



Experimental and Numerical Evaluation of Momentum Variations Effect of Striker on Fracture Energy in Charpy Impact Testing of API X65 Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohitzadeh S.S.¹ MSc,

Hashemi S.H.*¹ PhD

How to cite this article

Mohitzadeh S.S, Hashemi S.H. Experimental and Numerical Evaluation of Momentum Variations Effect of Striker on Fracture Energy in Charpy Impact Testing of API X65 Steel. Modares Mechanical Engineering, 2020 ;20(9):2275-2287.

ABSTRACT

In this study investigated the effects of momentum variations on fracture energy in Charpy impact testing of API X65 steel by experimental and numerical methods. Experimental analysis was conducted in the various speed of impact about 3.50 to 5.72 m/s and impact energy varied about 450 to 1200 J. The experimental results showed that increase of about 63% in impact speed increased the fracture energy about 15%, because of material properties dependence on loading rate. Numerical studies were performed in two categories with ABAQUS software. First mass variation in constant velocity assumed standard quantity about 5.5 m/s in which impact energy varied about 300 to 1200 J and the second, velocity variation with constant mass assumed 50 kg that impact energy varied about 625 to 1600 J. The simulation results showed the variations in mass had not any effect in fracture energy and in all analyses, it was about 265 J. However, increasing the velocity variations with constant mass, caused a slight reduction of about 5% in the fracture energy. The reason for the difference between experimental and numerical results is the lack of consideration of the effect of strain rate on mechanical properties of tested steel in numerical analysis.

Keywords Charpy impact test; API X65 Steel; Fracture energy; Momentum variation; Impact velocity; Strain Rate

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

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran.

Phone: +98 (56) 32202142

Fax: -

shhashemi@birjand.ac.ir

Article History

Received: December 09, 2019

Accepted: July 08, 2020

ePublished: September 20, 2020

CITATION LINKS

[1] Characterisation of weldment hardness, impact energy ... [2] Historical background and development of the ... [3] Transition of ductile and brittle fracture during ... [4] ASTM E23-07a, notched bar impact testing of ... [5] Experimental and numerical study of the impact behavior ... [6] Low-velocity impact study on GLARE FMLs using ... [7] Effect of thickness on the impact resistance of ... [8] Energy partitioning in impact fracture toughness ... [9] Energy partitioning in impact fracture toughness ... [10] Impact and rapid crack propagation measurement ... [11] An analysis of the static and dynamic fracture ... [12] Impact and fracture response of sintered 316L ... [13] Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption ... [14] Weld metal fracture characterization of API X65 ... [15] Investigation of macroscopic fracture surface characteristics ... [16] Impact energy absorption in an Al foam at low ... [17] Strain rate dependent tensile behavior of advanced ... [18] Strain rate effect on tensile behavior for a high ... [19] Low striking velocity testing of precracked charpy-type ... [20] Loading rate effect on ductile crack resistance of steels ... [21] Dynamic shear properties of alloy 718 over wide temperature ... [22] Mechanical properties and dislocation substructure of ... [23] The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain ... [24] Measurement of the dynamic fracture toughness with notched PMMA ... [25] Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness ... [26] Comparison of experimental and numerical fracture energy of thermo ... [27] Experimental and numerical investigation of initial notch radius ... [28] Correction factors for safe performance of API X65 pipeline ...

بررسی تجربی و عددی اثر تغییرات تکانه بر انرژی شکست فولاد APIX65 در آزمایش ضربه شارپی

سیدسمالدین محیطزاده MSc

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

سیدحجت هاشمی* PhD

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

چکیده

در این تحقیق اثر تغییرات تکانه ضربه‌زننده بر انرژی شکست فولاد API X65 در آزمایش ضربه شارپی مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی سرعت برخورد بین ۳/۵۰ تا ۵/۷۲ m/s متغیر بود که تامین‌کننده انرژی برخورد بین ۴۵۰ تا ۱۲۰۰ ژول بود. نتایج تجربی نشان داد که با افزایش سرعت برخورد، میزان انرژی شکست صعودی است؛ به‌طوری که با ۶۳٪ افزایش سرعت برخورد، انرژی شکست ۱۵٪ افزایش می‌یابد و دلیل آن، وابستگی خواص ماده به نرخ کرنش و افزایش مقاومت شکست فولاد در نرخ بارگذاری بالاتر است. تحلیل عددی در دو بخش توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در بخش نخست، سرعت ضربه‌زننده به میزان ۵/۵ m/s ثابت فرض شد که با تغییر جرم، انرژی ضربه از ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ ژول تغییر کرد. در بخش دوم، جرم ضربه‌زننده به میزان ۵۰ kg ثابت و با تغییر سرعت، انرژی برخورد بین ۶۲۵ تا ۱۶۰۰ ژول متغیر بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر جرم در سرعت ثابت تأثیری بر انرژی شکست ندارد و برای تمامی حالات انرژی شکست حدود ۲۶۵ ژول است. اما افزایش سرعت با جرم ثابت باعث کاهش ناچیزی در حدود ۵٪ در میزان انرژی شکست شد. دلیل تفاوت بین نتایج تجربی و عددی، عدم در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش بر خواص مکانیکی مصالح در تحلیل عددی است.

کلیدواژه‌ها: آزمایش ضربه شارپی، فولاد API X65، انرژی شکست، تغییرات تکانه، سرعت برخورد، نرخ کرنش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸

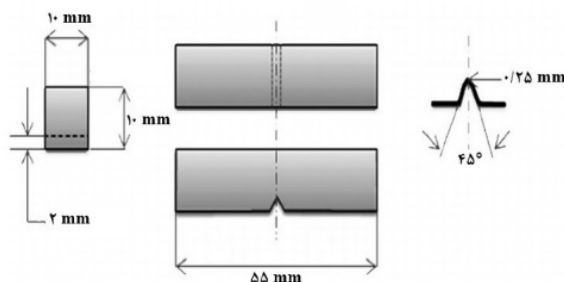
*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

مقدمه

با توجه به نیاز صنایع دنیا برای انرژی و توسعه استفاده از انرژی‌های پاک در سطح جهان، استفاده از منابع انرژی همانند گاز طبیعی به‌شدت رو به گسترش است. یکی از مناسب‌ترین و به‌صرفه‌ترین روش‌ها برای انتقال این منابع انرژی، استفاده از خطوط انتقال فلیزی است. افزایش نیاز به انتقال حجم بالای گاز طبیعی توسط لوله‌های فولادی تحت فشار زیاد منجر به تولید لوله‌هایی جدیدتر و پراستحکام شده است. ترکیب فرآیند عملیات حرارتی سردکردن سریع و فناوری نورد کنترل‌شده برای تولید فولادهای کم‌آلیاژ پراستحکام (HSLA) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شبکه انتقال گاز با لوله‌هایی با قطر بزرگ نیز کاربرد دارند. درجه استحکام این لوله‌ها توسط استاندارد ای‌پی‌آی مشخص شده است. هدف اصلی، تولید لوله‌هایی با ضخامت کمتر است که بتواند فشار بیشتری را تحمل کند که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های تولید و انتقال خواهد شد. برای کسب بهترین ترکیب ممکن از استحکام و سطح چقرمگی بالا، می‌توان از لوله‌های

فولادی مورد نظر استفاده کرد. علاوه بر این، قابلیت جوشکاری، شکل‌پذیری، چقرمگی شکست، دمای انتقال نرم به ترد پایین، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی ناشی از هیدروژن در خطوط انتقال گاز ترش، مقاومت در برابر ترک ناشی از تنش خوردگی برای اجزای مدفون در زیر زمین و مقاومت خستگی، دیگر ملزوماتی است که برای خطوط انتقال گاز توسط لوله‌های فولادی باید مد نظر داشت، فولادهای رده ای‌پی‌آی‌ایکس در بردارنده این خصوصیات هستند[1].

روش‌های آزمایش مختلفی برای تعیین خواص ضربه‌ای مواد و تعیین چقرمگی شکست فولادها و مواد تدوین شده است. آزمایش شارپی یکی از روش‌هایی است که اطلاعات ارزشمندی را در مورد خواص ضربه‌ای مواد و مصالح مهندسی در اختیار طراحان و مهندسان قرار می‌دهد. به کمک این آزمایش می‌توان انتقال بین حالت شکل‌پذیر و ترد را در فولادهای فرتیتی نمایش داد[2]. روش دیگر آزمایش ضربه سقوطی (Drop Weight Tear Test) است. در این روش نمونه‌ای به کار گرفته می‌شود که از کل ضخامت لوله ساخته شده است و دارای مسیر شکست به طول کافی برای رسیدن به مقاومت پایدار شکست است. مناطق شکست نرم و ترد طی آزمایش سقوط وزنه کیفیت لوله فولادی را مشخص می‌کند[3]. در آزمایش ضربه شارپی با استفاده از نمونه‌های شیاردار، شرایط تنش سه‌بعدی در نمونه ایجاد می‌شود و قابلیت تغییر شکل پلاستیک در آن محدود می‌شود. نمونه قطعه‌ای از مصالح مورد نظر با ابعاد ۵۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر است که شیار با عمق ۲ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه در میانه آن ایجاد شده است. هندسه نمونه آزمایش در شکل ۱ نمایش داده شده است[4]. در آزمایش ضربه شارپی، نمونه مورد آزمایش به حالت یک تیر با تکیه‌گاه ساده مستقر می‌شود و ضربه در وسط دهانه تیر (پشت محل شیار) وارد می‌شود. در یک ماشین شارپی استاندارد، انرژی پاندول در پایین نقطه حرکت، می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد که وابسته به میزان جرم چکش و سرعت آن است. در استاندارد میزان سرعت حدود ۵/۵ m/s در نظر گرفته شده است. در این آزمایش، مقدار انرژی جذب‌شده توسط نمونه هنگام شکست از میزان اختلاف ارتفاع اولیه و ثانویه پاندول به‌دست می‌آید که در شکل ۲ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. این میزان انرژی، معیاری از ماده در برابر شکست دینامیکی است[4].



شکل ۱) مشخصات هندسی نمونه آزمایش ضربه شارپی[4]

انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت در انرژی ضربه ثابت هرچه سرعت ضربه کاهش یابد میزان انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش می‌یابد[5].

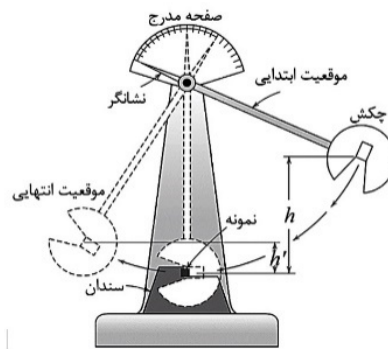
در تحقیق دیگری، لیو و همکاران به بررسی اثر تغییرات شکل و اندازه چکش در آزمایش ضربه بر تغییرات انرژی جذب شده و تغییر شکل نمونه بر ماده مرکب GLARE2 و GLARE3 پرداختند[6]. در این تحقیق چکش‌های فولادی با جرم‌های مختلف از ارتفاع سقوط از پیش تعیین شده با انرژی‌های متفاوت برای آزمایش ضربه مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های ضربه با توجه به اندازه چکش برای دو مقدار انرژی ضربه ۲۰ و ۳۰ ژول انجام شد. با بررسی نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که با افزایش انرژی ضربه (فارغ از شکل و هندسه چکش) میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که برای هر دو ماده تحت بررسی، بیشترین انرژی جذب شده در ضربه با انرژی اولیه ۲۰ ژول، حدود ۲۵ ژول و در ضربه با انرژی اولیه ۳۰ ژول، حدود ۳۰ ژول است. همچنین با افزایش انرژی ضربه تغییری چندانی طی زمان برخورد ایجاد نمی‌شود، ولی میزان نیروی تماسی طی برخورد افزایش می‌یابد[6].

در تحقیقی که توسط ونگ و همکاران انجام شد، رفتار ضربه ماده مرکب FRFP بررسی شد. آنها تحقیقات خود را در دو بخش که یکی بررسی رفتار ماده در آزمایش سقوط آزاد و دیگری آزمایش ضربه شارپی بود به انجام رساندند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد که با افزایش میزان انرژی ضربه در آزمایش ضربه سقوطی در حداکثر نیرو، تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود و افزایش نیروی بیشینه مقدار کمی است؛ اما زمان برخورد تغییرات زیادی دارد و هرچه میزان انرژی ضربه افزایش یابد، برخورد در کسر کمتری از زمان اتفاق خواهد افتاد. همچنین با افزایش انرژی ضربه در حالت کلی میزان انرژی جذب شده توسط نمونه افزایش یافته است[7].

کلاتان و چنل به بررسی اثر سرعت ضربه در آزمایش ضربه شارپی بر چگونگی رشد سریع ترک ترد در مواد ترمو پلاستیک پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که اگر سرعت ضربه به اندازه کافی زیاد باشد، رشد سریع ترک ترد اتفاق می‌افتد که بیانگر صرف انرژی کمتر برای شکست ماده است[8]. همچنین پیش از آن در تحقیق دیگری که توسط هری و مارشال انجام شده بود، نتایج مشابهی حاصل شده بود[9].

لیووز به بررسی عددی اثر سرعت ضربه در آزمایش ضربه شارپی بر سه ماده PE80، PE100 و PE3 پرداخت. در این آزمایش‌ها سرعت برخورد چکش بین ۰/۱ تا ۵/۵ متر بر ثانیه متغیر بود و میزان G_c اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت برخورد برای هر سه ماده، میزان انرژی لازم برای گسترش ترک روند نزولی دارد[10].

لونا و همکاران به تحلیل رفتار شکست استاتیکی و دینامیکی فولاد API X70 که یک فولاد کم‌کربن با ریزآلیاژ آلومینیوم و



شکل ۲) عملکرد دستگاه ضربه شارپی برای تعیین انرژی شکست[2]

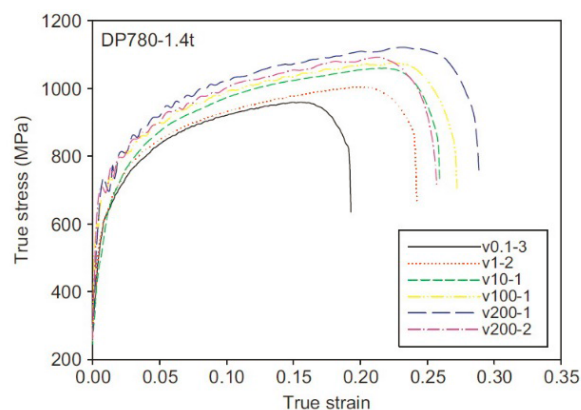
ظرفیت عمده ماشین‌های شارپی که به‌منظور تعیین انرژی شکست فولادهای معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معادل ۳۰۰ ژول است (چکشی با جرم ۲۰ کیلوگرم و سرعت برخورد ۵/۵ متر بر ثانیه) که این دستگاه‌ها برای فولادهای جدیدی که در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، نامناسب است؛ زیرا بر مبنای استاندارد ASTM E23 ظرفیت دستگاه می‌باید از ۸۰٪ انرژی شکست نمونه بیشتر باشد[4]. لذا به ناچار از ماشین‌هایی با ظرفیت‌های ۴۵۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ ژول استفاده شده است. برای شرایط یکسان نمونه‌های آزمایش، این ماشین‌ها انرژی‌های شکست متفاوتی را ارائه نموده‌اند. حال یکی از مسائلی که در انجام آزمایش‌ها مطرح می‌شود، تاثیر تغییر شرایط آزمایش بر نتایج حاصل است. در اینجا سؤال این است که آیا تغییر در میزان اندازه حرکت چکش (تغییر سرعت یا جرم ضربه‌زننده)، انرژی شکست فولاد را تغییر می‌دهد؟ به عبارت دیگر، آیا ظرفیت ماشین ضربه شارپی تاثیری بر انرژی جذب شده نمونه دارد یا خیر؟ در صورت مثبت بودن جواب، نحوه این تغییرات به چه شکلی است؟ سؤال دیگر این است که انرژی شکست واقعی ماده آزمایش شده چه میزان است؟

در تحقیقی که توسط لی و همکاران انجام شد، رفتار ضربه‌ای ماده مرکب SMC که کاربرد گسترده‌ای در صنایع خوردوسازی دارد به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق اثر جرم و شکل چکش، سرعت اولیه و ضخامت نمونه بر میزان انرژی جذب شده در ضربه بر صفحات تخت SMC مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار این ماده در مقابل ضربه شناسایی شود[5].

آزمایش ضربه سقوطی به‌منظور اندازه‌گیری انرژی جذب شده برای شکست کامل ورق تخت SMC انجام شد. ارتفاع سقوط چکش بین ۱۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر برای سرعت بین ۱/۴۰ تا ۴/۷۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین جرم چکش بین ۱ تا ۴/۵ کیلوگرم با وزنه‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرمی متغیر بود. انرژی اولیه ضربه برای تمام آزمایش‌ها با تغییر در سرعت برخورد متفاوت، یکسان در نظر گرفته شده بود؛ به این مفهوم که با افزایش جرم چکش، سرعت برخورد کاهش پیدا می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش جرم چکش در انرژی ضربه ثابت، میزان

شد[15]. مقایسه نتایج آزمایش‌های آنها بیانگر تفاوت انرژی شکست این نمونه در سرعت‌های بارگذاری متفاوت است. رامچاندرا و همکاران تحقیقی در مورد اثر ضربه کم‌سرعت گلوله‌های فولادی بر انرژی جذب‌شده و تغییر شکل در نمونه‌های آلومینیومی انجام دادند. در آزمایش‌های آنها سرعت برخورد بین ۳ تا ۳۰ متر بر ثانیه متغیر بود. در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه، با افزایش سرعت، برخورد انرژی جذب‌شده با شیب کمی افزایش می‌یابد ولی در سرعت‌های بالای ۱۰ متر بر ثانیه میزان افزایش انرژی جذب‌شده با افزایش سرعت چشمگیر است[16].

در تحقیقی که توسط کیم و همکاران انجام شد، وابستگی رفتار کششی فولاد پراستحکام دوفازی به نرخ کرنش مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های انجام‌شده نرخ کرنش بین ۱/۰ تا ۲۰۰۰۰۰۰۰۰ متغیر بود. بارگذاری دینامیکی توسط ماشین Instron VHS 8800 انجام شد که این ماشین قابلیت اعمال بار تا ۶۰ کیلو نیوتن تا حداکثر سرعت ۲۰ متر بر ثانیه را دارد. بررسی نتایج آزمایش‌های آنها برای نمونه‌هایی با شرایط یکسان از نظر ابعاد و جنس حاکی از افزایش میزان تنش تسلیم، تنش نهایی در اثر افزایش نرخ کرنش است. به‌علاوه تغییر طول کل نمونه در لحظه شکست با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش کرنش شکست نمونه با افزایش نرخ کرنش است. منحنی تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش‌های مختلف برای فولاد دوفازی DP780 که یکی از مصالح مورد بررسی آنها بود نشان‌دهنده افزایش انرژی شکست با افزایش نرخ کرنش است (نمودار ۱) [17].



نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش حقیقی برای نمونه فولاد دوفازی DP780 با ضخامت ۱/۴ میلی‌متر در نرخ کرنش‌های مختلف (v0.1-3 به معنی نرخ کرنش ۱/۳۰۰۰۰۰۰۰۰ برای نمونه شماره ۳ است) [17]

وَنگ و همکاران به بررسی اثر نرخ کرنش بر رفتار کششی فولادهای سخت پرداختند. در آزمایش‌های آنها نرخ کرنش از بارگذاری شبه‌استاتیکی با مقدار 10^{-3} تا نرخ کرنش متوسط به میزان 10^5 متغیر بود. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد با افزایش نرخ کرنش به‌دلیل تغییرات در ریزساختار، میزان انرژی بیشتری صرف شکست نمونه‌ها می‌شود. همچنین با افزایش نرخ کرنش میزان تنش تسلیم و تنش نهایی در ماده تحت آزمایش

نیوبیم است، پرداختند. در حالت بارگذاری دینامیکی، نمونه توسط ضربه پاندولی با سرعت چکش ۵/۰ تا ۹۰۰ متر بر ثانیه در هنگام برخورد مورد آزمایش قرار گرفت و در بارگذاری استاتیکی نمونه به‌صورت شبه‌استاتیکی تحت خمش سه نقطه قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت به شکست در بارگذاری دینامیکی در مقایسه با بارگذاری استاتیکی مقدار بیشتری دارد. باید توجه داشت رفتار این ماده به‌صورت ویسکوپلاستیک است؛ به عبارت دیگر تنش تسلیم و تنش نهایی با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابند[11].

لی و همکاران به بررسی اثر نرخ کرنش در بارگذاری ضربه‌ای بر رفتار فولاد ضدزنگ 316L پرداختند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که تنش جاری‌شدن با افزایش نرخ کرنش برای هر دو نوع بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی افزایش می‌یابد. در شرایط بارگذاری دینامیکی نسبت به شرایط بارگذاری استاتیکی، نرخ افزایش تنش جریان سرعت بیشتری دارد. به این بیان که فولاد ضدزنگ تف‌جوشی‌شده 316L به‌شدت حساسیت شدیدی به نرخ کرنش‌های بالا دارد. مقایسه ریزدانه‌ها در دو نرخ کرنش $2/7 \times 10^{-3}$ و $7/5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ نشان می‌دهد که تغییر نرخ کرنش موجب تغییر شکل ریزدانه‌ها شده است. مقایسه ریزساختارها در این دو نرخ کرنش، روشن می‌سازد که اندازه دانه‌ها، چگالی حفره‌ها و تغییر شکل دانه‌ها همه با نرخ کرنش در ارتباط است. چگالی حفره‌ها و اندازه دانه‌ها هر دو با افزایش نرخ کرنش، کاهش می‌یابند. از بین رفتن حفره‌ها نشان می‌دهد که در نرخ کرنش بالا در بار ضربه‌ای، ساختار متراکم‌تری ایجاد می‌شود. در همین حال، کاهش اندازه دانه‌ها با بالا رفتن نرخ کرنش به‌دلیل افزایش منطقه مرزی دانه‌ها می‌تواند منجر به بالا رفتن تنش تسلیم شود. افزایش نرخ کرنش از $2/7 \times 10^{-3}$ به $7/5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ موجب تغییر شکل شدیدتر دانه‌ها به‌دلیل جریان پلاستیک ناپایدار می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که بارگذاری با نرخ کرنش خیلی زیاد موجب گسترده‌تر شدن منطقه‌ای جریان می‌شود که نتیجه آن تغییر شکل ناهمگن زیادی در دانه‌ها است و در شرایط بارگذاری با نرخ کرنش‌های مختلف تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار مکانیکی مواد، وجود دارد[12].

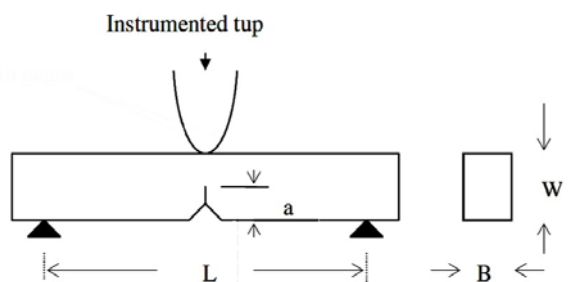
فازیتا و همکاران با مطالعه تحقیقات انجام‌شده، به بررسی جامعی روی اثر نرخ کرنش بر مکانیزم شکست و انرژی جذب‌شده در پلیمرهای کامپوزیتی پرداختند. مطالعات مختلف بیانگر اثر نرخ کرنش بر مقاومت مورد استفاده در مواد مرکب بوده است[13].

در تحقیق دیگری که توسط مجیدی انجام شد، به بررسی مقایسه مشخصات سطح شکست و انرژی شکست نمونه ضربه سقوطی فولاد API X65 در سقوط وزنه با سرعت ۷ متر بر ثانیه پرداخته شد[14]. در تحقیق مشابه دیگری توسط هاشمی به بررسی انرژی شکست و خصوصیات سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65 در آزمایش خمش سه‌نقطه با سرعت بارگذاری ۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه روی ماشین استاندارد کشش و فشار پرداخته

نشان می‌دهد که نرخ کرنش بر خواص مواد تأثیرگذار است [23]. ساحترو و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی مواد در آزمایش ضربه شارپی پرداختند و توانستند رابطه‌ای را برای تعیین میزان نرخ کرنش بر مبنای سرعت برخورد و ابعاد هندسی نمونه در این آزمایش تعیین کنند [24]. معادله ۱، این رابطه را نشان می‌دهد.

$$\dot{\epsilon} = \frac{6Wv}{L^2} = 37.5v \quad (1)$$

در رابطه فوق، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، v سرعت برخورد، W ضخامت نمونه آزمایش و L فاصله بین دو تکیه‌گاه قرارگیری نمونه در آزمایش ضربه شارپی است. متغیرهای هندسی رابطه فوق و ابعاد هندسی نمونه در شکل ۳ نمایش داده شده است.



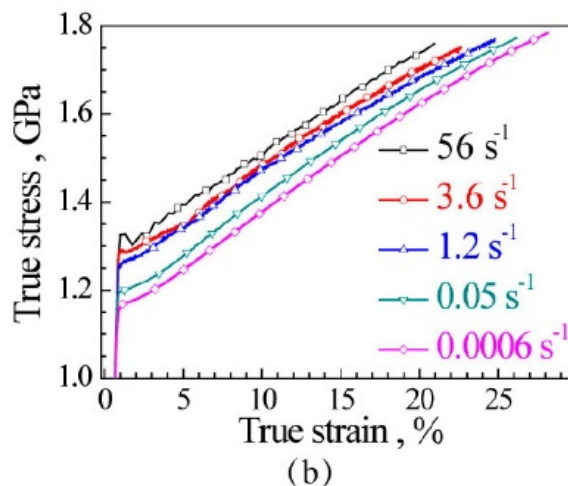
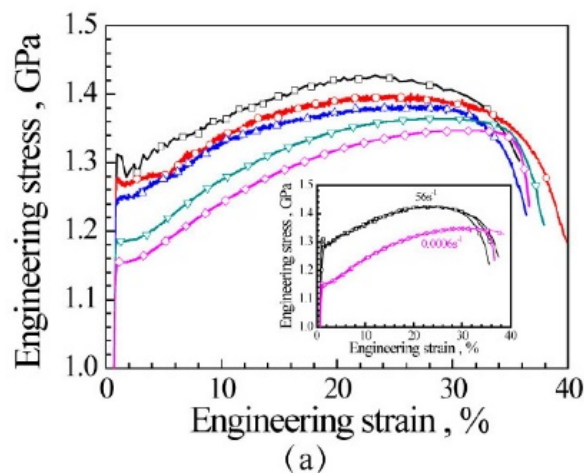
شکل ۳ معرفی متغیرهای معادله ۱ [24]

در تحقیق فعلی، هدف بررسی اثر تغییرات میزان تکانه (اندازه حرکت) چکش در هنگام برخورد با نمونه در آزمایش ضربه شارپی، بر میزان انرژی شکست در فولاد API X65 است. این فولاد کاربرد فراوانی در صنایع نفت و گاز برای تولید لوله‌های انتقال دارد. ویژگی اصلی این فولاد، داشتن استحکام بالا همراه با چقرمگی بالا است [25]. تنش تسلیم متوسط این فولاد ۴۸۰ MPa و چقرمگی آن $۳۰۰ \text{ MPa}\sqrt{m}$ است [15].

بررسی تجربی اثر سرعت برخورد بر انرژی شکست

برای انجام آزمایش‌های مورد نظر، دستگاه ضربه شارپی مجهز شده با قابلیت تغییر ارتفاع سقوط چکش در آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند ساخته شد. این دستگاه بر اساس اصول ذکر شده در استاندارد ASTM E23 با ظرفیت حداکثر ۱۲۰۰ ژول و با قابلیت تنظیم سرعت و انرژی برخورد، ساخته و بهره‌برداری شد (شکل ۴). نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها توسط این دستگاه برای فولاد API X65 نشان‌دهنده نزدیکی نتایج به آزمایش‌های معتبری بود که قبلاً انجام شده بود و بیانگر دقت مناسب دستگاه برای تعیین انرژی شکست است [1]. کرنش‌سنج‌های نصب شده روی دستگاه بر اساس میزان بار وارده و ولتاژ عبوری نیز کالیبره شده‌اند که در تحقیق کنونی نیازی به استفاده از این قابلیت دستگاه وجود نداشت. همچنین برای هر سرعت برخورد مورد بررسی سه نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند که نتایج تکرارپذیری بسیار مطلوب آزمایش‌ها توسط دستگاه را تایید می‌کند.

افزایش می‌یابد، اما از میزان کرنش شکست کاسته می‌شود. در مجموع سطح زیر نمودار تنش-کرنش که بیانگر چگالی انرژی شکست است با افزایش نرخ کرنش روند افزایشی دارد (نمودار ۲) [18].



نمودار ۲) منحنی تنش-کرنش برای HSSS در نرخ کرنش‌های مختلف؛ مهندسی (a) و واقعی (b) [18]

علاوه بر مواردی که ذکر شد، مطالعات فراوان دیگری پیرامون اثر نرخ کرنش و سرعت بارگذاری بر رفتار مکانیکی مواد وجود دارد که عمدتاً بیانگر تغییر استحکام و رفتار مکانیکی مواد در سرعت‌های مختلف بارگذاری و نرخ کرنش‌های متفاوت است [19-22].

در موارد بسیاری، اجسام تحت ضربه توسط اجسام دیگر با اشکال و اندازه‌های مختلف قرار می‌گیرند. بارهای ضربه‌ای مانند سقوط اجسام می‌تواند آسیب‌های جدی به یک سازه برساند؛ بنابراین مطالعه و بررسی مقاومت مواد به بارهای ضربه‌ای مهم است. در بیشتر کاربردها، طراحان معمولاً آلیاژها را بر اساس خواص شبه‌استاتیکی آنها انتخاب می‌کنند و تحلیل اجزای محدودی که انجام می‌دهند بر مبنای همین خواص است. در حالی که بررسی‌ها

انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های ضربه در دمای محیط برای ۶ سرعت ضربه مختلف که در واقع بیانگر ۶ ارتفاع سقوط و ۶ انرژی ضربه متفاوت است، انجام شد. میزان سرعت برخورد بر مبنای انرژی برخورد تنظیم شد. آزمایش‌ها برای ۶ مقدار انرژی ضربه در حدود ۴۵۰، ۶۰۰، ۷۵۰، ۹۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۲۰۰ ژول که متناظر با سرعت بین ۳/۵۰ تا ۵/۷۷ m/s بود، با چکشی به جرم ۷۳/۴ کیلوگرم صورت پذیرفت که این جرم به صورت متمرکز در فاصله ۸۳۴ میلی‌متری از محور دوران ماشین ضربه شاری در نظر گرفته می‌شود. میزان سرعت برخورد بر اساس ارتفاع رهاسازی چکش (h) که در شکل ۲ مشخص شده است با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

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

در رابطه فوق، h ارتفاع رهاسازی چکش و g شتاب گرانش معادل ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است.

مجموعاً ۱۸ آزمایش انجام شد و پس از انجام هر آزمایش، زاویه نهایی آونگ و ارتفاع چکش پس از شکست نمونه قرائت و اندازه‌گیری شد و انرژی شکست محاسبه شد. برای محاسبه انرژی شکست تفاضل انرژی پتانسیل اولیه چکش و انرژی پتانسیل نهایی چکش پس از شکست نمونه با توجه به شکل ۲ و مطابق رابطه ۳ محاسبه شد.

$$E_f = U_0 - U_f = mg(h - h') \quad (3)$$

در رابطه فوق، E_f انرژی شکست نمونه، U_0 انرژی پتانسیل اولیه چکش قبل از رهاسازی، U_f انرژی پتانسیل نهایی چکش پس از شکست نمونه، m جرم مجموعه چکش، g شتاب گرانش معادل ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، h ارتفاع رهاسازی چکش و h' ارتفاع نهایی چکش پس از شکست نمونه است.

شکل ۷ نمونه‌های شکسته‌شده پس از آزمایش را نمایش می‌دهد. در جدول ۱ نیز خلاصه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها آورده شده است.



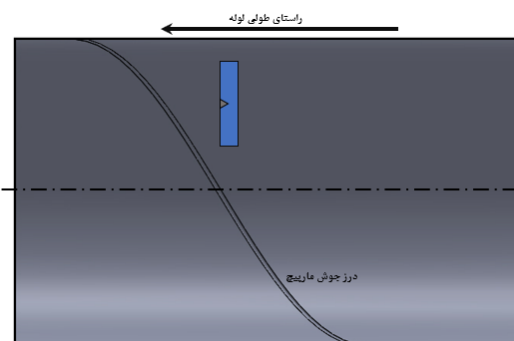
شکل (۷) تصویری از نمونه‌های شکسته‌شده



شکل (۴) تصویر دستگاه ضربه شاری ساخته‌شده در آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند

ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های لازم برای آزمایش از جداره یک لوله از جنس فولاد API X65 ساخته شد. برای این منظور، بخشی از لوله توسط فرآیند هوا-برش از لوله جدا شد و پس از آن توسط دستگاه واترجت به بخش‌هایی با عرض ۶۰ میلی‌متر برشکاری شد. با توجه به اینکه ضخامت لوله‌های API X65 معادل ۱۴/۳ میلی‌متر است و قطعات به دلیل جداسازی از جداره لوله دارای انحناء بود، تحت عملیات سنگ‌زنی در طرفین قرار گرفته تا به ضخامت ۱۰ میلی‌متر برسد و سپس توسط فرآیند وایرکات، نمونه‌ها مطابق ابعاد ذکرشده در شکل ۱ برشکاری و ساخته شد. لازم به ذکر است که شیار نمونه‌ها در راستای طولی لوله ایجاد شده است (شکل ۵). به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصله و تکرارپذیری آنها، برای هر یک از حالت‌های مد نظر در آزمایش‌ها سه نمونه در نظر گرفته شد. این نمونه‌ها توسط یک حرف لاتین و عدد ۱ تا ۳ کدگذاری شد (شکل ۶).



شکل (۵) جهت شیار و راستای نمونه شاری تحت آزمایش



شکل (۶) تصویری از نمونه‌های ساخته‌شده و کدگذاری‌شده

شماره نمونه	انرژی شکست (J)	درصد نسبت انرژی شکست به میانگین انرژی شکست	انرژی برخورد (J)	تکانه برخورد (kg.m/s)	نرخ کرنش (1/s)	سرعت برخورد (m/s)
A1	280/81	63/21	283/39	448/30	131/20	3/00
A2	280/81					
A3	278/84					
B1	283/96	46/90	283/96	604/80	102/20	4/06
B2	283/96					
B3	283/96					
C1	292/70	38/96	292/70	701/17	169/00	4/02
C2	292/70					
C3	292/70					
D1	298/01	33/24	298/01	898/08	182/63	4/90
D2	293/24					
D3	303/79					
E1	308/29	29/24	308/29	1004/34	201/00	0/36
E2	303/16					
E3	313/43					
F1	340/04	27/26	327/30	1200/00	214/00	0/72
F2	320/77					
F3	316/08					

از آنجا که هدف، بررسی اثر سرعت برخورد چکش بر میزان انرژی شکست در نمونه فولاد API X65 در آزمایش ضربه شارپی است، لذا در نمودار ۴، تغییرات انرژی شکست در مقابل سرعت برخورد چکش ترسیم شده است که روند افزایشی انرژی شکست را در مقابل افزایش سرعت برخورد چکش نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش، می‌توان معادله درجه ۲ را برای تعیین انرژی شکست بر اساس سرعت برخورد برای فولاد API X65 تعیین نمود. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_f = 10.55v^2 (m/s) - 78.525v (m/s) + 429.34, R^2 = 0.9845 \quad (5)$$

همچنین ارتباط بین سرعت برخورد و انرژی شکست را می‌توان به صورت خطی نشان داد، این معادله به شکل زیر تعریف می‌شود:

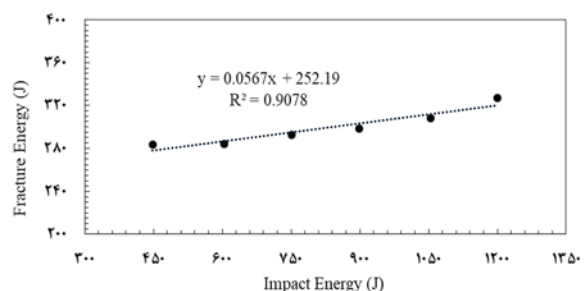
$$E_f = 17.89v (m/s) + 211, R^2 = 0.8661 \quad (6)$$

سرعت برخورد چکش با نمونه آزمایش بر حسب متر بر ثانیه است. با مقایسه R^2 معادله ۵ و معادله ۶ با هم در نمودار ۴، این مقدار برای معادله ۵ به عدد یک نزدیک‌تر است و لذا پیش‌بینی بهتری برای تعیین انرژی شکست بر حسب سرعت برخورد دارد. نکته‌ای که در اینجا وجود دارد، اختلاف زیاد نتایج حاصل از معادله ۵ و ۶ برای میزان سرعت‌های برخورد کم و بارگذاری شبه‌استاتیکی است. در هر صورت برون‌یابی معادله ۶ برای بارگذاری شبه‌استاتیکی با $v=0$ مقدار انرژی شکست شارپی را ۲۱۱ ژول برآورد می‌کند که منطقی به نظر می‌رسد (البته برای صحت‌سنجی آن نیاز به آزمایش تجربی در آینده است). از آنجا که آزمایش‌ها در محدوده سرعتی بین ۳/۵ تا ۵/۷۲ متر بر ثانیه انجام شده‌اند و با توجه به محدودیت‌های دستگاه و مصالح مورد آزمایش امکان آزمایش در سرعت‌های بالاتر یا پایین‌تر وجود ندارد؛ لذا رابطه درجه ۲ ذکر شده

به منظور درک بهتر اثر تغییرات سرعت ضربه و انرژی اولیه برخورد بر میزان انرژی شکست فولاد API X65T نمودار تغییرات انرژی شکست در مقابل انرژی برخورد ترسیم شده است (نمودار ۳). با توجه به پراکندگی داده‌ها می‌توان رابطه‌ای خطی بین انرژی برخورد و انرژی شکست به صورت معادله ۴ تعریف نمود:

$$E_f(J) = 0.0567E_i(J) + 252.19, R^2 = 0.9078 \quad (4)$$

E_f انرژی شکست بر حسب ژول و E_i انرژی برخورد چکش بر حسب ژول است.

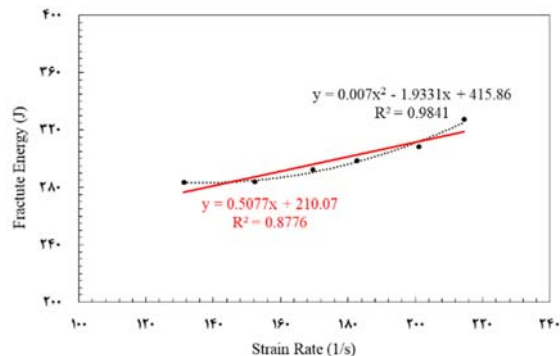


نمودار ۳) تغییرات انرژی شکست در مقابل انرژی برخورد

میانگین انرژی شکست به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده معادل 299.02 ژول با انحراف معیار $15.26/299$ ژول حاصل شد. لذا با توجه به استاندارد ASTM E23، می‌توان از ماشین ضربه شارپی با ظرفیت ۴۵۰ ژول (که ۸۰٪ ظرفیت آن برابر ۳۶۰ ژول است) برای بررسی انرژی شکست فولاد API X65 بهره گرفت (همچنین نمی‌توان از ماشین ضربه شارپی با ظرفیت ۳۰۰ ژول برای شکست نمونه‌ای که انرژی شکست آن $292/299$ ژول است استفاده کرد).

با بررسی نتایج ذکرشده در جدول ۲ خطای رابطه به دست آمده برای تعیین انرژی شکست بر حسب انرژی برخورد چکش کمتر از ۲/۱٪ به دست آمده است که نشان می‌دهد رابطه ذکرشده میزان انرژی شکست برای فولاد API X65 را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

همچنین نتایج جدول ۳، نشان می‌دهد که خطای حاصل از رابطه ۶ برای تعیین انرژی شکست بر حسب سرعت برخورد چکش مقداری کمتر از ۴/۲٪ دارد. بنابر این نتایج می‌توان گفت که رابطه ۴ پیش‌بینی مناسب‌تری برای تعیین انرژی شکست نسبت به رابطه ۶ دارد، علاوه بر این، R^2 آن به عدد یک نزدیک‌تر است.



نمودار ۵) تغییرات انرژی شکست در مقابل نرخ کرنش

جدول ۲) نتایج خطای رابطه تعیین‌شده برای انرژی شکست بر حسب انرژی برخورد

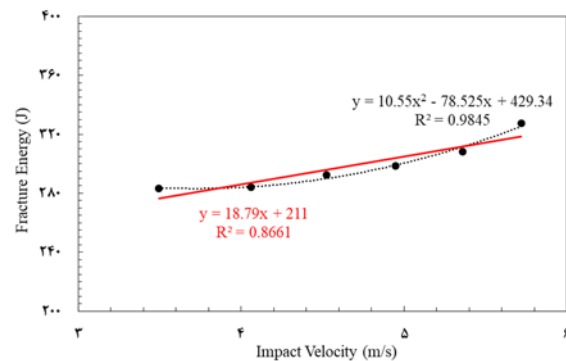
درصد خطا	انرژی شکست از رابطه ۴ (J)	انرژی شکست تجربی (J)	انرژی برخورد (J)	سرعت برخورد چکش (m/s)
-۲/۰	۲۷۷/۶۱	۲۸۳/۳۹	۴۴۸/۳۰	۳/۵۰
۰/۹	۲۸۶/۴۸	۲۸۳/۹۶	۶۰۴/۸۵	۴/۰۶
۰/۷	۲۹۴/۷۸	۲۹۲/۶۵	۷۵۱/۱۷	۴/۵۲
۱/۵	۳۰۳/۱۱	۲۹۸/۵۱	۸۹۸/۰۸	۴/۹۵
۱/۲	۳۱۱/۹۷	۳۰۸/۲۹	۱۰۵۴/۳۴	۵/۳۶
-۲/۱	۳۲۰/۲۶	۳۲۷/۳۰	۱۲۰۰/۵۰	۵/۷۲

جدول ۳) نتایج خطای رابطه تعیین‌شده برای انرژی شکست بر حسب سرعت برخورد

درصد خطا	انرژی شکست از رابطه ۶ (J)	انرژی شکست تجربی (J)	انرژی برخورد (J)	سرعت برخورد چکش (m/s)
-۳	۲۷۴/۶۹	۲۸۳/۳۹	۴۴۸/۳۰	۳/۵
-۰/۲	۲۸۳/۶۳	۲۸۳/۹۶	۶۰۴/۸۵	۴/۰۶
-۰/۳	۲۹۱/۸۶	۲۹۲/۶۵	۷۵۱/۱۷	۴/۵۲
۰/۳	۲۹۹/۵۵	۲۹۸/۵۱	۸۹۸/۰۸	۴/۹۵
-۰/۴	۳۰۶/۸۹	۳۰۸/۲۹	۱۰۵۴/۳۴	۵/۳۶
-۴/۲	۳۱۳/۳۳	۳۲۷/۳۰	۱۲۰۰/۵۰	۵/۷۲

میزان انرژی شکست در فولاد API X65 با افزایش سرعت برخورد و به تبع آن افزایش انرژی و تکانه برخورد، روند افزایشی دارد (نمودارهای ۳ تا ۵). در مقالاتی که مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت، یکی از اثرات افزایش سرعت بارگذاری و نرخ کرنش، افزایش استحکام و مقاومت نهایی مواد به خصوص فولادهای با

برای بازه سرعتی مورد بررسی مناسب است و در بازه سرعت گسترده‌تر احتمال وجود خطا در نتایج بالا می‌رود. لذا برای تعیین انرژی شکست بر حسب سرعت برخورد رابطه ۶ مناسب است.



نمودار ۴) تغییرات انرژی شکست در مقابل سرعت برخورد

در نمودار ۵، تغییرات انرژی شکست در مقابل تغییرات نرخ کرنش ترسیم شده است. مقادیر نرخ کرنش با استفاده از معادله ۱ محاسبه شده است. روند افزایشی انرژی شکست در مقابل افزایش نرخ کرنش است که با توجه به رابطه مستقیم نرخ کرنش و سرعت برخورد، این امر قابل پیش‌بینی بود. با توجه به پراکندگی داده‌های نمودار ۵ می‌توان رابطه‌ای بین میزان نرخ کرنش و انرژی شکست برای فولاد API X65 در آزمایش ضربه شاری تعریف نمود. این معادله درجه ۲ به شکل رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$E_f = 0.007\varepsilon^2 (mm/mm.s) - 1.9331\varepsilon (mm/mm.s) + 415.86, R^2 = 0.9841 \quad (7)$$

همچنین می‌توان رابطه بین انرژی شکست با نرخ کرنش را به صورت خطی تفسیر کرد، این معادله به شکل زیر است.

$$E_f = 0.5077\varepsilon (mm/mm.s) + 210.07, R^2 = 0.8776 \quad (8)$$

غ میزان نرخ کرنش بر حسب s^{-1} است. در اینجا هم با مقایسه R^2 معادله‌های ۷ و ۸ در نمودار ۵ این مقدار برای معادله ۷ به عدد یک نزدیک‌تر است و لذا پیش‌بینی بهتری برای تعیین انرژی شکست بر حسب نرخ کرنش دارد (این معادلات برای تعیین انرژی شکست در بارگذاری‌های دینامیکی مناسب است). مشابه معادله ۶ انرژی شکست شاری برای $\dot{\varepsilon} = 0$ برابر ۲۱۰/۰۷ ژول حاصل می‌شود، بنابراین رابطه درجه اول، یعنی معادله ۸ برای تعیین انرژی شکست بر حسب نرخ کرنش پیشنهاد می‌شود.

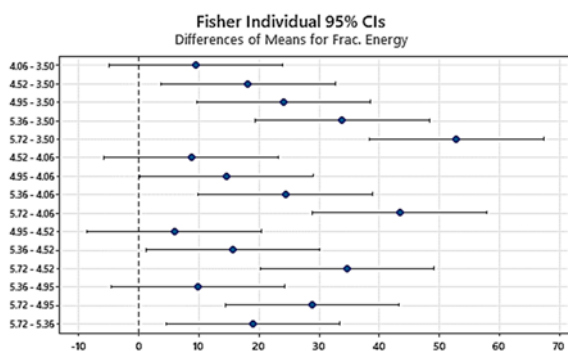
برای تعیین خطای معادلات بیان‌شده برای محاسبه انرژی شکست بر مبنای انرژی برخورد و سرعت برخورد، به مقایسه بین مقادیر حاصل از روابط ۴ و ۶ با مقادیر تجربی پرداخته شد و میزان خطا از رابطه ۹ محاسبه شد. نتایج این مقایسه و خطاهای موجود در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

$$error = \frac{\text{انرژی شکست تجربی} - \text{انرژی شکست حاصل از رابطه}}{\text{انرژی شکست تجربی}} \times 100 \quad (9)$$

مختلف را تعیین نمود. به این منظور تحلیل فیشر روی داده‌ها صورت گرفت (جدول ۵). بررسی نتایج حاصل از تحلیل فیشر بیان می‌کند که میزان انرژی شکست برای سطح سرعت ۵/۷۲ متر بر ثانیه کاملاً مستقل است. اما سطوح سرعت ۵/۳۶ و ۴/۹۵ متر بر ثانیه همپوشانی داشته و اختلاف میانگین کمی دارند، همچنین سطوح سرعت ۴/۹۵ با ۴/۵۲ و ۴/۵۲ با ۴/۰۶ و ۴/۰۶ با ۳/۵۰ دو به دو شرایط مشابهی دارند. اما هیچ گونه همپوشانی بین سطح سرعت ۳/۵۰ و ۵/۷۲ وجود ندارد که نشان از اثرگذاری تغییرات سرعت بر میزان انرژی شکست است. مقایسه دو به دو بین نتایج سطوح مختلف سرعت در شکل ۸ زیر نمایش داده شده است.

جدول ۵ نتایج حاصل از تحلیل فیشر بر داده‌های آزمایش (تعداد تکرار برای همه موارد ۳ بار بود)

دسته‌بندی	متوسط انرژی شکست	سرعت برخورد
A	۳۲۷/۳۰	۵/۷۲
B	۳۰۸/۲۹	۵/۳۶
B C	۲۹۸/۵۱	۴/۹۵
C D	۲۹۲/۶۰	۴/۵۲
D E	۲۸۴/۰۰	۴/۰۶
E	۲۷۴/۴۹	۳/۵۰



شکل ۸ نتایج تحلیل فیشر در مقایسه دو به دو میانگین انرژی شکست برای سطوح سرعت مختلف

مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

شبیه‌سازی آزمایش شاری در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. به این منظور نمونه به‌صورت سه‌بعدی بر مبنای ابعاد شکل ۱ مدل شد. چکش و سندان‌ها که نمونه روی آن قرار می‌گیرد، صلب در نظر گرفته شدند. طبق استاندارد ASTM E23 شعاع نوک چکش ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد [4]. مشخصات مکانیکی نمونه شامل ضریب ارتجاعی ۲۱۰ GPa، ضریب پواسون ۰/۳، تنش تسلیم ۵۰۵ MPa و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بر اساس نتایج حاصل آزمایش‌های تجربی وارد نرم‌افزار شد [26]. همچنین مشخصات تنش- کرنش پلاستیک حقیقی نیز بر مبنای مقادیر ذکرشده در جدول ۶ به نرم‌افزار معرفی شد. مدل آسیب گرسون- تیوردگارد- نیدلمن برای شبیه‌سازی رشد ترک و شکست نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. برای داشتن شبکه‌بندی مناسب و

چقرمگی بالا بود [12, 13, 23]. فولاد API X65 نیز در دسته فولادهای پر استحکام کم‌الیاژ قرار می‌گیرد که جزو فولادهای بسیار نرم با چقرمگی بالا است. بنابراین رفتار مشاهده‌شده در آزمایش‌ها را می‌توان به این شکل تفسیر نمود که با افزایش سرعت برخورد و افزایش نرخ بارگذاری، ماده مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد، به این معنی که در نمودار تنش- کرنش، تنش تسلیم و مقاومت نهایی ماده افزایش یافته و در مقابل، کرنش شکست آن کاهش می‌یابد؛ بنابراین استحکام نهایی در سطح بالاتری قرار گرفته و سطح زیر نمودار که بیانگر چقرمگی و چگالی انرژی شکست است، افزایش پیدا می‌کند. به این ترتیب، افزایش سرعت برخورد و در نتیجه نرخ بارگذاری بالاتر، باعث افزایش استحکام ماده و بالارفتن مقاومت آن در مقابل شکست می‌شود. همچنین نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت ماشین (افزایش سرعت برخورد) نسبت کمتری از انرژی صرف شکست نمونه می‌شود؛ بنابراین شرط سرعت برخورد ثابت حین آزمایش ضربه برقرار است.

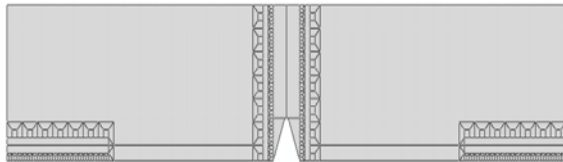
تحلیل واریانس نتایج

به‌منظور بررسی میزان وابستگی تغییرات سرعت برخورد چکش بر میزان انرژی شکست و بررسی تفاوت معنادار بین میانگین انرژی شکست برای مقادیر متفاوت سرعت، تحلیل واریانس روی داده‌های آزمایش انجام شد. در این تحلیل، سرعت برخورد چکش متغیر مستقل و انرژی شکست به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. تحلیل واریانس با استفاده از نرم‌افزار Minitab صورت گرفت. فرض صفر برای تحلیل واریانس این داده‌ها برابری میانگین انرژی شکست برای سطوح سرعت مختلف و فرض یک، بیانگر وجود تفاوت معنادار بین میانگین انرژی شکست برای سطوح مختلف سرعت است؛ به این معنی که به‌ازای حداقل یک سطح سرعت، میانگین انرژی شکست دارای تفاوت معناداری با سطوح دیگر است. همچنین مقدار سطح اهمیت (خطای نوع اول) $\alpha=5\%$ منظور شد (جدول ۴).

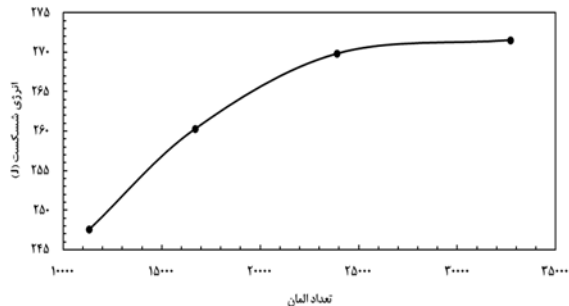
جدول ۴ تحلیل واریانس اطلاعات حاصل از آزمایش انجام‌شده توسط نرم‌افزار Minitab (p-Value: ۰/۰۰۰۰ و F-Value: ۱۵/۸۴)

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
سرعت برخورد	۵	۵۲۲۵/۵	۱۰۴۵/۱۰
خطا	۱۲	۷۹۱/۹	۶۵/۹۹
مجموع	۱۷	۶۰۱۷/۳	۱۱۱۱/۰۹

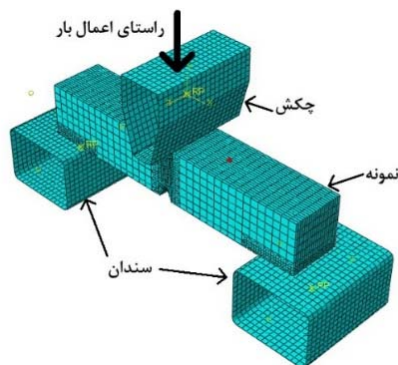
در تحلیل واریانس انجام‌شده مقدار p-Value معادل صفر است و سطح اهمیت ۵% در نظر گرفته شده است و به این مفهوم است که میانگین‌های حاصل از آزمایش در سطوح سرعتی حداقل در سطح سرعت مختلف با هم برابر نیستند که بیانگر تاثیرگذاری تغییرات سرعت برخورد بر میزان انرژی شکست است. با توجه به متفاوت بودن میزان میانگین انرژی شکست برای سطوح مختلف سرعت، حال می‌توان به بررسی تفاوت بین سطوح مختلف پرداخت و بیشترین و کمترین تفاوت انرژی شکست بین سطوح سرعت



شکل ۹) تقسیم‌های نمونه به منظور ایجاد شبکه مناسب



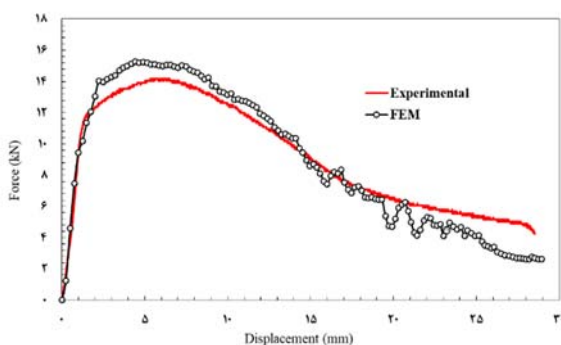
نمودار ۶) منحنی تحلیل حساسیت به مش



شکل ۱۰) طرح‌واره شبکه‌بندی شده

جدول ۷) ضرایب پیش‌فرض و نهایی برای مدل آسیب گرسون [26]

مقدار نهایی	مقدار پیش‌فرض	ضرایب GTN
۱/۵	۱/۵	q_1
۱	۱	q_2
۲/۲۵	۲/۲۵	q_3
۰/۳	۰/۳	ϵ_N
۰/۱	۰/۱	S_N
۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۳	f_N
۰/۰۳۰	۰/۰۱۹	f_c
۰/۳۶۰	۰/۲۹	f_f



نمودار ۷) مقایسه نمودارهای جابجایی- نیرو در آزمایش تجربی و حل عددی

متراکم در نقاط بحرانی که محل برخورد چکش با نمونه و محل تماس نمونه با سندان‌ها است، از روش تقسیم استفاده شد و بر مبنای تقسیم‌های ایجادشده، شبکه‌بندی نمونه صورت پذیرفت. شکل ۹ تقسیم‌های ایجادشده روی سطح جانبی نمونه برای اجرای شبکه‌بندی را نمایش می‌دهد.

برای قطعات صلب مانند چکش و سندان از المان خطی، سه‌بعدی و چهار گره‌ای صلب (R3D4) استفاده شده است. برای نمونه مورد مطالعه (با توجه به اینکه شکل‌پذیر است) از المان خطی، پیوسته، سه‌بعدی و هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهشی (C3D8R) استفاده شده است. از آنجا که در تحلیل اجزای محدود ابعاد و اندازه المان‌ها در نتایج تأثیرگذار هستند، تحلیل حساسیت به مش انجام شد (نمودار ۶). با افزایش تعداد المان‌ها از ۱۱۳۲۷ به ۵۳۷۷۵، مقدار انرژی شکست ۲۷٪ افزایش یافته است. تعداد المان در مدل نهایی تحلیل ۲۳۹۰۰ است. در شکل ۱۰ طرح‌واره شبکه‌بندی‌شده نشان داده شده است.

به منظور کالیبره کردن متغیرهای آسیب گرسون، مقدار اولیه متغیرها بر اساس تحقیق شاهسونی و هاشمی [27]، انتخاب شد. پس از انجام تحلیل اولیه نمودار جابجایی- نیرو ترسیم شد و با نمودار تجربی حاصل از تحقیق هاشمی [28] مقایسه شد. سپس با انجام تحلیل‌های بیشتر و سعی و خطا، متغیرهای مدل آسیب گرسون اصلاح شد تا نتایج حاصل از تحلیل با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشته باشد. در جدول ۷ مقادیر پیش‌فرض و نهایی متغیرهای آسیب گرسون آورده شده است. نمودارهای جابجایی- نیرو در تحلیل عددی و آزمایش تجربی [28] همان طور که در نمودار ۷ نمایش داده شده به شکل مناسبی بر هم منطبق شده است.

جدول ۶) مقادیر منحنی تنش- کرنش پلاستیک حقیقی فولاد API X65

ردیف	کرنش پلاستیک	تنش پلاستیک (MPa)
۱	۰	۵۰۵
۲	۰/۰۱	۵۴۹
۳	۰/۰۳	۵۹۹
۴	۰/۰۵	۶۳۱
۵	۰/۰۶	۶۵۲
۶	۰/۰۸	۶۶۷
۷	۰/۱۰	۶۸۱
۸	۰/۱۲	۶۹۳
۹	۰/۱۴	۷۰۳
۱۰	۰/۱۶	۷۱۲
۱۱	۰/۱۸	۷۱۹
۱۲	۰/۱۹	۷۲۲
۱۳	۰/۳۰	۷۵۵
۱۴	۰/۵۰	۷۹۴
۱۵	۰/۷۰	۸۲۱
۱۶	۰/۸۰	۹۳۲
۱۷	۰/۹۰	۹۴۱
۱۸	۱/۰۰	۸۵۰
۱۹	۱/۱۰	۸۵۸
۲۰	۱/۲۰	۸۶۶

جدول ۸) نتایج حاصل از تحلیل اطلاعات با سرعت برخورد ثابت (۵/۵m/s)؛ میانگین انرژی شکست برابر ۲۶۵ ژول است.

جرم چکش (kg)	انرژی برخورد (J)	انرژی شکست (J)	بیشینه نیرو (kN)	تغییر مکان (mm)	زمان برخورد (ms)
۲۰	۳۰۰	۲۷۳/۶۶	۱۵/۳۶	۳۳/۰۳	۷/۱۳
۳۰	۴۵۰	۲۶۶/۳۷	۱۵/۴۰	۳۲/۴۸	۶/۶۸
۴۰	۶۰۰	۲۶۸/۴۹	۱۵/۴۰	۳۱/۹۰	۶/۴۵
۵۰	۷۵۰	۲۶۸/۷۶	۱۵/۴۰	۳۳/۹۴	۶/۵۸
۶۰	۹۰۰	۲۷۴/۶۸	۱۵/۲۷	۳۳/۵۵	۶/۵۴
۷۰	۱۰۵۰	۲۷۲/۳۲	۱۵/۴۶	۳۲/۹۶	۶/۴۰
۸۰	۱۲۰۰	۲۶۶/۰۳	۱۵/۳۸	۳۱/۲۵	۵/۸۵

بررسی اثر تغییرات سرعت برخورد

در بخش دوم تحلیل‌ها، به بررسی اثر تغییرات سرعت برخورد چکش بر میزان انرژی شکست پرداخته شده است. برای این حالت جرم چکش به میزان ثابت ۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد و سرعت برخورد چکش با نمونه بین ۵ تا ۸ متر بر ثانیه متغیر بود. همانند حالت قبل پس از اتمام هر تحلیل، نیروی وارد بر سندان‌ها و جابجایی چکش متناظر با آن از نرم‌افزار استخراج شد و از طریق انتگرال‌گیری سطح زیر نمودار تغییر مکان-نیرو، میزان انرژی شکست برای سرعت‌های مختلف برخورد محاسبه شد (جدول ۹).

می‌توان دریافت که تغییرات سرعت برخورد نیز تاثیر چندانی در انرژی شکست ندارد، در واقع انرژی شکست روند کاهشی ناچیزی دارد، به‌طوری که با افزایش سرعت از ۵ به ۸ متر بر ثانیه کاهشی حدود ۵٪ در میزان انرژی شکست مشاهده می‌شود. همچنین میزان بیشترین نیروی تماسی در طول برخورد و میزان جابجایی چکش در طول برخورد تغییر محسوسی ندارند و مقدار تقریباً ثابتی دارند؛ اما با افزایش سرعت برخورد، کاهش چشمگیری در زمان برخورد مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که با افزایش حدود ۱/۶ برابری سرعت از ۵ به ۸ متر بر ثانیه، زمان برخورد کاهش حدود ۴۰٪ دارد که باعث افزایش نرخ کرنش خواهد شد.

جدول ۹) نتایج حاصل از تحلیل اطلاعات با فرض جرم ثابت چکش (۵۰kg)؛ میانگین انرژی شکست برابر ۲۷۰ ژول است.

جرم چکش (kg)	انرژی برخورد (J)	انرژی شکست (J)	بیشینه نیرو (kN)	تغییر مکان (mm)	زمان برخورد (ms)
۵۰	۶۲۵	۲۷۳/۹۹	۱۵/۲۹	۳۳/۹۲	۷/۵
۵۰	۷۵۶	۲۶۸/۷۶	۱۵/۴۰	۳۳/۹۴	۶/۶
۶۰	۹۰۰	۲۶۸/۳۸	۱۵/۳۴	۳۳/۸۴	۵/۹
۶۰	۱۰۵۶	۲۶۸/۹۴	۱۵/۳۶	۳۳/۳۸	۵/۴
۷۰	۱۲۲۵	۲۷۱/۵۴	۱۵/۳۳	۳۲/۴۳	۴/۸
۷۰	۱۴۰۶	۲۶۶/۹۳	۱۵/۴۹	۳۳/۵۹	۴/۷
۸۰	۱۶۰۰	۲۶۸/۸۰	۱۵/۶۶	۳۳/۷۸	۴/۵

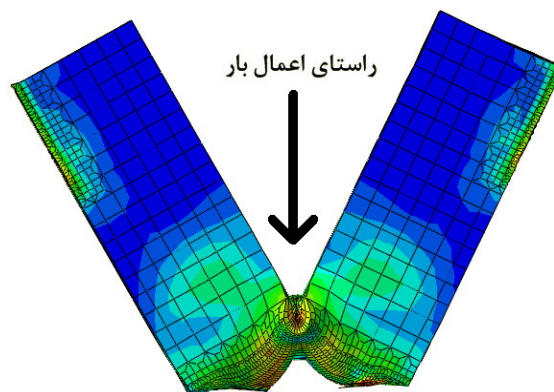
روندی که در میزان انرژی شکست با افزایش سرعت و در نتیجه انرژی برخورد در آزمایش‌های تجربی به‌دست آمد، با آنچه از تحلیل عددی به‌دست‌آمده متفاوت است. دلیل این امر را می‌توان در

انجام تحلیل عددی

پس از مدل‌سازی و تعیین ضرایب مدل گرسون، تحلیل‌های اصلی انجام شد. همان‌طور که ذکر شد، هدف، بررسی اثر تغییرات میزان تکانه یا اندازه حرکت ضربه‌زننده یا چکش بر میزان انرژی شکست نمونه است. از آنجا که میزان اندازه حرکت وابسته به دو عامل جرم و سرعت است، لذا تحلیل‌های مورد نظر در دو بخش انجام شد. در بخش اول سرعت برخورد چکش با نمونه مقدار استاندارد ۵/۵ متر بر ثانیه فرض شد و جرم چکش به‌عنوان متغیر مساله در نظر گرفته شد و در بخش دوم تحلیل‌ها، با فرض جرم ثابت ۵۰ کیلوگرم برای چکش، سرعت برخورد چکش به نمونه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. زمان در نظر گرفته‌شده برای برخورد بر مبنای آزمایش تجربی حدود ۰/۰۹۴ ثانیه وارد نرم‌افزار شد [28].

بررسی اثر تغییرات جرم چکش

به‌منظور تعیین اثر تغییرات جرم چکش بر میزان انرژی شکست، سرعت برخورد مقدار ۵/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد و تحلیل‌هایی بر فرض جرم متغیر برای چکش بین ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم صورت پذیرفت. پس از انجام هر تحلیل، تغییرات نیرو در مقابل تغییر مکان از نرم‌افزار دریافت شد و انتگرال زیر منحنی نیرو-جابجایی که بیانگر میزان انرژی شکست است، محاسبه شد. شکل ۱۱، تصویر نمونه را پس از پایان تحلیل و شکسته‌شدن نمونه نمایش می‌دهد. همچنین، نتایج این تحلیل‌ها در جدول ۸ آورده شده است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که تغییرات جرم، اثر چندانی بر میزان انرژی شکست، بیشینه نیروی برخورد و میزان جابجایی چکش در طول برخورد ندارد، اما با افزایش جرم چکش و به تبع آن افزایش انرژی برخورد، زمان برخورد روند کاهشی دارد. از آنجا که میزان جابجایی تغییری در مقابل تغییرات جرم چکش و انرژی برخورد ندارد، لذا با کم‌شدن زمان برخورد می‌توان حدس زد که میزان نرخ کرنش با افزایش جرم ضربه‌زننده افزایش می‌یابد. آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که تغییرات نرخ کرنش بر مشخصات سطح شکست و همچنین رفتار مکانیکی مواد تاثیرگذار است که این موضوع از طریق آزمایش‌های تجربی قابل بررسی خواهد بود.



شکل ۱۱) نمایی از نمونه پس از شکست

تغییر رفتار مکانیکی مواد در نرخ بارگذاری‌های مختلف دانست. در تحلیل عددی در سرعت‌های مختلف برخورد، خواص مکانیکی ماده تحت بررسی به صورت یکسان در نظر گرفته شده است و همین امر موجب بروز اختلاف در نتایج عددی و تجربی شده است.

نتایج

با بررسی و مطالعه تحقیقات انجام شده در خصوص اثر نرخ بارگذاری بر خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد روشن می‌شود که تغییر این عوامل، تأثیرات مشخصی بر خواص مکانیکی از جمله میزان مقاومت تسلیم یا نهایی و همچنین انرژی لازم برای شکست دارند. در بررسی تجربی و عددی انجام شده روی اثرات سرعت و تکانه برخورد بر انرژی شکست در آزمایش ضربه شاری بر فولاد API X65 در تحقیق حاضر نتایج زیر به دست آمد:

- سرعت برخورد بین ۳/۵۰ تا ۵/۷۲ متر بر ثانیه متغیر بود که این تغییر سرعت باعث تغییر انرژی برخورد بین حدود ۴۵۰ تا ۱۲۰۰ ژول شده است. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت و تکانه برخورد، انرژی شکست روند افزایش دارد به طوری که با افزایش ۶۰ درصدی سرعت اعمال ضربه، میزان انرژی شکست حدود ۱۵٪ افزایش یافته است. از آنجا که تغییر نرخ بارگذاری و نرخ کرنش بر خواص مکانیکی مواد اثر می‌گذارد، انتظار می‌رفت که افزایش نرخ کرنش باعث تغییر میزان انرژی شکست شود. در اکثر آلیاژهای فولادی با افزایش نرخ کرنش و سرعت بارگذاری میزان مقاوت تسلیم و مقاوت نهایی افزایش می‌یابد؛ لذا نمودار تنش کرنش در تراز بالاتری قرار گرفته و سطح زیر نمودار تنش-کرنش که بیانگر میزان چگالی انرژی شکست است، افزایش خواهد یافت.

با بررسی عددی اثر تغییرات جرم چکش در آزمایش ضربه شاری که باعث تغییر اندازه حرکت چکش و میزان انرژی برخورد می‌شود، نتایج زیر حاصل شد:

- تغییر جرم چکش در محدوده ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم با سرعت ثابت برخورد (۵/۵ متر بر ثانیه) تأثیر محسوسی در میزان انرژی شکست، نیروی تماسی برخورد و میزان جابجایی چکش در طول برخورد ندارد و این متغیرها در اثر افزایش جرم ضربه‌زننده در آزمایش ضربه شاری تقریباً مقدار ثابتی خواهد داشت. اما افزایش جرم چکش در آزمایش ضربه شاری، زمان برخورد روند کاهشی دارد که انتظار می‌رود، این امر سبب افزایش نرخ کرنش به وجود آمده در نمونه حین شکست باشد. افزایش نرخ کرنش بر مشخصات سطح شکست و همچنین رفتار مکانیکی مصالح اثرگذار است که این موضوع با انجام آزمایش‌های تجربی قابل بررسی است.

وقتی تغییر در اندازه حرکت چکش و انرژی برخورد به واسطه تغییر سرعت برخورد صورت پذیرفت، مشاهده شد:

- با افزایش سرعت برخورد در محدوده ۵ تا ۸ متر بر ثانیه با جرم ثابت چکش (۵۰ کیلوگرم) میزان انرژی شکست روند کاهشی خیلی کمی دارد؛ به طوری که با افزایش سرعت از ۵ به ۸ متر بر ثانیه با

۲/۵ برابر شدن انرژی برخورد، کاهشی حدود ۵٪ در انرژی شکست نمونه حاصل می‌شود.

- همانند تغییرات جرم، تغییرات سرعت نیز اثری بر میزان حداکثر نیروی تماسی حین برخورد و میزان جابجایی چکش در طول برخورد ندارد.

- بیشترین اثر افزایش سرعت برخورد در زمان برخورد مشاهده می‌شود؛ به طوری که با افزایش سرعت از ۵ به ۸ متر بر ثانیه، زمان برخورد کاهشی حدود ۴۰٪ دارد و بیانگر افزایش نرخ کرنش است.

- روند تغییرات انرژی شکست در مقابل افزایش سرعت و تکانه برخورد در تحلیل عددی و تجربی متفاوت است که این تفاوت را می‌توان به دلیل تغییر مقاوت نهایی و کارسختی مواد در نرخ بارگذاری‌های متفاوت دانست. بنابراین برای انجام تحلیل عددی در بارگذاری با نرخ‌های مختلف می‌بایست به رفتار مکانیکی ماده در آن نرخ بارگذاری توجه ویژه داشت. به عبارت دیگر، نمودار تنش واقعی بر حسب کرنش واقعی در نرخ کرنش‌های مختلف باید در نرم‌افزار آباکوس وارد و استفاده شود تا نزدیکی بهتری بین نتایج تجربی و عددی حاصل شود.

تشکر و قدردانی: از مسئولین شرکت لوله‌سازی و تجهیزات سدید به دلیل دراختیار گذاشتن فولاد API X65 برای ساخت نمونه‌های آزمایش و همچنین از آقای مهندس صادقی که نقش بسزایی در طراحی و ساخت ماشین ضربه شاری داشته‌اند، تقدیر و تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: سید سماالدین محیطزاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سید حجت هاشمی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

فهرست علائم

g	شتاب گرانش
h	ارتفاع اولیه چکش
h'	ارتفاع نهایی چکش پس از شکست نمونه
L	فاصله بین تکیه‌گاه‌های قرارگیری نمونه (m)
m	جرم مجموعه چکش
v	سرعت برخورد چکش به نمونه (ms^{-1})
W	عرض نمونه (m)
E_i	انرژی برخورد (J)
E_f	انرژی شکست (J)
U_0	انرژی پتانسیل چکش در لحظه رهاسازی
U_F	انرژی پتانسیل نهایی چکش پس از شکست نمونه
ε	نرخ کرنش (s^{-1})

منابع

1- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure

- 15- Hashemi H, Hashemi SH. Investigation of macroscopic fracture surface characteristics of API X65 steel using three-point bending test. *Modares Mechanical Engineering*. 2019;19(7):1591-1600. [Persian]
- 16- Ramachandra S, Sudheer Kumar P, Ramamurty U. Impact energy absorption in an Al foam at low velocities. *Scripta Materialia*. 2003;49(8):741-745.
- 17- Kim JH, Kim D, Han HN, Barlat F, Lee MG. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;559:222-231.
- 18- Wang W, Ma Y, Yang M, Jiang P, Yuan F, Wu X. Strain rate effect on tensile behavior for a high specific strength steel: From quasi-static to intermediate strain rates. *Metals*. 2018;8(1):11.
- 19- Varga T, Loibnegger F. Low striking velocity testing of precracked Charpy-type specimens. In: Siewert T, Manahan M. editors. *Pendulum impact testing: A century of progress*. Pennsylvania: ASTM International; 2000. pp. 267-285.
- 20- Chaouadi R, Puzzolante JL. Loading rate effect on ductile crack resistance of steels using precracked Charpy specimens. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(11):752-761.
- 21- Lee WS, Lin CF, Chen TH, Huang CS. Dynamic shear properties of alloy 718 over wide temperature range. *Materials Transactions*. 2012;53(10):1758-1764.
- 22- Lee WS, Hsu MC. Mechanical properties and dislocation substructure of inconel 690 alloy impacted at cryogenic temperatures. *Materials Transactions*. 2014;55(11):1689-1697.
- 23- Boyce BL, Dilmore MF. The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s^{-1} to 200 s^{-1} . *International Journal of Impact Engineering*. 2009;36(2):263-271.
- 24- Sahraoui S, El Mahi A, Castagnède B. Measurement of the dynamic fracture toughness with notched PMMA specimen under impact loading. *Polymer Testing*. 2009;28(7):780-783.
- 25- Hwang B, Lee S, Kim YM, Kim NJ, Yoo JY, Woo CS. Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line pipe steel. *Material Science and Engineering: A*. 2004;368(1-2):18-27.
- 26- Fathi-Asgarabad, Hashemi SH. Comparison of experimental and numerical fracture energy of thermo-mechanical steel in drop weight tear test. 5th Iranian Pipe & Pipeline Conference, Razi Intl. Conference center, 10-11 Dec 2013, Tehran, Iran. Tehran: Shahid Beheshti University; 2013. [Persian]
- 27- Shahsavani AR, Hashemi SH. Experimental and numerical investigation of initial notch radius effect on Charpy fracture energy in API X65 steel. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;52(2):1-3.
- 28- Hashemi SH. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009;86(8):533-540.
- in API X65 Steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2012;98:8-15.
- 2- Tóth L, Rossmanith HP, Siewert TA. Historical background and development of the Charpy test. *European Structural Integrity Society*. 2002;30:3-19.
- 3- Wu YY, Yu H, Lu C, Tieu AK, Godbole A. Transition of ductile and brittle fracture during DWTT by FEM. 13th International Conference on Fracture (ICF). China: Curran Associates, Inc; 2013. pp. 1648-1655.
- 4- ASTM. ASTM E23-07a, notched bar impact testing of metallic materials [Internet]. Pennsylvania: ASTM International; 2011 [Unknown Cited]. available from: http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/ASTM%20E23%20%28impact%20test%29_20160406_233024.pdf
- 5- Lee SM, Cheon JS, Im YT. Experimental and numerical study of the impact behavior of SMC plates. *Composite Structure*. 1999;47(1-4):551-561.
- 6- Liu Y, Yaghoubi AS, Liaw B. Low-velocity impact study on GLARE FMLs using various indenter. *Journal of Aerospace Engineering*. 2014;27(2):325-335.
- 7- Wang W, Chouw N, Jayaraman K. Effect of thickness on the impact resistance of flax fiber-reinforced polymer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016;35(17):1277-1289.
- 8- Clutton EQ, Chanell AD. Energy partitioning in impact fracture toughness measurements. In: Williams JG, Pavan A, editors. *Impact and dynamic fracture of polymer and composites (ESIS 19)*. Hoboken: Wiley; 1995. pp. 215-224.
- 9- Harry PG, Marshall GP, Ward AL, Pearson D. The Prediction of long term failure properties of plastic pressure pipe. *International Conference Plastic Pipes*, 21-24 Sep 1992, Koningshof, Netherlands. Volume VIII. Akron, Oh: Smithers Rapra Publishing; 1998.
- 10- Leever PS. Impact and rapid crack propagation measurement techniques. *Mechanical Properties and Testing of Polymers*. 2000;3:130-134.
- 11- de Luna S, Fernández-Sáez J, Pérez-Castellanos JL, Navarro C. An analysis of the static and dynamic fracture behavior of a pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000;77(11):691-696.
- 12- Lee WS, Lin CF, Liu TJ. Impact and fracture response of sintered 316L stainless steel subjected to high strain rate loading. *Material Characterization*. 2007;58(4):363-370.
- 13- Nurul Fazita MR, Abdul Khalil HPS, Nor Amira Izzati A, Rizal S. Effects of strain rate on failure mechanisms and energy absorption in polymer composites. In: Jawaaid M, Thariq M, Saba N, editors. *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*, Woodhead Publishing series in composites science and engineering. Sawston: Woodhead Publishing; 2019.
- 14- Majidi-Jirandehi AA, Hashemi SH. Weld metal fracture characterization of API X65 steel using drop weight tear test. *Materials Research Express*. 2018;6(1).