

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

جلال الدین صدر\* (دانشجوی دکتری)

سیدحجت هاشمی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

علی‌اکبر مجیدی چیرندهی (استادیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام‌نور

هدف از انجام این تحقیق، تعیین نیروهای تسلیم و بیشینه بارگذاری دینامیکی و ضرایب اصلاح برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی با چقرمگی بالا است. برای این منظور، انرژی شروع و انرژی رشد ترک در فولاد API X65 با استفاده از دستگاه ضربه شاریبی مجهز شده به دست آمد. برای توصیف رفتار دینامیکی فولاد به ازای تغییر ضخامت نمونه شاریبی، روابط توانی با دقت بالا برای تخمین انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و نیروهای مذکور به دست آمد. میانگین ضریب اصلاح برای کاربرد در مدل‌های پیش‌بینی شکست لوله‌های فولادی انتقال انرژی از تحقیق حاضر برابر ۱/۲۶ به دست آمد که با نتایج موجود در پژوهش‌های صورت گرفته پیشین از مطابقت خوبی برخوردار است. با بررسی نیروهای مشخصه و ترسیم نسبت نیروی تسلیم به نیروی بیشینه، مشخص شد که افزایش ضخامت نمونه منجر به کاهش قابلیت کارسختی فولاد آزمایش شده می‌شود.

واژگان کلیدی: انرژی رشد ترک، انرژی شروع ترک، انرژی شکست، فولاد API X65، ماشین شاریبی مجهز شده.

## ۱. مقدمه

تسلیم و بیشینه را تعیین نمایند<sup>[۱]</sup> با این حال، در دو دهه اخیر، استفاده از دستگاه شاریبی مجهز شده قابل توجه نیست. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که موسسات و دانشگاه‌هایی مانند دانشگاه پوهانگ کره جنوبی، دانشگاه آخن آلمان، مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا و ... به منظور برآورد خواص مکانیکی فولادهای استفاده شده در صنعت نفت و گاز به سمت استفاده از دستگاه ضربه شاریبی مجهز شده مانند X65، X70، X80، X100 و X120 حرکت کرده‌اند.

در دهه ۷۰ میلادی، به دلیل نگرانی از شکست خطوط انتقال نفت و گاز مدرن پرفشار، مبحثی با عنوان کنترل گسترش شکست نرم مطرح شد. مگسی در شرکت بیل، مدل دو منحنی<sup>۱</sup> را جهت تعیین چقرمگی مورد نیاز برای توقف شکست نرم فولادهای مذکور در قالب انرژی ضربه شاریبی توسعه داد.<sup>[۱]</sup> این مدل شامل دو منحنی مستقل است که عبارتند از: ۱. منحنی فشارگذاری گاز<sup>۲</sup> که به عنوان منحنی محرک شکست<sup>۳</sup> معروف است و ۲. منحنی مقاومت گسترش ترک دینامیکی<sup>۴</sup> که به عنوان منحنی مقاومت شکست<sup>۵</sup> معرفی می‌شود.

مطالعه رفتار مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی از مسائل مهم در زمینه مهندسی است. از سازه‌هایی که در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند می‌توان به مخازن تحت فشاری که تحت نیروی زلزله قرار دارند و یا هواپیماها، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها که به ترتیب در معرض نیروهای آئوردینامیکی و هیدرودینامیکی (به خصوص ضربه‌های امواج دریا) قرار دارند، اشاره نمود. در همین راستا، جوامع مهندسی برای تعیین استحکام شکست مواد و سازه‌ها، آزمایش‌هایی را برای شبیه‌سازی نیروهای دینامیکی طراحی کردند. آزمون ضربه شاریبی یکی از این آزمایش‌ها است. این آزمون کیفی است و تنها می‌توان چقرمگی و انرژی شکست مواد را از آن به دست آورد. مهندسان طراح برای طراحی سازه‌های تحت بارگذاری استاتیکی به نیروی تسلیم و بیشینه ماده برای مقایسه دو حالت حین کار و بحرانی نیاز دارند. به همین دلیل، دانشمندان متعددی اقدام به مجهز کردن دستگاه شاریبی به نیروسنج نمودند تا بتوانند نیروهای

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۲/۷/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۶.

استاد به این مقاله:

صدر، جلال‌الدین، هاشمی، سیدحجت، و مجیدی چیرندهی، علی‌اکبر، ۱۴۰۳. تعیین ضرایب اصلاح به وسیله آزمایش ضربه شاریبی مجهز شده روی نمونه‌های فولادی ایکس شصت و پنج با ضخامت متفاوت. دانشکده مهندسی مکانیک شریف، ۱۴۰۳(۱)، صص. ۱۱۹-۱۲۷. DOI:10.24200/J40.2023.62502.1686.

همکاران نیز با استفاده از ضربه شاری مجهز شده ۴۵۰ ژول، نمودارهای نیرو - جابه‌جایی را برای عمق شیارهای متفاوت استخراج کرده و به محاسبه انرژی‌های جزء و نیروهای مشخصه پرداختند. در این تحقیق، اثر عمق شیار بر انرژی شکست و ضرایب تصحیح مطالعه شد.<sup>[۱۷]</sup> آنها همچنین در حال انجام تحقیق بر روی اثر عمق شیار و ضخامت نمونه شاری بر چقرمگی شکست ( $K_{Ic}$ ) هستند. علاوه بر این، اثر زاویه شیار و شعاع نوک شیار بر انرژی شکست و چقرمگی شکست و ضرایب اصلاح انجام شده است که در آینده نزدیک به چاپ خواهد رسید.

ونگ و همکاران نیز یک مدل ریاضی برای انرژی ضربه شاری ارائه کرده و کارایی آن را با تعدادی آزمون تجربی تأیید کردند.<sup>[۱۸]</sup> تجزیه و تحلیل نظری و نتایج تجربی نشان داد که رابطه میان ارتفاع باقیمانده شیار<sup>۱</sup> و انرژی ضربه از درجه دو پیروی می‌کند، در حالی که رابطه میان ضخامت نمونه و انرژی ضربه خطی است. مطالعه اثر ابعاد نمونه بر انرژی شکست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در آزمایش ضربه سقوطی برای فولادهای API X۷۰ و API X۸۰ نیز مطالعه شده است.<sup>[۱۹، ۲۰]</sup>

همانگونه که در بالا اشاره شد، تعداد پژوهش‌هایی که از دستگاه ضربه شاری مجهز شده جهت بررسی رفتار مواد در برابر نیروهای دینامیکی استفاده شده است، در مقایسه با پژوهش‌هایی که از دستگاه شاری معمولی استفاده کرده‌اند، بسیار ناچیز است. اهمیت استفاده از این دستگاه زمانی مشخص می‌شود که طراح نیاز به پارامترهای طراحی سازه در برابر نیروهای دینامیکی داشته باشد. چرا که با استفاده از اطلاعات خروجی آن می‌توان ضرایب چقرمگی شکست دینامیکی ( $K_{Ic}$  و  $J_{Ic}$ ) و در نتیجه ارزیابی اثرات دما و نرخ بارگذاری بر ماده مورد نظر را به دست آورد.<sup>[۲۱]</sup> از این رو، در این تحقیق به تعیین پارامترهای مهم شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه برای فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه ضربه شاری مجهز شده پرداخته شده است. علاوه بر این، یک رابطه توانی جهت تخمین انرژی شکست برای ضخامت‌های متفاوت نمونه شاری از فولاد مذکور است. همچنین، تغییرات ضریب اصلاح به ازای تغییر ضخامت محاسبه و گزارش شده است.

## ۲. ماده و روش انجام آزمایش

### ۲.۱. ماده آزمایش

فولادی که در این تحقیق استفاده شده است با نام تجاری API X۶۵ شناخته می‌شود. از این فولاد در لوله‌های انتقال صنعت نفت و گاز ایران بسیار استفاده می‌شود. مشخصات مربوط به این نوع فولادها در موسسه بین‌المللی نفت آمریکا<sup>۱۱</sup> استاندارد شده است.<sup>[۲۲]</sup> استحکام تسلیم و نهایی این فولاد به ترتیب برابر با ۴۹۰ و ۵۵۲ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت ۸۹/۰ را تأمین می‌نماید. درصد ازدیاد طول در ۵۰ میلی‌متر برابر با ۲۱ درصد به‌دست آمد.<sup>[۲۳]</sup> الزامات موسسه بین‌المللی نفت آمریکا حداقل و حداکثر تنش تسلیم را برای این فولاد به ترتیب برابر با ۴۴۸ و ۶۰۰ مگاپاسکال و در مورد تنش نهایی به ترتیب ۵۳۱ و ۷۵۸ مگاپاسکال تعریف می‌کند. مشاهده می‌شود که تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد مورد نظر در محدوده مورد نظر این استاندارد قرار گرفته است. در جدول ۱ علاوه بر ترکیب شیمیایی این فولاد مقادیر مشخص شده آنها در موسسه بین‌المللی نفت آمریکا آورده شده است.

این فولاد با دو ریزساختار فریت - پرلیتی یا فریت سوزنی - باینیتی تولید می‌شود که ساختار دوم به دلیل ترکیب بهتر، استحکام و چقرمگی، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و همچنین جوش‌پذیری عالی نسبت به ساختار اول در خطوط

براساس نتایج این مدل، برای طیف وسیعی از خواص مکانیکی و مقادیر انرژی شکست شاری CVN، چقرمگی توقف شکست<sup>۶</sup> برای نمونه شاری با ضخامت ۲/۳ برابر ضخامت نمونه استاندارد (که ۱۰ میلی‌متر ضخامت دارد)، به‌عنوان تابعی از تنش محیطی و هندسه لوله (شعاع و ضخامت) به صورت زیر کمی‌سازی شد:<sup>[۲]</sup>

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

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

با بهبود استحکام فولاد، چقرمگی شکست نیز افزایش یافت. اما مشخص شد که این مدل و دیگر مدل‌ها برای فولادهایی با چقرمگی بالا (بالتر از ۹۵ ژول) نتایج غیر محافظه‌کارانه‌ای را در مقایسه با انرژی شکست شاری در آزمایشگاه پیش‌بینی می‌کند. به همین علت، محققین متعددی تحقیقات گسترده‌ای برای اصلاح مدل مذکور انجام دادند.<sup>[۲]</sup> هاشمی برای فولاد API X۶۵ نسبت انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک را به‌عنوان ضریب تصحیح معرفی کرد و از آن برای تخمین انرژی شکست شاری فولاد پایه، فلز جوش و فلز ناحیه متأثر از حرارت<sup>۷</sup> استفاده کرد.<sup>[۲۴]</sup> وی، همچنین برای سه فولاد API X۷۰، API X۸۰ و API X۱۰۰ ضرایب تصحیحی را به‌دست آورد.<sup>[۵-۱۰]</sup>

انرژی شکست مواد نرم که به‌هنگام شکست دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند، تنها در سطح مقطع مصرف نمی‌شود (محل تماس چکش با قطعه و اصطکاک نمونه با سندان). ضمن این که مصرف انرژی در سطح مقطع یکسان نیست. بنابراین، انرژی شکست را نمی‌توان به خودی خود به‌عنوان یک خاصیت مکانیکی در نظر گرفت، زیرا تا حدودی به هندسه وابسته است. به همین دلیل، نمی‌توان ظرفیت تحمل ضربه یک سازه یا قطعه‌ای را که اندازه آن مشابه به اندازه استاندارد نیست، پیش‌بینی کرد. از این رو، تحقیقاتی متعددی برای یافتن ارتباط میان انرژی ضربه و ابعاد نمونه انجام شده است.

در مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا، لوکان و همکاران در پژوهشی انرژی شکست، نمودارهای دمای انتقال شکست نرم به ترد و ظاهر شکست برشی<sup>۸</sup> را برای فولادهای X۵۲، X۶۵، X۷۰ و X۱۰۰ گزارش کردند.<sup>[۱۱]</sup> در این پژوهش، آنها روابطی را برای ارتباط انرژی شکست نمونه شاری که دارای اندازه کامل است با نمونه‌های شاری که اندازه‌های آن به ترتیب ۲/۳، ۱/۲ و ۱/۴ برابر نمونه کامل است، ارائه کردند. لوکان در یک گزارش فنی نیروهای ویژه را برای فولادهای نام برده شده و با ابعاد بیان شده ارائه داد.<sup>[۱۲]</sup> همچنین رابطه‌ای برای تخمین استحکام کششی نهایی دینامیکی از نیروی بیشینه اندازه‌گیری شده در آزمون شاری مجهز شده توسط وی ارائه شد.<sup>[۱۳]</sup> لوکان با انجام آزمایش‌های کششی در نرخ‌های کرنش مختلف و آزمایش‌های شاری مجهز شده برای ۱۰ ماده مختلف، مقادیر استحکام تسلیم دینامیکی را که از آزمایش‌های کششی اندازه‌گیری شده و با استفاده از معادله سرور<sup>۹</sup> برآورد شده‌اند، جهت برآورد نرخ کرنش معادل، مقایسه کرد.<sup>[۱۴]</sup>

حسین‌زاده و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی به مطالعه رابطه میان عمق شیار و انرژی شکست فولاد API X۶۵ پرداختند. آنها نتایج خود را با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی به‌دست آمده از دستگاه شاری معمولی ۷۵۰ ژول ژونیک مقایسه کرده و یک رابطه نمایی میان انرژی شکست و عمق شیار نمونه شاری ارائه کردند.<sup>[۱۵]</sup> به‌طور مشابه، شاهسونی و هاشمی اثر شعاع شیار بر انرژی شکست فولاد API X۶۵ را با نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کرده و نتایج را با آزمون‌های تجربی انجام شده توسط دستگاه شاری ۷۵۰ ژول معمولی مقایسه کردند.<sup>[۱۶]</sup> صدر و



شکل ۲. نمای کلی از دستگاه ضربه شاریبی مجهز شده سنتام مدل ۴۵۰ - SIT.



شکل ۳. یک دسته از نمونه‌های شاریبی بعد از شکسته شدن در نیترژن مایع (اعداد ضخامت‌های نمونه شاریبی هستند).

برابر با ۳۲/۱ کیلوگرم می‌باشد. زاویه‌ای که چکش از آن رها می‌شود برابر با ۱۵۰/۱ درجه می‌باشد. سرعت در لحظه برخورد برابر با ۵/۲۶ متر بر ثانیه است. شعاع نوک چکش مطابق با استاندارد ASTM E۲۳<sup>[۲۷]</sup> برابر با ۸ میلی‌متر است.

### ۳. نتایج تجربی

#### ۱.۳. طرح آزمایش

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

جدول ۱. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

عنصر	درصد وزنی	API ۵L X۶۵
آهن (Fe)	پایه	-
کربن معادل (CE)	۰/۳۴	حداکثر ۰/۴۳
کربن (C)	۰/۰۷۲	حداکثر ۰/۲۲
منگنز (Mn)	۱/۴۵	حداکثر ۱/۴۵
فسفر (P)	۰/۰۰۸	حداکثر ۰/۰۲۵
سولفور (S)	۰/۰۰۲	حداکثر ۰/۰۰۶
تیتانیوم (Ti)	۰/۱۵	-
سیلیکون (Si)	۰/۲۰۱	-
نیوبیوم (Nb)	۰/۴۷	-
کرم (Cr)	۰/۱۷۴	-
مولیبدن (Mo)	۰/۲۴	-
وانادیوم (V)	۰/۰۵	-
نیکل (Ni)	۰/۰۰۹	-
مس (Cu)	۰/۰۰۸	-
آلومینیوم (Al)	۰/۲۳	-

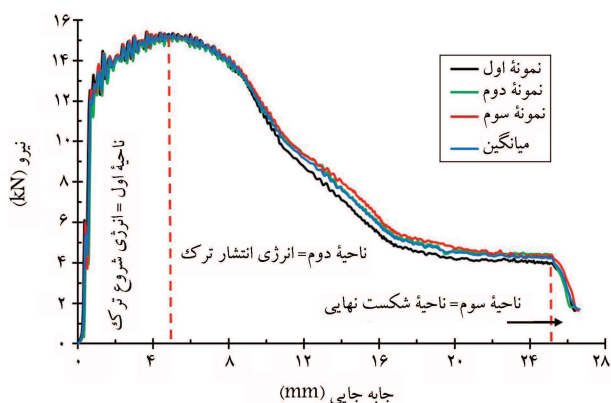


شکل ۱. ریزساختار فلز پایه فولاد API X65.<sup>[۲۵]</sup>

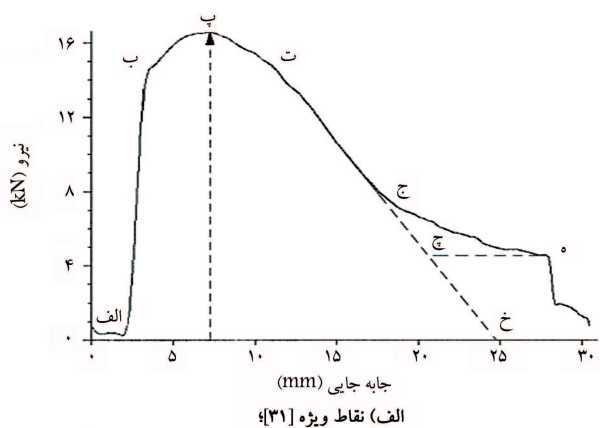
انتقال نفت و گاز ارجحیت دارد. ترکیب ویژگی‌های مذکور اجازه می‌دهد این نوع فولاد در ساخت لوله‌های با قطر زیاد برای انتقال نفت و گاز در مناطق سردسیر کاربرد داشته باشد. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، ریزساختار فلز پایه در این فولاد بسیار ریزدانه است (میانگین اندازه دانه حدود ۳ الی ۷ میکرون).<sup>[۲۴]</sup> فریت سوزنی، ساختاری بسیار مناسب جهت افزایش چقرمگی ناحیه جوش می‌باشد. به دلیل ماهیت درهم قفل شونده<sup>۱۲</sup> ساختار فریت سوزنی به همراه دانه‌بندی ریز آن، مقاومت در برابر رشد ترک تورقی<sup>۱۳</sup> افزایش می‌یابد. هاشمی و همکاران میکروساختار فلز پایه،<sup>۱۴</sup> فلز جوش<sup>۱۵</sup> و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)<sup>۱۶</sup> این فولاد را مطالعه کردند.<sup>[۲۵، ۲۶]</sup>

#### ۲.۲. دستگاه شاریبی مجهز شده

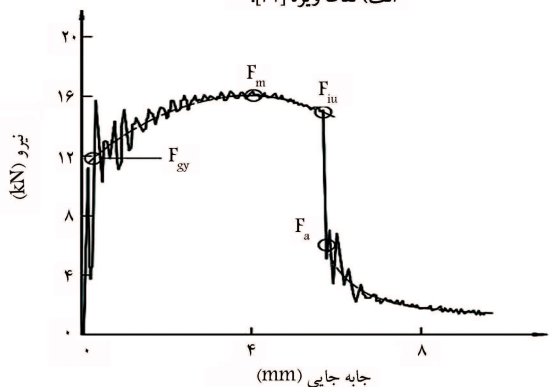
برای انجام آزمایش از دستگاه شارپ SIT ۴۵۰ سنتام استفاده شده است (شکل ۲). مزیت این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های این شرکت توانایی ثبت و گزارش داده‌های نیرو بر حسب جابه‌جایی است. علاوه بر این، به دلیل داشتن بدنه‌ای که به صورت یکپارچه ریخته‌گری شده است، صلابت و دقت دستگاه به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. این دستگاه مجهز به چکش C شکل است و وزن آن



شکل ۴. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های استاندارد شاریپی.



الف) نقاط ویژه [۳۱]



ب) نیروهای ویژه [۳۰]

شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی.

با گوشه‌های چکش با شعاع ۸ میلی‌متر (استاندارد ASTM E۲۳) است. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که این پرش در نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل از دستگاه ضربه شاریپی که شعاع چکش آن مطابق با استاندارد ۲ - ISO ۱۴۸ [۳۳]، ۲ میلی‌متر است، دیده نمی‌شود. [۳۴-۳۷] نوک این چکش به صورت یک منحنی ساده و بدون گوشه است. نمونه شاریپی در این قسمت از نمودار همچنان بر روی چکش قرار دارد اما در حال پرتاب شدن به بیرون از دستگاه شاریپی می‌باشد. به عبارت دیگر، چکش نمونه را خم کرده و از حد فاصل میان دو تکیه‌گاه (سندان) گذرانده است. در قسمتی از نمودار که سه منحنی از یکدیگر جدا می‌شوند (در جابه‌جایی حدود ۹ میلی‌متر)، دلیل آن می‌تواند عدم بروز رفتار یکسان نمونه‌ها نسبت به یکدیگر در برابر نیرو به هنگامی که ماده وارد حالت پلاستیک شده است، باشد. به همین

قسمتی از نمودار نیرو - جابه‌جایی که در آن رفتار میان نیرو و جابه‌جایی متناسب است (بعد از قله دوم نوسانات) به عنوان نیروی تسلیم تعریف می‌شود. نیروی بیشینه نیز بیشترین نیرو حاصل شده از ضربه در منحنی نیرو - جابه‌جایی است.

نکته قابل توجه این است که با کم شدن ضخامت نمونه شاریپی عملاً چکش در محل مرکز ضربه ۱۷ به نمونه شاریپی ضربه وارد نمی‌کند. بنابراین، هر چقدر ضخامت نمونه شاریپی کاهش یابد، خطای دستگاه شاریپی در گزارش انرژی شکست افزایش می‌یابد. محل مرکز ضربه ۵ میلی‌متر بالاتر از سطحی است که نمونه استاندارد شاریپی بر روی آن قرار داده می‌شود تا از طرف چکش به آن ضربه وارد شود. به همین دلیل، برای این که بتوان نمونه‌های شاریپی با ضخامت ۴ الی ۹ میلی‌متر را به گونه‌ای بر روی سندان قرار داد که مرکز ارتفاع نمونه دقیقاً منطبق با مرکز ضربه قرار گیرد، نمونه‌هایی با شکلی کاملاً مشابه با نمونه شاریپی اما از جنس اسید پلی‌لاکتیک یا پلی‌لاکتاید ۱۸ استفاده از پرینتر سه‌بعدی ساخته شد و در زمان آزمایش در زیر نمونه‌ها به عنوان زیرکاری قرار داده شد. ضخامت‌های ۵/۰ الی ۳ میلی‌متر با گام ۵/۰ به ترتیب برای ضخامت‌های ۹ الی ۴ میلی‌متر ساخته شد. اما از آنجایی که این نمونه‌ها می‌توانند موجب افزایش انرژی شکست شوند، شیاری با عمق ۹/۷ میلی‌متر و با شعاع صفر در آن‌ها ایجاد شد تا مقاومت آنها به کمترین حد امکان برسد.

### ۲.۳. تفسیر نمودار شاریپی

نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه استاندارد شاریپی فولاد API X۶۵ با استفاده از دستگاه شاریپی مجهز شده ۴۵۰ ژول برای اولین بار به همراه مقدار میانگین آن در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. مطابق با استاندارد ۲۰۰۰ : BS EN ISO ۱۴۵۵۶، نمودار به دست آمده از نوع  $F$  می‌باشد. [۳۰] این نمودار دارای نقاط ویژه‌ای است. برای تفسیر نمودار شکل ۴ و نحو تعیین مقادیر مذکور، شکل ۵ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۵ قسمت الف چنانچه رفتار ماده بسیار ترد باشد، نقطه ت بر منطبق می‌شود. در مواد با تردی کمتر، نمودار در نقطه ت دچار یک افت ناگهانی مشابه شکل ۵ قسمت ب می‌شود و نیرو به صورت جابه‌جایی - ثابت و به صورت عمودی تا نقطه ج که به نیروی توقف ترک ۱۹ معروف است، افت یا سقوط ناگهانی می‌کند.

اما همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، این قسمت از نمودار نه دارای شیب ثابت و نه دارای افت ناگهانی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت فولادی که دارای چنین نموداری است (شکل ۴)، از چقرمگی بالا و دمای انتقال شکست نرم به ترد بسیار پایین برخوردار است. این موارد هر دو از ویژگی‌های بارز فولاد API X۶۵ است. نکته دیگری که از نوع نمودار می‌توان به آن رسید این است که عدم وجود شیب مذکور بیان‌کننده آن است که فولاد در برابر رشد ترک ناپایدار بسیار مقاوم است. هرچند که در برخی از پژوهش‌های صورت‌گرفته اذعان شده است که نمونه شاریپی برای ایجاد یک حالت شکست پایدار بسیار کوچک است. [۳۲] همچنین، با این نوع نمودار می‌توان گفت که نمونه دچار شکست نرم شده است. باید این نکته را به خاطر سپرد که شکست ترد به دما و اندازه دانه در نمونه شاریپی وابسته است. بنابراین، دستگاه شاریپی مجهز شده این امکان را به محقق می‌دهد تا با استخراج نمودار نیرو - جابه‌جایی مقاومت ماده را در برابر رشد ترک ناپایدار در برابر نیروهای ضربه‌ای برآورد کند.

همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، در انتهای منحنی نیرو - جابه‌جایی یک پرش ایجاد شده است. دلیل این پرش احتمالاً به دلیل اثر برهم‌کنش نمونه شاریپی

جدول ۲. مقادیر نیروهای ویژه و مولفه‌ها و نسبت‌های انرژی.

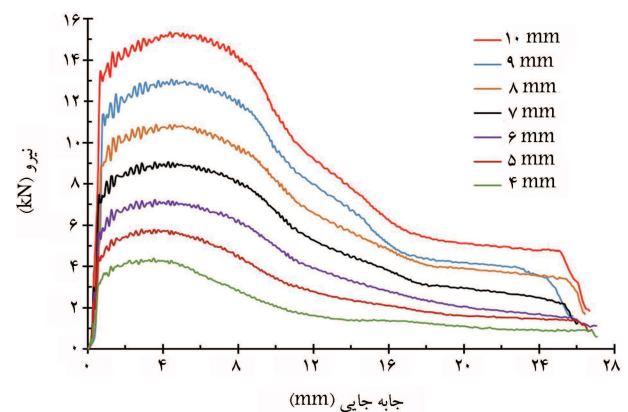
شماره گروه نمونه‌ها	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	نیروی تسلیم $F_{gy}$ (کیلو نیوتن)	نیروی بیشینه $F_{max}$ (کیلو نیوتن)	تنش تسلیم (MPa)	$F_y/F_{max}$	انرژی (ژول)				
						انرژی کلی شکست	انرژی کلی از صفحه مدرج	انرژی کلی شکست از مدار کرنش‌سنج $E_{sg}$	درصد اختلاف نسبت به صفحه مدرج دستگاه	
۱	۴	۳/۱۳	۴/۳۹	۳۴۲	۰/۷۱	۶۲	۵۹	۵	۱۲	
۲	۵	۴/۱۳	۵/۷۲	۳۶۱	۰/۷۲	۹۱	۸۳	۹	۱۶	
۳	۶	۵/۴۵	۷/۱۴	۳۹۶	۰/۷۶	۱۲۶	۱۱۸	۶	۲۴	
۴	۷	۶/۹۲	۸/۹۵	۴۳۱	۰/۷۷	۱۶۳	۱۵۱	۷	۳۱	
۵	۸	۸/۷۹	۱۰/۷۵	۴۷۹	۰/۸۲	۱۸۱	۱۸۳	-۱	۳۷	
۶	۹	۱۰/۷۳	۱۲/۹۶	۵۲۱	۰/۸۳	۲۲۰	۲۲۲	۱	۴۷	
۷	۱۰	۱۲/۸۰	۱۵/۱۲۲	۵۵۹	۰/۸۴	۲۵۵	۲۶۰	-۲	۶۴	
میانگین										

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

بیشترین مقدار انرژی که از صفحه مدرج خوانده شد برابر با ۲۵۵ ژول برای نمونه با ضخامت کامل (۱۰ میلی‌متر) و کمترین آن برابر با ۶۲ ژول برای ضخامت ۴ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار نیروی تسلیم به ترتیب برابر با ۳ و ۱۳ کیلو نیوتن حاصل شد. مقادیر متناظر برای نیروی بیشینه نیز به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵ کیلو نیوتن به دست آمد. برای محاسبه تنش تسلیم نیاز به ضریب قید  $C_{gy}$  است که به نوع چکش (۲ یا ۸ میلی‌متری) و شعاع نوک شیار نمونه شارپی بستگی دارد. [۱۳] از آنجا که در این تحقیق نمونه‌های با شیار  $V$  شکل توسط دستگاه شارپی مجهز شده با چکش ۸ میلی‌متر (مطابق با استاندارد ASTM E۲۳) آزمایش شده‌اند، ضریب مذکور برابر با  $۱/۳۳۶$  می‌باشد. [۱۳] رابطه محاسبه تنش تسلیم در مرجع مذکور به صورت زیر است و نتایج آن برای این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

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

در رابطه ۲،  $W$  عرض نمونه شارپی،  $a$  عمق شیار،  $B$  ضخامت نمونه شارپی،  $F_{gy}$  نیروی تسلیم و  $C_{gy}$  ضریب قید است. به لحاظ ریاضی، در رابطه ۲ تمامی متغیرها به غیر از  $F_{gy}$  و  $B$  ثابت هستند. بنابراین، این دو متغیر تعیین‌کننده تنش تسلیم خواهد بود. همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است، با افزایش ضخامت، تنش تسلیم افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد اثر نیروی تسلیم که در صورت کسر قرار دارد، به مراتب بیشتر از اثر ضخامت است که در مخرج کسر قرار گرفته است. این امر به دلیل ماهیت دینامیکی بارگذاری است. در انتها، می‌توان به این موضوع اذعان داشت که تغییر تنش تسلیم با تغییر ضخامت به صورت خطی است. در جدول ۲ نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کلی شکست و نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کلی شکست محاسبه شده‌اند. در ستون آخر جدول ۲ نیز نسبت



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

دلیل است که معیارهای آسیب متفاوت و با دقت‌های متفاوت برای توصیف رفتار مواد زمانی که وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند، ارائه شده است. از جمله این معیارها که بسیار پرکاربرد است می‌توان به معیار گرسون - تیورگارد - نیدلمن  $2^\circ$  اشاره کرد. شاهشونی، محیط‌زاده و هاشمی با استفاده از این معیار به شبیه‌سازی آزمایش ضربه شارپی پرداختند و ضرایب مدل مذکور را استخراج نمودند. [۳۸، ۱۶] شایان ذکر است که در دو مرجع مذکور از دو دستگاه شارپی متفاوت استفاده شد.

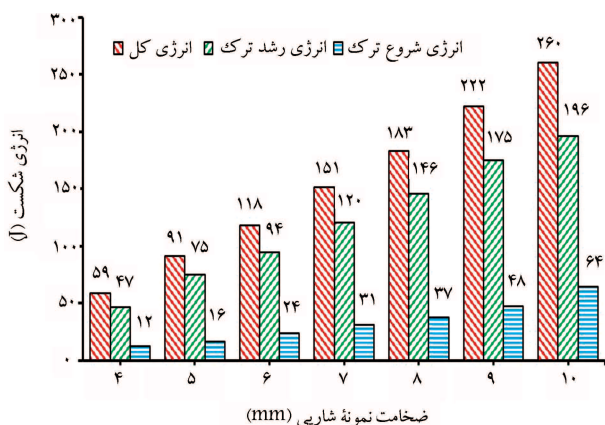
جهت اطمینان از دقت اطلاعات به دست آمده از کرنش‌سنج باید به منطبق بودن قسمت الاستیک ماده برای هر سه نمونه استناد نمود. در شکل ۴ دیده می‌شود که هر سه نمودار از سه نمونه استاندارد شارپی در قسمت مذکور از انطباق بسیار خوبی برخوردار هستند. علاوه بر این، در قسمت تغییر شکل پلاستیک و قسمت نرم‌شوندگی بعد از آن (حدفاصل نقاط پ تا ت) بر یکدیگر منطبق هستند.

در شکل ۶ مقادیر میانگین نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای ۷ ضخامت مختلف برای مقایسه آورده شده است. مطابق با این شکل، با کاهش ضخامت نمونه شارپی اندازه نمودار نیرو - جابه‌جایی نیز کوچک می‌شود. متعاقب با آن نیز انرژی مورد نیاز برای شکست نمونه و البته نیروهای ویژه کاهش می‌یابد.

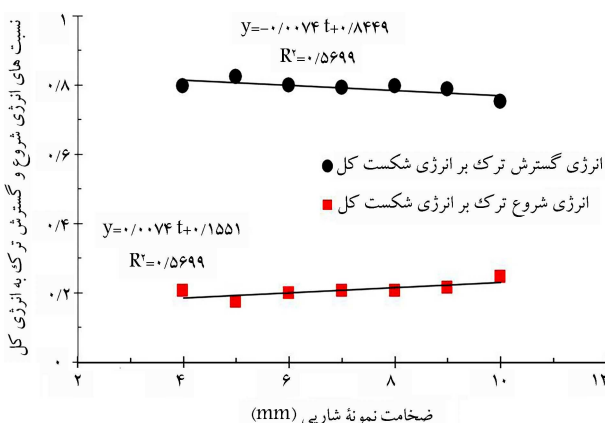
انرژی کل حاصل از اطلاعات کرنش‌سنج است.  $t$  ضخامت،  $E_i$  انرژی شروع ترک و  $E_p$  انرژی رشد ترک است. برای مقایسه بهتر تغییرات انرژی‌های بیان شده نسبت به تغییرات ضخامت، یک نمودار ستونی در شکل ۸ آورده شده است.

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

این موضوع، همانطور که قبلاً برای ضرایب اصلاح نیز بیان شد، نظریه وابسته بودن انرژی و ضرایب اصلاح به انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای و اندازه ناحیه پلاستیک را تقویت می‌کند، ثابت می‌کند. از این نمودار چنین استنباط می‌شود که در ضخامت‌های کمتر از ۴ میلی‌متر، تمامی انرژی صرف رشد ترک می‌شود. علت این امر این است که با نازک‌تر شدن نمونه ماده کمتری در برابر نوک ترک جذب انرژی تغییر شکل پلاستیک موجود است. به همین دلیل،



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



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

انرژی شکست کل به انرژی رشد ترک که به‌عنوان ضریب اصلاح معرفی می‌شود، برای تمامی ضخامت‌ها آورده شده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، از این مقادیر برای پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی با چقرمگی بالا که با دستگاه ضربه شاری مرسوم آزمایش می‌شوند، استفاده می‌شود.

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

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

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

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

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

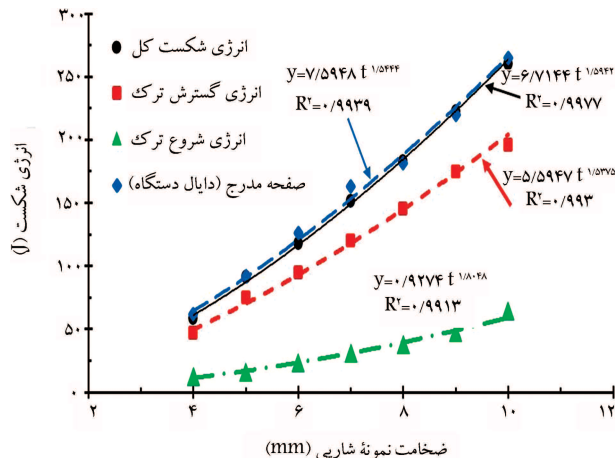
$$E_D = 7/5948 t^{1/5222} \quad (3)$$

$$E_{SG} = 6/7114 t^{1/592} \quad (4)$$

$$E_i = 5/9274 t^{1/5222} \quad (5)$$

$$E_P = 5/9247 t^{1/5272} \quad (6)$$

در روابط بالا،  $E_D$  و  $E_{SG}$  به ترتیب انرژی کل صفحه مدرج دستگاه شاری و



شکل ۷. تغییرات انرژی در برابر تغییرات ضخامت.

انرژی کل شکست فولاد API X65 به‌طور مستقیم و تجربی از دستگاه شارپی مجهز شده و تعیین ضرایب اصلاح جهت پیش‌بینی شروع شکست از اهداف این تحقیق بود.

نتایج این پژوهش را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان نمود:

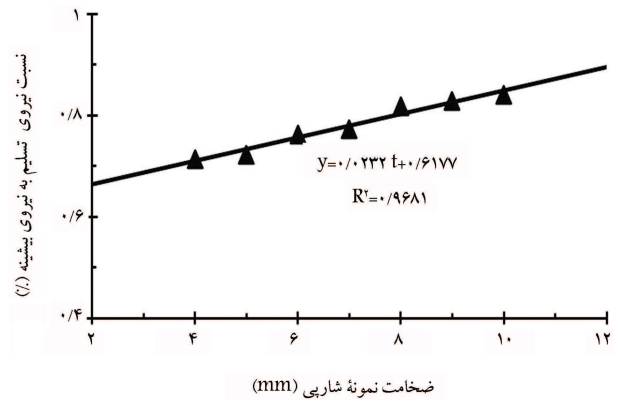
- با استفاده از نتایج آزمایش شارپی مجهز شده نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای ضخامت‌های متفاوت و محاسبه نیروهای ویژه و انرژی‌های مذکور مطابق جدول ۲ محاسبه شد؛
- به‌دلیل ماهیت دینامیکی بارگذاری، اثر افزایش نیروی تسلیم بر تنش تسلیم به مراتب بیشتر از اثر افزایش ضخامت است؛
- روابط توانی برای تخمین انرژی‌های شکست و نیروهای ویژه به ازای تغییر ضخامت نمونه شارپی با دقت بالا ارائه شد؛
- با بررسی ضرایب اصلاح مشخص شد که این ضرایب به حالت بارگذاری (تنش صفحه‌ای یا کرنش صفحه‌ای) و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته‌اند؛
- انرژی شکست به حالت بارگذاری و اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک وابسته است؛
- کاهش ضخامت، سهم انرژی رشد ترک نسبت به شروع ترک را بیشتر می‌کند؛
- طرفیت دستگاه ضربه شارپی برای نمونه‌هایی با انرژی کمتر از ۲۵ ژول تأثیری بر جذب انرژی فولاد آزمایش شده ندارد؛
- برای ضخامت‌های ۴ تا ۹ میلی‌متر، انرژی شروع ترک مقدار ۲۰ درصد از کل انرژی را دربر می‌گیرد، اما با افزایش ضخامت به ۱۰ میلی‌متر، به دلیل انتقال حالت بارگذاری از تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای این مقدار به ۲۵ درصد افزایش یافت؛
- از کاربردهای مهندسی روابط به دست آمده می‌توان به تعیین انرژی شکست ورق‌هایی که ضخامت آنها کمتر از ابعاد نمونه استاندارد شارپی است (۱۰ میلی‌متر) اشاره کرد. بنابراین، دیگر نیازی به صرف هزینه برای ساخت نمونه و آزمایش ضربه شارپی نمی‌باشد.

## فهرست علائم

- $J$ : انرژی شکست نمونه شارپی با ضخامت ۲/۳ ضخامت نمونه استاندارد  $C_V(2/3)$ ؛  
 $R$ : شعاع لوله  $mm$ ؛  
 $t$ : ضخامت لوله  $mm$ ؛  
 $\sigma_h$ : تنش محیطی  $MPa$ ؛  
 $F_{gy}$ : نیروی تسلیم  $kN$ ؛  
 $F_{max}$ : نیروی بیشینه  $kN$ ؛  
 $E_D$ : انرژی شکست صفحه مدرج  $J$ ؛  
 $E_{SG}$ : انرژی شکست کرنش سنج  $J$ ؛  
 $E_i$ : انرژی شروع ترک  $J$ ؛  
 $E_p$ : انرژی گسترش ترک  $J$ .

## تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و تجهیزات سدید بابت در اختیار قرار دادن فولاد API X65 و از دانشگاه پیام نور کرمان جهت فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌نماید.



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

نیازی کمتری به انرژی برای شروع ترک نیاز است. در نقطه مقابل، اگر ضخامت زیاد شود، این انرژی شروع ترک است که سهم بیشتری را برای شروع درخواست می‌کند.

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

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

$$F_y = 0.3447 t^{1/558} \quad (7)$$

$$F_{max} = 0.6432 t^{1/2617} \quad (8)$$

نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که معمولاً در پژوهش‌های تجربی منابع و درصد خطا بیان می‌شود. محیط‌زاده و هاشمی در پژوهشی علاوه بر مطالعه اثر تغییرات تکانه بر انرژی شکست شارپی به بررسی میزان خطای روابط ارائه شده (انرژی شکست در برابر انرژی برخورد و سرعت برخورد) در آزمون ضربه شارپی پرداخته‌اند.<sup>[۳۸]</sup> حداکثر میزان خطا بسیار کم و حدود ۴/۲ درصد گزارش شد. همچنین، برین به بررسی منابع خطا و تحلیل آماری انرژی ضربه شارپی ۲۰ لوله فولادی API X65 با هندسه و ترکیب شیمیایی یکسان برای سه منطقه فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت پرداخت.<sup>[۳۹]</sup> تحلیل ۶۰ داده از فلز پایه نشان داد توزیع هیستوگرامی انرژی شکست نرمال است و توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک بود. بیشترین انحراف معیار ۲۰ ژول گزارش شد.

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

## ۴. نتیجه‌گیری

تعیین نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه، انرژی شروع و رشد ترک و

## پانوشتها

1. Battelle Two-curve Model
2. Gas-Decompression
3. Fracture-Driving Curve
4. Dynamic Crack-Propagation Resistance
5. Fracture Resistance Curve
6. Arrest Fracture Toughness
7. Heat Affected Zone
8. Shear Fracture Appearance
9. Server's Equation
10. Ligament
11. American Petroleum Institute
12. Interlocking Nature
13. Cleavage Crack
14. Base Material
15. Weld Metal
16. Heat Affected Zone
17. Center of Percussion
18. Polylactic Acid or Polylactide, PLA
19. Crack Arrest Force
20. Gurson-Tvergaard-Needleman
21. Constrain Factor

## (References) منابع

1. Manahan, M.P. and Siewert, T.A., 2006. The history of instrumented impact testing, *Journal of ASTM International*, 31(2), <https://doi.org/10.1520/JAI12867>.
2. Maxey, W.A., 1974. Fracture initiation, propagation, and arrest. 5th Symposium on Line Pipe Research, Houston, USA.
3. Zhu, X.-K. and Leis, B.N., 2013. Ductile fracture arrest methods for gas transmission pipelines using Charpy impact energy of DWTT energy. *Journal of Pipeline Engineering*, pp.259-272.
4. Hashemi, S.H., 2009. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, pp.533-540. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.01.011>.
5. Hashemi, S.H., 2008. Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85, pp. 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2008.04.011>.
6. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R. and Andrews, R.M., 2004. The transferability of micro-mechanical damage parameter in modern line pipe steel. *European Conf. on Fracture*, Stockholm, Sweden.
7. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R. and Andrews, R.M., 2005. Measurement and analysis of impact test data for X100 pipeline steel. *Applied Mechanics and Materials*, 3-4, pp.369-376. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.3-4.369>.
8. Hashemi, S.H., Howard, I.C., Yates, J.R., Andrews, R.M. and Edwards, A.M., 2006. Estimation of slant tearing energy for high-grade pipeline steel from instrumented Charpy test data and its transferability to large structures. *6th Int. Pipeline Conf*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2006-10069>.
9. Hashemi, S.H. and Jalali, M.R., 2006. Experimental study of Charpy impact characteristics of high strength spiral welded gas pipeline. *Int Pipeline Conf*, Calgary, Alberta, Canada, <https://doi.org/10.1115/IPC2006-10068>.
10. Hashemi, S.H. and Jalali, M.R., 2008. Evaluation of fracture initiation energy in API X65 pipeline steel. *7th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2008-64149>.
11. Lucon, E., McCowan, C.N. and Santoyo, R.L., 2016. Overview of NIST activities on sub-size and miniaturized charpy specimen: Correlation with full-size specimens and verification specimens for small-scale pendulum machines. *Journal of Pressure Vessel Technology*. <https://doi.org/10.1115/1.4032474>.
12. Lucon, E., McCowan, C.N. and Santoyo, R.L., 2015. Impact characterization line pipe steels by means of standard sub-size and miniaturized Charpy specimens. *National Institute of Standards and Technology*. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1865>.
13. Lucon, E., 2016. Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data. *Materials and Design*, 97, pp. 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.116>.
14. Lucon, E., 2016. Experimental assessment of equivalent strain for an instrumented Charpy test. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 121, pp.165-179. <https://doi.org/10.6028/jres.121.007>.
15. Hosseinzadeha, A., Hashemi, S.H., Rastegari, H. and Maraki, M.R., 2022. Investigation of the notch depth effect on Charpy fracture energy and fracture surface features of API X65 steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 35, <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2066241>.
16. Shahsavani, A.R. and Hashemi, S.H., 2020. Experimental and numerical investigation of initial notch radius effect on Charpy fracture energy in API X65 steel. *Amirkabir Journal of Mechanical engineering*, 52(5), pp.1139-1152. [In Persian]. <https://doi.org/10.22060/MEJ.2018.14130.5804>.
17. Sadr, J., Hashemi, S.H. and MajidiJirandehi, A.A., 2023. Determination of energy-notch depth relationship using force-displacement diagrams in instrumented Charpy impact testing of API X65 steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 12(6), pp.149-162. [In Persian]. <https://doi.org/10.22044/JFSFM.2023.12084.3624>.
18. Wang, W., Wang, P., Liu, X., Dong, Z. and Fang, H., 2021. Mathematical model for Charpy impact energy of V-notch specimen. *Advances in Materials Science and Engineering*, ID 5330068. <https://doi.org/10.1155/2021/5330068>.
19. Hong, S., Shin, S.Y., Lee, S. and Kim, N.J., 2011. Effects of specimen thickness and notch shape on fracture modes in the drop weight tear test of API X70 and X80 linepipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(9), pp.2619-2632. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0697-9>.



20. Shin, S.Y., Hwang, B., Lee, S. and Kang, K.B., 2007. Effects of notch shape and specimen thickness on drop-weight tear test properties of API X70 and X80 line-pipe steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(3), pp.537-551. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-9073-6>.
21. Pereira, L.C., Garcia de Blas, J.C., Griza, S. and Darwish, F.A.I., 2021. Use of instrumented Charpy testing on the fracture toughness characterization of metallic materials. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 18, pp.1-11. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212469>.
22. API Specification 5L. 2013. Specification for line pipe.
23. Hashemi, S.H., 2011. Strength hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*, 528, pp. 1648-1655. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.089>.
24. Hashemi S.H., and Mohammadyani, D. 2012. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, pp.8-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.05.011>.
25. Majidi-Jirandehi, A.A., Hashemi, S.H., Ebrahimi-Nejad, S. and Kheybari, M., 2021. Impact of crack propagation path and inclusion elements on fracture toughness and micro-surface characteristics of welded pipes in DWTT. *Material Research Express*, 8, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac2ae0>.
26. Tazimi, M., Hashemi, S.H. and Rahnema, S., 2020. Experimental study of fracture surface characteristics of inhomogeneously drop weight tear test specimen made from API X65 steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 10(1), pp.77-91. [In Persian]. <https://doi.org/10.22044/JFSM.2020.9029.3053>.
27. ASTM E23-16b, 2016. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.
28. ASTM A370-16, 2016. Standard test method and definitions for mechanical testing of steel products.
29. ASTM E2298-13a, 2013. Standard test method for instrumented impact testing of metallic materials.
30. BS EN ISO 14556, 2002. Steel-Charpy V-notch pendulum impact test-Instrumented test method.
31. Vodopivec, F., Arzensek, D., Vojvodi-Tuma, J. and Celin, R., 2008. The Charpy fracture process in ductile range. *Metalurgija*, 47, pp.173-179. <https://hrcaak.srce.hr/22656>.
32. Vodopivec, F., Arzensek, B., Kmeti, D. and Vojvodi-Tuma, J., 2003. On the Charpy fracture process. *Materiali In Tehnologije*, 37(6), p.317. UDK 669.14.018.298:539.42.
33. ISO 148-2., 2009. Metallic materials-Charpy pendulum impact test-Part 2: Verification of testing machines.
34. Panin, S.V., Maruschak, P.O., Vlasov, I.V. and Ovechkin, B.B., 2016. Impact toughness of 12Cr1MoV steel Part1-Influence of temperature on energy and deformation parameters of fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83, pp.105-113. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.12.008>.
35. Panin, S.V., Maruschak, P.O. Vlasov, I.V., Sergeev, V.P., Ovechkin, B.B. and Neifeld, V.V., 2016. Impact toughness of 12Cr1MoV steel. Part 2-Influence of high intensity ion beam irradiation on energy and deformation parameters and deformation parameters and mechanisms of fracture. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 83, pp.82-92. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.12.009>.
36. Panin, S.V., Vassel, A., Maruschak, P.O., Moiseenko, D.D., Berto, F. and Vinogradov, A., 2017. Influence of stress concentrator shape and testing temperature on impact bending fracture of 17Mn1Si pipe steel. *Presented at the AIP Conf. Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5017392>.
37. Hojjati, R., Steinhoff, M., Cooreman, S., Van den Abeele, F. and Verleysen, P., 2016. Effect of high strain rate on ductile slant fracture behaviour of pipeline steel-experiments and modeling. *In 11th Int. Pipeline Conf.*, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64332>.
38. Mohitzadeh, S.S. and Hashemi, S.H., 2020. Experimental and numerical evaluation of momentum variation effect of striker on fracture energy in Charpy impact testing of API X65 steel. *Modares Mechanical Engineering*, 20(9), pp.2275-2287. [In Persian]. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-38867-en.html>.
39. Barin, M.R., 2016. Identification of scatter factors and statistical analysis of Charpy fracture energy variations in API X65 steel. MSc. Thesis, Mechanical engineering, University of Birjand. [In Persian].