

بررسی تجربی و عددی اثر عمق شیار بر انرژی شکست شارپی در فولاد ایکس شصت و پنج

علی حسین زاده^۱
دانشجوی دکترا

سیدحجت هاشمی^۲
استاد

آزمایش ضربه شارپی روی نمونه‌های فولادی از جنس API X65 با اندازه کامل در مقیاس صنعتی با عمق شیارهای متفاوت انجام و انرژی شکست اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۲۴ نمونه در گروه‌های سه‌تایی با ۸ عمق شیار متفاوت، ساخته شده و سپس توسط آزمایش ضربه شارپی، انرژی شکست به دست آمد. همچنین شبیه‌سازی کامپیوتری آزمایش ضربه با مدل سه‌بعدی بر اساس قانون آسیب اصلاح شده گرسون در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که رابطه بین انرژی شکست (E برحسب ژول) و عمق شیار نمونه‌ها (a برحسب میلی‌متر) برای فولاد آزمایش شده از نوع نمائی به صورت $E = 503.44e^{-0.352a}$ باشد.

واژه‌های راهنما: فولاد API X65، نمونه با عمق شیار متفاوت، آزمایش ضربه شارپی، مدل شکست گرسون.

۱- مقدمه

نفت و گاز طبیعی، مهم‌ترین منابع تأمین انرژی بشر امروزی هستند؛ به طوری که نفت خام ۴۵ درصد و گاز طبیعی ۲۵ درصد انرژی دنیا را تأمین می‌کنند؛ از این رو نفت و گاز در معادلات اقتصادی - سیاسی جهان اهمیت راهبردی دارند و در روابط بین‌الملل نقش مهمی ایفا می‌کنند [۱]. با توجه به زیاد بودن طول خطوط لوله حامل انرژی و بالا بودن فشار اعمالی توسط سیال داخل لوله، توسعه تولید فولادهای پر استحکام به کاررفته در لوله، موجب کاهش قیمت پروژه احداث خط لوله و بالا رفتن ایمنی آن می‌شود. پایین آوردن هزینه تولید مواد اولیه خطوط لوله مورد استفاده در انتقال نفت و گاز دغدغه اصلی مجریان طرح‌های بزرگ انتقال بوده است. لذا در طول چند دهه اخیر تولید فولاد با استحکام بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند تا با کاهش ضخامت جداره لوله، هزینه‌های مربوط به مواد اولیه و جوشکاری کاهش یابد [۲ و ۳]. بخش عمده‌ای از خطوط لوله فولادی به کاررفته در ایران از جنس فولاد API X65 می‌باشد و در حال حاضر لوله‌هایی قطور با قطر خارجی ۵۶ اینچ از این فولاد ساخته می‌شوند. لذا ضروری است تا در مورد این نوع لوله اطلاعاتی نظیر خواص مکانیکی (چقرمگی شکست، انرژی شکست، استحکام تسلیم، استحکام کششی)، ریزساختار، ترکیب شیمیایی و اطلاعاتی از این قبیل جمع‌آوری و بررسی گردد.

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران a.hosseinzadeh.PhD@mail.um.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران shhashemi@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸

آزمایش ضربه شاریپی یک آزمایش کنترل کیفیت عمومی در صنایع فولادسازی و لوله‌سازی است. تعیین انرژی شکست دینامیکی در آزمایش ضربه شاریپی و ارتباط آن با چقرمگی شکست دینامیکی از طریق روابط نیمه تجربی اهمیت دارد. عوامل متعددی در تعیین تجربی انرژی شکست شاریپی دخالت دارند (به عنوان مثال زاویه شیار اولیه، عمق شیار، شعاع ریشه شیار، خروج از مرکز شیار نسبت به مرکز جرم چکش، ابعاد مقطع نمونه، شعاع و فاصله تکیه گاه ها، هندسه و سرعت ضربه چکش و روش ایجاد شیار اولیه مانند خان‌کشی یا ماشین کاری) مطالعه تغییرات این پارامترها و بررسی اثر کمی این تغییرات در انرژی نهایی اندازه گیری شده اهمیت فراوانی دارد. وجود ناپیوستگی‌های هندسی مانند شیار یا سوراخ در یک جسم باعث توزیع غیریکنواخت تنش در اطراف آن یا همان تمرکز تنش می‌شود و همین عامل علت اصلی کمتر بودن تنش شکست اعمالی از تنش شکست تئوری است؛ بنابراین تأثیر مضر وجود ترک، افزایش تنش موضعی و به وجود آمدن حالت تنش سه‌بعدی در مجاورت نوک ترک که تحت شرایط کرنش صفحه‌ای بارگذاری شده است می‌باشد [۵۴]. وجود شیار موجب ایجاد تراکم خطوط نیرو در نوک شیار و تمرکز تنش و افزایش مقدار آن می‌شود و در نتیجه باعث چندین برابر شدن تنش اعمالی در نوک ترک خواهد شد [۶]. در صنعت امروز یکی از مسائلی که باعث خسارت زیادی شده و بسیار مهم به شمار می‌رود شکستن قطعات به دلیل تردی جنس آن‌ها می‌باشد. علیرغم اهمیت و کاربرد گسترده آزمایش‌های کشش و فشار و نیز پیچش، این آزمایش‌ها نمی‌توانند رفتار را در برابر اعمال بارهای ضربه‌ای تعیین کنند؛ بنابراین برای دستیابی به این هدف و تعیین میزان جذب انرژی فلزات در دماهای مختلف از آزمایش‌های ضربه استفاده می‌شود. آزمایش ضربه شاریپی به‌عنوان یک آزمایش کنترل کیفیت عمومی در صنایع فولادسازی و لوله‌سازی (محصول نهایی) الزامی است [۷] و استانداردهای صنعتی متعددی برای انجام دقیق این آزمایش تدوین شده است [۸-۱۰].

تعیین انرژی شکست دینامیکی در آزمایش ضربه شاریپی و ارتباط آن با چقرمگی شکست دینامیکی از طریق روابط نیمه تجربی اهمیت دارد [۱۱-۱۴]. با توجه به اینکه عوامل متعددی در تعیین تجربی انرژی شکست شاریپی دخالت دارند مطالعه تغییرات پارامترها و بررسی اثر کمی تغییرات در انرژی نهایی اندازه‌گیری شده اهمیت فراوانی دارد [۱۴]. دراکه^۱ و همکاران [۱۵] در (۱۹۸۷) میلادی به بررسی اثر هندسه شیار در دماهای مختلف در فولاد SA351 CF3 با استفاده از آزمایش ضربه شاریپی پرداختند.

در این تحقیق نمونه‌هایی با شیار U و V شکل با هندسه‌های متفاوت استفاده شده است. لوکاس^۲ و همکاران [۱۶] به بررسی عددی اندازه شیار و تأثیر آن بر شکست نمونه آزمایش ضربه شاریپی ماده‌ای از مرتبه‌ای مس - فولاد پرداختند. سیدنر^۳ و همکاران [۱۷] در (۱۹۹۶) به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی انرژی شکست نمونه‌های ضربه شاریپی برای عمق شیارهای متفاوت از ۲ تا ۷ میلی‌متر در فولاد A533B بر اساس آزمایش تجربی و شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته‌اند. در این تحقیق مقدار انرژی شکست برای نمونه استاندارد ۱۵۲ ژول گزارش شده است.

¹ Druce

² Lukas

³ Sidener

گومز^۱ و همکاران [۱۸] در (۲۰۰۵) با تغییر عمق شیار، زاویه شیار و شعاع قوس شیار در نمونه‌های آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای با جنس پلیمری PMMA از دو نوع شیار U و V شکل استفاده کردند. هاشمی [۱۱] در (۲۰۰۸) مقدار انرژی شکست ضربه شاری را برای نواحی مختلف فولاد درز جوش ماریچ لوله API X70 بر اساس استاندارد ASTM E23 اندازه‌گیری کرد. براتی و همکاران [۱۹] در (۲۰۰۹) به بررسی تجربی و عددی تأثیر عمق و شعاع شیار U شکل بر مقدار انتگرال J در آزمایش خمش سه نقطه ماده پلیمری PMMA پرداخته‌اند. براتی و همکاران [۲۰] در (۲۰۰۹) تأثیر عمق و شعاع شیار U شکل (به ترتیب از ۰ تا ۳۰ میلی‌متر و ۰ تا ۳ میلی‌متر) در آزمایش ضربه شاری را بر مقدار متوسط چگالی انرژی کرنشی نمونه بررسی کردند. نظری و همکاران [۲۱] در (۲۰۱۱) به مطالعه موقعیت و عمق شیار از ۰ تا ۳۰ میلی‌متر و اثر لایه‌های موجود در نمونه‌های آزمایش ضربه شاری از جنس فولاد مرتبه‌ای به‌منظور توقف رشد ترک پرداختند. در این تحقیق شبیه‌سازی آزمایش ضربه شاری به‌صورت سه‌بعدی انجام شده است. قاجار و همکاران [۲۲] در (۲۰۱۱) چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 را با استفاده از آزمایش ضربه شاری در محدوده دمای ۴۰- تا ۶۰ درجه سلسیوس بررسی کردند. هاشمی و همکاران [۱۲] در (۲۰۱۲) انرژی شکست فولاد API X65 را در نواحی مختلف درز جوش (ناحیه متأثر از حرارت، ناحیه جوش و ناحیه فلز پایه) در آزمایش ضربه شاری بررسی کردند. لی^۲ و همکاران [۲۳] در (۲۰۱۴) به بررسی اثر عمق شیار بر رشد ترک نرم در فولاد API X100 پرداختند. در این تحقیق از مدل آسیب‌گرسون برای شبیه‌سازی دوبعدی نمونه تحت آزمایش ضربه شاری دینامیکی و آزمایش کشش استاتیکی استفاده شده است.

صلواتی و همکاران [۲۴] در (۲۰۱۴) به بررسی تجربی و عددی اثر عمق و شعاع قوس شیار بر نیروی واردشده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای پرداخته‌اند. کوا^۳ و همکاران [۲۵] در (۲۰۱۵) تأثیر اندازه هندسی بر مقاومت به شکست آهن GJ400 را بررسی کردند. یو^۴ و همکاران [۲۶] در (۲۰۱۴) به بررسی تجربی و عددی اثر عمق شیار بر انرژی شکست شاری در فولاد Q235 با اتصال چسب اپوکسی پرداخته‌اند. مصدقی و همکاران [۲۷] در (۲۰۱۷) اثر عمق و شعاع شیار بر مقدار انرژی شکست نمونه خمش سه‌نقطه 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 جی 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 جی $1.17/84\%$ با نتایج تجربی اختلاف وجود دارد. پانین^۵ و همکاران [۲۸] در (۲۰۱۷) اثر شکل و اندازه شیار در فولاد 12Cr1 MoV تحت بارگذاری ضربه‌ای با شیارهای V، U و I شکل، در سه اندازه مختلف بررسی کردند. حسین زاده و هاشمی [۲۹] در (۲۰۱۸) به بررسی تجربی اثر عمق شیار بر انرژی شکست شاری در فولاد ایکس شصت‌وپنج پرداخته‌اند.

¹ Gomez

² Li

³ Cova

⁴ You

⁵ Panin

در این تحقیق عمق شیارها از ۱/۲۵ تا ۳ میلی‌متر آزمایش‌شده و انرژی شکست نمونه استاندارد ۲۴۱ ژول گزارش شده است. لوزیو^۱ و همکار [۳۰] در (۲۰۱۸) به تجزیه و تحلیل نسبت شیار به اندازه نمونه با شیار U شکل و منحنی تأثیر اندازه برای مواد شبه ترد پرداخته‌اند. شاهسونی و هاشمی [۳۱] در (۲۰۱۸) به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری اثر شعاع شیار بر انرژی شکست شاریپی در فولاد ایکس شصت‌وپنج پرداخته‌اند. در تحقیق حاضر اثر تغییر عمق شیار V شکل بر انرژی شکست ضربه شاریپی از جنس فولاد ایکس شصت‌وپنج بررسی می‌شود. بدین وسیله رابطه‌ای بین انرژی شکست فولاد ایکس شصت‌وپنج و عمق شیار به دست می‌آید تا در صورت خطا در ساخت نمونه‌ها بتوان به کمک رابطه به دست آمده در این تحقیق، مقدار انرژی شکست استاندارد را محاسبه کرد. همچنین شبیه‌سازی نمونه‌ها به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی انجام می‌شود.

۲- معرفی ماده

استاندارد API مشخصات فولادهای پر استحکام مانند ترکیب شیمیایی، استحکام تسلیم، استحکام شکست، شرایط جوشکاری، فرایندهای ساخت، نحوه انجام آزمایش‌های مکانیکی و مواردی از این دست را بیان می‌کند. تمامی این فولادها با گریدهایی توسط یک حرف و یک عدد مشخص می‌شوند که این عدد (به جز گریدهای A و B) حداقل استحکام تسلیم این نوع فولادها را بر اساس واحد انگلیسی (ksi) مشخص می‌کند. بر اساس استاندارد API این گریدها عبارت‌اند از: A25, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80 و X100. محصولات API در دو سطح PSL1 و PSL2 که بیانگر دو سطح مختلف استاندارد تخصصی موردنیاز این محصولات هستند، بیان می‌شوند [۳]. به‌طور کلی لوله سیاه فولادی در صنعت به دو دسته درزدار و بدون درز تقسیم می‌شود. لوله‌های درزدار برای انتقال مایعات، تولید پروفیل‌های قوطی، ساخت مصنوعات و سازه‌های فلزی به‌کاربرده می‌شود. لوله‌های بدون درز نیز در زمینه‌های مختلف صنعتی از قبیل انتقال گاز، ساخت مخازن تحت فشار تأسیسات پالایشگاهی و نیروگاه‌ها به‌کار برده می‌شود.

در دهه (۱۹۷۰) فولادهای ترمومکانیکال جانشین فولادهای نورد گرم و نرمالیزه شدند. در فرایندهای اخیر و فناوری‌های جدیدتر تولید ورق‌های فولادی با اضافه کردن میکرو آلیاژهایی همچون وانادیوم و نیوبیوم با مقدار پایین کربن فولادی با گرید X65 تولید گردید.

با بهبود روش‌های تولید همچون سرد کردن سریع و عملیات ترمومکانیکال در سال‌های بعد امکان تولید فولاد با گریدهای X70 و X80 نیز فراهم شد. در این دسته از فولادها با توجه به پایین بودن درصد کربن قابلیت جوشکاری لوله نیز افزایش می‌یابد [۳۲]. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد آزمایش‌شده به ترتیب در جدول (۱) و (۲) ذکر شده است.

¹ Luzio

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد API X65 در جهت محیطی لوله [۳۳].

| خواص مکانیکی | مقدار |
|------------------------|---------|
| Young's modulus (GPa) | ۲۱۰ |
| Yield strength (MPa) | ۵۰۵ |
| Tensile strength (MPa) | ۶۱۱ |
| Yield to UTS | ۰/۸۳ |
| Elongation (%) | ۲۰ |
| K(GPa) | ۸۵۰ |
| n | ۰/۰۹۸ |
| Vickers Hardness (HV) | ۲۱۷-۲۲۸ |

جدول ۲- ترکیب شیمیایی لوله فولادی API X65 [۳۳].

| C | P | Mn | S | Si | Cr | Fe |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|---------|
| ۰/۰۷۲ | ۰/۰۰۸ | ۱/۴۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۲۰۱ | ۰/۳۲۰ | Balance |

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها شامل چهار مرحله کلی زیر می‌باشد:

۱- برش اولیه نمونه‌ها از لوله اصلی

به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش، ۲۴ نمونه ضربه شاری در ۸ گروه ۳ تایی از لوله ساخته شده در مقیاس صنعتی با جنس فولاد میکرو آلیاژی گرید API X65 با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر که در شکل (۱) مشاهده می‌شود جدا شده است. لازم به ذکر است، برش نمونه‌ها هم می‌تواند با حرارت صورت گیرد و هم با تراشکاری که در این تحقیق از روش دوم استفاده شد. روش اول خواص مکانیکی فولاد را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بنابراین، در صورت استفاده باید نمونه‌ها با فاصله مشخصی از محل حرارت دیده برش داده شود که خود باعث اتلاف بخش زیادی از لوله می‌شود.

۲- رساندن نمونه‌ها به ابعاد استاندارد

پس از برش اولیه نمونه‌ها به‌منظور رساندن آن‌ها به ابعاد استاندارد، می‌بایست بر روی آن‌ها عملیات تراشکاری و تراشکاری صورت پذیرد. با استفاده از دستگاه برش‌زن لوله، لوله فولادی برش خورده سپس، صفحه‌ای از آن جدا شده که این صفحه در قسمت فلز پایه می‌باشد. سپس نمونه‌ها به‌صورت طولی از صفحه بریده شده استخراج شد. پس از آن دو ستون با دستگاه برش اره‌لنگ به طول ۲۴۰ میلی‌متر و عرض آن ۶۰ میلی‌متر و ضخامت اولیه لوله بود، جدا شد. با توجه به اینکه نمونه‌ها از لوله‌ای به قطر ۱۲۱۹ میلی‌متر بریده می‌شوند،

پس از برش دارای انحنا خواهند بود که توسط دستگاه فرز، ضخامت آن به ۱۰ میلی‌متر و همچنین عرض ستون به ۵۵ میلی‌متر (اندازه استاندارد طول نمونه‌های آزمایش ضربه شاریپی) کاهش یافت که در شکل (۲) نشان داده شده است. سپس توسط دستگاه سنگ‌زنی همان‌طور که در شکل (۳) قابل مشاهده است سطح آن صاف و صیقلی شد.



شکل ۱- برش لوله فولاد API X65 توسط دستگاه برش‌زن



شکل ۲- حذف انحنا و کاهش عرض ستون با استفاده از دستگاه فرز



شکل ۳- صاف و صیقلی شدن سطح ستون توسط دستگاه سنگ‌زنی



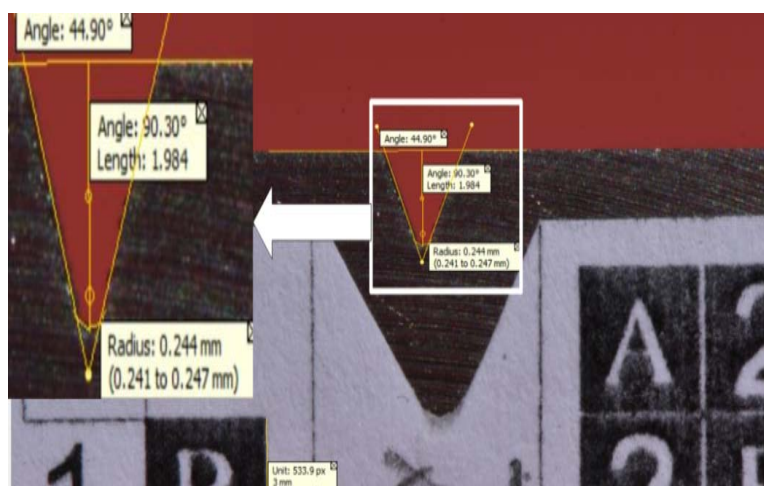
شکل ۴- ساخت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات

۳- ایجاد شیار با استفاده از دستگاه وایرکات

در این تحقیق با استفاده از دستگاه وایرکات که در شکل (۴) قابل مشاهده است، نمونه‌ها با ابعاد استاندارد $10 \times 10 \times 55$ میلی‌متر و شیار آن با زاویه 45° درجه و قوس انتهایی شیار با شعاع 0.25 میلی‌متر و عمق شیار از $1/25$ تا 3 میلی‌متر (۸ نمونه با اختلاف 0.25 میلی‌متر) با اعمال دقت کافی و رعایت الزامات استاندارد ساخته شد.

۴- اندازه‌گیری دقیق نمونه‌ها

برای صحت سنجی ابعاد نمونه‌ها (ضخامت، طول و عرض) با میکرومتر اندازه‌گیری شد. ابعاد طول نمونه‌ها با میکرومتر $75-50$ میلی‌متر و ابعاد عرض و ضخامت با میکرومتر 25 میلی‌متر اندازه‌گیری شد و ابعاد شیار نمونه‌ها (عمق و شعاع قوس) با دوربین عکس‌برداری با عدسی ماکرو و نرم‌افزار پردازش تصویر با دقت 0.001 میلی‌متر مطابق شکل (۵) به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد که کاملاً مطابق تلورانس‌های استاندارد ASTM E23 بود و سپس به آزمایشگاه کنترل کیفیت (کارخانه لوله‌سازی اهواز) برای انجام آزمایش ضربه منتقل شد.



شکل ۵- اندازه‌گیری نمونه‌ها با نرم‌افزار پردازش تصویر دیجیتال به دقت 0.001 میلی‌متر



شکل ۶- ماشین ضربه شاریبی زوئیک رول آلمان با ظرفیت ۷۵۰ ژول

جدول ۳- نمونه‌های آزمایش شده تحت آزمایش ضربه شاریبی و انرژی شکست آن‌ها

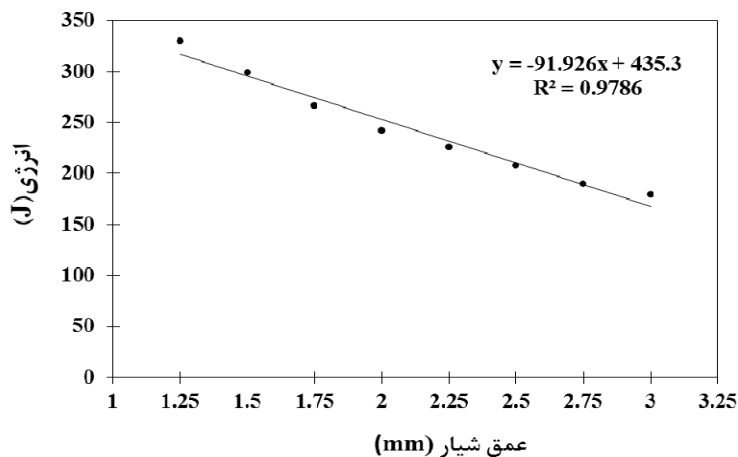
| شماره نمونه | عمق شیار (میلی‌متر) | انرژی شکست (ژول) | میانگین (ژول) |
|-------------|---------------------|------------------------|---------------|
| ۳-۱ | ۱/۲۵ | ۳۳۴/۹۳، ۳۲۹/۵۱، ۳۲۵/۹۰ | ۳۳۰ |
| ۶-۴ | ۱/۵ | ۲۹۴/۷۷، ۲۹۹/۵۴، ۳۰۱/۹۲ | ۲۹۹ |
| ۹-۷ | ۱/۷۵ | ۲۶۷/۰۴، ۲۶۲/۳۷، ۲۶۹/۳۸ | ۲۶۶ |
| ۱۲-۱۰ | ۲ | ۲۴۷/۸۷، ۲۳۶/۴۱، ۲۴۰/۴۱ | ۲۴۱ |
| ۱۵-۱۳ | ۲/۲۵ | ۲۳۲/۴۳، ۲۲۲/۸۲، ۲۲۲/۲۶ | ۲۲۶ |
| ۱۸-۱۶ | ۲/۵ | ۲۱۷/۲۲، ۱۹۸/۹۹، ۲۰۷/۷۸ | ۲۰۸ |
| ۲۱-۱۹ | ۲/۷۵ | ۱۹۰/۳۱، ۱۸۹/۷۷، ۱۸۸/۷۰ | ۱۹۰ |
| ۲۴-۲۲ | ۳ | ۱۷۷/۵۰، ۱۷۹/۰۹، ۱۸۱/۲۱ | ۱۷۹ |

۴- انجام آزمایش ضربه شاریبی

آزمایش ضربه شاریبی با استفاده از ماشین زوئیک رول آلمان با ظرفیت ۷۵۰ ژول که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شد. آزمایش ضربه شاریبی برای نمونه‌های فلز پایه ۳ بار تکرار شده و میانگین انرژی شکست به دست آمده است. در جدول (۳) مشخصات نمونه‌ها و انرژی شکست آن‌ها گزارش شده است. در این آزمایش سه نمونه با ابعاد استاندارد و بیستویک نمونه با عمق شیار V شکل غیراستاندارد تحت آزمایش ضربه شاریبی قرار گرفت. مشخصات اصلی ماشین ضربه شاریبی زوئیک رول آزمایش شده در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات اصلی ماشین ضربه شاریبی زوئیک رول آزمایش شده

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



شکل ۷- نمودار رابطه خطی انرژی شکست نمونه‌ها برحسب عمق شیار

این دستگاه مجهز به سیستم نمایش انرژی بوده و به صورت دیجیتالی انرژی شکست نمونه را می‌توان از روی صفحه مانیتور آن قرائت کرد. طی این مرحله، با توجه به مقادیر انرژی شکست به دست آمده، انرژی شکست میانگین سه نمونه استاندارد ۲۴۱ ژول می‌باشد که این انرژی معادل ۳۲ درصد ظرفیت دستگاه آزمایش این شرکت بوده است. از آنجاکه مطابق استاندارد، حداکثر انرژی شکست نمونه‌ها می‌بایست از ۸۰٪ ظرفیت ماشین کمتر باشد (اگر میانگین انرژی شکست نمونه‌ها بیش از ۸۰ درصد ظرفیت ماشین باشد، در این صورت در حین اصابت چکش دستگاه به نمونه، پاندول دچار افت شدید سرعت شده و مقدار انرژی به دست آمده دقیق نبوده و قابل قبول نیست)، این آزمایش از نظر استاندارد قابل قبول می‌باشد [۳۴].

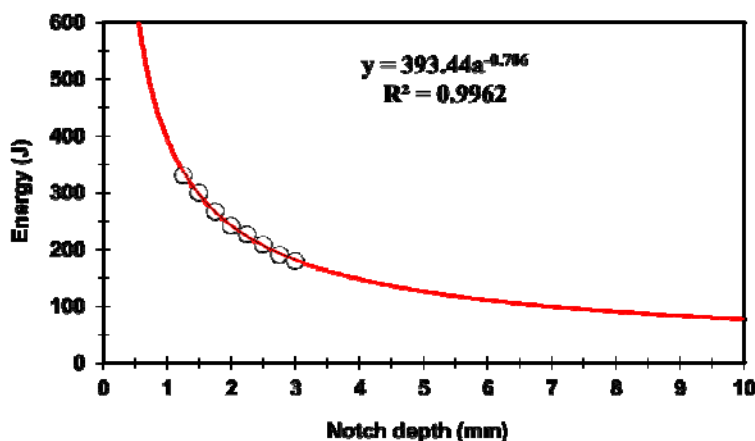
شکل (۷) نمودار انرژی شکست شاری برحسب عمق شیار نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۷) انرژی شکست شاری را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

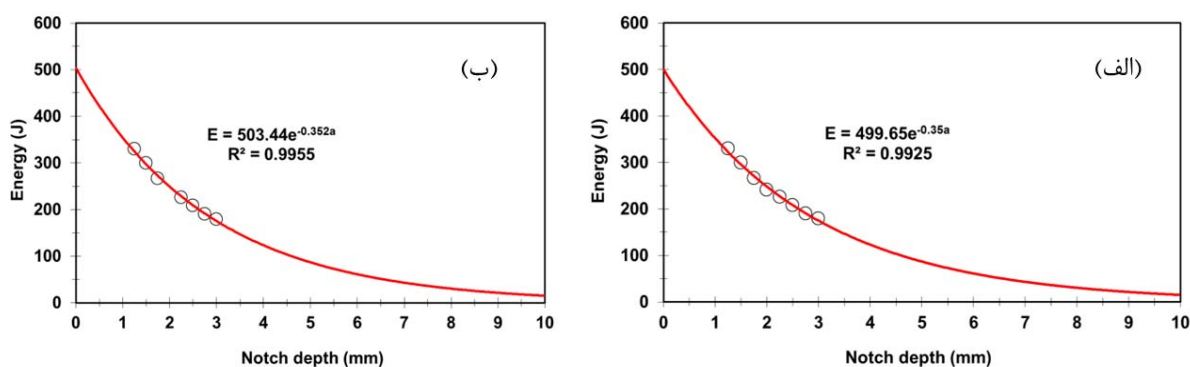
$$E = -91.926a + 436.94 \quad (1)$$

در این رابطه E انرژی ضربه برحسب ژول و a عمق شیار برحسب میلی‌متر است. در این رابطه اگر عمق شیار برابر ۵ میلی‌متر فرض شود (a=5mm) انرژی شکست برابر ۱۹/۳۶- ژول (E=-19.36J) به دست می‌آید که انرژی شکست منفی نشان از نادرست بودن معادله می‌باشد. تابع توانی اولین تابع مدنظر است، زیرا ضریب همبستگی (رگرسیون) نزدیک به یک دارد که در شکل (۸) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه این تابع در نمونه با عمق شیار ۱۰ میلی‌متر (نمونه از هم جدا شده) انرژی شکست ۱۰۰ ژول و انرژی شکست نمونه بدون شیار را بی‌نهایت گزارش می‌دهد، غیرمنطقی می‌باشد و لذا غیرقابل قبول است. شکل (۹) نمودار اصلاح شده انرژی شکست شاری برحسب عمق شیار نمونه با در نظر گرفتن نمونه استاندارد و همچنین بدون در نظر گرفتن انرژی شکست میانگین با عمق شیار استاندارد را بر اساس تابع نمایی نشان می‌دهد. همانطور که در نمودارها می‌شود با افزایش عمق شیار انرژی شکست به علت کاهش مساحت سطح، کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹) انرژی شکست شاری را می‌توان از رابطه زیر (بدون احتساب نمونه استاندارد) به دست آورد:

$$E = 503.44e^{-0.352a} \quad (2)$$



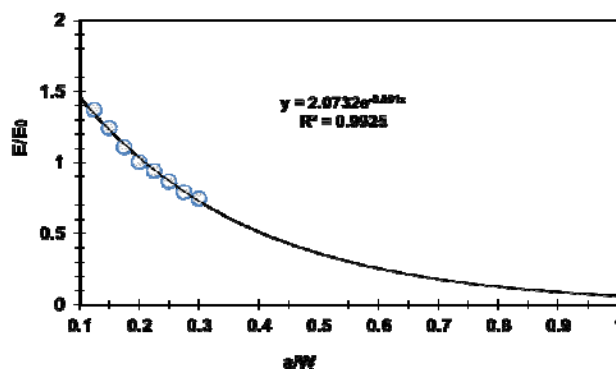
شکل ۸- نمودار تابع توانی انرژی شکست نمونه‌ها برحسب عمق شیار



شکل ۹- نمودار اصلاح‌شده انرژی شکست نمونه‌ها برحسب عمق شیار؛ الف) با احتساب نمونه استاندارد،

ب) بدون احتساب نمونه استاندارد

با استفاده از رابطه (۲) و با جایگذاری مقدار استاندارد عمق شیار (۲ میلی‌متر) مقدار انرژی شکست شاری برابر ۲۴۹ ژول به دست می‌آید که با نتایج تجربی (۲۴۱ ژول) تطابق دارد (کمتر از ۴ درصد خطا). به‌طور مثال اگر عمق شیار را برابر ۵ میلی‌متر فرض شود (انرژی شکست برابر ۸۶/۶۱ ژول $E=86.61J$) به دست می‌آید که به لحاظ فیزیکی معنادار است. یکی از مزایای رابطه به‌دست‌آمده این است که با معلوم بودن عمق شیار (دلخواه)، می‌توان انرژی شکست نمونه ضربه شاری را برای این فولاد تعیین کرد. در شکل (۱۰) نمودار انرژی شکست به انرژی شکست استاندارد (E/E_0) برحسب تغییرات عمق شیار نمونه به ضخامت نمونه (a/W) نشان داده شده است. در این نمودار a عمق شیار نمونه برحسب میلی‌متر و $0 \leq a \leq 10$ میلی‌متر که $1.25 \leq a \leq 3$ میلی‌متر آزمایش تجربی انجام‌شده (۸ نمونه)، W ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و $W=10mm$ می‌باشد که محور افقی با تقسیم عمق شیار نمونه‌ها بر ضخامت نمونه به دست می‌آید. محور عمودی از تقسیم انرژی شکست حاصل از آزمایش تجربی ضربه شاری نمونه‌ها برحسب ژول (E) بر انرژی شکست نمونه استاندارد حاصل از آزمایش تجربی ضربه شاری برحسب ژول ($E_0=241J$) به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک رابطه نمایی با رگرسیون 0.9925 گزارش شده است. در شکل (۱۱) یک گروه سه‌تایی از نمونه آزمایش شاری قبل و بعد شکست مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها به‌صورت کامل شکسته نشده و شکست نرم اتفاق افتاده است.



شکل ۱۰- نمودار تغییر انرژی به انرژی استاندارد بر حسب عمق شیار بر ضخامت برای آزمایش ضربه شارپی



شکل ۱۱- یک گروه سه تایی (با عمق شیار استاندارد) از نمونه آزمایش ضربه شارپی قبل و بعد شکست.

۶- شبیه سازی

برای شبیه سازی آزمایش ضربه شارپی در مقالات مدل های دو و سه بعدی ارائه شده است. از آنجایی که در مدل دوبعدی امکان جریان ماده در راستای محیطی با ضخامت وجود ندارد و همچنین وجود تنش های سه بعدی در نوک ترک، باعث کاهش دقت در شبیه سازی دوبعدی می گردد؛ بنابراین برای شبیه سازی مناسب شکست فولاد ایکس شصت و پنج در آزمایش ضربه شارپی مدل سه بعدی انتخاب شده است. بنابراین شبیه سازی آزمایش ضربه شارپی مدل گرسون-تیورگاد و نیدلمن یا به اختصار مدل GTN نامیده می شود [۳۷-۳۵] با در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی به وسیله نرم افزار ABAQUS V6.14 انجام شده است. در این تحقیق نمونه ضربه شارپی به صورت سه بعدی و تغییر شکل پذیر با ابعاد $10 \times 10 \times 55$ میلی متر و زاویه شیار ۴۵ درجه و شعاع قوس شیار 0.25 میلی متر مطابق با استاندارد ASTM E23 و عمق شیار از $1/25$ تا 3 میلی متر (۸ نمونه با اختلاف 0.25 میلی متر) در نرم افزار آباکوس مدل شده است. همچنین سندانها بر اساس آزمایش تجربی به شعاع 1 میلی متر و چکش به شعاع 8 میلی متر به صورت صلب مدل شده اند. لازم به ذکر است فاصله سندانها نسبت به هم 40 میلی متر می باشد. جهت استفاده از نرم افزار نیاز است که خواص ماده به نرم افزار معرفی شود. خواص مورد نیاز چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون، خواص پلاستیک در جدول های (۵) و (۶) نشان داده شده است [۳۷].

جدول ۵- خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد API X65 [۳۷]

| | |
|------|----------------------------|
| ۷۸۷۰ | چگالی (kg/m ³) |
| ۰/۳ | ضریب پواسون |
| ۵۰۵ | استحکام تسلیم (MPa) |
| ۲۱۰ | مدول یانگ (GPa) |

جدول ۶- خواص پلاستیک فولاد API X65 [۴۵]

| ردیف | تنش تسلیم (MPa) | کرنش پلاستیک | ردیف | تنش تسلیم (MPa) | کرنش پلاستیک |
|------|--------------------|-----------------|------|--------------------|-----------------|
| ۱ | ۵۰۵ | ۰ | ۱۱ | ۷۱۹ | ۰/۱۸ |
| ۲ | ۵۴۹ | ۰/۰۱ | ۱۲ | ۷۲۲ | ۰/۱۹ |
| ۳ | ۵۹۹ | ۰/۰۳ | ۱۳ | ۷۵۵ | ۰/۳۰ |
| ۴ | ۶۳۱ | ۰/۰۵ | ۱۴ | ۷۹۴ | ۰/۵۰ |
| ۵ | ۶۵۲ | ۰/۰۶ | ۱۵ | ۸۲۱ | ۰/۷۰ |
| ۶ | ۶۶۷ | ۰/۰۸ | ۱۶ | ۸۳۲ | ۰/۸۰ |
| ۷ | ۶۸۱ | ۰/۱۰ | ۱۷ | ۸۴۱ | ۰/۹۰ |
| ۸ | ۶۹۳ | ۰/۱۲ | ۱۸ | ۸۵۰ | ۱/۰۰ |
| ۹ | ۷۰۳ | ۰/۱۴ | ۱۹ | ۸۵۸ | ۱/۱۰ |
| ۱۰ | ۷۱۲ | ۰/۱۶ | ۲۰ | ۸۶۶ | ۱/۲۰ |

پارامترهای گرسون به دلیل استفاده از مدل گرسون جهت پیش‌بینی رشد ترک و تحلیل شکست مدل نیاز به معرفی این مدل به نرم‌افزار می‌باشد. همچنین اطلاعات پلاستیک مربوط به لوله فولادی API X65 به دست آمده از آزمایش کشش در جهت محیطی لوله وارد نرم‌افزار شد [۳۷].

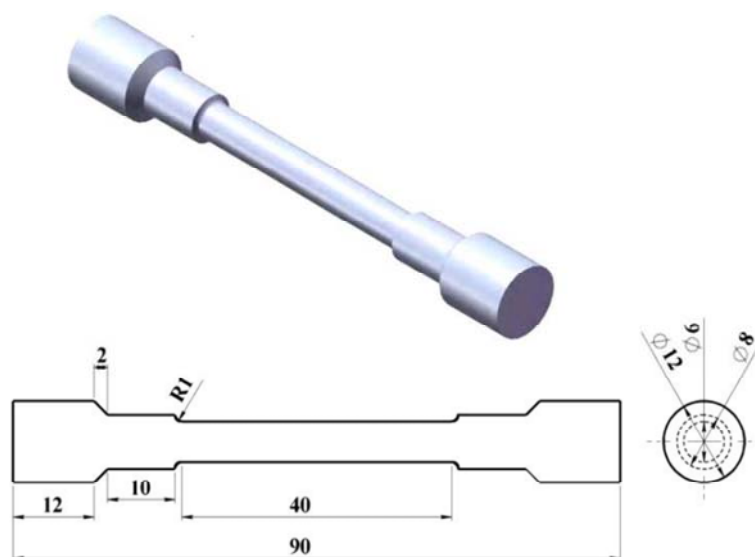
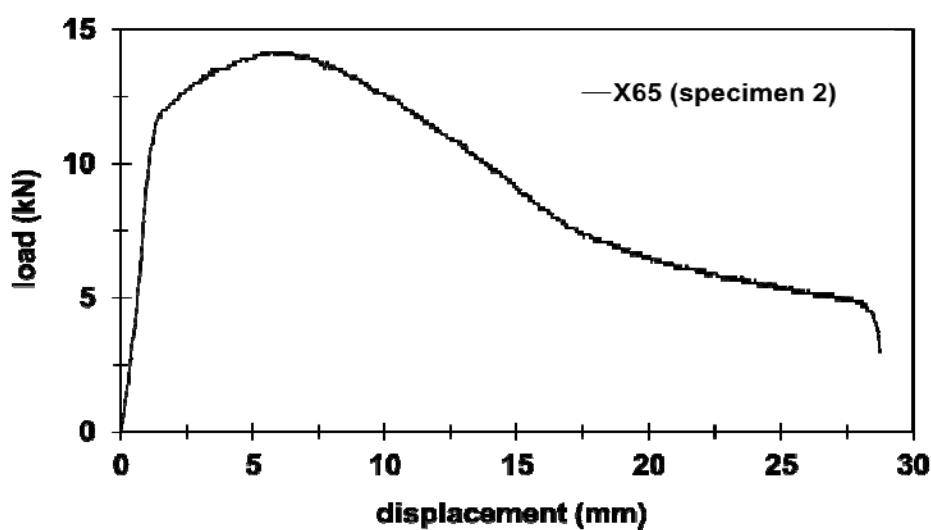
مدل اصلاح شده گرسون دارای هشت پارامتر می‌باشد که بایستی برای مواد مورد نظر کالیبره شوند. این پارامترها نشان‌دهنده کرنش متوسط به هم پیوستن حفره‌ها، انحراف استاندارد توزیع حفره‌ها، کسر حجمی مربوط به ذرات برای به هم پیوستن حفره‌ها، کسر حجمی اولیه حفره‌ها، مقدار بحرانی (نسبت حجم حفره در لحظه شروع ادغام حفره‌ها)، نسبت حجم حفره در پایان شکست و پارامترهای تعدیل‌کننده در تابع تسلیم می‌باشند. این مدل معمولاً مدل گرسون - تی‌ورگارد - نیدل‌من یا به اختصار مدل GTN نامیده می‌شود [۳۶].

برای شبیه‌سازی اولیه آزمایش ضربه شاریپی از ضرایب رابطه اصلاح شده گرسون (مطابق جدول ۷) با آزمایش کشش تک محوری برای این فولاد در مرجع [۱۳] کالیبره می‌شود.

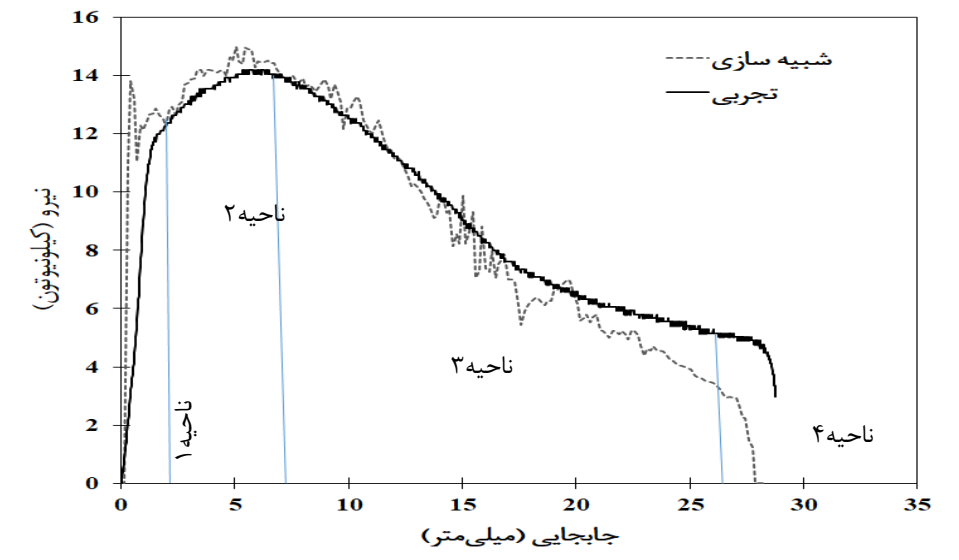
جدول ۷- ضرایب کالیبره شده برای فولاد ایکس شصت و پنج حاصل از آزمایش کشش [۳۸]

| ضرایب GTN | 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 | $7/07 \times 10^{-5}$ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۹ |

در این مرجع نمونه آزمایش کشش تک محوری از نوع هموار مطابق شکل (۱۲) در سه جهت محیطی، طولی و درز جوش (برای هر کدام سه نمونه) برای تعیین خواص مکانیکی لوله ایکس شصت و پنج مطابق استاندارد ASTM A370 [۳۹] آزمایش شد.

**شکل ۱۲-** شماتیک نمونه آزمایش کشش تک محوره هموار در جهت محیطی لوله (ابعاد برحسب میلی متر) [۳۹]**شکل ۱۳-** نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش مجهز شده شاریبی روی فولاد ایکس شصت و پنج

در جهت محیطی لوله [۱۳]



شکل ۱۴- نمودار کالیبره شده [۴۱]

برای صحت سنجی شبیه‌سازی از داده‌های تجربی مرجع [۱۳] مطابق شکل (۱۳) استفاده شد. این نمودار اطلاعات آزمایشگاهی نیرو-جابجایی برای فولاد ایکس شصت‌وپنج حاصل از آزمایش ضربه شاریپی تجهیز شده با ظرفیت ۲۹۴ ژول، جرم چکش ۱۹/۵ کیلوگرم و سرعت ضربه‌زن ۵/۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد [۱۳]. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۱۴) نمایش داده است. در شکل (۱۴) مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی نمودارهای نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. نمودار حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی به چهار ناحیه تقسیم شده و هر ناحیه به صورت جداگانه بررسی و مقایسه می‌شود. ناحیه ۱ (ناحیه الاستیک) با شیبی مناسب که حدود ۱/۲۵ میلی‌متر از تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه می‌باشد؛ دو نمودار از انطباق نسبتاً مناسبی برخوردار هستند. ناحیه ۲ (ناحیه کار سختی)، ابتدای ناحیه رشد ترک از ۱/۲۵ تا ۷ میلی‌متر از تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه می‌باشد که با توجه به نوسانات نسبتاً زیاد در نتایج شبیه‌سازی دو نمودار از تطابق مناسبی برخوردار هستند. ناحیه ۳ (ناحیه نرم شوندگی)، ناحیه گسترش ترک که از ۷ تا ۲۷ میلی‌متر از تغییر مکان نمونه مربوط به این ناحیه است. با توجه به نمودار از جابجایی ۷ تا ۱۶ میلی‌متر؛ دو نمودار به طور کامل برهم منطبق نشده‌اند؛ این ناحیه از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است که می‌تواند دلایل محیطی یا عددی داشته باشد. در ناحیه ۴ (ناحیه شکست) نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی هیچ‌گونه انطباقی ندارند؛ البته نتایج این ناحیه به صورت کامل در مرجع [۱۳] بیان نشده است. ضرایب کالیبره شده مدل اصلاح شده گرسون برای فولاد ایکس شصت‌وپنج در جدول (۸) گزارش شده است. مقایسه ضرایب مدل اصلاح شده گرسون هم‌خوانی مناسب ضرایب مدل GTN با تحقیق مرجع [۳۸] بر روی فولاد ایکس شصت‌وپنج انجام شده است را نشان می‌دهد. البته برای اعمال شکست حاصل از ضربه شاریپی نیاز به f_N کمتر، f_c و f_f بالاتری می‌باشد.

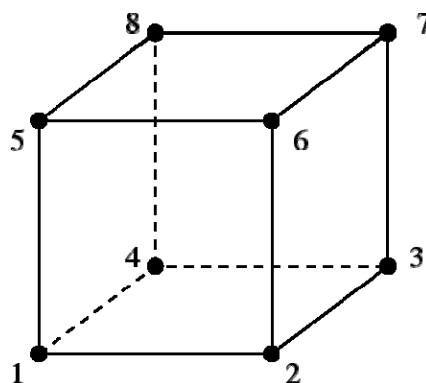
جدول ۸- ضرایب کالیبره شده برای فولاد ایکس شصت و پنج

| ضرایب GTN | q ₁ | q ₂ | q ₃ | ε _N | S _N | f _N | f ₀ | f _C | f _f |
|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| نتایج مرجع [۳۸] | ۱/۵ | ۱ | ۲/۲۵ | ۰/۳ | ۰/۱ | ۰/۰۰۳ | ۷/۰۷×۵ ^{-۱۰} | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۹ |
| نتایج تحقیق حاضر از مرجع [۴۰] | ۱/۵ | ۱ | ۲/۲۵ | ۰/۳ | ۰/۱ | ۰/۰۰۳۸ | ۷/۰۷×۵ ^{-۱۰} | ۰/۰۱۵ | ۰/۲۵ |

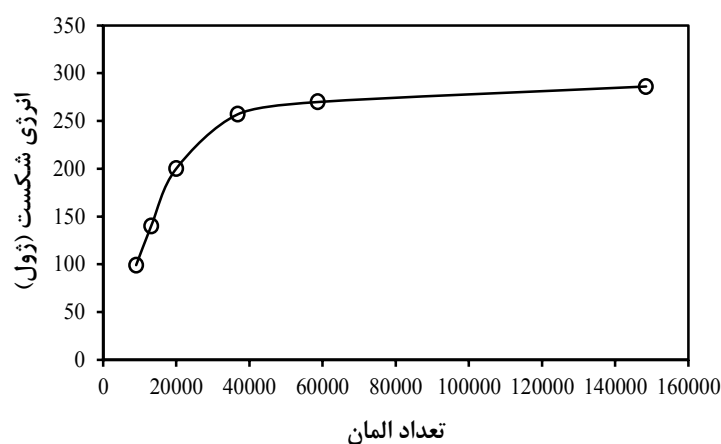
حال با در نظر گرفتن ضرایب کالیبره شده مدل آسیب گرسون می‌توان نتایج آزمایش تجربی ضربه شاریپی، روی هشت نمونه با عمق شیارهای متفاوت را به‌وسیله ماشین با ظرفیت ۷۵۰ ژول، جرم ضربه‌زن ۵۰ کیلوگرم، چکش ۸ میلی‌متری و سرعت ضربه‌زن ۵/۴۲ متر بر ثانیه که در شرکت لوله‌سازی اهواز انجام شده شبیه‌سازی کرد. با توجه به اینکه مسئله از نوع دینامیکی می‌باشد و همچنین در این شبیه‌سازی از مدل گرسون به‌عنوان معیار شکست و پیش‌بینی رشد ترک استفاده شده است نوع حل انتخابی باید دینامیک صریح^۱ (حل گر آن Abaqus/explicit) باشد؛ زیرا مدل گرسون در نرم‌افزار آباکوس در این نوع حل گنجانده شده است. حل دینامیک صریح برای مسائل با نرخ کرنش بالا مانند تحلیل ضربه یا انفجار توسعه داده شده است. همچنین تماس بین سطح نمونه و چکش و نیز سطح نمونه و سندان‌ها به‌صورت surface-to-surface تعریف و ضریب اصطکاک بین سطوح ۰/۱ در نظر گرفته شد [۴۱].

برای تعریف شرایط مرزی، سندان‌ها کاملاً در تمامی جهات مقید شدند و سرعت چکش با توجه به ارتفاع سقوط در لحظه برخورد با نمونه محاسبه شد و به‌صورت تغییر مکان وارد نرم‌افزار شد. زمان انجام آزمایش ضربه شاریپی ۵ میلی‌ثانیه است. با داشتن سرعت تغییر مکان را بدست آورده و وارد نرم‌افزار می‌شود. همچنین در این مرحله با توجه به اینکه چکش فقط در راستای عمودی می‌تواند حرکت کند، حرکت چکش در این راستا مقید شد تا در راستای دیگری حرکت نکند. به‌منظور اعمال شبکه‌بندی مناسب در ناحیه اطراف ترک (به ابعاد ۰/۲×۰/۲×۰/۵ میلی‌متر)، نمونه تقسیم‌بندی^۲ شده است. برای اطمینان از دقت محاسبات، المان‌ها اعمال شده از نوع سالیید خطی ۸ گره‌ای (C3D8R) است. ابعاد شبکه در نزدیک ترک ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این عدد به دلیل انتخاب طرح گرسون برای نوع حل بین ۰/۱۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر قابل تغییر است [۴۲-۴۴]. این مقادیر با توجه به نمودار تحلیل حساسیت به شبکه مطابق شکل (۱۶) تعیین شده است. ابعاد شبکه به‌عنوان میانگین فاصله بین ذرات ناخالصی موجود در ماده مورد نظر در نظر گرفته می‌شود. نوع المان به‌کار رفته در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

^۱Dynamic explicit^۲Partition



شکل ۱۵- المان‌های به کاررفته در نمونه شاریپی (C3D8R)



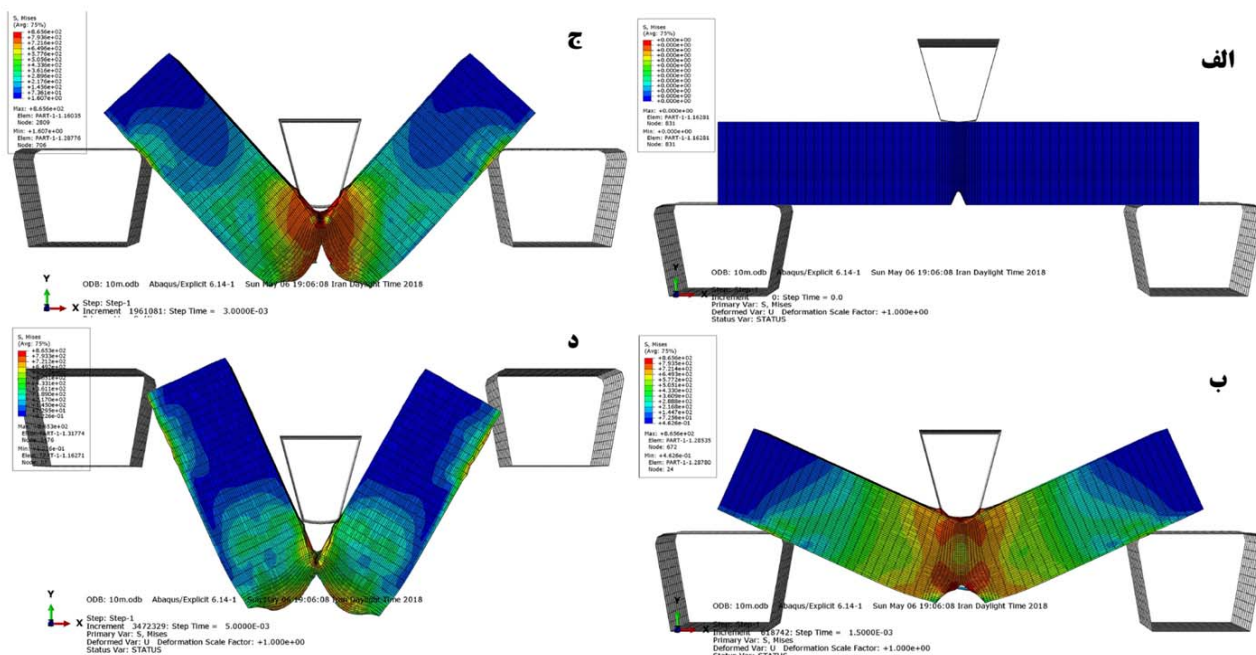
شکل ۱۶- نمودار تحلیل حساسیت به شبکه

بعد از حل مسئله، می‌توان خروجی‌های تعیین‌شده را از شبیه‌سازی دریافت کرد. شکل (۱۷) مراحل شکست نمونه با ابعاد و شیار استاندارد با ماشین ضربه ۳۰۰ ژول و تغییرات تنش میزز در اطراف نوک ترک در نمونه ضربه شاریپی در محیط نرم‌افزار آباکوس در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

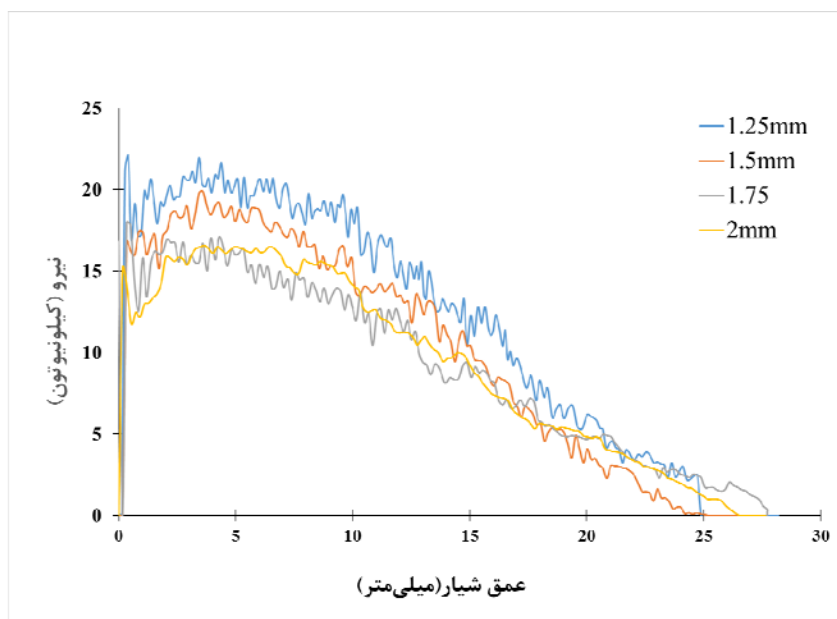
۷- نتایج و بحث

شبیه‌سازی برای هشت نمونه با عمق شیارهای متفاوت به‌طور جداگانه انجام شده در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) بر اساس نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود با افزایش عمق شیار انرژی شکست کاهش می‌یابد. وجود ناپیوستگی‌های هندسی مانند شیار یا سوراخ در یک جسم باعث توزیع غیریکنواخت تنش در اطراف آن یا همان تمرکز تنش می‌شود و همین عامل علت اصلی کمتر بودن تنش شکست اعمالی از تنش شکست تئوری است؛ بنابراین تأثیر مضر وجود ترک، افزایش تنش موضعی و به وجود آمدن حالت تنش سه‌بعدی در مجاورت نوک ترک که تحت شرایط کرنش صفحه‌ای بارگذاری شده است می‌باشد [۵ و ۴].

وجود شیار موجب ایجاد تراکم خطوط نیرو در نوک شیار و تمرکز تنش و افزایش مقدار آن می‌شود و در نتیجه باعث چندین برابر شدن تنش اعمالی در نوک ترک خواهد شد [۶].

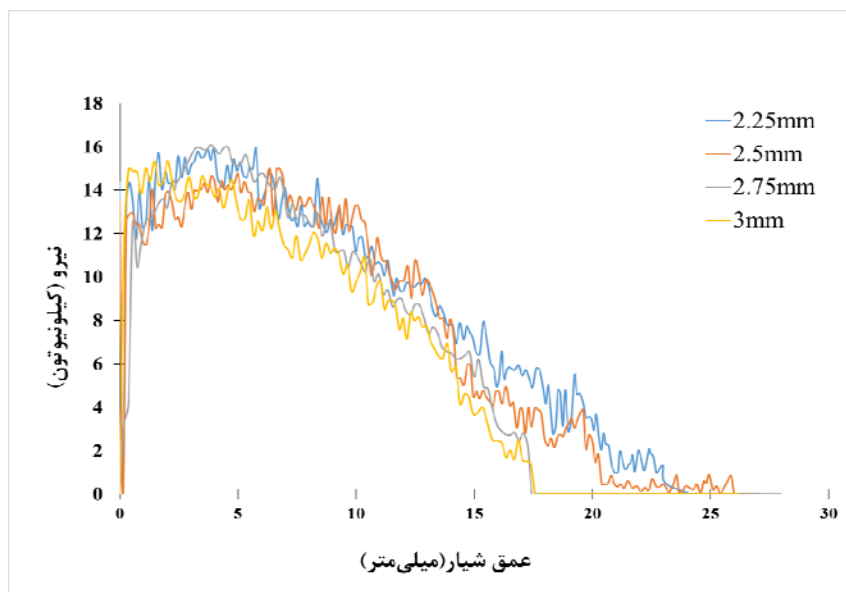


شکل ۱۷- مراحل شکست نمونه ضربه شاری در نرم افزار آباکوس؛ الف) تصویر نمونه قبل از شکست، ب) تصویر نمونه در لحظه ۱/۵ میلی ثانیه، ج) تصویر نمونه در لحظه ۳ میلی ثانیه، د) تصویر نمونه بعد از اتمام شکست.

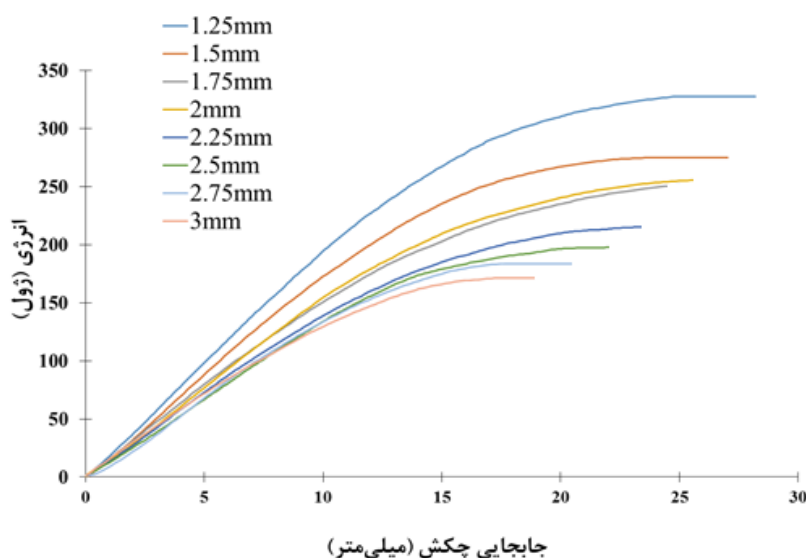


شکل ۱۸- نمودار شبیه سازی نیرو- جابجایی آزمایش ضربه شاری بر حسب تغییر عمق شیار (از ۱/۲۵ تا ۲ میلی متر)

در شکل (۲۰) نمودار انرژی- جابجایی برای هشت نمونه آزمایش شده نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش عمق شیار انرژی کاهش می یابد.



شکل ۱۹- نمودار شبیه‌سازی نیرو- جابجایی آزمایش ضربه شاریبی برحسب تغییر عمق شیار (از ۲/۲۵ تا ۳ میلی‌متر)

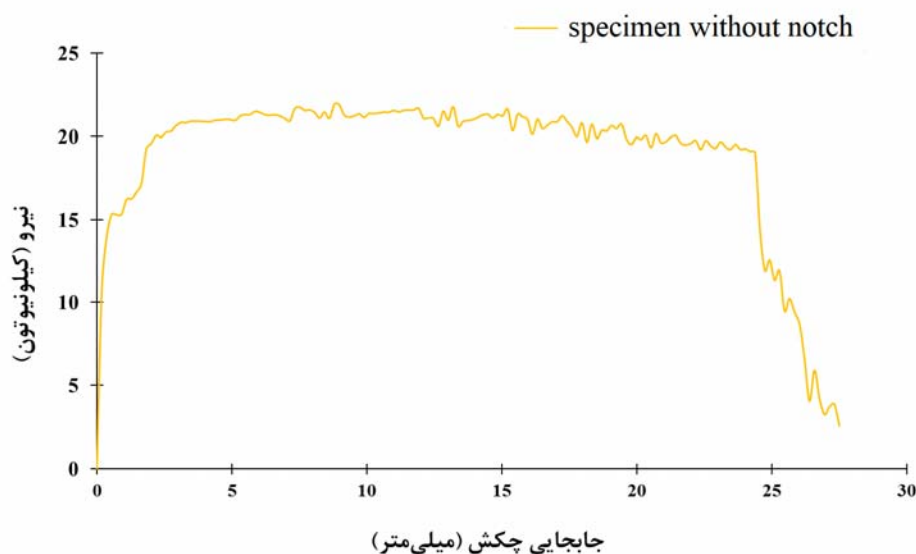


شکل ۲۰- نمودار شبیه‌سازی انرژی- جابجایی آزمایش ضربه شاریبی برحسب تغییر عمق شیار

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده انرژی شکست شاریبی حاصل از شبیه‌سازی را می‌توان از رابطه زیر (بدون احتساب نمونه استاندارد) به دست آورد:

$$E = 474.81e^{-0.336a} \quad (۳)$$

برای به دست آوردن رابطه انرژی برحسب عمق شیار باید اطمینان حاصل شود که برای نمونه بدون شیار تقریب درستی در نظر گرفته شده است. لذا نمونه بدون شیار را شبیه‌سازی کرده و نمودار نیرو-جابجایی مطابق شکل (۲۱) می‌باشد. انرژی شکست به دست آمده از شبیه‌سازی ۵۲۰ ژول می‌باشد. با استفاده از رابطه ۲ به دست آمده (حاصل از برون‌یابی تجربی) انرژی شکست برای نمونه بدون شیار ۵۰۰ ژول به دست آمد که با مقدار شبیه‌سازی ۴ درصد خطا دارد.



شکل ۲۱- نمودار نیرو- جابجایی نمونه بدون شیار بر اساس شبیه‌سازی

نتایج حاصل از انرژی شکست تجربی و عددی در جدول (۹) ذکر شده و با یکدیگر مقایسه گردید.

جدول ۹- مقایسه انرژی شکست تجربی و عددی تغییرات عمق شیار

| شماره گروه | عمق شیار (میلی‌متر) | انرژی شکست تجربی | انرژی شکست عددی | درصد خطا % |
|------------|---------------------|------------------|-----------------|------------|
| ۱ | ۱/۲۵ | ۳۳۰ | ۳۲۷ | ۰/۹ |
| ۲ | ۱/۵ | ۲۹۹ | ۲۷۵ | ۸/۰۲ |
| ۳ | ۱/۷۵ | ۲۶۶ | ۲۵۵ | ۴/۱۳ |
| ۴ | ۲ | ۲۴۱ | ۲۵۶ | ۶/۲۲ |
| ۵ | ۲/۲۵ | ۲۲۶ | ۲۱۵ | ۴/۸۷ |
| ۶ | ۲/۵ | ۲۰۸ | ۱۹۹ | ۴/۳۳ |
| ۷ | ۲/۷۵ | ۱۹۰ | ۱۸۲ | ۴/۲۱ |
| ۸ | ۳ | ۱۷۹ | ۱۷۱ | ۴/۴۷ |

در جدول (۱۰) مقایسه مقدار انرژی شکست نمونه استاندارد با استفاده از روابط به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام شده است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده و میزان خطای کمتر از ۵ درصد می‌توان نتیجه گرفت؛ نتایج آزمایش تجربی از انطباق مناسبی با نتایج شبیه‌سازی برخوردار است.

جدول ۱۰- مقایسه انرژی شکست نمونه استاندارد با استفاده دو رابطه شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

| ردیف | انرژی شکست (ژول) | درصد خطا در مقایسه با مقدار آزمایش (%) |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| مقدار انرژی شکست حاصل از آزمایش نمونه استاندارد | ۲۴۱ | - |
| مقدار انرژی شکست حاصل از آزمایش تجربی (معادله ۲) | ۲۴۹ | ۳/۳۱ |
| مقدار انرژی شکست حاصل از شبیه‌سازی (معادله ۳) | ۲۴۲ | ۰/۴۱ |

۸- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر عمق شیار بر انرژی شکست شاریپی نمونه از فولاد ایکس شصت و پنج بررسی شد. برای این تحقیق بیست و چهار نمونه در هفت سری نمونه (هر نمونه با ۳ بار تکرار) با عمق شیار غیراستاندارد و یک سری ۳ تایی نمونه با ابعاد استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ضربه شاریپی مورد استفاده در این آزمایش با ظرفیت ۷۵۰ ژول مطابق استاندارد ASTM E23 انتخاب شد. همچنین شبیه‌سازی سه بعدی نمونه در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. خلاصه نتایج به دست آمده عبارت است از:

۱. با افزایش عمق شیار انرژی شکست شاریپی به صورت نمایی بر اساس رابطه $E = 503.44e^{-0.352a}$ کاهش پیدا می‌کند. با معلوم بودن این رابطه می‌توان مقدار دقیق انرژی شکست شاریپی را برای هر شیار دلخواه در نمونه فولادی آزمایش شده محاسبه کرد.
۲. مقدار انرژی ضربه به دست آمده از رابطه تجربی برای نمونه استاندارد با عمق شیار ۲ میلی‌متر برابر ۲۴۹ ژول است که با مقدار حاصل از آزمایش تجربی (۲۴۱ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از درون‌یابی رابطه تجربی برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد ۳/۳۱ درصد است.
۳. برای اعتبارسنجی نتایج آزمایش تجربی از شبیه‌سازی سه بعدی بر اساس مدل اصلاح شده آسیب گرسون استفاده شد. مقایسه مقدار حاصل از نتایج آزمایش تجربی و رابطه به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مقدار انرژی ضربه به دست آمده از معادله شبیه‌سازی برای نمونه استاندارد برابر ۲۴۲ ژول است که با مقدار حاصل از آزمایش تجربی (۲۴۱ ژول) مطابقت دارد. خطای حاصل از معادله شبیه‌سازی برای محاسبه انرژی شکست نمونه استاندارد فقط ۰/۴۱ درصد است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از آقایان مهندس غریب زاده (مدیر پژوهش و توسعه)، مهندس احمدی، مهندس داوودیان رنجبر، مهندس کلانتری و مهندس سلطانی در آزمایشگاه کنترل کیفیت شرکت لوله‌سازی اهواز اعلام می‌دارند. همچنین از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قرار دادن فولاد API X65 و آقای مهندس اسماعیل قاسمی سلوکلو که در شبیه‌سازی یاری نمودند قدردانی و تشکر می‌گردد.

مراجع

- [1] Esmaeilzadeh, A., "Investigation of the Effect of Submerged Welding Parameters on the Hardness and Fracture Energy of Thermomechanical Steel Welding", MSC Thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand, (2013). (in Persian)
- [2] Soleimani, V., "Computer Simulation of the X70 Steel Grooving Tensile Test with Gurson Model", MSC Thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand, (2011). (in Persian)
- [3] Salari Pour, H., "Analysis of the Experimental Results of the X70 Steel Impact Test", MSC Thesis of Mechanical Department, University of Birjand, (2011). (in Persian)
- [4] Dieter, G.E., "*Mechanical Metallurgy*", McGraw-Hill Book, New York, (1988).
- [5] Sajjadi, S. A., "*Mechanical Behavior Materials*", Ferdowsi University of Mashhad, (2006). (in Persian)
- [6] Meyers, M. A., and Chawla, K.K., "*Mechanical Behavior of Materials*", Prentice Hall, New Jersey, (1999).
- [7] Specification for Line Pipe, ANSI/API Specification 5L Forty- fourth Edition, (2007).
- [8] BS EN 10 045-1:1990, "Charpy Impact Test on Metallic Materials- Part 1: Test Method (V-and U-notches)", (1990).
- [9] ASTM E23-96, "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", American Society for Testing and Materials, (1996).
- [10] EN ISO 14556:2000. "European Standard, Steel-Charpy V-notch Pendulum Impact Test – instrumented Test Method", (2000).
- [11] Hashemi, S.H., "Apportion of Charpy Energy in API 5L Grade X70 Pipeline Steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, pp. 879-884, (2008).
- [12] Hashemi, S.H., and Mohammadyani, D., "Characterisation of Weldment Hardness, Impact Energy and Microstructure in API X65 Steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 98, pp. 8-15, (2012).
- [13] Hashemi, S.H., "Correction Factors for Safe Performance of API X65 Pipeline Steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, pp. 533-540, (2009).
- [14] Francois, D., and Pineau, A., "*From Charpy to Present Impact Testing*", Elsevier Science, (2002).
- [15] Druce, S.G., Gage, G., and Popkiss, E., "Effects of Notch Geometry on the Impact Fracture Behavior of a Cast Duplex Stainless Steel", Materials Physics and Metallurgy Division, Harwell Laboratory, UKAEA, Oxfordshire, OX11 0RA, UK, (1987).

- [16] Lukas, P., Kunz, L., Weiss, B., and Stickler, R., "Notch Size Effect in Fatigue", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 12, No. 3, pp. 175-186, (1989).
- [17] Sidener, S.E., Kumar, A.S., Oglesby, D.B., Schubert, L.E., Hamilton, M.L., and Rosinski, S.T., "Dynamic Finite Element Modeling of the Effects of Size on the Upper Shelf Energy of Pressure Vessel Steels", *Journal of Nuclear Materials*, pp. 210-218, (1996).
- [18] Gomez, F.J., Elices, M., and Planas, J., "The Cohesive Crack Concept: Application to PMMA at -60°C ", *Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid E.T.S. Ingenieros de Caminos, Spain*, (2004).
- [19] Barati, A., Alizadeh, Y., and Aghazadeh, J., "Investigation of the Change in the Depth and Radius of the U-shaped Groove on the Integral Value of J", *17th Annual Conference of Mechanical Engineering, Tehran, Tehran University*, (2009). (in Persian)
- [20] Barati, E., Alizadeh, Y., and Aghazadeh, J., "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*, Vol. 5, No. 2, pp. 39-49, (2009). (in Persian)
- [21] Nazari, A., Aghazadeh-Mohandesi, J., Vishkasogheh, M.H., and Abedi, M., "Simulation of Impact Energy in Functionally Graded Steels", *Computational Materials Science*, Vol. 50, Issue. 3, pp. 1187-1196, ISSN 0927-0256, (2011).
- [22] Ghajar, R.A., Alizadeh, J., Nemati, M., and Alizadeh, Y., "Evaluate the Fracture Toughness in UIC60 Rail by Charpy Impact Test at Different Temperatures", *Traffic Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 249-259, (2011). (in Persian)
- [23] Li, Y., Mao, W., Ji, L., and Huo, C., "The Effect of Constraint on Ductile Crack Growth for Anisotropy Evaluation of X100 Pipeline Steels", *Procedia Materials Science*, Vol. 3, pp. 1505-1511, (2004).
- [24] Salavati, H., and Alizadeh, Y., "Effect of Notch Depth and Radius on the Critical Fracture Load of Bainitic Functionally Graded Steels under Mixed Mode I + II Loading", *Physical Mesomechanics*, Vol. 4, (2014).
- [25] Cova, M., Nanni, M., and Tovo, R., "Geometrical Size Effect in High Cycle Fatigue Strength of Heavywalled Ductile Cast iron GJS400: Weakest Link vs Defect-based Approach", *Procedia Engineering*, Vol. 74, pp. 101-104, (2014).
- [26] You, M., Li, M., Li, J.L., Liu, K., and Zhao, Y.L., "Effect of Notch Depth on the Adhesively Bonded Steel Butt-joint under Charpy Impact Test", *Applied Mechanics and Materials*, pp. 538-541, (2014).
- [27] Mosadeghi, M.R., Salavati, H., Alizadeh, Y., and Abdullah, A., "Fracture Assessment of Specimens Weakened by U-notch made of Functionally Graded Materials under Mode I Loading", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 1-9, (2017). (in Persian)

- [28] Panin, S., Maruschak, P., Vlasov, I., Moiseenko, D., Berto, F., Bishchak, R., and Vinogradov, A., "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*, Vol. 40, No. 4, pp. 586-596, (2017).
- [29] Hosseinzadeh, A., and Hashemi, S.H., "Experimental Investigation of Notch Depth Effect on Charpy Fracture Energy in API X65 Steel", *ISME Annual Conference 2018, Semnam, University of Semnan*, (2018). (in Persian)
- [30] Luzio, G.D., and Cusatis, G., "Cohesive Crack Analysis of Size Effect for Samples with Blunt Notches and Generalized Size Effect Curve for Quasi-brittle Materials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 204, pp. 15-28, ISSN 0013-7944, (2018).
- [31] Shahsavani, A.R., and Hashemi, S.H., "Experimental and Numerical Investigation of Initial Notch Radius Effect on Charpy Fracture Energy in API X65 Steel", *Amirkabir Journal*, (2018). (in Persian)
- [32] Verlinden, B., "*Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*", First Edition, Elsevier Ltd, (2007).
- [33] Hashemi, S.H., Kimiyabakhsh, M., Rezaei-Yekta, M., and Farahi, A., "Experimental and Numerical Investigation of the Influence of the Length of the Three-point Bending Point Groove on the Value of the Integral J in Steel Gas Transfer Pipes with API X65", *19th Annual Conference of the Mechanical Engineering of Iran, Birjand, University of Birjand*, (2011). (in Persian)
- [34] ASTM E23, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* (Approved Nov. 10. 2002, Published May 2003).
- [35] Barbosa, A.Q., da Silva, L.F., Öchsner, A., Abenojar, J., and del Real, J.C., "Influence of the Size and Amount of Cork Particles on the Impact Toughness of a Structural Adhesive", in *Journal of Adhesion*, pp. 452-470, (2012).
- [36] Tvergaard, V., and Needleman, A., "Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar", *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 157-169, (1984).
- [37] Hashemi, S.H., Kimiyabakhsh, M., and Rezaei-Yekta, M., "Experimental and Numerical Determination of Fracture Toughness using Charpy Impact Test Data in Steel Gas Transfer Pipelines with API X65", *19th Annual Conference of Mechanical Engineering of Iran, University of Birjand*, (2011). (in Persian)
- [38] Rezai, M., "Experimental and Numerical (Gurson) Analysis of Tensile Testing on API X65 Pipeline Steel", *MSC Thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand*, (2010) (in Persian).
- [39] A. ASTM, 370, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM International, 100, 19428-12959, (2005).

- [40] Ghasemi-Solookloo, E., "Experimental and Numerical Investigation of Section Thickness Effect on Charpy Fracture Energy in API X65 Steel", MSC Thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand, (2018). (in Persian)
- [41] Hojjati, R., Steinhoff, M., Cooreman, S., Van den Abeele, F., and Verleysen, P., "Effects of High Strain Rates on Ductile Slant Fracture Behavior of Pipeline Steel: Experiments and Modelling", Vol. 3, Operations, Monitoring and Maintenance, Materials and Joining, International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 26-30 September, (2016).
- [42] Landes, J.D., and Begley, J.A., "The Effect of Specimen Geometry on JIC", ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 24-29, (1972).
- [43] Beak, J.H., Kim, Y.P., Kim, C.M., Kim, W.S., and Seok, C.S., "Effect of Pre-strain on the Mechanical Properties of API X65 Pipe", Material and Science and Engineering, pp. 1473-1479, (2015).
- [44] Hashemi, S.H., Rezaei, M., and Soleimani, V., "Local Damage Modeling of Ductile Fracture in API Pipeline Steels of Grade X65 and X70", Proceeding of ISME2011, The University of Birjand, (2011).
- [45] Fathi-Asgarabad, A., "Investigation of Vibration of Drop-weight Test Specimen in Thermomechanical Steel", MSC Thesis of Mechanical Engineering, University of Birjand, (2013). (in Persian)

Abstract

In the present study Charpy impact tests on a steel plate of API X65 (made from a pipe with a diameter of 1219 and a thickness of 14.3 mm) with full size (10 × 10 × 55 mm) with different notch depth (in the range of 1.25 to 3 mm) were conducted and the fracture energy was measured. For this purpose, 24 specimens were made in triple series with 8 different notch depths, and then the failure energy was obtained by Charpy impact tests. Also, computer simulation of the experiment with a three-dimensional model was performed based on Gurson's modified damage law in Abaqus software. The experimental results showed that the relationship between the fracture energy (E) and the depth of the Charpy samples (a) for the tested steel is $E = 499.65e^{-0.3501a}$. Using this relationship, the Charpy energy can be determined for this steel for any notch depth.