



تعیین رابطه انرژی-عمق شیار در فولاد API X65 با استفاده از نمودارهای نیرو-جابجایی در آزمایش ضربه شاریبی

جلال الدین صدر^۱، سیدحجت هاشمی^{۲*} و علی اکبر مجیدی جیرندهی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند

^۲ استاد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند

^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱

چکیده

در این مقاله رفتار دینامیکی فولاد API X65 تحت بارگذاری ضربه‌ای با استفاده از دستگاه ضربه شاریبی مجهز شده به مدار نیروسنج با ظرفیت ۴۵۰ ژول بررسی گردید. از این دستگاه به دو طریق می‌توان انرژی شکست را به دست آورد. در روش اول اختلاف انرژی پتانسیل قبل و بعد از برخورد چکش به نمونه توسط صفحه دیجیتالی دستگاه گزارش می‌شود. در روش دوم از خروجی کرنش‌سنج‌های نصب شده روی چکش، نمودار نیرو-جابجایی به دست می‌آید و مساحت زیر آن به عنوان انرژی شکست فولاد آزمایش شده گزارش می‌شود. با استفاده از دستگاه مجهز شده، انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و انرژی کلی شکست برای هشت گروه نمونه از فولاد آزمایش شده بر حسب عمق متفاوت شیار اولیه به صورت نمائی محاسبه و گزارش شد. همچنین نیروهای ویژه مورد نیاز برای طراحی سازه‌های تحت بارگذاری دینامیکی استخراج و ارائه گردید. نوآوری مهم تحقیق حاضر حصول هشت ضریب تصحیح جدید به ازای عمق شیارهای متفاوت نمونه است. ضرایب تصحیح محاسبه شده جدید و میانگین آنها با ضریب تصحیح گزارش شده در تحقیقات قبلی برای مدل‌های مرسوم پیش بینی شکست لوله‌های انتقال انرژی فولادی مقایسه شده است که تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: انرژی شکست؛ انرژی شروع ترک؛ انرژی رشد ترک؛ دستگاه ضربه مجهز شده شاریبی؛ فولاد API X65

Determination of energy-notch depth relationship using force-displacement diagrams in instrumented Charpy impact testing of API X65 steel

Jalaleddin sadr¹, Sayyed Hojjat Hashemi^{2,*}, Ali Akbar Majidi- Jirandehi³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birajnd, Iran

² Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birajnd, Iran

³ Assist. Prof., Mech. Eng., Payame Noor Univ., Tehran, Iran

Abstract

In this paper, dynamic behavior of API X65 steel under impact loading was studied using an instrumented Charpy machine of 450J capacity. The fracture energy can be measured using this testing machine in two different ways. In the first method, the difference in potential energy before and after impact test is reported via machine dial. In the second method, the output voltage from load-cell (mounted on the machine tup) gives load-displacement data from which energy is calculated via curve integration. Using instrumented data, the initiation energy, propagation energy and total fracture energy for eight series of specimens made from tested steel were measured and found to have exponential behavior versus initial notch depth. Furthermore, the characteristic forces used for the design of dynamically loaded structures (namely general yielding, F_{gy} , and maximum force, F_m) were determined from the force-displacement diagram. The important innovation of this research is presentation of eight new correction factors for different notch depth of specimens. These new correction factors and their mean value were compared with a similar data from a previous research work for conventional fracture models of energy transportation steel pipelines which showed good agreement.

Keywords: Fracture energy; Crack initiation energy; Crack propagation energy; Instrumented Charpy impact machine; API X65 steel.

۱- مقدمه

در صنعت برای انتقال نفت و گاز از لوله‌هایی استفاده می‌شود که علاوه بر مقاومت به خوردگی بالا (به دلیل مدفون بودن)، باید از استحکام کافی همراه با چقرمگی بالا برخوردار باشند. به همین دلیل دسته فولادهایی که در این حوزه کاربرد دارند، توسط موسسه بین‌المللی نفت آمریکا طبقه‌بندی شده و خواص مکانیکی و شیمیایی آن‌ها به صورت استاندارد ارائه شده است [۱]. به عنوان مثال، می‌توان به تعدادی از آن‌ها شامل X120، X100، X90، X80، X70، X65، X60 اشاره نمود. به طور طبیعی برای جلوگیری از هزینه‌های زیاد در تولید ورق‌های فولادی و همچنین کاهش وزن، محققان تلاش می‌کنند که به طور هم‌زمان استحکام و چقرمگی فولاد را تا سطح مناسبی بالا ببرند که این امر منجر به تولید ورق با ضخامت‌های کمتر در صنعت می‌شود. علیرغم کیفیت و خواص بهتر فولادهای با درجه بالاتر در بین فولادهای بالا، در ایران از فولاد API X65 به مقدار زیاد استفاده می‌شود که محققان بومی را به تحقیق در مورد خواص مکانیکی این فولاد واداشته است.

فولاد API X65 از خانواده فولادهای کم‌کربن و پراستحکام است. مشخصات این فولاد توسط موسسه بین‌المللی نفت آمریکا ارائه شده است [۱]. قابلیت جوش‌پذیری این فولاد از ویژگی‌های بارز این فولاد محسوب می‌شود. علاوه بر این، در برابر خوردگی از مقاومت قابل قبولی برخوردار است. این فولاد دارای چقرمگی شکست بالایی است. تمامی موارد مذکور باعث شده است که از این فولاد در خطوط لوله‌های انتقال نفت و گاز استفاده شود. به همین دلیل تحقیقات بسیار زیادی بر روی این فولاد چه به صورت عددی و چه به صورت تجربی انجام شده است. در مقاله‌ای محیط‌زاده و هاشمی به بررسی اثر تکانه چکش بر انرژی شکست پرداختند [۲]. شجاع الدین و همکاران تأثیر ناهمسانگردی بر انرژی شکست را با استفاده از دستگاه شاری SIT 450 که در تحقیق حاضر نیز از آن استفاده شده است، مطالعه کردند [۳]. هاشمی و همکاران با استفاده از دستگاه شاری مجهز شده متوجه شدند که بخش زیادی از انرژی شکست صرف فرایندهایی به غیر از شکست مانند فرورفتگی در محل برخورد چکش با نمونه و در محل تماس نمونه با سندان، می‌شود. انرژی مصرف شده در دستگاه

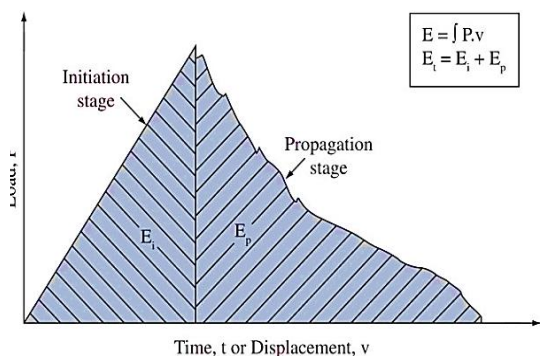
شاری مرسوم نادیده گرفته می‌شده است؛ لذا آن‌ها یک ضربه تصحیح (برابر ۱/۳ الی ۱/۴ برای فولاد X70، ۱/۵ برای فولاد X80، ۱/۳ الی ۱/۴ برای فولاد X100) برای رفع این مشکل ارائه دادند [۴-۹]؛ همچنین، هاشمی برای اولین بار ضرایب تصحیح فلز پایه، جوش و ناحیه متأثر از حرارت در فولاد API X65 (۱/۳) برای فلز پایه و ۱/۶ برای فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت) را به دست آورد [۱۰]. حسین‌زاده و همکاران با استفاده از دستگاه شاری با ظرفیت ۷۵۰ ژول (مدل ژوئیک بدون مدار الکترونیکی) رابطه بین انرژی شکست و عمق شیار را ارائه دادند. آن‌ها با شبیه‌سازی آزمایش ضربه شاری و استفاده از معیار آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن در نرم‌افزار آباکوس نمودار نیرو-جابجایی را گزارش کردند [۱۱]. لوکان^۱ در موسسه ملی استاندارد آمریکا^۲ تحقیقات متعددی را بر روی فولادهای متفاوت بخصوص فولادهای لوله‌های نفت و گاز با استفاده از دستگاه مجهز شده شاری انجام داده است. وی رابطه ای برای تخمین استحکام کششی نهایی دینامیکی از نیروی بیشینه اندازه‌گیری شده در آزمون شاری مجهز شده ارائه داد [۱۲]. وی همچنین از این دستگاه جهت برآورد تجربی نرخ کرنش معادل استفاده کرد [۱۳].

باید گفت که استفاده از دستگاه ضربه شاری مجهز شده به قرن ۱۹ میلادی برمی‌گردد و ماناهان در مقاله‌ای به بررسی تاریخچه استفاده از این دستگاه پرداخته است [۱۴]. در همین راستا دستگاه وزنه سقوطی (مجهز به کرنش سنج) نیز برای اهداف متعدد در تحقیقات متفاوت استفاده شده است [۱۵-۱۸]. در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه بیرجند یک دستگاه ضربه سقوطی ۳۰۰۰۰ ژول جهت مطالعه رفتار دینامیکی فولاد API X65 ساخته شده است [۱۹-۲۳]؛ همچنین حاتمی و همکاران در تحقیقات گسترده و ادامه‌داری با تجهیز کردن دستگاه ضربه سقوطی به مطالعه رفتار ورق‌ها و بتن‌های تقویت شده در برابر نیروهای ضربه‌ای پرداختند [۲۴-۳۲].

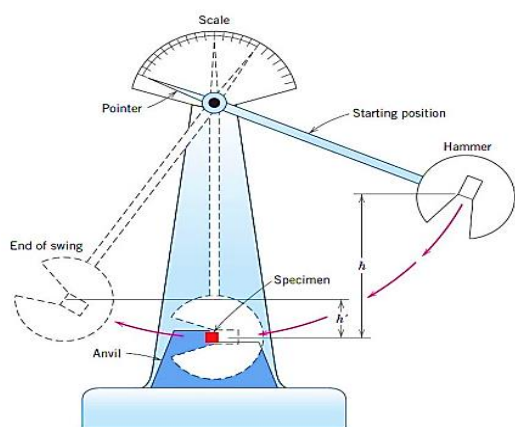
در تحقیق حاضر پس از تجهیز کردن دستگاه ضربه شاری سنتام به مدار کرنش‌سنج، نمودارهای نیرو-جابجایی (شامل تمام اطلاعات شروع و رشد ترک) مستقیماً به صورت تجربی استخراج و نیروهای ویژه مختص فولاد API X65 برای اولین

² National Institute of Standard and Technology Testing (NIST)

¹ Enrico Lucon



شکل ۱- نمودار نیرو جابجایی [۳۳]



شکل ۲- طرح‌واره دستگاه آزمایش ضربه شاریپی [۳۴]

اما با توجه به امکانات دستگاه ضربه شاریپی مجهز شده، نمودار ولتاژ-زمان را می‌توان به نمودار نیرو-جابجایی تبدیل کرد. در نهایت با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی، انرژی شکست نمونه حاصل می‌شود؛ اما قبل از این مرحله باید چکش مجهز شده را در حالی که کرنش سنج‌ها روی آن نصب شده است در دستگاه آزمایش فشار تک‌محوری قرار داده و هم‌زمان با اعمال نیروی فشاری و ثبت نمودار نیرو-زمان، ولتاژ خروجی برحسب زمان را ثبت کرد. بدین ترتیب با داشتن نمودار نیرو-زمان از دستگاه فشار تک‌محوری و نمودار ولتاژ-زمان کرنش سنج‌ها، نمودار نیرو-ولتاژ را می‌توان ترسیم کرد. شیب نمودار نیرو-ولتاژ ضریب ولتاژ خواهد بود. به این فرایند تنظیم کردن یا واسنجی^۶ گفته می‌شود. با ضرب ضریب ولتاژ به دست آمده در مقادیر ولتاژ حاصل از آزمایش شاریپی، مقادیر نیرو-زمان به

بار تعیین شد. سپس، انرژی شروع و انتشار ترک و انرژی کل شکست (سطح زیر نمودار) به دست آمد. این انرژی با مقدار انرژی حاصل از اختلاف بین انرژی پتانسیل چکش قبل و بعد از برخورد (قابل قرائت از صفحه دیجیتالی دستگاه) مقایسه شد. علاوه بر این، نسبت انرژی شکست به ظرفیت دستگاه، جهت اطمینان از کمتر بودن انرژی شکست فولاد ز ۸۰ درصد ظرفیت دستگاه شاریپی، گزارش شد. همچنین، نسبت انرژی شروع به انرژی کل و انرژی رشد ترک به انرژی کل محاسبه شده است. در انتها ضرایب تصحیح جدید با تقسیم انرژی کل به انرژی رشد ترک به ازای عمق شیارهای متفاوت نمونه جهت مقایسه با مدل‌های مرسوم پیش‌بینی شکست لوله‌های انتقال انرژی فولادی محاسبه شد.

۲- دستگاه ضربه شاریپی و تجهیزات

در آزمایش ضربه شاریپی معمولی انرژی گزارش شده برابر با کل انرژی جذب شده توسط ماده است. این انرژی مجموع انرژی‌هایی است که برای شروع^۱ و رشد ترک^۲ صرف می‌شود (شکل ۱)؛ بنابراین برای استخراج این دو انرژی و نیروهای ویژه از دستگاه ضربه شاریپی مجهز شده^۳ استفاده شده است. با داده‌های بدست آمده از این دستگاه تغییرات نیرو و جابجایی بر حسب زمان ترسیم می‌شود. در واقع سیگنال ولتاژ از کرنش‌سنج‌های^۴ نصب شده روی آونگ توسط نوسان‌سنج^۵ دریافت و به شکل منحنی ولتاژ-زمان برای نمونه آزمایش ثبت می‌شود. تصویر ماشین ضربه شاریپی معمولی در شکل ۲ نشان داده شده است [۳۴].

در این آزمایش مقدار انرژی جذب شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴]:

$$E = mg(h - h') \quad (1)$$

در این رابطه E انرژی شکست و m جرم چکش است.

⁴ Strain gage
⁵ Oscilloscope
⁶ Calibration

¹ Crack initiation energy (E_i)
² Crack propagation energy (E_p)
³ Instrumented Charpy impact test

در زاویه طی شده توسط آن (با استفاده از اطلاعات حاصل از یک زاویه سنج الکترونیکی با دقت ۰/۰۱ درجه) به دست می‌آید. کرنش سنج‌ها در وجهی از چکش نصب می‌شوند که در اثر خم شدن نمونه ضربه شاری در حین ضربه، آسیب نبیند. برای حصول نتایج دقیق، کرنش سنج‌ها در فاصله ۱۵ میلی‌متر از نوک چکش نصب می‌شوند.



شکل ۳- نمای کلی از دستگاه ضربه شاری مجهز شده سنتام مدل SIT-450

جدول ۱- مشخصات دستگاه ضربه شاری مجهز شده سنتام مدل SIT-450

ظرفیت دستگاه	۴۵۰ ژول
نوع چکش	C شکل، استاندارد ASTM E23
سرعت چکش در لحظه برخورد	۵/۲۶ متر بر ثانیه
زاویه رهایی چکش	۱۵۰/۱ درجه
وزن چکش	۳۲/۱ کیلوگرم
شعاع نوک چکش	۸ میلی‌متر
مرکز ضربه	۷۸۰ میلی‌متر از محور دوران
نوع کرنش سنج	TML: FLA-3-350-11
ضریب کرنش سنج	۲/۱۰
مقاومت کرنش سنج	۳۵۰±۱/۰ اهم
تعداد نمونه‌برداری به هنگام برخورد چکش	۲۰۰ نمونه در هر ثانیه
نرخ داده‌برداری اینترفیس	۲۵۰۰۰۰ نمونه در هر ثانیه
دقت زاویه سنج	۰/۰۱ درجه

دست می‌آید. اکنون می‌توان با رابطه زیر سرعت را به صورت تابعی از زمان به دست آورد:

$$v(t) = V_0 - \frac{1}{m} \int_0^t F(t) dt \quad (2)$$

در رابطه (۲) m جرم چکش، V_0 سرعت اولیه، F نیروی لحظه ای و t زمان است. اکنون می‌توان با رابطه زیر جابجایی S را بر حسب تابعی از زمان به دست آورد:

$$s(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (3)$$

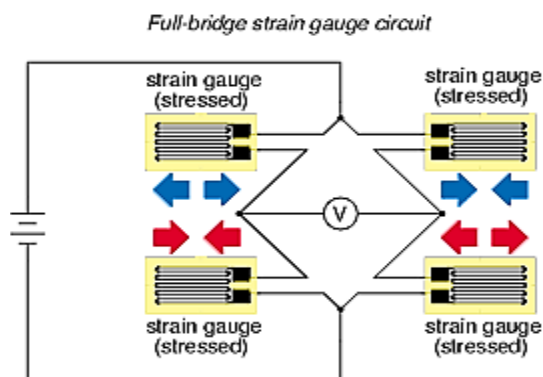
درواقع جابجایی با دومرتبه انتگرال گیری از مقادیر نیرو-زمان حاصل می‌شود. اکنون نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری دینامیکی قابل ترسیم بوده و با رابطه زیر انرژی کل به دست می‌آید:

$$E(t) = V_0 \int_0^t F(t) dt \quad (4)$$

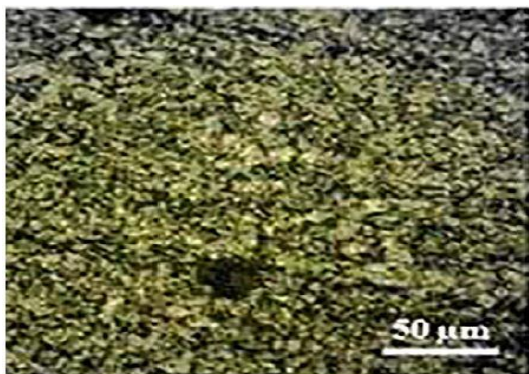
در رابطه (۴) سرعت ثابت در نظر گرفته شده است؛ اما این فرض صحیح نیست و بعد از برخورد چکش با نمونه طبیعتاً سرعت ضربه شاری کاهش می‌یابد [۳۵]. با توجه به شکل ۱ برای به دست آوردن انرژی شروع و رشد ترک بازه‌های انتگرال گیری تغییر داده می‌شوند که هر جزء انرژی به صورت جداگانه قابل انتگرال گیری و محاسبه خواهند بود؛ همچنین نیروی بیشینه در بالاترین قسمت نیرو-جابجایی قابل استخراج است. دستگاه ضربه شاری مجهز شده که در این تحقیق از آن استفاده شده است در شکل ۳ دیده می‌شود. توانایی این دستگاه ارائه نمودار نیرو-جابجایی، محاسبه نسبت انرژی به سطح شکست، ارائه انرژی شکست از طریق انتگرال گیری مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی و محاسبه انرژی حاصل از اختلاف ارتفاع چکش قبل و بعد از ضربه است. مشخصات این دستگاه از دفترچه آن (کاتالوگ دستگاه) استخراج و در جدول ۱ آورده شده است.

از مشخصات منحصر به فرد این دستگاه این است که نیرو و جابجایی به صورت کاملاً مجزا اندازه‌گیری می‌شود؛ یعنی مستقل از یکدیگر محاسبه می‌شوند. نیرو با استفاده از کرنش سنج‌های نصب شده بر روی چکش مطابق با روند توصیف شده در بالا به دست می‌آید؛ اما جابجایی نه با استفاده از روش انتگرال گیری توصیف شده، بلکه با استفاده از ضرب طول آونگ

شده و کاهش توقف‌های دمایی حین سرمایش ریزساختار نهایی این فولاد را از فریت-پرلیت به فریت سوزنی-باینیت تبدیل کرده است.



شکل ۴- نمایی از مدار و تستون استفاده شده در دستگاه شارپی SIT-450



شکل ۵- ریزساختار فولاد API X65 [۳۶].

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این فولاد به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است [۱, ۳۶]. همان‌گونه که می‌توان دید، این فولاد حداقل و حداکثر مقادیر مجاز تعیین شده توسط استاندارد ملی موسسه نفت و گاز آمریکا را برآورده می‌نماید.

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، خروجی کرنش‌سنج‌ها ولتاژ است که از طریق مدار رابط (مدار کامل^۱ پل و تستون^۲) انتقال داده می‌شود (شکل ۴). تمامی محاسبات توصیف‌شده در بالا توسط شرکت سنتام با نرم‌افزار لیبویو^۳ نوشته و در این برد الکتریکی ذخیره شده است. برای محاسبه جابجایی، روی محور دوران یک زاویه‌سنج الکتریکی نصب شده است. فاصله طی شده (شعاع دوران آونگ) توسط این زاویه‌سنج به صورت بازه های کوچک ثبت می‌شود. با ضرب این بازه‌ها در طول آونگ یا همان شعاع دوران، جابجایی به دست می‌آید. نیرو نیز همان گونه که قبلاً بیان شد، توسط کرنش‌سنج به دست می‌آید. در نهایت نمودار نیرو-جابجایی در خروجی روی صفحه نمایشگری که در شکل ۳ دیده می‌شود برای کاربر ترسیم می‌شود.

این نکته باید ذکر شود که داده‌های نیرو-جابجایی از نرم افزار قابل استخراج است؛ بنابراین، خود کاربر نیز می‌تواند با استفاده از نرم‌افزار اکسل نمودار را ترسیم کند و نی‌روهای ویژه و مساحت‌های موردنیاز را محاسبه نماید. در این تحقیق از داده‌های خروجی برای تحلیل نتایج استفاده شده است (تعداد داده‌ها ۱۲۰۰ عدد است).

۳- معرفی ماده

ماده مورد استفاده از فولاد API X65 است که از لوله‌ای با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر تهیه شده است. ریزساختار فلز پایه از بافت یکنواخت ریزدانه فریت سوزنی^۴-باینیت^۵ تشکیل شده است. فریت سوزنی ساختار مناسبی برای افزایش چقرمگی فولاد API است (شکل ۵). طبیعت درهم قفل‌شوندگی^۶ فریت سوزنی با اندازه دانه‌بندی کوچک آن بیشترین مقاومت را در برابر رشد ترک تورقی^۷ دارد [۳۶].

میانگین اندازه دانه‌های فریت ۳ الی ۷ میکرومتر است. به منظور دستیابی هم‌زمان به استحکام و چقرمگی بالا ورق فولاد API X65 با فرایند خنک‌کاری سریع^۸ و نورد کنترل‌شده^۹ ترمومکانیکال^۹ تولید شده است. در واقع نرخ سرمایش بهینه

⁶ Interlocking nature

⁷ Cleavage

⁸ Accelerated Cooling (AC)

⁹ Thermo-Mechanical Controlled Rolling (TMCR)

¹ Full Bridge

² Wheatstone bridge

³ Lab view

⁴ Acicular ferrite

⁵ Bainite

۴- نتایج تجربی

ابعاد نمونه استاندارد شاری در استاندارد ASTM E23 آورده شده است [۳۷]. در این تحقیق تعداد ۲۴ نمونه شاری با عمق شیارهای ۱/۲۵ الی ۳ میلی‌متر با گام ۰/۲۵ و به ازای هر عمق شیار ۳ نمونه برای تکرارپذیری آماده شد. نتایج انرژی شکست تمامی نمونه‌ها در جدول ۴ به همراه مقدار میانگین آورده شده است. مقادیر دایال همان‌گونه که قبلاً بیان شد از رابطه ۱ به دست می‌آید.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد آزمایش شده در تحقیق حاضر [۱، ۳۶]

عناصر	درصد وزنی	استاندارد API 5L X65
آهن	پایه	---
کربن معادل	۰/۳۴	حداکثر ۰/۴۳
کربن	۰/۰۷۲	حداکثر ۰/۲۲
منگنز	۱/۴۵	حداکثر ۱/۴۵
فسفر	۰/۰۰۸	حداکثر ۰/۰۲۵
سولفور	۰/۰۰۲	حداکثر ۰/۰۱۵
تیتانیوم	۰/۰۱۵	حداکثر ۰/۰۶
سیلیکون	۰/۲۰۱	---
نیوبیوم	۰/۰۴۷	---
کرم	۰/۱۷۴	---
مولیبدن	۰/۲۴۰	---
وانادیوم	۰/۰۵	---
نیکل	۰/۰۰۹	---

مس	۰/۰۰۸	---
آلومینیوم	۰/۰۲۳	---

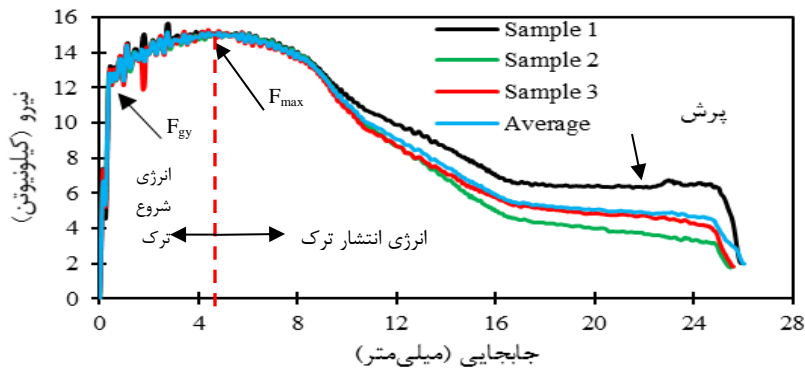
این دستگاه مقادیر مذکور را بعد از هر آزمایش بر روی صفحه دیجیتالی نمایش می‌دهد. نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد شاری (با عمق شیار اولیه ۲ میلی‌متر) به همراه مقدار میانگین آن در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، بیشترین جابجایی چکش برابر ۲۶ میلی‌متر است. هم‌چنین تا جابجایی حدود ۹ میلی‌متر، هر سه نمودار کاملاً برهم منطبق می‌باشند. پس از حدود ۱۰ میلی‌متر جابجایی چکش، اختلاف مشهودی بین رفتار رشد ترک در ناحیه نرم‌شوندگی نمودارها مشاهده می‌شود. دلیل این اختلاف را می‌توان به رفتار متفاوت هر نمونه شاری، که از ورق پایه ساخته می‌شود، در برابر رشد و ادغام حفره‌ها با توجه به راستای صفحات شکست، انباشتگی نابجایی‌ها، شکل دانه‌ها، فازهای ثانویه، کاربیدها و سولفیدها، که هرکدام از این موارد به نوبه خود در میزان جذب انرژی شکست تأثیر بسزایی دارند، نسبت داد. چنین اختلافی در نمودار آزمون کشش تک‌محوری برای سه نمونه آزمون کشش در نواحی بعد از سخت‌شوندگی و به خصوص زمانی مشاهده می‌شود که ماده وارد مرحله پلاستیک و نرم‌شوندگی می‌شود.

جدول ۳- خواص مکانیکی فولاد آزمایش شده در تحقیق حاضر [۱، ۳۸]

خواص کششی				فولاد API X65
درصد ازدیاد طول %	نسبت تسلیم به نهایی	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	آزمون کشش
۲۱	۰/۸۹	۵۵۲	۴۹۰	آزمون کشش
---	---	۵۳۱	۴۴۸	حداقل (استاندارد API 5L)
---	۰/۹۳	۷۵۸	۶۰۰	حداکثر (استاندارد API 5L)

جدول ۴- انرژی شکست تمام نمونه‌ها (برحسب ژول)

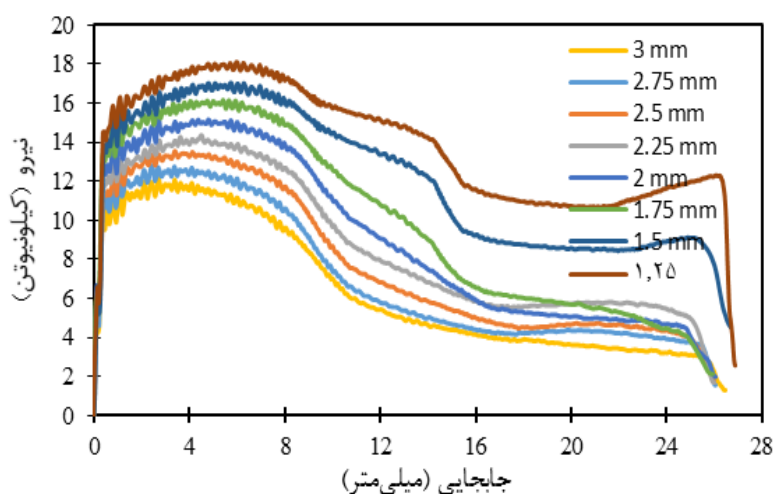
عمق شیار (میلی‌متر)	انرژی نمونه اول		انرژی نمونه دوم		انرژی نمونه سوم		انرژی میانگین	
	دایال	کرنش سنج	دایال	کرنش سنج	دایال	کرنش سنج	دایال	کرنش سنج
۱/۲۵	۳۷۰	۳۹۵	۳۶۸	۳۹۴	۳۶۶	۳۸۷	۳۶۸	۳۹۲
۱/۵	۳۲۲	۳۳۵	۳۲۸	۳۶۳	۳۲۸	۳۴۸	۳۲۹	۳۴۹
۱/۷۵	۲۸۱	۲۸۵	۲۸۳	۲۸۶	۲۸۳	۲۸۸	۲۸۲	۲۸۷
۲	۲۶۹	۲۸۸	۲۵۰	۲۴۸	۲۵۴	۲۵۹	۲۵۸	۲۶۵
۲/۲۵	۲۳۷	۲۵۲	۲۴۲	۲۶۰	۲۴۶	۲۶۴	۲۴۲	۲۵۹
۲/۵	۲۱۴	۲۲۷	۲۱۸	۲۳۳	۲۲۴	۲۴۲	۲۱۹	۲۳۴
۲/۷۵	۲۰۶	۲۲۱	۱۹۶	۲۰۶	۲۰۰	۲۱۹	۲۰۱	۲۱۶
۳	۱۷۹	۱۹۰	۱۹۱	۲۰۳	۱۸۷	۲۰۳	۱۸۵	۱۹۹



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های استاندارد شاریبی (عمق شیار ۲ میلی‌متر)

کمی برخوردارند. او همچنین علت به وجود آمدن پرش در انتهای نمودار را به اثر برهم‌کنش نمونه شاریبی و شعاع‌های نوک چکش ۸ میلی‌متری نسبت داد به هنگامی که نمونه در حال پرتاب شدن به بیرون از دستگاه است. این پرش ناشی از مؤلفه نیروی اضافی تولیدشده توسط نمونه خم‌شده در اطراف گوشه‌های تیز چکش با شعاع ۸ میلی‌متر است. این پرش باعث افزایش مصنوعی انرژی جذب‌شده محاسبه‌شده از مساحت زیر نمودار نسبت به مقدار ارائه‌شده توسط صفحه مدرج دستگاه شاریبی است [۳۹].

در شکل ۷ مقادیر میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی برای ۸ عمق شیار مختلف برای مقایسه آورده شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که پرش ایجادشده در انتهای نمودارها مربوط به اثر برهم‌کنش چکش با نمونه و نمونه با سندان در چکش با شعاع ۸ میلی‌متر است. لوکان در تحقیق خود نشان داد که در نمونه‌های با انرژی شکست شاریبی بالا (بالتر از ۲۰۰ ژول) اختلاف انرژی شکست بین چکش با شعاع ۸ و ۲ میلی‌متر قابل توجه بوده و چکش با شعاع ۸ میلی‌متر مقدار انرژی بیشتری را گزارش می‌دهد؛ اما در فولادهایی که انرژی شکست آن‌ها کم است، انرژی گزارش‌شده بین این دو چکش از اختلاف



شکل ۷- میانگین نمودارهای نیرو-جابجایی برای تمامی عمق شیارها

بیان کننده میزان انرژی مورد نیاز برای شروع ترک خواهد بود. انرژی انتشار ترک نیز برابر با مساحت محصور شده بین نمودار نیرو-جابجایی از بعد از نیروی بیشینه و خط چین ترسیم شده است.

با توجه به اینکه بدنه دستگاه شاری ۴۵۰ ژول سنتام به صورت کاملاً یکپارچه ریخته گری شده است از استحکام و صلبیت بسیار بالایی برخوردار است؛ بنابراین دارای کمترین نوسانات ممکن در داده های خروجی است. این ادعا از مقدار نوسانات بسیار کم نمودارها قابل اثبات است؛ ضمن اینکه نمودارهای ترسیم شده در شکل ۶ و ۷ بدون اعمال پالایه^۱ ترسیم شده اند و تفاوت چندانی با مقادیر پالایه شده نداشتند. در جدول ۵ نیروی تسلیم F_{gy} ، نیروی بیشینه F_{max} ، انرژی گزارش شده توسط دایال (صفحه مدرج) دستگاه، نسبت انرژی شکست به ظرفیت دستگاه، انرژی محاسبه شده با استفاده از کرنش سنج، اختلاف بین این دو انرژی، انرژی شروع ترک و انرژی انتشار ترک آورده شده است. مقادیر به دست آمده توسط مرجع [۱۱] جهت مقایسه گزارش شده است. در ستون های آخر، همچنین، نسبت انرژی شروع به انرژی رشد ترک و انرژی کل ترک، نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل و در ستون آخر نسبت انرژی کل به انرژی رشد ترک آورده شده است. از ستون آخر به این نکته بسیار مهم می توان رسید که میانگین نسبت

در استاندارد ASTM E23 [۳۷] گزارش شده است نمونه هایی که مقادیر انرژی جذب شده آن ها بالاتر از ۸۰ درصد ظرفیت دستگاه است از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند و مقدار آن ها باید به عنوان تقریب گزارش شود. در این تحقیق تنها نمونه ای که این الزام را برآورده نکرده است نمونه با عمق شیار ۱/۲۵ میلی متر (کم ترین عمق شیار) است. طبق جدول ۵ مقدار انرژی گزارش شده برای این نمونه ۳۶۸ ژول است. این مقدار معادل با ۸۲ درصد ظرفیت دستگاه است.

بیشترین نیرویی که نمونه طی بارگذاری ضربه ای متحمل می شود، F_{max} ، متناظر با مقدار نیرو در بالاترین قسمت نمودار نیرو-جابجایی است (شکل ۸). برای تعیین نیروی تسلیم، F_{gy} ، از دستورالعمل ارائه شده در استانداردهای ASTM E2298 و BS EN ISO 14556 استفاده شده است. بدین ترتیب که مطابق با شکل ۸ یک منحنی چندجمله ای با دقت بالا از قسمت بالایی نمودار (سخت شوندگی و نرم شوندگی) عبور داده می شود. محل برخورد منحنی با قسمت خطی نمودار معرف مقدار نیروی تسلیم ماده است.

برای تعیین انرژی های شروع و انتشار ترک مساحت سطح زیر نمودار به دو قسمت قبل از نیروی بیشینه و بعد از نیروی بیشینه تقسیم بندی می شود (شکل ۶). مقدار مساحت محصور شده بین نمودار نیرو-جابجایی تا خط چین ترسیم شده

^۱ Filter

با استفاده از نتایج جدول ۵ برای توصیف هر چه بهتر رفتار ماده تغییرات انرژی شکست خوانده شده از دایال دستگاه و محاسبه شده از نتایج مدار کرنش سنج در شکل ۹ ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مطابق انتظار با افزایش عمق شیار به دلیل کمتر شدن مقدار ماده باقی مانده، مقاومت ماده در برابر ضربه و متعاقب با آن انرژی موردنیاز برای شکست کاهش یافته است. از مقادیر حاصل شده یک منحنی گذرانده شده است. دو منحنی از یک تابع نمایی با دقت بسیار بالا پیروی می‌کند که با روابط زیر به ترتیب برای انرژی دایال و انرژی کرنش سنج توصیف می‌شود:

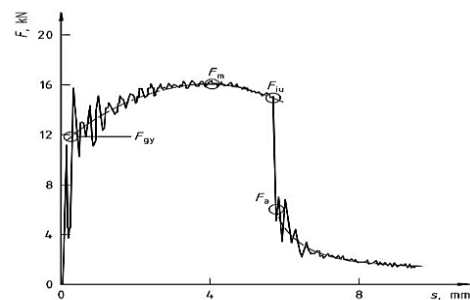
$$E = 577 e^{-0.396 a} \quad (۵)$$

$$E = 590.55 e^{-0.371 a} \quad (۶)$$

که a در روابط بالا عمق شیار است.

در شکل ۹ دیده می‌شود نتایج اندازه‌گیری انرژی شکست با استفاده از مدار کرنش سنج همواره بیشتر از مقادیر متناظر قرائت شده از دایال دستگاه آزمایش ضربه و بیشتر از محدوده مشخص شده در استاندارد (± 5 ژول) است. درعین حال خطای اندازه‌گیری بصورت یکسان در انرژی شکست تمام نمونه‌ها دخیل است، همچنین از آنجائیکه از نسبت‌های انرژی برای محاسبات مربوطه استفاده می‌شود، نتایج حاصله از دقت لازم برخوردار است.

انرژی کل شکست به انرژی رشد ترک نمونه‌ها (۱/۲۹) در این تحقیق با مقادیر قبلی (۱/۳۰) محاسبه شده برای نمونه‌های استاندارد فولاد پایه API X65 مطابقت خوبی دارد [۱۰]. لازم به یادآوری است، مدل‌های مرسوم پیش‌بینی شروع شکست در لوله‌های انتقال انرژی بر اساس استفاده از فولادهای کم‌انرژی (شبه ترد که در آنها سهم انرژی شروع ترک بسیار ناچیز بوده است) در گذشته بنا شده‌اند [۴۰]. در فولادهای جدیدی با چقرمگی بسیار زیاد بخش عمده انرژی شکست در فرایندهای غیرمرتبط با رشد ترک (مثل تغییر شکل در سندان‌ها یا محل برخورد یا شروع ترک) صرف می‌شود. محققین زیادی روش‌های متعددی را برای کاهش انرژی شروع ترک پیشنهاد کرده‌اند (مثل استفاده از شیار پشتی back slit، پیش‌ترک خستگی یا پیش‌بارگذاری). نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد، افزایش عمق شیار اولیه به حدود ۷/۵ میلی‌متر باعث می‌شود، تقریباً تمام انرژی شکست صرف رشد ترک (و نه صرف ایجاد ترک) شود.

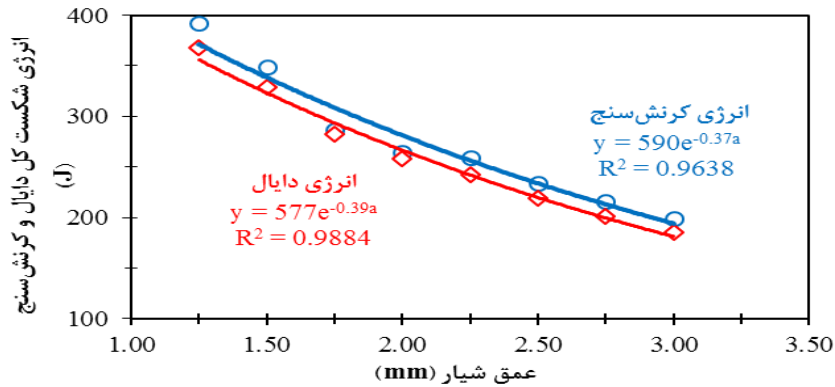


شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی در آزمایش ضربه شاری نوع E با افت شدید بعد از نیروی بیشینه [۳۵]

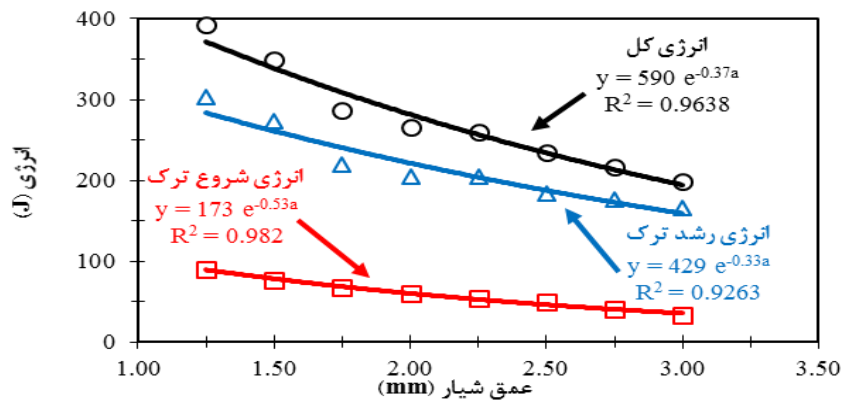
جدول ۵- عمق شیار، نیرو و انرژی (برحسب ژول) در فولاد آزمایش شده در تحقیق حاضر

عمق شیار (میلی-متر)	F _{gy} (kN)	F _{max} (kN)	انرژی دایال دستگاه	نسبت انرژی			اختلاف انرژی %	انرژی شروع ترک	انرژی رشد ترک	انرژی گزارش شده در مرجع [۱۱]	نسبت انرژی شروع به رشد ترک	نسبت انرژی شروع به رشد ترک	نسبت انرژی رشد کل	نسبت انرژی کل
				شکست	به ظرفیت دستگاه	انرژی								
۱/۲۵	۱۴	۱۸	۳۶۸	۰/۸۲	۳۹۲	-۷	۸۹	۳۰۳	۳۳۰	۲۹	۲۳	۷۷	۱/۲۹	
۱/۵	۱۳	۱۷	۳۲۹	۰/۷۳	۳۴۹	-۶	۷۶	۲۷۳	۲۹۹	۲۸	۲۲	۷۸	۱/۲۸	
۱/۷۵	۱۳	۱۶	۲۸۲	۰/۶۳	۲۸۷	-۱	۶۷	۲۱۹	۲۶۶	۳۱	۲۳	۷۶	۱/۳۰	
۲	۱۲	۱۵	۲۵۸	۰/۵۷	۲۶۵	-۳	۶۰	۲۰۵	۲۴۱	۲۹	۲۳	۷۷	۱/۲۹	
۲/۲۵	۱۱	۱۴	۲۴۲	۰/۵۴	۲۵۹	-۷	۵۴	۲۰۵	۲۲۶	۲۶	۲۱	۷۹	۱/۲۶	

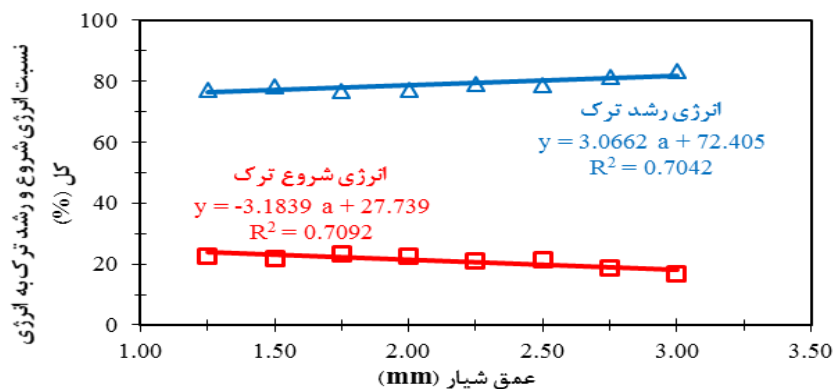
۱/۲۷	۷۹	۲۱	۲۷	۲۰.۸	۱۸۴	۵۰	-۷	۲۳۴	۰/۴۹	۲۱۹	۱۴	۱۱	۲/۵
۱/۲۳	۸۱	۱۹	۲۳	۱۹۰	۱۷۶	۴۰	-۸	۲۱۶	۰/۴۵	۲۰۱	۱۳	۱۰	۲/۷۵
۱/۲۰	۸۳	۱۷	۲۰	۱۷۹	۱۶۵	۳۳	-۷	۱۹۹	۰/۴۱	۱۸۵	۱۲	۱۰	۳
۱/۲۹	۷۹	۲۱	۲۷	۲۴۲	۲۱۶	۵۹	---	۲۷۵	---	۲۶۱	۱۵	۱۲	میانگین



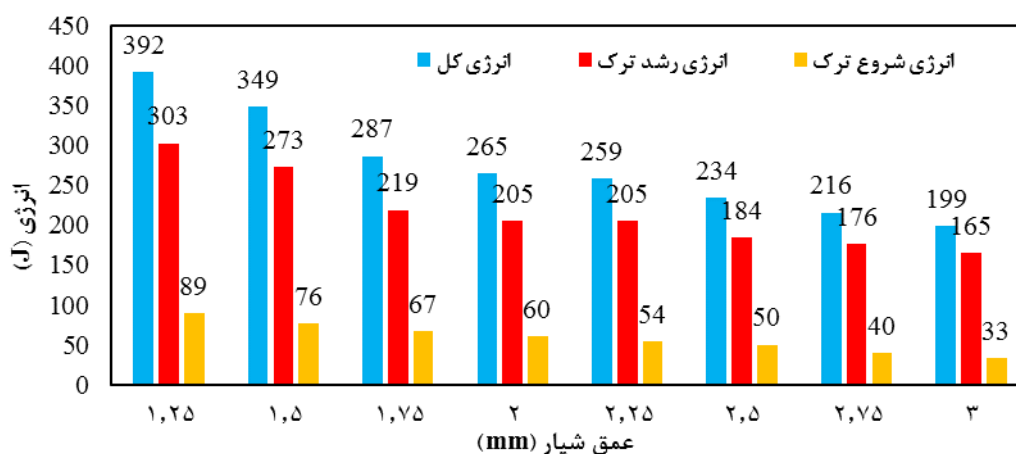
شکل ۹- تغییرات انرژی شکست حاصل از اختلاف انرژی پتانسیل چکش و کرنش سنج در برابر تغییرات عمق شیار



شکل ۱۰- تغییرات انرژی شکست حاصل از کرنش سنج در برابر تغییرات عمق شیار



شکل ۱۱- تغییرات انرژی رشد ترک انرژی شروع ترک در برابر تغییرات عمق شیار



شکل ۱۲- نمودار ستونی انرژی‌های جزء و کل جهت مقایسه

انرژی کلی شکست با افزایش عمق شیار اولیه بصورت نمایی دیده می‌شود.

در شکل ۱۱ تغییرات نسبت انرژی شروع ترک و نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کلی شکست بصورت خطی بر حسب عمق شیار اولیه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش عمق شیار نسبت انرژی شروع ترک کاهش و نسبت انرژی رشد ترک افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر در نمونه‌هایی با عمق شیار اولیه بیشتر، بخش عمده انرژی صرف رشد ترک در لیگامنت (عرض بدون ترک نمونه) می‌شود. نتیجه مهم این است که از نمونه‌های ضربه شاری با عمق بیشتر (و انرژی شروع ترک کمتر) می‌توان برای بازتنظیم مدل‌های قدیمی‌تر شکست لوله‌های انتقال گاز که با نمونه‌هایی فولادی با چقرمگی کمتر (با انرژی شروع ترک کمتر) در گذشته تنظیم شده‌اند، استفاده کرد.

برای مقایسه و درک بهتر از تغییرات انرژی‌های جزء و کل، یک نمودار ستونی در شکل ۱۲ ترسیم شده است. در این ترسیم روند کاهش انرژی‌ها به وضوح مشخص است.

۵- جمع بندی

هدف اصلی این تحقیق استخراج نمودار نیرو-جابجایی فولاد API X65 و مطالعه رفتار دینامیکی ماده با استفاده از نمودارهای مذکور بوده است. علاوه بر این، نیروهای ویژه شامل نیروی تسلیم و نیروی بیشینه به‌طور مستقیم و تجربی از

لازم به یادآوری است که مرجع [۱۱] رابطه زیر را گزارش کرده است:

$$E = 499.65 e^{-0.35 a} \quad (Y)$$

این رابطه با استفاده از آزمایش‌های تجربی انجام شده با دستگاه ژونیک ۷۵۰ ژول شرکت فولادسازی اهواز حاصل شده است.

شایان ذکر است، به دلیل استفاده زیاد از دستگاه مذکور در خط کنترل کیفیت محصول فولادی، شعاع نوک چکش و شعاع نوک دو سندان مقداری از محدوده استاندارد خارج شده است. زیاد شدن شعاع نوک سندان باعث می‌شود که نمونه شاری قبل از آنکه به اندازه کافی خم شود و انرژی را به‌طور کامل جذب کند، از دهانه سندان خارج شود؛ یا به‌عبارت دیگر، فاصله استاندارد بین دو تکیه‌گاه که ۴۰ میلی‌متر می‌باشد، افزایش یافته است. به همین دلیل انرژی‌های گزارش شده در مرجع [۱۱] کمتر از انرژی‌های حاصل شده در این تحقیق است. نکته دیگر که باید به آن دقت شود این است که سرعت چکش در لحظه برخورد برابر ۵/۴۲ متر بر ثانیه می‌باشد. با این حال، در همه موارد بالا روابط ارائه شده از دقت قابل قبولی برخوردار است.

با استفاده از نتایج جدول ۵ نمودار تغییرات هر جزء انرژی بر حسب عمق شیار مطابق شکل ۱۰ ترسیم می‌شود. در این شکل تغییرات کاهش انرژی شروع ترک، انرژی رشد ترک و

۶- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ در اختیار قراردادن فولاد API X65، از شرکت لوله‌سازی اهواز برای همکاری در آزمایش‌های شاری اولیه و از دانشگاه پیام نور کرمان جهت فراهم نمودن امکانات آزمایش مجهز شده ضربه شاری قدردانی و تشکر می‌نماید.

۷-مراجع

- [1] API Specification 5L (2004) Specification for Line Pipe. 43rd ed. American Petro. Inst.
- [2] Mohitzadeh SS and Hashemi SH (2020) Experimental and numerical evaluation of momentum variation effect of striker on fracture energy in Charpy impact testing of API X65 steel. Mod. Mech. Eng. 20 (9): 2275-2287.
- [3] Shojaeddin M, Hashemi SH and Majidi-Jirandehi AA (2022) Experimental investigation of anisotropy in API X65 steel pipe using Charpy impact fracture Energy. Mod. Mech. Eng. 22 (6): 407-404.
- [4] Hashmi SH (2008) Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel. Int. J. of Press. Vess. Pip. 89: 879-884.
- [5] Hashmi SH, Howard IC, Yates JR, and Andrews RM (2004) The Transferability of micro-mechanical damage parameter in modern line pipe steel. ECF. Stockholm, Sweden.
- [6] Hashemi SH, Howard IC, Yates JR, and Andrews RM (2005) Measurement and analysis of impact test data for X100 pipeline steel. App. Mech. and Mat. 3-4: 369-376.
- [7] Hashemi SH, Howard IC, Yates JR, and Andrews RM, and Edwards AM (2006) Estimation of slant tearing energy for high-grade pipeline steel from instrumented Charpy test data and its transferability to large structures. IPC. Calgary, Alberta, Canada.
- [8] Hashemi SH and Jalali MR (2006) Experimental study of charpy impact characteristics of high strength spiral welded gas pipeline. IPC. Calgary, Alberta, Canada.
- [9] Hashemi SH and Jalali MR (2008) Evaluation of fracture initiation energy in API X65 pipeline steel. IPC. Calgary, Alberta, Canada.
- [10] Hashemi SH (2009) Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. Int. J. of Press. Vessels. Pip. 86: 533-540.
- [11] Hosseinzadeha A, Hashemi SH, Rastegari H, Maraki MR, (2021) Investigation of the notch depth

دستگاه شاری مجهز شده استخراج شد. نکته قابل توجه اختلاف کم نتایج حاصل از اختلاف انرژی پتانسیل و نتایج حاصل از کرنش سنج است که در بیشترین حالت به ۸- درصد می‌رسد.

در جدول ۵ مشاهده می‌شود که تنها نمونه با انرژی شکست بیشتر از ۸۰ درصد ظرفیت دستگاه مربوط به نمونه شاری با عمق شیار ۱/۲۵ میلی‌متر است و میزان انرژی شکست آن به صورت تقریب بربر با ۳۶۸ ژول گزارش شد. به وضوح می‌توان دریافت که با افزایش عمق شیار، انرژی شکست و نیروهای ویژه کاهش می‌یابند. برای توصیف رفتار ماده در برابر بارگذاری دینامیکی یک رابطه‌ی نمایی (رابطه ۵) ارائه شد. اختلاف بین رابطه ۵ و رابطه ۷ مربوط به ظرفیت دستگاه و کیفیت چکش استفاده شده می‌باشد. در این تحقیق از دستگاه ۴۵۰ ژول استفاده شده است که چکش آن دارای شعاع ۸ میلی‌متر است و بسیار کم کار کرده است؛ اما برای استخراج رابطه ۷ از دستگاه ۷۵۰ ژول مدل زوئیک استفاده شده است که شعاع نوک چکش به دلیل کارکرد زیاد مقداری از محدوده استاندارد خارج شده است. همین امر در مورد سندان‌ها صدق می‌کند. به دلیل سایش، فاصله دهانه تکیه‌گاه افزایش یافته است؛ بنابراین نمونه شاری قبل از آنکه بتواند از تمامی پتانسیل موجود فلز برای جذب انرژی ضربه استفاده نماید از فاصله بین دو سندان بیرون آمده است و این امر منجر به گزارش انرژی‌های کمتر نسبت به این تحقیق شده است؛ همچنین سرعت چکش دستگاه زوئیک در لحظه برخورد با آونگی به وزن ۵۰ کیلوگرم، ۵/۴۲ متر بر ثانیه است.

ضرایب تصحیح برای هشت دسته از نمونه شاری گزارش شد و میانگین آن‌ها با مدل‌های مرسوم پیش‌بینی شکست لوله‌های انتقال انرژی فولادی از تطابق خوبی برخوردار بود.

انرژی‌های جزء و کل (حاصل از کرنش سنج) در برابر عمق شیار روند کاهشی داشت و همگی آن‌ها همانند انرژی کل دایال با رابطه‌ی نمایی ارائه شدند.

از شکل ۱۱ مشاهده شد که افزایش عمق شیار منجر به کاهش نسبت انرژی شروع به کل و افزایش نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل می‌شود. رفتار این دو انرژی به صورت خطی بود.

- St12, Al3105 with layers under drop test loading." J. Struc. Const. Eng. 8(1): 58-85.
- [25] Dalvand A, Hatami H, Chegini A (2021) Experimental study of the effect of dynamic loading on rectangular armed panels made of self-compacting composite fiber and lattice sheets. J. Struc. Const. Eng. 8(1):131-151.
- [26] Ghodsbin Jahromi A and Hatami H (2016) Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading. Amir. J. Mech. Eng. 49(4): 685-696.
- [27] Hatami H (2017) The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and two-cell reticular under impact loading. Amir. J. Mech. Eng. 50(5): 51-60.
- [28] Mousavi Zadeh SA, Hosseini M, Hatami H (2021) Experimental and Numerical Investigation on the plain and reinforced Steel Sheets under free fall impact. Ir. J. Mech. Eng. 23(1): 64-84.
- [29] Mousavi Zadeh SA, Hosseini M, Hatami H, Kamalvand M (2019) Studies on the effect of reinforcement types on flat and curved steel sheets' performance under drop impact. J. Aero. Mech. 16(4).
- [30] Mousavi Zadeh SA, Hosseini M, Hatami H (2021) Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendente on the Deformation of Samples. J. of Mod. Eng. 18(63): 27-40.
- [31] Nouri MD, Hatami H, Ghodsbin Jahromi A (2015) Experimental investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. Mod. Mech. Eng., vol. 15(1): 371-37.
- [32] Sepahvand H, Hosseini M, Hatami H (2021) Experimental and Numerical Investigation on Concrete Specimens with Expanded Metal Sheet under Impact Loading. J. App. and Comp. Sci. in Mech. 32(1): 211-230.
- [33] Tarpani JR, Maluf O, Gatti MCA (2009) Charpy Impact Toughness of Conventional and Advanced Composite Laminates for Aircraft Construction. Mat. Res. 12(4): 395-403.
- [34] Meyers MA and Chawla KK (2009) Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press.
- [35] BS EN ISO 14556 (2002) Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - Instrumented test Method.
- [36] Hashemi SH and Mohammadyani D (2012) Characterisation of weldment hardness, impact effect on Charpy fracture energy and fracture surface features of APIX65 steel. CMQ. 35.
- [12] Lucon E (2016) Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data. Mat. & Des. 97: 437-443.
- [13] Lucon E (2016) Experimental assessment of equivalent strain for an instrumented Charpy test. J. of Res. of the Nat. Inst. of Stan. Tech. 121: 165-179.
- [14] Manahan MP and Siewert TA (2006) the history of instrumented impact testing. J. ASTM Int. 31(2)
- [15] Gesing MA, Simha CHM, Xu S, Tyson RW (2016) Geometric and material property dependencies of the plastic rotation factor in the drop weight tear test. Eng. Frac. Mech. 153: 399-406.
- [16] Shin HS, Tuazon BJ (2015) an instrumented drop-bar impact testing apparatus for investigating the impact fracture behaviors of structural steels. Int. J. of Impact Eng. 84: 124-133.
- [17] Simha CHM, Xu S, Tyson RW (2015) Computational-modeling-of-the-drop-weight-tear-test-A-comparison-of-two-failure-modeling-approaches. Eng. Frac. Mech. 148: 304-323.
- [18] Simha CHM, Xu S, Tyson RW (2014) Non-local phenomenological damage mechanics based modeling of the Drop Weight Tear Test. Eng. Frac. Mech. 118: 66-82.
- [19] Fathi E and Hashemi SH (2020) Experimental and numerical study of ebergy absorbtion in drop weight tear test specimen with chevron notch on API X65 steel. J. Solid and Fluid Mech., 10 (2): 95-110.
- [20] Fathi E and Hashemi SH (2021) Analysis of fracture energy in drop weight tear testing of API X65. J. of Pipeline Science and Eng., 1: 225-232.
- [21] Fathi-Asgarabad E and Hashemi SH (2021) Experimental study of low velocity impact effect on fracture energy of API X65 steel using drop weight tear test. J. Solid and Fluid Mech. 11(2): 57-71.
- [22] Majidi-Jirandehi AA and Hashemi SH (2018) Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. Mod. Mech. Eng. 17(11): 219-228.
- [23] Tazimi M, Hashemi SH, Rahnama S (2020) Experimental study of fractire surface characteristics if inhomogeneously drop weight tear test specimen made from API X65 steel. J. of Solid Fluid Mech. 10 (1): 77-91.
- [24] Bashiri A, Hosseini M, Hatami H (2021) Experimental and numerical investigation on CK45,

- [39] Lucon E (2008) Influence of striking edge radius 2 vs 8 mm on instrumented Charpy data and absorbed energies. *Int. J. of Frac.* 153: 1-14.
- [40] Leis BN, Eiber RJ, (1998) Fracture propagation control in onshore transmission pipelines. *Onshore Pipeline Technology Conference*, 2.1-2.35.
- energy and microstructure in API X65 steel. *Int. J. of Press. Vess. Pip.* 98: 8-15.
- [37] ASTM E23-16b (2016) Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- [38] Hashemi SH (2011) Strength hardness statistical correlation in API X65 steel. *Mat. Sci. and Eng. A*, 528: 1648-1655.