



## Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variations of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen (with Horizontal Weld Seam) Made from API X65 Steel

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Tazimi M.<sup>1</sup> MSc,  
Hashemi S.H. \*<sup>1</sup> PhD,  
Rahnama S.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Tazimi M, Hashemi S.H, Rahnama S. Experimental Study of Fracture Surface Thickness Variations of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen (with Horizontal Weld Seam) Made from API X65 Steel. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(10):2583-2592.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.  
Postal code: 97175/615  
Phone: +98 (56) 32202142  
Fax: +98 (56) 32202142  
srahnama@birjand.ac.ir

#### Article History

Received: March 2, 2020  
Accepted: August 23, 2020  
ePublished: October 21, 2020

### ABSTRACT

In this study for the first time, changes in the thickness of the fracture cross-section of the inhomogeneous sample (with horizontal weld seam) of the API X65 steel, using drop weight tear test specimen have been investigated experimentally. The fracture surface of the test specimen consisted of three zones of base metal, heat affected zone and weld metal with different microstructure and mechanical properties. The most thickness reduction was in the cleavage fracture area of the notch root. In the base metal zone, thickness changes were constant which indicated the stable crack growth in this area. In both heat affected zones before and after the weld zone, the thickness changed with a constant slope. Due to the high hardness and low fracture energy of the weld zone, the lowest percentage of thickness changes was in this zone. Thickness in the weld zone increased with a constant slope due to the stretching of the weld zone to the end of the crack growth path by the force caused by the change of fracture mode from tensile to shear. Also in the reverse fracture zone, due to the increased in compressive strain caused by impact of the hammer on the sample, the thickness increases with a significant slope and reached the maximum value.

**Keywords** Drop Weight Tear Test; Fracture Cross Section Thickness; Inhomogeneous Specimen; API X65 Steel; Gas Transportation Pipelines

### CITATION LINKS

[1] Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels [2] Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high charpy energy [3] Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling [4] Effects of dynamic strain hardening exponent on abnormal cleavage fracture occurring during drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels [5] Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear test of API X80 pipeline steels [6] Use of the DWTT energy for predicting ductile fracture behavior in controlled-rolled steel line pipes [7] Experimental measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch in API X65 steel [8] Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test [9] Experimental investigation of CTOA in linepipe steels [10] On the relationship between shear index and energy in dynamic tear specimens [11] On the relationship between shear lip, shear index and energy in dynamic tear specimens [12] Effect of thickness on the relationship between shear lip and energy in dynamic tear specimens [13] Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels [14] Research on brittle fracture of X70/X80 line pipes with big wall thickness at low temperature [15] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel [16] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test [17] API specifications 5L, specifications for line pipe [18] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [19] Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel [20] API RP 5L3 recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe [21] Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneous drop weight tear test specimen made from API X65 steel [22] Elementary engineering fracture mechanics [23] Deformation and fracture mechanics of engineering materials

## بررسی تجربی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) در آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65

مصطفی تعظیمی MSc

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

سیدحجت هاشمی\* PhD

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

سعید رهنما PhD

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

### چکیده

در این پژوهش برای اولین بار تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65 به روش تجربی بررسی شده است. مقطع شکست نمونه آزمایش شامل سه ناحیه فلز پایه، متاثر از حرارت و جوش با ریزساختار و خواص مکانیکی متفاوت است. بیشترین کاهش ضخامت در ناحیه شکست تورفی ریشه شیار است. در ناحیه فلز پایه تغییرات ضخامت ثابت بوده که بیانگر رشد پایدار ترک در این ناحیه است. در هر دو ناحیه متاثر از حرارت قبل و بعد از ناحیه جوش، ضخامت با شیب ثابت تغییر می‌کند. به دلیل سختی بالا و انرژی شکست پایین ناحیه جوش، کمترین درصد تغییرات ضخامت در این ناحیه است. ضخامت در ناحیه جوش با شیب ثابت افزایش می‌یابد که علت آن کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر رشد ترک به وسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است. همچنین در ناحیه شکست معکوس، به دلیل افزایش کرنش فشاری ناشی از برخورد چکش با نمونه، ضخامت با شیب قابل توجهی افزایش یافته و به مقدار بیشینه می‌رسد.

**کلیدواژه‌ها:** آزمایش ضربه سقوطی، ضخامت مقطع شکست، نمونه نامتجانس، فولاد API X65، لوله‌های انتقال گاز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

\*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

### مقدمه

افزایش درخواست‌های اخیر در حوزه انرژی‌های پاک با آلاینده‌گی کمتر، به توسعه لوله‌های انتقال گاز طبیعی با ظرفیت انتقال بیشتر منجر شده است. استفاده از فولاد با استحکام و چقرمگی بیشتر در لوله‌های قطر و پرفشار باعث کاهش هزینه‌های انتقال می‌شود. به منظور بررسی چقرمگی شکست لوله‌های انتقال گاز طبیعی آزمایش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش ضربه سقوطی یک آزمایش استاندارد برای بررسی این مقاومت شکست در لوله‌های انتقال گاز طبیعی است. در این آزمایش به دلیل اینکه از ابعاد بزرگتری نسبت به آزمایش ضربه شارپی استفاده می‌شود نتایج شکست از دقت بیشتری برخوردار است. مقطع نمونه برخلاف آزمایش شارپی ضخامت کامل لوله است. همچنین به دلیل اینکه مسیر شکست دارای طول کافی است، در

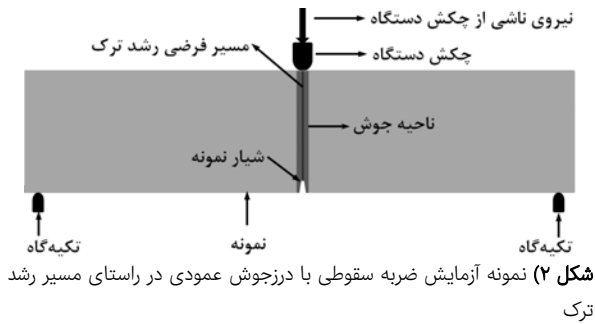
فرآیند شکست رشد پایدار ترک مشاهده می‌شود[1].

از مهم‌ترین ویژگی‌های آزمایش ضربه سقوطی بررسی سطح شکست و متغیرهای مختلف شکست در آن است که در سال‌های اخیر توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. در بررسی نواحی مختلف سطح شکست لوله‌های انتقال گاز طبیعی از دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی، آثار و علایم مختلفی از قبیل حفره‌های مخروطی، رخ‌برگ‌های تورفی، شورون‌ها (Chevron) و لایه‌لایه شدن به منظور تعیین نوع سطح شکست اعم از شکست نرم، ترد و در نهایت تعیین چقرمگی لوله توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [2-5]. همچنین متغیرهای مختلف شکست نمونه از قبیل دمای انتقال شکست نرم به ترد، زاویه بازشدگی دهانه ترک، فاصله بازشدگی دهانه ترک، انتگرال J، انرژی شکست و نیروی شکست نیز توسط محققین بررسی شده است [6-9].

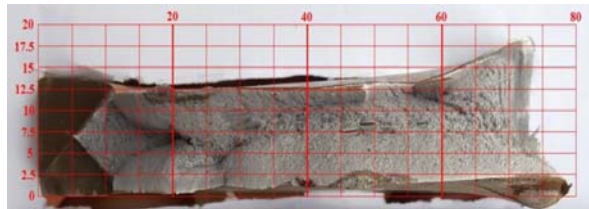
یکی از متغیرهای مهم در بررسی کیفیت فولادهای مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی، ضخامت نمونه آزمایش ضربه سقوطی می‌تواند باشد. به دلیل تفاوت ریزساختارها و همچنین خواص مکانیکی فولادهای مختلف از قبیل تنش تسلیم، تنش کششی، درصد تغییر طول، انرژی شکست و سختی، تغییرات ضخامت مقطع شکست در نمونه‌های مختلف، متفاوت است. استخراج سایر متغیرهای شکست آزمایش ضربه سقوطی با توجه به استفاده از دستگاه‌های تجهیز شده و نیروی انسانی متخصص گران است (به عنوان مثال در آزمایش ضربه سقوطی چکش مجهز به کرنش‌سنج یا شتاب‌سنج، کارت جمع‌آوری داده اسیلوسکوپ و رایانه لازم است و یا در آزمایش CTOA و یا CTOD به دوربین سرعت بالا نیاز است). این در حالی است که ضخامت مقطع نمونه یک پارامتر هندسی است که استخراج آن ساده و ارزان قیمت است، بنابراین می‌تواند به عنوان یک پارامتر مناسب شکست، در آزمایش ضربه سقوطی مورد استفاده قرار گیرد.

تحقیقات انجام شده بر روی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی بسیار محدود است. در تحقیقات انجام شده، رابطه بین اندازه لبه‌های برشی سطح شکست (به عنوان یک معیار هندسی) و انرژی شکست (به عنوان یک معیار برای بررسی چقرمگی شکست) در فولادهای کم‌آلیاژ پر استحکام و همچنین ناحیه جوش آنها در آزمایش شکست دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت [10-12]. مطابق شکل ۱ و نمودار ۱، این رابطه برای هر فولاد به صورت یک تابع چندجمله‌ای درجه سه به دست آمد که با افزایش اندازه لبه‌های برشی انرژی شکست نمونه و در نتیجه چقرمگی آن افزایش می‌یابد. آزمایش در دماهای مختلف با نمونه‌های انتخاب شده از راستای طولی (L-T) و عرضی (T-L) و از ناحیه فلز پایه، فلز جوش و ناحیه متاثر از حرارت انجام شده است [10-12].

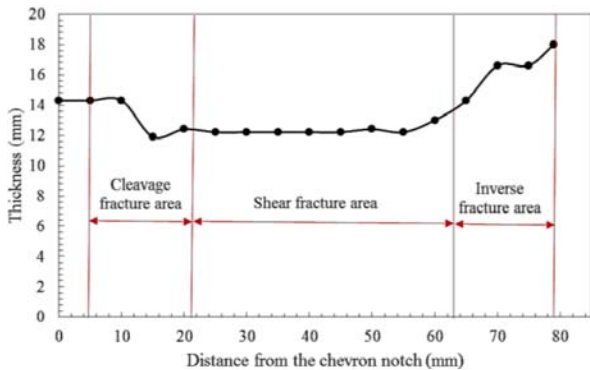
بررسی تجربی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) در ۲۵۸۵  
 ضخامت نمونه از انتهای ناحیه شکست برشی و با فاصله ۵۵ میلی‌متر از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده آغاز می‌شود. به‌گونه‌ای که در انتهای ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه با ضخامت نمونه اصلی برابر است. افزایش ضخامت با شیب قابل توجهی در ناحیه شکست معکوس (انتهای سطح شکست نمونه) ادامه می‌یابد. بیشترین ضخامت نمونه شکسته شده آزمایش ضربه سقوطی که در انتهای سطح شکست معکوس قرار دارد، برابر ۱۸ میلی‌متر است [15].



شکل ۲) نمونه آزمایش ضربه سقوطی با درزجوش عمودی در راستای مسیر رشد ترک

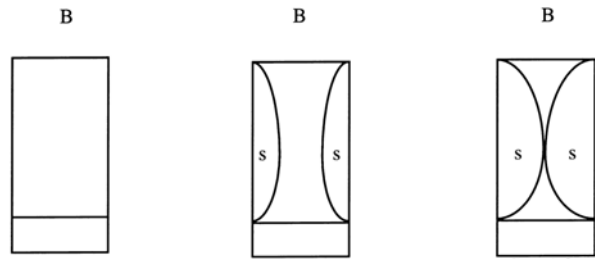


شکل ۳) تغییرات ضخامت سطح شکست نمونه به همراه ابعاد مربوطه برای نمونه با درزجوش عمودی (جهت رشد ترک از چپ به راست و ابعاد به میلی‌متر هستند) [15]

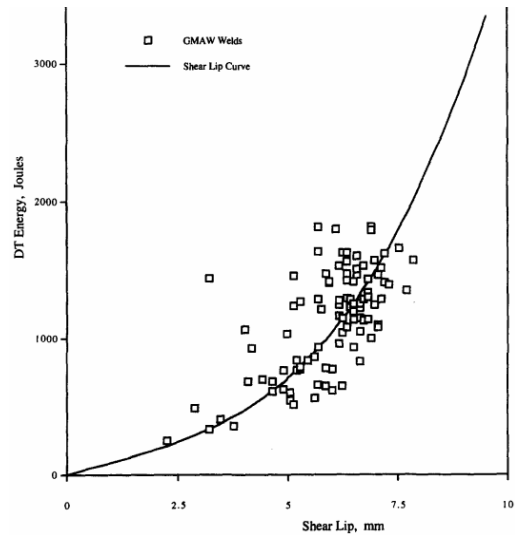


نمودار ۲) منحنی تغییرات ضخامت برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده برای نمونه با درزجوش عمودی [15]

در پژوهش دیگری تغییرات ضخامت سطح شکست نمونه فولاد پایه API X65 در آزمایش خمش سه‌نقطه مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش مسیر شکست شامل فقط فلز پایه است. شکل ۴ سطح شکست و نمودار ۳ منحنی تغییرات ضخامت آن را نشان می‌دهند. ضخامت نمونه در ابتدای آزمایش ۱۴/۳ میلی‌متر بوده است. شروع بارگذاری و گسترش ترک و همچنین تغییر حالت شکست از شکست تخت به برشی، تغییرات ضخامت را به همراه خواهد داشت. حداقل ضخامت برابر با ۶/۶ میلی‌متر و در فاصله



شکل ۱) لبه‌های برشی (s) در مقطع شکست نمونه‌های مختلف آزمایش شکست دینامیکی [11]

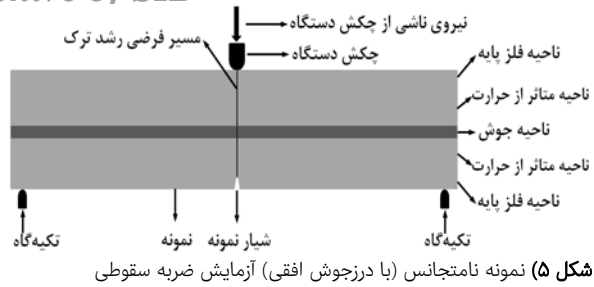


نمودار ۱) انرژی شکست به صورت تابعی از اندازه لبه‌های برشی [11]

تأثیر تغییرات ضخامت نمونه بر روی پارامترهای شکست آزمایش ضربه سقوطی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش ضخامت نمونه، درصد سطح شکست تورقی ریشه شیار، اندازه و طول سطوح لایه‌لایه به دلیل غالب شدن شرایط کرنش صفحه‌ای و همچنین درصد سطح شکست معکوس افزایش پیدا می‌کند. لبه‌های برشی در نمونه‌های با ضخامت کمتر عریض‌تر هستند [13]. با افزایش ضخامت نمونه درصد سطح برشی و در نتیجه چقرمگی شکست فولاد کاهش پیدا می‌کند [14].

مجیدی و هاشمی [15]، تغییرات ضخامت مقطع نمونه با درزجوش عمودی آزمایش ضربه سقوطی را بررسی کردند. نمونه مورد استفاده از راستای درزجوش لوله واقعی فولاد API X65 جدا شده، بنابراین مسیر فرضی رشد ترک در راستای درزجوش است که در شکل ۲ مشخص است. تغییرات ضخامت مقطع نمونه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

منحنی تغییرات ضخامت برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده در نمودار ۲ نشان داده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، ضخامت نمونه در ناحیه شکست تورقی (زیر شیار ماشین‌کاری شده) کاهش زیادی می‌یابد و از ۱۴/۳ میلی‌متر ضخامت اولیه نمونه و دیواره لوله فولادی به ۱۱/۹ میلی‌متر می‌رسد. کمترین ضخامت نمونه ۱۱/۹ میلی‌متر است که در ناحیه شکست تورقی قرار دارد. پس از آن در ناحیه شکست برشی ضخامت نمونه تقریباً دارای مقدار ثابت و برابر ۱۲/۲ میلی‌متر است. افزایش



شکل ۵) نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) آزمایش ضربه سقوطی

### مراحل تحقیق و انجام آزمایش

#### نحوه جوشکاری لوله‌ها با درزجوش مارپیچ

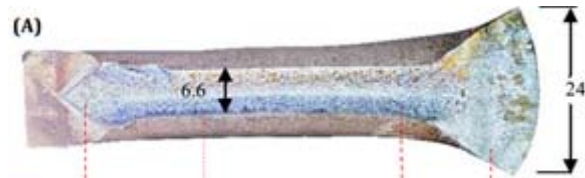
جوشکاری در لوله‌های فولاد API X65 به صورت روش جوش زیرپودری با حوضچه مذاب V شکل مطابق استاندارد API 5L است [17]. از روش جوش زیرپودری الکتروذوب شده و فلز پایه در زیر یک لایه گداز ذوب می‌شود. این لایه گداز از فلز مذاب در برابر آلاینده‌ها محافظت می‌کند و باعث می‌شود که حرارت در ناحیه اتصال (حوضچه مذاب) متمرکز شود. فلز گداز با جلوگیری از اکسید شدن فلز مذاب و محافظت از آن در برابر آلاینده‌ها به صورت لایه محافظ سطح فلز جوش را پوشش می‌دهد [18]. جوشکاری در هر پاس به وسیله دو مشعل انجام می‌شود. از چهار سیم جوش زیرپودری با درصد کربن کم و درصدهای مشخص مولیبدن، تیتانیوم، بور، مس و نیکل استفاده می‌شود. در شکل ۶ مشخصات هندسی لبه آماده شده قطعه، زاویه صحیح ابزار و ترتیب جوشکاری نشان داده شده است. پاس اولیه جوشکاری با جریان مستقیم DC انجام و سپس با جریان AC کامل می‌شود [18]. جزئیات روش جوشکاری و مشخصات سیم جوش در جدول ۱ آمده است.

#### مشخصات ماده نمونه

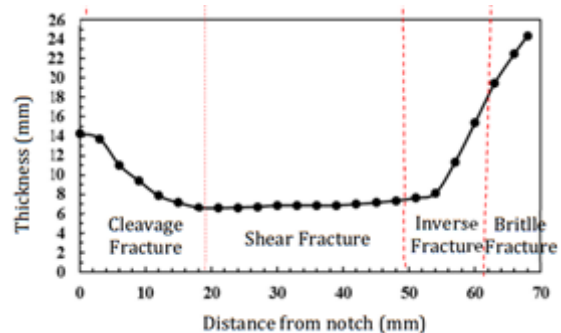
لوله استفاده شده با قطر خارجی ۱۲۱۹ و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر از جنس فولاد API X65 است که با جوشکاری مارپیچ تولید می‌شود. ضخامت درزجوش در قسمت داخلی لوله ۱۶ و در قسمت خارجی لوله ۲۰ میلی‌متر است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. به منظور دستیابی به استحکام و چقرمگی همزمان بالا، ورق مورد استفاده با فرآیند خنک‌کاری سریع و نورد کنترل شده ترمومکانیکال تولید می‌شود [18].

مقطع نمونه آزمایش شامل فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است. در شکل ۸ ریزساختار این نواحی نشان داده شده است [18]. ناحیه جوش درشت‌دانه با اندازه حدود ۲ تا ۴ میکرومتر است. ساختار این ناحیه فریت سوزنی بوده که در مرز بین دانه‌ها فریت پرویوتکتوئید (Proeutectoid Ferrite) و فریت ویدمنشتاتن (Widmanstätten Ferrite) دیده می‌شود (شکل‌های A و B). شکل‌های C و D به ترتیب ناحیه درشت‌دانه و ریزدانه متأثر از حرارت را نشان می‌دهد. این ناحیه از بینیت (Bainite)، فریت چندوجهی و فریت سوزنی تشکیل شده است. درشت‌دانه شدن ناحیه متأثر از حرارت نزدیک‌تر به ناحیه جوش، به دلیل تبلور مجدد ناشی از حرارت جوش است. شکل E

۲۱ میلی‌متری از نوک شیار اولیه ایجاد شده است. با ادامه رشد ترک و در فواصل ۲۲ تا ۶۳ میلی‌متر شکست نرم برشی اتفاق افتاده و ضخامت ثابت باقی می‌ماند. سطح شکست در این ناحیه نرم بوده و رشد ترک، پایدار است. همچنین حداکثر ضخامت برابر با ۲۴ میلی‌متر در ناحیه محل برخورد چکش و نمونه دیده می‌شود [16].



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ نوری از سطح کامل شکست نمونه آزمایشگاهی خمش سه نقطه‌ای با شیار ماشین‌کاری شده به عمق ۵/۱ میلی‌متر از جنس فولاد پایه API X65 [16]



نمودار ۳) منحنی تغییرات ضخامت نمونه برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری شده [16]

حرارت ناشی از جوشکاری هنگام تولید لوله‌های انتقال گاز باعث به وجود آمدن سه ناحیه مختلف روی لوله می‌شود که شامل ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است. به دلیل حرارت ناشی از جوشکاری، خواص مکانیکی و همچنین ریزساختار کریستالی در این سه ناحیه متفاوت است. به دلیل این تفاوت خواص در نواحی مختلف، ضخامت سطح شکست نیز متفاوت است.

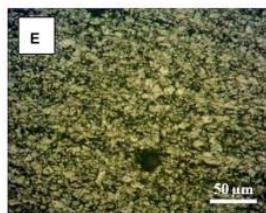
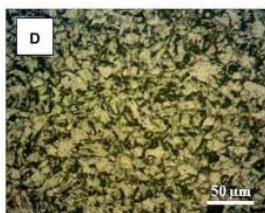
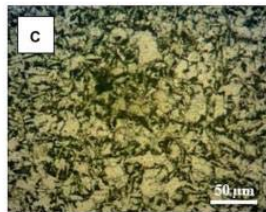
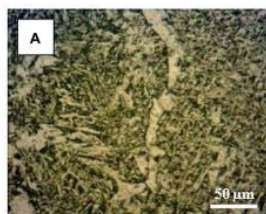
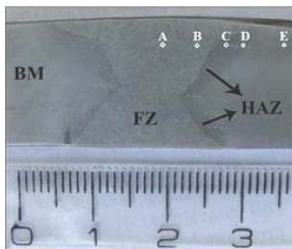
در تحقیقات پیشین نمونه استفاده شده فقط از فلز پایه و یا فقط از ناحیه جوش است. این در حالی است که لوله‌های انتقال گاز طبیعی با استفاده از روش جوشکاری مارپیچ تولید می‌شود، بنابراین احتمال رشد ترک در مسیری عمود بر مسیر جوش وجود دارد. در مسیر رشد ترک در راستای عمود بر مسیر جوش، مقطع شکست همزمان شامل سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است. در تحقیق حاضر برای نخستین بار در بررسی تغییرات ضخامت مقطع شکست آزمایش ضربه سقوطی، نمونه‌ای انتخاب شده است که حاوی درزجوش افقی بوده؛ بنابراین مسیر رشد ترک در راستای عمود بر مسیر جوش است و همزمان هر سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش در مقطع شکست نمونه وجود دارد (شکل ۵).



پارامتر		توضیحات	
اندازه لوله (mm)			
اندازه لوله	۱۳۱۹×۱۴/۳		
نوع پاس	داخلی	داخلی	خارجی
شماره سیم	یک	۲	یک
ماده مصرفی	S <sub>2</sub> Mo	S <sub>2</sub> Mo	S <sub>2</sub> Mo
قطر سیم (mm)	۳/۲	۳/۲	۴
نوع جریان	DC	AC	DC
جریان (A)	۷۰۰	۷۰۰	۸۰۰
ولتاژ (V)	۳۱	۳۳	۳۳
سرعت جوشکاری (m/min)	۱/۲	۱/۲	۱/۲



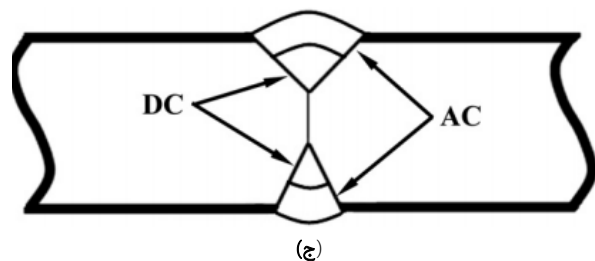
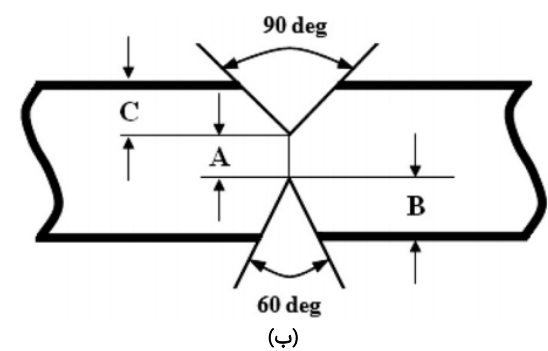
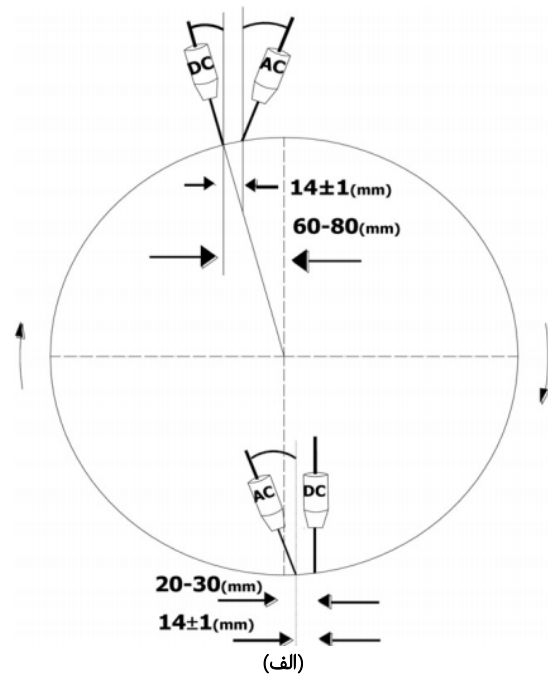
شکل ۷) لوله API X65 با درجوش مارپیچ و نمونه آزمایشگاهی جدا شده از آن



شکل ۸) ریزساختار ناحیه جوش، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه فلز پایه در لوله فولادی آزمایش شده [18]

ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد. این ناحیه از بافت یکنواخت ریزدانه فریت سوزنی- بینیت تشکیل شده است.

فریت سوزنی ساختار مناسب جهت افزایش چقرمگی فولاد API است. طبیعت درهم قفل‌شونده فریت سوزنی با اندازه دانه‌بندی کوچک آن، بیشترین مقاومت در برابر رشد ترک تورفی را دارد [18]. خواص مکانیکی این نواحی شامل، استحکام تسلیم، استحکام کششی، نسبت استحکام تسلیم به کششی، درصد تغییر طول، انرژی ضربه شاری و سختی در نواحی مختلف در جدول ۲ آورده شده است [18, 19].



شکل ۹) نحوه جوشکاری درجوش مارپیچ لوله؛ (الف) زاویه جوشکاری جوش متناوب و مستقیم، (ب) آماده‌سازی لبه، (ج) ترتیب جوشکاری [18]

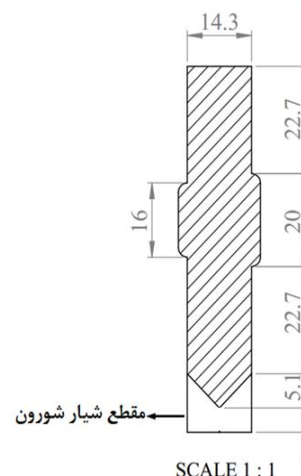
پارامتر	فلز پایه (حداقل، حداکثر، میانگین)	ناحیه متأثر از حرارت (حداقل، حداکثر، میانگین)	ناحیه جوش (حداقل، حداکثر، میانگین)
تنش تسلیم (MPa)	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۵۹۸، ۴۴۸	-	-
تنش کششی (MPa)	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۷۵۸، ۵۳۱	-	-
تنش تسلیم/تنش کششی	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۰/۹۳	-	۰/۷۷، ۰/۸۹، ۰/۸۶
درصد تغییر طول	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۲۴	-	-
انرژی شارپی (J)	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۲۶۴	۱۹۰	۱۶۰
سختی (ویکرز)	استاندارد API اندازه‌گیری شده ۳۵۰	۲۱۳، ۲۱۵، ۲۱۴	۲۳۰، ۲۳۹، ۲۳۵

### آماده‌سازی نمونه

ابعاد نمونه آزمایش ضربه سقوطی با مشخصات هندسی طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۳۰۵، ۷۶/۲ و ۱۴/۳ میلی‌متر مطابق استاندارد API 5L است [20]. پس از جداکردن نمونه از راستای درزجوش لوله به کمک دستگاه سنگ‌فرز دستی با حاشیه یک سانتی‌متر، به وسیله پرس انحنای آن گرفته شده و با استفاده از دستگاه برش با آب تا ابعاد استاندارد ماشین‌کاری شده است. برش در دستگاه برش با آب به دلیل آنکه سرد است، ساختار کریستالی فولاد را تغییر نمی‌دهد. سپس مطابق شکل ۹، با استفاده از دستگاه تخلیه الکتریکی، شیار شورون به عمق ۵/۱ میلی‌متر در وسط نمونه ایجاد شده است. طبق استاندارد به دلیل اینکه نسبت قطر به ضخامت بیشتر از ۴۰ است، پرس انحنای نمونه تأثیر قابل توجهی در نتایج ندارد.

### روش انجام آزمایش

آزمایش به وسیله دستگاه ضربه سقوطی ساخته شده در دانشگاه بیرجند مطابق شکل ۱۰، با ظرفیت ۳۰۰۰۰ ژول و طبق استاندارد API 5L انجام شد [20]. مرکز شیار نمونه باید منطبق بر مرکز چکش باشد، به همین منظور نمونه به کمک سنج مخصوص در وسط گیره دستگاه قرار گرفته و پیچ‌های آن به کمک گشتاورسنج بسته می‌شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. چکش دستگاه به وزن ۷۰۰ کیلوگرم از ارتفاع ۲ متری (فاصله لبه پایین چکش با لبه بالای نمونه) رها شده و سرعت آن در لحظه برخورد ۶/۲۶ متر بر ثانیه است که انرژی لازم برای شکست نمونه در یک مرحله را دارد. در محاسبه سرعت لحظه برخورد، از اصطکاک مجموعه نگه‌دارنده چکش در ریل دستگاه صرف نظر شده و سرعت به صورت تئوری از رابطه سقوط آزاد محاسبه شده است. بعد از انجام آزمایش و شکستن نمونه، برای اندازه‌گیری ضخامت مقطع شکست، عکس دیجیتال مقطع به نرم‌افزار سالیدورکس منتقل شده و در ۳۴ نقطه و با فاصله ۲/۵ میلی‌متر و با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری انجام شده است.

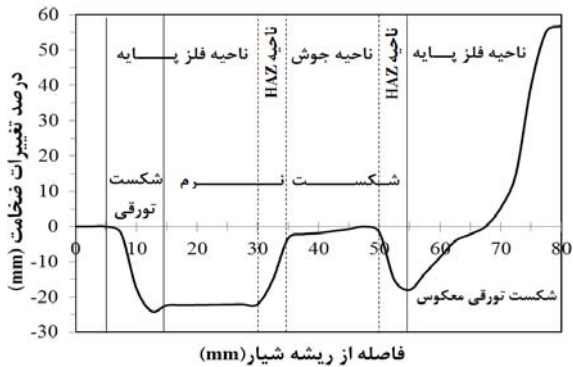


(ب)

(الف)

شکل ۱۰) دستگاه آزمایش ضربه سقوطی با ظرفیت ۳۰۰۰۰ ژول؛ الف) نمایی از دستگاه، ب) اسپلوسکوپ و کارت جمع‌آوری داده‌ها

شکل ۹) الف) شیار شورون به عمق ۵/۱ میلی‌متر در وسط نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی، ب) مقطع شیار شورون (ابعاد به میلی‌متر است)

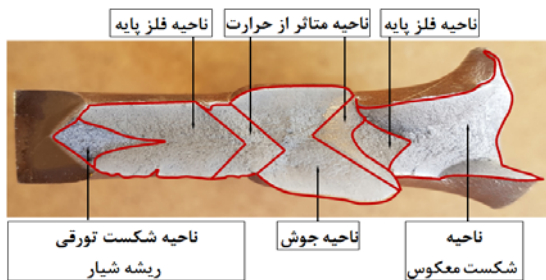


نمودار ۵) منحنی درصد تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین کاری شده

جدول ۳) مشخصات نقاط مهم اندازه گیری شده ضخامت سطح شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین کاری شده

پارامتر	مقدار	نسبت به اندازه اولیه	فاصله از ابتدای شیار (mm)	نوع شکست
نقاط اندازه گیری شده	۳۴	-	-	-
بیشترین ضخامت (mm)	۲۲/۴	+۵۶/۸	۸۰	شکست تورقی
ناحیه جوش متاثر از حرارت	۱۷/۹	-۰/۸	۴۵	شکست نرم
کمترین ضخامت (mm)	۱۰/۹	-۲۴/۱	۱۲/۵	شکست تورقی
ناحیه جوش متاثر از حرارت	۱۴/۳	-۳/۴	۳۵	شکست نرم
ناحیه جوش متاثر از حرارت	۱۱/۲	-۲۲	۳۰	شکست نرم

ابتدای سطح شکست با طول ۱۴/۷۱ میلی متر به صورت شکست تورقی است (شکل ۱۳). ضخامت در این ناحیه به دلیل کششی بودن بارگذاری [21] و تنش صفحه ای [22] بیشترین کاهش را نشان داده و به ۱۰/۹ میلی متر (۲۴/۱٪ کاهش) می رسد.



شکل ۱۳) نواحی مختلف سطح شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) جهت رشد ترک از چپ به راست است

بعد از ناحیه شکست تورقی، شکست وارد ناحیه فلز پایه شده و سطح شکست به شکست نرم برشی با زاویه ۴۵ درجه تغییر می کند (شکل ۱۳) [21]. ناحیه پلاستیک نوک ترک با عمق لبه های برشی رابطه مستقیم دارد.

$$D \approx r_y \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right) \quad (1)$$



شکل ۱۱) بستن نمونه آزمایش در گیره دستگاه با کمک گشتاورسنج

## نتایج

### بررسی تغییر ضخامت نمونه

همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود ضخامت نمونه هنگام شکستن، به دلیل تغییرات بارگذاری و چقرمگی متفاوت نواحی مختلف سطح شکست تغییر می کند. از آنجا که شیار در پایین نمونه قرار دارد و ضربه چکش از بالا وارد می شود، نیروی غالب در نزدیکی محل شیار به صورت کششی است ولی در ناحیه محل برخورد چکش کرنش های فشاری وجود دارد [21]. تغییرات ضخامت و درصد تغییرات ضخامت مقطع شکست برحسب فاصله از ابتدای شیار به ترتیب در نمودارهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. همچنین مشخصات نقاط مهم اندازه گیری شده ضخامت نمونه، برای سه ناحیه فلز پایه، ناحیه جوش و ناحیه متاثر از حرارت در جدول ۳ ارائه شده است.

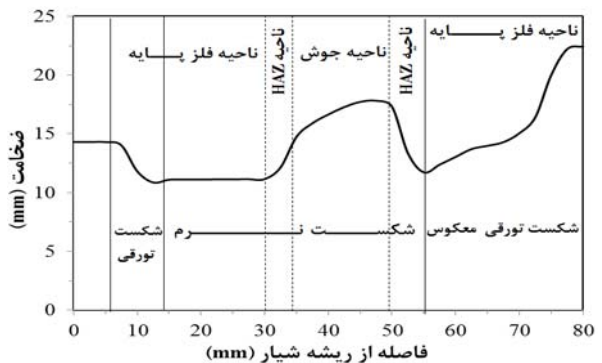


(الف)



(ب)

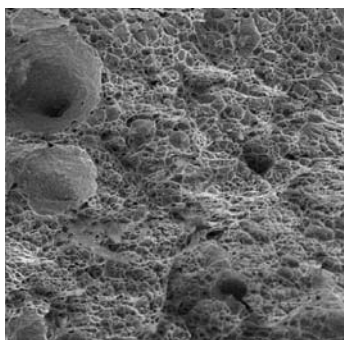
شکل ۱۲) (الف) مقطع نمونه قبل از شکست، (ب) عکس برداری با میکروسکوپ نوری از تغییرات ضخامت نمونه بعد از شکست (جهت رشد ترک از چپ به راست است)



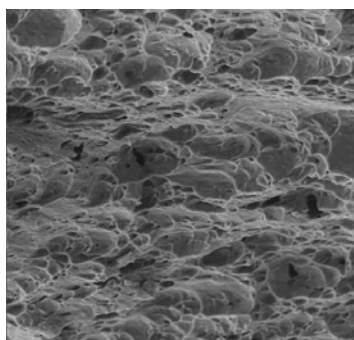
نمودار ۴) منحنی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس آزمایش ضربه سقوطی (با درزجوش افقی) برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین کاری شده



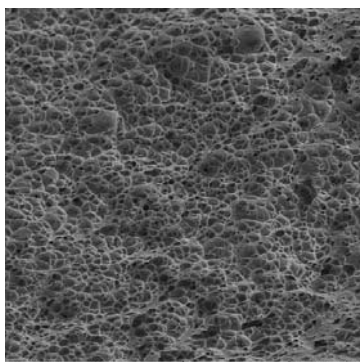
چقرمگی در این ناحیه کمتر و سختی بیشتر است تغییرات ضخامت آن نسبت به نواحی فلز پایه و متاثر از حرارت کمتر است. بررسی میکروسکوپی حفره‌های مخروطی سطح شکست نیز نشان می‌دهد که همه آنها هم‌اندازه و متحدالمرکز است در حالی که این حفره‌ها در ناحیه فلز پایه کشیده بوده که بیانگر تمایل به تغییر شکل بیشتر در این ناحیه است که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با تنظیم بهینه پارامترهای جوشکاری موثر در تولید لوله‌های API نظیر نوع و قطر الکترودها، تعداد پاس‌ها، نوع جریان، شدت جریان، ولتاژ جوشکاری، سرعت جوشکاری، نوع و نرخ جریان گاز پوشش‌دهنده، پیش‌گرم و پس‌گرم صفحه می‌توان باعث افزایش کیفیت چقرمگی ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش شد [17].



(الف)



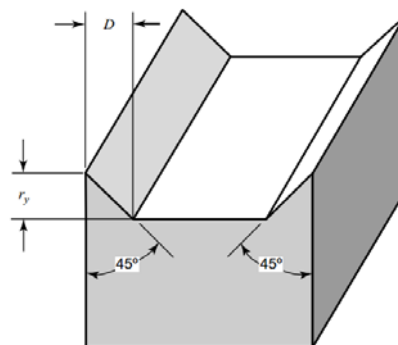
(ب)



(ج)

**شکل ۱۵** مقایسه میکروسکوپی سطح شکست نواحی مختلف نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی): (الف) ناحیه فلز پایه با حفره‌های مخروطی کشیده با اندازه‌های مختلف، (ب) ناحیه متاثر از حرارت با حفره‌های مخروطی کشیده و هم‌اندازه، (ج) ناحیه جوش با حفره‌های مخروطی هم‌اندازه

که در رابطه ۱،  $D$  عمق لبه برشی،  $r_y$  شعاع ناحیه پلاستیک،  $K$  ضریب شدت تنش و  $\sigma_{ys}$  تنش تسلیم ماده است (شکل ۱۴). همچنین با افزایش شعاع ناحیه پلاستیک چقرمگی ماده افزایش می‌یابد [23]. در ناحیه فلز پایه کل سطح شکست به‌صورت لبه برشی با زاویه ۵ درجه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این ناحیه چقرمگی بیشتر از بقیه قسمت‌های ماده است. بنابراین تغییر ضخامت در این ناحیه نسبت به ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش بیشتر است. در این ناحیه با طول ۱۶ (از فاصله ۱۴ تا ۳۰ میلی‌متر بر روی نمودار ۴ برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری‌شده)، ضخامت به ۱/۱ میلی‌متر رسیده که ۲۲٪ کاهش را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات ضخامت در این ناحیه ثابت بوده که بیانگر رشد پایدار ترک است. رشد پایدار ترک ناحیه‌ای از فرآیند شکست تعریف می‌شود که مقاومت شکست نرم مستقل از اندازه رشد ترک باشد؛ به‌عنوان مثال متغیرهای شکست مانند CTOA، CTOD یا تغییرات نیروی شکست در این ناحیه ثابت باشد [9].



**شکل ۱۴** شماتیک رابطه بین عمق لبه‌های برشی و اندازه ناحیه پلاستیک ناشی از تنش صفحه‌ای [23]

از فاصله ۳۰ تا ۳۵ و ۵۰ تا ۵۵ میلی‌متر برحسب فاصله از ابتدای شیار ماشین‌کاری‌شده، نواحی متاثر از حرارت است. به‌دلیل شیب تغییرات دمایی ناشی از جوشکاری، ریزساختار و خواص مکانیکی در این ناحیه نسبت به ناحیه فلز پایه و جوش متفاوت است. سختی در این ناحیه از ناحیه فلز پایه و جوش کمتر است. در صورتی که انرژی ضربه شاری از ناحیه جوش بیشتر بوده ولی از ناحیه فلز پایه کمتر است (جدول ۲). ضخامت در ناحیه متاثر از حرارت قبل از ناحیه جوش نسبت به ناحیه فلز پایه با شیب ثابت افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت در ناحیه متاثر از حرارت بعد از ناحیه جوش کاهش یافته و به ۱/۷ میلی‌متر می‌رسد که اختلاف بسیار ناچیزی با ناحیه فلز پایه ابتدایی دارد.

از فاصله ۳۵ تا ۵۰ میلی‌متر از ابتدای شیار ماشین‌کاری‌شده ناحیه جوش است. انرژی ضربه شاری در این ناحیه کمترین مقدار را دارد در حالی که بیشترین سختی سطح شکست در این ناحیه واقع شده است (جدول ۲). بنابراین تمایل به تغییر شکل در این ناحیه نسبت به بقیه نواحی کمتر است. به‌عبارت دیگر چون



### جمع‌بندی

آزمایش ضربه سقوطی روی نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) از لوله فولادی با جنس API X65 انجام گرفت. با بررسی ضخامت مقطع شکست نتایج زیر حاصل شد:

۱- ضخامت نمونه هنگام شکستن تغییر می‌کند. در محدوده شکست نرم نمونه، در ناحیه فلز پایه بیشترین تغییرات ضخامت و در ناحیه جوش کمترین تغییرات ضخامت اتفاق می‌افتد.

۲- در ادامه مسیر رشد ترک و در ناحیه فلز پایه تغییرات ضخامت تقریباً ثابت و برابر با مقدار ۱۱/۸ میلی‌متر (۲۲٪ کاهش) است. ضخامت ثابت در این ناحیه بیانگر رشد پایدار ترک است.

۳- در ناحیه متأثر از حرارت قبل و بعد از ناحیه جوش، به دلیل شیب حرارتی ناشی از جوشکاری تغییرات ضخامت با شیب ثابت به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

۴- در ناحیه جوش به دلیل سختی بالا و چقرمگی پایین‌تر نسبت به ناحیه فلز پایه و متأثر از حرارت تمایل به تغییر ضخامت بسیار کمتر است. کمترین درصد تغییرات ضخامت در این ناحیه اتفاق می‌افتد.

۵- شکل و اندازه حفره‌های مخروطی هر سه ناحیه کاملاً متناسب با تغییرات ضخامت در این نواحی است. در ناحیه فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت حفره‌ها دارای کشیدگی است در حالی که در ناحیه جوش حفره‌ها متحدالمرکز بوده که بیانگر تمایل کمتر این ناحیه به تغییر شکل است. به دلیل حرارت ناشی از جوشکاری اندازه حفره‌های مخروطی ناحیه فلز پایه و متأثر از حرارت متفاوت است.

۶- علت تغییرات جزئی ضخامت در ناحیه جوش (شیب نمودار در این ناحیه) کشیدگی این ناحیه به سمت انتهای مسیر رشد ترک به وسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است.

۷- کمترین و بیشترین مقدار ضخامت به ترتیب ۱۰/۹ میلی‌متر (۱٪/۲۴ کاهش) در ناحیه شکست تورقی ریشه شیار و ۲۲/۴ میلی‌متر (۸/۵۶٪ افزایش) در ناحیه شکست معکوس (محل برخورد چکش) است. در واقع تغییرات ناگهانی ضخامت از دلایل تشکیل سطوح تورقی است.

۸- با توجه به تغییرات ضخامت در نواحی مختلف نمونه نامتجانس و ثابت بودن ضخامت در ناحیه رشد پایدار ترک، به نظر می‌رسد که می‌توان ضخامت مقطع نمونه آزمایش ضربه سقوطی را به عنوان یک پارامتر ساده و ارزان و البته مهم در بررسی چقرمگی شکست فولادهای لوله‌های انتقال گاز مورد بررسی قرار داد.

۹- ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی ناحیه جوش با بقیه نواحی (فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت) در جدول ۲ مقایسه شده است. همچنین با بررسی تغییرات ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس مشخص شد که تغییرات ضخامت در ناحیه جوش نسبت به بقیه نواحی (فلز پایه و ناحیه متأثر از حرارت) کمتر است. همچنین مقایسه تغییرات ضخامت نمونه نامتجانس با

علت تغییرات جزئی ضخامت در این ناحیه کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر رشد ترک به وسیله نیروی ناشی از تغییر مود شکست از کششی به برشی است که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. کمترین درصد تغییرات ضخامت در ناحیه جوش است.

در ۲۸/۷ میلی‌متر انتهای سطح شکست ناحیه شکست معکوس تورقی وجود دارد. به دلیل کرنش فشاری در این ناحیه ضخامت با شیب قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند و به مقدار بیشینه ۲۲/۴ میلی‌متر در انتهای سطح می‌رسد که نشان‌دهنده ۸/۵۶٪ افزایش ضخامت است. بیشترین تغییرات ضخامت در نواحی شکست تورقی ابتدا و انتها بوده که این تغییرات ضخامت از دلایل تشکیل شکست تورقی است.

مقایسه نتایج ضخامت مقطع نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) و نمونه با درزجوش عمودی از فولاد API X65 در جدول ۴ آورده شده است. در نمونه با درزجوش عمودی مسیر شکست ناحیه جوش است که در ادامه مسیر رشد ترک و در ناحیه محل برخورد چکش، وارد ناحیه فلز پایه می‌شود<sup>[15]</sup>. تغییرات ضخامت در هر سه ناحیه شکست تورقی ریشه شیار و ناحیه فلز پایه و شکست معکوس در نمونه نامتجانس بیشتر از نمونه با درزجوش عمودی است که علت آن سختی کمتر فلز پایه نسبت به ناحیه جوش، انرژی شکست بیشتر ناحیه فلز پایه (جدول ۲) و تمایل بیشتر آن به تغییر شکل است.



شکل ۱۶ کشیدگی ناحیه جوش به سمت انتهای مسیر شکست

جدول ۴) مقایسه ضخامت مقطع شکست نمونه نامتجانس (با درزجوش افقی) و نمونه با درزجوش عمودی فولاد API X65 (اعداد به میلی‌متر هستند)

پارامتر	پژوهش حاضر	مجیدی و هاشمی <sup>[15]</sup>	درصد اختلاف
ضخامت شیار	۱۰/۹	۱۱/۹	-۹/۲
تورقی ریشه شیار	۱۱/۱	۱۲/۲	-۹/۹
ضخامت شکست نرم ناحیه فلز پایه	۲۲/۴	۱۸	۱۹/۶
ضخامت ناحیه شکست معکوس			

- 7- Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH. Experimental measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch in API X65 steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(5):1145-1156. [Persian]
- 8- Majidi-Jirandehi AA, Hashemi SH. Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test. *Materials Research Express*. 2018;Unknown Volume(Issue) & First & Last Pages.
- 9- 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.
- 10- Matthews JR. On the relationship between shear index and energy in dynamic tear specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 1991;39(1):131-140.
- 11- Matthews JR. On the relationship between shear lip, shear index and energy in dynamic tear specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 1996;54(1):11-23.
- 12- Matthews JR, Hyatt CV, Porter JF, Karisallen KJ. Effect of thickness on the relationship between shear lip and energy in dynamic tear specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. 1998;60(5-6):529-542.
- 13- Hong S, Shin SY, Lee S, Kim NJ. Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2011;42:2619-2632.
- 14- Wang HT, Li SL, Luo YL, Wang JQ, Zhang HB, Lin N. Research on brittle fracture of X70/X80 line pipes with big wall thickness at low temperature. *Key Engineering Materials*. 2019;795:3-8.
- 15- Majidi AA, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(11):219-228.
- 16- 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.
- 17- American petroleum institute. API specifications 5L, specifications for line pipe [Internet]. Washington: American Petroleum Institute; 2013 Unknown Cited & Link.
- 18- 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.
- 19- Hashemi SH. Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(3):1648-1655.
- 20- American petroleum institute. API RP 5L3 recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe [Internet]. Washington: American Petroleum Institute; 1996 Unknown Cited. Available from: <https://standards.globalspec.com/std/9859141/api-rp-5l3>
- 21- Tazimi M, Hashemi SH. Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneous drop weight tear test specimen made from API X65 steel. *Journal of Solids and Fluids Mechanics*. 2020;10(1):77-91. [Persian]
- 22- Broek D. *Elementary engineering fracture mechanics*. Berlin: Springer Science & Business Media; 1982.
- 23- Hertzberg RW, Vinci RP, Hertzberg JL. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: Wiley; 2012.

نمونه با درزجوش عمودی و فلز پایه نشان می دهد که کمترین ضخامت در نمونه نامتجانس از فلز پایه بیشتر و از نمونه با درزجوش عمودی کمتر است. می توان ارتباط معناداری بین ریزساختار و خواص مکانیکی با تغییرات ضخامت پیدا کرد. به عبارتی دیگر می توان گفت در نمونه های با انرژی شکست بیشتر، تغییرات ضخامت مقطع شکست بیشتر است (و برعکس). بنابراین می توان از ضخامت به عنوان یک پارامتر در بررسی مقاومت شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی استفاده کرد.

۱۰- کمترین ضخامت در نمونه نامتجانس ۱۰/۹، در نمونه با درزجوش عمودی ۱۱/۹<sup>[15]</sup> و در نمونه فقط فلز پایه ۶/۶ میلی متر<sup>[16]</sup> است.

**تشکر و قدردانی:** از شرکت لوله و تجهیزات سدید به دلیل در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65 و از آقای مهندس صادقی (کارگاه مکانیک دانشگاه بیرجند) که در تهیه نمونه و انجام آزمایش همکاری نموده اند، تشکر و قدردانی می شود.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**سهم نویسندگان:** مصطفی تعظیمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪); سیدحجت هاشمی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪); سعید رهنما (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰٪).

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

## منابع

- 1- ASTM E436-03. Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2014 Unknown Cited. Available from: <https://www.astm.org/Standards/E436.htm>
- 2- Amano T, Fujishiro T, Shinohara Y, Inoue Y. Evaluation of pre-strain effect on abnormal fracture occurrence in drop-weight tear test for linepipe steel with high charpy energy. *Procedia Structural Integrity*. 2016;2:422-429.
- 3- Zhao J, Hu W, Wang X, Kang J, Yuan G, Di H, et al. Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. *Material Science and Engineering: A*. 2016;666:214-224.
- 4- Kang M, Kim H, Lee S, Shin SY. Effects of dynamic strain hardening exponent on abnormal cleavage fracture occurring during drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;45:682-697.
- 5- Sung HK, Sohn SS, Shin SY, Lee S, Kim NJ, Chon SH, et al. Effects of finish rolling temperature on inverse fracture occurring during drop weight tear test of API X80 pipeline steels. *Material Science and Engineering: A*. 2012;541:181-189.
- 6- Wilkowski GM, Maxey WA, Eiber RJ. Use of the DWTT energy for predicting ductile fracture behavior in controlled-rolled steel line pipes. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1980;19(1):59-77.