



## مقایسه ضرایب اصلاح تجربی و عددی حاصل از انرژی شکست درزجوش خطوط انتقال گاز با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی

علی اکبر مجیدی جیرندهی<sup>۱\*</sup>، سید حجت هاشمی<sup>۲</sup>، سجاد سیفوری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولیعصر رفسنجان

\* تهران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، Aliakbar.majidi@PNU.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۱  
داوری اولیه: ۲۴ تیر ۱۴۰۱  
پذیرش: ۴ مرداد ۱۴۰۱

### کلیدواژگان:

آزمایش ضربه سقوطی  
درز جوش مارپیچ  
فولاد API X65  
ضرب اصلاح  
مدل شکست لوله

اتصالات جوش در سازه‌های بزرگ علاوه بر آزمایش‌های غیرمخرب، باید توسط آزمایش‌های مخرب مکانیکی (مانند آزمایش کشش و ضربه) نیز تایید شوند. آزمایش ضربه سقوطی روشی مطمئن جهت ارزیابی توانایی توقف ترک در شکست نرم است. تحقیقات گذشته با تمرکز بر اندازه‌گیری انرژی شکست در آزمون ضربه سقوطی به روش المان محدود و مقایسه با مقدار تجربی فولاد پایه انجام گرفته است. اما در تحقیق حاضر از درزجوش مارپیچ فولاد API X65 که در بدنه لوله واقعی خطوط انتقال گاز قرار داشت، استفاده شده است. نمونه‌ها با دستگاه ضربه سقوطی مجهز شده آزمایش شدند و نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از دو روش عددی و تجربی بر اساس ضریب اصلاح، ارزیابی و مقایسه شده‌اند. با در اختیار داشتن ضریب اصلاح (که در آن از مشخصه‌های مهم منحنی نیرو-تغییر مکان مانند انرژی کل جذب شده، انرژی رشد ترک و همچنین انرژی شروع ترک استفاده می‌شود)، می‌توان به نمودار نیرو-تغییر مکان استخراج شده از شبیه‌سازی که برای بدست آوردن مقادیر واقعی آن باید متحمل وقت و هزینه نسبتاً زیادی شد، با دقت قابل قبولی اعتماد کرد. برای فولاد مورد استفاده در تحقیق حاضر ضریب اصلاح برای فولاد پایه و درزجوش مارپیچ، ۱/۸ بدست آمده است. استفاده از این مقدار برای فولادهای با گرید مشابه نیز قابل قبول خواهد بود. ضریب اصلاح برای درزجوش با استفاده از شبیه‌سازی که با روش اصلاح شده گرسون انجام شد، ۱/۷ بدست آمده است که اختلاف آن با مقدار تجربی ناچیز است.

## Comparison of experimental and numerical correction factors from seam weld fracture energy by drop weight tear testing of gas transportation pipelines

Ali Akbar Majidi-Jirandehi<sup>1\*</sup>, Seyyed Hojjat Hashemi<sup>2</sup>, Sajjad Seifoori<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

\* Payame Noor University, P.O. B. 19395-3697, Tehran, Iran, Aliakbar.majidi@PNU.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 5 July 2022  
First Decision: 15 July 2022  
Accepted: 26 July 2022

### Keywords:

Drop weight tear test  
Spiral seam weld  
API X65 steel  
Correction factor  
Pipeline failure model

### Abstract

In addition to non-destructive testing, the weld joints in large structures must also be confirmed by mechanical destructive testing (such as tensile and impact tests). Drop weight tear test (DWTT) is a reliable test to evaluate ductile fracture and crack arrestability of pipelines. Previous research has focused on measuring and comparing the base metal fracture energy from DWTT using finite element and experimental methods. However, in the present research, the spirally welded seam of API X65 steel specimens were machined from an actual pipe and tested using DWTT. The load-displacement curves obtained from both numerical and experimental methods have been evaluated and compared regarding correction factors. Using the obtained correction factors (from important characteristics of the load-displacement curve such as total absorbed energy, crack initiation and propagation energy are used), the load-displacement curve of simulation can be relied upon with acceptable accuracy. Real curves can be obtained with a relatively large amount of time and money. For the steel used in the present study, the correction factor for base and weld metal is 1.8. The use of this value will also be acceptable for steels of the same grade. The weld metal correction factor using the simulation (based on Gurson-Tvergaard-needleman method) was 1.7, which was slightly different from the experimental value.

### ۱- مقدمه

مکانیک شکست، ایمن ساخته شوند. اتصالات جوش در سازه‌ها علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد. به همین دلیل علاوه بر آزمایش‌های غیرمخرب، تأیید سلامت آن بوسیله آزمایش‌های مخرب مکانیکی (کشش و ضربه) و بررسی

سازه‌های بزرگ نظیر کشتی‌ها، پل‌ها، هواپیماها و لوله‌های خطوط انتقال که نقص آنها سبب زیان‌های اقتصادی قابل ملاحظه و از بین رفتن جان انسان‌ها می‌شود، باید از نگاه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. A. Majidi-Jirandehi, S. H. Hashemi, S. Seifoori, Comparison of experimental and numerical correction factors from seam weld fracture energy by drop weight tear testing of gas transportation pipelines, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 29- 37, 2022 (in Persian).  
<https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157666>

ارزیابی‌هایی نیز به کمک شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی روی نمونه‌های با شیار پرسی و پیش ترک خستگی انجام شده است. بزرگ‌ترین مزیت نمونه‌های با پیش ترک خستگی نسبت به نمونه‌های با شیار پرسی، کاهش آشکار انرژی مورد نیاز برای آغاز ترک می‌باشد. تنها با تکیه بر ضرایب آسیب، نمی‌توان به روشنی دریافت که کدام یک از مواد مقاومت شکست بهتری را دارند [۵]. وانگ و همکاران [۶] به بررسی عددی رفتار رشد ترک نرم در اتصال جوشکاری شده چند فلز (با مواد غیر یکسان) به کمک مدل‌سازی با مدل آسیب گرسون پرداخته‌اند. گذار از نرمی به تردی برای جوش‌ها توسط تحلیل عددی نمونه ضربه شاری نیز مورد مطالعه پژوهشگران بوده است و نمودار نیرو-تغییر مکان که پرکاربردترین نمودار در این نمونه تحلیل‌ها می‌باشد، برای آن ترسیم شده است [۷].

معمولاً شبیه‌سازی رشد ترک نرم در فولادهای پر استحکام خطوط انتقال با استفاده از سه مدل آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن، منحنی مکان هندسی شکست<sup>۱</sup> و ناحیه چسبنده<sup>۲</sup> انجام می‌شود. مقایسه‌ای میان سه مدل آسیب (که استفاده گسترده‌ای دارند) نشان می‌دهد، هر سه مدل منحنی نیرو-تغییر مکان را به درستی و با خطای ناچیز تخمین می‌زنند [۸]. مدل‌های دیگری نیز برای شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. به عنوان نمونه مدل مکانیک آسیب ژو-ویربزبکی<sup>۳</sup> که به بیان اثرات نرخ کرنش و مقایسه بین منحنی نیرو-تغییر مکان در بارگذاری دینامیکی و استاتیکی می‌پردازد [۹]. مقایسه این روش نیز با روش گرسون-تیورگارد-نیدلمن اصلاح شده نشان می‌دهد، هر دو روش جواب‌های قابل قبولی برای منحنی نیرو-تغییر مکان ارائه می‌دهند [۱۰]. فتحی و همکاران [۱۱] نیز به اندازه‌گیری عددی و تجربی انرژی شکست فولاد پایه مورد استفاده در تحقیق حاضر پرداختند. شیار مورد استفاده از نوع ماشین‌کاری شده بود و با استفاده از شبیه‌سازی عددی رابطه میان سرعت و انرژی بدست آورده شده است.

همان‌گونه که ذکر شد تحقیقات گذشته با تمرکز بر اندازه‌گیری انرژی شکست در آزمون ضربه سقوطی به روش المان محدود و مقایسه با مقدار تجربی روی فولاد پایه انجام گرفته است. اما ماده استفاده شده در این تحقیق از جنس درزجوش بدنه لوله واقعی خطوط انتقال گاز بود. درزجوش از نوع مارپیچ و جنس فولاد API X65 با حداقل تنش تسلیم ۴۴۸ مگاپاسکال با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره

ریزساختار متالورژیکی نیز ضروری است. از مهم‌ترین آزمایش‌های ضربه می‌توان آزمایش ضربه سقوطی را نام برد. آزمایش ضربه سقوطی، روشی جهت ارزیابی توانایی توقف ترک در شکست نرم می‌باشد. ارزیابی توانایی توقف ترک در شکست نرم یکی از ویژگی‌های لازم برای اعتمادپذیری لوله‌های خطوط انتقال می‌باشد. به عنوان مثال، ترک‌ها حتی اگر شکست ترد در ناحیه جوش اتفاق افتد، باید متوقف شوند. آزمایش ضربه سقوطی انتقال ترک نرم از شکست تردی که در زیر شیار آغاز می‌شود را مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۱].

در تحقیق‌های انجام شده، اندازه‌گیری انرژی شکست در آزمون ضربه سقوطی به روش المان محدود و مقایسه با مقدار تجربی آن، تنها برای فولادهای پایه انجام شده است که در ادامه به چند نمونه از آنها اشاره می‌شود. رن و همکاران [۲] وابستگی چقرمگی شکست روی سرعت شکست خطوط لوله فولادی را به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش از نمونه‌های استاندارد و اصلاح شده (با ایجاد شیار در بالای نمونه) آزمایش ضربه سقوطی، استفاده شده است. وجود شیار، در بالا رفتن سرعت رشد ترک بسیار تاثیر گذار می‌باشد. نتایج عددی به دست آمده در تحقیق مذکور جهت مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان برای دو نمونه استاندارد و اصلاح شده، با نتایج تجربی تی-رانسکند مقایسه شده‌اند و تطابق خوبی میان روش عددی به کار گرفته شده در این تحقیق و نتایج تجربی برقرار است. پایین بودن انرژی شکست نمونه اصلاح شده در مقایسه با نمونه استاندارد، وابستگی چقرمگی شکست دینامیکی را به سرعت شکست نشان می‌دهد، که هدف اصلی پژوهش مذکور بوده است. پاسگودا و همکارانش [۳] با استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیکی، انرژی رشد شکست حالت پایدار در آزمایش ضربه سقوطی را بدست آورده‌اند. نمونه مورد استفاده در آزمایش دارای یک شیار در بالای خود (محل برخورد چکش) می‌باشد. شیارهای بالایی با عمق‌های مختلف ایجاد و نمودارهای آن رسم شدند که نشان می‌دهند با افزایش عمق شیار، انرژی شکست کمتر می‌گردد. دموفونتی و همکارانش [۴] به بررسی مقاومت خطوط لوله فولادی در برابر گسترش شکست نرم با آزمایش روی ۶ فولاد با گرید X65 تا X100 پرداختند. شبیه‌سازی کامپیوتری نیز برای مقایسه با نتایج کسب شده از آزمایش تجربی انجام شده است. هر چه مقاومت ماده در برابر رشد ترک بیشتر باشد یا اصطلاحاً ماده چقرمگی بالایی داشته باشد، تنش پلاستیک بیشتری به نمونه منتقل می‌شود و می‌تواند در تحلیل رشد ترک مؤثر باشد.

<sup>1</sup> Fracture Locus Curve

<sup>2</sup> Cohesive Zone

<sup>3</sup> Xue-Wierzbicki

ضریب اصلاح با توجه به ویژگی‌های مواد و شرایط آزمایش‌های تجربی، مورد به مورد ارزیابی می‌شود [۱۸]. به طور کلی، برای بکار بردن مدل‌های شکست به استفاده از ضرایب اصلاح، جهت عملکرد مطمئن فولادهای خطوط انتقال نیاز است. این قبیل ضرایب اصلاح می‌توانند از آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های با ضخامت کامل انجام می‌شوند، با دقت بیشتری به دست آید [۱۹، ۲۰].

## ۲- آزمایش ضربه سقوطی

### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

شکل استاندارد نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۲]. ابعاد نمونه آزمایشگاهی، چکش و تکیه‌گاه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول S فاصله بین دو تکیه‌گاه،  $R_h$  شعاع چکش،  $R_s$  شعاع تکیه‌گاه، a عمق شیار، L، W و t به ترتیب طول، عرض و ضخامت نمونه می‌باشد.

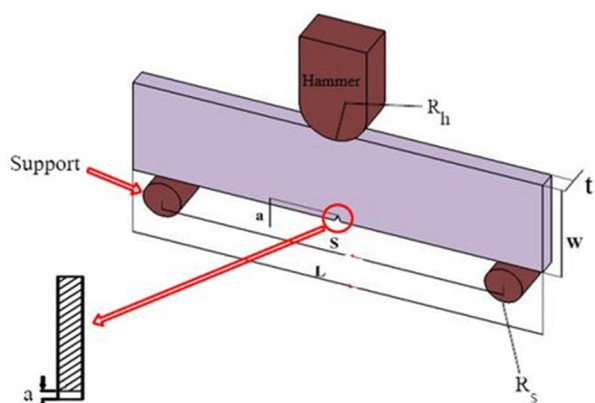


Fig. 1 Drop weight tear test specimen with pressed notch, hammer and support

شکل ۱ نمای نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار پرسی، چکش و تکیه‌گاه‌ها [۱۲]

جدول ۱ ابعاد نمونه آزمایش ضربه سقوطی، چکش و تکیه‌گاه (به میلی‌متر) بر اساس شکل ۱

L	S	W	t	a	$R_h$	$R_s$
۳۰۵	۲۵۴	۷۶/۲	۱۴/۳	۵/۱	۲۵/۴	۱۴/۳

برای تهیه نمونه مطابق استاندارد API 5L3 [۱۲]، به کمک برش شعله قطعات از لوله واقعی خطوط انتقال گاز با درزجوش مارپیچ و مشخصات ذکر شده استخراج شدند. در استاندارد API 5L که در سال ۲۰۱۲ منتشر شد، ذکر شده است که نمونه‌ها جهت رسیدن به ابعاد استاندارد (حتی برای رسیدن به ضخامت ۱۹ میلی‌متر، زیرا مطابق استاندارد، لوله‌های با ضخامت بیشتر از

۱۴/۳ میلی‌متر بود. نمونه‌های آزمایش مطابق استاندارد API 5L3 [۱۲] از ناحیه‌های فولاد پایه و حاوی درزجوش مارپیچ (به گونه‌ای که درزجوش در وسط نمونه قرار گیرد) تهیه شدند. نمونه‌ها با دستگاه ضربه سقوطی مجهز شده آزمایش شدند و انرژی شکست بدست آمده در روش تجربی با روش عددی بکار گرفته شده بر اساس ضریب اصلاح، ارزیابی و مقایسه شده است.

### ۱-۱- ضریب اصلاح

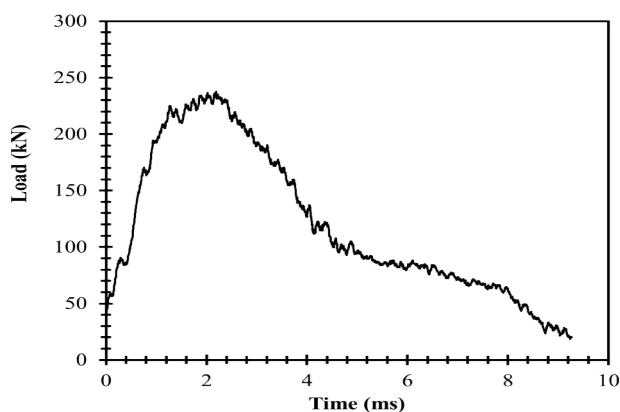
مهم‌ترین مدلی که برای شکست لوله‌های خطوط انتقال ارائه شده است، مدل دو منحنی باتل است [۱۳]. این مدل شکست نرم در فولادهای خطوط انتقال را به خوبی پیش‌بینی می‌کند و برای ارزیابی چقرمگی فولادهایی که با فرآیند کنترل شده ترمومکانیکال تولید می‌شوند، استفاده می‌شود. شکل ساده مدل دو منحنی باتل در رابطه (۱) آمده است [۱۴]:

$$CVN = 3.573 \times 10^{-5} \sigma_H^2 \left(\frac{Dt}{2}\right)^{1/3} \quad (1)$$

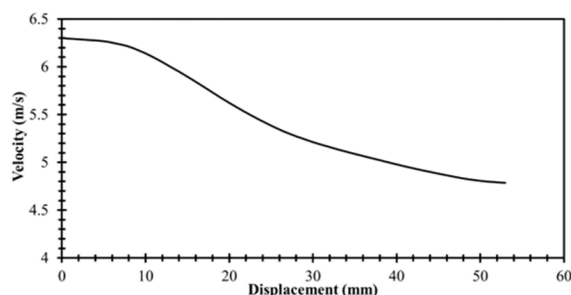
CVN انرژی شارپی پیش‌بینی شده برحسب ژول،  $\sigma_H$  تنش محیطی در لوله تحت فشار بر حسب مگاپاسکال، D و t به ترتیب قطر و ضخامت لوله بر حسب میلی‌متر می‌باشند. این مدل که بر مبنای رابطه‌ای میان بارگذاری و هندسه لوله برای محاسبه انرژی شارپی پایه‌گذاری شده است، محدودیت‌هایی نیز دارد. مدل دو منحنی باتل برای فولادهای با گرید پایین به خوبی کار می‌کند، اما در پیش‌بینی صحیح حداقل چقرمگی جهت توقف ترک، در فولادهایی که چقرمگی بیشتری دارند (گریدهای بالاتر)، به خوبی عمل نمی‌کند. برای غلبه بر این مشکل اصلاحات تجربی مختلفی برای مدل‌های شکست موجود (به شکل ضرایب اصلاح) در سال‌های اخیر پیشنهاد شده است. ضریب اصلاح از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$CF = \frac{E_t}{E_p} = \frac{E_t}{E_t - E_i} \quad (2)$$

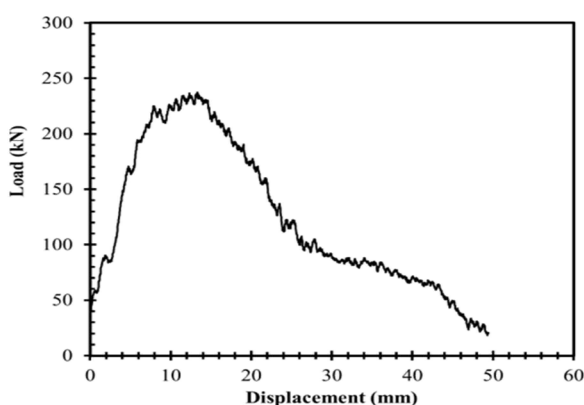
در رابطه (۲)،  $E_t$  انرژی کل جذب شده توسط نمونه شکسته شده،  $E_p$  انرژی رشد ترک و  $E_i$  نیز انرژی شروع ترک (شامل خمش و فرو رفتگی‌های تکیه‌گاهی نمونه) می‌باشند. در فولادهای پراستحکام، انرژی شروع ترک شامل تغییر شکل پلاستیک نمونه نیز می‌شود و بیانگر مقاومت واقعی شکست حاصل از ضربه در فولاد نمی‌باشد [۱۵]. در منحنی نیرو - تغییر مکان پس از نقطه تسلیم تغییر شکل پلاستیک در نمونه آغاز می‌شود تا به نقطه نیروی حداکثر برسد. شروع رشد ترک کمی بعد از نقطه نیروی حداکثر اتفاق می‌افتد که نیرو شروع به کاهش می‌کند، اما برای سادگی می‌توان نقطه نیروی حداکثر را نقطه شروع رشد ترک در نظر گرفت [۱۶، ۱۷]. در واقعیت



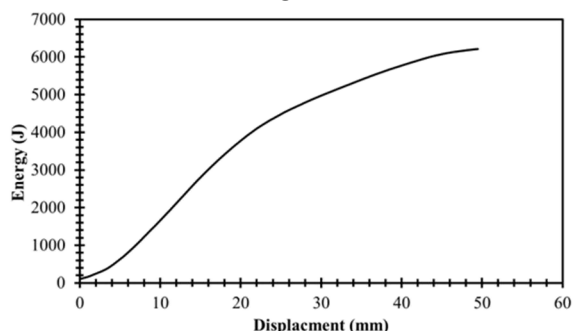
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

**Fig. 3** a) Force-impact time diagram, b) Velocity-hammer displacement diagram, c) Force-hammer displacement diagram, d) Energy-hammer displacement diagram

شکل ۳ الف) نمودار نیرو بر حسب زمان ضربه، ب) نمودار سرعت بر حسب تغییر مکان چکش، ج) نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان چکش، د) نمودار انرژی بر حسب تغییر مکان چکش

۱۹ میلی‌متر باید به ضخامتی برابر مقداری که استاندارد تعیین کرده است رسانده شوند)، ممکن است ماشین‌کاری شوند [۲۱]. در تحقیق حاضر عملیات ماشین‌کاری روی لبه‌های برش خورده نمونه‌ها جهت رسیدن به ابعاد استاندارد انجام شد. به دلیل وجود برآمدگی در محل درزجوش و از سویی نیاز به عملیات مسطح-سازی روی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش، برآمدگی‌های موجود از محل درزجوش نمونه‌ها حذف شدند. شیار در وسط نمونه‌ها (در جایی که درزجوش قرار دارد) ایجاد شد.

## ۲-۲- انجام آزمایش ضربه سقوطی

منحنی نیرو-تغییر مکان بیانگر اطلاعات کاملی از انجام آزمایش ضربه سقوطی است و از طریق آن می‌توان ویژگی‌های زیادی نظیر انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و مقدار انرژی کل شکست را محاسبه نمود. نمونه‌ای از تجهیزاتی که با استفاده از آنها این منحنی استخراج می‌شود، مدار کرنش‌سنج و تقویت کننده ولتاژ است که اطلاعات خروجی از کرنش‌سنج‌ها را بر حسب ولتاژ-زمان ارائه می‌نماید که در تحقیق حاضر از آن شده است. در شکل ۲ نمونه قرار گرفته در دستگاه آزمایش ضربه سقوطی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. مشخصات دستگاه ضربه سقوطی استفاده شده در تحقیق حاضر در جدول ۲ نشان داده شده است. پس از رهاسازی چکش نمونه کاملاً می‌شکند.



**Fig. 2** Welded specimen in the drop weight tear test machine

شکل ۲ نمونه درزجوش قرار گرفته زیر چکش دستگاه ضربه سقوطی

## ۲-۳- انجام آزمایش ضربه سقوطی

نمونه‌های دارای درزجوش مارپیچ فولاد API X65 با شیار پرسی به وسیله دستگاه ضربه سقوطی آزمایش شدند. نمودارهای نیرو-زمان، سرعت-تغییر مکان، نیرو-تغییر مکان و انرژی-تغییر مکان درزجوش مارپیچ، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

## جدول ۲ مشخصات دستگاه ضربه سقوطی

Table 2 Specifications of the drop weight tear test machine

سرعت ضربه (m/s)	ارتفاع سقوط (از مرکز جرم چکش) (m)	ارتفاع سقوط (kg)	جرم چکش (kg)
۶/۳	۲/۴	۲/۵	۷۰۰

جدول ۳ نتایج آزمایش ضربه سقوطی نمونه دارای درزجوش مارپیچ فولاد API X65 (t زمان ضربه، F نیروی ضربه، s جابه‌جایی چکش، v سرعت چکش و E انرژی ضربه می‌باشند)

Table 3 The results of the drop weight tear test of the API X65 spiral welded steel specimen (t is the impact time, F is the impact force, s is the hammer displacement, v is the hammer speed, and E is the impact energy)

متغیر اندازه‌گیری شده	نقطه		
	تسلیم	نیروی حداکثر	پایان آزمایش
t (ms)	۰/۹	۲/۳	۹/۳
F (kN)	۱۹۷/۵	۲۴۱/۲	۱۴/۸
s (mm)	۵/۶	۱۴/۳	۴۹/۴
v (m/s)	۶/۳	۵/۹	۴/۸
E (J)	۷۳۲	۲۶۶۶	۶۲۱۱

جدول ۴ انرژی جذب شده، انرژی شروع و رشد ترک آزمایش ضربه سقوطی نمونه دارای درزجوش مارپیچ فولاد API X65

Table 4 Absorbed, initiation and propagation crack energies of the drop weight tear test API X65 spiral welded steel specimen.

نسبت انرژی کل به نسبت انرژی شروع	انرژی رشد انرژی کل	انرژی شروع انرژی کل	انرژی رشد انرژی کل	ترک (J)	ترک (J)	شده (J)
۱/۸	۴۳٪	۳۵۴۵	۲۶۶۶	۶۲۱۱		



Fig. 4 The fracture surface of the drop weight tear test specimen with spiral welding

شکل ۴ سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی دارای درزجوش مارپیچ

## ۳- شبیه‌سازی

هدف از شبیه‌سازی، بدست آوردن منحنی نیرو- تغییرمکان با استفاده از نرم‌افزار آباکوس می‌باشد. شبیه‌سازی بر روی درزجوش فولاد API X65 انجام شده و مقایسه بین منحنی بدست آمده از نرم‌افزار و منحنی تجربی نیرو- تغییرمکان (که از آزمایش ضربه سقوطی بدست آمده است) صورت گرفته است. در مسأله حاضر پارامتر زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، در نرم افزار آباکوس از روش صریح که با استفاده از بازه‌های زمانی کوچک جهت حل معادله فوق با تعداد تکرار کمتری همگرا می‌شود، استفاده شده است. زیرا در این روش، هزینه محاسبات کمتر از روش‌های دیگر است. همچنین، در روش صریح می‌توان انواع بارگذاری‌ها را مدل‌سازی نمود. در نتیجه برای حل مسایل دینامیکی با سرعت بالا استفاده از این روش بسیار مفید می‌باشد.

همان‌گونه که ذکر شد درزجوش در وسط نمونه قرار داشته و شیار نیز در وسط نمونه ایجاد شده است. نمودارهای سرعت- تغییر مکان، نیرو-تغییر مکان و انرژی-تغییر مکان با انتگرال-گیری به دست آمده‌اند.

در آزمایش ضربه سقوطی انجام شده انرژی شکست نمونه فولاد API X65 با درزجوش مارپیچ و شیار پرسی برابر ۶۲۱۱ ژول، انرژی شروع ترک برابر ۲۶۶۶ ژول و انرژی رشد ترک برابر ۳۵۴۵ ژول به دست آمد. نتایج آزمایش ضربه سقوطی در جدول ۳ و ۴ خلاصه شده است. انرژی شروع ترک ۴۳ درصد کل انرژی شکست می‌باشد. به عبارت دیگر نسبت کل انرژی شکست به انرژی رشد ترک برابر ۱/۸ است. در واقع بر اساس رابطه ۲، ضریب اصلاح برای درزجوش مارپیچ فولاد API X65، مقدار ۱/۸ به دست آمده است. در پژوهش هاشمی [۱۵] ضرایب اصلاح برای ناحیه فلز جوش ۱/۶ گزارش شده است. ضریب اصلاح پیشنهادی در تحقیق حاضر به دلیل انجام آزمایش با ابعاد واقعی ضخامت لوله (نسبت به نمونه‌ای با ابعاد ۱۰ میلی‌متر در آزمایش شاری)، از دقت بیشتری برخوردار است.

سطح شکست نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی (حاوی درزجوش مارپیچ در تحقیق حاضر) در شکل ۴ نشان داده شده است. شکست تورقی (ناحیه مثلثی ابتدایی) که نشانگر شکست ترد است، درست زیر شیار پرسی شکل گرفته است. بلافاصله پس از شکست تورقی اولیه، لبه برشی با زاویه ۴۵ درجه شکل گرفته است. این لبه برشی نماینده منطقه‌ای از سطح شکست است که تحت شرایط تنش صفحه‌ای و شکست نرم می‌باشد و نشانگر چقرمگی بالای ماده است. سطح شکست نرم بیشتر سطح شکست را اشغال نموده و در تمام ضخامت نمونه گسترش یافته است. در منطقه ضربه چکش، لبه‌های برشی در نمونه تغییر شکل یافته مشاهده شدند. سطح شکست معکوس نیز در انتهای نمونه (سمت راست آن) و در محل ضربه چکش که پهنای سطح شکست به طور ناگهانی افزایش می‌یابد، اتفاق افتاده است. این نوع ظاهر غیرعادی سطح شکست بسیار مهم است، زیرا چقرمگی نمونه افزایش می‌یابد و در شکست انفجاری لوله‌ها اتفاق نمی‌افتد. ویژگی‌های سطح شکست بطور کامل در مرجع [۲۲] بررسی شده است.

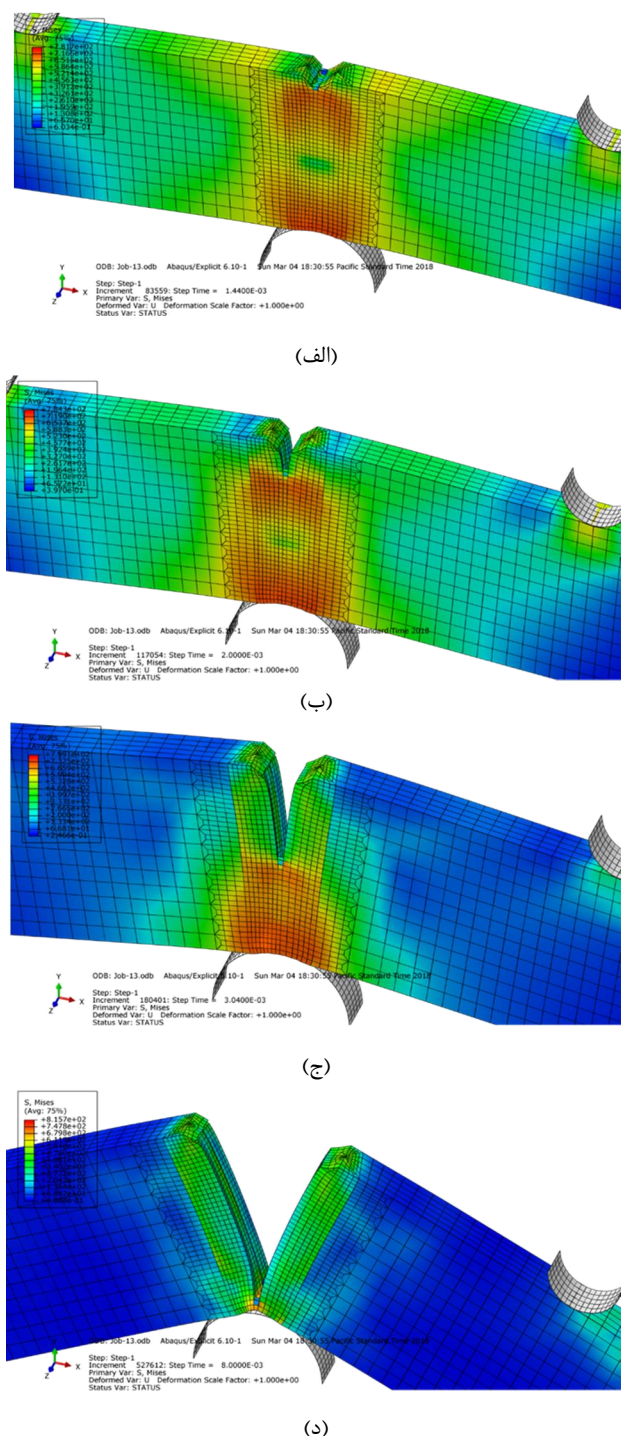


Fig. 6 Showing the removal of elements in, a) 1.44 milliseconds, b) 2 milliseconds, c) 3 milliseconds, d) 8 milliseconds

شکل ۶ نمایش حذف تدریجی المان‌ها در، الف) ۱/۴۴ میلی‌ثانیه، ب) ۲ میلی‌ثانیه، ج) ۳ میلی‌ثانیه، د) ۸ میلی‌ثانیه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تفاوت میان انرژی شکست نمونه دارای درزجوش ماریپیچ فولاد API X65 با شیار پرسی با دو روش تجربی و عددی ۲۵۲ ژول بوده است. به عبارت دیگر در مدل شبیه‌سازی شده به روش اصلاح شده گرسون، انرژی شکست ۴ درصد کمتر بدست آمده است. انرژی شروع ترک در

مدل‌سازی به روش اصلاح شده گرسون انجام شده است. از آنجا که در نرم‌افزار آباکوس حل معادلات حاکم بر مدل آسیب گرسون تنها با روش دینامیکی صریح صورت می‌پذیرد، این روش به عنوان نوع تحلیل انتخاب شد. شکل ۵ شبکه‌بندی را برای کل مدل ساخته شده نشان می‌دهد.

با پایان یافتن تحلیل مسئله می‌توان المان‌هایی که به تدریج تحت آسیب قرار گرفته‌اند را مشاهده نمود (شکل ۶). در شکل ۷ نیز یک نیمه از نمونه که پیشروی ترک در آن کاملاً مشخص است نشان داده شده است.

همچنین منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه که از نرم افزار استخراج شده است در شکل ۸ نشان داده شده است. قابل ذکر است که ضرایب گرسون پس از شروع رشد ترک تأثیرگذار خواهند بود. به این معنی که پیش از آغاز رشد ترک تا زمانی که حفره‌ها هیچگونه گسترشی نیافته‌اند، این ضرایب نقشی را در تحلیل ایفا نمی‌کنند. همچنین، با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان می‌توان به مقدار انرژی شکست دست یافت. این مقدار انرژی را می‌توان با روش‌های انتگرال‌گیری عددی مانند روش دوزنقه‌ای یا سیمپسون بدست آورد. مقدار انرژی بدست آمده از شبیه‌سازی ۵۹۵۹/۴ ژول است.

#### ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

در شکل ۹ نمودار بدست آمده از آزمایش ضربه سقوطی در کنار نمودار حاصل از شبیه‌سازی برای نمونه دارای درزجوش ماریپیچ با شیار پرسی به عمق ۵/۱ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص است نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند. اختلاف موجود نیز با توجه به ماهیت تحلیل‌های المان محدود و همچنین خواص ناهمسانگرد فلز جوش عادی به نظر می‌رسد. در جداول ۵ و ۶ نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه سقوطی و شبیه‌سازی انجام شده، نشان داده شده است.

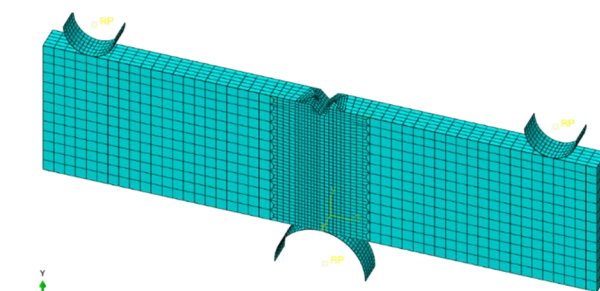


Fig. 5 The mesh model

شکل ۵ مدل شبکه‌بندی شده

جدول ۵ نتایج آزمون ضربه سقوطی و شبیه‌سازی انجام شده بر روی نمونه دارای درزجوش مارپیچ فولاد API X65 با شیار پرسی (F نیروی ضربه، s جابه‌جایی چکش و E انرژی ضربه می‌باشند)

**Table 5** The results of drop weight test and the simulation performed on the API X65 spiral welded steel specimen with a press notch (F is the impact force, s is the hammer displacement and E is the impact energy)

روش	عامل اندازه‌گیری شده	نقطه		
		تسلیم	نیروی حداکثر	پایان آزمایش
آزمایش ضربه سقوطی	F (kN)	۱۹۷/۵	۲۴۱/۲	۱۴/۸
	s (mm)	۵/۶	۱۴/۳	۴۹/۴
	E (J)	۷۳۲	۲۶۶۶	۶۲۱۱
شبیه‌سازی به روش GTN	F (kN)	۱۹۹/۹	۲۲۸/۶	۴/۶
	s (mm)	۶/۶	۱۴/۶	۵۸/۲
	E (J)	۶۸۶/۵	۲۴۲۰/۷	۵۹۵۹/۴

جدول ۶ انرژی جذب شده، انرژی شروع و رشد ترک آزمایش ضربه سقوطی و شبیه‌سازی انجام شده بر روی نمونه دارای درزجوش مارپیچ فولاد API X65

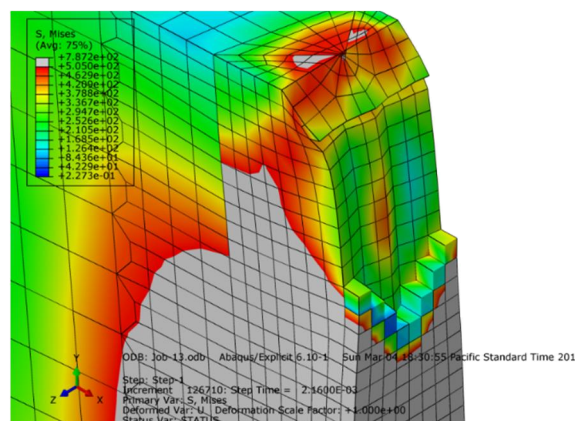
**Table 6** Absorbed energy, energy of initiation and crack propagation of the drop weight tear test and simulation performed on the API X65 spiral welded steel specimen

نمونه	نسبت انرژی کل به انرژی رشد			
	شروع کل انرژی جذب شده (J)	ترک (J)	رشد انرژی (J)	نسبت انرژی کل به انرژی رشد ترک
آزمایش ضربه سقوطی	۶۲۱۱	۲۶۶۶	۳۵۴۵	۶۲۱۱ ÷ ۳۵۴۵ = ۱/۸
شبیه‌سازی به روش GTN	۵۹۵۹	۲۴۲۱	۳۵۳۸	۵۹۵۹ ÷ ۳۵۳۸ = ۱/۷
	اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده			
-	۲۵۲	۲۴۵	۷	۰/۱

اگرچه نیروی حداکثر در روش تجربی (کیلونیوتن ۲۴۱) نسبت به روش شبیه‌سازی شده (۲۲۹ کیلونیوتن) بیشتر است، همانگونه که در شکل ۹ و جدول ۵ نشان داده شده است، جابه‌جایی در نقطه نیروی حداکثر در دو منحنی نیرو-تغییر مکان اختلاف بسیار ناچیزی دارد (در روش تجربی ۱۴/۳ و در مدل شبیه‌سازی شده ۱۴/۶ میلی‌متر).

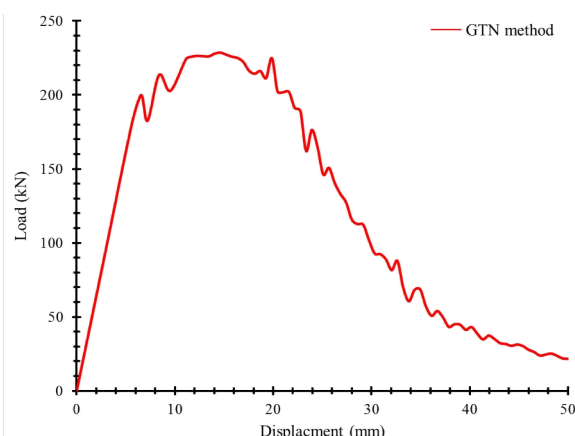
هرچند مقادیر انرژی شروع ترک و انرژی کل شکست در دو روش تجربی و شبیه‌سازی عددی تفاوت دارد، اما نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل در هر دو روش بسیار به هم نزدیک است (در روش تجربی ۴۳ و در مدل شبیه‌سازی شده ۴۱ درصد). به عبارت دیگر نسبت کل انرژی شکست به انرژی رشد ترک در هر دو روش، تقریباً برابر است (در روش تجربی ۱/۸ و در مدل شبیه‌سازی شده ۱/۷). در واقع بر اساس رابطه (۲)، اختلاف ضریب اصلاح برای درزجوش مارپیچ فولاد API X65 در دو روش بسیار ناچیز است. ضریب اصلاح برای هر فولاد با

مدل شبیه‌سازی شده در مقایسه با روش تجربی به نیز مقدار ۲۴۵ ژول کمتر است. اختلاف میان نیروی تسلیم در در مدل شبیه‌سازی شده و روش تجربی بسیار اندک است (نیروی تسلیم بدست آمده از روش تجربی ۱۹۸ و مدل شبیه‌سازی شده ۲۰۰ کیلونیوتن است).



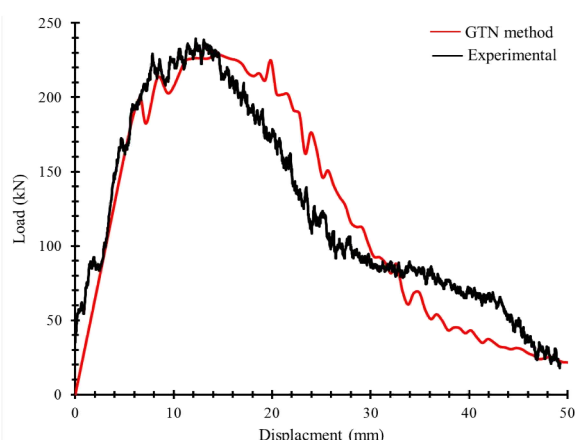
**Fig. 7** Crack propagation in the specimen

شکل ۷ پیشروی ترک در نمونه



**Fig. 8** The curve of force-displacement obtained from simulation

شکل ۸ منحنی نیرو-تغییر مکان بدست آمده از شبیه‌سازی



**Fig. 9** The curve of force-displacement obtained from the drop weight tear test and simulation

شکل ۹ منحنی نیرو-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش ضربه سقوطی و شبیه‌سازی انجام شده

مقدار انرژی شکست به دست آمده از شبیه‌سازی ۵۹۵۹ ژول بود. به عبارت دیگر در مدل شبیه‌سازی شده به روش اصلاح شده گرسون، انرژی شکست ۴ درصد کمتر به دست آمده است، اما مقدار ضریب اصلاح در هر دو روش بسیار به هم نزدیک بود (در روش تجربی ۱/۸ و در مدل شبیه‌سازی شده ۱/۷). از آنجا که ضریب اصلاح نسبت کل انرژی شکست به انرژی رشد ترک می‌باشد، مشخصه‌های مهم منحنی نیرو-تغییر مکان (انرژی کل جذب شده، انرژی رشد ترک و همچنین انرژی شروع ترک) را در خود جای داده است. از سویی استخراج تجربی منحنی نیرو-تغییر مکان همیشه امکان‌پذیر نیست (بویژه در صنایع مختلف)، بنابراین با استفاده از ضریب اصلاح فولادهای مختلف که هر کدام تنها با یک بار آزمایش بدست می‌آیند، می‌توان جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با روش‌های مختلف و برای فولادهای مشابه استفاده کرد.

#### ۶- تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن لوله فولادی API X65 و از آقای مهندس صادقی جهت همکاری در ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش تقدیر و تشکر می‌شود. هم‌چنین از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران بدلیل تامین بخشی از هزینه‌های ساخت ماشین ضربه سقوطی در قالب طرح پژوهشی مشترک با دانشگاه بیرجند قدردانی می‌نماید.

#### ۷- مراجع

- [1] T. Hara, T. Fujishiro, Effect of separation on ductile crack propagation behavior during drop weight tear test. *In International Pipeline Conference*, Vol. 44212, pp. 321-327, 2010.
- [2] ZJ. Ren, C. Ru, Numerical investigation of speed dependent dynamic fracture toughness of line pipe steels. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 1. No. 99, pp. 214-22, 2013.
- [3] L. Pussegoda, A. Fredj, A. Fonzo, G. Demofonti, G. Mannucci, B. Rothwell. Ductile Fracture Resistance Measurements in High Grade Steels. *In International Pipeline Conference* Vol. 42630, pp. 201-208, 2006.
- [4] M. Di Biagio, G. Demofonti, G. Mannucci, F. Iob, C. Spinelli, T. Schmidt. Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. *In International Pipeline Conference*, Vol. 45141, pp. 553-563, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [5] I. Scheider, A. Nonn, A. Völling, A. Mondry, C. Kalwa, A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. Vol. 1, No. 3, pp. 1956-1964, 2014.

آزمایش بدست می‌آید و به ویژگی‌های مواد وابسته است، بنابراین، مقایسه آن با روش عددی می‌تواند قابل اطمینان باشد. از آنجا که اختلاف بین نتایج عددی و آزمایش تجربی امری اجتناب‌ناپذیر است، تکیه بر روش یا مقایسه‌های ساده می‌تواند پژوهشگران و صنعت‌گران را جهت اعتماد به روش‌های عددی بکار گرفته شده در شبیه‌سازی نسبتاً مطمئن سازد. دستگاه ضربه سقوطی مجهز شده معمولاً در آزمایشگاه‌های صنعتی وجود ندارد و در صنعت تنها با مشاهده سطح شکست و محاسبه درصد سطح شکست برشی و مقایسه آن با استاندارد از قابل قبول بودن چقرمگی نمونه و مقاومت آن در برابر شکست اطمینان حاصل می‌کنند. اما با مقایسه ضریب اصلاح، می‌توان به شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز با دقت قابل قبولی تکیه کرد و نمودار نیرو-تغییر مکان استخراج شده از شبیه‌سازی را (که برای بدست آوردن مقادیر واقعی آن باید متحمل وقت و هزینه نسبتاً زیادی شد) معتبر دانست. باید توجه کرد که جهت محاسبه ضریب اصلاح، از مشخصه‌های مهم منحنی نیرو-تغییر مکان مانند انرژی کل جذب شده، انرژی رشد ترک و همچنین انرژی شروع ترک استفاده می‌شود. در فولاد مورد استفاده در تحقیق حاضر ضریب اصلاح برای فولاد پایه [۲۰] و درزجوش ماریچ، ۱/۸ بدست آمده است. استفاده از این مقدار برای فولادهای با گرید مشابه نیز قابل قبول خواهد بود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به تعیین انرژی شکست درزجوش ماریچ فولاد API X65 به صورت تجربی و عددی با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی پرداخته شد. نمونه‌های مورد نظر از بدنه لوله واقعی خطوط انتقال گاز، مطابق استاندارد API 5L3 از ناحیه حاوی درزجوش ماریچ (به گونه‌ای که درزجوش در وسط نمونه قرار گیرد) تهیه شدند. نتایج به شرح زیر است:

در آزمایش ضربه سقوطی انجام شده، انرژی شکست نمونه برابر ۶۲۱۱ و ضریب اصلاح آن مقدار ۱/۸ ژول به دست آمده است. ضریب اصلاح پیشنهادی ارائه شده در تحقیق حاضر شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است، زیرا آزمایش انجام شده در تحقیق حاضر روی نمونه‌های با ضخامت کامل که از لوله واقعی خطوط انتقال انرژی جدا شده‌اند، انجام گرفته است.

مدل‌سازی عددی نمونه دارای درزجوش استاندارد API 5L3 نیز در نرم‌افزار آباکوس به وسیله مدل اصلاح شده گرسون انجام شد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده تطابق خوبی با یکدیگر داشتند.



- [15] SH. Hashemi, Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel, *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 86, No. 8, pp. 533-40, 2009.
- [16] T. Kobayashi, I. Yamamoto, M. Niinomi, Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system. *Journal of testing and evaluation*, Vol. 21, No. 3, pp. 145-53, 1993.
- [17] B. Tanguy, J. Besson, Piques R, Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part I: Experimental results. *Engineering fracture mechanics*, Vol. 72, No. 1, pp. 49-72, 2005.
- [18] G. Demofonti, G. Mannucci, H. Hillenbrand, D. Harris, Evaluation of the suitability of X100 steel pipes for high pressure gas transportation pipelines by full scale tests, *In International Pipeline Conference*, Vol. 41766, pp. 1685-1692, 2004.
- [19] SH. Hashemi, Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 12, pp. 879-84, 2008.
- [20] AA. Majidi-Jirandehi., SH. Hashemi, Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test, *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 1, pp.016552, 2018.
- [21] *America Petroleum Institute* [Report]. Specification for Line Pipe. 45th Edition. Washington: American Petroleum Institute (API); 2012.
- [22] AA. Majidi Jirandehi, SH. Hashemi, Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 219-228, 2017 (in Persian فارسی).
- [6] H. Wang, G. Wang, F. Xuan, S. Tu, Numerical investigation of ductile crack growth behavior in a dissimilar metal welded joint, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 8, pp. 3234-43, 2001.
- [7] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the Charpy V-notch test for welds. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 65, No. 6, pp. 627-43, 2000.
- [8] A. Nonn, C. Kalwa, Simulation of ductile crack propagation in high-strength pipeline steel using damage models. *In International Pipeline Conference*, Vol. 45141, pp. 597-603), American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [9] G. Simha, S. Xu, W. Tyson. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the Drop-Weight Tear Test, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 1, No. 118. Pp. 66-82, 2014.
- [10] C. Simha, S. Xu, W. Tyson, Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 148, pp. 304-23, 2015.
- [11] E. Fathi, SH. Hashemi, Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in drop weight tear test specimen with chevron notch on API X65 steel, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 2, pp. 95-110, 2020 (in Persian فارسی).
- [12] *America Petroleum Institute* [Report]. Recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe. 3th Edition. Washington: American Petroleum Institute (API); 1996.
- [13] W. Maxey, *5th Symposium on Line Pipe Research*, AGA Catalog, 1974.
- [14] J. Wolodko, M. Stephens, Applicability of existing models for predicting ductile fracture arrest in high pressure pipelines, *In International Pipeline Conference* Vol. 42630, pp. 115-123, 2006.