

بررسی تجربی و عددی جذب انرژی در نمونه آزمایش سقوط آزاد وزنه با شیار ماشین‌کاری 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: ۱۳۹۸/۱۲/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

هدف از این تحقیق ارائه روش‌های تجربی و عددی جهت محاسبه انرژی جذب شده توسط نمونه در آزمایش سقوط آزاد وزنه است. از آنجا که تمامی انرژی جذب شده داخل نمونه منجر به رشد ترک نشده و بخشی از آن صرف تغییر شکل پلاستیک در نواحی تکیه‌گاه‌ها و چکش می‌شود، با محاسبه این انرژی می‌توان درصد نواحی پلاستیک ایجاد شده در بخش‌های مختلف نمونه را بدست آورد. نمونه‌های آزمایشگاهی از بدنه لوله فولادی از جنس API X65 با درز جوش مارپیچ با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی‌متر جدا شدند. سپس در وسط هر نمونه شیار شورن به عمق ۵/۱ میلی‌متر ایجاد و نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی با سرعت اولیه ۶/۳ متر بر ثانیه قرار گرفتند. آزمایش ب روی سه نمونه با سقوط چکش از ارتفاع ۲ متری صورت پذیرفت. با ترسیم و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی یک رابطه خطی بین انرژی جذب شده توسط نمونه و سرعت چکش بدست آمد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی عددی و به کمک معادله انرژی مکانیکی این رابطه برای سرعت‌های اولیه ۵ تا ۹ متر بر ثانیه تعمیم داده شد. به کمک این رابطه می‌توان با معلوم بودن سرعت چکش در هر لحظه، انرژی جذب شده توسط نمونه را بدست آورد.

کلمات کلیدی: آزمایش سقوط آزاد وزنه؛ فولاد API X65؛ بارگذاری دینامیکی؛ انرژی جذب شده؛ شیار شورن.

Experimental and Numerical Study of Energy Absorption in Drop Weight Tear Test Specimen with Chevron Notch on API X65 Steel

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 presenting experimental and numerical methods for evaluating energy absorbed by the specimen in drop weight tear test. Since, all the absorbed energy by the specimen does not cause the crack to propagate and some part of it creates plastic deformation near the anvils and striker, by evaluation this energy one could calculate the percentage of plastic regions in different parts of specimen. Test specimens were separated from an actual spiral seam welded steel pipe with an outside diameter of 1219mm and wall thickness of 14.3mm. Then, chevron notch was placed in the middle of each specimen and test samples were subjected under dynamic loading with initial impact velocity of 6.3m/s. Experiment was implemented on three specimens by dropping the impactor from 2m height. By drawing and analyzing experimental data, linear relation between fracture energy and hammer velocity was achieved. Then, Using numerical simulation and using mechanical energy formula this relation was generalized for initial velocities between 5 and 9 m/s. Using this relation by having the impactor velocity in each time, one could evaluate the energy absorbed by the specimen.

Keywords: Drop Weight Tear Test; API X65 Steel; Dynamic Loading; Absorption Energy; Chevron Notch.

۱- مقدمه

آزمایش سقوط آزاد وزنه^۱ یک آزمایش استاندارد صنعتی است که از آن برای بدست آوردن انرژی شکست^۲ و تعیین ویژگی-های سطح شکست نمونه‌های فولادی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ابعاد نمونه آزمایشگاهی در آزمایش سقوط آزاد وزنه به ابعاد واقعی لوله نزدیکتر است، نتایج حاصل از این آزمایش در مقایسه با آزمایش‌های دیگر نظیر آزمایش ضربه شاریپی به واقعیت نزدیکتر است [۱-۳].

در آزمایش سقوط آزاد وزنه مطابق استاندارد API 5L از نمونه مستطیلی با یک شیار در سطح زیرین آن استفاده می‌شود که تحت کشش است. 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 [۴].

به طور کلی در آزمایش‌های ضربه نرخ کرنش تأثیر زیادی در رفتار مواد از جمله مواد فلزی دارد. نرخ کرنش در آزمایش سقوط آزاد وزنه در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰۰ بر ثانیه متغیر است [۵، ۶].

در تحقیق حاضر محاسبه عددی و اندازه‌گیری تجربی انرژی شکست برای سه نمونه آزمایشگاهی از جنس API X65 انجام شده است. نمونه آزمایشگاهی از نوع شیاردار لبه-ای با شیار ماشین‌کاری شده^۴ (شیار شورن) است که از بدنه لوله فولادی API X65 جدا شده است. 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 [۴].

در تحقیق‌های مشابه صورت گرفته، بابایی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای گیردار فولادی و آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداختند. آزمایش‌های متعددی با به کار بردن دستگاه چکش پرتابه‌ای انجام شد. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها بر حسب خیز مرکز ورق، توزیع کرنش‌ها و

پروفیل یا گستره تغییر شکل ارزیابی و همچنین تأثیر پارامترهایی نظیر خواص مکانیکی ورق، ضخامت آن و فاصله استقرار چکش یا انرژی انتقالی، روی رفتار تغییر شکل ورق، مطالعه شد. در بخش مدل‌سازی اثرات نرخ کرنش، کرنش شعاعی و محیطی و همچنین اثرات انرژی کرنشی خمشی و غشایی همزمان لحاظ شد. در انتها نتایج بدست آمده برای خیز مرکز ورق از مدل‌سازی کامپیوتری با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی مقایسه شد. توافق خوب نتایج نشان داد که استفاده از این مدل‌سازی جهت پیش بینی خیز مرکز ورق در شرایط مختلف بارگذاری مناسب است [۷]. در تحقیق اسشایدرو و همکارانش، 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 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 بدست آمد. در این پژوهش از معیار آسیب گرسون^۵ جهت مدل‌سازی کامپیوتری استفاده شد و پارامترهای آسیب گرسون برای هر سه گرید گزارش گردید [۸]. بابایی و همکاران در پژوهشی دیگر به مطالعه تجربی و مدل‌سازی تغییرشکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بار ضربه‌ای با نرخ کرنش پایین توسط آزمایش چکش پرتابه‌ای پرداختند. در بخش تجربی، برای بررسی رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی و آلومینیومی نسبت به بار وارده، آزمایش‌هایی روی آن‌ها در سطوح مختلف انرژی انجام شد. هدف از مدل‌سازی پیش‌بینی قابل اطمینان نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت آن تحت بارگذاری ضربه‌ای بود. در سال ۲۰۱۶ پژوهش دیگری توسط یو و همکاران روی تحلیل جذب انرژی^۶ در نمونه‌های استاندارد آزمایش سقوط آزاد وزنه از جنس API X80 (به ابعاد استاندارد ۳۰۵×۷۶×۱۸ میلی‌متر) با استفاده از مدل المان محدود و ناحیه چسبنده^۷ 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 نمونه‌های با چقرمگی بالا تنها

⁵ Gurson Damage Criterion

⁶ Absorption Energy

⁷ Cohesive Zone (CZ)

¹ Drop Weight Tear Test (DWTT)

² Fracture Energy

³ Single Edge Notch (SEN)

⁴ Chevron Notch

تحلیل دینامیکی تا انتها شکل ترک ثابت و سهموی باقی می‌ماند [۱۳، ۱۲]. تعظیمی و همکاران 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. با شکست نمونه ملاحظه شد، ترک با شکست تورقی از ناحیه ریشه شیار شروع شده و در ادامه با تغییر زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه سطحی، به شکست نرم برشی تبدیل شده و تا ناحیه شکست معکوس ادامه دارد. در عکس‌های 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 انتهای سطح شکست نشان می‌دهد که بارگذاری از حالت کششی در ریشه شیار به بارگذاری برشی در انتهای سطح شکست تبدیل می‌شود [۱۴].

در منابع موجود تحلیل جامع و دقیقی روی ارتباط بین انرژی شکست با سرعت چکش ضربه زننده در فولاد API X65 صورت نگرفته است؛ همچنین تاکنون رابطه ریاضی برای محاسبه جذب انرژی درون نمونه از طریق نمودارهای ترسیم شده ارائه نشده است.

در پژوهش حاضر هدف بررسی رابطه انرژی با سرعت چکش و بیان رابطه محاسباتی بین این پارامترها است. با ترسیم نمودار انرژی شکست بر حسب جابجایی و سرعت چکش ضربه زننده روابط محاسباتی جهت اندازه‌گیری انرژی جذب شده توسط نمونه در لحظه‌های مختلف از جمله لحظه رشد ترک و لحظه شکست نمونه ارائه شده است؛ همچنین به کمک روابط انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل محاسبه انرژی جذب شده توسط نمونه با دقت قابل قبولی صورت گرفت.

هدف اصلی از این پژوهش، بررسی میزان جذب انرژی توسط نمونه آزمایش سقوط آزاد وزنه از طریق روش‌های تجربی و عددی و مقایسه نتایج با یکدیگر است. از این انرژی می‌توان برای بیان درصد نواحی پلاستیک ایجاد شده داخل نمونه استفاده کرد.

حدود ۶۰ درصد انرژی جذب شده صرف رشد ترک^۱ می‌شود و بخش زیادی از انرژی صرف تغییر شکل پلاستیک^۲ در نواحی تکیه‌گاه‌ها و ناحیه برخورد چکش با نمونه شده است [۱۰]. رودلند و همکارانش چندین آزمایش سقوط آزاد وزنه را روی نمونه فولاد API X70 برای اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک^۳ و بدست آوردن چقرمگی شکست نرم حالت پایدار برای لوله‌های خطوط انتقال انجام دادند. در آزمایش‌های صورت گرفته تغییرمکان چکش توسط اسکن-های نوری اندازه‌گیری شد. سپس 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 [۱۱]. هاری و همکاران با اصلاح مدل آسیب ژو-ویزبیکی اثرات نرخ کرنش^۴ را در نمونه فولادی API X70 در کد المان محدود پیاده‌سازی کردند. سپس به بررسی پاسخ دینامیکی و استاتیکی این نمونه در آزمایش سقوط آزاد وزنه 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. به طوری که در آزمایش دینامیکی، حداکثر نیروی ۲۳۵ کیلو نیوتن در جابجایی ۱۲/۵ میلی‌متر بدست آمد؛ در حالیکه در آزمایش استاتیکی، مقدار این نیرو ۲۲۳ کیلو نیوتن در جابجایی ۷/۹ میلی‌متر است که بیانگر وابستگی مقاومت ماده به نرخ کرنش است؛ همچنین، مقدار انرژی شکست در آزمایش دینامیکی ۶۱۰۰ ژول بدست آمد که در مقایسه با آزمایش استاتیکی (۵۱۹۰ ژول) حدود ۱۵ درصد بیشتر است. نتیجه دیگر آن با بررسی سطح شکست در نمونه حاصل شده است. سطح شکست در آزمایش دینامیکی برشی است، در حالیکه در آزمایش استاتیکی مد اول شکست (مد 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

¹ Crack Growth

² Plastic Deformation

³ Crack Tip Opening Displacement (CTOD)

⁴ Strain Rate Effects

۲- معرفی هندسه و خواص مکانیکی نمونه

نمونه مورد آزمایش در این تحقیق از جنس فولاد API X65 است که مشخصات مربوط به آن، توسط موسسه بین‌المللی نفت آمریکا^۱ استاندارد شده است [۱۵]. این نمونه از نوع شیاردار لبه‌ای با سطح مقطع مستطیلی است. ابعاد و اندازه‌های این نمونه در شکل ۱ نمایش داده شده است؛ همچنین، تصویر واقعی نمونه فولادی، قرار گرفته زیر دستگاه آزمایش سقوط آزاد وزنه در شکل ۲ 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. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب خواص پلاستیک و مکانیکی نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است [۱۶].

۳- روش انجام آزمایش

آزمایش انجام شده توسط دستگاه سقوط آزاد وزنه ساخته شده در دانشگاه بیرجند صورت پذیرفت. این دستگاه مجهز به مدار کرنش‌سنج و شتاب‌سنج است 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 ۳ شماتیکی از چکش و نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.

جهت انجام آزمایش سقوط آزاد وزنه 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 API 5L (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 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 زمین برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه سرعت ضربه چکش در لحظه برخورد با نمونه حدود ۶/۳ متر بر ثانیه بدست می‌آید.

پس از رهاسازی چکش، نتایج در صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود که به کمک تجهیزات متصل به اسیلوسکوپ این نتایج به صورت یک فایل اکسل (حاوی ۲۵۰۰ سطر داده آزمایشگاهی شامل زمان، شتاب حاصل از شتاب‌سنج و نیرو حاصل از مدار نیروسنج) در اختیار اپراتور قرار می‌گیرد.

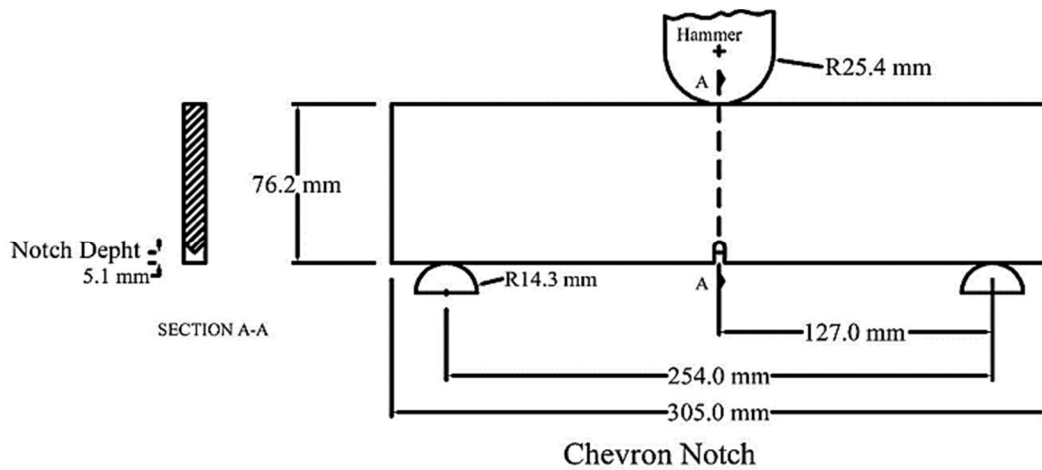
جدول ۱- خواص پلاستیک فولاد API X65 [۱۶]

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	۶۹۲	۸
۱/۱۰	۸۵۸	۱۹	۰/۱۴	۷۰۳	۹
۱/۲۰	۸۶۶	۲۰	۰/۱۶	۷۱۲	۱۰

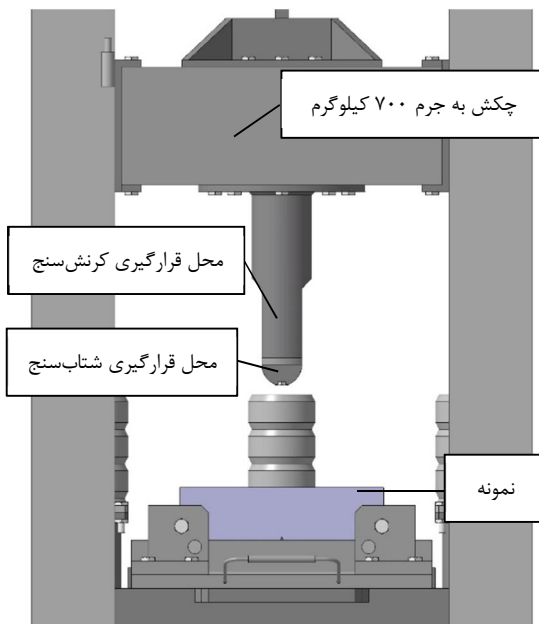
جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد API X65 [۱۶]

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

¹ American Petroleum Institute (API)



شکل ۱- ابعاد نمونه آزمایشگاهی مطابق استاندارد [۱۵]



شکل ۳- طرحواره چکش و نمونه آزمایشگاهی ضربه



شکل ۲- تصویر نمونه آزمایشگاهی در ماشین ضربه

صورت دو نیم دایره توخالی به شعاعهای ۲۵/۴ و ۱۴/۳ میلی‌متر ترسیم شدند. برای چکش با توجه به نوع آزمایش که دینامیکی است، جرم ۷۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه نمونه دارای رفتار نرم در برابر شکست است، از معیار آسیب گرسون استفاده شده است که جهت مدل‌سازی شکست نمونه‌های نرم به کار می‌رود [۱۷ و ۱۸]. در جدول ۳ پارامترهای آسیب گرسون ارائه شده است که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است [۱۶].

۴- مدل‌سازی کامپیوتری

جهت مدل‌سازی کامپیوتری از نرم‌افزار تجاری آباکوس صریح^۱ استفاده شده است. هندسه نمونه به صورت سه‌بعدی و تغییرشکل‌پذیر مدل شده است. در این مدل‌سازی چکش و سندان‌ها صلب در نظر گرفته شده‌اند و مطابق با استاندارد به

^۱ ABAQUS/Explicit

جدول ۳- پارامترهای مدل گرسون برای فولاد

API X65 [۱۶]

q_1	q_2	q_3	ϵ_N	S_N	f_N	f_c	f_f
۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۷	۰/۱۸۵

معیار گرسون بر گرفته از تابع تسلیم میز است با این تفاوت که اثرات ناخالصی‌ها و حفره‌ها را داخل نمونه در نظر می‌گیرد. معادله تابع تسلیم گرسون به صورت رابطه (۲) است:

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

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

به منظور ایجاد شبکه مناسب در کل نمونه، بخش‌هایی از مدل که باید از تراکم المان بیشتری برخوردار باشند با پارتیشن جدا شدند. در شکل ۴ نحوه قرارگیری چکش، نمونه، سندان‌ها و شبکه‌بندی کل نمونه نمایش داده شده است.

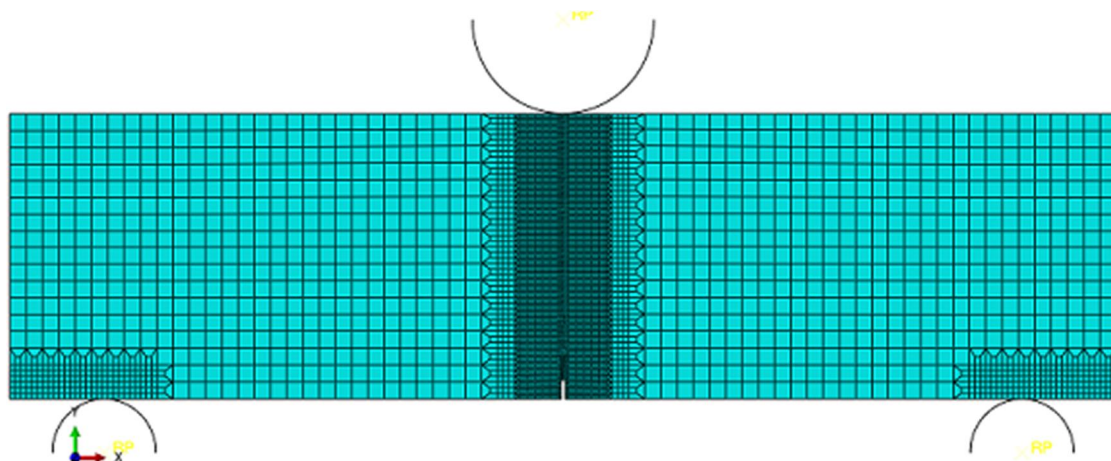
مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود، نمونه از سه ناحیه با چکش و تکیه‌گاه‌ها در تماس است. با توجه به اینکه امکان

انتخاب سطوح تماسی در نرم‌افزار وجود دارد، 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 [۱۶]؛ همچنین، بارگذاری با تعریف سرعت اولیه ۶/۳ متر بر ثانیه برای چکش تعریف شده است. زمان بارگذاری با توجه به داده‌های استخراج شده از اسیلوسکوپ ۹ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. در مرحله آخر از مدل‌سازی، تراکم و نوع المان‌های به کار رفته در مدل تعریف شده‌اند. حجم المان‌ها در مجاورت شیار و بخش پایینی چکش ۰/۱ 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 شکل پذیر است، از المان خطی، پیوسته، سه بعدی و هشت گره‌ای (C3D8R) استفاده شد [۱۶].

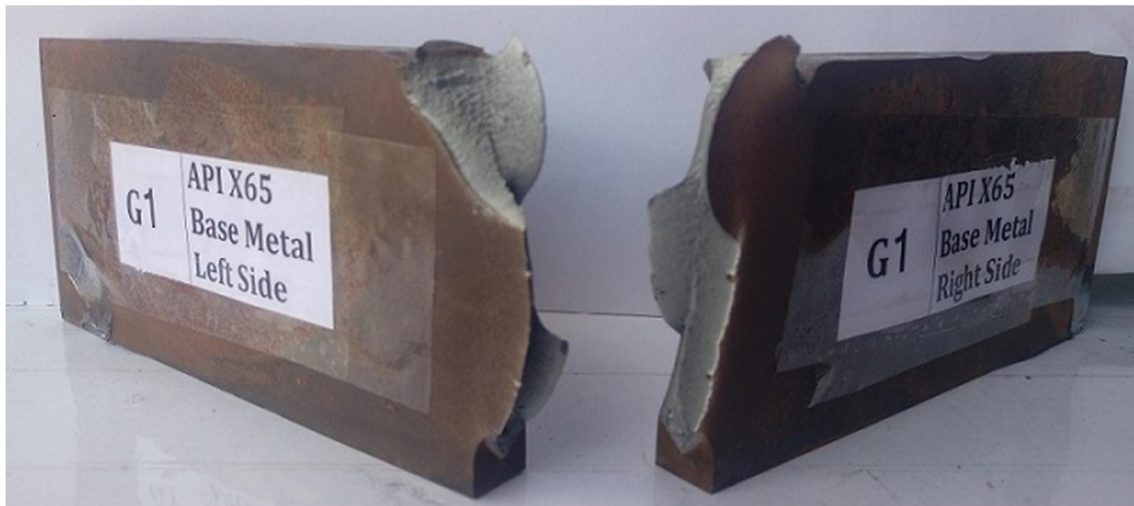
در خصوص شرایط مرزی، تکیه‌گاه‌های در نظر گرفته شده در پایین نمونه که به صورت صلب مدل شده‌اند، در تمامی جهت مقید شده و به چکش فقط در جهت عمودی اجازه حرکت به سمت پایین داده شده است.

۵- بررسی نتایج تجربی

با اعمال ضربه چکش به نمونه، شکست کامل اتفاق می‌افتد. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، آزمایش روی سه نمونه با شرایط کاملاً یکسان صورت پذیرفت. شکل ۵ تصویر یک نمونه شکسته شده را نشان می‌دهد که در آن بخش میانی نمونه به طور کامل دچار اعوجاج شده است.

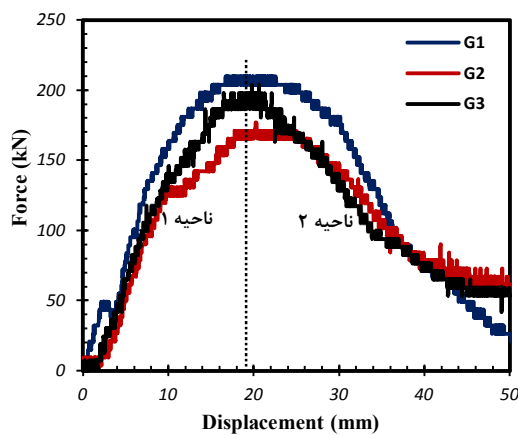


شکل ۴- اتصال چکش، تکیه‌گاه‌ها و نمونه آزمایشگاهی



شکل ۵- تصویر نمونه شکسته شده پس از انجام آزمایش

۵-۱- نمودار نیرو-جابجایی



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش

۵-۲- نمودار انرژی-جابجایی

با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی مقدار انرژی شکست برای هر سه نمونه آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. با توجه به گسسته بودن داده‌های آزمایشگاهی جهت محاسبه انرژی شکست از انتگرال‌گیری عددی^۱ به روش دوزنقه‌ای استفاده شده است [۱۶]. مقدار انرژی محاسبه شده قبل از نیروی بیشینه (ناحیه ۱)، انرژی شروع ترک و مقدار این انرژی بعد از نیروی بیشینه (ناحیه ۲)، انرژی رشد ترک را

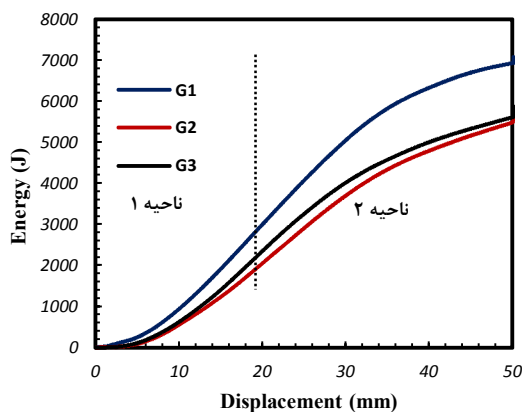
به منظور ترسیم نمودار انرژی شکست ابتدا باید دو نمودار مهم نیرو و سرعت بر حسب جابجایی چکش ترسیم شوند. جزئیات در خصوص نحوه ترسیم این نمودارها در پژوهشی جداگانه توسط فتحی و همکاران بررسی شده است [۱۶]. در شکل ۶ تصویر نمودار نیرو بر حسب جابجایی چکش برای سه نمونه استاندارد با شیار ماشین‌کاری شده نشان داده شده است. ارتفاع سقوط چکش در این سه آزمایش ۲ متر است. با توجه به تعدد آزمایش‌ها که روی ۲۱ نمونه آزمایشگاهی صورت گرفته است، ۳ نمونه از این مجموعه برای انجام آزمایش ضربه مطابق با استاندارد API 5L انتخاب و با عبارت‌های G1، G2 و G3 شماره‌گذاری شدند. سایر نمونه‌ها ابتدا با اعمال ضربه اولیه وارد ناحیه پلاستیک شده و بعد تحت شکست کامل قرار گرفتند که نتایج آن در پژوهشی جداگانه بررسی خواهد شد.

مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌شود، بیشترین نیرو در تمامی نمودارها در جابجایی حدود ۲۰ میلی‌متر صورت گرفته است. این نیرو برای نمونه‌های G1، G2 و G3 به ترتیب ۲۲۹، ۱۷۶ و ۲۰۹ کیلو نیوتن بدست آمده است. با توجه به اینکه افت نیرو زمانی حاصل می‌شود که ترک شروع به رشد کند، می‌توان شروع رشد ترک را در لحظه‌ای در نظر گرفت که نیرو به حداکثر خود برسد. در جدول ۴ جزئیات بیشتری در خصوص این نمودار ارائه شده است.

¹ Numerical Integration

جدول ۴- نتایج تجربی بدست آمده از نمودار نیرو-جابجایی

شماره نمونه	حداکثر نیرو (kN)	جابجایی چکش تا شکست کامل (mm)	جابجایی در لحظه رشد ترک (mm)	درصد جابجایی چکش در لحظه رشد ترک (%)
G1	۲۲۹	۴۹/۰۷	۱۹/۶۰	۳۹
G2	۱۷۶	۵۵/۸۶	۲۰/۳۱	۳۶
G3	۲۰۳	۵۵/۰۹	۲۰/۶۱	۳۷
میانگین	۲۰۲	۵۳/۳۴	۲۰/۱۷	۳۷



شکل ۷- نمودار انرژی-جابجایی حاصل از آزمایش

با توجه به اینکه مقادیر بدست آمده در جدول ۵ مستقیماً از طریق انتگرال‌گیری عددی از داده‌های تجربی محاسبه شده‌اند، از دقت قابل قبولی برخوردارند. در این پژوهش با تحلیل نمودار انرژی-جابجایی نشان داده می‌شود، یک رابطه مستقیم بین انرژی شکست با سرعت چکش در لحظه برخورد با نمونه وجود دارد. به این ترتیب می‌توان به راحتی با معلوم بودن سرعت مستقیماً انرژی جذب شده در نمونه را حین اعمال ضربه بدست آورد. با توجه به اینکه تمام انرژی جذب شده داخل نمونه باعث رشد ترک نشده و بخشی از آن صرف تغییر شکل پلاستیک در محل تماس چکش و سندان‌ها با نمونه می‌شود و با توجه به اینکه انرژی جذب شده در مدت زمانی متغیر است که چکش با نمونه در تماس است، ارائه یک رابطه بین انرژی جذب شده با سرعت چکش اهمیت پیدا می‌کند. از این انرژی در پژوهش‌های بعدی می‌توان جهت بررسی درصد ناحیه پلاستیک ایجاد شده داخل نمونه حین اعمال ضربه استفاده کرد و میزان ناحیه پلاستیک را

نشان می‌دهد. در شکل ۷ نمودار انرژی شکست بر حسب جابجایی چکش برای سه نمونه آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

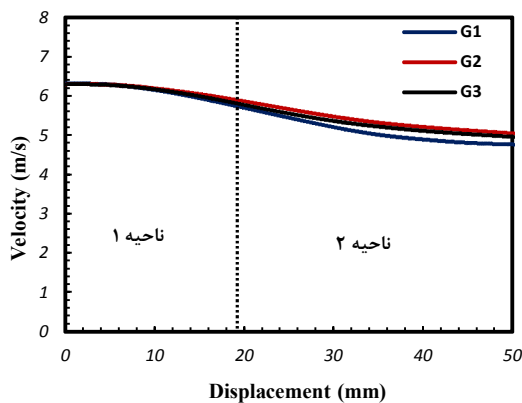
با توجه به شکل ۷ مقدار انرژی شکست برای نمونه‌های G1، G2 و G3 به ترتیب ۷۰۸۵، ۵۶۰۵ و ۵۸۷۲ ژول بدست آمده است. با میانگین‌گیری از داده‌های این سه نمودار مقدار انرژی شکست میانگین ۶۱۸۷ ژول است که در ادامه از آن جهت مقایسه نتایج تجربی با مدل‌سازی کامپیوتری استفاده می‌شود. با بررسی شکل ۷ ملاحظه می‌شود، شیب نمودار تا جابجایی ۲۰ میلی‌متر در حال افزایش بوده و پس از آن کاهش می‌یابد. مرز بین این دو ناحیه را می‌توان محل شروع رشد ترک دانست. لازم به ذکر است، شیب این نمودار از طریق مشتق‌گیری از داده‌های انرژی نسبت به جابجایی بدست می‌آید. از طرفی با توجه به اینکه این نمودار با انتگرال‌گیری از نمودار نیرو-جابجایی ترسیم شده است، شیب آن را می‌توان همان مقدار نیرو در شکل ۶ در نظر گرفت؛ بنابراین، مقدار نیرو در شکل ۶ همان شیب در شکل ۷ می‌شود. نمودارهای شکل ۶ و ۷ هر کدام به نوعی محل شروع ترک را نشان می‌دهند. در نمودار شکل ۶، حداکثر نیرو محل شروع ترک است و در نمودار شکل ۷ تغییر شیب منحنی محل شروع ترک را مشخص می‌کند که هر دو در ۲۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است.

با محاسبه نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست ملاحظه می‌شود، بخش زیادی از انرژی (حدود ۶۰ درصد) صرف رشد ترک می‌شود که این خود بیانگر چقرمگی بالای ماده و رفتار نرم آن در برابر شکست است. در جدول ۵ نتایج تجربی بدست آمده از نمودار انرژی-جابجایی ارائه شده است.

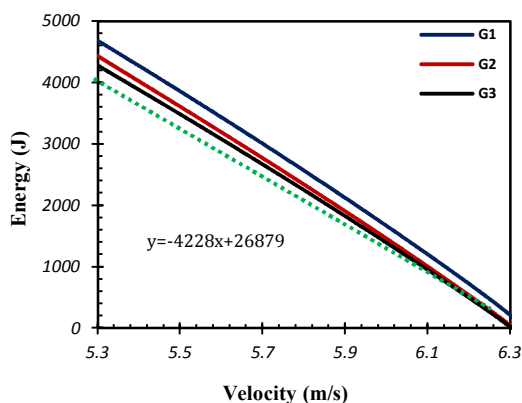
جدول ۵- نتایج تجربی نمودار انرژی-جابجایی

شماره نمونه	انرژی شروع ترک (J)	انرژی رشد ترک (J)	انرژی کل شکست (J)	نسبت انرژی شروع ترک به انرژی کل شکست (%)	نسبت انرژی رشد ترک به انرژی کل شکست (%)
G1	۲۹۰۲	۴۱۸۳	۷۰۸۵	۴۱	۵۹
G2	۲۱۰۷	۳۴۹۸	۵۶۰۵	۳۷	۶۳
G3	۲۴۶۹	۳۴۰۳	۵۸۷۲	۴۲	۵۸
میانگین	۲۴۹۳	۳۶۹۴	۶۱۸۷	۴۰	۶۰

مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه در هر لحظه با معلوم بودن سرعت چکش قابل محاسبه است. نکته جالب توجه در خصوص این نمودار در رفتار خطی انرژی با سرعت حین اعمال ضربه است. شکل ۹ این نمودار را برای سه نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمودار سرعت-جابجایی



شکل ۹- نمودار انرژی-سرعت

بر حسب انرژی جذب شده داخل نمونه گزارش داد. قبل از ترسیم نمودار انرژی برحسب سرعت چکش ابتدا باید نمودار سرعت-جابجایی برای چکش در دسترس باشد.

۵-۳- نمودار سرعت-جابجایی

هنگام برخورد چکش به نمونه سرعت آن کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد. میزان کاهش سرعت چکش با مقاومت ماده در برابر شکست رابطه مستقیم دارد. نمودار سرعت-جابجایی این امکان را می‌دهد تا بتوان سرعت چکش را در موقعیت‌های مختلف چکش بدست آورد. شکل ۸ این نمودار را برای سه نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در خصوص این نمودار رفتار آن بوده که کاملاً شبیه به رفتار نمودار انرژی-جابجایی است. با این تفاوت که در این نمودار مقدار سرعت با افزایش جابجایی چکش افت می‌کند و به مقدار ثابتی می‌رسد.

مانند نمودار انرژی-جابجایی برای این نمودار نیز می‌توان دو ناحیه مختلف در نظر گرفت. در ناحیه اول شیب نمودار در جهت منفی رو به افزایش است، در حالیکه در ناحیه دوم این شیب رو به کاهش بوده و در نهایت به صفر می‌رسد. با محاسبه میانگین سرعت ملاحظه می‌شود، در لحظه برخورد سرعت چکش ۶/۳ متر بر ثانیه است که پس از پایان ضربه این مقدار در حدود ۲۱ درصد افت می‌کند و به مقدار ۴/۹۲ متر بر ثانیه می‌رسد. جدول ۶ اطلاعات کامل‌تری را از این نمودار در اختیار قرار می‌دهد.

۵-۴- نمودار انرژی-سرعت

با معلوم بودن دو نمودار انرژی-جابجایی و سرعت-جابجایی می‌توان نمودار جدید دیگری را بدست آورد که از طریق آن

جدول ۶- نتایج تجربی بدست آمده از نمودار سرعت-جابجایی

شماره نمونه	سرعت اولیه (m/s)	سرعت نهایی (m/s)	افت سرعت (m/s)	نسب افت سرعت به سرعت اولیه (%)
G1	۶/۳۰	۴/۷۶	۱/۵۴	۲۴
G2	۶/۳۰	۵/۰۴	۱/۲۶	۲۰
G3	۶/۳۰	۴/۹۶	۱/۳۴	۲۱
میانگین	۶/۳۰	۴/۹۲	۱/۳۸	۲۱

جنبشی و پتانسیل بدست آورد. جزئیات این روش در پژوهش‌های پیشین بررسی نشده است. برای این منظور باید روابط انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل را برای قبل و بعد از اعمال ضربه نوشت. رابطه ۳ نحوه محاسبه انرژی شکست را نشان می‌دهد:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 + E_f \quad (3)$$

در این رابطه m جرم چکش، g شتاب گرانش، h موقعیت چکش، v سرعت چکش و E_f انرژی جذب شده توسط نمونه (انرژی شکست) است. با قرار دادن مبدأ مختصات در بالای نمونه موقعیت اولیه و ثانویه چکش طبق جدول ۴ به ترتیب صفر و ۵۳/۳۳- میلی‌متر است؛ همچنین سرعت چکش قبل و بعد از اعمال ضربه طبق جدول ۶ به ترتیب ۶/۳۰ و ۴/۹۲ متر بر ثانیه است. به این ترتیب با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۳ مقدار انرژی شکست ۶۱۲۹ ژول بدست می‌آید که با انرژی ۶۱۸۷ ژول از جدول ۵ حدود ۵۸ ژول اختلاف دارد که معادل ۰/۹ درصد است. نکته قابل توجه در خصوص این رابطه، کم بودن تغییرات انرژی پتانسیل چکش در مقایسه با انرژی جنبشی آن است. در جدول ۷ مقدار انرژی شکست بدست آمده از هر سه روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۶- بررسی نتایج عددی

در مدل اجزاء محدود با توجه به نوع شیار نمونه و به منظور رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. در شکل ۱۰ نحوه شکست نمونه و توزیع تنش میز به همراه نواحی پلاستیک در نمونه نمایش داده شده است. بخش‌های خاکستری رنگ نقاطی هستند که تنش آن‌ها بیشتر از تنش تسلیم است. با

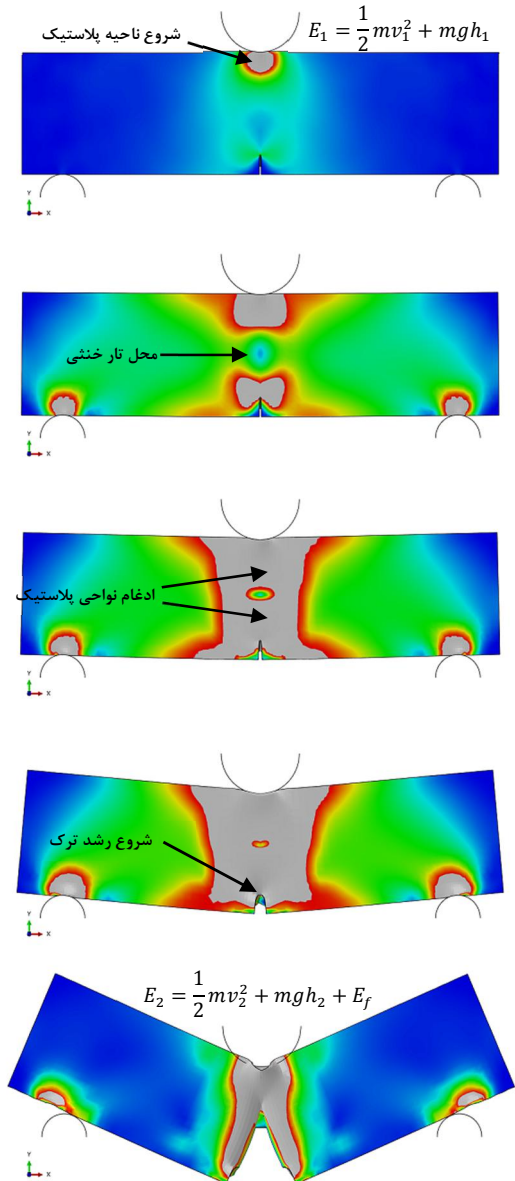
در شکل ۹ خط سبز رنگ میانگین داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. معادله این خط با ورود داده‌ها به نرم‌افزار آماری SPSS استخراج شده که در پایین نمودار نشان داده شده است. دقت این معادله ۰/۹۹۷ است. با معلوم بودن سرعت چکش ضربه زننده در هر لحظه و با قرار دادن مقدار سرعت در رابطه ارائه شده می‌توان انرژی جذب شده توسط نمونه را بدست آورد. چنانچه سرعت در این رابطه ۴/۹۲ متر بر ثانیه قرار داده شود، مقدار انرژی شکست ۶۰۷۷ ژول بدست می‌آید. با مقایسه این مقدار با انرژی ۶۱۸۷ ژول از جدول ۵ ملاحظه می‌شود، اختلاف بین نتایج ۱۱۰ ژول است که حدود ۱ درصد است؛ بنابراین، می‌توان با دقت قابل قبولی از این رابطه خطی جهت محاسبه انرژی شکست و انرژی جذب شده داخل نمونه استفاده کرد.

لازم به ذکر است، این نمودار برای آزمایش‌های با سرعت اولیه ۶/۳۰ متر بر ثانیه قابل استفاده است. این نمودار زمانی ارزشمند است که سرعت چکش را در عمل بتوان در هر لحظه از جمله لحظه شکست نمونه مستقیماً اندازه‌گیری کرد. این امر با هزینه‌های ناچیز قابل انجام است. به این ترتیب بدون نیاز به تجهیزات گران قیمت می‌توان با معلوم بودن سرعت چکش قبل و بعد از ضربه مقدار انرژی شکست نمونه را تخمین زد؛ همچنین کاربرد این نمودار زمانی دو چندان می‌شود که بتوان از طریق آن مقدار انرژی شکست را در سرعت‌های مختلف ضربه بدست آورد که داخل استاندارد تعریف شده است (بین ۵ تا ۹ متر بر ثانیه). به این موضوع در ادامه همین پژوهش پرداخته شده است.

علاوه بر روش‌های ارائه شده روش ساده دیگری وجود دارد که می‌توان مقدار انرژی شکست را با صرف نظر کردن از تلفات چکش در لحظه سقوط، مستقیماً به کمک روابط انرژی

جدول ۷- مقایسه انرژی شکست بدست آمده از سه روش مختلف

روش اول: انتگرال گیری عددی (J)	روش دوم: رابطه خطی انرژی-سرعت (J)	درصد اختلاف بین روش اول و دوم (%)	روش سوم: رابطه انرژی مکانیکی (J)	درصد اختلاف بین روش اول و سوم (%)
۶۱۸۷	۶۰۷۷	۱	۶۱۲۹	۰/۹



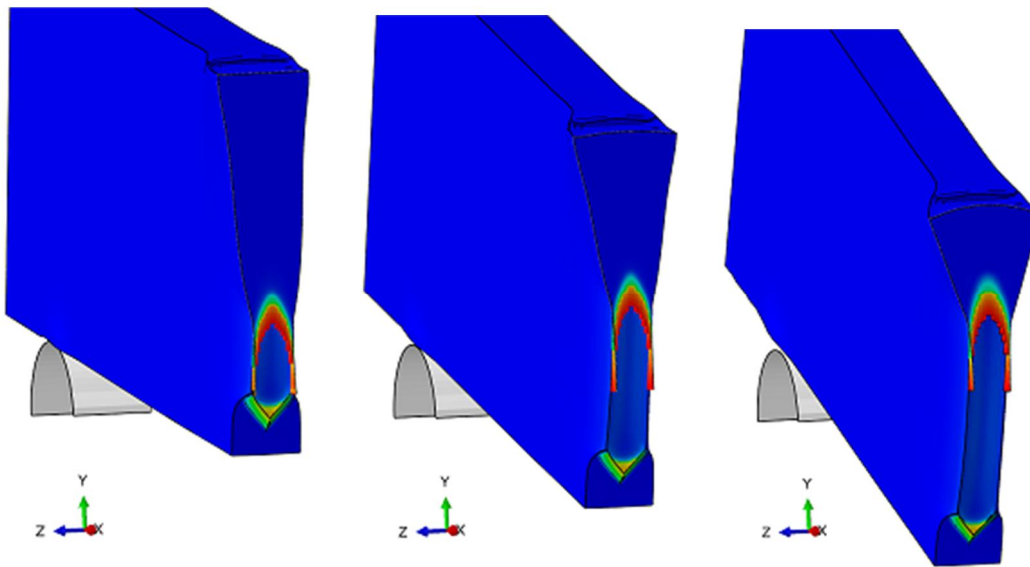
شکل ۱۰- نمایش توزیع تنش میزز و نواحی پلاستیک در جابجایی‌های مختلف چکش

پایین آمدن چکش این بخش‌ها گسترش پیدا کرده و بخش زیادی از نمونه در نواحی سندان‌ها، چکش و نزدیکی نوک ترک وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند. مطابق این شکل بلافاصله در لحظه برخورد چکش به نمونه بخش بالایی نمونه وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. در بخش میانی ناحیه‌ای وجود دارد که تنش آن کمتر از تنش تسلیم است. این ناحیه همان تار خنثی است که با افزایش جابجایی چکش محل آن تغییر می‌کند. ذکر این نکته ضروری است، انرژی اولیه چکش در لحظه برخورد با نمونه E_1 و در لحظه شکست E_2 است.

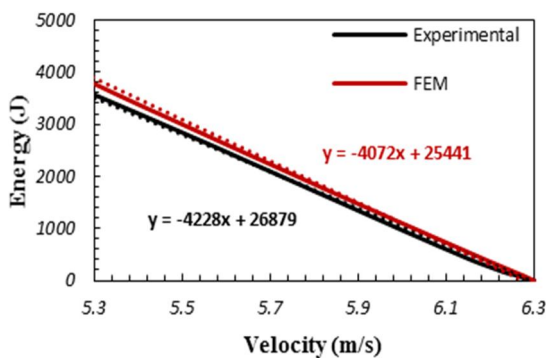
همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی این مقاله بررسی میزان جذب انرژی در نمونه API X65 است. نواحی خاکستری رنگ نشان داده شده در شکل ۱۰ بیان می‌کند، از این مقدار انرژی فقط بخشی از آن صرف رشد ترک شده و مابقی صرف تغییر شکل پلاستیک اطراف تکیه‌گاه‌ها و چکش می‌شود؛ بنابراین، جهت محاسبه مقدار انرژی لازم برای رشد ترک ابتدا باید انرژی جذب شده در کل نمونه محاسبه شود. سپس به کمک مدل‌سازی کامپیوتری از طریق حذف المان‌هایی که وارد ناحیه پلاستیک نشده‌اند، می‌توان مقدار انرژی جذب شده در نواحی اطراف چکش و تکیه‌گاه‌ها را بدست آورد و آن‌ها را بر حسب درصدی از انرژی کل جذب شده داخل نمونه گزارش داد. این موضوع در پژوهش‌های آتی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با افزایش جابجایی چکش المان‌های اطراف نوک ترک شروع به حذف شدن می‌کنند که در نهایت منجر به شکست کامل نمونه می‌شود. نمایش نحوه حذف این المان‌ها در جابجایی‌های مختلف چکش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

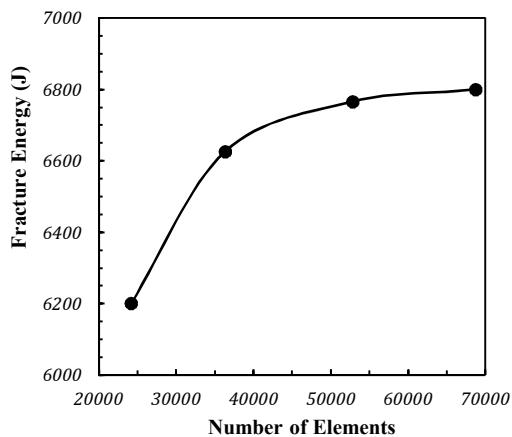
مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش جابجایی چکش ترک در مسیر مستقیم خود شروع به رشد می‌کند. رشد ترک به صورت سهمی است، بنابراین ابتدا المان‌های میانی حذف شده و بعد المان‌های روی سطح آزاد حذف می‌شوند.



شکل ۱۱- نمایش نحوه حذف المان‌ها و رشد ترک در جابجایی‌های مختلف چکش



شکل ۱۲- مقایسه نمودار انرژی-سرعت حاصل از آزمایش تجربی و مدل المان محدود



شکل ۱۳- تحلیل حساسیت به شبکه المان محدود

به کمک این مدل‌سازی نمودار انرژی بر حسب سرعت چکش ترسیم و با نمودار بدست آمده از نتایج تجربی (شکل ۹) مقایسه شده است. شکل ۱۲ مقایسه این دو نمودار را نشان می‌دهد.

نمودار نشان داده شده در شکل ۱۲، رابطه خطی انرژی جذب شده توسط نمونه با سرعت چکش را برای مدل المان محدود و نتایج تجربی بیان می‌کند. این معادلات با ورود داده‌ها به نرم‌افزار آماری SPSS بدست آمده‌اند. دقت این معادلات برای داده‌های تجربی ۰/۹۹۷ و برای داده‌های عددی ۰/۹۹۹ است. نکته قابل توجه در خصوص این نمودار در بدست آوردن مقدار سرعت چکش برای مقادیر مشخص انرژی است. با قرار دادن انرژی شروع ترک برابر ۲۴۹۳ ژول مقدار سرعت چکش از طریق رابطه خطی برای مدل المان محدود و نتایج تجربی به ترتیب ۵/۶۳ و ۵/۷۶ متر بر ثانیه بدست می‌آید. ذکر این نکته ضروری است که در مدل‌سازی کامپیوتری ابعاد و اندازه‌های شبکه نتایج تأثیر بسیاری دارند. با توجه به این موضوع تحلیل حساسیت به شبکه بررسی و نتایج آن در شکل ۱۳ ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، با افزایش المان‌ها، مقدار انرژی شکست به عدد ثابت ۶۸۰۰ همگرا شده است.

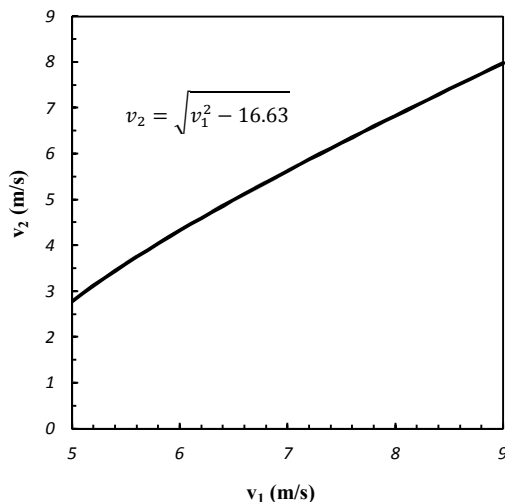
فرض نیز قابل قبول است. بنابراین، با قرار دادن $mg h_1 = 0 J$ و $mg h_2 = -363 J$ ، $E_f = 6187 J$ در رابطه ۳ و در نظر گرفتن جرم چکش و شتاب گرانش به ترتیب برابر ۷۰۰ کیلوگرم و ۹/۸۱ متر بر مجذورثانیه، سرعت نهایی چکش را می‌توان از رابطه ۴ محاسبه نمود:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 16.63} \quad (۴)$$

در این رابطه v_1 سرعت چکش قبل از ضربه و v_2 سرعت چکش پس از ضربه است. چنانچه سرعت اولیه چکش از ۵ تا ۹ متر بر ثانیه متغیر باشد، به راحتی به کمک این رابطه می‌توان سرعت نهایی چکش را در لحظه شکست محاسبه کرد. شکل ۱۴ این رابطه را به صورت ترسیمی نشان می‌دهد. با معلوم بودن سرعت چکش قبل و بعد از ضربه و ثابت بودن انرژی شکست در تمامی سرعت‌های اولیه مطابق جدول ۸ می‌توان رابطه کلی انرژی بر حسب سرعت چکش ضربه زننده را به صورت زیر نوشت. در این رابطه انرژی شکست مطابق جدول ۷ برابر ۶۱۸۷ ژول در نظر گرفته شده است:

$$E_f = 6187 \frac{(v - v_1)}{v_2 - v_1} \quad (۵)$$

در این رابطه v سرعت چکش حین اعمال ضربه را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات این سرعت بین v_1 و v_2 است. مطابق این رابطه چنانچه سرعت چکش v_1 اختیار شود،



شکل ۱۴- نمودار سرعت چکش بعد از ضربه بر حسب سرعت چکش قبل از اعمال ضربه

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نمودار شکل ۱۲ زمانی ارزشمند خواهد بود که برای سرعت‌های مختلف چکش (بین ۵ تا ۹ متر بر ثانیه) مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه را بدست دهد. از طرفی بدیهی است، با تغییر سرعت اولیه چکش شیب نمودار بدست آمده در شکل ۱۲ تغییر خواهد کرد؛ بنابراین، باید روشی پیاده شود تا بتوان شیب نمودار را به سرعت اولیه چکش مرتبط کرد. به این ترتیب با معلوم بودن سرعت اولیه چکش می‌توان معادلات جدید انرژی جذب شده را بر حسب سرعت چکش ضربه زننده نوشت. برای این منظور می‌توان از رابطه تئوری ۳ کمک گرفت. با دو فرض می‌توان از این رابطه برای محاسبه سرعت چکش پس از ضربه استفاده کرد. فرض اول ثابت بودن انرژی شکست نمونه در سرعت‌های مختلف چکش است. برای این منظور چند مدل‌سازی دیگر با سرعت‌های اولیه چکش بین ۵ تا ۹ متر بر ثانیه صورت گرفت. جدول ۸ نتایج حاصل از این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۸ ملاحظه می‌شود، انرژی شکست در تمامی حالت‌ها تقریباً ثابت است. فرض دوم ثابت بودن تغییرات انرژی پتانسیل چکش در تمامی حالت‌ها است. برای این منظور باید میزان پایین آمدن چکش پس از ضربه در هر پنج حالت یکسان و طبق جدول ۴ حدود ۵۳/۳۳ میلی‌متر باشد. با توجه به اینکه تغییرات انرژی پتانسیل چکش در مقایسه با تغییرات انرژی جنبشی آن بسیار ناچیز است، این

جدول ۸- مقایسه انرژی شکست عددی برای سرعت‌های مختلف چکش

ردیف	سرعت اولیه (m/s)	ارتفاع سقوط (m)	انرژی شکست عددی (J)
۱	۵	۱/۲۷	۶۴۲۵
۲	۶	۱/۸۳	۶۴۱۷
۳	۷	۲/۴۹	۶۳۹۰
۴	۸	۳/۲۶	۶۴۰۲
۵	۹	۴/۱۲	۶۳۸۳
میانگین	-	-	۶۴۰۳

۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر برای نخستین بار میزان جذب انرژی در نمونه با شیار ماشین کاری شده از جنس فولاد API X65 از طریق آزمایش سقوط آزاد وزنه بدست آمد. نتایج حاصل شده در این پژوهش از ترسیم منحنی های مربوطه عبارت است از:

۱- با ترسیم نمودار انرژی-سرعت چکش یک رابطه خطی بین انرژی با سرعت چکش برقرار شد. شیب این نمودار به افت سرعت چکش در طول آزمایش بستگی دارد. هرچه افت سرعت چکش بیشتر باشد، شیب نمودار خطی انرژی بر حسب سرعت کمتر خواهد بود.

۲- مقدار انرژی شکست بدست آمده از طریق رابطه خطی انرژی بر حسب سرعت 6077 ژول است که در مقایسه با مقدار بدست آمده از داده های آزمایشگاهی (6187 ژول) حدود ۱ درصد اختلاف دارد.

۳- با نوشتن رابطه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی قبل و بعد از اعمال ضربه و کوچک در نظر گرفتن تغییرات انرژی پتانسیل چکش، رابطه ۴ جهت محاسبه سرعت چکش در لحظه شکست نمونه ارائه شد. این رابطه سرعت چکش را بعد از شکست به سرعت اولیه آن مرتبط می کند و برای سرعت های اولیه ۵ تا ۹ متر بر ثانیه که در آن انرژی شکست نمونه ثابت است، قابل استفاده است.

میزان انرژی جذب شده توسط نمونه صفر خواهد بود که بیانگر لحظه برخورد چکش به نمونه است؛ همچنین اگر سرعت نهایی چکش داخل رابطه قرار گیرد، مقدار انرژی شکست 6187 ژول بدست خواهد آمد. به کمک این رابطه می توان برای سرعت های بین v_1 و v_2 انرژی جذب شده توسط نمونه را حین اعمال ضربه بدست آورد. در جدول ۹ رابطه انرژی جذب شده توسط نمونه با سرعت چکش حین اعمال ضربه برای سرعت های اولیه ۵ تا ۹ متر بر ثانیه ارائه شده است.

جدول ۹ نتایج روابط ۴ و ۵ را به اختصار بیان می کند. این جدول نشان می دهد، چنانچه چکش از ارتفاع های مختلف روی نمونه سقوط کند، به طوریکه سرعت اولیه آن بین ۵ تا ۹ متر بر ثانیه باشد، می توان انرژی جذب شده توسط نمونه را بر حسب سرعت چکش حین اعمال ضربه محاسبه کرد. با مقایسه روابط ارائه شده در این جدول ملاحظه می شود، شیب معادلات با افزایش سرعت اولیه چکش در جهت منفی افزایش می یابد. همچنین این جدول نشان می دهد، هر چه سرعت اولیه چکش بیشتر باشد، افت سرعت در پایان ضربه کم بوده و به مقدار ثابتی همگرا می شود. با در نظر گرفتن سرعت اولیه چکش برابر ۵ متر بر ثانیه افت سرعت در پایان ضربه $2/11$ متر بر ثانیه خواهد بود؛ یعنی حدود ۴۲ درصد از سرعت اولیه چکش در پایان ضربه کم خواهد شد. چنانچه سرعت اولیه چکش ۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شود، افت سرعت $0/98$ متر بر ثانیه خواهد بود که حدود ۱۰ درصد سرعت اولیه است.

جدول ۹- رابطه انرژی جذب شده توسط نمونه برای سرعت های اولیه ۵ تا ۹ متر بر ثانیه

رابطه انرژی جذب شده توسط نمونه بر حسب سرعت (J)	افت سرعت چکش (m/s)	سرعت چکش پس از ضربه (m/s)	سرعت چکش قبل از ضربه (m/s)
$E_f = -2140v + 10704$	۲/۱۱	۲/۸۹	۵
$E_f = -3871v + 23230$	۱/۶۰	۴/۴۰	۶
$E_f = -4722v + 33060$	۱/۳۲	۵/۶۸	۷
$E_f = -5524v + 44192$	۱/۱۲	۶/۸۸	۸
$E_f = -6313v + 56819$	۰/۹۸	۸/۰۲	۹

تنش تسليم، MPa

σ_y

۱۰- مراجع

- [1] Dieter GE (1961) Mechanical metallurgy. McGraw-Hill, United State of America 370-390.
- [2] 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.
- [3] 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)
- [4] API Specification 5L (2012) Specification for line pipe. 45th edn. American Petroleum Institute (API). Washington DC.
- [5] Ferahat H, Ahmadi-Brooghani SY (2017) Studying the behavior of A356/SiCp composite foam under low-velocity impact loading. *Journal of Solid and Fluide Mechanics* 7(2): 129-147. (In Persian)
- [6] Jonson W (1972) Impact strength of materials. Edward Arnold Co.
- [7] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaei Mostofi T (2015) Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. *Journal of Modares Mechanical Engineering* 15(2): 305-312. (In Persian)
- [8] 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.
- [9] Babaei H, Jamali A, Mirzababaei Mostofi T, Ahraf Taleh SH (2016) Experimental study and mathematical modeling of deformation of rectangular plates under impact load. *Journal of Solid and Fluide Mechanics* 6(1): 143-152. (In Persian)
- [10] Yu PS, Ru CQ (2016) Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Eng Fract Mech* 160: 138-146.
- [11] 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.
- [12] Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR (2014) Non-local phenomenological damage-mechanics-

۴- با تکميل مدل سازي کامپيوترى رابطه انرژى جذب شده در نمونه تعميم پيدا کرد و رابطه ۵ ارائه شد. به کمک اين رابطه مي توان انرژى جذب شده توسط نمونه را در سرعت هاي مختلف چکش (بين ۵ تا ۹ متر بر ثانيه) محاسبه و درصد نواحى پلاستيک ايجاد شده داخل نمونه را بر حسب اين انرژى بيان کرد.

۸- تشکر و قدردانى

از شرکت لوله و تجهيزات سديد به جهت در اختيار قرار دادن فولاد API X65 جهت آزمايش قدردانى مي شود؛ همچنين، از شرکت گاز استان خراسان جنوبى جهت حمايت از طرح پژوهشى ساخت دستگاه آزمايش سقوط آزاد وزنه تشکر مي نمايد.

۹- فهرست علائم

شتاب چکش، m/s^2	a
انرژى شکست، J	E_f
کسر حجمى حفره ها، بي بعد	f
شتاب گرانش، m/s^2	g
ارتفاع سقوط چکش، m	h
جرم چکش، kg	m
نيروى وارد شده بر چکش، N	P
زمان برخورد چکش با نمونه، s	t
سرعت چکش، m/s	v
جابجايى چکش، m	x
تنش معادل وون مایرز، MPa	σ_e
تنش میانگين، MPa	σ_m

- [16] 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)
- [17] Tvergaard V, Needleman A (1984) Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta metall* 32(1): 157-169.
- [18] Gurson AL (1977) Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 - yield criteria and flow rules for porous ductile media. Division of Engineering. Brown University, Providence, RI, USA.
- based modeling of the drop-weight tear test. *Eng Fract Mech* 118: 66-82.
- [13] Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR (2015) Computational modeling of the drop-weight tear test: A comparison of two failure modeling approaches. *Eng Fract Mech* 148: 304-323.
- [14] 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.
- [15] API RP 5L3 (1996) Recommended practice conducting drop-weight tear test on line pipe. 3rd edn. American Petroleum Institute (API). Washington DC: 1-9.