Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(5) (2020) 285-288
DOI: 10.22060/mej.2018.14130.5804

Experimental and Numerical Investigation of Initial Notch Radius Effect on Charpy Fracture Energy in API X65 Steel

A.R. Shahsavani*, S.H. Hashemi

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

ABSTRACT: Different factors such as initial notch angle, notch depth, notch root radius, notch, specimen size, hammer geometry, striker velocity, and initial notch creation method (i.e. broaching and machining), influence the experimental determination of Charpy impact energy. Thus, the study of the influence of these parameters on Charpy fracture energy is important. In the present research, Charpy impact experiments are conducted on test specimens made from API X65 steel (used for gas transportation pipelines). The tests samples have a standard size with different notch radius (within the range of 0.13 - 0.41 mm). By measurement of fracture energy, Charpy impact energy is determined as a function of variations of the initial crack radius. Through having geometrical dimensions of the initial notch and considering the stated standard tolerance the aforementioned function allows the determination of measurement error of API X65 steel Charpy impact energy. Then, the test samples are modeled as 3D in ABAQUS using Gurson damage theory. The comparison of test and simulation results for different notch radius are presented in compared.

Review History:

Received: 2/24/2018
Revised: 10/19/2018
Accepted: 11/10/2018
Available Online: 12/21/2018

Keywords:

API X65 steel
Charpy impact test
V notch radius
Gas transportation pipeline
Gurson–Tvergaard–Needleman model

1. INTRODUCTION

Hashemi [1] measured the amount of Charpy fracture energy for different areas of pipe spiral API X70 of seam welder steel based on the ASTM E23 standard. The amount of fracture energy of this steel is reported 222 J for the area of the basic metal. Mosaddegh et al. [2] investigated the effect of radius and depth of notch on the fracture energy belonging to the three-point bending specimen with U-notched functionally graded copper-steel which is under the mode I loading. In this study, in order to evaluate the fracture force of specimens with finite element analysis, J integral standard was used. Comparison of results of the finite element analysis and the experimental test demonstrated that calculated fracture force by J integral standard has a difference of 17.84% with experimental results. Also, the linear relation between fracture energy and notch radius can be deduced by the resulting graph. Young et al. [3] considered the effect of geometric constraints (depth of notch) on the growth of soft notch in the API X100 steel. In this study, Gurson damage model is used for 2D simulation of the specimen under dynamic Charpy impact test and static tension test.

In the present study, the effect of radius change in the V-notched end on the fracture energy of impact belonging to Charpy experimental specimens is investigated in which specimens are made from API X65 steel. Hereby, a relation is obtained between fracture energy of the API X65 steel and radius of notch end to be used in the case of an error in the manufacturing of the specimen to calculate the standard amount of fracture energy. Also, 3D simulation of specimens is done in the ABAQUS software and the results of the numerical modeling and experimental tests are compared with each other.

2. EXPERIMENTAL STAGES

The experimental specimens with due attention to the ASTM 23 standard for the Charpy impact test [4] were prepared from API X65 tube with outer diameter of 1219 mm (48 inches) and thickness of 14.3 mm in the direction of circumferential (with a notch in the length of the tube). Twenty-four specimens with V-notched with variable end radius (eight radii, three specimens from each of one) were made with due attention to specified limits in the ASTM 23 standard.

Charpy impact test was carried out in the quality control laboratory of Ahvaz tubing factory in which a Zwick Roell system according to standard was used with the capacity of 750J in the environment temperature. The dimensions of the specimens are shown in Table 1.

Table 1: Dimensions of specimens with variable notch radius which are used in Charpy impact test

Number of specimens	Notch radius (mm)
1-3	0.13
4-6	0.17
7-9	0.21
10-12	0.25
13-15	0.29
16-18	0.33
19-21	0.37
22-24	0.41

*Corresponding author's email: shahsavaniamirreza@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

3. SIMULATION

In order to simulate the Charpy impact test, a 3D model is chosen. The simulation was done in ABAQUS 6.12 software. Fig. 1 shows an image of the Charpy impact test specimen accompanied by the striker and support in the environment of simulation software.

4. RESULTS

In Table 2, fracture energy is shown which is obtained from the impact test and numerical modeling.

Energy changes of the Charpy impact in terms of arc radius of V-notched are demonstrated in Fig. 2 (in two graphs, experimental and simulation results are shown). In this figure, the results of the standard specimen (259J) are obtained.

As shown in Fig. 2, by increasing the end radius of V-notched belonging to the standard specimen of the Charpy impact test, the amount of fracture energy increases linearly based on Eq. (1). Also, variation in the fracture energy based on V-notched arc from numerical modeling changes as follows:

$$E = 65.47R + 245.07 \tag{1}$$

Using the Eq. (1), the amount of impact energy for a standard specimen with R = 0.25 mm is 261J, which matches with experimental value (259J). The error resulting from interpolation of the Eq. (1) for calculation of the fracture energy of the standard specimen is just 0.77%. In Table 3, the results of the fracture energy of the standard specimen which are obtained from experimental equations and simulation, are compared with each other. According to the obtained results, errors are less than 1%, it can be deduced that the results of the simulation have a good fit (0.77%) with experimental results.

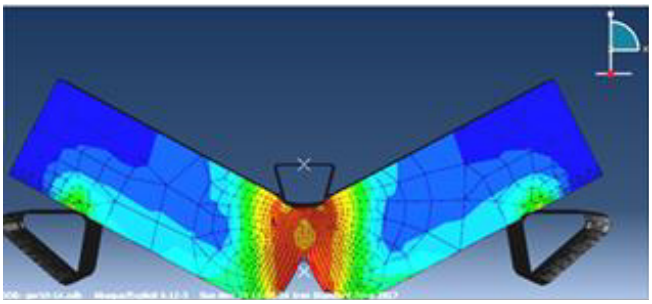


Fig. 1: The environment of ABAQUS software [15]

Table 2: Percentage error related to the results of experimental and simulation test

Radius (mm)	Fracture energy exp. (J)	Fracture energy sim. (J)	Error (%)
0.13	255	253	0.78
0.17	259	258	0.38
0.21	260	259	0.38
0.25	259	261	0.77
0.29	259	263	1.54
0.33	262	266	1.52
0.37	265	268	1.13
0.41	267	274	2.62

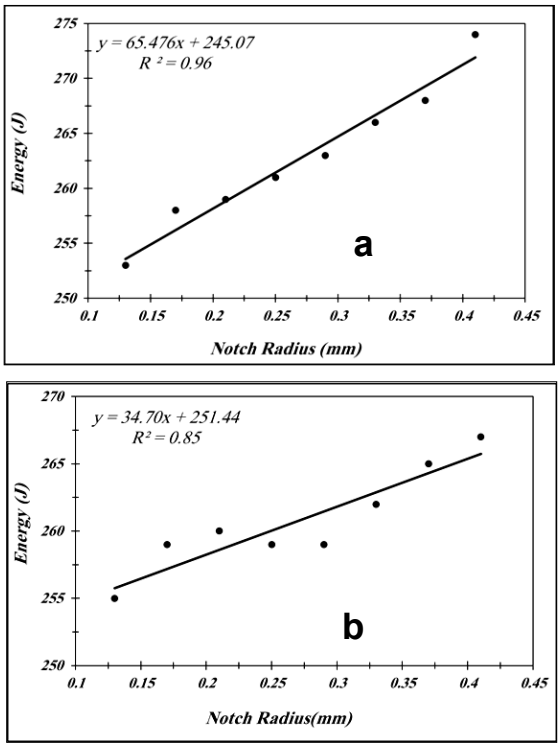


Fig. 2: Energy changes of the Charpy impact in terms of notch radius a) results of the simulation test b) results of the experiment

Table 3: Comparison of fracture energy of standard specimen using two simulation and experimental equations

parameter	Fracture energy (J)	Error (%)
Fracture energy resulting from the experimental test	259	-
Fracture energy resulting from the experimental equation.	260	0.38
Fracture energy resulting from the simulation equation.	261	0.77

5. CONCLUSION

In the present study, the effect of root radius variations in V-notched on the Charpy fracture energy of API X65 steel specimen was investigated. For this study, twenty-four specimens in seven specimen series (each series has three specimens.) with non-standard radius and a specimen series with standard dimensions were tested. The system used in this experiment was chosen with the capacity of 750J according to the ASTM E23 standard. Also, a 3D simulation of specimen took place in the ABAQUS software. The summary of the obtained results is as follows:

1- With increasing end radius of the notch, the Charpy fracture energy increases linearly based on this equation *E=34.70R+251.44*. By means of this equation, the exact amount of the Charpy fracture energy can be calculated even if there is an error in the manufacturing of the specimen for the tested steel (error in arc V-notched).

2- The amount of the impact energy obtained from the

experimental equation for a standard specimen with R = 0.25 mm equals to 260J, which fits with the experimental value (259J). The error resulting from interpolation of the experimental equation for fracture energy calculation of the standard specimen is just 0.38%.

3- In order to validate the experimental results, the 3D simulation was used based on the Gurson damage modified model. Comparison of values obtained from experimental test and simulation results reveals that the amount of the impact energy obtained from Eq. (1) for a standard specimen with R = 0.25 mm equals to 261J, which fits with experimental value (259J). The error resulting from interpolation of the Eq. (1) for fracture energy calculation of the standard specimen is just 0.77%.

REFERENCES

[1] S.H. Hashemi, Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(12) (2008) 879-884.

[2] S. Hashemi, D. Mohammadyani, Characterization of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 98 (2012) 8-15.

[3] Y. Li, W. Mao, L. Ji, C. Huo, The Effect of Constraint on Ductile Crack Growth for Anisotropy Evaluation of X100 Pipeline Steels, Procedia Materials Science, 3 (2014) 1505-1511.

[4] E. ASTM, 23; Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, in: Annual Book of ASTM Standards, 2016.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۵، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۱۳۹ تا ۱۱۵۲
DOI: 10.22060/mej.2018.14130.5804

بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری اثر شعاع شیار بر انرژی شکست شارپی در فولاد ایکس شصت و پنج

امیررضا شاهسونی*، سید حجت هاشمی

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

خلاصه: عوامل متعددی به عنوان مثال زاویه شیار اولیه، عمق شیار، شعاع ریشه شیار، ابعاد نمونه، هندسه و سرعت ضربه چکش و روش ایجاد شیار اولیه (مانند خان‌کشی یا ماشین‌کاری)؛ در تعیین تجربی انرژی شکست شارپی دخالت دارند. مطالعه تاثیر این پارامترها بر انرژی شکست شارپی اهمیت دارد. درتحقیق حاضر، آزمایش ضربه شارپی روی نمونه ساخته شده از فولاد ایکس شصت و پنج انجام شد (مورد استفاده در خطوط لوله انتقال گاز). انرژی شکست نمونه‌های استاندارد با شعاع شیار متفاوت (از بازه ۰/۱۳ تا ۰/۴۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. ارتباط تغییرات انرژی ضربه شارپی با شعاع شیار اولیه تعیین گشت. با استفاده از این رابطه می‌توان با معلوم بودن ابعاد هندسی شیار اولیه با احتساب تلرانس‌های مجاز قید شده در استاندارد، میزان خطا در اندازه‌گیری انرژی شکست شارپی فولاد آزمایش شده را تعیین نمود. علاوه بر آن، نمونه‌های آزمایش ضربه در نرم‌افزار آباکوس توسط مدل آسیب گرسون به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد. سپس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ارائه شده برای شعاع شیار مختلف مقایسه شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۰۵-۱۲-۱۳۹۶
بازنگری: ۲۷-۰۷-۱۳۹۷
پذیرش: ۱۹-۰۸-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۳۰-۰۹-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:
فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵
آزمایش ضربه شارپی
شعاع شیارVشکل
لوله فولادی انتقال گاز
مدل آسیب گرسون

۱- مقدمه

آزمایش ضربه شارپی، روشی کم‌هزینه و قابل اطمینان برای تعیین انرژی شکست و بررسی رفتار انتقال سازه‌های فولادی است. آزمایش ضربه شارپی از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۰ به تکامل رسید [۱] و به عنوان یک آزمایش استاندارد برای بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها شناخته شد. نتایج این آزمایش به شدت به شکل نمونه آزمایش و ابعاد آن، ابعاد شیار، سرعت ضربه و ابعاد قید و بندها بستگی دارد. به همین منظور استانداردی با عنوان ASTM E23 [1] به وجود آمد؛ که تمامی متغیرهای مربوط به نمونه آزمایش، ابعاد، سرعت دستگاه آزمایشگاهی و موارد دیگر را مشخص می‌کند. این آزمایش تاکنون در مقالات متعددی برای تعیین انرژی شکست فولادهای مختلف و سایر فلزات و مواد کامپوزیتی استفاده شده است.

لوکاس و همکاران [۲] به بررسی عددی اندازه شیار و تأثیر آن بر شکست نمونه ضربه شارپی ماده‌ای از مرتبه‌ای مس-فولاد پرداختند. همچنین، در این تحقیق ارتباط خطی بین شعاع شیار نیم‌دایره‌ای با انرژی شکست اثبات شده است. شیونی و همکاران [۳] به مقایسه روش المان محدود توسعه یافته[2] مدل جی.تی.اِن[3] برای شروع و رشد ترک پرداخته‌اند. در این آزمایش کشش شبه‌استاتیکی ماده‌ای از جنس آلومینیوم A 1050 مورد بررسی قرار گرفته است. هر دو مدل نتایج تقریباً ثابتی را ارائه کردند اما مدل جی.تی.اِن برای نمایش رشد ترک در بارگذاری دینامیکی بهتر عمل کرد. هاشمی و محمدیان [۴] انرژی شکست فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵[4] را در نواحی مختلف حول درز جوش ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه جوش و ناحیه فلز پایه در آزمایش ضربه شارپی بررسی کردند. مقدار انرژی شکست این فولاد برای ناحیه فلز پایه ۲۶۴ ژول گزارش شده است. هاشمی [۵] مقدار انرژی شکست شارپی را برای نواحی مختلف فولاد درز جوش مارپیچ لوله آ.پی.آی

1 American Society for Testing and Materials (ASTM)

2 Extended Finite Element Method (XFEM)
3 Gurson–Tvergaard–Needleman (GTN)
4 API X65

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amir_reza@birjand.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

ایکس۷۰ بر اساس استاندارد آ.اِس.تی.اِم ای۲۳ اندازه‌گیری کرد. مقدار انرژی شکست این فولاد برای ناحیه فلز پایه ۲۲۲ ژول گزارش شده است. مصدق و همکاران [۶] اثر شعاع و عمق شیار بر مقدار انرژی شکست نمونه خمش سه نقطه با شیار U شکل از جنس مرتبه‌ای مس-فولاد تحت مود اول بارگذاری را بررسی کردند. در این تحقیق برای ارزیابی نیروی شکست نمونه‌ها با تحلیل المان محدود از معیار انتگرال J استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل المان محدود با نتایج حاصل از آزمایش تجربی نشان داد که نیروی شکست محاسبه شده با معیار انتگرال J % ۱۷/۸۴ با نتایج تجربی اختلاف وجود دارد. همچنین، رابطه خطی انرژی شکست با شعاع شیار در نمودار نتایج قابل استناد است. نظری و همکاران [۷] به مطالعه موقعیت و عمق شیار از ۰ تا ۳ میلی‌متر و اثر لایه‌های موجود در نمونه ضربه شارپی از جنس فولاد مرتبه‌ای به‌منظور توقف رشد ترک پرداختند. در این تحقیق فرایند آزمایش ضربه شارپی به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. یانگ و همکاران [۸] به بررسی اثر قیود هندسی (عمق شیار) بر رشد ترک نرم در فولاد آ.پی.آی ایکس۱۰۰ پرداختند. در این تحقیق از مدل آسیب گرسون برای شبیه‌سازی دوبعدی نمونه تحت آزمایش ضربه شارپی دینامیکی و آزمایش کشش استاتیکی استفاده شده است. قاجار و همکاران [۹] چقرمگی شکست فولاد ریل یو.آی.سی[1]۶۰ را با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در محدوده دمای ۴۰- تا ۶۰ درجه سلسیوس بررسی کرده‌اند. چقرمگی شکست ریل با توجه به محدوده دمایی آزمایش شده از ۲۷ تا ۵۵ $MPa.m^{1/2}$ بدست آمده است. براتی و همکاران [۱۰] اثر شعاع و عمق شیار U شکل (به ترتیب از ۰تا ۳ میلی‌متر و ۰ تا ۳۰ میلی‌متر) در آزمایش ضربه شارپی را بر مقدار متوسط چگالی انرژی کرنشی نمونه بررسی کردند. مقدار متوسط چگالی انرژی کرنش برای شعاع شیار ۱ میلی‌متر، ۳۸ kPa گزارش شده است. پانین و همکاران [۱۱] اثر شکل و اندازه شیار در فولاد ۱۲Cr1MoV تحت باز گذاری ضربه‌ای با شیارها U، V و I شکل، در سه اندازه مختلف بررسی کرده‌اند؛ نتایج این بارگذاری ضربه‌ای در دو دمای ۲۰ و ۴۰- درجه سلسیوس نشان از افزایش خطی انرژی شکست این فولاد برحسب شعاع انتهای شیار دارد.

در تحقیق حاضر اثر تغییر شعاع در انتهای شیار V شکل بر انرژی شکست ضربه نمونه‌های آزمایشگاهی شارپی از جنس فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ بررسی می‌شود. بدین‌وسیله رابطه‌ای بین انرژی شکست فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ و شعاع انتهای شیار بدست می‌آید، تا در صورت خطا در ساخت نمونه بتوان به کمک این رابطه مقدار انرژی شکست استاندارد را محاسبه کرد. هم‌چنین شبیه‌سازی نمونه‌ها بصورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس انجام و مقایسه نتایج عددی و تجربی انجام می‌شود.

۲- آشنایی با فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵

فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵به‌طور گسترده در خطوط انتقال گاز ایران به شکل لوله‌های قطور فولادی، استفاده می‌شود. این فولاد،کربن-منگنزی است و نیوبیوم، وانادیوم، آلومینیوم و تیتانیوم عناصر اصلی آلیاژ آن را تشکیل می‌دهند. استحکام بالا، چقرمگی بالا و قابلیت جوش‌پذیری مناسب، ویژگی‌های اصلی این فولاد است. دستیابی به این ویژگی‌ها با ترکیب مناسب عناصر میکروآلیاژی و عملیات ترمومکانیکی میسر شده است. در مقالات مختلف ترکیب این فولاد به‌طور عمومی و نقش عناصر اصلی آلیاژسازی این فولاد به‌طور خاص در استاندارد مورد بررسی قرارگرفته است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ داده شده است [۱۲].

خواص مکانیکی فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ در جهت محیطی لوله با استفاده از آزمایش کشش تک‌محوره بر اساس استاندارد آ.پی.آی ۵اِل[2] مطابق جدول ۲ اندازه گیری شده‌است.

۳- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها با توجه به استاندارد آ.اِس.تی.اِم ای ۲۳ برای آزمایش ضربه شارپی [۱۳] از لوله آ.پی.آی ایکس۶۵ با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر (۴۸ اینچ) و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر در جهت محیطی لوله (با شیاری در امتداد طول لوله) تهیه شد. بیست‌وچهار نمونه با شیار V شکل با شعاع انتهای متغیر (هشت شعاع، از هر کدام سه نمونه) با توجه به حدود مشخص شده در استاندارد آ.اِس.تی.اِم ای ۲۳ (شکل ۱) ساخته شد. ابعاد نمونه‌ها در جدول۳ نشان داده شده است

ابتدا قطعه چهارگوش از بدنه لوله فولادی آ.پی.آی ایکس۶۵ به وسیله سنگ فرز (مکانیزمی ابداعی) بریده شد (شکل ۲)، تا از هدر رفت لوله به دلیل وجود ناحیه متأثر از حرارت (در روش مرسوم برش

1 **UIC60**

2 API 5L

جدول ۱: ترکیب شیمیایی لوله فولادی آ.پی.آی ایکس۶۵ [۱۲]

Table 1. Chemical composition of API X65 steel pipe [12]

عنصر	مقدار (درصد وزنی)
C	۰/۰۷۲
P	۰/۰۰۸
Mn	۱/۴۵۰
S	۰/۰۰۲
Si	۰/۲۰۱
Cr	۰/۳۲۰
Fe	Balance

جدول ۲: خواص مکانیکی لوله فولادی آ.پی.آی ایکس۶۵ در جهت محیطی [۱۲]

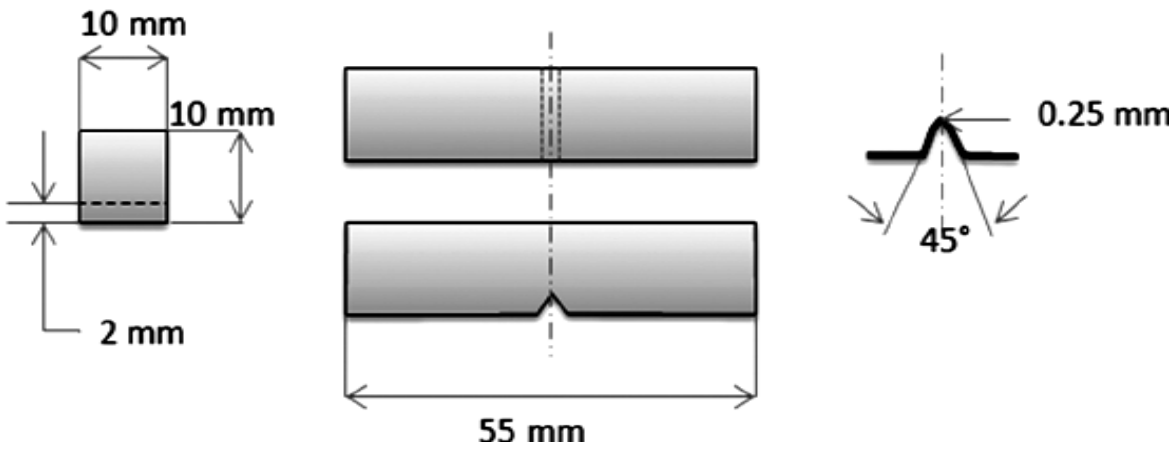
Table 2: Mechanical properties of API X65 steel pipe in the circumferential direction [12]

خواص مکانیکی	مقدار
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۱۰
تنش تسلیم (MPa)	۴۹۰
تنش نهایی (MPa)	۵۵۲
نسبت پواسان	۰/۳
سختی ویکرز (HV)	۲۲۸-۲۱۷

جدول ۳: ابعاد نمونه‌های آزمایش ضربه شارپی با شعاع شیار متغیر

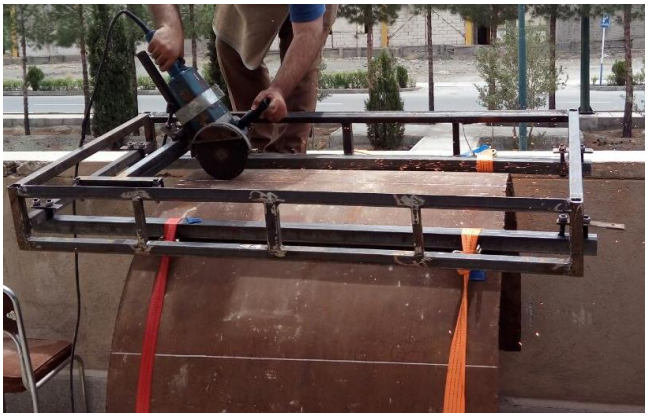
Table 3. Dimensions of specimens with variable notch radius which are used in the Charpy impact test

شماره نمونه	شعاع شیار (میلی‌متر)
۳-۱	۰/۱۳
۶-۴	۰/۱۷
۹-۷	۰/۲۱
۱۲-۱۰	۰/۲۵
۱۵-۱۳	۰/۲۹
۱۸-۱۶	۰/۳۳
۲۱-۱۹	۰/۳۷
۲۴-۲۲	۰/۴۱



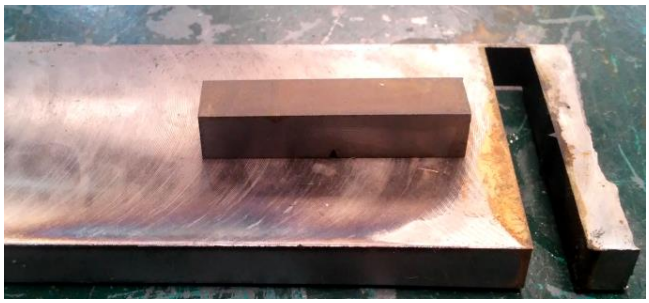
شکل ۱: ابعاد نمونه استاندارد آزمایش ضربه شارپی [۱۴]

Fig. 1: Dimensions of standard specimen in the Charpy impact test [14]



شکل ۲: برش لوله فولادی به وسیله سنگ فرز (مکانیزمی ابداعی)

Fig. 2: Steel tube cutting by Angle Grinder (innovative mechanism)



شکل ۳: نمونه آزمایش ضربه برش داده شده به وسیله وایرکات

Fig. 3: Impact test specimen cutting by wire cut

به وسیله هوا-گاز) در لبه برش جلوگیری شود.

سپس مطابق استاندارد، فرزکاری و سنگ‌زنی قطعه چهارگوش جدا شده انجام شد تا نمونه بدون هیچگونه تنشی از قوس لوله (راستای محیطی لوله) استخراج گردد. در نهایت به وسیله وایرکات شیار V شکل با شعاع انتهایی متغیر برش داده شد (شکل ۳).

۴- روش انجام آزمایش ضربه شارپی

آزمایش ضربه شارپی در آزمایشگاه کنترل کیفیت کارخانه لوله‌سازی اهواز با استفاده از دستگاه زوئیک رول[1] مطابق استاندارد با ظرفیت ۷۵۰ ژول در دمای محیط (شکل ۴) انجام شد. عملکرد کلی ماشین ضربه شارپی به گونه‌ای است که ضربه‌زن به صورت پاندولی به نمونه‌ای که در پایین‌ترین قسمت تکیه‌گاه قرار دارد برخورد می‌کند. سپس، با محاسبه اختلاف ارتفاع قبل و بعد از برخورد ضربه‌زن مقدار

1 Zwick Roell

شکل ۴: دستگاه ضربه شارپی با ظرفیت ۷۵۰ ژول

Fig. 4: Charpy impact system with capacity of 750J

انرژی جذب شده جهت شکست نمونه محاسبه می‌شود.

در این آزمایش سه نمونه استاندارد و بیست‌ویک نمونه با هفت شعاع انتهای شیار V شکل غیر استاندارد تحت آزمایش ضربه شارپی قرار گرفت. جدول ۴ مشخصات اساسی ماشین ضربه شارپی به ظرفیت ۷۵۰ ژول را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش ضربه شارپی در جدول ۵ داده شده است. در این جدول میانگین انرژی شکست حاصل از سه آزمایش روی نمونه استاندارد با شعاع R=۰/۲۵mm، ۲۵۹ ژول اندازه‌گیری شده است.

شکل ۵ نمونه استاندار ضربه شارپی، قبل و بعد از آزمایش ضربه را نشان می‌دهد (در این آزمایش هیچ یک از نمونه‌ها به‌طور کامل شکسته نشد).

۵- نتایج تجربی آزمایش ضربه شارپی

در شکل ۶ تغییرات انرژی ضربه شارپی برای فولاد آزمایش شده برحسب شعاع ریشه شیار V شکل نشان داده شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش شعاع در نمونه‌های آزمایش

جدول ۴: مشخصات اساسی ماشین ضربه شارپی به ظرفیت ۷۵۰ ژول

Table 4: Fundamental features of Charpy impact machine with capacity of 750J

شعاع ضربه‌زن (میلی‌متر)	ظرفیت (ژول)	سرعت ضربه‌زن (متر بر ثانیه)	جرم ضربه‌زن (کیلوگرم)
۸	۷۵۰	۵/۴۲	۵۰

جدول ۵: نتایج آزمایش تجربی ضربه شارپی برای ۲۴ نمونه از فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵

Table 5: Results of the Charpy impact test for 24 specimens of API X65 steel

شماره نمونه	انرژی ضربه شکست شارپی (ژول)	میانگین انرژی ضربه (ژول)
۳-۱	۲۵۴/۷۲، ۲۵۵/۳، ۲۵۶/۴۹	۲۵۵
۶-۴	۲۵۸/۷۶، ۲۵۹/۰۷، ۲۶۰/۲۷	۲۵۹
۹-۷	۲۶۰/۶۹، ۲۵۹/۰۷، ۲۶۰/۰۷	۲۶۰
۱۲-۱۰	۲۵۷/۶۹، ۲۶۱/۰۷، ۲۵۷/۰۳	۲۵۹
۱۵-۱۳	۲۵۸/۸۷، ۲۵۸/۶۰، ۲۶۰/۸۰	۲۵۹
۱۸-۱۶	۲۵۵/۸۷، ۲۶۹/۲۰، ۲۶۱/۰۷	۲۶۲
۲۱-۱۹	۲۶۵/۷۱، ۲۶۲/۸۱، ۲۶۵/۷۱	۲۶۵
۲۴-۲۲	۲۷۳/۲۱، ۲۶۶/۸۷، ۲۶۴/۵۰،	۲۶۷

ضربه شارپی، مقدار انرژی شکست به صورت خطی بر اساس رابطه زیر افزایش پیدا می‌کند:

$$E = 34.70R + 251.44 \quad (۱)$$

شکل ۷ تغییرات انرژی ضربه شارپی برحسب شعاع قوس را با حذف نتایج نمونه استاندارد (۲۵۹ ژول) نشان می‌دهد.

رابطه خطی بین انرژی ضربه‌ی شارپی و شعاع قوس بر اساس شکل ۷ به‌صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$E = 34.33R + 251.69 \quad (۲)$$

با استفاده از رابطه (۲) مقدار انرژی ضربه برای نمونه استاندارد با شعاع ۰/۲۵ میلی‌متر برابر ۲۶۰ ژول بدست می‌آید که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درون‌یابی رابطه (۲) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۳۸ درصد است.

۶- مدل آسیب گرسون

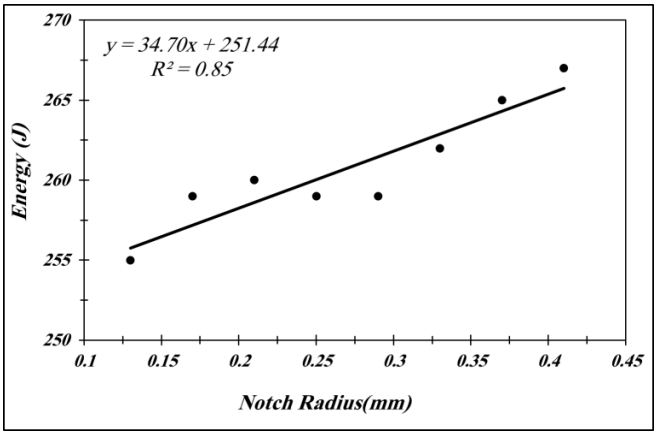
در سال ۱۹۷۷ گرسون[1] روشی برای رسیدن به یک سطح تسلیم تقریبی برای ماده‌ای که دارای حفره بوده را پیشنهاد کرد. تابع تسلیم گرسون به صورت زیر تعریف شد [۱۴]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2f.\mathrm{Cosh}\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_y}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (۳)$$

1 Gurson

شکل ۵: نمونه با شعاع شیار استاندارد قبل و بعد از آزمایش ضربه شارپی

Fig. 5: The specimen with standard notch radius before and after Charpy impact test

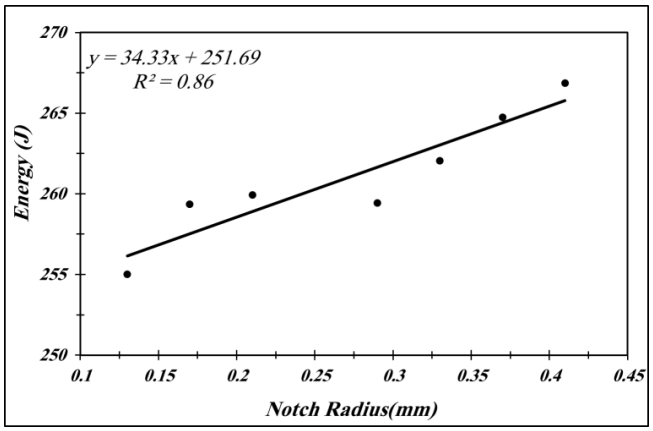


شکل ۶: تغییرات انرژی ضربه شارپی برحسب شعاع شیار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

Fig. 6: Variation of Charpy impact energy in terms of notch radius by means of experimental data

تنش میانگین و σ_m تنش معادل ون‌میزز، σ_{eq} در این رابطه نسبت حجم f تنش تسلیم ماتریس ماده است. همچنین، σ_y حفره‌ها است (که به صورت نسبت حجم کل حفره‌ها به حجم کل ماده تعریف می‌شود). از آنجایی‌که اختلافاتی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی کامپیوتری در مدل اولیه گرسون وجود داشت و سطوح تسلیم بعد از تسلیم اولیه کوچک‌تر از مقدار واقعی بود، تیورگارد[1]

1 Tvergaard



شکل ۷: تغییرات انرژی ضربه شارپی برحسب شعاع شیار با استفاده از هفت سری داده آزمایشگاهی؛ حذف مقدار بدست آمده از آزمایش برای نمونه استاندارد

Fig. 7: Variation of the Charpy impact energy in terms of notch radius by means of 7 series of experimental data; elimination of the obtained value from test for standard specimen

در سال ۱۹۸۱ برای کاهش دادن اختلاف فوق‌الذکر، دو پارامتر تعدیل کننده (q_1, q_2) در تابع تسلیم گرسون را معرفی نمود ،تا اثرات کرنش سختی و اثر متقابل حفره ها نیز منظور شود در نتیجه مدل اولیه گرسون به صورت رابطه زیر اصلاح شد:

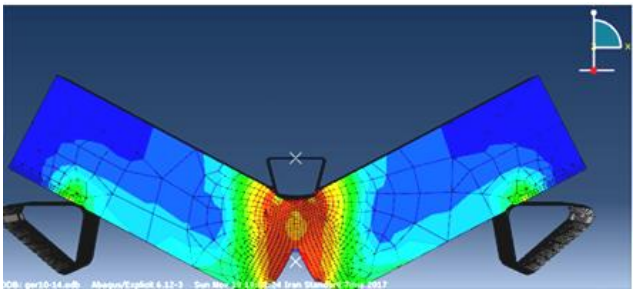
$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \,.\mathrm{Cosh}\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_y}\right) - \left[1 + \left(q_1 f^2\right)\right] = 0 \qquad (۴)$$

در سال ۱۹۸۴ تیورگارد و نیدلمن[2] تابع را برای کاهش سریع ظرفیت تحمل تنش در مراحل نهایی و ادغام حفره‌ها را برای این مدل معرفی کرده‌اند. تابع به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & f \le f_c \\ f_c + \dfrac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c}(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \qquad (۵)$$

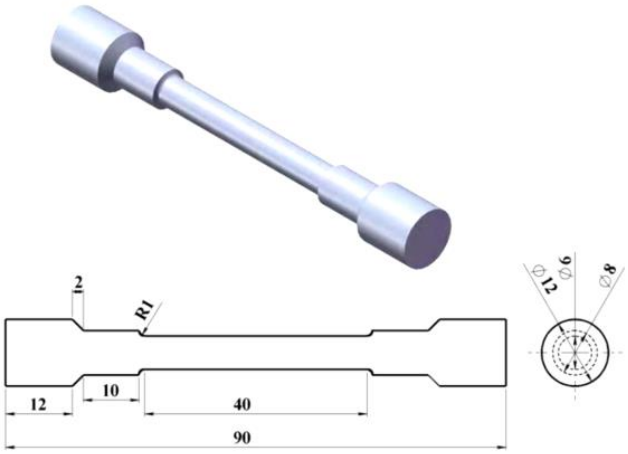
در این رابطه f_c مقدار بحرانی نسبت حجم حفره‌ها در لحظه‌ای است که با ادغام حفره‌ها شروع می‌شود (مقداری که در آن کاهش سریع بار شروع می‌شود) و همچنین، f_f نسبت حجم حفره در پایان شکست است. با جایگزینی f^* به جای f در رابطه (۴)، مدل اصلاح

2 Needleman



شکل ۸: محیط نرم‌افزار آباکوس [۱۵]

Fig. 8: Environment of ABAQUS software [15]



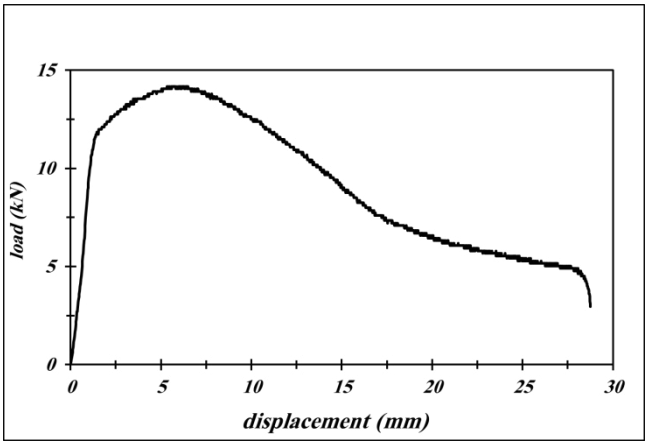
شکل ۹: شماتیک نمونه آزمایش کشش تک محوره هموار در جهت محیطی لوله (ابعاد برحسب میلی‌متر) [۱۷]

Fig. 9: The schematic of uniaxial tension test in the circumferential direction (dimensions are in terms of mm) [17]

شده گرسون به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\Phi=\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2+2q_1f^*.\mathrm{Cosh}\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_y}\right)-\left(q_1f^*\right)^2-1=0 \qquad (۶)$$

برای شبیه‌سازی آزمایش ضربه شارپی در مقالات مدل‌های دو و سه‌بعدی ارائه شده است. از آنجایی‌که در مدل دوبعدی امکان جریان ماده در راستای محیطی یا ضخامت وجود ندارد و همچنین وجود تنش‌های سه‌بعدی در نوک ترک، باعث کاهش دقت در شبیه‌سازی دوبعدی می‌گردد؛ بنابراین برای شبیه‌سازی مناسب شکست فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ در آزمایش ضربه شارپی مدل سه‌بعدی انتخاب شده است. مدل‌سازی سه‌بعدی هفت نمونه با شعاع انتهای شیار متغیر به همراه نمونه با شیار استاندارد در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۲ انجام شد. شکل ۸ تصویر نمونه آزمایش ضربه شارپی به همراه



شکل ۱۰: نمودار تجربی نیرو-جابجایی فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵(در جهت محیطی لوله) [۱۶]

Fig. 10: Experimental plot of force-displacement for API X65 steel (in the circumferential direction of pipe) [16]

ضربه‌زن و تکیه‌گاه در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

برای شبیه‌سازی اولیه آزمایش ضربه شارپی از ضرایب کالیبره شده مرجع [۱۶] حاصل از آزمایش کشش تک محوری برای این فولاد مطابق جدول ۶ استفاده شد.

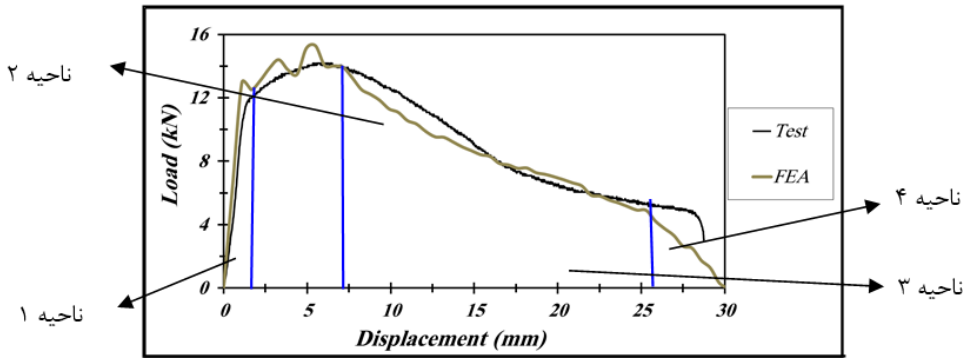
در این مرجع نمونه آزمایش کشش تک محور از نوع هموار مطابق شکل ۹ در سه جهت محیطی، طولی و درز جوش (برای هر کدام سه نمونه) برای تعیین خواص مکانیکی لوله آ.پی.آی ایکس۶۵ مطابق استاندارد ASTM A370 [۱۷] آزمایش شد.

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی از داده‌های تجربی مرجع [۱۶] مطابق شکل ۱۰ استفاده شده است.

این نمودار اطلاعات آزمایشگاهی نیرو-جابجایی برای فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ حاصل از آزمایش ضربه به وسیله ماشین ضربه شارپی[1] تجهیز شده با ظرفیت ۲۹۴ ژول (جرم چکش ۱۹/۵ کیلوگرم و سرعت ضربه۵/۵ متر بر ثانیه) را نشان می‌دهد [۱۶]. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۱ نمایش داده است.

در شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی (نمودار با خط سیاه) و شبیه‌سازی (نمودار با خط قهوه‌ای) به چهار ناحیه تقسیم‌شده و هر ناحیه به صورت جداگانه مقایسه شده است. ناحیه الاستیک (ناحیه ۱) از ابتدا تا جابجایی ۲ میلی‌متر از نمودار مربوط به

1 Losenhausenwerk Charpy



شکل ۱۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش ضربه‌ی شارپی با نتایج تجربی برای فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ [۹]

Fig. 11: Comparison of numerical results of Charpy impact test with experimental results for API X65 steel [9]

جدول ۶: ضرایب کالیبره شده رابطه (۴) برای فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ حاصل از آزمایش کشش [۱۲]

Table 6: Calibrated coefficients of Eq. (4) for API X65 steel from the tension test [12]

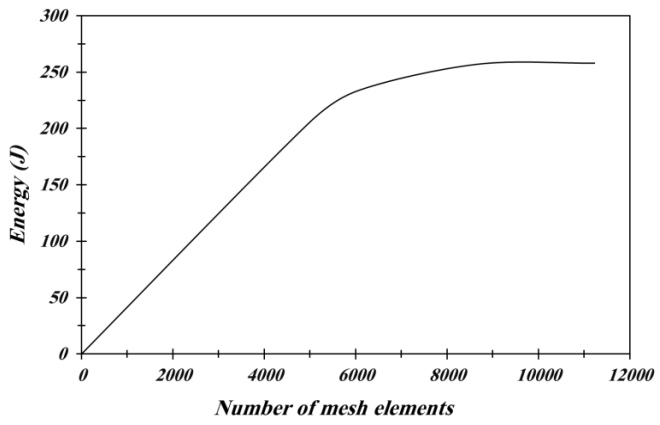
ضرایب جی.تی.اِن	q_1	q_2	q_3	ε_N	s_N	f_N	f_0	f_c	f_f
مقدار	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۰۳	۷/۰۷x۱۰$^{-۵}$	۰/۰۱۹	۰/۲۹

جدول ۷: ضرایب کالیبره شده رابطه (۴) برای فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵

Table 7: Calibrated coefficients of Eq. (4) for API X65 steel

ضرایب جی.تی.اِن	q_1	q_2	q_3	ε_N	s_N	f_N	f_0	f_c	f_f
نتایج تحقیق حاضر	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۰۳	۷/۰۷x۱۰$^{-۵}$	۰/۰۲۵	۰/۳۶
نتایج مرجع [۱۲]	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۰۳	۷/۰۷x۱۰$^{-۵}$	۰/۰۱۹	۰/۲۹

این ناحیه است؛ در این ناحیه دو نمودار از انطباق مناسبی برخوردار می‌باشند. ناحیه کارسختی (ناحیه ۲) یا ابتدای ناحیه رشد ترک، از ۲ تا ۷ میلی‌متر تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه بوده است؛ با توجه به نوسانات نسبتاً زیاد در نتایج شبیه‌سازی دو نمودار از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. ناحیه نرم‌شوندگی (ناحیه ۳)؛ ناحیه گسترش ترک که از ۷ تا ۲۷ میلی‌متر از تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه بوده است. با توجه به نمودار از جابجایی ۷ تا ۱۶ میلی‌متر؛ دو نمودار به‌طور کامل بر هم منطبق نشده‌اند؛ این ناحیه از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است که می‌تواند دلایل محیطی یا عددی داشته باشد، دلایل محیطی عدم رعایت استاندارد در ساخت نمونه، کالیبره نبودن دستگاه ضربه شارپی، فرسودگی تکیه‌گاه و ضربه‌زن و غیره؛ دلایل عددی آن، ساده‌سازی‌های که در مدل آسیب گرسون در نظر گرفته شده است؛ در این مدل حفره‌های موجود در ماده، بصورت کروی فرض شده است. همچنین سطح شکست ماده در این



شکل ۱۲: نمودار تحلیل حساسیت به شبکه [۱۵]

Fig. 12: Plot of the sensitivity analysis [15]

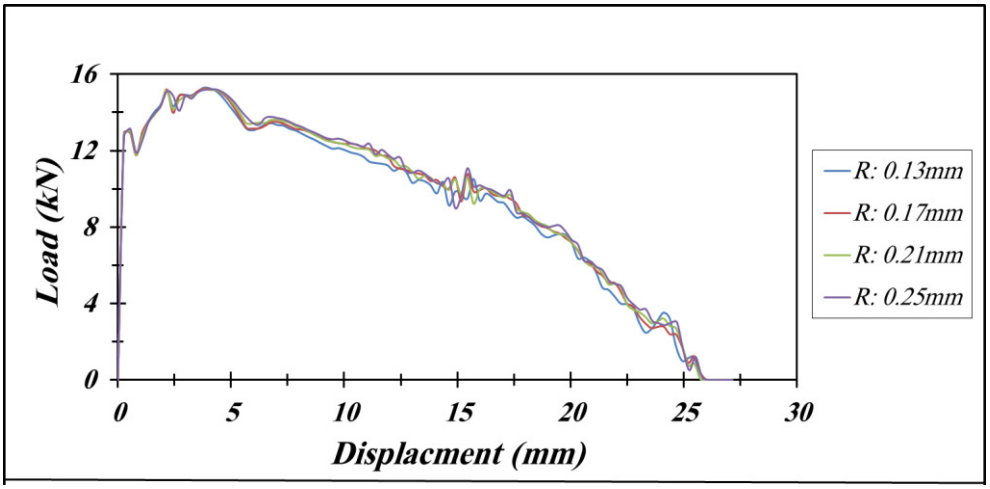
مدل کاملاً تخت فرض شده است که باعث خطا بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌شود. در ناحیه شکست یا جدایش (ناحیه ۴) نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی هیچ‌گونه انطباقی ندارند؛ البته نتایج این ناحیه به صورت کامل در مرجع [۱۶] بیان نشده است. در نهایت ضرایب کالیبره شده مدل اصلاح شده آسیب گرسون برای فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ در جدول ۷ گزارش شده است. مقایسه نه ضریب مدل اصلاح شده آسیب گرسون در جدول ۷ صورت گرفته است. این نتایج هم‌خوانی مناسب ضرایب مدل جی.تی.اِن با تحقیقی که در سال ۱۳۸۹ [۱۲] بر روی فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ انجام‌شده است را نشان می‌دهد. البته برای اعمال شکست حاصل از ضربه‌ی شارپی نیاز به f_f و f_c بالاتری می‌باشد.

بعد از کالیبره شدن پارامترهای رابطه اصلاح شده گرسون؛ شبیه‌سازی انجام شده (ماشین ضربه شارپی با ظرفیت ۲۹۴ ژول) را با داده‌های جدول ۴ جایگزین کرده تا شبیه‌سازی در شرایط حاکم بر این تحقیق (ماشین ضربه شارپی با ظرفیت ۷۵۰ ژول) برای هشت نمونه ضربه شارپی با شعاع انتهای شیار متغیر انجام پذیرد.

اندازه شبکه‌بندی و نوع المان تأثیر بسیار زیادی بر نتایج شبیه‌سازی دارد به همین دلیل اندازه شبکه‌بندی اطراف شیار ۱۰۰۰ میکرون تا ۲۵۰۰ میکرون و از نوع المان C3D8R هشت گره‌ای انتخاب شد، این مقادیر با توجه به نمودار تحلیل حساسیت به شبکه تعیین شده است (شکل ۱۲). همچنین، اندازه المان‌ها اطراف تکیه‌گاه ۲۵۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است بنابراین، تعداد کل المان‌های تشکیل‌دهنده نمونه برابر ۱۱۲۵۰ خواهد بود. در نهایت ضربه‌زن و تکیه‌گاه به صورت صلب در نظرگرفته شده و شبکه‌بندی و حل مسئله انجام می‌شود [۱۵].

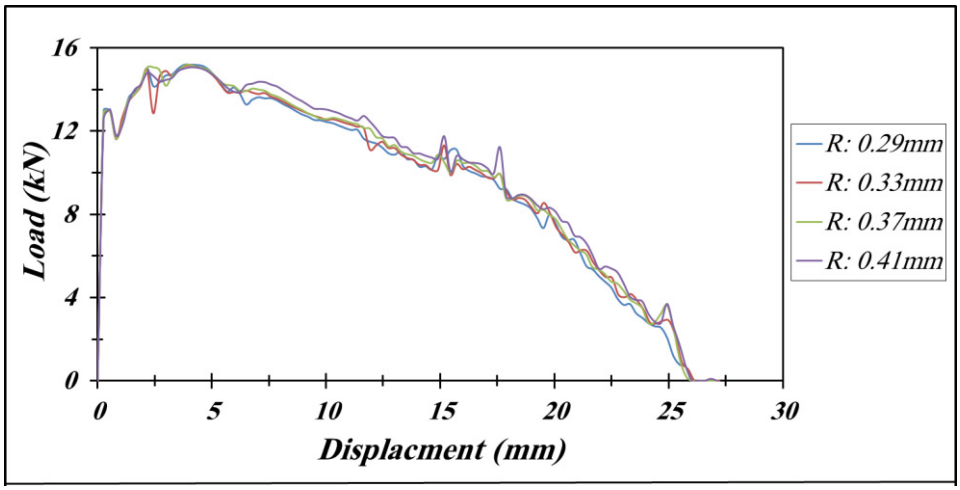
در شکل ۱۳ و ۱۴ نمودارهای نیرو-جابجایی هشت نمونه آزمایش ضربه شارپی حاصل از مدل اصلاح شده آسیب گرسون در دو گروه و هرکدام شامل چهار قوس شیار مختلف از نمونه ضربه شارپی مقایسه شده‌اند.

ناحیه الاستیک و ناحیه ابتدای شروع ترک (جابجایی تا ۵/۵ میلی‌متر) در شکل ۱۳ و ۱۴؛ نشان از انطباق مناسب نمودارها است. ناحیه گسترش ترک و ناحیه شکست از جابجایی ۵/۵ تا ۲۶ میلی‌متر در نمودارهای فوق نشان می‌دهد که با افزایش شعاع انتهای شیار



شکل ۱۳: مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی چهار شعاع شیار نمونه آزمایش ضربه‌ی شارپی به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۱۷، ۰/۲۱ و ۰/۲۵ میلی‌متر

Fig. 13: Comparison of force-displacement plots of four notch radius for the Charpy impact test 0.13, 0.17, 0.21 and 0.25 mm, respectively.



شکل ۱۴: مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی چهار شعاع شیار نمونه آزمایش ضربه شارپی به ترتیب ۰/۲۹، ۰/۳۳، ۰/۳۷ و ۰/۴۱ میلی‌متر

Fig. 14: Comparison of force-displacement plots of four notch radius for the Charpy impact test 0.29, 0.33, 0.37 and 0.41 mm, respectively.

که موجب افزایش سطح زیر نمودار و در نتیجه افزایش مقدار انرژی شکست فولاد می‌گردد. این نتایج با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی نمونه‌های ضربه‌ی شارپی فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ که با افزایش شعاع انتهای شیار مقدار انرژی شکست آن افزایش می‌یابد، هم‌خوانی دارد. تغییرات تنش میزز در اطراف نوک ترک در نمونه ضربه شارپی در محیط نرم افزار آباکوس در زمان‌های مختلف (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌ثانیه) در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

دیده می‌شود که نوک ترک کاملاً به صورت متقارن باز می‌شود که مبین ترک از نوع بارگذاری مود یک است. همچنین تمرکز تنش در نوک شیار وجود دارد و با فاصله گرفتن از نوک ترک، تنش میزز کاهش می‌یابد. تقارن این مؤلفه تنش نسبت به محور عمودی کاملاً مشهود است که از تقارن هندسه و بارگذاری نسبت به این محور ناشی می‌شود. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در زمان ۰/۷ میلی‌ثانیه ترک شروع به رشد می‌کند. کل فرایند شبیه‌سازی۴ میلی‌ثانیه است

۷- نتایج

در جدول ۸ انرژی شکست حاصل آزمایش ضربه به صورت تجربی و انرژی شکست حاصل از مدل‌سازی نشان داده شده است.

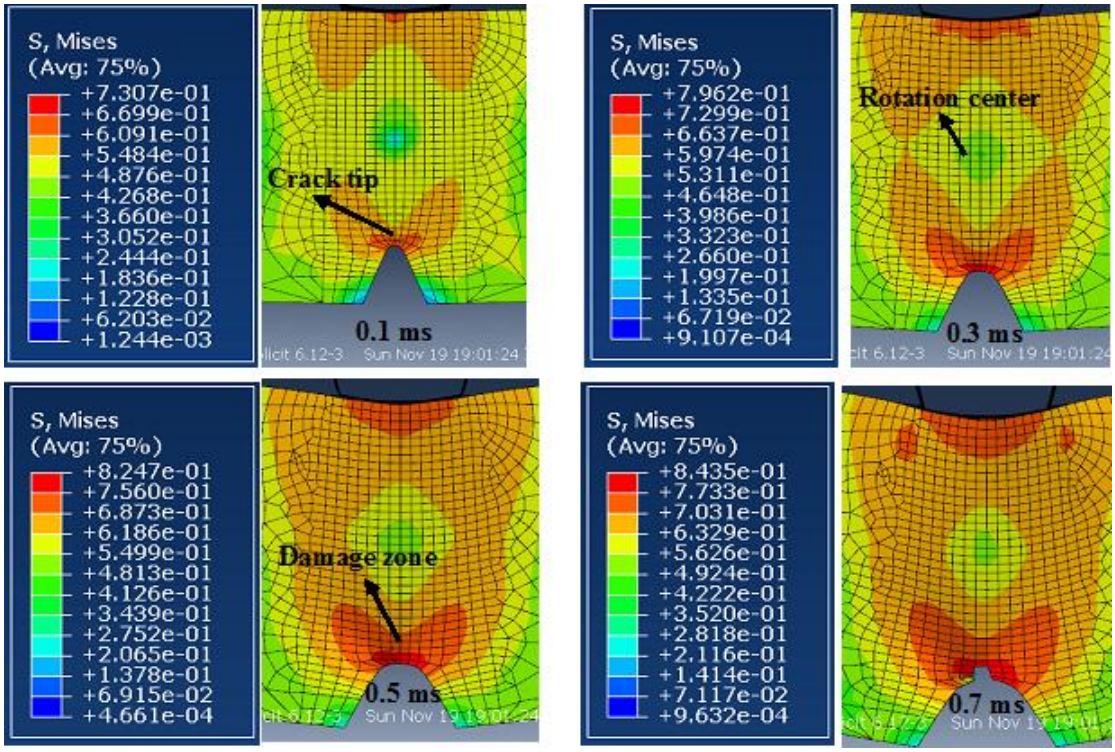
در شکل ۱۶ تغییرات انرژی ضربه شارپی بر حسب شعاع قوس شیار V شکل نشان داده شده است (در دو نمودار، نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است). در این شکل نتایج نمونه استاندارد (۲۵۹ ژول) بدست آمده است.

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است با افزایش شعاع انتهای شیار V شکل نمونه استاندارد آزمایش ضربه شارپی، مقدار انرژی شکست به صورت خطی بر اساس رابطه (۱) افزایش پیدا

جدول ۸: درصد خطا نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

Table 8: Error percentage related to results of simulation and experimental test

شعاع (میلی‌متر)	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۴۱
انرژی شکست تجربی (ژول)	۲۵۵	۲۵۹	۲۶۰	۲۵۹	۲۵۹	۲۶۲	۲۶۵	۲۶۷
انرژی شکست عددی (ژول)	۲۵۳	۲۵۸	۲۵۹	۲۶۱	۲۶۳	۲۶۶	۲۶۸	۲۷۴
درصد خطا (٪)	۰/۷۸	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۷۷	۱/۵۴	۱/۵۲	۱/۱۳	۲/۶۲



شکل ۱۵: توزیع تنش ون‌میزز در انتهای شیارشکل V

Fig. 15: Distribution of the von-Mises stress in the end of V-notched

می‌کند. همچنین، تغییرات انرژی شکست براساس قوس شیارV حاصل از مدل‌سازی عددی به صورت رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$E = 65.47R + 245.07 \qquad (۷)$$

با استفاده از رابطه (۷) مقدار انرژی ضربه برای نمونه استاندارد با R=۰/۲۵mm برابر ۲۶۱ ژول بدست می‌آید که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درونیابی رابطه (۷) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۷۷ درصد است. در جدول ۹ نتایج حاصل از مقدار انرژی شکست نمونه استاندارد با استفاده از روابط بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی (رابطه (۱) و (۷)) مقایسه شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده و میزان خطای کمتر از یک درصد می‌توان نتیجه گرفت؛ نتایج شبیه‌سازی از انطباق مناسبی (حدود ۰/۷۷ %) با نتایج تجربی دارد.

انتخاب رابطه خطی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی ضربه شارپی بر روی هشت شعاع شیار V شکل متغیر دو دلیل است. ملاک اول با توجه به مقدار ضریب تعیین است. ضریب تعیین[1] با علامت R^2 نشان داده می‌شود، بیانگر میزان احتمال همبستگی میان داده‌ها است و براساس رابطه زیر تعریف می‌شود. مقدار این ضریب بین صفر تا یک بوده اگر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، می‌توان داده‌های دقیق‌تری از مدل ریاضی تعریف شده بر داده‌های واقعی بدست آورد [۱۸].

ملاک دوم براساس رابطه‌ی ایروین[2] با توجه به نتایج نیوبر[3] است و ارتباط بین شعاع ریشه و ضریب شدت تنش را بیان می‌کند [۱۹]:

$$\left.\begin{aligned} K &= \frac{\sqrt{\pi}}{2}\lim_{\rho\to 0}\sigma_{Max}\sqrt{\rho} \\ E &= \frac{K^2}{2}\left(1-\nu^2\right) \end{aligned}\right\} E \approx \rho \qquad (۸)$$

در این رابطه K ضریب شدت تنش، ρ شعاع انتهای شیار، σ_{Max} تنش ماکزیمم، E انرژی شکست و ν ضریب پوسان می‌باشد. از رابطه (۸) ارتباط بین انرژی شکست و شعاع ریشه بصورت خطی نتیجه می‌شود.

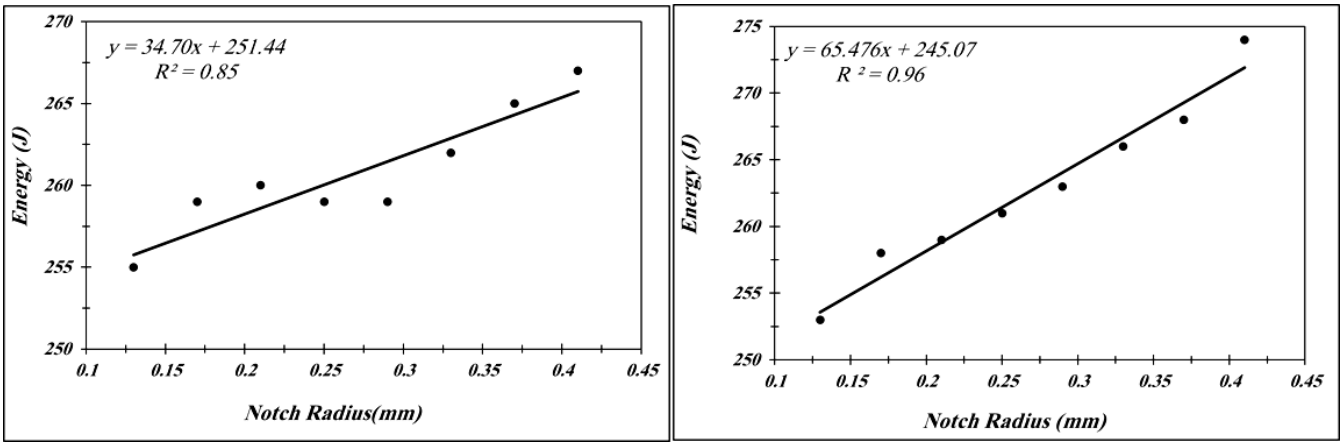
۸- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر تغییرات شعاع ریشه در شیار V شکل بر انرژی شکست شارپی نمونه از جنس فولاد آ.پی.آی ایکس۶۵ بررسی شد.

1 Coefficient of Determination

2 Irwin

3 Neuber



a b

شکل ۱۶: تغییرات انرژی ضربه‌ی شارپی بر حسب شعاع شیار در دو حالت؛ a) نتایج آزمایش تجربی b) نتایج شبیه‌سازی

Fig. 16: Energy changes of Charpy impact in terms of notch radius a) results of experimental test b) results of simulation

جدول ۹: مقایسه انرژی شکست نمونه استاندارد با استفاده دو رابطه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

Table 9: Comparison of fracture energy of standard specimen using two simulation equations and experimental test

ردیف	انرژی شکست (ژول)	خطا در مقایسه با آزمایش (٪)
مقدار انرژی شکست حاصل از آزمایش	۲۵۹	-
مقدار انرژی شکست حاصل از رابطه تجربی	۲۶۰	۰/۳۸
مقدار انرژی شکست حاصل از رابطه عددی	۲۶۱	۰/۷۷

برای این تحقیق بیست‌وچهار نمونه در هفت سری نمونه (هر سری ۳ نمونه) با شعاع غیر استاندارد و یک سری نمونه با ابعاد استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده در این آزمایش با ظرفیت ۷۵۰ ژول مطابق استاندارد آ.اِس.تی.اِم ای۲۳ انتخاب شد. همچنین شبیه‌سازی سه‌بعدی نمونه در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. خلاصه نتایج بدست آمده عبارت است از:

۱. با افزایش شعاع انتهای شیار انرژی شکست شارپی به صورت خطی بر اساس رابطه $E=34.70R+251.44$ افزایش پیدا می‌کند. با معلوم بودن این رابطه می‌توان مقدار دقیق انرژی شکست شارپی را حتی در صورت وجود خطا در ساخت نمونه برای فولاد آزمایش شده (خطا در قوس شیار V شکل) محاسبه کرد.

۲. مقدار انرژی ضربه بدست آمده از رابطه (۲) (رابطه تجربی) برای نمونه استاندارد با R=۰/۲۵mm برابر ۲۶۰ ژول است که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درونیابی رابطه (۲) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۳۸ درصد است.

۳. برای اعتبار سنجی نتایج آزمایش تجربی از شبیه‌سازی سه‌بعدی بر اساس مدل اصلاح شده آسیب گرسون استفاده شد. مقایسه مقدار حاصل از نتایج آزمایش تجربی و رابطه بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد مقدار انرژی ضربه بدست آمده از رابطه (۷) برای نمونه استاندارد با R=۰/۲۵mm برابر ۲۶۱ ژول است که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درونیابی رابطه (۷) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۷۷ درصد است.

تشکر و قدردانی

از شرکت لوله‌سازی اهواز برای در اختیار گذاشتن دستگاه ضربه شارپی و همکاری آقایان مهندس غریب‌زاده (مدیر پژوهش و توسعه)، مهندس احمدی، مهندس کلانتری، مهندس داودیان و آقای سیفی‌خانی در انجام آزمایش ضربه تشکر می‌گردد. همچنین از شرکت لوله‌سازی سدید به لحاظ فراهم کردن لوله فولادی آ.پی.آی ایکس۶۵ قدردانی می‌شود.

منابع

[1] T. Anderson, Fracture mechanics: fundamentals and applications, CRC press, 2005.

[2] P. Lukas, L. Kunz, B. Weiss, R. Stickler, Notch size effect in fatigue, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 12(3) (1989) 175-186.

[3] M. Cova, M. Nanni, R. Tovo, Geometrical size effect in high cycle fatigue strength of heavy-walled ductile cast iron GJS400: weakest link vs defect-based approach, Procedia Engineering, 74 (2014) 101-104.

[4] S. Hashemi, D. Mohammadyani, Characterization of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 98 (2012) 8-15.

[5] S.H. Hashemi, Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85(12) (2008) 879-884.

[6] M.R. Mosadeghi, H. Salavati, Y. Alizadeh, A. Abdullah, Fracture assessment of specimens weakened by U-notch made of functionally graded materials under mode I loading, Modares Mechanical Engineering,17(2) (2017) 1-9 (in Persian).

[7] A. Nazari, J.A. Mohandesi, M.H. Vishkasogheh, M. Abedi, Simulation of impact energy in functionally graded steels, Computational Materials Science, 50(3) (2011) 1187-1196.

[8] Y. Li, W. Mao, L. Ji, C. Huo, The Effect of Constraint on Ductile Crack Growth for Anisotropy Evaluation of X100 Pipeline Steels, Procedia Materials Science, 3 (2014) 1505-1511.

[9] R.A. Ghajar, J. Alizadeh, M. Nemati, Y. Alizadeh, Evaluate the Fracture Toughness in UIC60 rail by Charpy Impact Test at different temperatures, Traffic Engineering, 2(3) (2011) 249-259 (in Persian).

[10] E. Barati,Y. Alizadeh, J. Aghazadeh, The Effect of Notch Depth and Notch Root Radius on the Averaged Strain Energy Density and on Fracture Load in U Notches under Bending, Aerospace Mechanics Journal, 5(2) (2009) 39-49 (in Persian).

[11] S. Panin, P. Maruschak, I. Vlasov, D. Moiseenko, F. Berto, R. Bishchak, A. Vinogradov, The role of notch tip shape and radius on deformation mechanisms of 12Cr1MoV steel under impact loading. Part 1. Energy parameters of fracture, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 40(4) (2017) 586-596.

[12] M. Rezai, Experimental and Numerical (Gurson) Analysis of Tensile Testing on API X65 Pipeline Steel, M.Sc. dissertation, University of Birjand, 1389 (in Persian).

[13] E. ASTM, 23; Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, in: Annual Book of ASTM Standards, 2016.

[14] A.Q. Barbosa, L.F. da Silva, A. Öchsner, J. Abenojar, J.C. del Real, Influence of the size and amount of cork particles on the impact toughness of a structural adhesive, in: The Journal of Adhesion, 2012, pp. 452-470.

[15] A.R. Shahsvani, Experimental and numerical investigation of initial notch radius effect on Charpy fracture energy in API X65 steel, M.Sc. dissertation, University of Birjand, 1396 (in Persian).

[16] S.H. Hashemi, Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86(8) (2009) 533-540.

[17] A. ASTM, 370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, 100 (2005) 19428-12959.

[18] M.H. Degroot, M.J. Schervish, Probability and statistics, Pearson Education, 2012.

[19] G. Irwin, J. Krafft, P. Paris, A. Wells, Basic aspects of crack growth and fracture, NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, 1967.

این صفحه عمداً خالی است