



DOR:

بررسی اثر ضربه کم سرعت بر انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار ماشین کاری شده در فولاد API X65

احسان فتحی عسگرآباد^۱ و سید حجت هاشمی^{۲*}

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

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر ضربه کم سرعت بر انرژی شکست نمونه آزمایشگاهی ضربه سقوطی از جنس فولاد API X65 است. در اثر اعمال ضربه، تغییر شکل دائم در نمونه ایجاد می‌شود که می‌تواند انرژی شکست فولاد را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین بررسی اینکه این تغییر شکل چه میزان انرژی شکست نمونه را تغییر می‌دهد، اهمیت دارد. نمونه آزمایشگاهی حاوی شیار شورن به عمق ۵/۱ میلی‌متر است. نمونه‌ها از بدنه لوله فولادی با درز جوش مارپیچ با قطر خارجی ۱۲۱۹ و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر جدا شدند. آزمایش انجام شده در دو مرحله روی ۱۸ نمونه در ۶ گروه سه تایی انجام شد. در مرحله اول از آزمایش، ارتفاع سقوط چکش طوری در نظر گرفته شد که نمونه‌ها شکسته نشده و فقط ناحیه مجاور نوک ترک وارد منطقه پلاستیک شود. در ادامه با اعمال ضربه دوم از ارتفاع ۲ متری تمامی نمونه‌ها شکسته شدند. با ترسیم نمودار انرژی شکست بر حسب انرژی منتقل شده به نمونه مشاهده شد، افزایش انرژی در مرحله اول آزمایش، انرژی شکست نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. در انتها یک رابطه خطی با دقت قابل قبول برای این کاهش انرژی پیشنهاد شد که رابطه مستقیم بین انرژی شکست را با انرژی ضربه اولیه نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آزمایش ضربه سقوطی؛ فولاد API X65؛ ضربه کم سرعت؛ انرژی شکست؛ شیار شورن.

Experimental Study of Low Velocity Impact Effect on Fracture Energy of API X65 Steel Using Drop Weight Tear Test

E. Fathi-Asgarabad¹, S. H. Hashemi^{2,*}

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran.

² Prof., Mech. Eng., University of Birjand., Birjand, Iran.

Abstract

The purpose of this research is to investigate the effect of low velocity impact on fracture energy of DWTT specimen made of API X65 steel. Permanent deformation occurs in specimen by impact, which can affect the fracture energy of tested steel. Therefore, it is important to investigate how much this deformation changes the fracture energy of test samples. All examined specimens had Chevron notch of 5.1 mm depth, cut from a spiral seam welded pipe with 1219mm outside diameter and 14.3mm wall thickness. Experiments were performed in two stages on 18 samples in 6 groups, consisting of three samples. In the first stage, hammer drop height was low and specimens did not fail. However, only the area adjacent to the crack tip experienced plastic deformation. Subsequently, all samples were fractured by applying a second impact from 2m height. By plotting the fracture energy in terms of the energy transferred to the sample, it was observed that increasing the energy in the first stage of experiment, reduced fracture energy of the specimens. Finally, a linear relationship with acceptable accuracy for this energy drop was proposed, which showed a direct relationship between the fracture energy and the initial impact energy.

Keywords: Drop Weight Tear Test; API X65 Steel; Low Velocity Impact; Absorbition Energy; Chevron Notch.

۱- مقدمه

آزمایش ضربه سقوطی یک آزمایش استاندارد صنعتی است که از آن برای بدست آوردن انرژی شکست و تعیین ویژگی های سطح شکست نمونه های فولادی استفاده می شود [۱]. علاوه بر این آزمایش، آزمایش های مشابه دیگری مانند ضربه شاری وجود دارد که با همین هدف طراحی و برای نمونه های کوچکتر در صنعت نفت و گاز قابل استفاده است. در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه آزمایشگاهی بر خلاف نمونه آزمایش ضربه شاری، بزرگتر بوده و ضخامتی برابر با ضخامت خود لوله دارد. این ویژگی باعث می شود، نتایج حاصل شده از آزمایش ضربه سقوطی به واقعیت نزدیک تر باشد [۲].

مزیت دیگر این آزمایش در نمایش مسیر رشد ترک است که به دلیل زیاد بودن ناحیه بدون ترک اولیه^۱، سطح شکست بزرگتری را جهت مطالعات بعدی و شکست نگاری در اختیار قرار می دهد [۳-۴].

در آزمایش ضربه سقوطی مطابق استاندارد API 5L3 از نمونه مستطیلی با یک شیار در سطح زیرین آن استفاده می شود که تحت کشش قرار می گیرد. سرعت اولیه ضربه بسته به استحکام و ضخامت نمونه از ۵ تا ۹ متر بر ثانیه قابل تغییر است که این سرعت با تغییر ارتفاع چکش تنظیم می شود [۱]. همچنین نرخ کرنش در این آزمایش در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه متغیر است [۵، ۶].

هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر ضربه کم سرعت (ضربه ای که انرژی آن کمتر از انرژی شکست فولاد بوده و نمونه پس از ضربه دچار شکست نمی شود و فقط ناحیه مجاور نوک ترک دچار تغییر شکل پلاستیک می شود) بر انرژی شکست فولاد API X65 با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی است. در مطالعات صورت گرفته قبلی، اسشایدنر و همکاران مقاومت در برابر شکست دینامیکی سه فولاد با گرید API X65، API X80 و API X100 را بررسی کردند. آزمایش صورت گرفته در گرید API X65 روی نمونه ای به ضخامت ۱۹ میلی متر با شیار پرسی (شیاری که توسط دستگاه پرس ایجاد می شود و ظاهر V شکل دارد) صورت گرفت. مقدار انرژی شکست تجربی و عددی در این آزمایش به ترتیب

۱۳۲۷۰ و ۱۱۹۸۰ ژول با درصد خطای ۹/۷۲ بدست آمد [۷]. فتحنی و هاشمی در پژوهشی انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی از جنس API X65 را به صورت عددی و تجربی تعیین کردند. هدف از این تحقیق تخمین مقاومت ماده در برابر شکست بود. نمونه آزمایشگاهی تحت بارگذاری دینامیکی (بارگذاری ضربه ای) با سرعت اولیه ۶/۳ متر بر ثانیه قرار گرفت. با ترسیم منحنی نیرو-جابجایی و محاسبه سطح زیر آن مقدار انرژی شکست نمونه آزمایشگاهی برای داده های تجربی و مدل سازی کامپیوتری به ترتیب ۷۰۸۵ و ۶۸۰۰ ژول به دست آمد [۸]. در پژوهشی دیگر فتحنی و هاشمی به بررسی تجربی و عددی جذب انرژی حین اعمال ضربه در آزمایش ضربه سقوطی پرداختند. در این پژوهش با ترسیم و تحلیل داده های آزمایشگاهی یک رابطه خطی بین انرژی جذب شده توسط نمونه و سرعت چکش بدست آمد. به کمک این رابطه با معلوم بودن سرعت چکش حین اعمال ضربه می توان انرژی جذب شده توسط نمونه را محاسبه کرد [۹].

سیاح و همکاران به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل غیر الاستیک ورق های دایروی، مستطیلی و مثلثی تحت بارگذاری هیدرو دینامیکی با سرعت پایین توسط چکش پرتابه ای پرداختند. آزمایش ها تحت سطوح انرژی مختلف با تغییر ارتفاع و جرم چکش انجام گرفت و بیشترین خیز دائمی ورق به عنوان خروجی آزمایش ثبت شد. نتایج نشان داد، ارتفاع وزنه بیشترین تأثیر و جرم چکش نیز کمترین اثر بر پاسخ را داشت [۱۰].

در سال ۲۰۱۶ پژوهش دیگری توسط یو و همکاران روی تحلیل جذب انرژی^۲ در نمونه های استاندارد آزمایش سقوط آزاد وزنه از جنس API X80 با استفاده از مدل المان محدود و ناحیه چسبنده^۳ صورت گرفت. انرژی لازم برای شکست نمونه با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو جابجایی ۵۰۸۲ ژول بدست آمد. در این تحقیق نشان داده شد در نمونه های با چقرمگی بالا تنها حدود ۶۰ درصد انرژی جذب شده صرف رشد ترک^۴ می شود و بخش زیادی از انرژی صرف تغییر شکل

² Absorption Energy

³ Cohesive Zone (CZ)

⁴ Crack Growth

¹ Ligament

انتهای سطح شکست نشان می‌دهد که بارگذاری از حالت کششی در ریشه شیار به بارگذاری برشی در انتهای سطح شکست تبدیل می‌شود [۱۵].

فانگ و همکاران به ارزیابی ترک روی لوله‌های خطوط انتقال با استفاده از نمونه‌های آزمایش ضربه سقوطی پرداختند. در این تحقیق دو نمونه A و B به ترتیب با ضخامت‌های ۳۱ و ۱۹ میلی‌متر تحت شکست قرار گرفتند. با ترسیم نمودار نیرو-تغییرمکان ملاحظه شد، رفتار شکست برای هر دو گروه از نمونه‌ها به لحاظ شکل ظاهری شباهت بسیاری دارند. تنها در قطعه A انرژی جذب شده در آزمایش ضربه سقوطی افزایش یافته است. در این پژوهش سطوح شکست نمونه‌های A و B نیز بررسی شدند که شباهت بسیار زیادی را از نظر ظاهری به هم داشتند [۱۶].

طیبی منش و هاشمی در پژوهشی آزمایش ضربه کم سرعت را روی نمونه‌های استاندارد شارپی انجام دادند. پیش از انجام آزمایش ضربه کم سرعت، آزمایش ضربه شارپی روی نمونه‌های استخراج شده از فلز پایه صورت گرفت و انرژی شکست میانگین برای سه نمونه ۲۵۸ ژول بدست آمد. در بخش دیگر ۱۲ نمونه در چهار گروه جداگانه آزمایش شدند. در ابتدا به سه نمونه انرژی اولیه ۳۰ ژول (معادل ۱۱/۶ درصد انرژی شکست نمونه) وارد گردید. سپس برای نمونه‌های دیگر انرژی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ژول اعمال شد. در مرحله بعد تمامی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ضربه شارپی ۷۵۰ ژول شکسته شدند. با بررسی نتایج ملاحظه شد با افزایش انرژی ضربه اولیه انرژی شکست نمونه کاهش می‌یابد [۱۷].

در پژوهش حاضر اثر ضربه کم سرعت بر انرژی شکست فولاد API X65 توسط آزمایش ضربه سقوطی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که ممکن است، در مواردی در اثر ضربه ناگهانی یا پیش بارگذاری^۴ انرژی شکست فولاد تحت تأثیر قرار گیرد، بررسی این موضوع اهمیت پیدا می‌کند. این ضربه ناگهانی ممکن است، در اثر عواملی مانند جابجایی و یا در مرحله نصب لوله‌ها صورت پذیرد. در اثر ضربه و ایجاد تغییر شکل پلاستیک در لوله انتظار می‌رود، انرژی شکست کاهش یابد؛ بنابراین، نیاز به محاسبه انرژی شکست فولاد پس از اعمال ضربه کم سرعت است. با توجه به اینکه

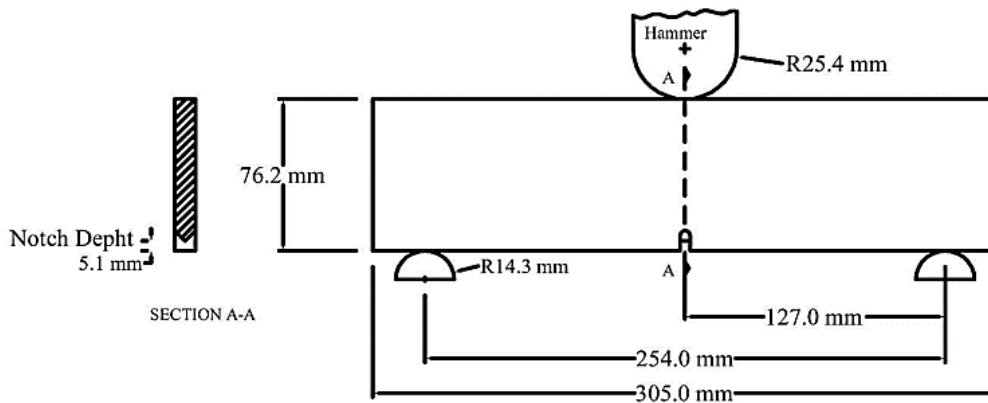
پلاستیک^۱ در نواحی تکیه‌گاه‌ها و ناحیه برخورد چکش با نمونه شده است [۱۱]. رودلند و همکاران چندین آزمایش ضربه سقوطی را روی نمونه فولاد API X70 برای اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک^۲ و بدست آوردن چقرمگی شکست نرم حالت پایدار برای لوله‌های خطوط انتقال انجام دادند. در آزمایش‌های صورت گرفته با معلوم بودن جرم چکش، سرعت چکش و منحنی نیرو-زمان، تغییرمکان چکش با دو بار انتگرال‌گیری از منحنی نیرو-زمان بدست آمد. در ادامه با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مقدار انرژی شکست برای نمونه API X70 برابر ۴۵۰۰ ژول بدست آمد [۱۲]. هاری و همکاران با اصلاح مدل آسیب ژو-ویزبیکی اثرات نرخ کرنش^۳ را در نمونه فولادی API X70 در کد المان محدود پیاده‌سازی کردند. سپس به بررسی پاسخ دینامیکی و استاتیکی این نمونه در آزمایش خمش سه نقطه‌ای پرداختند. در این تحقیق دو تفاوت عمده بین بارگذاری استاتیکی و دینامیکی حاصل شد. با مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی مشاهده شد، اثرات نرخ کرنش در مقدار انرژی شکست و مقدار نیروی حداکثر تأثیر می‌گذارد. نتیجه دیگر آن با بررسی سطح شکست در نمونه حاصل شده است. سطح شکست در آزمایش دینامیکی برشی است؛ در حالیکه در آزمایش استاتیکی مود اول شکست (مود بازشوندگی) با کمی اعوجاج در لبه‌های ترک مشاهده شده است؛ همچنین، در تحلیل استاتیکی پدیده تونل‌زنی ترک از همان ابتدا شکل سهموی دارد و بر خلاف تحلیل دینامیکی تا انتها شکل ترک ثابت و سهموی باقی می‌ماند [۱۳، ۱۴]. تعظیمی و هاشمی در پژوهشی به بررسی تجربی ویژگی‌های سطح شکست نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) با استفاده از آزمایش سقوط آزاد وزنه پرداختند. در این پژوهش شکست‌نگاری نمونه نامتجانس (با درز جوش افقی) آزمایش سقوط آزاد وزنه از جنس فولاد API X65 برای اولین بار انجام شد. در عکس-های حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در هر سه ناحیه (فلز پایه، متأثر از حرارت و جوش)، علائم شکست نرم مشاهده شد که شامل حفره‌های مخروطی با اندازه، جهت و شکل متفاوت است. بررسی حفره‌های مخروطی از ابتدا تا

^۱ Plastic Deformation

^۲ Crack Tip Opening Displacement (CTOD)

^۳ Strain Rate Effects

^۴ Pre Loading



Chevron Notch

شکل ۱- ابعاد نمونه آزمایشگاهی مطابق با استاندارد [۱۸]



شکل ۲- تصویر نمونه فولادی قرار گرفته زیر چکش

ضخامت نمونه استخراج شده در این پژوهش با ضخامت لوله یکسان است، نتایج این آزمایش بیشتر به واقعیت نزدیک است؛ همچنین تجهیزات نصب شده از قبیل مدار کرنش سنج (استفاده شده در تحقیق حاضر) و شتاب سنج روی چکش نتایج دقیق تری را در اختیار قرار می دهد.

۲- معرفی هندسه و خواص مکانیکی نمونه

نمونه های آزمایش شده در این تحقیق از جنس فولاد API X65 می باشد که مشخصات مربوط به آن، توسط موسسه بین المللی نفت آمریکا^۱ استاندارد شده است [۱۸]. این نمونه ها از نوع شیاردار لبه ای با سطح مقطع مستطیلی است. ابعاد و اندازه نمونه استاندارد در شکل ۱ نمایش داده شده است؛ همچنین، تصویر واقعی نمونه فولادی، قرار گرفته زیر دستگاه آزمایش ضربه سقوطی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است [۸].

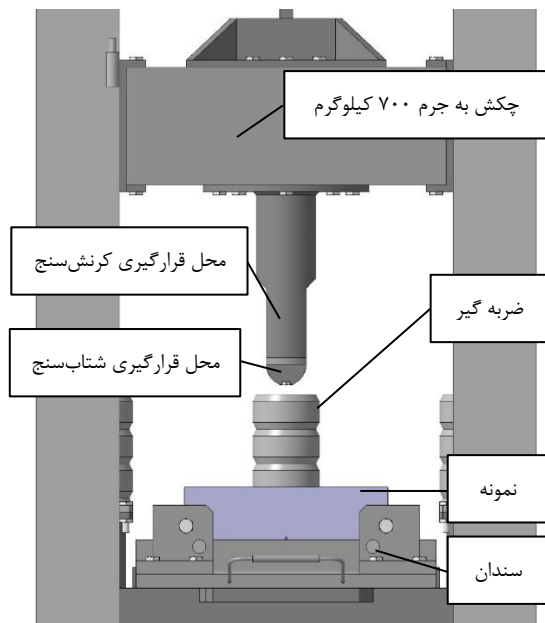
جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد API X65 [۸]

تنش تسلیم در جهت محیطی (MPa)	چگالی (kg/m ³)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)
۵۰۵	۷۸۰۰	۰/۳	۲۱۰

^۱ American Petroleum Institute (API)

۳- روش انجام آزمایش

در تحقیق حاضر اثر ضربه کم سرعت بر انرژی شکست فولاد در لوله فولادی API X65 با حداقل تنش تسلیم ۴۴۸ مگاپاسکال با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی متر با استفاده از آزمایش ضربه سقوطی بررسی شد. ظرفیت دستگاه با توجه به جرم چکش (۷۰۰ کیلوگرم) و حداکثر ارتفاع سقوط (۳ متر) تقریباً ۲۱ کیلوژول است. در شکل ۳ تصویر دستگاه آزمایش ضربه سقوطی استفاده شده در تحقیق حاضر نشان داده شده است؛ همچنین، تصویری از محل قرارگیری چکش و نمونه آزمایشگاهی به همراه محل



شکل ۴- نمایش شماتیک چکش و نمونه

در شکل ۵ این چهار مرحله نشان داده شده است. در خصوص مرحله اول برش نمونه‌ها هم می‌تواند با حرارت صورت گیرد و هم با تراشکاری که در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است. 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. در مرحله سوم فرایند مسطح‌سازی صورت می‌گیرد که خود می‌تواند باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک داخل نمونه شود. طبق استاندارد API 5L3 این فرایند یکی از مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی به شمار می‌رود و باید از اثرات آن صرف نظر شود. در غیر این صورت نمونه هنگام تماس با چکش دچار پیچش می‌شود و آزمایش دیگر اعتبار نخواهد داشت. نکته مهم یکسان در نظر گرفتن شرایط پرسکاری در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی است. با توجه به اینکه همه نمونه‌ها با شرایط یکسان مسطح می‌شوند، اثر این عملیات در تمامی نمونه‌ها یکسان خواهد بود [۱].

تعداد نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق ۲۱ نمونه است که در ۷ گروه A تا G (هر گروه سه نمونه) دسته‌بندی شدند. از این نمونه‌ها، ۱۸ نمونه (نمونه‌های گروه A تا F) قبل از شکست تحت ضربه کم سرعت در سطوح مختلف انرژی قرار



شکل ۳- دستگاه ضربه سقوطی استفاده شده در تحقیق حاضر

نصب مدار کرنش سنج و شتاب سنج جهت ثبت نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی می‌توان بخش آزمایشگاهی این تحقیق را به سه بخش تقسیم کرد:

- ۱- آماده‌سازی نمونه‌ها
- ۲- انجام آزمایش ضربه کم سرعت جهت ایجاد تغییر شکل پلاستیک در مجاورت نوک ترک
- ۳- انجام آزمایش ضربه جهت شکست نمونه‌ها

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش ابتدا باید نمونه‌ها از لوله جدا و به ابعاد استاندارد رسانده شوند؛ بنابراین، چهار مرحله کلی زیر جهت آماده‌سازی نمونه‌ها انجام شده است:

- ۱- برش اولیه نمونه‌ها از لوله اصلی با درز جوش ماریچ.
- ۲- رساندن نمونه به ابعاد استاندارد با استفاده از عملیات برشکاری و تراشکاری.
- ۳- پرسکاری جهت از بین بردن انحنای نمونه.
- ۴- ایجاد شیار شوررون مطابق با استاندارد API 5L3 با استفاده از دستگاه وایرکات.



شکل ۵- مراحل آماده‌سازی نمونه؛ الف) برش اولیه از لوله، ب) رساندن نمونه به ابعاد استاندارد، ج) مسطح سازی و د) ایجاد شیار



شکل ۶- نمایش تعدادی از نمونه‌های فولادی قبل از آزمایش



شکل ۷- نمایش تجهیزات متصل به دستگاه ضربه سقوطی جهت ثبت نتایج شتاب سنج و کرنش سنج

گرفته و ۳ نمونه دیگر (نمونه‌های گروه G) بدون اعمال ضربه کم سرعت مستقیماً با سقوط چکش از ارتفاع ۲ متری شکسته شدند. تعدادی از این نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

۳-۲- انجام آزمایش ضربه کم سرعت

هدف از انجام آزمایش ضربه کم سرعت ایجاد تغییر شکل پلاستیک کوچک در مجاورت نوک ترک است. برای این منظور ابتدا چکش از ارتفاع‌های مشخص روی نمونه‌های آزمایشگاهی سقوط کرد؛ به طوری که پس از برخورد، نمونه‌ها دچار شکست نشده و فقط ناحیه مجاور نوک ترک وارد منطقه پلاستیک شود. همان طور که اشاره شد، در مرحله اول از آزمایش فقط نمونه‌های گروه A تا F تحت ضربه کم سرعت قرار گرفتند. چکش دستگاه ضربه سقوطی مجهز به دو مدار کرنش سنج و شتاب سنج جهت ثبت نتایج است. با تکمیل آزمایش‌ها، داده‌های حاصل از مدار کرنش سنج و شتاب سنج توسط تجهیزات متصل به دستگاه ضربه سقوطی استخراج و وارد نرم افزار اکسل شدند. این تجهیزات در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودارهای بدست آمده در صفحه اسیلوسکوپ به صورت ولتاژ بر حسب زمان است.

شده است. در شکل ۸ تصویر تعدادی از نمونه‌ها نشان داده شده است که تحت ضربه کم سرعت قرار گرفته‌اند.

۳-۳- انجام آزمایش ضربه جهت شکست نمونه‌ها
در مرحله آخر از آزمایش، تمامی نمونه‌هایی که قبلاً تحت ضربه کم سرعت قرار گرفتند (نمونه‌های گروه A تا F) به همراه نمونه‌های گروه G از ارتفاع استاندارد ۲ متری تحت ضربه مجدد واقع شدند. این ارتفاع به گونه‌ای انتخاب شده است که سرعت چکش در لحظه برخورد به نمونه در محدوده تعریف شده در استاندارد API 5L3 (۵ تا ۹ متر بر ثانیه) قرار گیرد. با توجه به روابط انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل، سرعت اولیه ضربه مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (1)$$



شکل ۸- تصویر تعدادی از نمونه‌ها پس از اعمال ضربه کم سرعت

ارتفاع‌های سقوط و میزان انرژی ضربه کم سرعت در جدول ۲ مشخص شده‌اند. ارتفاع‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده که انرژی ضربه کم سرعت در محدوده ۳۰۰ تا ۲۱۰۰ ژول قرار گیرد. انرژی‌های بیشتر از ۲۱۰۰ ژول باعث تغییر شکل زیاد نمونه و رشد ترک شده و انرژی‌های کمتر از ۳۰۰ ژول تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی را در نمونه ایجاد نمی‌کند.

مطابق جدول ۲ مشاهده می‌شود با تغییر ارتفاع ضربه از ۵ سانتی‌متر تا ۳۰ سانتی‌متر مقدار انرژی ضربه از ۳۴۳ ژول تا ۲۰۶۰ ژول تغییر می‌کند. نسبت این دو انرژی به انرژی نهایی چکش (۱۳۷۳۴ ژول) که از ارتفاع ۲ متر روی نمونه سقوط می‌کند با صرف نظر کردن از اصطکاک بین ۲/۵ تا ۱۵ درصد است؛ همچنین سرعت ضربه از ۰/۹۹ متر بر ثانیه تا ۲/۴۲ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. این دو مقدار به ترتیب ۱۵/۸ درصد و ۳۸/۶ درصد سرعت سقوط چکش از ارتفاع ۲ متری (۶/۲۶ متر بر ثانیه) است. ذکر این نکته ضروری است، مقادیر انرژی ضربه کم سرعت در جدول ۲ با محاسبه انرژی پتانسیل چکش در ارتفاع‌های مختلف بدست آمده است. برای بررسی اینکه چه میزان از انرژی پتانسیل چکش توسط نمونه جذب شده است، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی محاسبه و مشاهده شد، تقریباً در تمامی موارد مقادیر انرژی جذب شده برابر همان انرژی پتانسیل چکش است. با توجه به صلب بودن سندان‌ها و چکش در مقایسه با نمونه بیشتر انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک داخل نمونه شده و توسط نمونه جذب

جدول ۲- طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس ارتفاع ضربه کم سرعت

گروه نمونه‌ها	ارتفاع ضربه کم سرعت (m)	نسبت ارتفاع ضربه کم سرعت به ارتفاع کل (%)	سرعت ضربه (m/s)	انرژی ضربه کم سرعت (J)
A	۰/۰۵	۲/۵	۰/۹۹	۳۴۳
B	۰/۱۰	۵	۱/۴۰	۶۸۶
C	۰/۱۵	۷/۵	۱/۷۱	۱۰۳۰
D	۰/۲۰	۱۰	۱/۹۸	۱۳۷۳
E	۰/۲۵	۱۲/۵	۲/۲۱	۱۷۱۶
F	۰/۳۰	۱۵	۲/۴۲	۲۰۶۰

وجود دارد. همان طور که مشاهده می شود، سطح شکست در این بخش تخت (مسطح) است که یکی از ویژگی های شکست ترد را نشان می دهد. با فاصله گرفتن از نوک ترک شکست نرم شروع شده و لبه های برشی در بالای نمونه ایجاد شده است.

یکی از شرایط صحت آزمایش ضربه سقوطی این است که نمونه چقرمگی لازم برای تبدیل شکست ترد به نرم را داشته باشد [۱۵]. با توجه به شکل (۹-ب) و (۹-ج) می توان به وضوح تبدیل شکست ترد به نرم را با فاصله گرفتن از نوک ترک مشاهده کرد.

به منظور مقایسه نتایج، نمودار نیرو-جابجایی برای همه نمونه ها ترسیم و میانگین آن ها گزارش گردید. شکل ۱۰ نمونه های گروه G را نشان می دهد که مستقیماً بدون اعمال ضربه اولیه از ارتفاع سقوط ۲ متری شکسته شدند. در شکل ۱۱ این نمودار برای نمونه های گروه A تا F نشان داده شده است. این نمونه ها ابتدا تحت ضربه کم سرعت قرار گرفته و بعد شکسته شدند. در نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۱۰ و ۱۱، منحنی سبز رنگ میانگین سه آزمایش را در هر گروه نشان می دهد.

در شکل ۱۰ دو ناحیه مختلف را می توان برای نمودار نیرو-جابجایی در نظر گرفت. ناحیه اول افزایش نیرو تا شروع ترک (ادغام و به هم پیوستن حفره ها) را نشان می دهد. در ناحیه دوم ترک شروع به رشد کرده و نیرو کاهش پیدا می کند. با محاسبه سطح زیر ناحیه اول انرژی مورد نیاز برای شروع ترک^۱ و با محاسبه سطح زیر ناحیه دوم انرژی مورد نیاز برای رشد ترک^۲ بدست می آید. با جمع سطح زیر این دو ناحیه انرژی شکست نمونه بدست می آید. با محاسبه سطح زیر نمودار سبز رنگ انرژی شکست میانگین برای سه نمونه آزمایشگاهی بدست می آید.

برای مقایسه بهتر نتایج، نمودار نیرو-جابجایی برای میانگین منحنی های شش گروه آزمایشگاهی A تا F در شکل ۱۲ ترسیم شده است.

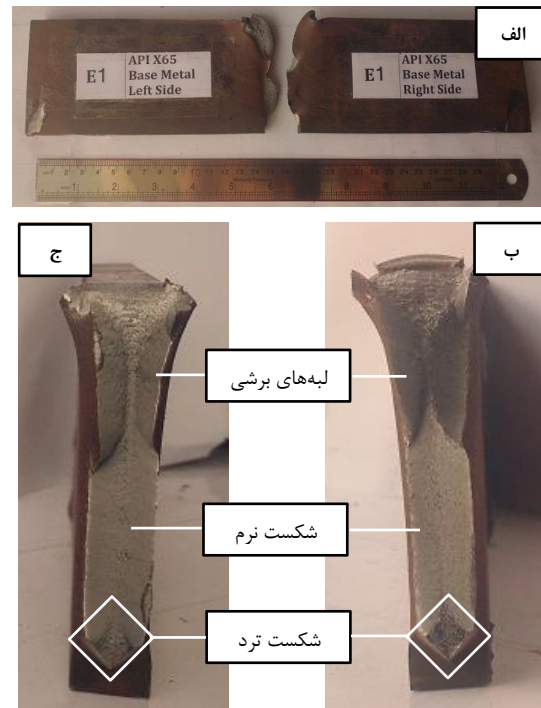
در شکل ۱۲ منحنی ها نشان می دهد، هر چه انرژی ضربه اولیه بیشتر باشد، سطح نمودار نیرو-جابجایی کاهش یافته و

در این رابطه V سرعت چکش در لحظه برخورد با نمونه، h ارتفاع سقوط چکش و g شتاب گرانش زمین است. با قرار دادن ارتفاع ۲ متر و شتاب گرانش $9/81$ متر بر مجذور ثانیه و با صرف نظر کردن از اصطکاک سرعت ضربه چکش در لحظه برخورد با نمونه حدود $6/26$ متر بر ثانیه بدست می آید.

۴- بررسی نتایج تجربی

با اعمال ضربه چکش از ارتفاع ۲ متری تمامی نمونه ها تحت شکست قرار گرفتند. تصویری از اولین نمونه شکسته شده از گروه E که تحت ضربه کم سرعت از ارتفاع ۲۵ سانتی متری با انرژی اولیه ۱۷۱۶ ژول قرار گرفته است، به همراه سطوح شکست آن در شکل ۹ نشان داده شده است. پس از ضربه نهایی، انرژی شکست این نمونه ۵۰۶۹ ژول بدست آمد.

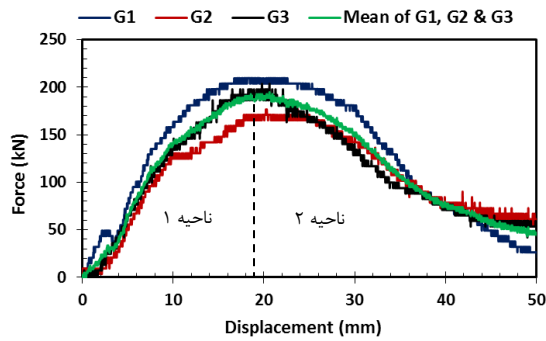
شکل ۹ رفتار نرم ماده را در برابر شکست نشان می دهد. با افزایش انرژی نمونه و افزایش تمرکز تنش در نوک شیار، رشد ترک شروع می شود. در نوک شیار شرایط شکست ترد



شکل ۹- الف) اولین نمونه شکسته شده از گروه E، ب) شکست ترد در مجاورت نوک ترک (نیمه سمت راست) و ج) شکست اولیه ترد در مجاورت نوک ترک (نیمه سمت چپ)

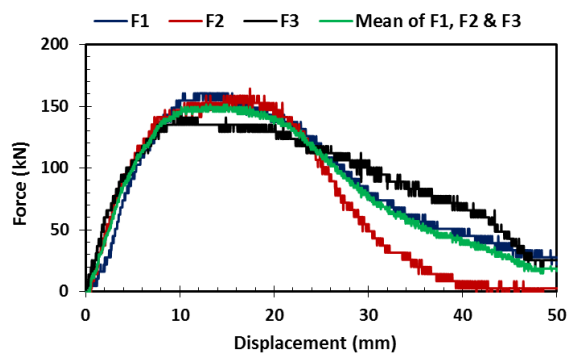
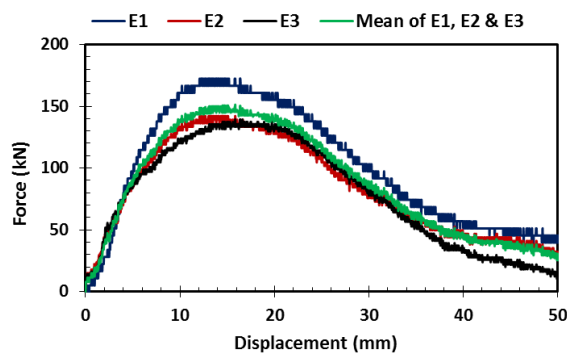
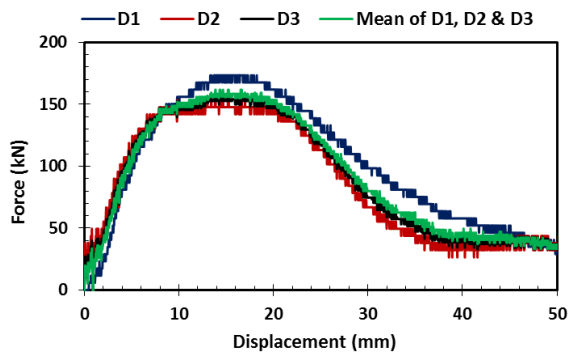
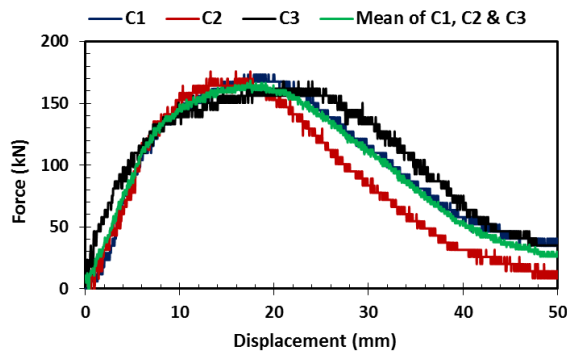
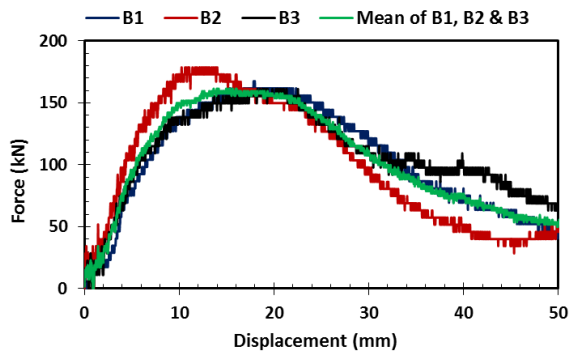
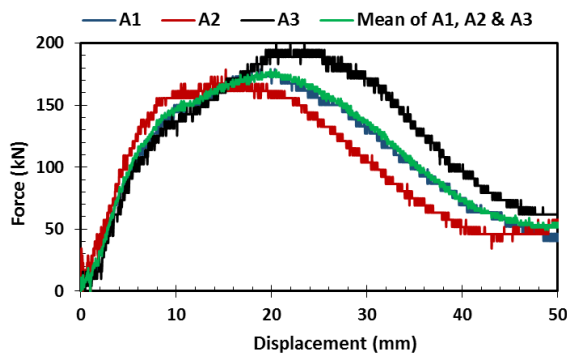
¹ Crack initiation

² Crack propagation



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های گروه G

شکست نمونه‌ها با انرژی کمتری انجام می‌شود. در این شکل نمونه‌های گروه F که ضربه اولیه ۲۰۶۰ ژول به آن اعمال شده است، سطح پایین‌تری دارد. همان‌طور که اشاره شد، ترک در نقطه‌ای شروع به رشد می‌کند که نیرو به حداکثر مقدار خود رسیده باشد. در این نقطه شیب نمودار نیرو-جابجایی صفر است؛ بنابراین، برای تعیین موقعیت شروع ترک باید از داده‌های نیرو بر حسب جابجایی مشتق گرفت و حاصل را برابر صفر قرار داد. با انجام این کار ترک در جابجایی ۱۹/۸۷ میلی‌متر برای نمونه‌های گروه A شروع به



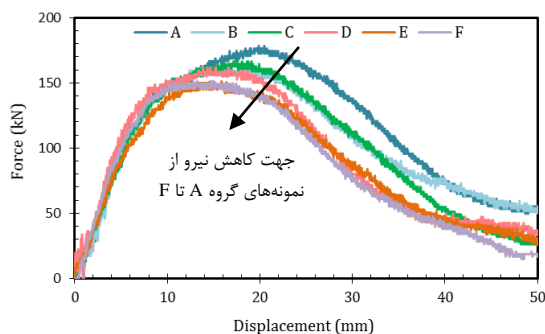
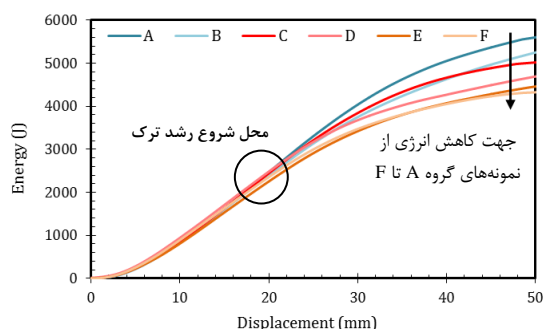
شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های گروه A تا F

آن در جدول ۳ ارائه گردید. با استفاده از داده‌های این جدول نمودار انرژی شکست میانگین بر حسب انرژی ضربه کم سرعت برای شش گروه آزمایشگاهی A تا F ترسیم و با یکدیگر مقایسه گردید. این نمودار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود با افزایش انرژی ضربه کم سرعت مقدار انرژی شکست کاهش یافته است. علت این کاهش انرژی را می‌توان به ایجاد ناحیه پلاستیک و تنش پسماند در مجاورت نوک ترک در اثر ضربه کم سرعت نسبت داد. وجود این تنش‌ها و اثرات کارسختی تأثیر منفی در چقرمگی شکست فولاد می‌گذارد؛ بنابراین، برای افزایش چقرمگی شکست فولاد باید اثرات کارسختی و تنش‌های پسماند در نمونه حذف شود [۱۹].

با عبور بهترین خط از داده‌های آزمایشگاهی (۶ نقطه) یک رابطه خطی بین انرژی شکست و انرژی ضربه کم سرعت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$y = -0.76x + 5812 \quad (2)$$



شکل ۱۲- مقایسه منحنی میانگین نیرو-جابجایی برای شش گروه آزمایشگاهی A تا F

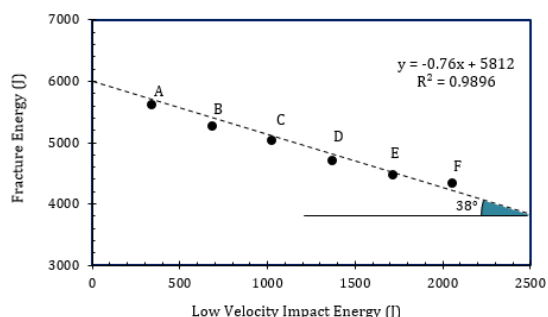
رشد کرده و با افزایش انرژی ضربه کم سرعت موقعیت شروع ترک تا جابجایی ۱۴/۶۶ میلی‌متر برای نمونه‌های گروه F کاهش می‌یابد.

با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی مقدار انرژی شکست برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. با توجه به گسسته بودن داده‌های آزمایشگاهی جهت محاسبه انرژی شکست از انتگرال‌گیری عددی به روش ذوزنقه‌ای استفاده شده است [۸]. همان‌طور که اشاره شد، مقدار انرژی محاسبه شده قبل از نیروی بیشینه، انرژی شروع ترک (انرژی لازم برای جوانه زنی و ادغام حفره‌ها) و مقدار این انرژی بعد از نیروی بیشینه، انرژی رشد ترک (انرژی لازم برای گسترش ترک و شکست نمونه) را نشان می‌دهد. نمودار انرژی-جابجایی برای میانگین داده‌های شش گروه آزمایشگاهی A تا F در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش انرژی ضربه اولیه مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد؛ همچنین با مقایسه این نمودار با نمودار شکل ۱۲ می‌توان گفت، ترک در نقطه‌ای شروع می‌شود که تقعر منحنی انرژی-جابجایی عوض می‌شود. این نقطه همان نقطه عطف در نمودار است. با توجه به اینکه نمودار انرژی-جابجایی با انتگرال‌گیری از نمودار نیرو-جابجایی بدست می‌آید؛ بنابراین مشتق دوم از نمودار انرژی-جابجایی برای تعیین نقطه عطف با مشتق اول از نمودار نیرو-جابجایی برای تعیین اکسترمم برابر است. به این ترتیب می‌توان گفت، موقعیت نیروی ماکزیمم در نمودار نیرو-جابجایی همان نقطه عطف در نمودار انرژی-جابجایی است.

برای بررسی وابستگی انرژی شکست به انرژی ضربه کم سرعت، میانگین انرژی شکست در هر گروه محاسبه و نتایج

شکل ۱۳- مقایسه نمودارهای انرژی-جابجایی



شکل ۱۴- نمودار انرژی شکست بر حسب انرژی ضربه کم سرعت

آمده از آزمایش حدود ۶ درصد اختلاف دارد. علت این اختلاف، پراکندگی داده‌های آزمایشگاهی نمونه‌های گروه G در مقایسه با سایر نمونه‌ها است. با توجه به چقرمگی بالای نمونه‌های آزمایشگاهی تقریباً ۵۰ درصد انرژی دستگاه (۱۳۷۳۴ ژول) صرف شکست نمونه‌ها شده است. به همین جهت پراکندگی مقادیر بدست آمده در جدول ۳ کمی زیاد بدست آمده است. پیشنهاد می‌شود، برای کاهش این پراکندگی چکش از ارتفاع بیشتری روی نمونه‌ها سقوط کند. به این ترتیب نرخ بارگذاری افزایش پیدا کرده و ضربه با سرعت بیشتری به نمونه‌ها اعمال می‌شود؛ همچنین استفاده

در این رابطه x انرژی ضربه کم سرعت و y انرژی شکست نمونه می‌باشد. با قرار دادن $x=0$ مقدار انرژی شکست برای نمونه‌ای بدست می‌آید که تحت ضربه کم سرعت قرار نگرفته است. مقدار این انرژی ۵۸۱۲ ژول است. با استفاده از رابطه ۲، تخمین انرژی شکست نمونه آزمایش شده در جدول ۴ ارائه شده است.

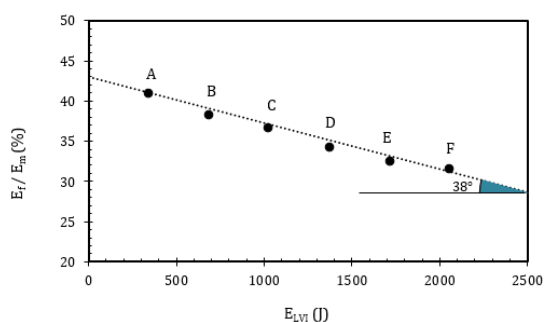
مطابق جدول ۴ ملاحظه می‌شود، رابطه خطی ۲ با دقت قابل قبولی می‌تواند مقدار انرژی شکست نمونه‌های گروه A تا F را تخمین بزند، ولی برای نمونه‌های گروه G مقدار انرژی شکست تخمین زده شده توسط این رابطه با مقدار بدست

جدول ۳- محاسبه انرژی شکست میانگین، انرژی شروع و رشد ترک برای داده‌های آزمایشگاهی

شماره نمونه‌ها	انرژی شکست (J)	انحراف معیار (J)	انرژی شروع ترک (J)	نسبت انرژی شروع ترک به انرژی شکست میانگین (%)	انرژی رشد ترک (J)	نسبت انرژی رشد ترک به انرژی شکست میانگین (%)	انرژی ضربه کم سرعت به انرژی شکست (J)	نسبت انرژی ضربه کم سرعت به انرژی شکست (%)
A1	۵۵۹۰							
A2	۵۱۸۳	±۳۵۴	۲۲۹۸	۴۱	۳۳۱۰	۵۹	۳۴۳	۶/۱۲
A3	۶۰۵۱							
B1	۵۳۰۶							
B2	۵۰۲۳	±۱۷۷	۱۹۴۹	۳۷	۳۳۱۱	۶۳	۶۸۶	۱۳/۰۴
B3	۵۴۵۱							
C1	۵۱۶۷							
C2	۴۴۷۸	±۳۹۸	۱۹۷۸	۳۹	۳۰۴۴	۶۱	۱۰۳۰	۲۰/۵۱
C3	۵۴۲۲							
D1	۵۱۰۷							
D2	۴۴۰۷	±۲۹۷	۱۵۹۷	۳۴	۳۱۰۲	۶۶	۱۳۷۳	۲۹/۲۲
D3	۴۵۸۲							
E1	۵۰۶۹							
E2	۴۲۸۳	±۴۳۸	۱۴۵۹	۳۳	۳۰۰۶	۶۷	۱۷۱۶	۳۸/۴۴
E3	۴۰۴۲							
F1	۴۵۱۰							
F2	۳۷۴۹	±۴۱۸	۱۳۰۱	۳۰	۳۰۲۷	۷۰	۲۰۶۰	۴۷/۶۱
F3	۴۷۲۴							
G1	۷۰۸۵							
G2	۵۶۰۵	±۶۴۴	۲۴۹۳	۴۰	۳۶۹۴	۶۰	-	-
G3	۵۸۷۲							

جدول ۴- محاسبه انرژی شکست تخمین زده شده با استفاده از رابطه ۲

وضعیت آزمایش	گروه نمونه‌ها	انرژی ضربه کم سرعت (J)	انرژی شکست آزمایشگاهی (J)	انرژی شکست تخمین زده شده با رابطه ۲ (J)	درصد خطا (%)
	A	۳۴۳	۵۶۰۸	۵۵۵۱	۱/۰۱
	B	۶۸۶	۵۲۶۰	۵۳۸۸	۰/۵۸
با اعمال ضربه کم سرعت	C	۱۰۳۰	۵۰۲۲	۵۰۲۹	۰/۱۴
	D	۱۳۷۳	۴۶۹۹	۴۷۶۸	۰/۱۴
	E	۱۷۱۶	۴۴۶۵	۴۵۰۷	۰/۹۸
	F	۲۰۶۰	۴۳۲۸	۴۲۴۶	۱/۸۷
بدون اعمال ضربه کم سرعت	G	-	۶۱۸۷	۵۸۱۲	۶/۰۶



شکل ۱۵- نمودار نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه بر حسب انرژی ضربه کم سرعت

در مرجع [۱۷] نتایج مشابهی برای آزمایش ضربه کم سرعت روی ۵ گروه نمونه شاریپ ارائه شد. آزمایش انجام شده با دستگاه ضربه شاریپ در کارخانه لوله سازی اهواز با ظرفیت ۷۵۰ ژول انجام شد. نتایج این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است.

با عبور بهترین خط از میانگین سه داده آزمایشگاهی معادله زیر برای تخمین انرژی شکست بدست آمد:

$$y = -0.33x + 255 \quad (3)$$

در این رابطه y انرژی شکست در آزمایش ضربه شاریپ و x انرژی ضربه کم سرعت است. شکل ۱۶ داده‌های آزمایشگاهی و خط برازش شده بر نقاط مختلف را نشان می‌دهد.

از یک شیار در بالای نمونه^۱ می‌تواند تا حد قابل توجهی انرژی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی را کاهش داده و این پراکندگی را کمتر کند.

محور عمودی نمودار شکل ۱۴ را می‌توان به صورت بی‌بعد نشان داد. برای این منظور باید داده‌های انرژی شکست (E_i) را بر انرژی دستگاه ($E_{im}=13734$ J) تقسیم کرد. با کم کردن انرژی شکست از انرژی دستگاه می‌توان مقدار انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیرها پس از پایان ضربه را محاسبه کرد. در جدول ۵ نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه بر حسب درصد و مقدار انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیرها پس از شکست کامل نمونه ارائه شده است.

این جدول نشان می‌دهد با افزایش انرژی ضربه اولیه انرژی لازم برای شکست نمونه از ۴۵ درصد انرژی دستگاه به ۳۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۱۵ نمودار نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه را بر حسب انرژی ضربه کم سرعت نشان می‌دهد.

در نمودار شکل ۱۵ با توجه به اینکه داده‌های انرژی شکست بر عدد ثابتی تقسیم شده‌اند، مشاهده می‌شود شیب خط گذرنده از داده‌ها با نمودار شکل ۱۴ یکسان بوده و همان ۳۸ درجه است.

^۱ Back Slot

جدول ۵- محاسبه نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه در پژوهش حاضر

وضعیت آزمایش	گروه نمونه‌ها	انرژی ضربه کم سرعت (J)	انرژی شکست آزمایشگاهی (J)	انرژی جذب شده توسط ضربه‌گیر (J)	نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه (%)
	A	۳۴۳	۵۶۰۸	۸۱۲۶	۴۰/۸
	B	۶۸۶	۵۲۶۰	۸۴۷۴	۳۸/۳
با اعمال ضربه کم سرعت	C	۱۰۳۰	۵۰۲۲	۸۷۱۲	۳۶/۶
	D	۱۳۷۳	۴۶۹۹	۹۰۳۵	۳۴/۲
	E	۱۷۱۶	۴۴۶۵	۹۲۶۹	۳۲/۵
	F	۲۰۶۰	۴۳۲۸	۹۴۰۶	۳۱/۵
بدون اعمال ضربه کم سرعت	G	-	۶۱۸۷	۷۵۴۷	۴۵

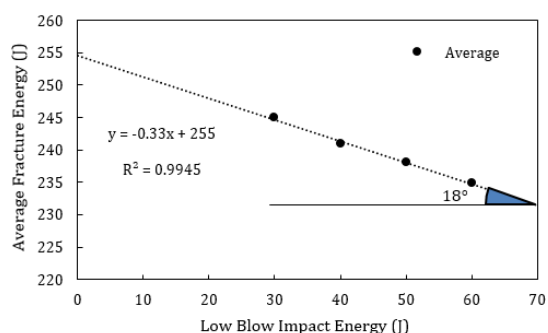
جدول ۶- محاسبه انرژی شکست نمونه‌های آزمایش ضربه شارپی در آزمایش ضربه کم سرعت

وضعیت آزمایش	گروه نمونه‌ها	انرژی ضربه کم سرعت (J)	انرژی شکست آزمایشگاهی (J)	نسبت انرژی شکست به انرژی دستگاه (%)
	۱	۳۰	۲۴۵	۳۲/۶
با اعمال ضربه کم سرعت	۲	۴۰	۲۴۱	۳۲/۱
	۳	۵۰	۲۳۸	۳۱/۷
	۴	۶۰	۲۳۵	۳۱/۳
بدون اعمال ضربه کم سرعت	۵	-	۲۵۸	۳۴/۴

مقدار ۲۵۸ ژول از جدول ۵ تطابق خوبی دارد. رابطه بدست آمده در این شکل به دلیل کم بودن انرژی‌های ضربه کم سرعت را نمی‌توان به معادله (۲) مرتبط کرد. در رابطه (۲) شیب نمودار ۳۸ درجه است که بیش از دو برابر شیب نمودار شکل ۱۴ است.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای نخستین بار اثر ضربه کم سرعت بر نمونه با شیار ماشین‌کاری شده از جنس فولاد API X65 از طریق آزمایش ضربه سقوطی بررسی شد. نتایج حاصل در این پژوهش از ترسیم منحنی‌های مربوطه عبارت است از:



شکل ۱۶- نمودار انرژی شکست بر حسب انرژی ضربه کم سرعت در آزمایش شارپی

در معادله نشان داده شده در شکل ۱۶ با قرار دادن $x=0$ مقدار انرژی شکست شارپی ۲۵۵ ژول بدست می‌آید که با

انرژی ماشین، J	E_m	۱- با ترسیم و مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شد با افزایش انرژی ضربه اولیه مقدار نیروی حداکثر در جابجایی کمتری صورت می‌گیرد.
شتاب گرانش، m/s^2	g	۲- در نمودار انرژی شکست بر حسب جابجایی نقطه عطف همان محل نیروی حداکثر را نشان می‌دهد.
ارتفاع سقوط چکش، m	h	۳- نقطه عطف در نمودار انرژی-جابجایی و نیروی حداکثر در نمودار نیرو-جابجایی موقعیت شروع ترک را نشان می‌دهد.
سرعت چکش، m/s	v	۴- ترسیم نمودار انرژی شکست بر حسب انرژی ضربه اولیه نشان می‌دهد با افزایش انرژی ضربه اولیه، انرژی شکست کاهش می‌یابد.
انرژی ضربه کم سرعت، J	x	۵- با عبور یک خط از داده‌های بدست آمده یک رابطه خطی برای بیان ارتباط بین انرژی شکست با انرژی ضربه کم سرعت ارائه شد. به این ترتیب با معلوم بودن انرژی ضربه اولیه می‌توان انرژی شکست نمونه را در آزمایش ضربه سقوطی تخمین زد.
انرژی شکست، J	y	۶- با مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با مرجع [۱۷] ملاحظه شد، شیب خط برازش بر داده‌های آزمایشگاهی در آزمایش ضربه سقوطی حدود دو برابر شیب خط در آزمایش ضربه شاریبی است.

۸- مراجع

- [1] API Specification 5L (2012) Specification for Line Pipe. 45th edn. American Petroleum Institute (API). Washington DC.
- [2] Dieter GE. (1961) Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill, United State of America: 370-390.
- [3] Zhao J, Hu W, Wang X, Kang J, Yuan G, Di H, Misra RDK (2016) Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. *Mat Sci Eng A-Struct* 666: 214-224.
- [4] Majidi-Jirandehi A, Hashemi SH (2017) Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering* 17(11): 219-228. (In Persian)
- [5] Ferahat H, Ahmadi-Brooghani SY (2017) Studying the behavior of A356/SiCp composite foam under low-velocity impact loading. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7(2): 129-147. (In Persian)
- [6] Jonson W (1972) Impact strength of materials. Edward Arnold Co.
- [7] Scheider I, Nonn A, Lee S, Völling A, Mondry A, Kalwa C (2014) A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines, 20th European Conference on Fracture (ECF20), Procedia Materials Science 3, Trondheim, Norway: 1956-1964.
- [8] Asgarabad EF, Hashemi SH (2020) Experimental measurement and numerical evaluation of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch on API X65 steel. *Modares Mechanical Engineering* 20(5): 1145-1156. (In Persian)
- [9] Asgarabad EF, Hashemi SH (2020) Experimental and numerical study of energy absorbtion in drop weight tear test specimen with Chevron notch on API X65 steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(2): 95-110. (In Persian)

۶- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به جهت در اختیار قرار دادن فولاد API X65 جهت آزمایش قدردانی می‌شود؛ همچنین، از شرکت گاز استان خراسان جنوبی جهت حمایت مالی در بخشی از طرح پژوهشی ساخت دستگاه آزمایش سقوط آزاد وزنه تشکر می‌نماید.

۷- فهرست علائم

شتاب چکش، m/s^2	a
انرژی شکست، J	E_f
انرژی ضربه کم سرعت، J	E_{LVI}

- [15] Tazimi M, Hashemi SH, Rahnama S (2020) Experimental Study of Fracture Surface Characteristics of Inhomogeneous Drop Weight Tear Test Specimen Made from API X65 Steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(1): 77-91. (In Persian)
- [16] Fang J, Zhang J, Wang L (2014) Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel from DWTT Specimens. *Eng Fract Mech* 124-125: 18-29.
- [17] Moradpour MA, Tayebimanesh AS, Hashemi SH (2017) Study of low velocity impact on charpy fracture energy in API X65 steel. 25th Annual Conference of Mechanical Engineering (ISME), Department of Mechanical Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.
- [18] API RP 5L3 (1996) Recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe. 3rd edn. American Petroleum Institute (API). Washington DC: 1-9.
- [19] Godse R, Gurlan J, Suresh S (1988) Effects of residual stresses in fracture toughness testing of hard metals. *Mat Sci Eng A-Struct* 105-106: 383-387.
- [10] Sayah Badkhor M, Mirzababaie mostofi T, Babaei H (2020) Low-velocity impact response of plate with different geometries under hydrodynamic load: Experimental investigation and process optimization by response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering* 20(4):807-818.
- [11] Yu PS, Ru CQ (2016) Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Eng Fract Mech* 160: 138-146.
- [12] Rudland DL, Wilkowski GM, Feng Z, Wang YY, Horsley D, Glover A (2003) Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. *Eng Fract Mech* 70: 567-577.
- [13] Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR (2014) Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the Drop-Weight Tear Test. *Eng Fract Mech* 118: 66-82.
- [14] Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR (2015) Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches. *Engineering Fracture Mechanics*. 148: 304-323.