

تعیین ضرایب اصلاح بوسیله آزمایش ضربه شاریبی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شصت و پنج با ضخامت متفاوت

جلال الدین صدر^{۱*}، سیدحجت هاشمی^۲، علی اکبر مجیدی جیرندهی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشگاه بیرجند)

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشگاه بیرجند)

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشگاه پیام‌نور)

Jalaleddin.sadr@yahoo.com

Shhashemi@birjand.ac.ir

aliakbar.majidi@PNU.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این تحقیق تعیین نیروهای تسلیم و بیشینه بارگذاری دینامیکی و ضرایب اصلاح برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی با چقرمگی بالا است. برای این منظور انرژی شروع و انرژی رشد ترک در فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه ضربه شاریبی مجهز شده بدست آمد. برای توصیف رفتار دینامیکی فولاد به‌ازای تغییر ضخامت نمونه شاریبی روابط توانی با دقت بالا برای تخمین انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و نیروهای مذکور بدست آمد. میانگین ضریب اصلاح برای کاربرد در مدل‌های پیش‌بینی شکست لوله‌های فولادی انتقال انرژی از تحقیق حاضر برابر ۱/۲۶ بدست آمد که با نتایج موجود در مقالات از مطابقت خوبی برخوردار است. با بررسی نیروهای مشخصه و ترسیم نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه، مشخص شد که افزایش ضخامت نمونه منجر به کاهش قابلیت کارسختی فولاد آزمایش شده می‌شود.

کلیدواژگان

انرژی شکست؛ انرژی شروع ترک؛ انرژی رشد ترک، ماشین شاریبی مجهز شده؛ فولاد API X۶۵

Experimental determination of correction factors from Charpy impact testing of API X⁷⁰ steel with varying specimen thickness

Jalaleddin Sadr^{1*}: Ph.D student, Faculty of Mechanical Engineering (University of Birjand)

Seyyed Hojjat Hashemi: Professor, Faculty of Mechanical Engineering (University of Birjand)

Ali Akbar Majidi-Jirandehi: Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering (Payame Noor University)

Jalaleddin@sadr@yahoo.com

Shhashemi@birjand.ac.ir

aliakbar.majidi@PNU.ac.ir

Abstract

The purpose of this research, in addition to **determining** the characteristic forces including the yield force and maximum force, was to calculate the correction factors to predict the onset of failure in the energy transmission pipelines with high toughness under dynamic (impact) loading. To achieve this goal, an instrumented Charpy impact machine, which plot the force-displacement diagram during the impact test, was used. Then, by dividing the area under the force-displacement diagram into two **parts**, both the initiation energy and crack growth energy in API X⁷⁰ steel were calculated. The results showed that the total energy provided by the machine dial had good agreement with the total energy calculated from the area under the force-displacement curve. Characteristic forces, also determined from **the** force-displacement curve as were described in the BS 14546 standard. After that, Power law expressions with high accuracy for describing the behavior of the tested steel against **variations** of the Charpy sample thickness for crack initiation energy, crack propagation energy, and characteristic forces were extracted. Additionally, the average correction factor, which is **used** in prediction models of energy transmission steel pipelines, was found to be 1.27, which is in good agreement with the available results for the current steel in **the** literatures. It was shown that by increasing the thickness, due to **the** transition from plain stress to plain strain condition, the correction factor **changed** from 1.27 to 1.3 in 8 to 10 mm thicknesses, while it **did** not changed so much from 4 to 8 mm thicknesses. By examining the characteristic forces and plotting the ratio of the yield force to the maximum force versus thickness variation, it was also found that increasing the thickness **leads** to decreasing the work hardening of the steel.

Keywords

Fracture energy; Crack initiation energy; Crack propagation energy; Instrumented Charpy impact machine; API X⁷⁰

منحنی مستقل است. یکی با نام فشار گذاری گاز^۲ که به عنوان منحنی محرک شکست^۴ معروف است و دیگری مقاومت گسترش ترک دینامیکی^۵ که به عنوان منحنی مقاومت شکست^۶ معرفی می‌شود.

بر اساس نتایج این مدل برای طیف وسیعی از خواص مکانیکی و مقادیر انرژی شکست شارپی CVN، چقرمگی توقف شکست^۷ برای نمونه شارپی با ضخامت ۲/۳ ضخامت نمونه استاندارد (که ۱۰ میلی‌متر ضخامت دارد)، به عنوان تابعی از تنش محیطی و هندسه لوله (شعاع و ضخامت) بصورت زیر کمی‌سازی شد [۲]:

$$C_{V(2/3)} = 7/2 \times 10^2 \cdot \sigma_h^2 (Rt)^{3/2} \quad (1)$$

در این رابطه R شعاع لوله، t ضخامت لوله و σ_h تنش محیطی می‌باشد. با استفاده از این معادله یک مجهول (انرژی شارپی، هندسه یا فشار داخلی لوله) قابل حصول است.

با بهبود فناوری ساخت فولادها علاوه بر حصول استحکام بالاتر، چقرمگی شکست نیز افزایش یافت. اما مشخص شد که این مدل و دیگر مدل‌ها برای فولادهای با چقرمگی بالا (بالاتر از ۹۵ ژول) نتایج غیرمحافظة کارانه‌ای را در مقایسه با انرژی شکست شارپی در آزمایشگاه پیش‌بینی می‌کند. به همین دلیل محققین متعددی تحقیقات گسترده‌ای برای اصلاح مدل مذکور انجام دادند [۳]. هاشمی برای فولاد API X۶۵ نسبت انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک را به عنوان ضریب تصحیح معرفی کرد و از آن برای تخمین انرژی شکست شارپی فولاد پایه، فلز جوش و فلز ناحیه متأثر از حرارت^۸ استفاده کرد [۴]. وی، همچنین برای سه فولاد API X۷۰، API X۸۰ و API X۱۰۰ ضرایب تصحیحی را بدست آورد [۵-۱۰].

انرژی شکست مواد نرم که به هنگام شکست دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شوند فقط در سطح مقطع مصرف نمی‌شود (محل تماس چکش با قطعه و اصطکاک نمونه با سندان). ضمن این‌که مصرف انرژی در سطح مقطع یکسان نیست، بنابراین، انرژی شکست را نمی‌توان به خودی خود به عنوان یک خواص مکانیکی در نظر گرفت، چون تا حدودی به هندسه وابسته است. به همین

مطالعه رفتار مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی از مسائل حائز اهمیت در دنیای مهندسی است. از سازه‌هایی که در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند می‌توان به مخازن تحت فشاری که تحت نیروی زلزله قرار دارند و یا سازه‌های هواپیماها، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها که به ترتیب در معرض نیروهای آترو دینامیکی و هیدرودینامیکی (به خصوص ضربه‌های امواج دریا) قرار دارند، اشاره نمود. از اینرو جوامع مهندسی برای تعیین پارامتری مناسب جهت تعیین استحکام شکست مواد و سازه‌ها آزمایش‌هایی را طراحی کردند که نیروهای دینامیکی را شبیه‌سازی کند. از جمله این آزمایش‌ها می‌توان به آزمون ضربه شارپی اشاره نمود. اما این آزمون به خودی خود تنها یک آزمون کیفی است و تنها می‌توان چقرمگی و انرژی شکست مواد را از آن بدست آورد. نکته این‌که مهندسان طراح برای طراحی سازه‌هایی که تحت بارگذاری استاتیکی قرار دارند به نیروی تسلیم و نیروی بیشینه ماده برای مقایسه دو حالت، حین کار و بحرانی دسترسی دارند. به همین دلیل دانشمندان متعددی اقدام به تجهیز کردن دستگاه شارپی به نیروسنج نمودند تا بتوانند نیروهای تسلیم و بیشینه تعیین نمایند [۱]. با این حال، در یکی دو دهه اخیر تعداد مقالاتی که از دستگاه شارپی مجهز شده در آن‌ها استفاده شده است قابل توجه نیست. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که موسسات و دانشگاه‌هایی مانند دانشگاه پوهانگ کره جنوبی، دانشگاه آخن آلمان، مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا و غیره به آرامی به سمت استفاده از دستگاه ضربه شارپی مجهز شده جهت برآورد خواص مکانیکی فولادهای استفاده شده در صنعت نفت و گاز مانند X۶۵، X۷۰، X۸۰، X۱۰۰، X۱۲۰، حرکت کرده‌اند.

در دهه ۷۰ میلادی به دلیل نگرانی از شکست خطوط انتقال نفت و گاز مدرن پرفشار، مبحثی با عنوان کنترل گسترش شکست نرم مطرح شد. مکسی^۱ در شرکت بتل یک مدل دومنحی^۲ را جهت تعیین چقرمگی مورد نیاز برای توقف شکست نرم فولادهای مذکور در قالب انرژی ضربه شارپی توسعه داد [۲]. این مدل شامل دو

^۵ Dynamic crack-propagation resistance

^۶ Fracture resistance curve

^۷ Arrest fracture toughness

^۸ Heat affected zone

^۱ Maxey

^۲ Battelle Two-curve Model

^۳ Gas-decompression

^۴ Fracture-driving curve

دلیل نمی‌توان ظرفیت تحمل ضربه یک سازه یا قطعه‌ای را که اندازه آن مشابه به اندازه استاندارد نیست، پیش‌بینی کرد. از اینرو تحقیقاتی متعددی برای یافتن ارتباط بین انرژی ضربه و ابعاد نمونه انجام شده است.

در مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا لوکان و همکاران در مقاله‌ای [۱۱] انرژی شکست، نمودارهای دمای انتقال شکست نرم به ترد و ظاهر شکست برشی^۱ را برای فولادهای X۱۰۰, X۷۰, X۶۵ و X۵۲ گزارش کردند. در این مقاله آنها روابطی برای ارتباط دادن انرژی شکست نمونه شاریپی که دارای اندازه کامل است را با نمونه‌های شاریپی که اندازه‌های آن به ترتیب ۲/۳، ۱/۲ و ۱/۴ برابر نمونه کامل است، ارائه کردند. لوکان در یک گزارش فنی نیروهای ویژه را برای فولادهای نامبرده با ابعاد بیان شده ارائه داد [۱۲]. وی همچنین رابطه‌ای برای تخمین استحکام کششی نهایی دینامیکی از نیروی بیشینه اندازه‌گیری شده در آزمون شاریپی مجهز شده ارائه داد [۱۳]. لوکان با انجام آزمایش‌های کششی در نرخ‌های کرنش مختلف و آزمایش‌های شاریپی مجهز شده برای ۱۰ ماده مختلف، مقادیر استحکام تسلیم دینامیکی را که هم از آزمایش‌های کششی اندازه‌گیری شده و هم با استفاده از معادله سرور^۲ برآورد شده‌اند، جهت برآورد نرخ کرنش معادل، مقایسه کرد [۱۴].

حسین‌زاده و همکاران با شبیه‌سازی به مطالعه رابطه بین عمق شیار و انرژی شکست فولاد API X۶۵ پرداختند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی بدست آمده از دستگاه شاریپی معمولی ۷۵۰ ژول زوئیک مقایسه کرده و یک رابطه‌ی نمایی بین انرژی شکست و عمق شیار نمونه شاریپی ارائه دادند [۱۵]. به طور مشابه، شاهسونی و هاشمی اثر شعاع شیار بر انرژی شکست فولاد API X۶۵ را با نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کرده و نتایج را با آزمون‌های تجربی انجام شده توسط دستگاه شاریپی ۷۵۰ ژول معمولی مقایسه کردند [۱۶]. صدر و همکاران نیز با استفاده از ضربه شاریپی مجهز شده ۴۵۰ ژول نمودارهای نیرو-جابجایی را برای عمق شیارهای متفاوت استخراج کرده و به محاسبه انرژی‌های جزء و نیروهای مشخصه پرداختند. در آن تحقیق اثر عمق شیار بر انرژی شکست و ضرایب تصحیح مطالعه شد [۱۷]. آن‌ها همچنین، درحال انجام تحقیق بر روی اثر عمق شیار و ضخامت نمونه شاریپی بر چقرمگی شکست (K_I) هستند. علاوه بر این، اثر زاویه شیار و شعاع

نوک شیار بر انرژی شکست و چقرمگی شکست و ضرایب اصلاح انجام شده است که در آینده نزدیک به چاپ خواهد رسید.

ونگ و همکاران [۱۸] نیز یک مدل ریاضی برای انرژی ضربه شاریپی ارائه داده و کارائی آن را با تعدادی آزمون تجربی تأیید کردند. تجزیه و تحلیل نظری و نتایج تجربی نشان داد که رابطه بین ارتفاع باقی‌مانده شیار^۳ و انرژی ضربه از درجه دو پیروی می‌کند، درحالی‌که رابطه بین ضخامت نمونه و انرژی ضربه خطی است. مطالعه اثر ابعاد نمونه بر انرژی شکست بقدری اهمیت دارد که در آزمایش ضربه سقوطی برای فولادهای API X۷۰ و API X۸۰ نیز مطالعه شده است [۱۹, ۲۰].

همان‌گونه که در بالا اشاره شد تعداد مقالاتی که از دستگاه ضربه شاریپی مجهز شده جهت بررسی رفتار مواد در برابر نیروهای دینامیکی استفاده شده است، در مقایسه با مقالاتی که از دستگاه شاریپی معمولی استفاده کرده‌اند بسیار ناچیز است. اهمیت استفاده از این دستگاه زمانی به چشم می‌آید که طراح نیاز به پارامترهای طراحی سازه در برابر نیروهای دینامیکی داشته باشد. چراکه با استفاده از اطلاعات خروجی آن می‌توان ضرایب چقرمگی شکست دینامیکی (K_{Id} , J_{Id}) و در نتیجه ارزیابی اثرات دما و نرخ بارگذاری بر ماده مورد نظر را بدست آورد [۲۱].

از اینرو، در این تحقیق به تعیین پارامترهای مهم شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه، برای فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه ضربه شاریپی مجهز شده پرداخته شده است. علاوه بر این، یک رابطه توانی جهت تخمین انرژی شکست برای ضخامت‌های متفاوت نمونه شاریپی از فولاد مذکور است. همچنین، تغییرات ضریب اصلاح به‌ازای تغییر ضخامت محاسبه و گزارش شده است.

۲- ماده و روش انجام آزمایش

۲-۱ ماده آزمایش

فولادی که در این تحقیق استفاده شده است با نام تجاری API X۶۵ شناخته می‌شود. از این فولاد در لوله‌های انتقال صنعت نفت و گاز ایران بسیار استفاده می‌شود. مشخصات مربوط به این نوع فولادها در موسسه بین المللی نفت آمریکا^۴ استاندارد شده است [۲۲]. استحکام تسلیم و نهایی این فولاد به ترتیب برابر با ۴۹۰ و

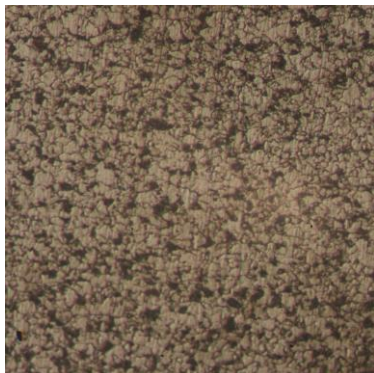
^۱ Ligament

^۴ American Petroleum Institute

^۱ Shear Fracture Appearance

^۲ Server's Equation

دانه‌بندی ریز آن مقاومت در برابر رشد ترک تورقی^۲ افزایش می‌یابد. هاشمی و همکاران میکروساختار فلز پایه^۳، فلز جوش^۴ و ناحیه متأثیر از حرارت (HAZ)^۵ این فولاد را مطالعه کردند [۲۶، ۲۵].



شکل ۱- ریزساختار فلز پایه فولاد API X65 [۲۵]

۲-۲ دستگاه شارپی مجهز شده

برای انجام آزمایش از دستگاه شارپ SIT ۴۵۰ سنتم استفاده شده است (شکل ۲). مزیت این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های این شرکت توانایی ثبت و گزارش داده‌های نیرو بر حسب جابجایی است. علاوه بر این، به دلیل داشتن بدنه‌ای که به صورت یکپارچه ریخته‌گری شده است صلبیت و دقت دستگاه به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. این دستگاه مجهز به چکش C شکل و وزن آن برابر با ۳۲/۱ کیلوگرم است. زاویه‌ای که چکش از آن رها می‌شود برابر با ۱۵۰/۱ درجه می‌باشد. سرعت در لحظه برخورد برابر با ۵/۲۶ متر بر ثانیه است. شعاع نوک چکش مطابق با استاندارد ASTM E۲۳ [۲۷] برابر با ۸ میل‌متر است.

۵۵۲ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت ۰/۸۹ را تأمین می‌نماید. درصد ازدیاد طول در ۵۰ میلی‌متر برابر با ۲۱ درصد بدست آمد [۲۳]. الزامات موسسه بین‌المللی نفت آمریکا حداقل و حداکثر تنش تسلیم را برای این فولاد به ترتیب برابر با ۴۴۸ و ۶۰۰ مگاپاسکال و در مورد تنش نهایی به ترتیب ۵۳۱ و ۷۵۸ مگاپاسکال تعریف می‌کند. مشاهده می‌شود که تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد مورد نظر در محدوده مورد نظر این استاندارد قرار گرفته است. در جدول ۱ علاوه بر ترکیب شیمیایی این فولاد مقادیر مشخص شده آن‌ها در موسسه بین‌المللی نفت آمریکا آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی

عنصر	درصد وزنی	API ۵L X۶۵
آهن (Fe)	پایه	---
کربن معادل (CE)	۰/۳۴	حداکثر ۰/۴۳
کربن (C)	۰/۰۷۲	حداکثر ۰/۲۲
منگنز (Mn)	۱/۴۵	حداکثر ۱/۴۵
فسفر (P)	۰/۰۰۸	حداکثر ۰/۰۲۵
سولفور (S)	۰/۰۰۲	حداکثر ۰/۰۶
تیتانیوم (Ti)	۰/۱۵	---
سیلیکون (Si)	۰/۲۰۱	---
ناپوبیوم (Nb)	۰/۴۷	---
کرم (Cr)	۰/۱۷۴	---
مولیبیدن (Mo)	۰/۲۴	---
وانادیوم (V)	۰/۰۵	---
نیکل (Ni)	۰/۰۰۹	---
مس (Cu)	۰/۰۰۸	---
آلومینیوم (Al)	۰/۲۳	---

این فولاد با دو ریزساختار فریت-پرلیتی یا فریت سوزنی-باینیتی تولید می‌شود که ساختار دوم به دلیل ترکیب بهتر استحکام و چقرمگی، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و همچنین جوش‌پذیری عالی نسبت به ساختار اول در خطوط انتقال نفت و گاز ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی‌های مذکور اجازه می‌دهد این نوع فولاد در ساخت لوله‌های با قطر زیاد برای انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود ریزساختار فلز پایه در این فولاد بسیار ریزدانه است (میانگین اندازه دانه حدود ۳ الی ۷ میکرون) [۲۴]. فریت سوزنی ساختاری بسیار مناسب جهت افزایش چقرمگی ناحیه جوش می‌باشد. به دلیل ماهیت درهم قفل‌شوندگی^۱ ساختار فریت سوزنی به همراه

^۳ Base material

^۴ Weld metal

^۵ Heat affected zone

^۱ Interlocking nature

^۲ Cleavage crack

نکته قابل توجه این است که با کم شدن ضخامت نمونه شاری عملاً چکش در محل مرکز ضربه^۱ به نمونه شاری ضربه وارد نمی‌کند. بنابراین، هرچقدر ضخامت نمونه شاری کاهش یابد خطای دستگاه شاری در گزارش انرژی شکست افزایش می‌یابد. محل مرکز ضربه ۵ میلی‌متر بالاتر از سطحی است که نمونه استاندارد شاری بر روی آن قرار داده می‌شود تا از طرف چکش به آن ضربه وارد شود. به همین دلیل، برای اینکه بتوان نمونه‌های شاری با ضخامت ۴ تا ۹ میلی‌متر را به گونه‌ای بر روی سندان قرار داد که مرکز ارتفاع نمونه دقیقاً منطبق با مرکز ضربه قرار گیرد، نمونه‌هایی با شکلی کاملاً مشابه با نمونه شاری اما از جنس اسید پلی‌لاکتیک یا پلی‌لاکتاید^۲ با استفاده از پرینتر سه‌بعدی ساخته شد و در موقع آزمایش در زیر نمونه‌ها به عنوان زیرکاری قرار داده شد. ضخامت‌های ۰/۵ الی ۳ میلی‌متر با گام ۰/۵ به ترتیب برای ضخامت‌های ۹ تا ۴ میلی‌متر ساخته شد. اما از آنجایی که خود این نمونه‌ها می‌توانند باعث افزایش انرژی شکست شوند، شیری با عمق ۹/۷ میلی‌متر و با شعاع صفر در آنها ایجاد شد تا مقاومت آنها به کمترین حد امکان برسد.



شکل ۳- یک دسته از نمونه‌های شاری بعد از شکسته شدن در نیتروژن مایع (اعداد ضخامت‌های نمونه شاری هستند)



شکل ۲- نمای کلی از دستگاه ضربه شاری مجهز شده سننام مدل SIT-۴۵۰

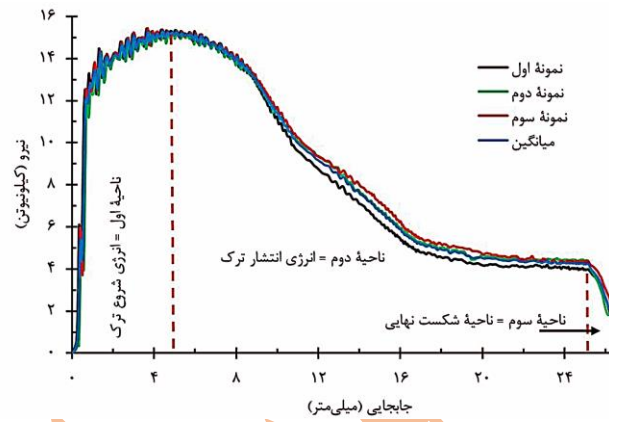
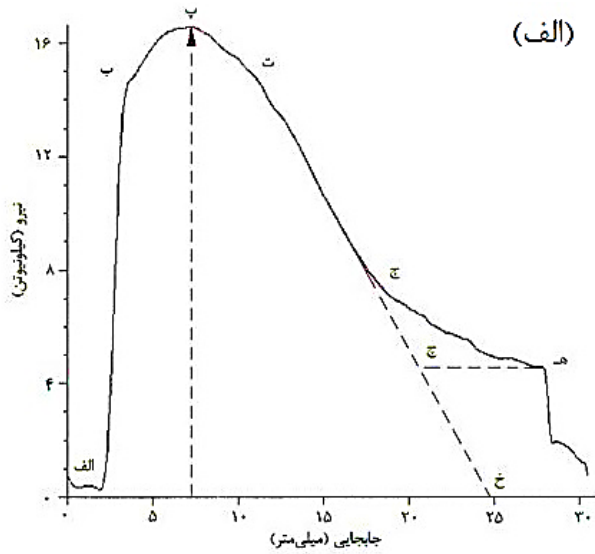
۳- نتایج تجربی

۳-۱- طرح آزمایش

مطابق با استاندارد ASTM E۲۳ و یا ASTM A۳۷۰ نمونه استاندارد شاری دارای سطح مقطع مربعی شکل به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر و طول ۵۵ میلی‌متر است که در وسط آن یک شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه و عمق ۲ میلی‌متر ایجاد شده است [۲۷، ۲۸]. اما در این تحقیق تعداد ۷ دسته از نمونه شاری با ضخامت‌های ۴ الی ۱۰ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۳). برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج از هر دسته ۳ عدد نمونه شاری در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر نمونه استخراج شد. از نمودار میانگین در هر دسته برای گزارش نیروهای ویژه و میزان انرژی جذب شده و تعیین اثر تغییر ضخامت بر انرژی شکست استفاده شد. برای گزارش نیروی تسلیم مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM ۲۲۹۸-۱۳ و BS EN ISO ۱۴۵۵۶:۲۰۰۰ عمل شده است [۲۹، ۳۰]. با مراجعه به شکل ۵-ب دیده می‌شود یک منحنی، که معمولاً چند جمله‌ای می‌باشد، در قسمت بالایی نمودار نیرو-جابجایی عبور داده شده است. برخورد این منحنی با قسمتی از نمودار نیرو-جابجایی که در آن رفتار بین نیرو و جابجایی متناسب است (بعد از قله دوم نوسانات به عنوان نیروی تسلیم تعریف می‌شود. نیروی بیشینه نیز بیشترین نیرو حاصل شده از ضربه در منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد.

^۲ Polylactic acid or polylactide, PLA

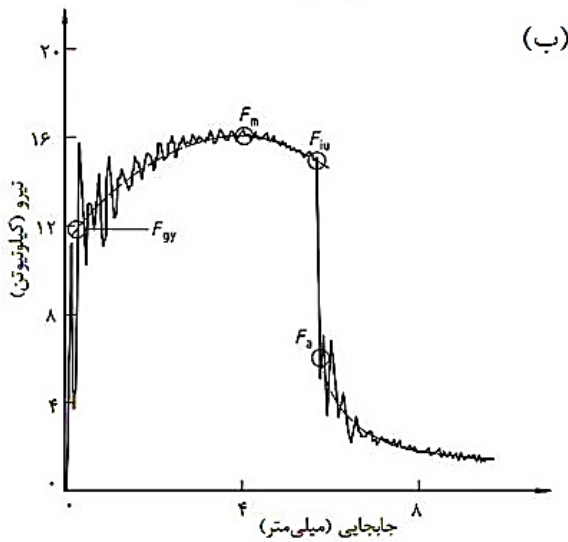
^۱ Center of percussion



شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های استاندارد شاریپی

۲-۳- تفسیر نمودار شاریپی

نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد شاریپی فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه شاریپی مجهز شده ۴۵۰ ژول برای اولین بار به همراه مقدار میانگین آن در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. مطابق با استاندارد BS EN ISO ۱۴۵۵۶:۲۰۰۰ نمودار بدست آمده از نوع F می‌باشد [۳۰]. این نمودار دارای نقاط ویژه‌ای است. برای تفسیر نمودار آورده شده در شکل ۴ و نحوه تعیین مقادیر مذکور شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی: الف) نقاط ویژه [۳۱]، ب) نیروهای ویژه [۳۰]

با توجه به شکل ۵-الف چنانچه رفتار ماده بسیار ترد باشد نقطه (ت) بر (پ) منطبق می‌شود. در مواد با تردی کمتر نمودار در نقطه (ت) دچار یک افت ناگهانی مشابه شکل ۵-ب می‌شود و نیرو به صورت جابجایی-ثابت و به صورت عمودی تا نقطه (ج) که به نیروی توقف ترک^۱ معروف است، افت یا سقوط ناگهانی می‌کند.

^۱ Crack arrest force

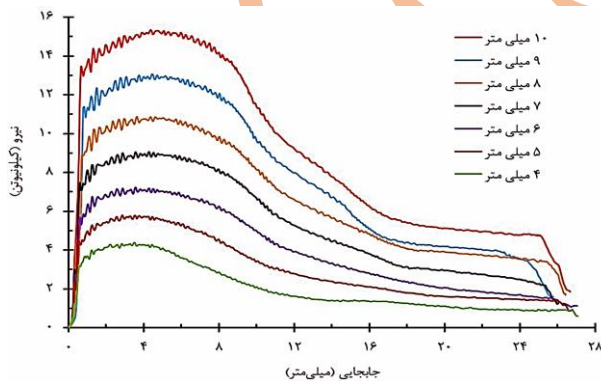
اما همان‌گونه در شکل ۴ دیده می‌شود این قسمت از نمودار نه دارای شیب ثابت و نه دارای افت ناگهانی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فولادی که دارای چنین نموداری است (شکل ۴) از چقرمگی بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد بسیار پایین برخوردار است. هر دو این موارد از ویژگی‌های بارز فولاد API X۶۵ است. نکته‌ای دیگر که از نوع نمودار می‌توان به آن رسید آن است که عدم وجود شیب مذکور بیان‌کننده آن است که فولاد در برابر رشد ترک ناپایدار بسیار مقاوم است؛ هرچند در بعضی مقالات اذعان شده است که نمونه شاری برای ایجاد یک حالت شکست پایدار بسیار کوچک است [۳۲]. همچنین، با این نوع نمودار می‌توان گفت که نمونه دچار شکست نرم شده است. باید این نکته را به خاطر سپرد که شکست ترد به دما و اندازه دانه در نمونه شاری وابسته است. بنابراین، دستگاه شاری مجهز شده این امکان را به محقق می‌دهد تا با استخراج نمودار نیرو-جابجایی مقاومت ماده را در برابر رشد ترک ناپایدار در برابر نیروهای ضربه‌ای برآورد کند. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود در انتهای منحنی نیرو-جابجایی یک پرش ایجاد شده است. دلیل این پرش احتمالاً بخاطر اثر برهم‌کنش نمونه شاری با گوشه‌های چکش با شعاع ۸ میلی‌متر (استاندارد ASTM E۲۳) است. نکته‌ای جالب که باید به آن اشاره کرد این است که این پرش در نمودار نیرو-جابجایی حاصل از دستگاه ضربه شاری که شعاع چکش آن مطابق با استاندارد ISO ۱۴۸-۲، [۳۳]، ۲ میلی‌متر است، دیده نمی‌شود [۳۴-۳۷]. نوک این چکش به صورت یک منحنی ساده و بدون گوشه است. نمونه شاری در این قسمت از نمودار هنوز بر روی چکش قرار دارد اما در حال پرتاب شدن به بیرون از دستگاه شاری می‌باشد. به عبارت دیگر چکش نمونه‌ها خم کرده و از حدفاصل بین دو تکیه‌گاه (سندان) گذرانده است.

در قسمتی از نمودار که سه منحنی از یکدیگر جدا می‌شوند (در جابجایی حدود ۹ میلی‌متر)، دلیل آن می‌تواند عدم بروز رفتار یکسان نمونه‌ها نسبت به یکدیگر در برابر نیرو به هنگامی که ماده وارد حالت پلاستیک شده است، باشد. به همین دلیل است که معیارهای آسیب متفاوت و با دقت‌های متفاوت برای توصیف رفتار مواد وقتی وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، ارائه شده است. از جمله این معیارها که بسیار پرکاربرد است می‌توان به معیار گرسون-

تیرورگارد-نیدلمن^۱ اشاره کرد. شاهسونی، محیط زاده و هاشمی با استفاده از این معیار به شبیه‌سازی آزمایش ضربه شاری پرداختند و ضرایب مدل مذکور را استخراج نمودند [۱۶، ۳۸]. شایان ذکر است که در دو مرجع مذکور از دو دستگاه شاری متفاوت استفاده شد.

جهت اطمینان از دقت اطلاعات بدست آمده از کرنش‌سنج باید به منطبق بودن قسمت الاستیک ماده برای هر سه نمونه استناد نمود. در شکل ۴ دیده می‌شود که هر سه نمودار از سه نمونه استاندارد شاری در قسمت مذکور از انطباق بسیار خوبی برخوردار هستند. علاوه بر این، در قسمت تغییرشکل پلاستیک و قسمت نرم‌شوندگی بعد از آن (حدفاصل نقاط (پ) تا (ت)) بر یکدیگر منطبق هستند. در شکل ۶ مقادیر میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی برای ۷ ضخامت مختلف برای مقایسه آورده شده است. مطابق با این شکل با کاهش ضخامت نمونه شاری اندازه نمودار نیرو-جابجایی نیز کوچک می‌شود. متعاقب با آن نیز انرژی مورد نیاز برای شکست نمونه و البته نیروهای ویژه کاهش می‌یابد.

همانگونه که در بالا اشاره شد هدف تعیین نیروهای ویژه برای فولاد مورد نظر است. در جدول ۲ علاوه بر انرژی کلی شکست خوانده شده از صفحه مدرج دستگاه، انرژی کلی شکست محاسبه شده با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مدار کرنش‌سنج، اختلاف بین این دو انرژی، انرژی شروع ترک و انرژی رشد ترک، نیروی تسلیم F_{gy} و نیروی بیشینه F_{max} آورده شده است.



شکل ۶- میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی برای تمامی ضخامت‌ها (۷ گروه نمونه‌ها)

بیشترین مقدار انرژی که از صفحه مدرج خوانده شد برابر با ۲۵۵ ژول برای نمونه با ضخامت کامل (۱۰ میلی‌متر) و کمترین آن برابر با ۶۲ ژول برای ضخامت ۴ میلی‌متر بدست آمد. بیشترین و کمترین

^۱ Gurson-Tvergaard-Needleman

مقدار نیروی تسلیم به ترتیب برابر با ۳ و ۱۳ کیلونیوتن حاصل شد. مقادیر متناظر برای نیروی بیشینه نیز به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵ کیلونیوتن بدست آمد. برای محاسبه تنش تسلیم نیاز به ضریب قید^۱، C_{gy} ، است که به نوع چکش (۲ یا ۸ میلی‌متری) و شعاع نوک شیار نمونه شاری بستگی دارد [۱۳]. از آنجایی که در این تحقیق نمونه‌های با شیار V شکل توسط دستگاه شاری مجهز شده با چکش ۸ میلی‌متر (مطابق با استاندارد ASTM E۲۳) آزمایش شده‌اند ضریب مذکور برابر با ۱/۳۳۶ می‌باشد [۱۳]. رابطه محاسبه تنش تسلیم در مرجع مذکور به صورت زیر است و نتایج آن برای این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

$$\sigma_{gy} = \frac{3/732 F_{gy} W}{C_{gy} B(W-a)^2} \quad (2)$$

در رابطه بالا W عرض نمونه شاری، a عمق شیار، B ضخامت نمونه شاری، F_{gy} نیروی تسلیم و C_{gy} ضریب قید است. به لحاظ ریاضی در رابطه (۲) تمامی متغیرها به غیر از F_{gy} و B ثابت هستند. بنابراین این دو متغیر تعیین کننده تنش تسلیم خواهد بود. همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است با افزایش ضخامت، تنش تسلیم افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد اثر نیروی تسلیم که در صورت کسر قرار دارد به مراتب بیشتر از اثر ضخامت است که در مخرج کسر قرار گرفته است. این امر به دلیل ماهیت

دینامیکی بارگذاری است. در انتها می‌توان به این موضع اذعان داشت که تغییر تنش تسلیم با تغییر ضخامت به صورت خطی است. در جدول ۲ همچنین نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کلی شکست و نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کلی شکست محاسبه شده‌اند. در ستون آخر جدول ۲ نیز، نسبت انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک که به عنوان ضریب اصلاح معرفی می‌شود، برای تمامی ضخامت‌ها آورده شده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد از این مقادیر برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی با چقرمگی بالا که با دستگاه ضربه شاری مرسوم آزمایش می‌شوند، استفاده می‌شود.

با توجه به مقادیر حاصل شده دیده می‌شود که ضرایب تصحیح تا ضخامت ۹ میلی‌متر بین مقادیر ۱/۲۵ و ۱/۲۷ تغییر می‌کند. به محض آنکه ضخامت به ۱۰ میلی‌متر می‌رسد مقدار مذکور به ۱/۳۰ ارتقا می‌یابد. علت این امر را می‌توان به انتقال از حالت تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای نسبت داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب اصلاح به حالت بارگذاری و متعاقباً به اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک بستگی دارند.

مقدار ضریب اصلاح بدست آمده در این تحقیق برای ضخامت ۱۰ میلی‌متر با مقدار بدست آمده در مرجع [۴] برابر می‌باشد. میانگین حاصل نیز برابر با ۱/۲۶ است.

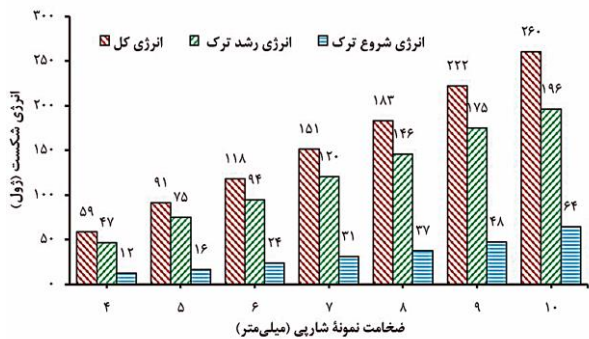
جدول ۲- مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی

شماره گروه نمونه‌ها	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	نیروی تسلیم F_{gy} (کیلونیوتن)	نیروی بیشینه F_{max} (کیلونیوتن)	تنش تسلیم (MPa)	F_y/F_{max}	انرژی کلی شکست از صفحه مدرج دستگاه	انرژی (ژول)			نسبت انرژی کلی شکست به انرژی رشد ترک	نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کلی شکست
							انرژی شروع ترک E_i	انرژی رشد ترک E_p	انرژی شکست کلی E_{ESG}		
۱	۴	۳/۱۳	۴/۳۹	۳۴۲	۰/۷۱	۶۲	۱۲	۴۷	۰/۲	۰/۸	۱/۲۶
۲	۵	۴/۱۳	۵/۷۲	۳۶۱	۰/۷۲	۹۱	۱۶	۶۷	۰/۱۹	۰/۸۱	۱/۲۴
۳	۶	۵/۴۵	۷/۱۴	۳۹۶	۰/۷۶	۱۲۶	۲۴	۹۴	۰/۲	۰/۸	۱/۲۵
۴	۷	۶/۹۲	۸/۹۵	۴۳۱	۰/۷۷	۱۶۳	۳۱	۱۲۰	۰/۲۱	۰/۷۹	۱/۲۶
۵	۸	۸/۷۹	۱۰/۷۵	۴۷۹	۰/۸۲	۱۸۱	۳۷	۱۴۶	۰/۲	۰/۸	۱/۲۶

^۱ Constrain factor

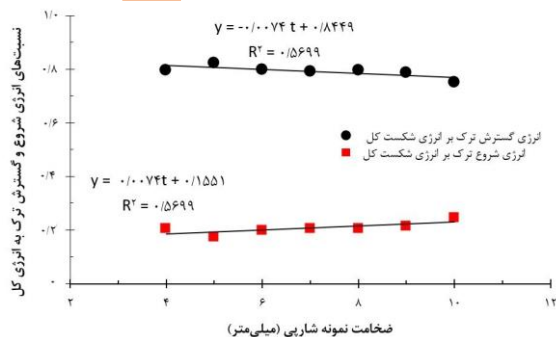
۱/۲۷	۰/۷۹	۰/۲۱	۱۷۴	۴۷	۱	۲۲۲	۲۲۰	۰/۸۳	۵۲۱	۱۲/۹۶	۱۰/۷۳	۹	۶
۱/۳۰	۰/۷۵	۰/۲۵	۱۹۶	۶۴	-۲	۲۶۰	۲۵۵	۰/۸۴	۵۵۹	۱۵/۲۲	۱۲/۸۰	۱۰	۷
۱/۲۶	۰/۷۹	۰/۲۱	میانگین										

در روابط بالا E_D و E_{SG} به ترتیب انرژی کل صفحه مدرج دستگاه شاریبی و انرژی کل حاصل از اطلاعات کرنش‌سنج است. t ضخامت، E_i انرژی شروع ترک و E_p انرژی رشد ترک است. برای مقایسه بهتر تغییرات انرژی‌های بیان شده نسبت به تغییرات ضخامت، یک نمودار ستونی در شکل ۸ آورده شده است.



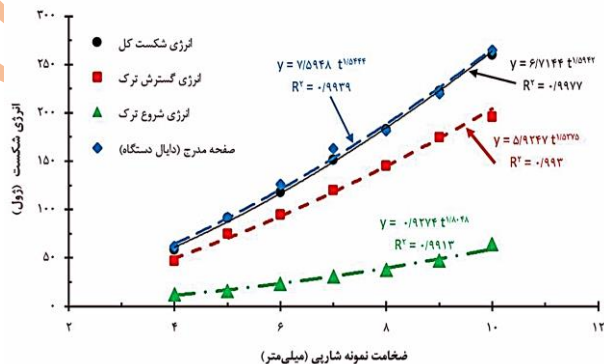
شکل ۸- تغییرات انرژی شروع، رشد و کل ترک در برابر تغییرات ضخامت

در شکل ۹ تغییرات نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل شکست و نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت ترسیم و یک برازش خطی انجام شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود تا ضخامت ۹ میلی‌متر نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل روند افزایشی آرامی دارد. به همین ترتیب در مورد نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل نیز روند کاهشی آرام دیده می‌شود. اما در ضخامت ۱۰ میلی‌متر یک پرش ۵ درصدی در هردو انرژی دیده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت باعث می‌شود که انرژی شروع ترک سهم بیشتری را برای رشد ترک تقاضا کند تا بتواند فیوید (مواد) جلوی ترک را تسلیم کرده و ناحیه پلاستیک را در آن نقطه ایجاد نماید.



برای توصیف رفتار ماده، تغییرات انرژی در برابر تغییرات ضخامت در شکل ۷ ترسیم شد. همانگونه که از شکل ۷ و نتایج ارائه شده در جدول ۲ قابل مشاهده است، نتایج ارائه شده توسط صفحه مدرج دستگاه با نتایج حاصل از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی اختلاف بسیار کمی دارد. بیشترین و کمترین اختلاف به ترتیب برابر با ۶ و ۱ درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان رفتار ماده را به‌ازای تغییر ضخامت با یک رابطه ریاضی که از برازش منحنی بر داده‌های حاصل شده از صفحه مدرج دستگاه بدست آمده است، توصیف نمود.

در شکل ۷ علاوه بر نتایج دایال دستگاه و کرنش‌سنج، انرژی شروع و رشد ترک نیز ترسیم و با نمودار توانی برازش شد. روابط توانی حاصل شده در تمامی موارد دارای دقت بسیار بالا است.



شکل ۷- تغییرات انرژی در برابر تغییرات ضخامت

روابط ریاضی برای انرژی دایال یا صفحه مدرج دستگاه، انرژی کرنش‌سنج، انرژی شروع و رشد ترک به ترتیب در روابط ۳ الی ۶ آورده شده است:

$$E_D = 7 / 5948 t^{1/5444} \quad (3)$$

$$E_{SG} = 6 / 7114 t^{1/594} \quad (4)$$

$$E_i = 0 / 9274 t^{1/5444} \quad (5)$$

$$E_p = 5 / 9247 t^{1/5377} \quad (6)$$

شکل ۹- تغییرات نسبت انرژی شروع و رشد ترک به انرژی کل شکست در برابر تغییرات ضخامت

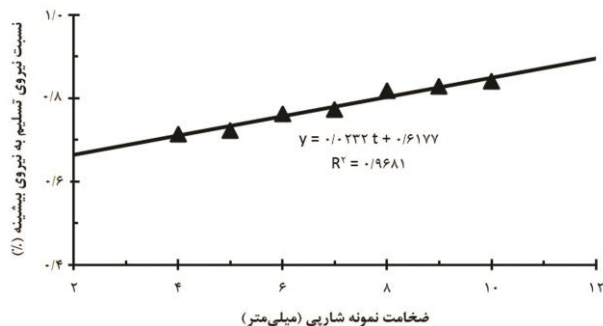
این موضوع، همان طور که قبلا برای ضرایب اصلاح نیز بیان شد، نظریه وابسته بودن انرژی و ضرایب اصلاح به انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای و اندازه ناحیه پلاستیک را تقویت می‌کند ثابت می‌کند. از این نمودار این چنین استنباط می‌شود که در ضخامت‌های کمتر از ۴ میلی‌متر تمامی انرژی صرف رشد ترک می‌شود. علت این امر این است که با نازک تر شدن نمونه ماده کمتری در برابر نوک ترک برای جذب انرژی تغییر شکل پلاستیک موجود است، به همین دلیل نیازی کمتری به انرژی برای شروع ترک نیاز است. در نقطه مقابل، اگر ضخامت زیاد شود این انرژی شروع ترک است که سهم بیشتری را برای شروع درخواست می‌کند.

نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه در جدول ۲ آورده شده است و تغییرات آن نسبت به ضخامت در شکل ۱۰ ترسیم شده است. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش ضخامت نسبت مذکور کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که کارسختی فولاد با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰ این نسبت با یک رابطه خطی، که از دقت بسیار خوبی برخوردار است، برازش شده است.

با بررسی نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نهایی نیز مشخص شد که می‌توان آنها را نیز با یک تابع نمایی توصیف نمود. این دو نیرو به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$F_y = 0.3447t^{1.558} \quad (7)$$

$$F_{max} = 0.6432t^{1.3617} \quad (8)$$



شکل ۱۰- تغییرات نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه در برابر تغییرات ضخامت

نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که معمولا در

پژوهش‌های تجربی منابع و درصد خطا بیان می‌شود. محیط‌زاده و هاشمی در مقاله‌ای [۳۸] علاوه بر مطالعه اثر تغییرات تکانه بر انرژی شکست شاری به بررسی میزان خطای روابط ارائه شده (انرژی شکست در برابر انرژی برخورد و سرعت برخورد) در آزمون ضربه‌شاری پرداخته‌اند. حداکثر میزان خطا بسیار کم و حدود ۴/۲ درصد گزارش شد. همچنین، برین به بررسی منابع خطا و تحلیل آماری انرژی ضربه شاری ۲۰۰ لوله فولادی API X۶۵ با هندسه و ترکیب شیمیایی یکسان برای سه منطقه فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت پرداخت [۳۹]. تحلیل ۶۰۰ داده از فلز پایه نشان داد توزیع هیستوگرامی انرژی شکست نرمال است و توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک بود. بیشترین انحراف معیار ۲۰ ژول گزارش شد.

مسئله متغیرهای بسیار زیاد مانند ابعاد و هندسه نمونه و چکش، سرعت اولیه، ساخت نمونه‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری، وضعیت سندان و قرارگیری نمونه بر روی آن در نتایج دخیل هستند، اما در حالت کلی خطای ناشی از این آزمون بسیار کم است. لذا، برای دریافت اطلاعات بیشتر در مورد منابع و درصد خطا در آزمون ضربه شاری می‌توان به دو مرجع مذکور رجوع کرد.

۴- جمع‌بندی

تعیین نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه، انرژی شروع و رشد ترک و انرژی کل شکست فولاد API X۶۵ به طور مستقیم و تجربی از دستگاه شاری مجهز شده و تعیین ضرایب اصلاح جهت پیش‌بینی شروع شکست از اهداف این تحقیق بود. نتایج این پژوهش را می‌توان به صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

- ۱- با استفاده از نتایج آزمایش شاری مجهز شده نمودارهای نیرو-جابجایی برای ضخامت‌های متفاوت و محاسبه نیروهای ویژه و انرژی‌های مذکور مطابق جدول ۲ محاسبه شد.
- ۲- به دلیل ماهیت دینامیکی بارگذاری، اثر افزایش نیروی تسلیم بر تنش تسلیم به مراتب بیشتر از اثر افزایش ضخامت است.
- ۳- روابط توانی برای تخمین انرژی‌های شکست و نیروهای ویژه به ازای تغییر ضخامت نمونه شاری با دقت بالا ارائه شد.

۷- مراجع

- [۱] Manahan, M. P. and Siewert, T. A. "The history of instrumented impact testing", *Journal of ASTM International*, ۳۱ (۲), (۲۰۰۶).
- [۲] Maxey, W. A. "Fracture initiation, propagation, and arrest", *5th Symposium on Line Pipe Research*, Houston, USA., (۱۹۷۴).
- [۳] Zhu, X.-K. and. Leis, B. N "Ductile fracture arrest methodes for gas transmission pipelines using Charpy impact energy of DWTT energy", *Journal of Pipeline Engineering*, pp. ۲۵۹-۲۷۲, (۲۰۱۳).
- [۴] Hashemi, S. H. "Correction factors for safe performance of API X^{۶۵} pipeline steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, ۸۶, pp. ۵۳۳-۵۴۰, (۲۰۰۹).
- [۵] Hashemi, S. H. "Apportion of Charpy energy in API ۵L grade X^{۷۰} pipeline steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, ۸۵, pp. ۸۷۹-۸۸۴, (۲۰۰۸).
- [۶] Hashemi, S. H., Howard, I. C., Yates, J. R., Andrews, R. M. "The transferability of micro-mechanical damage parameter in modern line pipe steel," *European Conf. on Fracture*, Stockholm, Sweden, (۲۰۰۴).
- [۷] Hashemi, S. H., Howard, I. C., Yates, J. R., Andrews, R. M. "Measurement and analysis of impact test data for X^{۱۰۰} pipeline steel," *Applied Mechanics and Materials*, ۳-۴, pp. ۳۶۹-۳۷۶, (۲۰۰۵).
- [۸] Hashemi, S. H., Howard, I. C., Yates, J. R., Andrews, R. M. and A. M. Edwards, "Estimation of slant tearing energy for high-grade pipeline steel from

- ۴- با بررسی ضرایب اصلاح مشخص شد که این ضرایب به حالت بارگذاری (تنش صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای) و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته‌اند.
- ۵- انرژی شکست به حالت بارگذاری و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته است.
- ۶- کاهش ضخامت، سهم انرژی رشد ترک نسبت به شروع ترک را بیشتر می‌کند.
- ۷- ظرفیت دستگاه ضربه شاری برای نمونه‌هایی با انرژی کمتر از ۲۵۰ ژول تأثیری بر جذب انرژی فولاد آزمایش شده ندارد.
- ۸- برای ضخامت‌های ۴ تا ۹ میلی‌متر انرژی شروع ترک مقدار ۲۰ درصد از کل انرژی را دربر می‌گیرد. اما با افزایش ضخامت به ۱۰ میلی‌متر به دلیل انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای این مقدار به ۲۵ درصد افزایش یافت.
- ۹- از کاربردهای مهندسی روابط بدست آمده می‌توان به تعیین انرژی شکست ورق‌هایی که ضخامت آن‌ها کمتر از ابعاد نمونه استاندارد شاری است (۱۰ میلی‌متر) است اشاره کرد. بنابراین دیگر نیاز به صرف هزینه برای ساخت نمونه و آزمایش ضربه شاری نمی‌باشد.

۵- فهرست علائم

$C_{V(۲/۳)}$	J	انرژی شکست نمونه شاری با ضخامت ۲/۳ ضخامت نمونه استاندارد
R	mm	شعاع لوله
t	mm	ضخامت لوله
σ_h	MPa	تنش محیطی
F_{gy}	kN	نیروی تسلیم
F_{max}	kN	نیروی بیشینه
E_D	J	انرژی شکست صفحه مدرج
E_{SG}	J	انرژی شکست کرنش سنج
E_i	J	انرژی شروع ترک
E_p	J	انرژی گسترش ترک

۶- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X^{۶۵} و از دانشگاه پیام نور کرمان جهت فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌نماید.

- surface features of API X⁷⁰ steel", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 35, (2022).
- [16] Shahsavani, A.-R. and Hashemi, S. H. "Experimental and numerical investigation of initial notch radius effect on Charpy fracture energy in API X⁷⁰ steel", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52 (5), pp. 1139-1152, (in Persian) (2020).
- [17] Sadr, J., Hashemi, S. H. and MajidiJirandehi, A. A, "Determination of energy-notch depth relationship using force-displacement diagrams in instrumented Charpy impact testing of API X⁷⁰ steel", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, (in Persian) (2023).
- [18] Wang, W., Wang, P. Liu, X., Dong, Z. and Fang, H. "Mathematical model for Charpy impact energy of V-notch specimen", *Advances in Materials Science and Engineering*, (2021).
- [19] Hong, S., Shin, S. Y., Lee, S. and Kim, N. J. "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 Transactions A*, 42 (9), pp. 2619-2632, (2011).
- [20] Shin, S. Y., Hwang, B., Lee, S. and Kang, K. B. "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*, 38 (3), pp. 537-551, (2007).
- [21] Pereira, L. C., Garcia de Blas, J. C., Griza, S. and Darwish, F. A. I. "Use of instrumented Charpy testing on the fracture toughness characterization of metallic materials", *Tecnologia em* instrumented Charpy test data and its transferability to large structures", *6th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada, (2006).
- [9] Hashemi, S. H. and Jalali, M. R. "Experimental study of charpy impact characteristics of high strength spiral welded gas pipeline", *Int Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada, (2006)
- [10] Hashemi, S. H. and Jalali, M. R. "Evaluation of fracture initiation energy in API X⁷⁰ pipeline steel", *7th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada, (2008).
- [11] Lucon, E., McCowan, C. N. and Santoyo, R. L. "Overview of NIST activities on sub-size and miniaturized charpy specimen: Correlation with full-size specimens and verification specimens for small-scale pendulum machines", *Journal of Pressure Vessel Technology*, (2016).
- [12] Lucon, E., McCowan, C. N. and Santoyo, R. L. "Impact characterization line pipe steels by means of standard sub-size and miniaturized Charpy specimens", *National Institute of Standards and Technology*, (2015).
- [13] Lucon, E. "Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data", *Materials and Design*, 97, pp. 437-443, (2016).
- [14] Lucon, E. "Experimental assessment of equivalent strain for an instrumented Charpy test", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 111, pp. 165-179, (2016).
- [15] Hosseinzadeha, A., H. Hashemi, S., Rastegari, H. and Maraki, M. R. "Investigation of the notch depth effect on Charpy fracture energy and fracture

- [۳۰] BS EN ISO 14556, Steel—Charpy V-notch pendulum impact test—Instrumented test method, (۲۰۰۲).
- [۳۱] Vodopivec, F., Arzensek, D., Vojvodi-Tuma, J. and Celin, R. "The Charpy fracture process in ductile range", *Metalurgija*, ۴۷, pp. ۱۷۳-۱۷۹, (۲۰۰۸).
- [۳۲] Vodopivec, F., Arzensek, B., Kmeti, D. and Vojvodi-Tuma, J. "On the Charpy fracture process", *Materiali in Tehnologije*, ۳۷ (۶), p. ۳۱۷, (۲۰۰۳).
- [۳۳] ISO 148-2, Metallic materials—Charpy pendulum impact test—Part 2: Verification of testing machines, (۲۰۰۹).
- [۳۴] S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, and B. B. Ovechkin, "Impact toughness of ۱۲Cr۱MoV steel Part ۱—Influence of temperature on energy and deformation parameters of fracture", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, ۸۳, pp. ۱۰۵-۱۱۳, (۲۰۱۶).
- [۳۵] Panin, S. V., Maruschak, P. O. Vlasov, I. V., Sergeev, V. P., Ovechkin, B. B. and Neifeld, V. V. "Impact toughness of ۱۲Cr۱MoV steel. Part ۲—Influence of high intensity ion beam irradiation on energy and deformation parameters and deformation parameters and mechanisms of fracture", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, ۸۳, pp. ۸۲-۹۲, (۲۰۱۶).
- [۳۶] Panin, S. V., Vassel, A., Maruschak, P. O., Moiseenko, D. D., Berto, F. and Vinogradov, A. "Influence of stress concentrator shape and testing temperature on impact bending fracture of ۱۷Mn۱Si pipe steel", presented at the AIP Conf. Proceedings, (۲۰۱۷).
- [۳۷] Hojjati, R., Steinhoff, M., Cooreman, S., Van den Abeele, F. and Verleysen, P. *Metalurgia, Materiais e Mineração*, ۱۸, pp. ۱-۱۱, (۲۰۲۱).
- [۲۲] API Specification 5L, Specification for line pipe, (۲۰۱۳).
- [۲۳] Hashemi, S. H. "Strength hardness statistical correlation in API X۶۵ steel", *Materials Science and Engineering A*, ۵۲۸, pp. ۱۶۴۸-۱۶۵۵, (۲۰۱۱).
- [۲۴] Hashemi S. H., and Mohammadyani, D. "Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X۶۵ steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, ۹۸, pp. ۸-۱۵, (۲۰۱۲).
- [۲۵] Majidi-Jirandehi, A. A., Hashemi, S. H., Ebrahimi-Nejad, S. and Kheybari, M. "Impact crack propagation path and inclusion elements on fracture toughness and micro-surface characteristics of welded pipes in DWTT", *Material Research Express*, ۸, (۲۰۲۱).
- [۲۶] Tazimi, M., Hashemi, S. H., and Rahnema, S. "Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneously drop weight tear test specimen made from API X۶۵ steel", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, ۱۰ (۱), pp. ۷۷-۹۱, (۲۰۲۰).
- [۲۷] ASTM E23-16b, Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, ۲۰۱۶.
- [۲۸] ASTM A370-16, Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products, (۲۰۱۶).
- [۲۹] ASTM E2298—13a, Standard test method for instrumented impact testing of metallic materials, (۲۰۱۳).

"Effect of high strain rate on ductile slant fracture behaviour of pipeline steel-experiments and modeling," in *11th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada, (۲۰۱۶).

[۳۸] Mohitzadeh, S. S. and Hashemi, S. H. "Experimental and numerical evaluation of momentum variation effect of striker on fracture energy in Charpy impact testing of API X۶۵ steel," *Modares Mechanical Engineering*, ۲۰ (۹), pp. ۲۲۷۵-۲۲۸۷, (in Persian) (۲۰۲۰).

[۳۹] Barin, M.-R, "Identification of scatter factors and statistical analysis of Charpy fracture energy variations in API X۶۵ steel", MSc. Thesis, Mechanical engineering, University of Birjand, (in Persian) (۲۰۱۶).

پایان کارشناسی ارشد