



Experimental Measurement and Numerical Evaluation of Fracture Energy in Drop Weight Tear Test Specimen with Chevron Notch in API X65 Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fathi-Asgarabad E.¹ MSc,
Hashemi S.H.*¹ PhD

How to cite this article

Fathi-Asgarabad E, Hashemi S.H. Experimental Measurement and Numerical Evaluation of Fracture Energy in Drop Weight Tear Test Specimen with Chevron Notch in API X65 Steel. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1145-1156.

ABSTRACT

One of the most important purposes of the drop weight tear test (DWTT) is to achieve the value of fracture energy for better evaluation of tested steel properties. In the present research, experimental and numerical measurement of fracture energy in drop weight tear test specimen with chevron notch on API X65 steel has been carried out. The purpose of the determination of this energy is to estimate the strength of material due to fracture. The test specimen was cut from an actual spiral seam welded steel pipe of API X65 grade with an outside diameter of 1219mm and wall thickness of 14.3mm and then it has been machined to standard size. Then chevron notch with a length of 5.1 was placed in the middle of the specimen and the specimen was fractured under dynamic loading with an initial impact velocity of 6.3m/s. The maximum force of 229kN and 225kN were achieved for experimental and numerical data, respectively by drawing force-displacement and energy-displacement curves. The fracture energy of the test sample for experimental and numerical data was obtained as 7085J and 6800J, respectively by evaluation of the area under the force-displacement curve. Based on the results of experimental curves, about %59 of fracture energy was used for crack propagation and the remaining was used for crack initiation and plastic deformation of test sample near anvils and striker regions. In the end, drawing a linear curve for fracture energy of specimen based on the hammer velocity showed that the slope of this curve could be a good criterion for estimating the energy loss and fracture behavior of the test specimen.

Keywords Drop Weight Tear Test; Gas Transportation Pipeline Steel; API X65 Steel; Fracture Energy

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran
Phone: +98 (56) 32202142
Fax: -
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: July 20, 2019
Accepted: October 13, 2019
ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Mechanical Metallurgy [2] Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling [3] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel [4] Specification for Line Pipe [5] Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines [6] A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines [7] Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading [8] Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel [9] Experimental investigation of CTOA in linepipe steels [10] Simulation of ductile crack propagation in high-strength pipeline steel using damage models [11] Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test [12] Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches [13] Recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe [14] Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp; 2013 [15] Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar [16] Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1, yield criteria and flow rules for porous ductile media [17] Comparison of experimental and numerical fracture energy of thermo-mechanical steel in drop weight tear test [18] Impact Testing and Fracture Toughness [19] Numerical methods for engineers and scientists [20] Simulation of ductile crack propagation in high-strength pipeline steel using damage model

اندازه‌گیری تجربی و برآورد عددی انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار ماشین‌کاری‌شده در فولاد API X65

احسان فتحی‌عسگرآباد MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سیدحجت هاشمی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

یکی از اهداف مهم در آزمایش ضربه سقوطی به دست آوردن مقدار انرژی شکست به منظور ارزیابی بهتر خواص فولاد آزمایش شده است. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری تجربی و برآورد عددی انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار ماشین‌کاری‌شده در فولاد API X65 انجام شده است. هدف از تعیین این انرژی تخمین مقاومت ماده در برابر شکست است. نمونه آزمایشگاهی از بدنه لوله فولادی با درز جوش ماریچ با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر بریده و تا ابعاد استاندارد ماشین‌کاری شده است. سپس در وسط نمونه شیار شورن به طول ۵/۸ میلی‌متر ایجاد و نمونه تحت بارگذاری دینامیکی با سرعت اولیه ۶/۳ متر بر ثانیه قرار گرفت. با ترسیم منحنی‌های نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی مقدار حداکثر نیرو برای داده‌های آزمایشگاهی ۲۲۹ کیلو نیوتن و از طریق مدل‌سازی کامپیوتری ۲۲۵ کیلو نیوتن به دست آمد. با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مقدار انرژی شکست نمونه آزمایشگاهی برای داده‌های تجربی و مدل‌سازی کامپیوتری به ترتیب ۷۰۸۵ و ۶۸۰۰ ژول به دست آمد. بررسی منحنی‌های تجربی به دست آمده نشان داد که حدود ۵۹٪ انرژی صرف رشد ترک شده و مابقی صرف شروع ترک و تغییر شکل پلاستیک در نواحی سندان‌ها و ناحیه زیر چکش شده است. در انتها با ترسیم منحنی خطی انرژی شکست نمونه برحسب سرعت چکش نشان داده شد که شیب این منحنی معیار خوبی برای بررسی اتلاف انرژی و رفتار شکست ماده است.

کلیدواژه‌ها: آزمایش ضربه سقوطی، لوله فولادی انتقال گاز، فولاد API X65، انرژی شکست، مدل المان محدود

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۱

*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

آزمایش ضربه سقوطی (Drop weight tear test) یک آزمایش استاندارد صنعتی است که از آن برای به دست آوردن انرژی شکست و تعیین ویژگی‌های سطح شکست نمونه‌های فولادی استفاده می‌شود. علاوه بر این آزمایش، آزمایش‌های مشابه دیگری مانند ضربه شاریپی (Charpy impact test) وجود دارد که با همین هدف طراحی و برای نمونه‌های کوچکتر در صنعت نفت و گاز قابل استفاده است. در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه آزمایشگاهی بر خلاف نمونه آزمایش ضربه شاریپی، بزرگتر بوده و ضخامتی برابر با ضخامت خود لوله دارد. این ویژگی باعث می‌شود نتایج حاصل شده از آزمایش ضربه سقوطی به واقعیت نزدیک‌تر باشد [1]. مزیت

دیگر این آزمایش در نمایش مسیر رشد ترک است که به دلیل زیادبودن ناحیه بدون ترک، سطح شکست بزرگتری را جهت مطالعات بعدی و شکست‌نگاری در اختیار قرار می‌دهد. بنابراین، استفاده از آزمایش ضربه سقوطی به ویژه برای فولادهای پر استحکام نسبت به سایر آزمایش‌های ضربه ارجحیت دارد [2,3].

در آزمایش ضربه سقوطی مطابق استاندارد API 5L از نمونه مستطیلی با یک شیار در سطح زیرین آن که تحت کشش است، استفاده می‌شود. 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 می‌شود [4].

تاکنون پژوهش‌های زیادی در خصوص شبیه‌سازی کامپیوتری بر روی فولادهای مشابه صورت گرفته است که در ادامه به نتایج استخراج شده از هر پژوهش و تفاوت آن با پژوهش حاضر اشاره می‌شود. در این تحقیق محاسبه عددی و اندازه‌گیری تجربی انرژی شکست انجام شده و برای نخستین بار با ترسیم منحنی سرعت چکش بر حسب انرژی شکست رابطه خطی برای سرعت ضربه چکش بر حسب انرژی شکست فولاد API X65 ارائه شده است. نمونه آزمایشگاهی از نوع شیاردار لبه‌ای (Single edge notch) با شیار ماشین‌کاری شده (Chevron notch) است که از بدنه لوله فولادی API X65 جدا شده است. در اکثر مقالاتی که بر روی فولادهای مشابه صورت گرفته است اغلب از نمونه با شیار پرسی استفاده شده است. مطابق استاندارد علاوه بر شیار پرسی می‌توان از شیار ماشین‌کاری شده نیز استفاده کرد. مزیت این شیار در شکل هندسی آن است که باعث می‌شود ترک در مسیر مستقیم خود و با انرژی کمتری شروع به رشد کند. بنابراین، اتلاف انرژی کمتری هنگام استفاده از این شیار وجود خواهد داشت که به مقایسه دقیق‌تر نتایج کمک زیادی می‌کند [4].

دوموفونتی و همکاران به بررسی مقاومت خطوط لوله فولادی در برابر رشد شکست نرم پرداختند [5]. در این تحقیق تعدادی آزمایش با نرخ کرنش پایین (بین ۵ و ۱۰۰۰ بر ثانیه) بر روی شش فولاد با گرید API X65 تا API X100 صورت گرفت. هدف از این تحقیق بررسی اثر ناحیه بدون ترک در رشد ترک نرم و شکل‌گیری ناحیه پیشانی ترک بود. برای این منظور تعدادی آزمایش بر روی نمونه شاریپی و شیاردار لبه‌ای انجام شد. سپس شبیه‌سازی کامپیوتری برای مقایسه مقادیر عددی با نتایج کسب شده از آزمایش تجربی صورت پذیرفت. در این شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رشد ترک از مدل آسیب مبتنی بر تنش‌های سه محوره و تنش‌های انحرافی استفاده شد. در تحقیق *اسشایبر* و همکاران مقاومت در برابر شکست دینامیکی سه فولاد با گرید API X65، API X80 و API X100 بررسی شد. آزمایش صورت گرفته در گرید API X65 بر روی نمونه‌ای به ضخامت ۱۹ میلی‌متر با شیار پرسی صورت گرفت. مقدار انرژی شکست تجربی و عددی در این آزمایش به ترتیب ۱۳۲۷۰ و ۱۱۹۸۰ ژول با درصد خطای ۹/۷۲ به دست آمد. در این پژوهش از معیار آسیب گرسون (Gurson damage criterion)

۱۰۰٪ (۵۱۹۰ ژول) حدود ۱۵٪ بیشتر است [11, 12].

در منابع موجود تحلیل جامع و دقیقی بر روی ارتباط بین انرژی شکست با جابجایی و سرعت چکش ضربه زننده در فولاد API X65 صورت نگرفته است. همچنین اختلاف در نوع شیار، ضخامت و جنس نمونه، جرم و سرعت چکش ضربه زننده و جهت برش نمونه از لوله در تحقیق حاضر، اهمیت انجام بخش تجربی را برای دستیابی به نتایج جدید در این تحقیق دو چندان کرده است. بدین ترتیب اهداف این مقاله به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- ترسیم منحنی نیرو-جابجایی برای نتایج آزمایشگاهی و کامپیوتری.

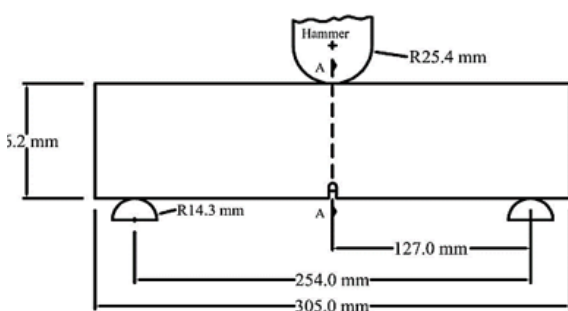
۲- کالیبراسیون پارامترهای آسیب گرسون با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی.

۳- محاسبه انرژی شکست، انرژی شروع ترک و انرژی لازم برای رشد ترک از طریق نمودارهای ترسیم شده و مقایسه با منابع موجود.

۴- ترسیم منحنی انرژی-جابجایی و سرعت-انرژی و بیان رابطه‌ای برای سرعت چکش با انرژی شکست نمونه.

۲- معرفی هندسه و خواص نمونه

نمونه مورد آزمایش در این تحقیق از جنس فولاد API X65 است که مشخصات مربوط به آن، توسط موسسه بین المللی نفت آمریکا استاندارد شده است [13]. این نمونه از نوع شیاردار لبه‌ای با سطح مقطع مستطیلی است که هندسه آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. نمونه از لوله انتقال گاز طبیعی با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر در جهت محیطی لوله ماشین‌کاری شده است. استحکام تسلیم و استحکام کششی این فولاد در جهت محیطی به ترتیب ۵۰۵ و ۵۵۲ مگاپاسکال است [3].



شیار ماشین‌کاری شده

شکل ۱) ابعاد نمونه با شیار ماشین‌کاری شده (شورون)، تکیه‌گاه‌ها و چکش در آزمایش ضربه سقوطی [13]

۳- روش تحقیق

با توجه به اینکه این تحقیق شامل دو بخش آزمایشگاهی و مدل‌سازی کامپیوتری است ابتدا روش آزمایشگاهی بررسی شده و

جهت مدل‌سازی کامپیوتری استفاده شد و پارامترهای آسیب گرسون برای هر سه گرید گزارش گردید [6]. بابایی و همکاران در پژوهشی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای گیردار فولادی و آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری هیدرودینامیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به کمک دستگاه چکش پرتابه‌ای تعدادی آزمایش صورت پذیرفت که نتایج به‌دست آمده از آنها برحسب خیز مرکز ورق، توزیع کرنش‌ها و پروفیل تغییر شکل ارزیابی و همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر خواص مکانیکی ورق، ضخامت آن و فاصله استقرار چکش یا انرژی انتقالی، بر روی رفتار تغییر شکل ورق، مطالعه شد [7]. در سال ۲۰۱۶ پژوهش دیگری توسط یو و همکاران بر روی تحلیل جذب انرژی در نمونه‌های استاندارد آزمایش ضربه سقوطی از جنس API X80 (به ابعاد استاندارد ۳۰۵×۷۶×۱۶ میلی‌متر) با استفاده از مدل المان محدود و ناحیه چسبنده (Cohesive zone) صورت گرفت. انرژی لازم برای شکست نمونه با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو جابجایی ۵۰۸۲ ژول به‌دست آمد. در این تحقیق نشان داده شد در نمونه‌های با چقرمگی بالا تنها حدود ۶۰٪ انرژی جذب شده صرف رشد ترک می‌شود و بخش زیادی از انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک در نواحی تکیه‌گاه‌ها و ناحیه برخورد چکش با نمونه شده است [8]. رودند و همکاران چندین آزمایش ضربه سقوطی را بر روی نمونه فولاد API X70 برای اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک (Crack tip opening angle) انجام دادند. در آزمایش‌های صورت گرفته تغییرمکان چکش توسط اسکن‌های نوری اندازه‌گیری شد. در ادامه با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مقدار انرژی شکست برای نمونه API X70 برابر ۴۵۰۰ ژول به‌دست آمد [9]. نان و همکاران در تحقیقی به شبیه‌سازی رشد ترک نرم در فولادهای پر استحکام خطوط انتقال با استفاده از سه مدل آسیب پرداخته‌اند. هدف اصلی تحقیق مذکور که بر روی فولاد API X100 صورت پذیرفت، مقایسه‌ای میان سه مدل آسیب گرسون- تیورگارد- نیلمن (Gurson-Tvergaard- Needleman)، منحنی مکان هندسی شکست و مدل ناحیه چسبنده بود. در این تحقیق نشان داده شد هر سه مدل به خوبی می‌توانند شکست نرم را مدل کنند [10]. هاری و همکاران با اصلاح مدل آسیب ژو-ویزبیکلی اثرات نرخ کرنش را در نمونه فولادی API X70 در کد المان محدود پیاده‌سازی کردند. سپس به بررسی پاسخ دینامیکی و استاتیکی این نمونه در آزمایش ضربه سقوطی پرداختند. با مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی مشاهده شد اثرات نرخ کرنش در مقدار انرژی شکست و مقدار نیروی حداکثر تاثیر می‌گذارد. به طوری که در آزمایش دینامیکی، حداکثر نیروی ۲۳۵ کیلونیوتن در جابجایی ۱۲/۵ میلی‌متر به‌دست آمد در حالی که در آزمایش استاتیکی، مقدار این نیرو ۲۲۳ کیلونیوتن در جابجایی ۷/۹ میلی‌متر است که بیانگر وابستگی مقاومت ماده به نرخ کرنش است. همچنین، مقدار انرژی شکست در آزمایش دینامیکی



شکل ۴) خطکشی و برش اولیه لوله

۲- رساندن نمونه به ابعاد استاندارد با استفاده از عملیات برشکاری و تراشکاری.

۳- پرسکاری جهت از بین بردن انحنای نمونه‌ها.

۴- ایجاد شیار شورون مطابق با استاندارد API 5L3 با استفاده از دستگاه وایرکات^[13] (شکل ۵)



شکل ۵) آماده‌سازی شیار شورون نمونه با استفاده از دستگاه وایرکات

۳-۲-۳- انجام آزمایش ضربه سقوطی

جهت انجام آزمایش ضربه سقوطی ابتدا چکش تا ارتفاع مشخصی بالا برده می‌شود. این ارتفاع باید به گونه‌ای باشد که سرعت چکش در لحظه برخورد به نمونه در محدوده تعریف شده در استاندارد (۵ تا ۹ متر بر ثانیه) قرار گیرد. ارتفاع سقوط در نظر گرفته شده در این تحقیق ۲ متر است. با توجه به روابط انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل سرعت اولیه ضربه مطابق با رابطه (۱) بدست می‌آید:

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

در رابطه (۱)، 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 زمین برابر ۹/۸ متر بر مجذور ثانیه سرعت ضربه چکش در لحظه برخورد با نمونه حدود ۶/۳ متر بر ثانیه بدست می‌آید.

۲-۲-۳- مدل‌سازی کامپیوتری

در بخش مدل‌سازی کامپیوتری از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. هندسه نمونه به صورت سه‌بعدی و تغییرشکل‌پذیر مدل شده است. ابعاد هندسی نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است. چکش و سندان‌ها صلب در نظر گرفته شده‌اند و مطابق با استاندارد به صورت دو نیم دایره توخالی به شعاع‌های ۲۵/۴ و ۱۴/۳ میلی‌متر ترسیم شدند. برای چکش با توجه به نوع آزمایش

سپس به مدل‌سازی کامپیوتری و نتایج حاصل شده از این مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۳- روش آزمایشگاهی

۱-۲-۲-۳- معرفی دستگاه آزمایش

آزمایش انجام شده توسط دستگاه ضربه سقوطی ساخته شده در دانشگاه بیرجند صورت پذیرفت. این دستگاه مجهز به مدار کرنش‌سنج و شتاب‌سنج می‌باشد که داده‌ها را از طریق اسیلوسکوپ و کامپیوتر متصل به آن نمایش می‌دهد. حداکثر ظرفیت دستگاه با توجه به جرم چکش (۷۰۰ کیلوگرم) و حداکثر ارتفاع سقوط (۳ متر) تقریباً ۲۱ کیلوژول است. در شکل ۲ تصویر کامل دستگاه به همراه سایر تجهیزات متصل به آن شامل اسیلوسکوپ و کامپیوتر نمایش داده شده است. در شکل ۳ نیز نحوه قرارگیری نمونه زیر چکش نمایش داده شده است.



شکل ۲) دستگاه آزمایش ضربه سقوطی استفاده شده در این تحقیق



شکل ۳) نمونه فولاد قرار گرفته شده زیر چکش دستگاه ضربه سقوطی

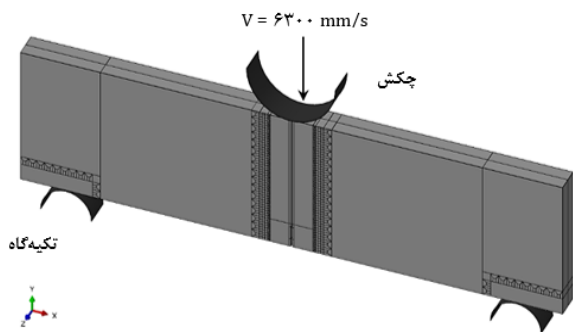
۲-۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

قبل از 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:

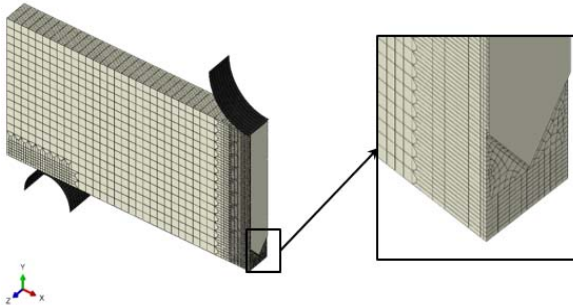
۱- برش اولیه نمونه‌ها از لوله اصلی با درز جوش مارپیچ (شکل ۴).

برای چکش تعریف شده است. زمان بارگذاری با توجه به داده‌های استخراج شده از اسپلوسکوپ حدود ۹ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

در آخرین مرحله مدل‌سازی، تراکم و نوع المان‌های به کار رفته در مدل تعریف شده‌اند. حجم المان‌ها در مجاورت شیار و بخش پایینی چکش ۱/۸ میکرومتر مکعب در نظر گرفته شده است. برای قطعات صلب مانند چکش و سندان‌ها از المان خطی، سه بعدی و چهار گره‌ای صلب (R3D4) و برای نمونه با توجه به اینکه تغییر شکل‌پذیر است از المان خطی، پیوسته، سه بعدی و هشت گره‌ای (C3D8R) استفاده شد. در شکل ۷ شبکه‌بندی نمونه و ناحیه اطراف شیار نمایش داده شده است.



شکل ۶ اتصال نهایی چکش، تکیه‌گاه‌ها و نمونه



شکل ۷ نمایش شبکه‌بندی نمونه و ناحیه اطراف شیار

۴- نتایج آزمایش ضربه سقوطی

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

با اعمال ضربه چکش به نمونه، شکست کامل اتفاق می‌افتد. شکل ۸ تصویر نمونه شکسته شده را نشان می‌دهد که در آن بخش میانی نمونه به طور کامل دچار اعوجاج شده است.



شکل ۸ تصویر نمونه شکسته شده پس از انجام آزمایش ضربه سقوطی

که دینامیکی است جرم ۷۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه ابعاد نمونه بر حسب میلی‌متر است جرم چکش بر حسب تن وارد نرم‌افزار شد^[۱۴]. پس از تکمیل هندسه نمونه، خواص مکانیکی نمونه وارد نرم‌افزار شدند. در جداول ۱، ۲ و ۳ به ترتیب خواص مکانیکی و فیزیکی، پارامترهای کالیبره شده مدل آسیب گرسون و خواص پلاستیک برای فولاد مورد نظر ارائه شده است. از معیار گرسون جهت مدل‌سازی شکست نمونه‌های نرم استفاده می‌شود. معادله تابع تسلیم گرسون مطابق با رابطه (۲) است^[۱۵، ۱۶].

$$\phi \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} \right)^2 + 2f \cosh \left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_y} \right) - 1 - f^2 = 0 \quad (2)$$

در معادله (۲)، σ_e تنش معادل ون‌میزز، σ_m تنش میانگین و σ_y تنش تسلیم ماتریس ماده است که به صورت تابعی از کرنش پلاستیک موثر در ماتریس ماده تعریف می‌شود. f نسبت حجم حفره است (که به صورت نسبت حجم کل حفره‌ها به حجم کل ماده تعریف می‌شود).

جدول ۱) خواص مکانیکی فولاد API X65^[۱۷]

مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)	تنش تسلیم (MPa)
۲۱۰۰۰۰	۰/۳	۷۸۰۰	۵۰۵

جدول ۲) پارامترهای مدل آسیب گرسون برای فولاد API X65

Q_1	Q_2	Q_3	ϵ_N	S_N	f_N	f_z	f_f
۱/۵	۱	۰/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۷	۰/۸۵

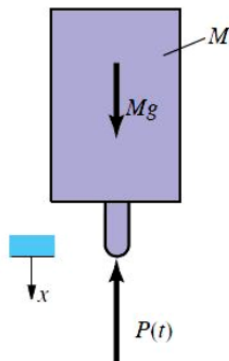
جدول ۳) خواص پلاستیک فولاد API X65 جهت استفاده در نرم افزار آباکوس^[۱۷]

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

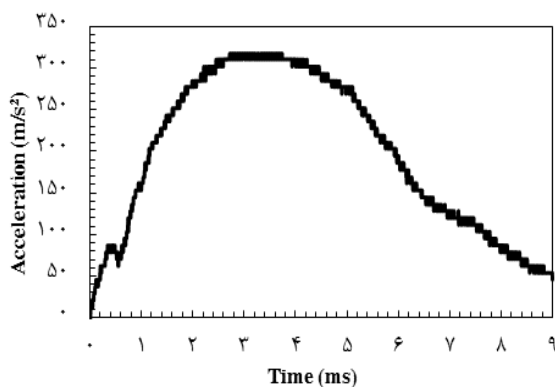
به‌منظور ایجاد شبکه مناسب در کل نمونه، بخش‌هایی از مدل که باید از تراکم المان بیشتری برخوردار باشند با پارتیشن جدا شدند. در شکل ۶ نحوه قرارگیری چکش، نمونه، سندان‌ها و پارتیشن‌بندی کل نمونه نمایش داده شده است.

تماس در نظر گرفته شده بین چکش، نمونه و سندان‌ها از نوع سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۱ در نظر گرفته شده است^[۱۷]. همچنین، بارگذاری با تعریف سرعت اولیه ۶۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه

را نشان می‌دهد. رابطه (۳) نشان می‌دهد که رفتار این منحنی باید کاملاً مشابه با منحنی نیرو- زمان باشد.



شکل ۹) نمایش نیروهای اعمال شده به چکش حین اعمال ضربه^[18]



نمودار ۲) منحنی شتاب- زمان تجربی

۳-۱-۴ منحنی سرعت- زمان

همان‌طور که اشاره شد برای ترسیم منحنی سرعت- زمان از انتگرال‌گیری عددی در نرم‌افزار اکسل استفاده شده است. در نمودار ۳ شماتیکی از روش انتگرال‌گیری عددی و رابطه به‌دست آمده برای بخش کوچکی از منحنی شتاب- زمان ارایه شده است. مطابق نمودار ۳ برای محاسبه سطح زیر منحنی شتاب- زمان تعدادی خط عمودی در بازه‌های زمانی کوچک ترسیم می‌شود تا منحنی را در نقاط مشخص شده قطع نمایند. بدین ترتیب ذوزنقه‌های کوچکی به مساحت‌های A_1, A_2, A_3, A_4 ایجاد می‌شود. با محاسبه مجموع سطوح ذوزنقه‌های ایجاد شده به کمک روابط (۴) و (۵) سطح کلی منحنی شتاب- زمان که سرعت را بدست می‌دهد، محاسبه می‌شود. رابطه (۵) روش عددی محاسبه انتگرال را برای داده‌های گسسته نشان می‌دهد^[19].

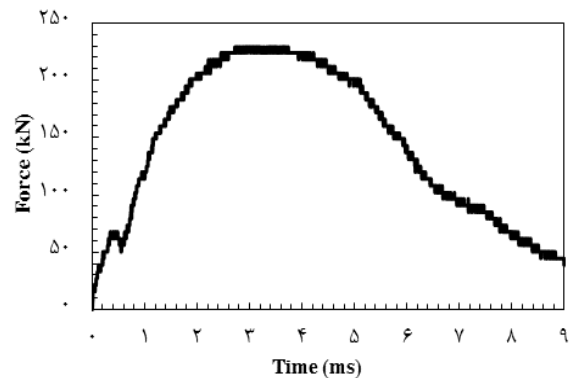
$$V(t) = \int a(t)dt \quad (4)$$

$$V(t) = \sum_{i=1}^n 0.5(a_i + a_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (5)$$

روابط (۴) و (۵)، n تعداد سطح‌های ذوزنقه‌ای شکل ایجاد شده، $V(t)$ سرعت چکش پس از ضربه، $a(t)$ شتاب چکش و t زمان برخورد بر حسب ثانیه است. بدین ترتیب منحنی سرعت- زمان مطابق نمودار ۴ ترسیم می‌شود.

۲-۱-۴ منحنی نیرو- زمان

به‌منظور ترسیم منحنی نیرو- جابجایی باید دو منحنی نیرو- زمان و جابجایی- زمان در اختیار باشد. با توجه به اینکه خروجی اسیلوسکوپ ولتاژ بر حسب زمان است، جهت ترسیم منحنی نیرو- زمان باید داده‌های ولتاژ در عدد ثابتی ضرب شود تا به نیرو تبدیل شوند. این عدد ثابت در آزمایشی جداگانه با قرار دادن تعدادی وزنه به جرم مشخص بر روی چکش و ترسیم منحنی ولتاژ بر حسب نیروی وزن وزنه‌ها به‌دست آمده است. در نمودار ۱ منحنی نیرو- زمان نشان داده شده است.



نمودار ۱) منحنی نیرو- زمان تجربی

با توجه به نمودار ۱ مقدار نیرو با شیب نسبتاً ثابت افزایش یافته و حداکثر نیرو ۲۲۹ کیلو نیوتن در زمان ۳ میلی‌ثانیه است. از این زمان به بعد ترک شروع به رشد کرده و مقدار نیرو افت پیدا کرده است. استخراج این منحنی از داده‌های آزمایشگاهی برای ترسیم منحنی نیرو- جابجایی مورد نیاز است.

۲-۱-۴ منحنی شتاب- زمان

برای ترسیم منحنی جابجایی- زمان باید منحنی شتاب- زمان ترسیم و سپس با دوبرار انتگرال‌گیری به منحنی جابجایی- زمان رسید. با توجه به اینکه داده‌ها گسسته هستند انتگرال‌گیری به صورت عددی و به روش ذوزنقه‌ای انجام شده است. برای به‌دست آوردن شتاب وارد شده به چکش ابتدا باید نیروهای اعمال شده به چکش مشخص شود. این نیروها در شکل ۹ نمایش داده شده است.

مطابق شکل ۹ نیروی اعمال شده از طرف نمونه به چکش $P(t)$ است. با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان نشان داد که شتاب چکش $a(t)$ از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

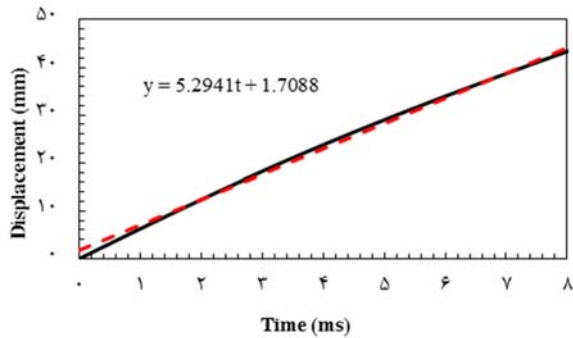
$$a(t) = g - \frac{P(t)}{M} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، M جرم چکش (۷۰۰ کیلوگرم)، g شتاب گرانش و P نیروی وارد شده از نمونه به چکش است. با توجه به جهت مثبت تغییرمکان در شکل ۹، شتاب چکش در تمام مدت ضربه منفی و به سمت بالا خواهد بود. بدین ترتیب سرعت چکش در حال کم شدن است. نمودار ۲ منحنی شتاب- زمان به‌دست آمده در تحقیق

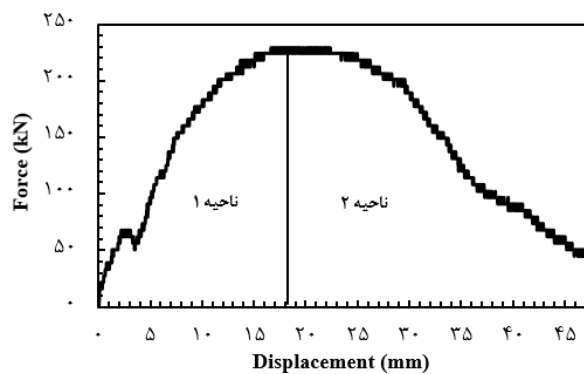
شرایطی که آزمایش در نرخ‌ها و دماهای مختلف صورت می‌گیرد، می‌تواند معیاری برای تشخیص ترد یا نرم‌بودن شکست ماده باشد.

۵-۱-۴- منحنی نیرو-جابجایی

با در اختیار داشتن دو منحنی نیرو- زمان و جابجایی- زمان با توجه به یکسان‌بودن داده‌های زمان می‌توان منحنی نیرو- جابجایی را برای داده‌های آزمایشگاهی ترسیم کرد. نمودار ۶ این منحنی را برای فولاد API X65 نشان می‌دهد.

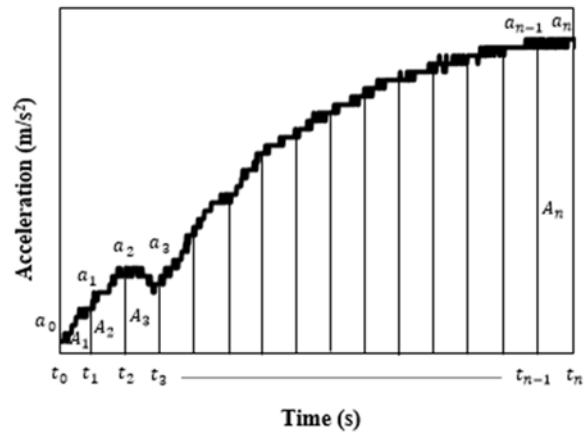


نمودار (۵) نمودار جابجایی- زمان تجربی

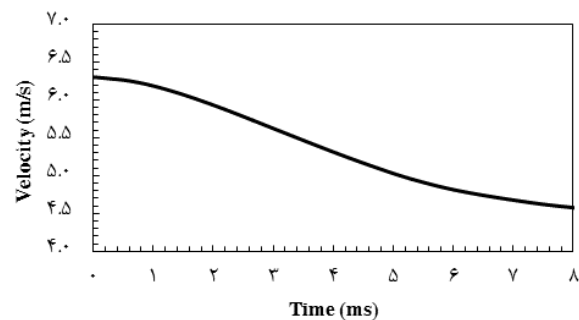


نمودار (۶) منحنی نیرو- جابجایی تجربی

در نمودار ۶ حداکثر نیروی ۲۲۹ کیلو نیوتن در جابجایی حدوداً ۹ میلی‌متر به‌دست آمده است. می‌توان محل حداکثر نیرو را با شروع ترک برابر دانست [11]. با توجه به خطی‌بودن رابطه جابجایی- زمان انتظار می‌رفت منحنی نیرو- جابجایی رفتاری مشابه با منحنی نیرو- زمان در نمودار ۱ داشته باشد. برای این منحنی می‌توان دو ناحیه قبل و بعد از نیروی حداکثر در نظر گرفت. ناحیه‌ای که در آن ترک هنوز رشد نکرده است (ناحیه ۱) و ناحیه‌ای که ترک در حال رشد است (ناحیه ۲). با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی مقدار انرژی شکست نمونه در آزمایش ضربه سقوطی ۷۰۸۵ ژول به‌دست آمد. انرژی شروع ترک و انرژی رشد ترک نیز با محاسبه سطح زیر منحنی در نواحی ۱ و ۲ به ترتیب ۳۱۴۰ و ۳۹۴۵ ژول به‌دست آمد. مشاهده می‌شود بخش زیادی از انرژی (حدود ۵۹٪) صرف رشد ترک و بقیه آن صرف شروع ترک می‌شود که چقرمگی بالای نمونه را نشان می‌دهد. این نتیجه مشابه نتیجه به‌دست آمده از تحقیق یو و همکاران است [7]. در جدول ۴ نتایج استخراج شده از این منحنی ارائه شده است.



نمودار (۳) انتگرال‌گیری عددی به روش دوزنقه‌ای



نمودار (۴) منحنی سرعت- زمان تجربی

مطابق نمودار ۴ سرعت چکش در ابتدای ضربه ۶۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه است که در پایان ضربه به مقدار ثابت ۴۵۹۳ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد. بدین ترتیب، اختلاف سرعت در ابتدا و انتهای آزمایش ۱۷۰۷ میلی‌متر بر ثانیه است. کم‌بودن این اختلاف باعث می‌شود سرعت به مقدار ثابت نزدیک باشد و جابجایی به‌دست آمده با زمان رابطه خطی داشته باشد. ثابت‌بودن سرعت در طول ضربه می‌تواند نشان‌گر رفتار ترد ماده در برابر شکست (شکست سریع) باشد. از سوی دیگر کاهش سرعت نشان دهنده مقاومت ماده در برابر رشد ترک (شکست نرم) است.

۴-۱-۴- منحنی جابجایی- زمان

با یک بار انتگرال‌گیری مطابق روابط (۶) و (۷) از داده‌های سرعت می‌توان مقدار جابجایی را به‌دست آورد [19]:

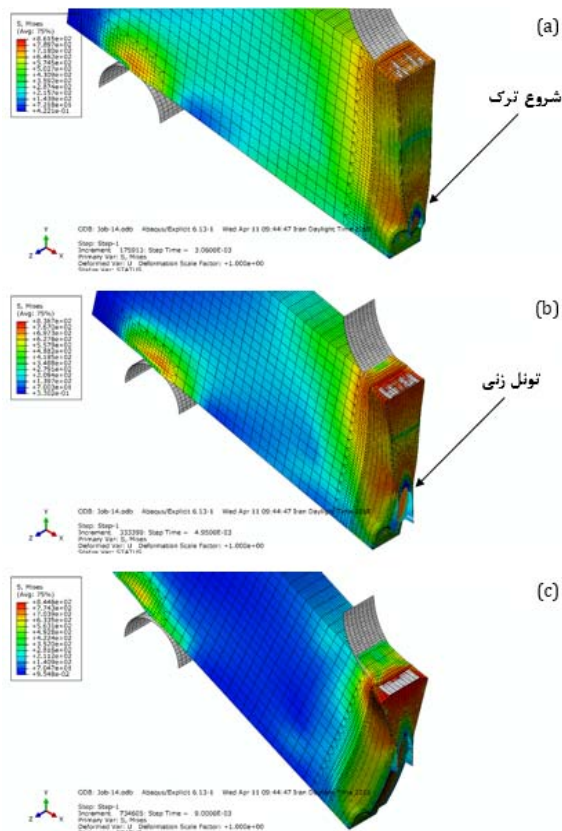
$$V(t) = \int a(t) dt \quad (6)$$

$$X(t) = \sum_{i=1}^n 0.5(V_i + V_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (7)$$

در روابط (۶) و (۷)، $x(t)$ جابجایی چکش طی آزمایش ضربه سقوطی است. منحنی جابجایی- زمان در نمودار ۱ نمایش داده شده است.

مطابق نمودار ۵ مشاهده می‌شود جابجایی چکش برحسب زمان تقریباً رابطه خطی دارد. برای داده‌های تجربی یک خط برازش شده است. شیب این خط $0.2941/5$ میلی‌متر بر میلی‌ثانیه است که سرعت میانگین چکش حین ضربه را نشان می‌دهد. این سرعت در

(شکل ۱۰-ب). همچنین، در اثر خم شدن نمونه، ناحیه قرار گرفته شده زیر چکش افزایش ضخامت زیادی از خود نشان می‌دهد. این افزایش ضخامت در شکل ۱۰-پ نشان داده شده است.



شکل ۱۰) سطح شکست نمونه در شبیه‌سازی اجزاء محدود پس از (a) 3، (b) 5 و (c) 9 میلی‌ثانیه

از این مدل‌سازی دو منحنی مهم نیرو-جابجایی و انرژی-جابجایی جهت مقایسه با نتایج تجربی استخراج شده است. نمودار ۸ منحنی نیرو-جابجایی را برای داده‌های تجربی و مدل‌سازی کامپیوتری نشان می‌دهد.

در نمودار ۸ تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نشان داده شده است. مقدار نیروی حداکثر در مدل اجزاء محدود ۲۲۵ کیلو نیوتن می‌باشد که در جابجایی ۱۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است. این نیرو برای داده‌های تجربی ۲۲۹ کیلو نیوتن در جابجایی ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. رشد ترک در جابجایی ۱۹ میلی‌متر همراه با تونل‌زنی صورت می‌گیرد که افت شدید نیرو را به دنبال دارد. افت نیرو پس از رشد ترک در جابجایی ۲۸ تا ۳۹ میلی‌متر خطی است که نشان دهنده رشد ترک پایدار (Steady state crack growth) در نمونه است. کانتورهای کسر حجمی حفره‌ها و نحوه رشد ترک در جابجایی‌های مختلف در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی مطابق رابطه (۹) مقدار انرژی شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی بدست می‌آید. مقدار این انرژی از آزمایش برابر ۷۰۸۵ ژول و در مدل‌سازی کامپیوتری

جدول ۴) مقادیر تجربی انرژی شکست نمونه در آزمایش ضربه سقوطی

پارامتر	مقدار
انرژی شروع ترک (J)	۲۹۰۲
انرژی رشد ترک (J)	۴۱۸۳
انرژی کل شکست (J)	۷۰۸۵
نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل شکست (%)	۴۱
نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست (%)	۵۹

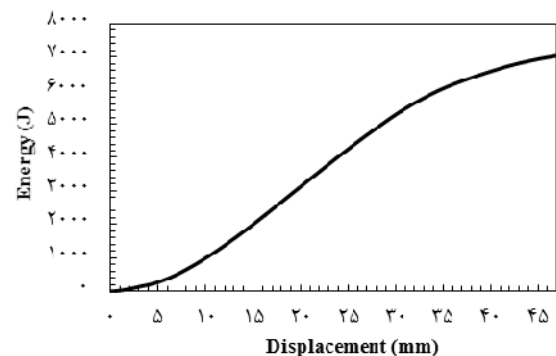
۶-۱۴-۶ منحنی انرژی-جابجایی

آخرین منحنی بدست آمده از داده‌های تجربی منحنی انرژی-جابجایی می‌باشد. این منحنی مشابه منحنی‌های سرعت-زمان و جابجایی-زمان از طریق انتگرال‌گیری از داده‌های نیرو-جابجایی بدست می‌آید. روابط (۸) و (۹) جهت محاسبه مقدار انرژی شکست استفاده می‌شوند [19]:

$$E(t) = \int P(x) dt \quad (8)$$

$$E(t) = \sum_{i=1}^n 0.5(P_i + P_{i-1})(t_i - t_{i-1}) \quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹)، $E(t)$ انرژی شکست فولاد API X65 طی آزمایش ضربه سقوطی است. منحنی انرژی-جابجایی در نمودار ۶ نمایش داده شده است.



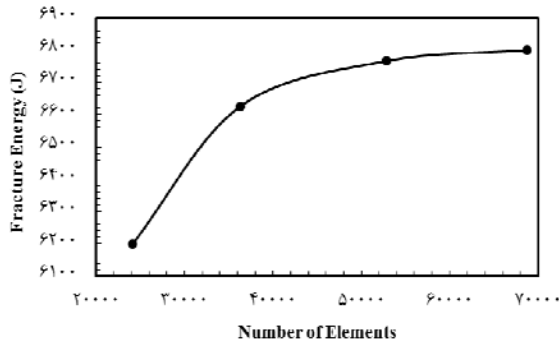
نمودار ۷) منحنی انرژی-جابجایی تجربی

۶-۱۴-۲ نتایج مدل‌سازی کامپیوتری

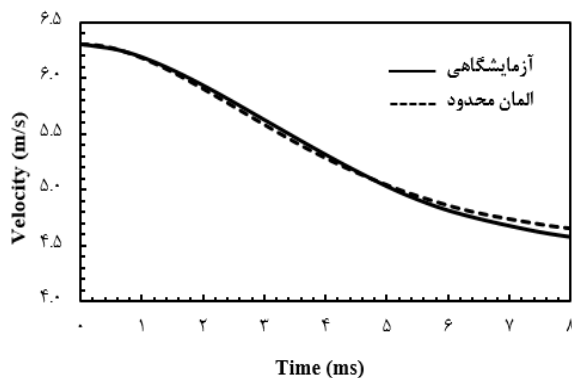
پس از تکمیل حل مسئله سطح شکست نمونه مطابق شکل ۱۰ بدست می‌آید. برای نمایش بهتر مقطع برش خورده نمونه از وسط نشان داده شده است. این سطح شکست در سه زمان ۳، ۵ و ۹ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. برای رشد ترک ابتدا باید کسر حجمی حفره‌ها (Void volume fraction) در اثر جوانه‌زنی (Crack nucleation) با کسر حجمی حفره‌ها در اثر رشد ترک جمع شوند. اگر حاصل با کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شکست که برابر ۰/۸۵ است (جدول ۲)، برابر شد المان مربوطه حذف می‌گردد (شکل ۱۰-الف). همچنین، در این شکل می‌توان پدیده تونل‌زنی ترک (Crack tunneling) را مشاهده کرد. برای شکل‌گیری این پدیده ابتدا المان‌های وسط حذف شده و سپس المان‌های نزدیک به سطح حذف می‌شوند. به این ترتیب در کل بازه زمانی که نمونه تحت ضربه قرار می‌گیرد ترک شکل سهموی خود را حفظ می‌کند

ابعاد و اندازه‌های مش در نتایج تاثیر بسیاری دارند. با توجه به این موضوع آنالیز حساسیت به مش بررسی شده و نتایج آن در نمودار ۱۰ ارایه شده است.

مطابق این نمودار ملاحظه می‌شود با افزایش المان‌ها از ۲۴۱۵۴ به ۶۸۷۲۲ مقدار انرژی شکست به عدد ثابت ۶۸۰۰ همگرا شده است. در نمودار ۱۱ مقایسه منحنی‌های سرعت- زمان بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی صورت گرفته است.



نمودار ۱۰) آنالیز حساسیت به مش

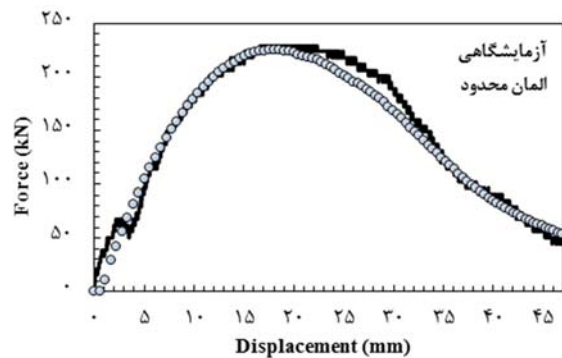


نمودار ۱۱) مقایسه منحنی سرعت- زمان بین داده‌های تجربی و مدل المان محدود

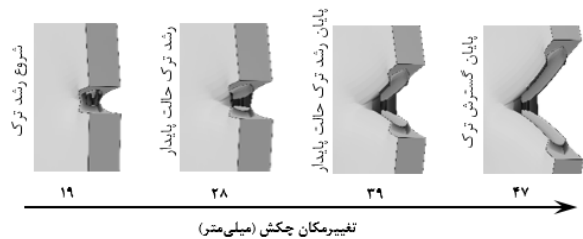
با توجه به نمودار ۱۱ مشاهده می‌شود در ۵ میلی‌ثانیه اول حرکت، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل المان محدود وجود دارد. اختلاف بین نتایج از ۵ میلی‌ثانیه به بعد بیشتر می‌شود به طوری که در انتهای ضربه سرعت چکش از آزمایش تجربی ۴۵۹۳ میلی‌متر بر ثانیه و از مدل‌سازی کامپیوتری ۴۶۳۳ میلی‌متر بر ثانیه بدست آمده است. اختلاف بین نتایج حدود ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه است.

از مقایسه این منحنی با منحنی نمودار ۱۱ نتیجه می‌شود رفتار دو منحنی تقریباً شبیه یکدیگر است. یعنی هر دو منحنی در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی خود رفتار غیرخطی و در قسمت میانی خود رفتار خطی از خود نشان می‌دهند. اگر بتوان برای انرژی شکست منحنی‌ای ارائه کرد که رفتار خطی از خود نشان دهد می‌توان با ارایه یک رابطه خطی در خصوص نتایج این

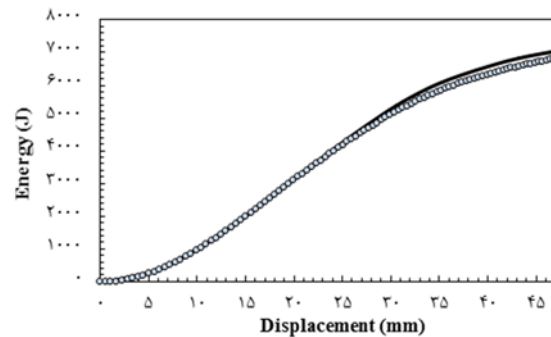
۶۸۰۰ است. درصد این اختلاف ۴٪ است. در نمودار ۹ مقایسه بین این دو منحنی نشان داده شده است.



نمودار ۹) مقایسه منحنی نیرو- جابجایی بین داده‌های تجربی و مدل المان محدود



شکل ۱۱) کانتورهای کسر حجمی حفره‌ها در جابجایی‌های مختلف چکش



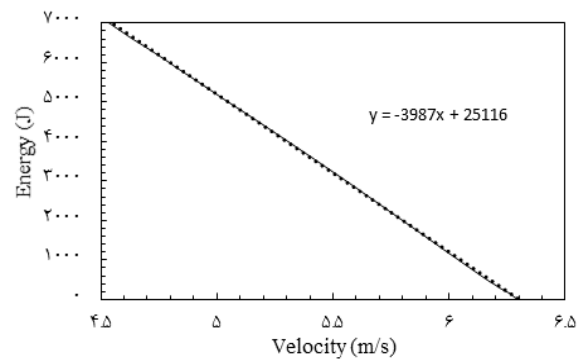
نمودار ۹) مقایسه منحنی‌های انرژی- جابجایی بین داده‌های تجربی و مدل المان محدود

منحنی نشان داده شده در نمودار ۹ تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی را با مدل‌سازی کامپیوتری نشان می‌دهد. اختلاف این دو منحنی از جابجایی ۲۸ میلی‌متر یعنی محلی که رشد ترک پایدار اتفاق می‌افتد، شروع شده است. با افزایش تغییرمکان چکش و افت شدید نیرو پس از رشد ترک مقدار انرژی به عدد ثابتی میل می‌کند. هر چقدر افت نیرو شدیدتر باشد و با شیب بیشتری مقدار نیرو کاهش یابد مقدار انرژی سریع‌تر و در بازه زمانی کمتری به عدد ثابت میل می‌کند. در تحقیق حاضر زمان لازم برای افت نیرو و ثابت شدن مقدار انرژی حدود ۶ میلی‌ثانیه می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که در مدل‌سازی کامپیوتری

نکته قابل توجه در خصوص این نمودار در به‌دست آوردن مقدار سرعت چکش برای مقادیر مشخص انرژی است. با قرار دادن انرژی شروع ترک برابر 2902 ژول مقدار این سرعت به راحتی از طریق رابطه خطی برابر $5/59$ متر بر ثانیه به‌دست می‌آید. اختلاف این سرعت با مقدار اولیه و مقدار نهایی آن به ترتیب $0/71$ و $0/99$ است. این اختلاف نشان می‌دهد بیشتر افت سرعت در چکش پس از رشد ترک است. کاهش سرعت در لحظه شروع ترک 41% و هنگام رشد ترک 59% درصد است. با توجه به خطی بودن رابطه سرعت با انرژی این نتایج باید با نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ همخوانی داشته باشد. بنابراین، می‌توان از درصد کاهش سرعت چکش در لحظه شروع و رشد ترک جهت محاسبه انرژی شروع و رشد ترک استفاده کرد.

نتیجه جالب توجه دیگر از این نمودار در تخمین انرژی شکست برای نمونه‌ها با عمق شیارهای مختلف است. هر چه عمق شیار بیشتر یا ناحیه بدون شیار کمتر باشد، انرژی شکست نمونه کمتر می‌شود [20]. چنانچه بتوان سرعت چکش را در انتهای ضربه محاسبه نمود می‌توان با قراردادن مقدار سرعت در رابطه به‌دست آمده بدون انجام آزمایش انرژی شکست نمونه با عمق شیار مختلف را تخمین زد. لازم به ذکر است این تخمین زمانی می‌تواند درست باشد که شیب منحنی انرژی- سرعت در عمق شیارهای مختلف با شیب این نمودار تقریباً یکسان باشد. این موضوع را می‌توان در پژوهش‌های آینده برای عمق شیارهای مختلف بررسی کرد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش انجام شده و نمودارهای این بخش در جداول ۵ و ۶ خلاصه شده است.

منحنی بحث و بررسی دقیق‌تری انجام داد. برای این منظور نمودار انرژی شکست برحسب سرعت چکش پیشنهاد می‌شود (نمودار ۱۲). این نمودار رابطه خطی سرعت چکش با انرژی شکست نمونه را بیان می‌کند. با در اختیار داشتن معادله این خط می‌توان انرژی شکست نمونه را در سرعت‌های مختلف چکش به‌دست آورد. با توجه به تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی و مدل المان محدود رابطه خطی برای هر دو نمودار تقریباً با یکدیگر برابر است. مقدار شیب این دو نمودار 3987 - است که علامت منفی نشان دهنده افت انرژی با افزایش سرعت است. با کاهش قدر مطلق شیب این نمودار رفتار شکست نمونه از نرم به ترد تغییر پیدا می‌کند. با قرار دادن سرعت صفر در رابطه به‌دست آمده مقدار انرژی پتانسیل ماشین 25116 ژول به‌دست می‌آید. در لحظه برخورد چکش به نمونه انرژی پتانسیل صفر است. ($v=6.3$ m/s)



نمودار ۱۲) نمودار انرژی- سرعت برای داده‌های تجربی

جدول ۵) نتایج آزمایشگاهی برای بیست داده اول

انرژی (J)	نیرو (kN)	سرعت (m/s)	جابجایی (mm)	زمان (ms)
0	0	7/300	0	0
0/057	0/202	7/298	0/566	0/009
3/131	10/670	7/295	1/132	0/180
14/271	28/813	7/290	1/696	0/270
34/273	42/241	7/283	2/259	0/360
61/814	55/972	7/274	2/820	0/450
96/272	68/957	7/262	3/379	0/540
138/623	81/482	7/249	3/936	0/630
186/774	92/223	7/233	4/490	0/720
241/166	104/944	7/216	5/042	0/810
301/751	115/034	7/198	5/591	0/900
367/358	124/907	7/179	6/139	0/990
438/087	134/138	7/158	6/685	1/080
513/292	142/624	7/136	7/229	1/170
592/617	150/635	7/114	7/770	1/260
675/996	158/537	7/090	8/309	1/350
763/108	166/190	7/066	8/846	1/440
853/322	172/682	7/041	9/378	1/530

عنوان	نتایج آزمایشگاهی	مدل‌سازی کامپیوتری	اختلاف نتایج (%)
حداکثر نیرو (kN)	۲۲۹	۲۲۵	۱/۲۴
سرعت چکش قبل از ضربه (mm/s)	۶۳۰۰	۶۳۰۰	۰
سرعت چکش پس از ضربه (mm/s)	۴۵۹۳	۴۶۳۳	۰/۸۷
کاهش سرعت در لحظه شروع ترک (mm/s)	۷۰۸	۶۵۰	۸/۱۹
کاهش سرعت در لحظه رشد ترک (mm/s)	۹۹۹	۱۰۱۷	۱/۸۰
کاهش کلی سرعت چکش (mm/s)	۱۷۰۷	۱۶۶۷	۲/۳۴
انرژی شروع ترک (J)	۲۹۰۲	۲۶۵۲	۸/۶۱
انرژی رشد ترک (J)	۴۱۸۳	۴۱۴۸	۰/۸۳
انرژی کل شکست (J)	۷۰۸۵	۶۸۰۰	۴/۰۲
نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل شکست (%)	۴۱	۳۹	-
نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست (%)	۵۹	۶۱	-

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای نخستین بار انرژی شکست نمونه با شیار ماشین‌کاری شده از جنس فولاد API X65 جدا شده از لوله با درز جوش مارپیچ از طریق آزمایش ضربه سقوطی بدست آمد. نتایج حاصل شده در این پژوهش از ترسیم منحنی‌های مربوطه عبارت است از:

- مقدار انرژی شکست حاصل از آزمایش تجربی و مدل‌سازی کامپیوتری به ترتیب ۷۰۸۵ ژول و ۶۸۰۰ ژول است. این اختلاف حدود ۴٪ است که با توجه به فرضیات انجام شده در مدل‌سازی کامپیوتری و نوع تحلیل که دینامیکی است اختلاف قابل قبولی است. لازم به ذکر است، محاسبه مقدار این انرژی هدف اصلی مقاله است که در پژوهش‌های بعدی می‌توان از آن به عنوان معیاری برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی سایر نمونه‌ها استفاده کرد.

۲- از این انرژی حدود ۵۹٪ آن صرف رشد ترک و مابقی صرف شروع ترک و تغییر شکل پلاستیک نمونه در محل سندان‌ها و چکش می‌شود. هر چه میزان انرژی لازم برای رشد ترک بیشتر باشد می‌توان نتیجه گرفت مقاومت ماده در برابر رشد ترک زیاده بوده و از این فولاد می‌توان در خطوط انتقال نفت و گاز که در آن چقرمگی شکست ماده اهمیت زیادی دارد استفاده نمود.

۳- مقدار نیروی حداکثر برای داده‌های تجربی ۲۲۹ کیلو نیوتن در جابجایی ۱۹ میلی‌متر و در مدل‌سازی کامپیوتری ۲۲۵ کیلو نیوتن در جابجایی ۱۸ میلی‌متر به دست آمد.

۴- ثابت بودن شیب منحنی نیرو-جابجایی در لحظه شکست نمونه، رشد ترک پایدار را نشان می‌دهد که در جابجایی ۲۸ تا ۳۹ میلی‌متر صورت می‌گیرد.

۵- شکل هندسی ترک هنگام رشد به صورت سهموی بوده و پدیده تونل‌زنی به خوبی در لحظه رشد ترک مشخص است. این پدیده نشان می‌دهد که ترک ابتدا از مرکز و سپس از کناره‌ها شروع به رشد می‌کند. این موضوع با سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه همخوانی دارد که تا حدی نشان دهنده صحت و دقت بالای مدل‌سازی است.

۶- جابجایی چکش پس از انتگرال‌گیری از داده‌های سرعت برای داده‌های تجربی ۴۹ و برای داده‌های عددی ۴۷ میلی‌متر به دست آمد. همچنین، با توجه به منحنی جابجایی- زمان مشاهده شد جابجایی چکش رابطه خطی با زمان می‌سازد که بیان‌گر ثابت بودن نسبی سرعت چکش حین ضربه است. شیب این خط برای داده‌های آزمایشگاهی ۱/۵۲۹۴ و برای داده‌های عددی ۱/۵۱۶۳ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد.

۷- مقدار انرژی شکست با سرعت چکش رابطه خطی می‌سازد. شیب منفی در معادله این منحنی نشان دهنده کاهش سرعت چکش است. به کمک رابطه به دست آمده می‌توان انرژی شکست نمونه را به تنهایی با محاسبه سرعت چکش در هر لحظه محاسبه کرد. این نتیجه یکی از نوآوری‌های این پژوهش است که تاکنون در پژوهش دیگری بررسی نشده است.

۸- با توجه به ثابت بودن شیب منحنی سرعت- انرژی شکست، از این شیب می‌توان به عنوان معیاری برای اتلاف انرژی و رفتار شکست ماده استفاده نمود.

۹- مقدار کاهش سرعت در لحظه شروع ترک ۴۱٪ و هنگام رشد ترک ۵۹٪ است. با مقایسه این اعداد با نتیجه شماره ۲ ملاحظه می‌شود درصد کاهش سرعت هنگام رشد ترک با درصد انرژی لازم برای رشد ترک یکسان است که علت آن خطی بودن رابطه انرژی و سرعت است.

۱۰- از طریق رابطه خطی به دست آمده از نمودار سرعت-انرژی شکست می‌توان با در اختیار داشتن سرعت چکش در هر لحظه بدون انجام آزمایش برای نمونه‌ها با عمق شیارهای مختلف انرژی شکست را تا حد قابل قبولی تخمین زد.

تشکر و قدردانی: از شرکت لوله و تجهیزات سدید به جهت در اختیار قرار دادن فولاد API X65 جهت آزمایش قدردانی می‌گردد. همچنین، از شرکت گاز استان خراسان جنوبی جهت حمایت از طرح پژوهشی ساخت دستگاه آزمایش ضربه سقوطی تشکر می‌نماید.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

Engineering Fracture Mechanics. 2016;160:138-146.

9- Rudland DL, Wilkowski GM, Feng Z, Wang YY, Horsley D, Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. Engineering Fracture Mechanics. 2003;70(3-4):567-577.

10- Nonn A, Kalwa C. Simulation of ductile crack propagation in high-strength pipeline steel using damage models. 9th International Pipeline Conference, 2012 September 24-28, Calgary, Alberta. New York: ASME; 2012.

11- Simha CHM, Xu S, Tyson WR. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test. Engineering Fracture Mechanics. 2014;118:66-82.

12- Simha CHM, Xu S, Tyson WR. Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches. Engineering Fracture Mechanics. 2015;148:304-323.

13- America Petroleum Institute [Report]. Recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe. 3th Edition. Washington: American Petroleum Institute (API); 1996.

14- Dassault Systèmes. ABAQUS/6.13 [Internet]. Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp; 2013 [Unknown cited]. Available from: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>

15- Tvergaard V, Needleman A. Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metallurgica. 1984;32(1):157-169.

16- Gurson AL. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1, yield criteria and flow rules for porous ductile media. Providence: Brown University; 1975.

17- Fathi Asgarabad E, Hashemi H, Ahmadi Beroghani U. Comparison of experimental and numerical fracture energy of thermo-mechanical steel in drop weight tear test. 5th Iranian Pipe & Pipeline Conference, 2013 December 10-12, Tehran, Iran. [Persian]

18- DOCUMENTS [Internet]. Impact Testing and Fracture Toughness. Unknown City: DOCUMENTS; 2014 [Unknown Cited]. Available from: <https://documents.pub/document/impacttest-and-fracture-test.html>

19- Hoffman JD. Numerical methods for engineers and scientists. 2nd edition. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2001.

20- Nonn A, Kalwa C. Simulation of ductile crack propagation in high-strength pipeline steel using damage model, Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference, 2012 September 24-28, Calgary, Alberta. New York: ASME; 2013.

فهرست علائم

شتاب چکش (ms^{-2})	a
کسر حجمی حفره‌ها، بی‌بعد	f
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
ارتفاع سقوط چکش (m)	h
جرم چکش (kg)	M
نیروی وارد شده بر چکش (kN)	P
زمان برخورد چکش با نمونه (s)	t
سرعت چکش (ms^{-1})	v
جابجایی چکش (m)	x
تنش معادل وون مایرز (MPa)	σ_e
تنش میانگین (MPa)	σ_m
تنش تسلیم (MPa)	σ_y

منابع

1- Dieter G. Mechanical Metallurgy. 1th edition. New York: McGraw-Hill; 1961.

2- Zhao J, Hu W, Wang X, Kang J, Yuan G, Di H, et al. Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;666:214-224.

3- Majidi-Jirandehi A, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of spiral welded API X65 gas transportation pipeline steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(11):219-228. [Persian].

4- America Petroleum Institute [Report]. Specification for Line Pipe. 45th Edition. Washington: American Petroleum Institute (API); 2012.

5- Biagio MD, Demofonti G, Mannucci G, Iob F, Spinelli CM, Roovers P, et al. Development of a reliable model for evaluating the ductile fracture propagation resistance for high grade steel pipelines. Proceeding on 6th Pipeline Technology Conference, 2012 September 24-28, Calgary, Alberta. New York: ASME; 2013.

6- Scheider I, Nonn A, Völling A, Mondry A, Kalwa C. A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. 2014;3:1956-1964.

7- Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaie Mostofi T. Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(2):305-312. [Persian].

8- Yu PS, Ru CQ. Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel.