

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

امیررضا شاهسونی*، سید حجت هاشمی

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

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

کلمات کلیدی:

فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵
آزمایش ضربه شاری
شعاع شیار V شکل
لوله فولادی انتقال گاز
مدل آسیب گرسون

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 شاری دخالت دارند. مطالعه تاثیر این پارامترها بر انرژی شکست شاری اهمیت دارد. در تحقیق حاضر، آزمایش ضربه شاری 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 شاری با شعاع شیار اولیه تعیین گشت. با استفاده از این رابطه می‌توان با معلوم بودن ابعاد هندسی شیار اولیه با احتساب تفرانس‌های مجاز قید شده در استاندارد، میزان خطا در اندازه‌گیری انرژی شکست شاری 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.

۱- مقدمه

آزمایش ضربه شاری، روشی کم‌هزینه و قابل اطمینان برای تعیین انرژی شکست و بررسی رفتار انتقال سازه‌های فولادی است. آزمایش ضربه شاری 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 استاندارد با عنوان ASTM E23^۱ 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 شاری 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^۲ مدل جی.تی.ان^۳ 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.ان برای نمایش رشد ترک در بارگذاری دینامیکی بهتر عمل کرد. هاشمی و محمدیان [۴] انرژی شکست فولاد آ.پی.آی ایکس^۴ ۶۵ را در نواحی مختلف حول درز جوش ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه جوش و ناحیه فلز پایه در آزمایش ضربه شاری بررسی کردند. مقدار انرژی شکست این فولاد برای ناحیه فلز پایه ۲۶۴ ژول گزارش شده است. هاشمی [۵] مقدار انرژی شکست شاری را برای نواحی مختلف فولاد درز جوش مارپیچ لوله آ.پی.آی

2 Extended Finite Element Method (XFEM)

3 Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)

4 API X65

1 American Society for Testing and Materials (ASTM)

* نویسنده‌دار مکاتبات: amir_reza@birjand.ac.ir



آ.پی.آی ایکس ۶۵ بررسی می‌شود. بدین‌وسیله رابطه‌ای بین انرژی شکست فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ و شعاع انتهایی 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 ایکس ۶۵

فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ به‌طور 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 قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ داده شده است [۱۲].

خواص مکانیکی فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ در جهت محیطی لوله با استفاده از آزمایش کشش تک‌محوره بر اساس استاندارد آ.پی.آی ۵ ال ۲ مطابق جدول ۲ اندازه‌گیری شده است.

۳- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها با توجه به استاندارد آ.اس.تی.ام ای ۲۳ برای آزمایش ضربه شاریبی [۱۳] از لوله آ.پی.آی ایکس ۶۵ با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر (۴۸ اینچ) و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر در جهت محیطی لوله (با شیری در امتداد طول لوله) تهیه شد. بیست‌و‌چهار نمونه با شیار V شکل با شعاع انتهایی متغیر (هشت شعاع، از هر کدام سه نمونه) با توجه به حدود مشخص شده در استاندارد آ.اس.تی.ام ای ۲۳ (شکل ۱) ساخته شد. ابعاد نمونه‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است ابتدا قطعه چهارگوش از بدنه لوله فولادی آ.پی.آی ایکس ۶۵ 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

ایکس ۷۰ بر اساس استاندارد آ.اس.تی.ام ای ۲۳ 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 شاریبی از جنس فولاد مرتبه‌ای به‌منظور توقف رشد ترک پرداختند. در این تحقیق فرایند آزمایش ضربه شاریبی 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 ایکس ۱۰۰ پرداختند. در این تحقیق از مدل آسیب گرسون برای شبیه‌سازی دوبعدی نمونه تحت آزمایش ضربه شاریبی دینامیکی و آزمایش کشش استاتیکی استفاده شده است. قاجار و همکاران [۹] چقرمگی شکست فولاد ریل یو.آی.سی ۶۰۱ را با استفاده از آزمایش ضربه شاریبی 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 ۰ تا ۳ میلی‌متر و ۰ تا ۳۰ میلی‌متر) در آزمایش ضربه شاریبی 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 انتهایی شیار دارد.

در تحقیق حاضر اثر تغییر شعاع در انتهایی شیار V شکل بر انرژی شکست ضربه نمونه‌های آزمایشگاهی شاریبی از جنس فولاد

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

جدول ۱: ترکیب شیمیایی لوله فولادی آ.پی.آی ایکس ۶۵ [۱۲]

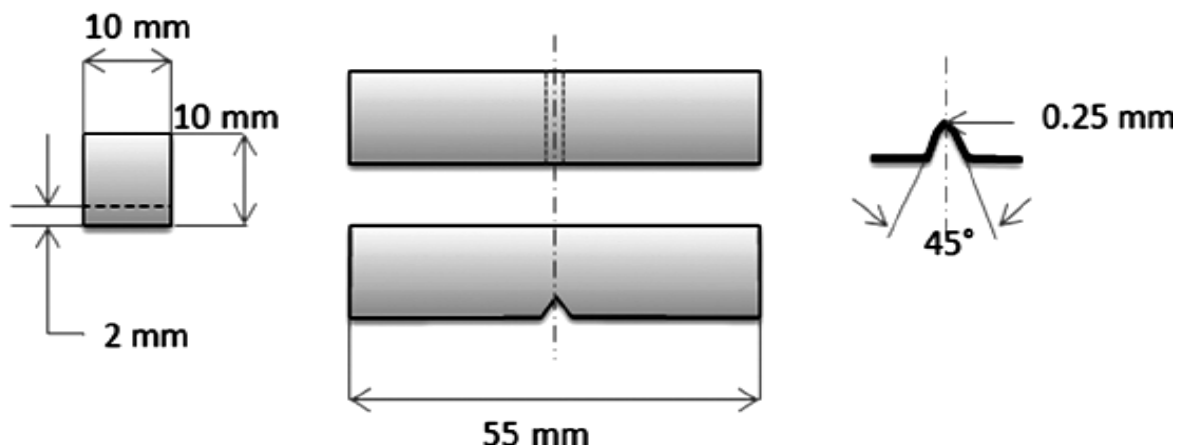
Table 1. Chemical composition of API X65 steel pipe [12]

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

جدول ۲: خواص مکانیکی لوله فولادی آ.پی.آی ایکس ۶۵ در جهت محیطی [۱۲]

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

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



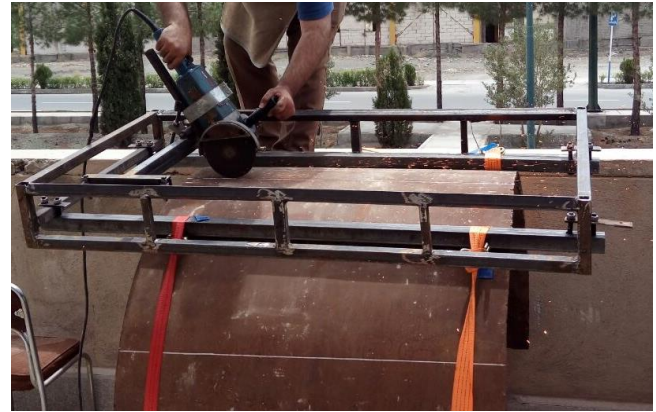
شکل ۱: ابعاد نمونه استاندارد آزمایش ضربه شارپی [۱۴]

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



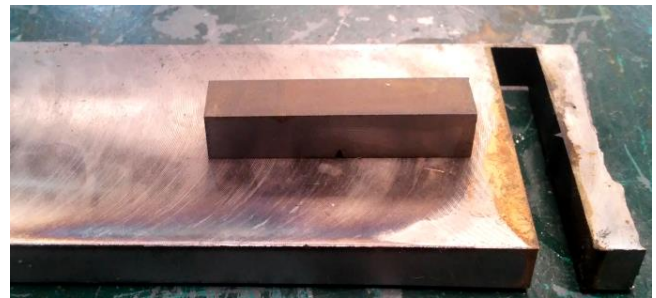
شکل ۴: دستگاه ضربه شاریبی با ظرفیت ۷۵۰ ژول

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



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

انرژی جذب شده جهت شکست نمونه محاسبه می‌شود.

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

نتایج آزمایش ضربه شاریبی در جدول ۵ داده شده است. در این جدول میانگین انرژی شکست حاصل از سه آزمایش روی نمونه استاندارد با شعاع $R=0/25\text{mm}$ ، 259 ژول اندازه‌گیری شده است.

شکل ۵ نمونه استاندارد ضربه شاریبی، 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 شاریبی

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

همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش شعاع در نمونه‌های آزمایش

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 تنش‌های 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 شاریبی

آزمایش ضربه شاریبی در آزمایشگاه کنترل کیفیت کارخانه لوله‌سازی اهواز با استفاده از دستگاه زوئیک رول^۱ مطابق استاندارد با ظرفیت ۷۵۰ ژول در دمای محیط (شکل ۴) انجام شد. عملکرد کلی ماشین ضربه شاریبی 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

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

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

جرم ضربه زن (کیلوگرم)	سرعت ضربه زن (متر بر ثانیه)	ظرفیت (ژول)	شعاع ضربه زن (میلی متر)
۵۰	۵/۴۲	۷۵۰	۸

جدول ۵: نتایج آزمایش تجربی ضربه شاریبی برای ۲۴ نمونه از فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵

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

شماره نمونه	انرژی ضربه شکست شاریبی (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

شعاع ۰/۲۵ میلی متر برابر ۲۶۰ ژول بدست می آید که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درون یابی رابطه (۲) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۳۸ درصد است.

ضربه شاریبی، مقدار انرژی شکست به صورت خطی بر اساس رابطه زیر افزایش پیدا می کند:

$$E = 34.70R + 251.44 \quad (1)$$

۶- مدل آسیب گرسون

در سال ۱۹۷۷ گرسون^۱ روشی برای رسیدن به یک سطح تسلیم تقریبی برای ماده ای که دارای حفره بوده را پیشنهاد کرد. تابع تسلیم گرسون به صورت زیر تعریف شد [۱۴]:

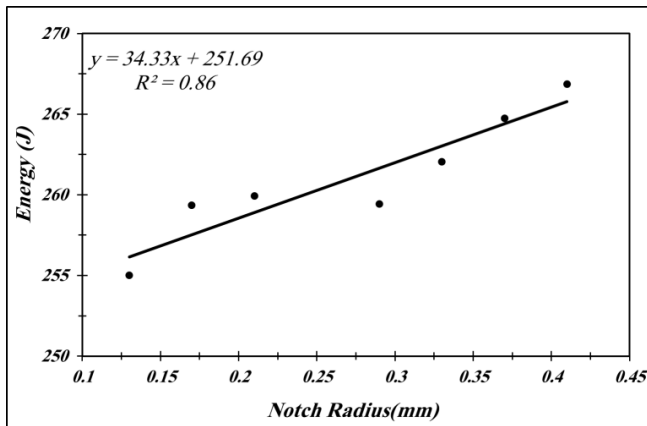
$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2f \cdot \text{Cosh} \left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_y} \right) - 1 - f^2 = 0 \quad (3)$$

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

رابطه خطی بین انرژی ضربه ی شاریبی و شعاع قوس بر اساس شکل ۷ به صورت رابطه زیر می باشد:

$$E = 34.33R + 251.69 \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (۲) مقدار انرژی ضربه برای نمونه استاندارد با



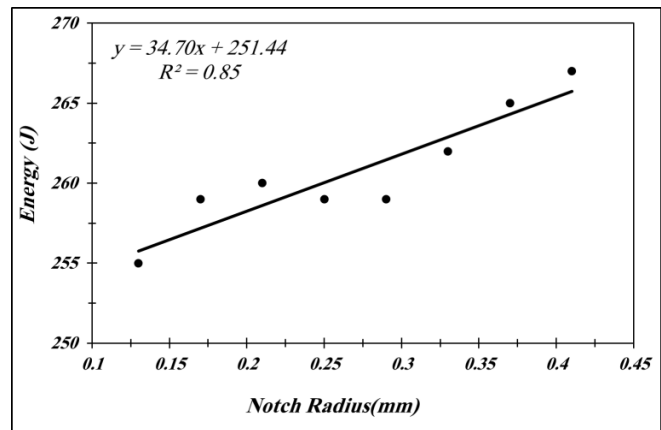
شکل ۷: تغییرات انرژی ضربه شاری برحسب شعاع شیار با استفاده از هفت سری داده آزمایشگاهی؛ حذف مقدار بدست آمده از آزمایش برای نمونه استاندارد

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



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

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



شکل ۶: تغییرات انرژی ضربه شاری 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 ون میزز، 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 آنجایی که 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^۱

1 Tvergaard

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 حفره‌ها نیز منظور شود. در نتیجه مدل اولیه گرسون به صورت رابطه زیر اصلاح شد:

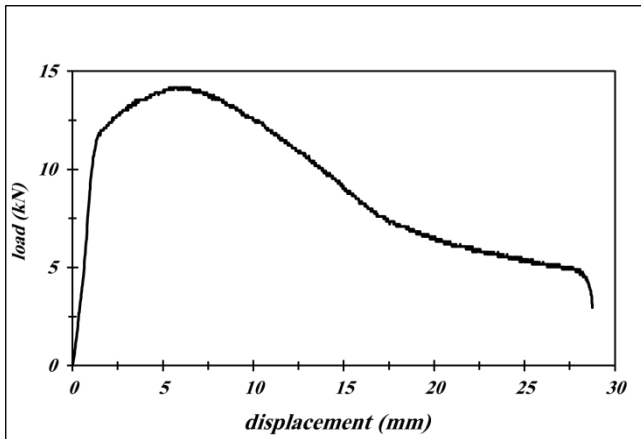
$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f \cdot \text{Cosh} \left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_y} \right) - [1 + (q_1 f^2)] = 0 \quad (4)$$

در سال ۱۹۸۴ تیورگارد و نیدلمن^۲ 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:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (5)$$

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 ۱۰: نمودار تجربی نیرو-جابجایی فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ (در جهت محیطی لوله) [۱۶]

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

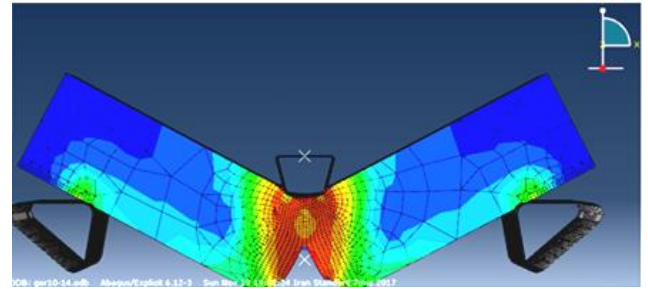
ضربه زن و تکیه‌گاه در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی اولیه آزمایش ضربه شاریبی از ضرایب کالیبره شده مرجع [۱۶] حاصل از آزمایش کشش تک محوری برای این فولاد مطابق جدول ۶ استفاده شد.

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 ایکس ۶۵ مطابق استاندارد ASTM A370 [۱۷] آزمایش شد.

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

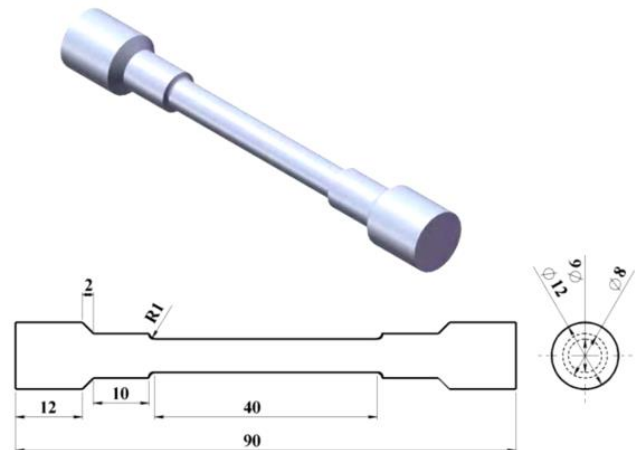
این نمودار اطلاعات آزمایشگاهی نیرو-جابجایی برای فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ حاصل از آزمایش ضربه به وسیله ماشین ضربه شاریبی^۱ تجهیز شده با ظرفیت ۲۹۴ ژول (جرم چکش ۱۹/۵ کیلوگرم و سرعت ضربه ۵/۵ متر بر ثانیه) را نشان می‌دهد [۱۶]. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۱ نمایش داده است.

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



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 بر حسب میلی‌متر) [۱۷]

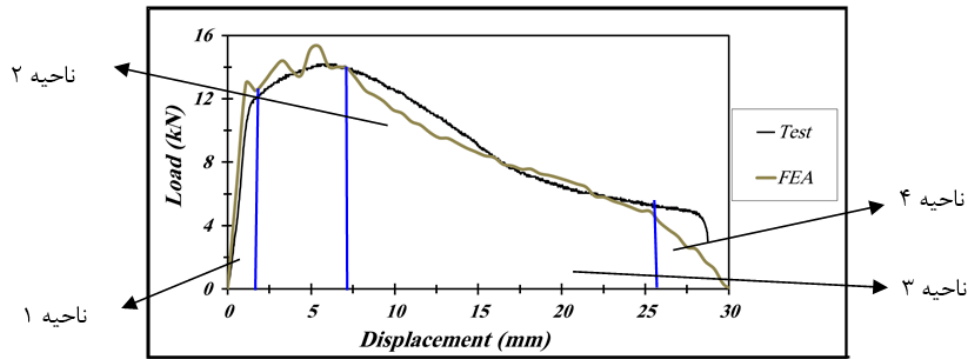
Fig. 9: The schematic of uniaxial tension test in the circumferential direction (dimensions are in terms of mm) [17]

شده گرسون به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cdot \text{Cosh} \left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_y} \right) - (q_1 f^*)^2 - 1 = 0 \quad (6)$$

برای شبیه‌سازی آزمایش ضربه شاریبی در مقالات مدل‌های دو و سه‌بعدی ارائه شده است. از آنجایی که 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 شاریبی 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 شاریبی به همراه

1 Losenhausenwerk Charpy



شکل ۱۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی آزمایش ضربه‌ی شارپی با نتایج تجربی برای فولاد آ.بی.آی ایکس ۶۵ [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.بی.آی ایکس ۶۵ حاصل از آزمایش کشش [۱۲]

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

f_f	f_c	f_0	f_N	s_N	ε_N	q_3	q_2	q_1	ضرایب جی.تی.ان
۰/۲۹	۰/۰۱۹	$۷/۰۷۵ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۳	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	مقدار

جدول ۷: ضرایب کالیبره شده رابطه (۴) برای فولاد آ.بی.آی ایکس ۶۵

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

f_f	f_c	f_0	f_N	s_N	ε_N	q_3	q_2	q_1	ضرایب جی.تی.ان
۰/۳۶	۰/۰۲۵	$۷/۰۷۵ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۳	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	نتایج تحقیق حاضر
۰/۲۹	۰/۰۱۹	$۷/۰۷۵ \times 10^{-5}$	۰/۰۰۳	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	نتایج مرجع [۱۲]

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 آسیب‌گرسون در نظر گرفته شده است؛ در این مدل حفره‌های موجود در ماده، بصورت کروی فرض شده است. همچنین سطح شکست ماده در این

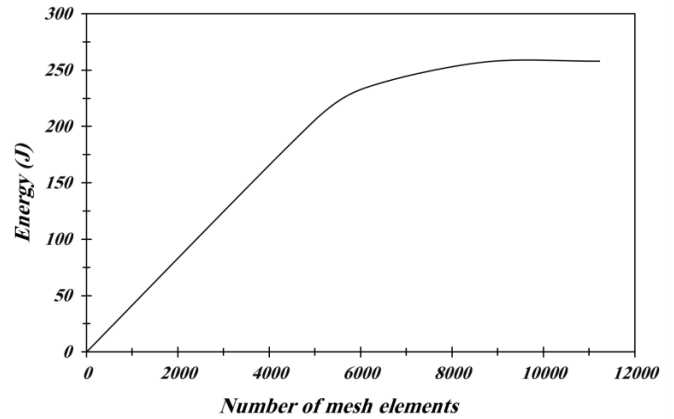
این ناحیه است؛ در این ناحیه دو نمودار از انطباق مناسبی برخوردار می‌باشند. ناحیه کارسختی (ناحیه ۲) یا ابتدای ناحیه رشد ترک، از ۲ تا ۷ میلی‌متر تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه بوده است؛ با توجه به نوسانات نسبتاً زیاد در نتایج شبیه‌سازی دو نمودار از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. ناحیه نرم‌شوندگی (ناحیه 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

بعد از کالیبره شدن پارامترهای رابطه اصلاح شده گرسون؛ شبیه‌سازی انجام شده (ماشین ضربه شاریبی با ظرفیت ۲۹۴ ژول) را با داده‌های جدول ۴ جایگزین کرده تا شبیه‌سازی در شرایط حاکم بر این تحقیق (ماشین ضربه شاریبی با ظرفیت ۷۵۰ ژول) برای هشت نمونه ضربه شاریبی 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 نظر گرفته شده و شبکه‌بندی و حل مسئله انجام می‌شود [۱۵].

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

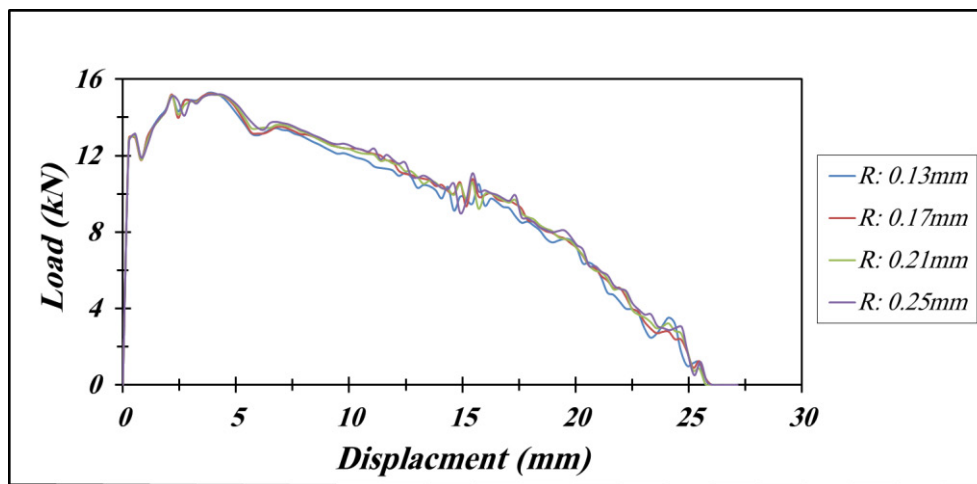
ناحیه الاستیک و ناحیه ابتدای شروع ترک (جابجایی تا ۵/۵ میلی‌متر) در شکل ۱۳ و ۱۴؛ نشان از انطباق مناسب نمودارها است. ناحیه گسترش ترک و ناحیه شکست از جابجایی ۵/۵ تا ۲۶ میلی‌متر در نمودارهای فوق نشان می‌دهد که با افزایش شعاع انتهای شیار



شکل ۱۲: نمودار تحلیل حساسیت به شبکه [۱۵]

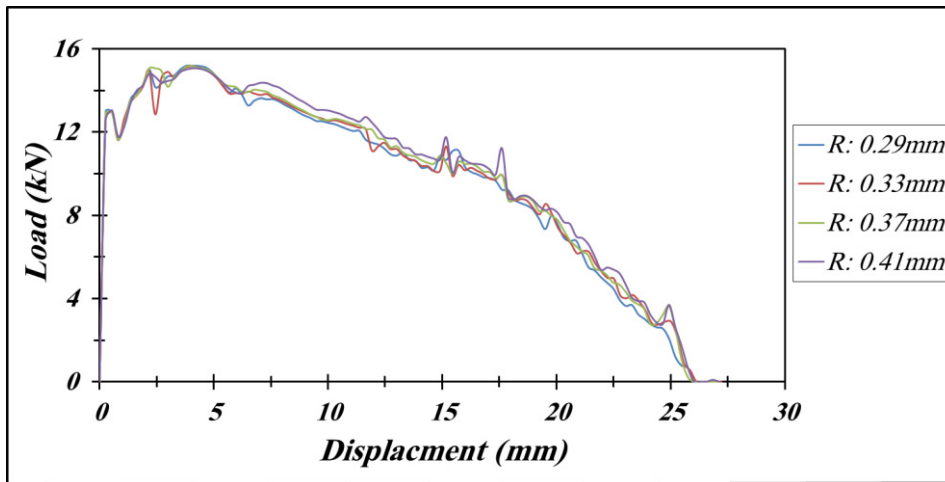
Fig. 12: Plot of the sensitivity analysis [15]

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 ایکس ۶۵ 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.ان با تحقیقی که در سال ۱۳۸۹ [۱۲] بر روی فولاد آ.پی. آی ایکس ۶۵ انجام شده است را نشان می‌دهد. البته برای اعمال شکست حاصل از ضربه‌ی شاریبی نیاز به f_c و f_c بالاتری می‌باشد.



شکل ۱۳: مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی چهار شعاع شیار نمونه آزمایش ضربه‌ی شاریبی 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 شاری 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.

۰/۷ میلی‌ثانیه ترک شروع به رشد می‌کند. کل فرایند شبیه‌سازی ۴ 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 شاری 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 شده است با افزایش شعاع انتهای شیار V شکل نمونه استاندارد آزمایش ضربه شاری، مقدار انرژی شکست به صورت خطی بر اساس رابطه (۱) افزایش پیدا

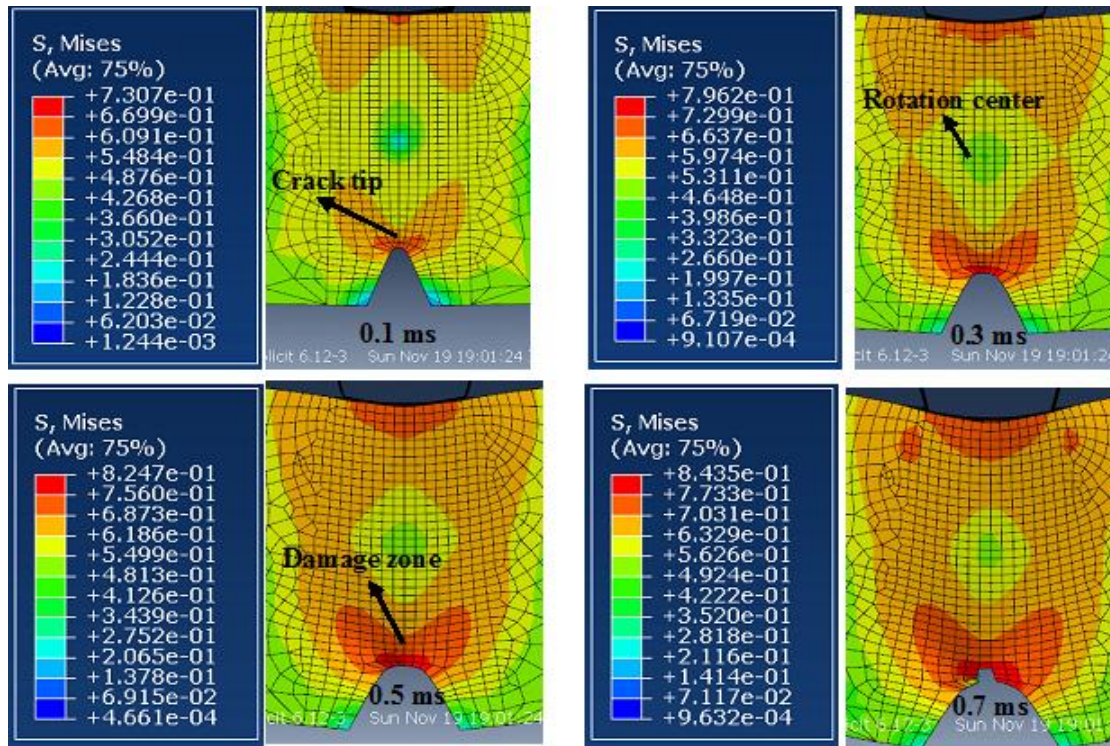
که موجب افزایش سطح زیر نمودار و در نتیجه افزایش مقدار انرژی شکست فولاد می‌گردد. این نتایج با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی نمونه‌های ضربه‌ی شاری فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ که با افزایش شعاع انتهای شیار مقدار انرژی شکست آن افزایش می‌یابد، هم‌خوانی دارد. تغییرات تنش میز در اطراف نوک ترک در نمونه ضربه شاری 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 میز 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

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 ون میزز در انتهای شیارشکل V

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

بر اساس 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 بر اساس رابطه‌ی ایروین^۲ با توجه به نتایج نیوبر^۳ است و ارتباط بین شعاع ریشه و ضریب شدت تنش را بیان می‌کند [۱۹]:

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \lim_{\rho \rightarrow 0} \sigma_{Max} \sqrt{\rho} \\ E &= \frac{K^2}{2} (1 - \nu^2) \end{aligned} \right\} E \approx \rho \quad (8)$$

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 شاری نمونه از جنس فولاد آ.پی.آی ایکس ۶۵ بررسی شد.

می‌کند. همچنین، تغییرات انرژی شکست بر اساس قوس شیار V حاصل از مدل‌سازی عددی به صورت رابطه زیر تغییر می‌کند:

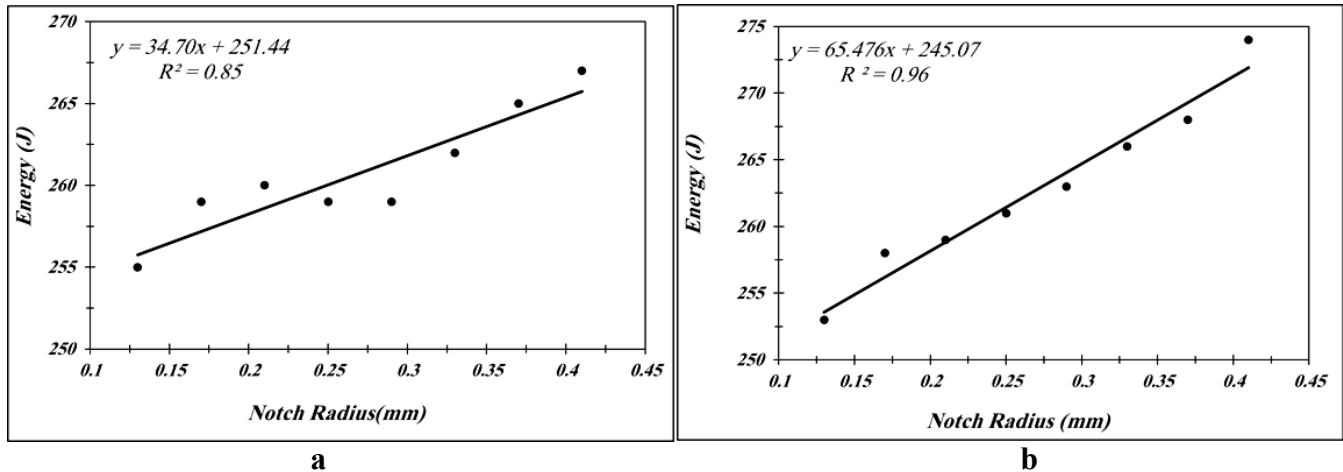
$$E = 65.47R + 245.07 \quad (9)$$

با استفاده از رابطه (۷) مقدار انرژی ضربه برای نمونه استاندارد با $R=0.25\text{mm}$ 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 شاری بر روی هشت شعاع شیار V شکل متغیر دو دلیل است. ملاک اول با توجه به مقدار ضریب تعیین است. ضریب تعیین^۱ با علامت R^2 نشان داده می‌شود، بیانگر میزان احتمال همبستگی میان داده‌ها است و

2 Irwin
3 Neuber

1 Coefficient of Determination



شکل ۱۶: تغییرات انرژی ضربه‌ی شاری 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

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

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 $R=0/25mm$ برابر ۲۶۱ ژول است که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درونیایی 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 شاری و همکاری آقایان مهندس غریب‌زاده (مدیر پژوهش و توسعه)، مهندس احمدی، مهندس کلانتری، مهندس داویدیان و آقای سیفی‌خانی در انجام آزمایش ضربه تشکر می‌گردد. همچنین از شرکت لوله‌سازی سدید به لحاظ فراهم کردن لوله فولادی آ.پی.آی یکس ۶۵ قدردانی می‌شود.

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.اس.تی.ام ای ۲۳ 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 شاری به صورت خطی بر اساس رابطه $E=34.70R+251.44$ افزایش پیدا می‌کند. با معلوم بودن این رابطه می‌توان مقدار دقیق انرژی شکست شاری 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 $R=0/25mm$ برابر ۲۶۰ ژول است که با مقدار تجربی (۲۵۹ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درونیایی رابطه (۲) برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۳۸ درصد است.

- 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.
- [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

