



Experimental Investigation of Anisotropy in API X65 Steel Pipe Using Charpy Fracture Energy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shojaeddin M¹,
Hashemi SH^{1*},
Majidi-Jirandehi AA².

How to cite this article

Shojaeddin M, Hashemi SH, Majidi-Jirandehi AA. Experimental Investigation of Anisotropy in API X65 Steel Pipe Using Charpy Fracture Energy. Modares Mechanical Engineering, 2022; 22 (06):407-417.

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

² Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
POBox: 19395-3697
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: January 15, 2022
Accepted: March 04, 2022
ePublished: May 07, 2022

ABSTRACT

To use higher capacities in Iran's energy transmission systems, API standardized pipes made of API X65 steel have been utilized (made of the thermo-mechanically controlled rolling process, TMCR steels). The TMCR inherently increases the anisotropic properties of steel coils and plates used for pipe manufacturing. In addition, the production of helically welded pipe involves steps that can lead to different mechanical properties in different directions. The present study aims to measure the orientation dependence of the Charpy fracture energy. Therefore, the effect of changing the angle of specimens relative to the rolling direction and also the effect of changing the notch orientation (three notch A, B, and C in total) on the fracture energy in API X65 steel has been experimentally determined. The maximum change in the average Charpy fracture energy at different angles relative to the rolling direction is a maximum of 13% (in notch B), but the largest change in the average Charpy fracture energy between different notches is a maximum of 12.2% (at an angle of 0°). As a result, the effect of changing the angle of the specimen relative to the rolling direction is greater than the effect of changing the notch orientation on the Charpy fracture energy. Also, at an angle of 67.5 degrees to the rolling direction (equivalent to the diagonal direction (D-D)), the most fracture energy for all notches was obtained. To quantitatively compare the fracture energy changes in different notches, an index called the anisotropy index has been presented.

Keywords Charpy Impact test, Anisotropy, Fracture Energy, Gas Transportation Pipeline, API X65 Steel

CITATION LINKS

[1] API Specifications. [2] Fracture propagation control for gas pipelines—past, present and future. [3] Effects of Mo, Cr, and V additions on tensile and Charpy impact properties of API X80 pipeline steels. [4] Experimental-numerical study on the feasibility of spirally welded pipes in a strain-based design context. [5] Effect of thermomechanical processing parameters on yield strength anisotropy in a niobium microalloyed steel [6] Crystallographically Controlled Mechanical Anisotropy of Pipeline Steel. [7] Anisotropy of Mechanical Properties of API-X70 Spiral Welded Pipe Steels. [8] Numerical analysis of factors influencing Charpy impact properties of TMCR structural steels using fuzzy modelling. [9] Study of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel [10] Historical background and development of the Charpy test. [11] Effects of toughness anisotropy and combined tension, torsion, and bending loads on fracture behavior of ferritic nuclear pipe. [12] Microstructure-Texture Related Toughness Anisotropy of API-X80 Pipeline Steel. [13] Role of delamination and crystallography on anisotropy of Charpy toughness in API-X80 steel. [14] Texture dependent mechanical anisotropy of X80 pipeline steel. [15] High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn (V-Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology. [16] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. [17] Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. [18] Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels. [19] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [20] Materials science and engineering: an introduction.

بررسی تجربی ناهمسانگردی در لوله فولادی یکس شصت و پنج با استفاده از انرژی شکست شاریبی

مجتبی شجاع‌الدین

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند، بیرجند

سیدحجت هاشمی *

گروه پژوهشی مطالعات لوله و صنایع وابسته دانشگاه بیرجند، بیرجند

علی اکبر مجیدی جیرندهی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران

چکیده

به منظور استفاده از ظرفیت‌های بالاتر در سامانه‌های انتقال انرژی ایران، لوله‌های استاندارد شده API از جنس فولاد API X65 مورد توجه قرار گرفته است. جهت دستیابی به سطوح استحکام مورد نیاز، استفاده از فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکی اجتناب‌ناپذیر است. این فرآیند ذاتاً خواص مواد ناهمسانگرد را در ورق لوله فولادی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تولید لوله جوشکاری شده مارپیچ شامل مراحل است که می‌تواند منجر به ایجاد خواص مکانیکی متفاوتی در جهت مختلف شود. هدف تحقیق حاضر این است که وابستگی به جهت انرژی شکست شاریبی، اندازه‌گیری شود. از این رو، اثر تغییر زاویه نمونه استخراجی نسبت به جهت نورد و همچنین اثر تغییر جهت شیار نمونه شاریبی (در کل سه جهت شیار A، B و C) بر انرژی شکست فولاد API X65 به صورت تجربی بررسی شده است. بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاریبی در زوایای مختلف نسبت به جهت نورد، حداکثر ۱۳ درصد است (در جهت شیار B) ولی بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاریبی بین جهت‌های شیار مختلف، حداکثر ۱۲/۲ درصد است (در زاویه صفر درجه). در نتیجه اثر تغییر زاویه نمونه استخراجی نسبت به جهت نورد بر روی انرژی شکست شاریبی، بیشتر از اثر تغییر جهت شیار نمونه است. همچنین، در زاویه ۶۷/۵ درجه نسبت به جهت نورد (معادل با جهت قطری لوله)، بیشترین انرژی شکست برای تمامی جهت شیار حاصل شد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در جهت قطری لوله، احتمال ایجاد و رشد ترک تحت بار ضربه‌ای کمتر باشد. به منظور مقایسه کتی تغییرات انرژی شکست در جهت شیار متفاوت، برای نخستین بار شاخصی با عنوان شاخص ناهمسانگردی تعریف و ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: آزمایش ضربه شاریبی، ناهمسانگردی انرژی شکست، لوله انتقال گاز، انرژی شکست، فولاد ای‌پی‌ای ایکس ۶۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

* نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد لوله‌های فولادی به دلیل مقرون به صرفه بودن در مقایسه با سایر روش‌ها در صنعت انتقال انرژی (نفت و گاز) افزایش یافته است. طی یک قرن گذشته صنعت گاز به منظور استفاده از ظرفیت‌های بالاتر در انتقال گازها از سامانه‌های انتقال پرفشار با کارایی بیشتر استفاده کرده است. لازمه این کار استفاده از خطوط لوله‌های فولادی با قطر خارجی بزرگ‌تر و دیواره نازک‌تر

برای حداقل کردن هزینه و وزن در هر متر از خط لوله می‌باشد. در این میان لوله‌های استاندارد شده توسط موسسه بین المللی نفت آمریکا (American Petroleum Institute (API)، از جنس فولاد API X65 با تنش تسلیمی در حدود ۴۴۸ مگاپاسکال و فولاد API X70 با تنش تسلیمی در حدود ۴۸۵ مگاپاسکال^[1] در سامانه‌های انتقال انرژی ایران، مورد توجه قرار گرفته است. این فولادها دارای مزایای متعددی از قبیل استحکام بالا به همراه چقرمگی مناسب و دمایی انتقال شکست نرم به ترد (Ductile to Brittle Transition) (Temperature (DBTT)، پایین هستند^[2]. در فولادهای خط لوله، دمای انتقال باید به اندازه کافی، کم باشد تا از شکست ترد ناگهانی، جلوگیری شود هم‌چنین انرژی جذب شده حین شکست (انرژی شکست (Fracture energy))، باید به اندازه کافی، بالا باشد تا از انتشار شکست نرم ناپایدار، جلوگیری گردد^[3].

جهت دستیابی به سطوح استحکام مورد نیاز برای فولادهای خط لوله با درجه کیفیت بالا، فولاد معمولاً توسط فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکی (Thermo-mechanical Controlled Process (TMCP)) تولید می‌شود^[4]. فرآیند نورد کنترل شده ترمومکانیکی به طور ذاتی خواص مواد ناهمسانگرد (Anisotropy) را در ورق لوله فولادی (Steel Skelp) ایجاد می‌کند. بنابراین خواص مکانیکی آن، بستگی به جهت بارگذاری نسبت به جهت نورد دارد. این رفتار ناهمسانگرد در استحکام، انرژی شکست و انعطاف پذیری دیده می‌شود^[5]. علاوه بر این، از آنجا که لوله‌های جوشکاری شده مارپیچ (Spiral) با شروع از مواد خام نامتجانس (Heterogeneous) به صورت سرد شکل می‌گیرند و فرآیند شکل‌دهی، جهت نورد را برحسب زاویه شکل‌گیری، تغییر می‌دهد، بنابراین لوله تولید شده به طور ذاتی خواص ناهمسانگردی دارد. در نتیجه، تولید لوله جوشکاری شده مارپیچ، می‌تواند منجر به ایجاد خواص مکانیکی متفاوتی در جهت مختلف شود^[6].

اگر ناهمسانگردی زیادی در خواص مکانیکی فولاد وجود داشته باشد، ممکن است عامل بالقوه‌ای برای شکست ناشی از تنش‌های محیطی اعمال شده، باشد که بر اساس داده‌های آزمون‌های کیفی، قابل پیش‌بینی نبوده است. برای فولادسازان، دانستن و کنترل ناهمسانگردی فولاد برای حذف هر پاسخ مکانیکی غیرمنتظره در حین بهره‌برداری مهم است. حتی اگر خواصی همچون انرژی شکست شاریبی و استحکام، حداقل خصوصیات لازم را برآورده کنند، وجود ناهمسانگردی، برای مثال پایداری لوله در مقابل کماتش را به مخاطره می‌اندازد^[7].

آزمایش ضربه شاریبی یکی از روش‌هایی است که اطلاعات ارزشمندی را در مورد خواص ضربه‌ای مواد در اختیار طراحان و مهندسان قرار می‌دهد. به کمک این آزمایش می‌توان انتقال بین حالت شکست نرم و ترد را در فولادها نمایش داد. آزمایش ضربه شاریبی با شیار V شکل (Charpy V-Notch (CVN) impact test)، رایج‌ترین روش تجربی برای اندازه‌گیری انرژی شکست است و از آن می‌توان برای تخمین چقرمگی شکست (Fracture toughness) فولادها بر اساس روابط نیمه تجربی استفاده کرد. با

نشان داده‌اند، و برحسب دماهای انتقال نرم به ترد، در جهت‌گیری ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد، انرژی شکست کمترین مقدار را دارا بوده است.

با بررسی منابع موجود، مشخص شد، در تمامی تحقیقات مرتبط با آزمایش ضربه شاری فولادهای خط لوله API در صنایع نفت و گاز، تاکنون پژوهشی در ارتباط با بررسی تغییرات انرژی شکست شاری فولاد X65، نشده است. علاوه بر این، تحقیقاتی که بر روی سایر فولادها به صورت محدود و پراکنده انجام شده، فقط بر روی ورق تسمه نورد گرم شده بوده است و بر روی بدنه لوله واقعی که به شرایط بهره‌برداری نزدیک‌تر است، آزمایشی انجام نشده است. از آنجائی که انرژی شکست می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای تخمین و بررسی چقرمگی شکست در فولادهای کم‌آلیاژ پراستحکام مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین می‌تواند اهمیت ویژه‌ای برای مهندسين طراح جهت طراحی بهینه خطوط لوله انتقال گاز داشته باشد. از این رو، به دلیل اهمیت فوق‌العاده فولاد X65 در خطوط انتقال گاز ایران، در تحقیق حاضر، تغییرات انرژی شکست شاری نمونه‌های با زوایای متفاوتی نسبت به جهت نورد و با سه جهت شیار مختلف عمود بر هم، از بدنه لوله فولادی (در مقیاس صنعتی) به قطر ۴۸ اینچ، توسط دستگاه ضربه شاری با ظرفیت ۴۵۰ ژول، بررسی شده است. همچنین شاخصی با عنوان شاخص ناهمسانگردی، به منظور مقایسه کمی تغییرات انرژی شکست شاری در جهات مختلف شیار، در این تحقیق ابداع و ارائه شده است.

۲- معرفی ماده و نحوه انجام آزمایش

لوله فولادی مورد آزمایش در این تحقیق، از نوع درز جوش مارپیچ می‌باشد. فولاد اولیه، توسط شرکت پوسکوی (POSCO) کره جنوبی با استفاده از روش نورد کنترل‌شده ترمومکانیکی و به صورت کلاف (رول) تولید می‌شود، سپس در شرکت لوله و تجهیزات سدید، شکل‌دهی و جوشکاری شده است. فولاد مربوطه از خانواده فولاد کم‌کربن پراستحکام و دارای مقادیر قابل‌توجهی عناصر ریزآلیاژی شامل تیتانیوم، وانادیوم و نیوبیوم می‌باشد. لوله موردنظر از جنس فولاد ایکس ۶۵ با حداقل تنش تسلیم ۶۵ هزار پوند بر اینچ مربع (معادل ۴۴۸ مگاپاسکال) با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر (۴۸ اینچ) و ضخامت جداره ۱۴/۳ میلی‌متر است.

۲-۱- مشخصات مکانیکی فولاد آزمایش شده در تحقیق حاضر

مشخصات مربوط به فولاد مورد استفاده در این تحقیق (API X65)، توسط موسسه بین‌المللی نفت آمریکا استاندارد شده است [1,15]. دارا بودن استحکام و چقرمگی بالا و قابلیت جوش‌پذیری مناسب، ویژگی بارز این فولاد است [1]. خواص مکانیکی این فولاد در جدول ۱ ارائه شده است. این فولاد با دو ریزساختار فریتی-پربلیتی و یا فریت سوزنی-بینیتی تولید می‌شود که ساختار دوم، به دلیل ترکیب بهتر استحکام و چقرمگی، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و همچنین

این حال، تجزیه و تحلیل آن سخت است زیرا بسیاری از عوامل مثل اندازه دانه، عناصر آلیاژی، پارامترهای تولید، بافت کریستالی و کار شکست می‌توانند بر روی انرژی شکست تأثیر بگذارند. با این وجود، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا روابط کمی، خطی یا غیرخطی بودن، بین انرژی ضربه شاری و عوامل تأثیرگذار بالقوه را کشف کنند [8]. علاوه بر این، از آزمایش شاری می‌توان برای تعیین میزان درصد شکست نرم (برشی) استفاده کرد که بیانگر کیفیت فولادهای خطوط انتقال انرژی است [9]. بنابراین این آزمایش، به‌عنوان ابزاری با اهمیت در شناخت خواص مکانیکی است و ریشه بسیاری از تحقیقات می‌باشد [10].

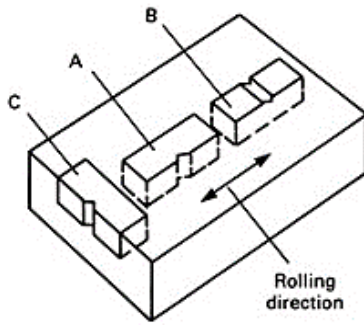
در تحقیق انجام‌شده توسط موهان [11] و همکاران، انرژی شکست شاری برای دو فولاد با درصدهای گوگرد متفاوت، اندازه‌گیری شده است. مشاهدات جالب این است که درجه ناهمسانگردی (Degree of anisotropy) برای فولاد با درصد گوگرد بالاتر، کمتر و تغییرات به صورت خطی است. این به دلیل آن است که سولفیدها در آلیاژ کم‌گوگرد، نسبتاً بیشتر کشیده شده بودند. همچنین، برای فولاد با درصد گوگرد کمتر، ناهمسانگردی بیشتر دیده شده و منحنی آن به صورت غیرخطی و سینوسی است. تحقیقی که توسط گارسیا [12] و همکاران بر روی فولاد خط لوله API X80 انجام شده است، نشان می‌دهد که در محدوده دمای انتقال نرم به ترد، حداقل انرژی شکست، با کمترین کسر حجمی بینیت پائینی (Lower Bainite) بر روی صفحه شکست، مرتبط است که در زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد ایجاد شده است. در این تحقیق، در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، بیشترین انرژی شکست مشاهده می‌شود.

در تحقیق انجام‌شده توسط جو [13] و همکاران، آزمایش ضربه شاری بر روی فولادهای API X80 در جهت‌گیری‌های مختلف با شیاری عمود بر صفحه ورق به منظور ارزیابی ناهمسانگردی انرژی شکست انجام شده است. در نمونه‌های آزمایش‌شده توسط آنها، در برخی از سطوح شکست، به علت وجود ریزساختار نواری (Banded structure)، ترک‌های طولی موازی با صفحه نورد دیده شده است که حالت شکست در این ترک‌ها به صورت شکست نرم بوده است. آنها با عملیات حرارتی کردن فولاد موردنظر، ریزساختار نواری را حذف کردند. در نتیجه، ترک‌های لایه‌ای (Delamination) در نمونه‌های شکسته شده شاری، با موفقیت حذف شده است. با این حال، همچنان ناهمسانگردی قوی در جهت قطری (یعنی زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد) مشاهده شده است.

مورینو [14] و همکاران به منظور بررسی ناهمسانگردی خواص مکانیکی فولاد خط لوله API X80، آزمایش‌های کشش و ضربه در زوایای ۰، ۲۲/۵، ۴۵، ۷۷/۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، انجام داده‌اند. در این تحقیق، انرژی جذب‌شده نمونه‌های آزمایش ضربه شاری برحسب جهت‌گیری نمونه در دماهای انتخاب‌شده به ترتیب برای ورق‌های فولادی API X80 و B2 اندازه‌گیری شده است و نتیجه‌گیری شده است که تمام آلیاژهای مورد مطالعه رفتار ناهمسانگردی مشابهی را از خود

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد ایکس ۶۵ (اندازه‌گیری شده در جهت محیطی) و مقایسه آن با استاندارد API [1,15].

| پارامتر | استحکام تسلیم (مگاپاسگال) | استحکام کششی (مگاپاسگال) | نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی | درصد ازدیاد طول (%) |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| اندازه- استاندارد API | اندازه- استاندارد API | اندازه- استاندارد API | اندازه- استاندارد API | اندازه- استاندارد API |
| حداقل | ۴۴۸ | ۵۳۱ | ۰/۷۷ | ۱۴ |
| میانگین | ۵۳۸ | ۶۲۴ | ۰/۸۶ | ۳۴ |
| حداکثر | ۵۹۸ | ۷۵۸ | ۰/۸۹ | ۳۸ |



شکل ۲) موقعیت و جهت‌گیری‌های نمونه‌های شاری با جهت شیار A, B و C در زاویه صفر درجه نسبت به جهت نورد در فلز پایه.

توجه شود که جهت شیار C، تاجائی که نویسندگان می‌دانند، برای اولین بار است که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است و یکی از نوآوری‌های این تحقیق به‌شمار می‌آید.

۲-۴- آماده سازی نمونه‌ها

ابتدا قطعه‌ای به طول ۱ متر و عرض ۰/۵ متر توسط دستگاه سنگ‌فرز از بدنه لوله فولادی به قطر ۴۸ اینچ جدا شده است (شکل ۳ الف). سپس توسط دستگاه برش با آب (Water Jet)، ورق اولیه بریده شده در مرحله قبل، به قطعات مستطیلی کوچک‌تری (به طول ۱۰۰ و عرض ۸۰ میلی‌متر) جهت استخراج نمونه‌های استاندارد، برش زده شده است. در ادامه، به‌منظور کاهش ضخامت ورق‌ها از ۱۴/۳ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر، عملیات سنگ‌زنی مغناطیسی تخت، بر روی دو طرف هر ورق، به‌طور کاملاً یکسان، انجام شد تا از هر دو سمت، به مقدار برابر، براده‌برداری انجام شود و قطعه از نظر موقعیت، کاملاً در وسط ضخامت لوله قرار گیرد. شکل ۳ بخشی از مراحل مختلف آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

در نهایت، بعد از تهیه نقشه ابعاد و چیدمان نمونه‌ها با سه جهت شیار متفاوت در هر بلوک مستطیلی، مطابق استاندارد ASTM E23، عملیات ساخت نهایی نمونه‌ها، توسط ماشین تخلیه الکتریکی (Wire-cut) به اتمام رسیده است. هر نمونه، در حدود ۱۳۰۰ میلی‌متر مربع وایرکات شده است. مطابق استاندارد ASTM، آزمایش ضربه شاری فولاد خط لوله، باید با ۳ نمونه انجام شود [18,19].



شکل ۳) الف) برش لوله فولادی به وسیله سنگ فرز. ب) عملیات واترجت صفحه اولیه توسط دستگاه واترجت.

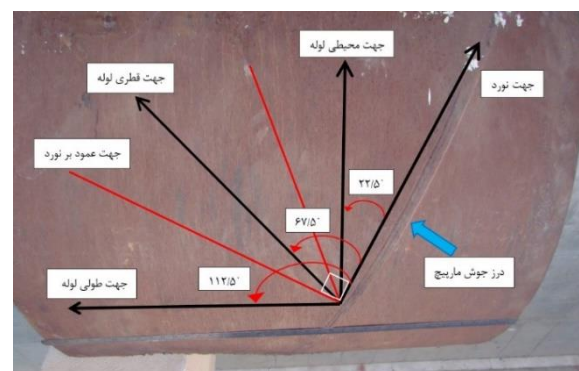
جوش‌پذیری عالی در خطوط انتقال انرژی، ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی‌های مذکور اجازه می‌دهد این نوع فولاد در ساخت لوله‌های با قطر زیاد، جهت استفاده در خطوط انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد [16].

۲-۲- هندسه نمونه

نمونه، قطعه‌ای از ماده موردنظر به طول ۵۵ میلی‌متر و مقطع ۱۰×۱۰ میلی‌متر است که شیار به عمق ۲ میلی‌متر با زاویه ۴۵ درجه در مرکز دارد [17]. اندازه، تیرانس و مشخصات شیار از جمله ویژگی‌های قابل توجه در ساخت نمونه‌ها می‌باشند. با این حال، تغییرات در ابعاد شیار، به‌طورجدی نتایج آزمایش‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و رعایت تیرانس‌های داده‌شده در استاندارد ضروری است [17].

۲-۳- موقعیت و جهت‌گیری نمونه‌های استخراجی

نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش از بدنه یک لوله واقعی به قطر ۴۸ اینچ از جنس فولاد API X65 و با زوایای ۲۲/۵ درجه نسبت به یکدیگر و با شروع از جهت نورد که متناظر با درز جوش ماریبیج است، استخراج و ساخته شده است. شکل ۱ تصویر کلی از لوله به‌همراه زوایای متناظر با جهت‌های اصلی لوله را نشان می‌دهد که نمونه‌ها تحت این زوایا از لوله استخراج شده است. همچنین در یک زاویه مشخص، موقعیت و جهت‌گیری‌های نمونه‌های شاری با جهت شیار A, B و C نسبت به یکدیگر در شکل ۲ نمایش داده شده است.

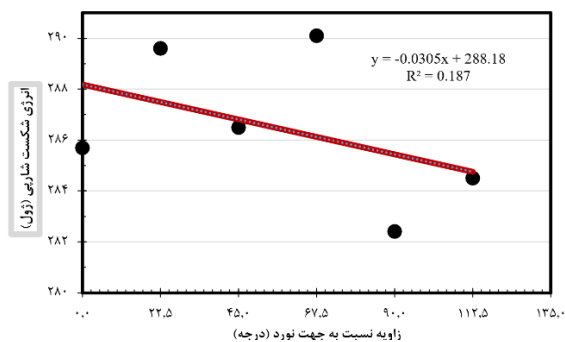


شکل ۱) تصویر کلی از لوله به‌همراه زوایای متناظر جهت‌های اصلی لوله با زوایای نمونه نسبت به جهت نورد.

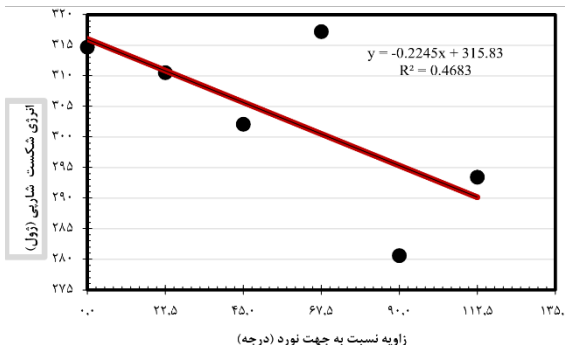
۳-۱- بررسی ناهمسانگردی انرژی شکست شاری

مقادیر انرژی شکست دریافت شده از نمایشگر دستگاه و میانگین آنها، براساس موقعیت و جهت گیری نمونه های استخراجی شاری در هر سری آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. نمودار تغییرات انرژی شکست شاری برحسب زاویه نسبت به جهت نورد برای نمونه های با جهت شیار A، B و C به ترتیب در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

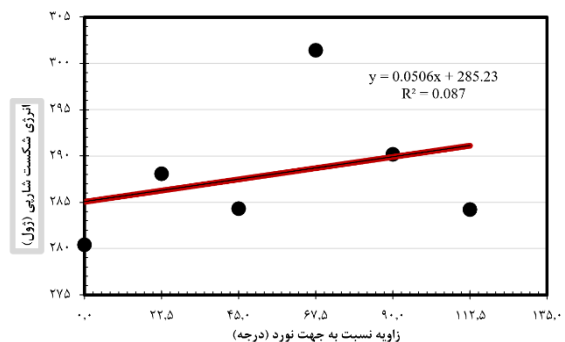
در جهت شیار A، تغییرات انرژی شکست میانگین بین ۲۸۲/۴ ژول در زاویه ۹۰ درجه تا ۲۹۰/۱ ژول در زاویه ۶۷/۵ درجه است. درصد تغییرات میانگین انرژی شکست در جهت شیار A، ۲/۷ % می باشد.



شکل ۶) نمودار تغییرات میانگین انرژی شکست شاری نسبت به جهت نورد برای نمونه های با جهت شیار A.



شکل ۷) نمودار تغییرات میانگین انرژی شکست شاری نسبت به جهت نورد برای نمونه های با جهت شیار B.



شکل ۸) نمودار تغییرات میانگین انرژی شکست شاری نسبت به جهت نورد برای نمونه های با جهت شیار C.

۲-۵- انجام آزمایش

کلیه آزمایش ها برای نمونه های استخراجی از لوله با شش زاویه مختلف نسبت به جهت نورد، توسط دستگاه ضربه شاری با ظرفیت ۴۵۰ ژول، مستقر در آزمایشگاه ضربه دانشگاه پیام نور کرمان در دمای محیط انجام شده است. برای هر زاویه، به منظور تکرارپذیری نتایج و بررسی دقت نتایج، آزمایش سه بار تکرار شده و پس از انجام هر آزمایش، انرژی شکست توسط نمایشگر دستگاه (دایال (Dial)) اندازه گیری و ثبت شده است. دقت اندازه گیری انرژی توسط نمایشگر دستگاه، ۰/۱ ژول می باشد. بر مبنای زاویه رهاسازی پاندول، سرعت چکش در لحظه برخورد با نمونه، ۲۶/۵ m/s است. نمای کلی دستگاه ضربه شاری در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴) نمای کلی دستگاه ضربه شاری در آزمایشگاه ضربه دانشگاه پیام نور کرمان.

۳- نتایج اولیه آزمایش

کلیه آزمایش ها بر روی ۶ گروه ۹ تایی (جمعاً ۵۴ نمونه) انجام و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است که در ادامه بررسی می شود. از آنجائی که فولاد API X65 در دسته فولادهای کم آلیاژ پراستحکام (HSLA) قرار داشته و بسیار نرم و دارای چقرمگی بالا است، بنابراین حین انجام آزمایش و بعد آن، نمونه ها به دو بخش مجزا تقسیم نمی شوند. در شکل ۵ تصویر تعدادی از نمونه های آزمایش پس از شکست، نشان داده شده است.



شکل ۵) تصویر تعدادی از نمونه های آزمایش شده پس از شکست.

جدول ۲) مقادیر انرژی شکست بدست آمده از نمایشگر دستگاه و میانگین انرژی شکست در هر سری آزمایش براساس موقعیت و جهت‌گیری نمونه‌های استخراجی شاری.

| میانگین انرژی شکست از نمایشگر دستگاه (ژول) | انحراف معیار (ژول) | انرژی شکست از نمایشگر دستگاه (ژول) | کد نمونه | زاویه نمونه نسبت به جهت نورد | میانگین انرژی شکست از نمایشگر دستگاه (ژول) | انحراف معیار (ژول) | انرژی شکست از نمایشگر دستگاه (ژول) | کد نمونه | زاویه نمونه نسبت به جهت نورد |
|--|--------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|--|--------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| ۲۹۰/۱ | ۳/۶۳ | ۲۸۸/۵ | A ₁ | ۶۷/۵° | ۲۸۵/۷ | ۱/۶۱ | ۲۸۴ | A ₁ | ۰° |
| | | ۲۹۴/۳ | A ₂ | | | | ۲۸۷/۲ | A ₂ | |
| | | ۲۸۷/۶ | A ₃ | | | | ۲۸۶/۰ | A ₃ | |
| ۳۱۷/۲۳ | ۲۲/۲۷ | ۳۱۰/۱ | B ₁ | | ۳۱۴/۷ | ۱۲/۹۳ | ۳۰۷/۳ | B ₁ | |
| | | ۳۴۲/۲ | B ₂ | | | | ۳۲۹/۷ | B ₂ | |
| | | ۲۹۹/۴ | B ₃ | | | | ۳۰۷/۳ | B ₃ | |
| ۳۰۱/۴ | ۷/۴۲ | ۳۰۲/۱ | C ₁ | | ۲۸۰/۴ | ۱۷/۸۸ | ۲۹۳/۳ | C ₁ | |
| | | ۳۰۸/۵ | C ₂ | | | | ۲۵۷/۷ | C ₂ | |
| | | ۲۹۳/۷ | C ₃ | | | | ۲۷۲/۴ | C ₃ | |
| ۲۸۲/۴ | ۴/۶۴ | ۲۸۷/۶ | A ₁ | ۹۰° | ۲۸۹/۶ | ۱/۴۴ | ۲۹۰/۵ | A ₁ | ۲۲/۵° |
| | | ۲۷۸/۶ | A ₂ | | | | ۲۸۸/۰ | A ₂ | |
| | | ۲۸۱/۱ | A ₃ | | | | ۲۹۰/۵ | A ₃ | |
| ۲۸۰/۶ | ۶/۸۷ | ۲۸۷/۶ | B ₁ | | ۳۱۰/۵ | ۲/۳۵ | ۳۱۰/۶ | B ₁ | |
| | | ۲۸۷/۶ | B ₂ | | | | ۳۱۲/۸ | B ₂ | |
| | | ۲۷۵/۷ | B ₃ | | | | ۳۰۸/۱ | B ₃ | |
| ۲۹۰/۲ | ۰/۸۳ | ۲۹۰/۹ | C ₁ | | ۲۸۸/۱ | ۱/۴۹ | ۲۸۸/۵ | C ₁ | |
| | | ۲۹۰/۵ | C ₂ | | | | ۲۸۹/۳ | C ₂ | |
| | | ۲۸۹/۳ | C ₃ | | | | ۲۸۶/۴ | C ₃ | |
| ۲۸۴/۵ | ۵/۵۵ | ۲۹۰/۱ | A ₁ | ۱۱۲/۵° | ۲۸۶/۵ | ۵/۳۷ | ۲۹۱/۳ | A ₁ | ۴۵° |
| | | ۲۸۴/۴ | A ₂ | | | | ۲۸۷/۶ | A ₂ | |
| | | ۲۷۹/۰ | A ₃ | | | | ۲۸۰/۷ | A ₃ | |
| ۲۹۳/۴ | ۵/۹۲ | ۲۹۸/۲ | B ₁ | | ۳۰۲/۱ | ۳/۸۱ | ۲۹۷/۷ | B ₁ | |
| | | ۲۸۶/۸ | B ₂ | | | | ۳۰۴/۵ | B ₂ | |
| | | ۲۹۵/۳ | B ₃ | | | | ۳۰۴/۱ | B ₃ | |
| ۲۸۴/۲ | ۰/۹۸ | ۲۸۴/۸ | C ₁ | | ۲۸۴/۳ | ۳/۰۶ | ۲۸۴ | C ₁ | |
| | | ۲۸۴/۸ | C ₂ | | | | ۲۸۷/۶ | C ₂ | |
| | | ۲۸۳/۱ | C ₃ | | | | ۲۸۱/۵ | C ₃ | |

به‌وضوح دیده می‌شود. در جهت شیار B، تغییرات انرژی شکست میانگین بین ۲۸۰/۶ ژول در زاویه ۹۰ درجه تا ۳۱۷/۲۳ ژول در زاویه ۶۷/۵ درجه است. درصد تغییرات میانگین انرژی شکست جهت شیار B، ۱۳٪ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که در جهت شیار B، ناهمسانگردی بیشتری نسبت به سایر جهات شیار دیگر در انرژی شکست وجود دارد. در جهت شیار C، تغییرات انرژی شکست میانگین، بین ۲۸۰/۴ ژول در زاویه صفر درجه تا ۳۰۱/۴ ژول در زاویه ۶۷/۵ درجه است. با برآزش خطی بر روی داده‌های میانگین انرژی شکست در جهت شیار A، نتیجه می‌شود که در نمونه‌های با جهت شیار A، با افزایش درصد تغییرات میانگین انرژی شکست جهت شیار C، ۷/۴٪ می‌باشد که نسبت به جهت شیار A، ناهمسانگردی بیشتر و نسبت به جهت شیار B، همسانگردی بیشتری در انرژی شکست این جهت شیار دیده

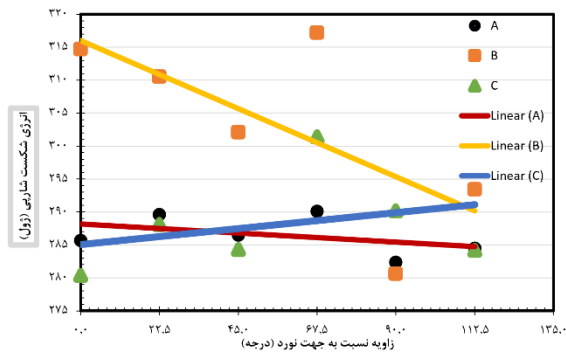
هرچه درصد تغییرات انرژی شکست کمتر باشد، همسانگردی انرژی شکست بیشتر خواهد شد. بنابراین در ادامه مقایسه با دو جهت شیار دیگر، نشان می‌دهد که در جهت شیار A، همسانگردی بیشتری در انرژی شکست وجود دارد. زاویه نسبت به جهت نورد، انرژی شکست کاهش می‌یابد (با شیب خط برآزش شده ۰/۰۳). ضریب تعیین که با علامت R2 نشان داده می‌شود، بیانگر میزان احتمال همبستگی میان داده‌ها است. مقدار این ضریب بین صفر تا یک است. اگر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، می‌توان داده‌های دقیق‌تری از مدل ریاضی تعریف‌شده بر داده‌های واقعی به‌دست آورد. دلیل کوچک‌بودن مقدار R2 در برآزش خطی در نمودارهای تغییرات انرژی شکست میانگین، این است که اساساً تغییرات انرژی شکست بر حسب اویه نسبت به جهت نورد، غیرخطی و سینوسی است. این موضوع در نتایج سایر محققین

لوله مارپیچ با پیچاندن دانه‌های هم‌راستا شده با جهت نورد، باعث افزایش ناهمسانگردی و با حرکت دادن نابعی‌های پیچی قفل‌شده در مرزهای دانه، باعث تغییر انرژی شکست نسبت به تسمه ورق نورد گرم شده می‌شود.

۳-۲- بحث و مقایسه نتایج

با مقایسه شکل‌های ۶، ۷ و ۸ کاملاً مشخص و مشهود است که در زاویه ۶۷/۵ درجه نسبت به جهت نورد، در هر سه جهت شیار، بیشترین انرژی شکست شاری نمونه‌ها به ثبت رسیده است. همچنین، میانگین انرژی شکست شاری نمونه‌های با هر سه جهت شیار متفاوت A، B و C برحسب زاویه نسبت به جهت نورد در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۹ دیده می‌شود که با افزایش زاویه نمونه نسبت به جهت نورد، انرژی شکست نمونه‌های با جهت شیار A و B کاهش می‌یابد، ولی انرژی شکست در نمونه‌های با جهت شیار C، افزایش یافته است. علاوه‌براین، در زاویه ۹۰ درجه، کمترین اختلاف انرژی شکست بین جهت شیار B با دو جهت دیگر شیار (یعنی A و C) ایجاد می‌شود.

یعنی در زاویه ۹۰ درجه، تقریباً هر سه جهت شیار، داده‌های نزدیک به یکدیگری دارند و ناهمسانگردی انرژی شکست در این زاویه به حداقل می‌رسد. در نتیجه در زاویه عمود بر جهت نورد، بیشترین همسانگردی انرژی شکست شاری بین نمونه‌ها وجود دارد. به نظر می‌رسد در جهت عمود بر نورد، اثر عوامل تأثیرگذار بر روی ناهمسانگردی انرژی شکست، حداقل باشد و یا حداقل اثر یکدیگر را به نحو مطلوب و مثبت خنثی کرده باشند. با مقایسه نتایج در نمودار شکل ۹، کاملاً مشهود است که جهت شیار B (که جهت شیار، عمود بر ضخامت لوله است)، همواره



شکل ۹) نمودار تغییرات میانگین انرژی شکست شاری نمونه‌های با هر سه جهت شیار متفاوت A، B و C برحسب زاویه نسبت به جهت نورد

می‌شود. این موضوع در ادامه با بررسی شاخص ناهمسانگردی مجدداً تأکید و تکرار می‌شود.

با مقایسه خطوط برازش شده در شکل‌های ۶ تا ۸ دیده می‌شود که شیب تغییرات انرژی شکست در جهت شیار C، (با مقدار ۰/۰۵)، بیشتر از جهت شیار A، (با مقدار ۰/۰۲) و کمتر از جهت شیار B، (با مقدار ۰/۲۲) است. بنابراین نتیجه می‌شود که ناهمسانگردی انرژی شکست در جهت شیار B، بیشتر از جهت شیار C و آن هم بیشتر از جهت شیار A است. این موضوع تأکید دوباره‌ای بر نتیجه صورت‌گرفته در بخش قبلی است.

به‌منظور بررسی اثر تغییر زاویه نمونه بر روی انرژی شکست شاری در یک جهت شیار مشخص، تغییرات بین کمترین و بیشترین انرژی شکست نمونه‌ها در زوایای مختلف، محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳) درصد تغییرات میانگین انرژی شکست (بر حسب ژول) در یک جهت مشخص در زوایای مختلف.

| جهت شیار | پارامتر | | |
|---|---------|------|-----|
| | C | B | A |
| درصد بیشترین تغییرات انرژی شکست در زوایای مختلف | ۱۳/۲ | ۲۴/۱ | ۵/۴ |
| درصد بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست در زوایای مختلف | ۷/۴ | ۱۳ | ۲/۷ |

به‌منظور بررسی اثر تغییر جهت شیار نمونه بر روی انرژی شکست شاری در یک زاویه مشخص، تغییرات بین کمترین و بیشترین انرژی شکست بین جهت‌های شیار مختلف نمونه‌ها، محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

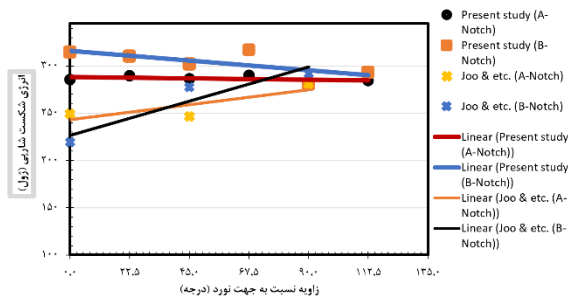
با مقایسه جداول ۳ و ۴ دیده می‌شود که بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاری در زوایای مختلف نسبت به جهت نورد، حداکثر ۱۳ درصد است (در جهت شیار B) ولی بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاری بین جهت‌های شیار مختلف، حداکثر ۱۲/۲ درصد است (در زاویه ۰ درجه). در نتیجه اثر تغییر زاویه نمونه استخراجی نسبت به جهت نورد بر روی انرژی شکست شاری، بیشتر از اثر تغییر جهت شیار نمونه است.

تغییرات انرژی شکست به‌واسطه تغییر زاویه نمونه نسبت به جهت نورد، متأثر از فرآیند ساخت لوله مارپیچ است و تغییرات انرژی شکست به‌واسطه تغییر جهت شیار نمونه‌ها در یک زاویه مشخص، متأثر از فرآیند ساخت ورق نورد گرم شده می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود که ناهمسانگردی ایجاد شده به‌واسطه فرآیند ساخت لوله مارپیچ، بیشتر از ناهمسانگردی ایجاد شده به‌واسطه فرآیند ساخت ورق نورد گرم شده است. فرآیند ساخت

جدول ۴) درصد تغییرات کمترین و بیشترین انرژی شکست (بر حسب ژول) بین جهت‌های شیار مختلف

| پارامتر | زاویه نسبت به جهت نورد | | | | | |
|--|------------------------|------|-----|------|-----|-------|
| | ۰ | ۲۲/۵ | ۴۵ | ۶۷/۵ | ۹۰ | ۱۱۲/۵ |
| درصد بیشترین تغییرات انرژی شکست بین جهت شیار مختلف | ۲۱ | ۹/۲ | ۸/۴ | ۱۸/۹ | ۵/۵ | ۶/۸ |
| درصد بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست بین جهت شیار مختلف | ۱۲/۲ | ۷/۷ | ۶/۲ | ۹/۳ | ۳/۴ | ۳/۲ |

در پژوهش اکثر محققین، عمدتاً فقط یک جهت شیار تحت زوایای مختلف بررسی شده است و تنها در تحقیق جو و همکاران، به-منظور بررسی ناهمسانگردی انرژی شکست شارپی، دو جهت شیار مختلف A و B، مورد آزمایش قرار گرفته است، بنابراین نتایج انرژی شکست تحقیق حاضر با پژوهش جو و همکاران مقایسه و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰) نمودار مقایسه نتایج تحقیق حاضر با پژوهش جو و همکاران [13]

با توجه به شکل ۱۰ کاملاً مشخص است که افزایش زاویه نمونه نسبت به جهت نورد در ورق نورد گرم شده فولاد API X80، افزایش انرژی شکست شارپی را در پی داشته است، ولی در نمونه‌های استخراج شده از لوله واقعی ۴۸ اینچ از فولاد API X65، با افزایش زاویه نمونه نسبت به جهت نورد، انرژی شکست شارپی کاهش یافته است که نتیجه ناهمسانگردی ایجاد شده به‌واسطه فرآیند ساخت لوله ماریپیج می‌باشد. با این حال، در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، نتایج بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و اختلاف به حداقل ممکن خود می‌رسد. بنابراین در جهت عمود بر نورد، ناهمسانگردی خواص ضربه‌ای شارپی نسبت به سایر زوایا، کاهش یافته است. تفاوت‌های اساسی بین تحقیق حاضر با کار سایر محققین عبارت‌اند از:

۱- ماده مورد استفاده در این تحقیق فولاد API X65 است ولی در تحقیق جو و همکاران، فولاد API X80 و API X70 و در تحقیق مورینو و همکاران، فولاد API X80 و فولاد B2 استفاده شده است. در یک زاویه و جهت شیار مشخص، مقدار انرژی شکست به چهار عامل: ترکیب شیمیایی، نوع ریز ساختار، دمای قطعه و اندازه دانه بستگی دارد. به‌دلیل متفاوت بودن ترکیب شیمیایی فولاد X65 با X80، بنابراین قطعاً انرژی شکست آنها با یکدیگر تفاوت واضح و آشکاری دارد. ترکیب شیمیایی شامل درصد کربن و سایر عناصر آلیاژی هست که با تغییر نوع فلز به‌شدت بر روی انرژی شکست تأثیرگذار است. هرچه درصد کربن کمتر شود، انرژی شکست افزایش می‌یابد [20].

۲- نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق، از بدنه لوله واقعی به قطر ۴۸ اینچ که به‌روش ماریپیج، جوشکاری شده است، استخراج شده، ولی در تحقیق سایرین، نمونه‌ها از تسمه ورق نورد گرم شده استخراج شده است. فرآیند ساخت لوله ماریپیج باعث تغییر انرژی شکست نسبت به تسمه ورق نورد گرم شده می‌شود.

سطح انرژی شکست بالاتری را نسبت به دو جهت شیار دیگر، دارا است. زیرا کارسختی حاصل از نورد، باعث فشردگی بیشتر ذرات در راستای ضخامت ورق می‌شود، بنابراین مانند مانعی در برابر پیشروی ترک عمل کرده و باعث افزایش انرژی شکست تا مقدار حداکثر ۲۲٪ (در زاویه ۰ درجه نسبت به جهت نورد) نسبت به سایر جهت‌های شیار، می‌شود. علاوه براین می‌توان نتیجه گرفت که میانگین کمترین انرژی شکست شارپی لوله (در هر سه جهت شیار) در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد واقع شده است. همچنین در زاویه ۰ درجه (یعنی در جهت نورد)، بیشترین اختلاف انرژی شکست بین جهت شیار B با دو جهت دیگر شیار (یعنی A و C) مشاهده می‌شود. بنابراین حداکثر ناهمسانگردی انرژی شکست (بین جهت شیار B با دو جهت شیار دیگر) در جهت نورد ایجاد شده است. برای لوله‌های جوشکاری شده ماریپیج با قطر بالا، جهت محیطی لوله متناظر با جهتی است که زاویه‌ای را نسبت به جهت نورد ورق تسمه تشکیل می‌دهد و برای لوله‌های تولید شده از یک عرض کلاف مشخص، این زاویه با قطر لوله تغییر می‌کند. بنابراین نتایج حاصله در این تحقیق که بر روی لوله واقعی به قطر ۴۸ اینچ بدست آمده است، نمی‌تواند قابل تعمیم برای لوله‌ای با قطر متفاوت ولو هم‌جنس باشد.

در جهتی از لوله که کمترین استحکام و انرژی شکست (چقرمگی) وجود دارد، بنظر می‌رسد که احتمالاً در آن جهت شانس شکست افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل ۹، در زاویه ۶۷/۵ درجه که معادل با جهت قطری لوله است، بیشترین انرژی شکست برای هر سه جهت شیار مشاهده می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار داشت که اگر لوله تحت بار ضربه‌ای ناگهانی در دمای پائین و به‌همراه میدان تنش سه‌بعدی قرار گیرد، به احتمال زیاد مسیر رشد ترک در این شرایط، راستای قطری لوله نخواهد بود. چون در این راستا، انرژی شکست ماده بیشتر از سایر زوایا و جهت‌ها است و همواره ترک مسیری را برای رشد انتخاب می‌کند که کمترین انرژی شارپی را نیاز داشته باشد.

از آنجائی که کمترین انرژی شکست برای نمونه‌های با جهت شیار A و C در زاویه صفر درجه و برای نمونه با جهت شیار B در زاویه ۹۰ درجه ایجاد شده است، بنابراین درصورت ایجاد ترک عمود بر ضخامت لوله و محیا بودن شرایط (دمای پائین و نرخ کرنش بالا)، در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد، احتمال شکست وجود دارد و اگر ترک در جهت شیار A و C ایجاد شود، در زاویه صفر درجه نسبت به جهت نورد، احتمال شکست بیشتر از سایر زوایا وجود خواهد داشت. پیش‌بینی مسیر احتمالی رشد ترک تحت بار ضربه‌ای برای سایر مواد و با فرآیندهای ساخت لوله متفاوت مثلاً روش UOE، قابل تعمیم نیست. برای این‌گونه مواد باید آزمایش‌های ضربه شارپی در زوایای متفاوت انجام شود و ناهمسانگردی انرژی شکست مورد آزمایش قرار گیرد.

است. مقایسه شاخص ناهمسانگردی تحقیق حاضر با تحقیق جو و همکاران در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ مقایسه شاخص ناهمسانگردی تحقیق حاضر برای نمونه‌هایی با جهت‌های شیار مختلف با کار سایر محققین

| شاخص ناهمسانگردی | جهت شیار | | |
|-------------------------|----------|------|------|
| | A | B | C |
| تحقیق حاضر | ۰/۱۹ | ۰/۹۰ | ۰/۵۱ |
| تحقیق جو و همکاران [13] | ۰/۴۷ | ۱ | --- |
| درصد اختلاف (%) | ۵۹ | ۱۰ | --- |

در واقع شاخص ناهمسانگردی، اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار ثبت شده انرژی شکست را در هر جهت شیار به نسبت اختلاف بیشترین و کمترین انرژی کل (در همه جهات شیارها) مشخص می‌کند و طبیعتاً هرچه این اختلاف کمتر باشد، یعنی ناهمسانگردی در آن جهت شیار، کمتر است و بالعکس. با مقایسه شاخص ناهمسانگردی در جدول ۵، مشاهده می‌شود بیشترین ناهمسانگردی مربوط به نمونه‌های با جهت شیار B و کمترین ناهمسانگردی مربوط به جهت شیار A است. مقایسه نتایج شاخص ناهمسانگردی انرژی شکست تحقیق حاضر، با پژوهش جو و همکاران، نشان می‌دهد که نتایج تقریباً یکسان و مشابهی در مورد شاخص ناهمسانگردی با هر دو تحقیق وجود دارد و تطابق خوب و مناسبی با یکدیگر دارند. افزون‌براین، کوچک‌تر بودن شاخص ناهمسانگردی در فولاد API X65 نسبت به فولاد API X80، نشان‌دهنده همسانگردی بیشتر انرژی شکست فولاد API X65 نسبت به فولاد API X80 است. در جهت شیار A، فولاد API X65 به اندازه ۵۹٪ و در جهت شیار B، به اندازه ۱۰٪ نسبت به فولاد API X80 دارای همسانگردی انرژی شکست بیشتری است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، آزمایش ضربه شاری بر روی نمونه‌هایی از بدنه لوله واقعی با جنس فولاد API X65 که با زوایا و جهات شیار متفاوت A، B و C نسبت به جهت نورد از لوله استخراج شده، انجام گردیده و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- لوله‌های جوشکاری شده ماریچ با شروع از مواد نامتجانس به صورت سرد شکل‌دهی شده و جهت نورد با توجه به زاویه ماریچ لوله، تغییر می‌کند، بنابراین لوله تولید شده ذاتاً خواص ناهمسانگردی را از خود نشان می‌دهد.

۲- در نمونه‌های با جهت شیار A، کمترین و بیشترین انرژی شکست به ترتیب ۲۸۲/۴ ژول (در زاویه ۹۰ درجه) و ۲۹۰/۱ ژول (در زاویه ۶۷/۵ درجه) است. درصد تغییرات انرژی شکست در جهت شیار A، ۲/۷٪ می‌باشد.

۳- نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق در دمای محیط مورد آزمایش قرار گرفته است، ولی در تحقیق سایرین، عمدتاً در دماهای زیر صفر و تا ۱۰۰- درجه سلسیوس آزمایش صورت گرفته است. در دماهای پایین، مخصوصاً پایین‌تر از دمای گذار تردی به نرمی، به دلیل رفتار ترد مواد، انرژی شکست به شدت کاهش می‌یابد.

۴- در تحقیق حاضر در هر زاویه مشخص نسبت به جهت نورد، انرژی شکست نمونه‌ها در سه جهت شیار متفاوت، به دست آمده است، ولی در تحقیق سایرین، بجز در تحقیق جو و همکاران (در دو جهت شیار)، فقط یک جهت شیار خاص در نظر گرفته شده است. برای این‌گونه تحقیقات، شاخص ناهمسانگردی قابل تعریف نیست.

۵- در کار سایر محققین، نمونه‌ها تحت زوایای معروف ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه از ورق تسمه استخراج شده‌اند، ولی در تحقیق حاضر، نمونه‌ها با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به یکدیگر و با شروع از جهت نورد، آزمایش شده‌اند.

۳-۳- تعریف و تعیین شاخص ناهمسانگردی

به منظور مقایسه کمی تغییرات انرژی شکست در جهت‌های شیار متفاوت در سه جهت عمود بر هم، شاخصی با عنوان شاخص ناهمسانگردی (Anisotropy Index) به صورت زیر تعریف شده است:

$$Index_{Anisotropy} = \frac{((MAX(CVN))_{Ori.e. i} - (MIN(CVN))_{Ori.e. i})}{((MAX(CVN))_{Overall Ori.e.} - (MIN(CVN))_{Overall Ori.e.})} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، عبارت $(MAX(CVN))_{Ori.e. i}$ و $(MIN(CVN))_{Ori.e. i}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر انرژی شاری در جهت‌گیری موردنظر در تمام زوایا (از زاویه صفر تا ۱۱۲/۵ درجه) و در دمای هدف (در اینجا دمای محیط) است. همچنین $(MAX(CVN))_{Overall Ori.e.}$ و $(MIN(CVN))_{Overall Ori.e.}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار انرژی شاری در کل جهت‌های مورد مطالعه است. مقدار $i=1$ می‌تواند جهت شیار A، $i=2$ جهت شیار B و $i=3$ جهت شیار C باشد. مقدار شاخص ناهمسانگردی، عددی بین صفر تا یک است. اگر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، به معنای ناهمسانگردی بیشتر، و با نزدیک‌تر شدن آن به سمت صفر، به معنای همسانگردی بیشتر انرژی شکست شاری می‌باشد.

بر اساس دانش نویسندگان این تحقیق، رابطه شاخص ناهمسانگردی، که اهمیت قابل توجهی در مقایسه تغییرات انرژی شکست شاری در جهات شیار متفاوت دارد، تاکنون ارائه نشده است و تاجائی که نویسندگان می‌دانند، برای اولین بار در این تحقیق، ابداع و ارائه شده است و یکی دیگر از نوآوری‌های این تحقیق به حساب می‌آید. این شاخص برای مقایسه و بررسی شاخص ناهمسانگردی در حداقل دو جهت شیار قابل استفاده

اندازه ۱۰٪ نسبت به فولاد API X80 همسانگردی انرژی شکست بیشتری دارد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قراردادن لوله فولادی API X65، از دانشگاه پیام‌نور کرمان به لحاظ تأمین امکانات آزمایشگاهی ضربه شاری و همچنین از آقای مهندس صادقی (کارگاه ماشین‌ابزار دانشگاه بیرجند) تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با پایان‌نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1-API Specifications, 5L (2007) Specifications for line pipe. American Petroleum Institute, Washington, DC.
- 2- Rothwell AB. Fracture propagation control for gas pipelines-past, present and future. 3rd International Pipeline Technology, Belgium, 2000. 2000:387-405.
- 3- Han SY, Shin SY, Seo CH, Lee H, Bae JH, Kim K, Lee S, Kim NJ. Effects of Mo, Cr, and V additions on tensile and Charpy impact properties of API X80 pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009; 40(8):1851-62.
- 4- Van Minnebruggen K. Experimental-numerical study on the feasibility of spirally welded pipes in a strain based design context (Doctoral dissertation, Ghent University).
- 5- Akbarzadeh A, Collins LE, Kostic M, Jonas JJ. Effect of thermomechanical processing parameters on yield strength anisotropy in a niobium microalloyed steel. *In 36th Mechanical Working and Steel Processing Conference 1994* (pp. 337-344).
- 6-Mourino, N.S., Crystallographically Controlled Mechanical Anisotropy of Pipeline Steel. PhD thesis, Ghent University, 2011.
- 7- Al Jabr HM, Speer JG, Matlock DK, Zhang P, Cho SH. Anisotropy of Mechanical Properties of API-X70 Spiral Welded Pipe Steels. *In Materials Science Forum 2013* (Vol. 753, pp. 538-541). Trans Tech Publications Ltd.
- 8- Chen MY, Linkens DA, Bannister A. Numerical analysis of factors influencing Charpy impact properties of TMCR structural steels using fuzzy modelling. *Materials science and technology*. 2004; 20(5):627-33.
- 9-Majidi A, Hashemi S. Study of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2018; 17 (11): 219-228.
- 10- Tóth L, Rossmanith HP, Siewert TA. Historical background and development of the Charpy test. *In European Structural Integrity Society 2002* (Vol. 30, pp. 3-19). Elsevier.

۳-درصد تغییرات انرژی شکست در جهت شیار B، ۱۳٪ می‌باشد و کمترین و بیشترین انرژی شکست به ترتیب ۲۸۰/۶ ژول (در زاویه ۹۰ درجه) و ۳۱۷/۲۳ ژول (در زاویه ۶۷/۵ درجه) است.

۴-در نمونه‌های با جهت شیار C، کمترین و بیشترین انرژی شکست به ترتیب ۲۸۰/۴ ژول (در زاویه ۰ درجه) و ۳۰۱/۴ ژول (در زاویه ۶۷/۵ درجه) است. درصد تغییرات انرژی شکست در جهت شیار C، ۷/۴٪ می‌باشد.

۵-هرچه درصد تغییرات انرژی شکست کمتر باشد، همسانگردی بیشتری وجود دارد. بنابراین، همسانگردی انرژی شکست در نمونه‌های با جهت شیار A، بیشتر از نمونه‌های با جهت شیار C و آن‌هم بیشتر از نمونه‌های با جهت شیار B است.

۶-با توجه به اینکه بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاری در زوایای مختلف نسبت به جهت نورد، حداکثر ۱۳٪ و بیشترین تغییرات میانگین انرژی شکست شاری بین جهت‌های شیار مختلف، حداکثر ۱۲/۲٪ می‌باشد، بنابراین اثر تغییر زاویه نمونه استخراجی نسبت به جهت نورد بر روی انرژی شکست شاری، بیشتر از اثر تغییر جهت شیار نمونه است.

۷-ناهمسانگردی ایجادشده به واسطه فرآیند ساخت لوله مارپیچ، بیشتر از ناهمسانگردی ایجادشده به واسطه نوع فرآیند ساخت ورق نورد گرم شده است.

۸-در جهت قطری لوله (زاویه ۶۷/۵ درجه نسبت به جهت نورد)، بیشترین انرژی شکست شاری نمونه‌ها برای هر سه جهت شیار مشاهده می‌شود.

۹-در جهت عمود بر نورد (زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد)، ناهمسانگردی انرژی شکست به حداقل رسیده و هر سه جهت شیار، مقادیر انرژی شکست نزدیک به یکدیگری دارند. در نتیجه بیشترین همسانگردی انرژی شکست شاری بین نمونه‌ها در جهت عمود بر نورد، دیده می‌شود.

۱۰-به‌منظور مقایسه کمی تغییرات انرژی شکست در جهت‌های شیار متفاوت (سه جهت شیار عمود بر هم)، شاخصی با عنوان شاخص ناهمسانگردی تعریف شده است. مقدار این شاخص، عددی بین صفر تا یک است. اگر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، به معنای ناهمسانگردی بیشتر، و با نزدیک‌تر شدن آن به سمت صفر، به معنای همسانگردی بیشتر انرژی شکست شاری می‌باشد.

۱۱-با مقایسه شاخص ناهمسانگردی، ملاحظه می‌شود بیشترین ناهمسانگردی مربوط به نمونه‌های با جهت شیار B و کمترین ناهمسانگردی مربوط به نمونه‌های با جهت شیار A است.

۱۲-کوچک‌تر بودن شاخص ناهمسانگردی در فولاد API X65 نسبت به فولاد API X80، نشان‌دهنده همسانگردی بیشتر انرژی شکست فولاد API X65 نسبت به فولاد API X80 است. در جهت شیار A، فولاد API X65 به اندازه ۵۹٪ و در جهت شیار B، به

- 11- Mohan R, Marschall C, Krishnaswamy P, Brust F, Ghadiali N, Wilkowski G. Effects of toughness anisotropy and combined tension, torsion, and bending loads on fracture behavior of ferritic nuclear pipe. Battelle Memorial Inst., Columbus, OH (United States); 1995.
- 12- García OL, Petrov RH, Bae JH, Kestens LA, Kang KB. Microstructure-texture related toughness anisotropy of API-X80 pipeline steel. In *Advanced Materials Research 2007* (Vol. 15, pp. 840-845). Trans Tech Publications Ltd.
- 13- Joo MS, Suh DW, Bae JH, Bhadeshia HK. Role of delamination and crystallography on anisotropy of Charpy toughness in API-X80 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2012; 546:314-22.
- 14- Mourino NS, Petrov R, Bae JH, Kim K, Kestens LA. Texture dependent mechanical anisotropy of X80 pipeline steel. *Advanced Engineering Materials*. 2010 ;12(10):973-80.
- 15- Reip CP, Shanmugam S, Misra RD. High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn (V-Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology: Microstructure, Precipitation and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2006; 424(1-2):307-17.
- 16- 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.
- 17- ASTM E2. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. E23-07a, Pennsylvania, PA, USA. 2007.
- 18- ASTM A. 20/A20M-99a. 1999. Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels.
- 19-ASTM, A 370-91a. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Philadelphia, p. 249-294. 1992.
- 20- Callister WD, Rethwisch DG. *Materials science and engineering: an introduction*. New York: Wiley; 2018.