ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):81-91

Experimental Measurement of Critical Crack Tip Opening Angle in API X65 Steel Using Drop Weight Tear Test Specimen

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Gholami Moghaddam S[1],
Hashemi S.H[1*]

How to cite this article
Gholami Moghaddam S, Hashemi S H. Experimental Measurement of Critical Crack Tip Opening Angle in API X65 Steel Using Drop Weight Tear Test Specimen. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):81-91.

[1] Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
P.O.B. 97175/615 Birjand
shhashemi@birjand.ac.ir

Article History
Received: August 28, 2022
Accepted: December 01, 2022
ePublished: February 19, 2023

ABSTRACT

The critical Crack Tip Opening Angle ($CTOA_c$) is considered as a convenient parameter to characterize the crack arrest toughness of natural gas pipeline. Load-displacement curve is a comprehensive reflection of geometry, mechanical property and fracture behavior of a loaded specimen, so it would be highly advantageous to deduce ($CTOA_c$) from load-displacement curve directly. From force-displacement curves, maximum force of 209kN and 207kN were obtained for experimental and numerical data, respectively. In this article, a combination of load-displacement and deformation of the drop weight tear test specimen was used to calculate the critical crack tip opening angle. For this purpose, the simplified single-specimen test method was used. The ($CTOA_c$) is dependent on the slope of the steady-state crack growth region and the plastic rotation factor. Firstly, based on the fact that load decreases linearly with the increment of displacement during steady-state crack growth, the slope of the experimental load-displacement curve of API X65 steel in the steady-state crack growth region was obtained as 21.583. Secondly, by modeling the drop weight tear test in Abaqus software and using two methods of mises stress and neutral axis, the plastic rotation factor was obtained as 0.5688 and 0.5651, respectively. Finally, these parameters were used and the critical crack tip opening angle was determined as 12.00 and 12.08 degrees.

Keywords Crack tip opening angle, API X65 Steel, Drop weight tear test, Simplified single-specimen method, Plastic rotation factor, Mises stress.

CITATION LINKS

1- A model to evaluate unstable ductile crack arrestability of.... 2- Study on crack growth resistance curve test of pipeline steel. 3- A fracture-propagation-control model for pipelines transporting CO2-rich mixture... 4- A specimen for studying the resistance to ductile crack propagation in pipes. 5- New numerical tools to calibrate the Two Curves Method using... 6- Geometric and material property dependencies of the plastic rotation factor... 7- Crack tip opening angle during unstable ductile crack propagation of... 8- Relationship between incremental J integral and... 9- A new data analysis technique to examine crack tip opening angle... 10- CTOA Results for X65 and X100 Pipeline... 11- Measurement of CTOA of pipe steels using... 12- The development and validation of a dynamic fracture propagation model for... 13- Standard Test Method for Determination of Resistance to... 14- On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using... 15- Microtopography for ductile fracture process... 16- Simplified single-specimen method for evaluating CTOA. 17- Tearing modulus, J-integral, CTOA and... 18- Review of CTOA as a Measure of... 19- Evaluation of cracking behavior and... 20- An energy based regression method to evaluate critical CTOA of pipeline steels by instrumented drop weight tear tests. 21- Determining critical CTOA from energy-load... 22- Standard Test Method for Determination of Crack-Tip-Opening Angle of... 23- Experimental Measurement and Numerical Evaluation of Fracture Energy in Drop Weight... 24- API Recommended Practice for Conducting Drop-weight Tear... 25- Analysis of fracture energy in drop weight tear testing of API X65 gas pipeline steel. 26- API Specification 5L. Specification for... 27- Characterisation of weldment hardness, impact energy and... 28- Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of ..t. 29- Ductile to brittle transition of an A508 steel... 30- Determination of dynamic rotation factor for DWTT specimens by... 31- Comments and replies on the paper 'Determination of..32- Fracture propagation in DWT back slotted specimens.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

اندازه‌گیری تجربی زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک در فولاد API X65 با استفاده از نمونه آزمایش ضربه سقوطی

سروش غلامی مقدم [۱]، سید حجت هاشمی [۱*]

[۱] دانشکده مهندسی بیرجند، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

چکیده

زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک به عنوان یک عامل مناسب برای ارزیابی چقرمگی خطوط لوله گاز انتقال طبیعی به منظور توقف ترک در نظر گرفته میشود. منحنی نیرو-جابجایی بازتابی جامع از هندسه، خواص مکانیکی و رفتار شکست یک نمونه بارگذاری شده است، بنابراین نتیجه‌گیری مستقیم زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک از این منحنی بسیار سودمند خواهد بود. با ترسیم منحنی‌های نیرو-جابجایی مقدار حداکثر نیرو برای داده‌های آزمایشگاهی ۲۰۹ کیلونیوتن و از طریق مدل‌سازی کامپیوتری ۲۰۷ کیلونیوتن به دست آمد. در این مقاله به منظور ترکیب نیرو، جابجایی و تغییر شکل نمونه آزمایش ضربه سقوطی و سپس محاسبه زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک، از روش تک نمون‌های ساده شده استفاده شده است. زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک به شیب ناحیه رشد ترک پایدار و ضریب دوران پلاستیک وابسته است. در مرحله اول، بر اساس این واقعیت که با افزایش جابجایی در طول رشد ترک در حالت پایدار، نیرو به صورت خطی کاهش می‌یابد، شیب منحنی نیرو-جابجایی آزمایشگاهی فولاد API X65 در ناحیه رشد ترک پایدار ۲۱/۵۸۳ به دست آمد. در مرحله دوم، با مدل‌سازی آزمایش ضربه سقوطی در نرمافزار آباکوس و استفاده از دو روش تنش میزز و تار خنثی، ضریب دوران پلاستیک به ترتیب برابر ۰/۵۶۸۸ و ۰/۵۶۵۱ محاسبه شد. در نهایت با استفاده از این ضرایب مقدار زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک ۱۲/۰۰ و ۱۲/۰۸ درجه تعیین گردید.

کلیدواژه‌ها: زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک، فولاد API X65، آزمایش ضربه سقوطی، روش تک نمون‌های ساده شده، ضریب دوران پلاستیک، تنش میزز.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

*نویسنده مسئول: shhashemi@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش تقاضا برای منابع گاز طبیعی، پیشرفت‌های خطوط لوله‌های فولادی با درجه بالا را به همراه داشته است، زیرا این پیشرفت‌ها راه حل خوبی برای انتقال گاز طبیعی با مزایایی از نظر هزینه کمتر و کارایی بیشتر ارائه می‌دهند[1]. در مورد یکپارچگی ساختاری این خطوط لوله، جلوگیری از انتشار ناپایدار ترک نرم بسیار مهم است، زیرا چنین حالت شکست میتواند منجر به صدمه‌های فاجعه بار به محیط اطراف شود[2]. توقف انتشار ناپایدار ترک نرم در خطوط لوله یک پدیده پیچیده است که در آن تغییر شکل و شکست لوله‌ها و جریان و فشرده‌سازی گاز به صورت پویا با یکدیگر در تعامل هستند[3]. روش دو منحنی بتل (Battelle two-curve method) که منحنی مقاومت ترک و فشرده‌سازی گاز را برای ارزیابی مقاومت ترک نرم ناپایدار مقایسه می‌کند، شناخته شده‌ترین روش است. با این حال ثابت شده است که این روش چقرمگی شکست کمتری را برای توقف ترک خطوط لوله پیش‌بینی می‌کند. بنابراین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک (Critical crack tip opening angle) به عنوان یک عامل بسیار امید بخش و مناسب برای کنترل ترک در نظر گرفته می‌شود[4,5]. اندازه‌گیری زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک برای فولادهای نرم و فریتی، با هدف استفاده از آن به عنوان یک عامل برای تعیین چقرمگی رشد ترک در محاسبات اجزاء محدود بررسی شده است[6]. یک آزمایش انفجار گاز در مقیاس کامل توسط شیبانوما برای بازتولید تاریخچه زاویه گشودگی نوک ترک در طول انتشار ترک نرم در لوله انتقال گاز، انجام شد. این آزمایش اثبات کرد که استفاده از زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک به عنوان عاملی برای تعریف چقرمگی توقف ترک منطقی است[7]. لو اولین کسی بود که اهمیت فیزیکی زاویه گشودگی نوک ترک را نشان داد و یک مبنای نظری برای کاربرد گسترده آن ایجاد کرد[8].

زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک بیشتر از سطح نمونه و با نمونه تیر یک‌سر گیردار دوتایی اصلاح شده (Modified double cantilever beam: MDCB)، نمونه کشش فشرده (Compact tension: CT)، نمونه خمشی با شیار تک‌لبه (Single edge notch bending: SENB) و نمونه آزمایش ضربه سقوطی (Drop weight tear test: DWTT) اندازه‌گیری می‌شود. مقادیر زاویه گشودگی نوک ترک اندازه‌گیری شده از نمونه‌های آزمایشگاهی در تحلیل سازه‌های صنعتی بزرگ مثل خطوط لوله قابل استفاده هستند[4]. دشواری زیاد، دوره طولانی و هزینه بالای آزمایش انفجار خط لوله باعث می‌شود که نمونه‌های با مقیاس آزمایشگاهی همچنان انتخاب ارجح باشند.

هاشمی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی به تعیین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک فولاد API X65 پرداختند. زاویه گشودگی نوک ترک در ناحیه رشد ترک پایدار به عنوان زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک تعریف می‌شود. در این پژوهش اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک از لبه‌های ترک و یک شبکه مرجع ریز، با استفاده از عکس‌های دو دوربین از نمونه تیر یک‌سر گیردار دوتایی اصلاح شده انجام شده است. مقدار ۱۱±۰/۵ درجه به عنوان زوایه بحرانی گشودگی نوک ترک تعیین شده است[9]. در پژوهش‌های دیگری نیز با استفاده از نمونه تیر یک‌سر گیردار دوتایی اصلاح شده و روش تجربی، زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک فولاد API X65 به دست آمده است[10,11].

اودانهیو و همکارانش در سال ۱۹۹۴ زاویه گشودگی نوک ترک را به عنوان معیاری برای مقاومت در برابر شکست و جلوگیری از امکان انتشار طولانی ترک پیشنهاد کردند. آنها بیان داشتند که زاویه گشودگی نوک ترک مناسب‌ترین عامل در طول انتشار شکست دینامیکی غیرالاستیک فولاد خط لوله می‌باشد. برای تعیین زاویه گشودگی نوک ترک در این پژوهش از روش آزمون

دو نمونه (Two-specimen test) استفاده شده است که این روش براساس اندازه‌گیری‌های انرژی از آزمایش ضربه سقوطی است. زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک برای فولاد API X65 در این پژوهش ۱۴/۲ درجه تعیین شده است[12].

بنامارا و همکارانش در سال ۲۰۱۹ زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک فولاد API X65 را با استفاده از یک نمونه اصلاح‌شده کشش فشرده (Modified compact tension: MCT) در دمای اتاق اندازه‌گیری کردند. به دلیل تفاوت در نتایج تجربی، از دو روش برای اندازه‌گیری استفاده شده است. روش اول شامل اندازه‌گیری مستقیم سیر تکاملی زاویه گشودگی نوک ترک با یک دوربین همبستگی تصویر دیجیتال (Digital image correlation: DIC) و روش دوم، اندازهگیری با ترکیب داده‌های تجربی نیرو-جابجایی و تحلیلهای اجزاء محدود و سپس اندازهگیری عددی سیر تکاملی زاویه گشودگی نوک ترک است. نشان داده شد که روش دوم از نظر دقت و همچنین پیاده‌سازی مزیت بیشتری دارد. زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک ۱±۲۰ درجه تعیین شده است[9].

۲- بررسی روش‌های اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک

با بررسی پژوهش‌هایی که صرفاً با استفاده از روش تجربی به تعیین زاویه گشودگی نوک ترک پرداخته‌اند، به نکات مهمی می‌توان اشاره کرد؛ آزمایش دقیق تعیین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک به دلیل محل‌سازی آن دشوار است. همچنین دقت و ثبات نتایج اندازه‌گیری تجربی به طور جدی تحت تأثیر عدم قطعیت در تعیین محل نوک ترک و نقاط روی هر دو سطح ترک قرار دارد. مقایسه روش‌های تجربی مختلف، از استاندارد ASTM-E-2472 و سایر پژوهش‌های خطوط لوله گاز در جدول ۱ آورده شده است[13-16].

جدول ۱) روش‌های تجربی برای اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک

نوع اندازه‌گیری	روش‌های اندازه‌گیری	نکات‌اندازه‌گیری
اندازه‌گیری مستقیم (در طول آزمایش)	استفاده از میکروسکوپ نوری همبستگی تصویربرداری دیجیتال	۱- فقط سطح نمونه ۲- دامنه: ۱/۵-۰/۵ میلی‌متر جلوی نوک ترک
اندازه‌گیری غیر مستقیم (پس از آزمایش)	میکروتوپوگرافی	۱- هم داخل و هم سطح نمونه ۲- نمونهای فضایی ۰/۱ میلی‌متر در جهت رشد ترک
اندازه‌گیری غیر مستقیم	استفاده از تکنیک δ_5	روابط آن‌ها تحت مطالعه است (بیشتر توسط محققین آلمانی)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر دو روش مستقیم و غیر مستقیم به تجهیزات آزمایشگاهی اضافی یا فناوری‌های پس از پردازش نیاز دارند که ممکن است خطاهای جدیدی را وارد کنند و در نتیجه دقت نتایج پایین بیاید. منحنی نیرو-جابجایی خود بازتابی جامع از هندسه، خواص مکانیکی و رفتار شکست نمونه‌ی بارگذاری شده است. بنابراین نتیجه‌گیری مستقیم زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک از منحنی نیرو-جابجایی با استفاده از نتایج یک نظریه بسیار مفید خواهد بود. در همین راستا روش‌های عددی ترکیبی (Combined Numerical Methods) که شامل باز تولید آزمایش تجربی به وسیله‌ی ترکیب داده‌های تجربی نیرو-جابجایی و تحلیل‌های اجزاء محدود و سپس اندازه‌گیری عددی زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک است، معرفی شده‌اند. مدل محاسبه زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک توسط مارتینللی و ونزی بر پایه مدل لولای پلاستیک (Plastic hinge) توسعه پیدا کرد؛ در این مدل مقادیر فیزیکی از جمله نیرو، جابجایی در امتداد خط اعمال نیرو و عرض بدون ترک (Ligament) با مدل لولای پلاستیک ترکیب می‌شوند و ابزاری نظری برای آزمایشگاه جهت ارزیابی عملکرد زاویه گشودگی نوک ترک مواد فراهم می‌کند[17]. چندین روش عددی ترکیبی دیگر برای تخمین زاویه گشودگی نوک ترک همراه با توسعه‌ها و کاربردهای‌شان ارائه شده است: روش تک نمونه‌های ساده شده (Simplified single-specimen method: S-SSM) توسط زو و همکاران پیشنهاد شده است[16]. روش جابجایی-خط اعمال نیرو (Load line displacement: LLD) توسط پاسگودا و همکاران[18] و فانگ و همکاران[19] ایجاد شد. روش انرژی-نیرو (Energy load method: ELM) توسط فانگ و همکاران[20] و شوآی و همکاران[21] مطرح شد.

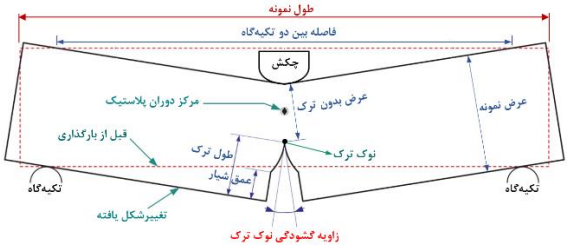
در تحقیق حاضر برای اولین بار با استفاده از روش تک نمونه‌های ساده شده، زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک نمونه با شیار ماشین‌کاری شده (شورون) از جنس فولاد API X65 از طریق آزمایش ضربه سقوطی تعیین می‌گردد. همچنین برای اولین بار ضریب دوران پلاستیک برای نمونه آزمایش ضربه سقوطی در فولاد API X65 به طور دقیق گزارش می‌شود.

۳- تعیین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک بر پایه روش تک نمونه‌های ساده شده

زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک بر پایه روش تک نمونه‌های ساده شده و در ناحیه رشد ترک پایدار از رابطه (۱) به دست می‌آید[11]:

$$\mathrm{CTOA_c}(^\circ) = \frac{8r^*}{\xi}.\frac{180}{\pi} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، ξ شیب منحنی $ln\left(\frac{P}{P_m}\right)$ بر حسب $\left(\frac{y-y_i}{s}\right)$ است (P مقدار هر نیرو و y جابجایی متناظر با این نیرو، P_m مقدار حداکثر نیرو و y_i جابجایی متناظر با این نیرو و S فاصله بین دو تکیه‌گاه است). r^* ضریب دوران پلاستیک است که برای فولادهای با استحکام بالا، ۰/۵۷ و برای فولادهای با استحکام پایین، ۰/۵۴ گزارش شده است[11]. شکل ۱ طرحی از نمونه آزمایش ضربه سقوطی با شیار تک‌لبه را نشان می‌دهد که مطابق با استاندارد ASTM-E-3039 در اندازه‌گیری زاویه گشودگی نوک ترک آزمایشگاهی استفاده می‌شود[22].



شکل ۱) هندسه و دوران نمونه آزمایش ضربه سقوطی قبل از بارگذاری و پس از تغییر شکل

۴- روش تحقیق

با توجه به این که این تحقیق شامل دو بخش آزمایشگاهی و مدل‌سازی کامپیوتری است ابتدا آزمایش ضربه سقوطی و نتایج این آزمایش بررسی شده، سپس به مدل‌سازی کامپیوتری و نتایج حاصل شده از این مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

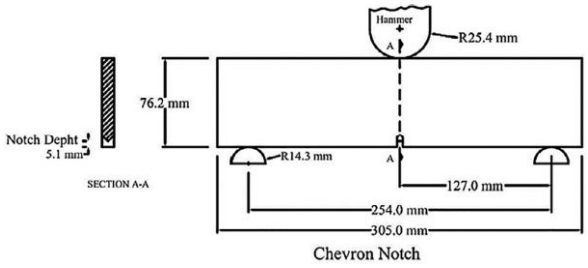
۴-۱- آزمایش ضربه سقوطی

آزمایش ضربه سقوطی یک آزمایش استاندارد صنعتی است که استفاده از آن برای به دست آوردن انرژی شکست و تعیین ویژگی‌های سطح شکست به ویژه برای فولادهای پر استحکام، نسبت به سایر آزمایش‌های ضربه ارجحیت دارد[23].

۴-۱-۱- معرفی هندسه و خواص نمونه آزمایش ضربه سقوطی

نمونه مورد آزمایش در تحقیق حاضر از جنس فولاد API X65 می‌باشد که مشخصات مربوط به آن، توسط موسسه بین المللی نفت آمریکا استاندارد شده است[24]. ابعاد و اندازه‌های این نمونه 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[25]. در جدول ۲ عناصر به کار برده شده برای تولید فولاد API X65 مورد آزمایش در تحقیق حاضر و همچنین مطابق با استاندارد API 5L[26] آورده شده است.

مطابق جدول ۲ مقادیر مربوط به استاندارد API 5L به صورت حداکثر مقدار قابل استفاده عناصر شیمیایی می‌باشند.



شکل ۲) ابعاد نمونه با شیار ماشین‌کاری شده (شورون)، تکیه‌گاه‌ها و چکش در آزمایش ضربه سقوطی مطابق با استاندارد[24]

جدول۲) ترکیبات شیمیایی فولاد API X65 تحقیق حاضر و مطابق با استاندارد API 5L بر حسب درصد وزنی (%)[27]

عنصر		فولاد API X65 تحقیق حاضر	استاندارد API 5L X65
Fe	آهن	عنصر پایه	–
C	کربن	۰/۰۷۲	۰/۲۲۰ (حداکثر)
Mn	منگنز	۱/۴۵۰	۱/۴۵۰ (حداکثر)
P	فسفر	۰/۰۰۸	۰/۰۲۵ (حداکثر)
S	سولفور	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵ (حداکثر)
Ti	تیتانیم	۰/۰۱۵	۰/۰۶۰ (حداکثر)
Si	سیلیکون	۰/۲۰۱	–
Nb	نیوبیم	۰/۰۴۷	–
Cr	کروم	۰/۱۷۴	–
Mo	مولیبدن	۰/۲۴۰	–
V	وانادیم	۰/۰۵۰	–
Ni	نیکل	۰/۰۰۹	–
Cu	مس	۰/۰۰۸	–
Al	آلومینیم	۰/۰۲۳	–

همان‌گونه که از اطلاعات نمایش داده شده دیده می‌شود کلیه داده‌های ترکیب شیمیایی فولاد تحقیق حاضر با استاندارد API 5L مطابقت دارند.

۴-۱-۲- دستگاه و تجهیزات آزمایش ضربه سقوطی

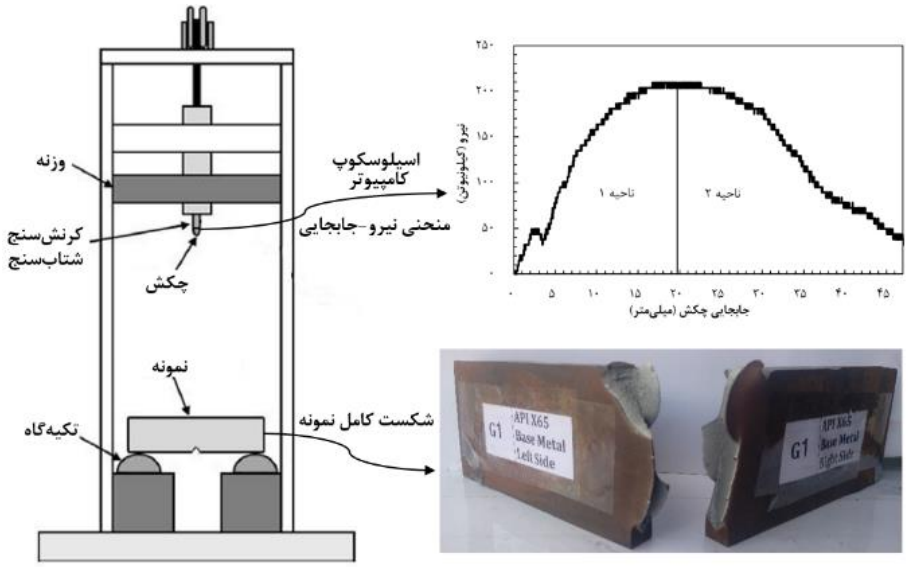
تصویر دستگاه ضربه سقوطی ساخته شده در دانشگاه بیرجند به همراه سایر تجهیزات متصل به آن شامل اسیلوسکوپ و کامپیوتر در مرجع[25] نمایش داده شده است. این دستگاه مجهز به مدار کرنش‌سنج و شتاب‌سنج می‌باشد که داده‌ها را از طریق اسیلوسکوپ و کامپیوتر متصل به آن نمایش می‌دهد. حداکثر ظرفیت دستگاه با توجه به جرم چکش (۷۰۰ کیلوگرم) و حداکثر ارتفاع سقوط (۳ متر) تقریباً ۲۱ کیلوژول است.

۴-۱-۳- انجام آزمایش ضربه سقوطی

در ابتدا نمونه بر روی دو تکیه‌گاه و زیر چکش دستگاه قرار میگیرد. سپس چکش تا ارتفاع مشخصی بالا برده می‌شود (۲ متر). این ارتفاع باید به گونه‌ای باشد که سرعت چکش در لحظه برخورد به نمونه در محدوده تعریف شده استاندارد (۵ تا ۹ متر بر ثانیه) قرار گیرد. سرعت ضربه چکش در لحظه برخورد با نمونه حدود ۶/۳ متر بر ثانیه است. در نهایت با اعمال ضربه چکش به نمونه، شکست کامل اتفاق می‌افتد. در شکل ۳ روند انجام آزمایش ضربه سقوطی نمایش داده شده است.

۴-۱-۴- نتایج آزمایش ضربه سقوطی

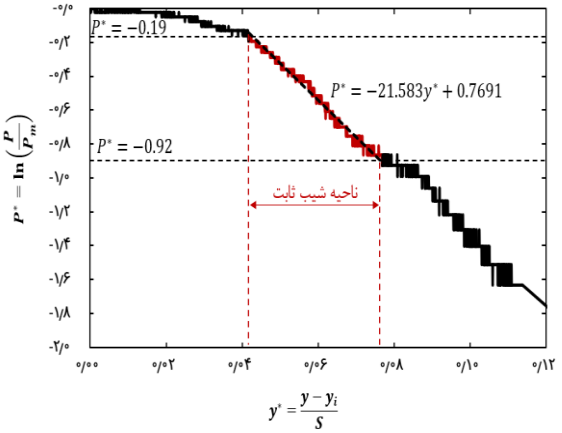
به منظور استفاده از روش تک نمونه‌ای ساده شده نیاز به ترسیم منحنی نیرو-جابجایی است. برای ترسیم این منحنی ابتدا باید دو منحنی نیرو-زمان و جابجایی-زمان ترسیم شوند. جزئیات در خصوص نحوه ترسیم این منحنی‌ها در پژوهشی جداگانه توسط فتحی و همکاران بررسی شده است[23]. در منحنی نیرو-جابجایی شکل ۳، حداکثر نیرو، ۲۰۹ کیلونیوتن در جابجایی ۱۹/۶۰ میلی‌متر است.



شکل ۳) طرح‌واره تجهیزات دستگاه و خروجی‌های آزمایش ضربه سقوطی

با توجه به این‌که افت نیرو زمانی حاصل می‌شود که ترک شروع به رشد می‌کند، می‌توان محل حداکثر نیرو را با شروع ترک برابر دانست[28]. 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). افت نیرو پس از رشد ترک در جابجایی ۲۸ تا ۳۹ میلی‌متر چکش، خطی است که نشان دهنده رشد ترک پایدار (Steady state crack growth) است.

در شکل ۴ منحنی $ln\,(\frac{P}{P_m})$ بر حسب $(\frac{y-y_i}{s})$ مربوط به ناحیه ۲ ترسیم شده است. هنگامی که ترک به حالت پایدار گسترش می‌یابد، نیرو با افزایش میزان جابجایی به صورت خطی کاهش می‌یابد (ناحیه قرمز رنگ). ناحیه‌ی رشد ترک پایدار زمانی اتفاق می‌افتد که طول ترک، بین ۲۵/۲۵ میلی‌متر و ۴۰/۰۸ میلی‌متر باشد. در این حالت مقدار $ln\,(\frac{P}{P_m})$ بین ۰/۱۹- تا ۰/۹۲- است. شیب منحنی در ناحیه رشد ترک پایدار، ۲۱/۵۸۳ به دست می‌آید. $(\xi = 21.58)$

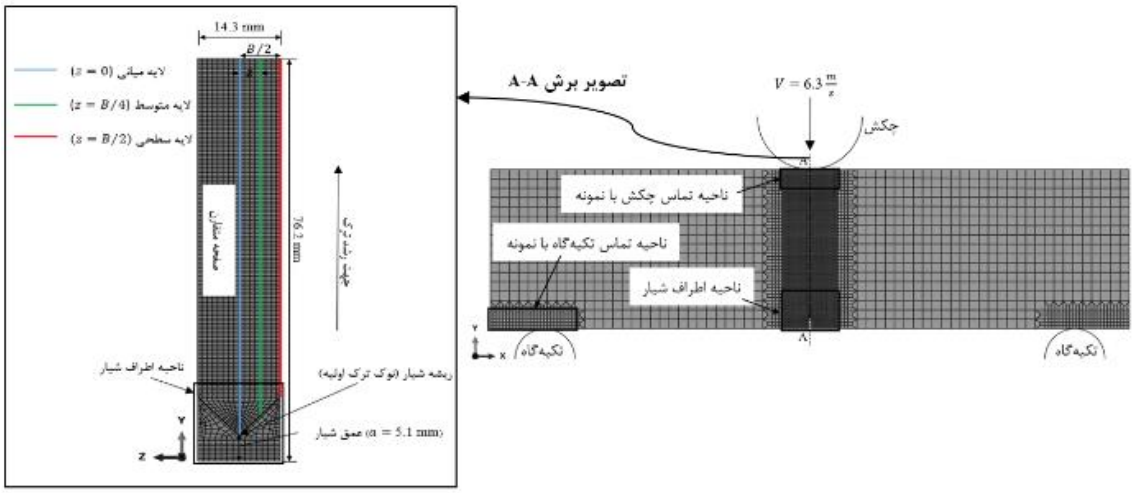


شکل ۴) تحلیل روش تک نمونه‌ای ساده شده: منحنی بر حسب ناحیه ۲ در منحنی نیرو-جابجایی شکل ۳

۴-۲- مدلسازی کامپیوتری

مدل گرسون-تیورگارد-نیدلمن (GTN) پیامد فیزیکی آسیب مواد را در سراسر تغییر شکل فلز نشان می‌دهد و تأثیر آسیب میکروسکوپی را بر رفتارهای مکانیکی ماکروسکوپی منعکس می‌کند. از این مدل جهت شبیه‌سازی شکست نمونه‌های نرم استفاده می‌شود. مدل اجزاء محدود سه بعدی برای نمونه آزمایش ضربه سقوطی با استفاده از مدل گرسون-تیورگارد-نیدلمن ساخته شد و انتشار ترک شکل‌پذیر شبیه‌سازی شد. جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در این شبیه‌سازی چکش و تکیه‌گاه‌ها صلب در نظر گرفته شده‌اند و مطابق با استاندارد به صورت دو نیم دایره توخالی به شعاع‌های ۲۵/۴ و ۱۴/۳ میلی‌متر ترسیم شده‌اند. پس از تکمیل هندسه نمونه، خواص مکانیکی و فیزیکی، عوامل کالیبره شده مدل آسیب گرسون و خواص پلاستیک نمونه (جدول ۳) وارد نرم‌افزار شدند. خواص پلاستیک با استفاده از آزمون کشش بر روی نمونه فولاد API X65 تحقیق حاضر در جهت محیطی لوله به دست آمده‌اند.[23]

در شکل ۵ شبیه‌سازی آزمایش ضربه سقوطی نمایش داده شده است. برای شبکه‌بندی نمونه با توجه به این‌که تغییر شکل‌پذیر است از ۶۸۷۷۲ اجزا خطی، سه بعدی و هشت گره‌ای با انتگرال کاهشی (C3D8R) و ۵۱۶ اجزا خطی، منشور مثلثی و شش گره‌ای (C3D6) و برای قطعات صلب مانند چکش و تکیه‌گاه‌ها از ۱۱۱۲ اجزا خطی، سه بعدی و چهار گره‌ای صلب (R3D4) استفاده شد. حجم اجزا در مجاورت شیار و بخش پایینی چکش ۰/۱ میکرومتر مکعب در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۵، نمونه در سه ناحیه با چکش و تکیه‌گاه‌ها در تماس است. در مرجع [۲۹] برای تماس بین چکش، نمونه و تکیه‌گاه‌ها، ضریب اصطکاک ۰/۱ و در مرجع[12] ضریب اصطکاک ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است (در



شکل ۵) شبیه‌سازی آزمایش ضربه سقوطی: اتصال نهایی چکش، تکیه‌گاه‌ها و نمونه

جدول۳) پارامترهای مدل آسیب گرسون و خواص پلاستیک برای فولاد API X65 جهت استفاده در نرم‌افزار آباکوس[23]

پارامترهای مدل آسیب گرسون							
f_f	f_c	f_N	S_N	ε_N	q_3	q_2	q_1
۰/۸۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۴۵	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵

خواص پلاستیک					
ردیف	تنش پلاستیک (MPa)	کرنش پلاستیک	ردیف	تنش پلاستیک (MPa)	کرنش پلاستیک
۱	۵۰۵	۰	۱۱	۷۱۹	۰/۱۸
۲	۵۴۹	۰/۰۱	۱۲	۷۷۲	۰/۱۹
۳	۵۹۹	۰/۰۳	۱۳	۷۵۵	۰/۳۰
۴	۶۳۱	۰/۰۵	۱۴	۷۹۴	۰/۵۰
۵	۶۵۲	۰/۰۶	۱۵	۸۲۱	۰/۷۰
۶	۶۶۷	۰/۰۸	۱۶	۸۳۲	۰/۸۰
۷	۶۸۱	۰/۱۰	۱۷	۸۴۱	۰/۹۰
۸	۶۹۳	۰/۱۲	۱۸	۸۵۰	۱/۰۰
۹	۷۰۳	۰/۱۴	۱۹	۸۵۸	۱/۱۰
۱۰	۷۱۲	۰/۱۶	۲۰	۸۶۶	۱/۲۰

این مرجع اشاره شده است که تغییر میزان اصطکاک در مدل شبیه‌سازی، تاثیر ناچیزی بر روی نتایج دارد). در تحقیق حاضر تماس بین چکش، نمونه و تکیه‌گاه‌ها از نوع سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۱ در نظر گرفته شده است. زمان بارگذاری با توجه به داده‌های استخراج شده از اسیلوسکوپ حدود ۹ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

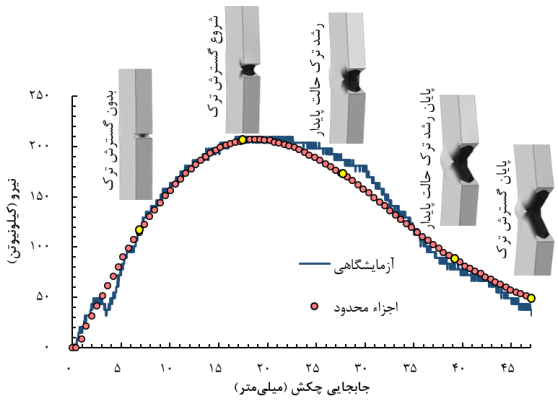
در تصویر برش A-A (شکل ۵)، شبکه‌بندی مقطع نمونه در صفحه yz (صفحه ترک) و ناحیه اطراف شیار نمایش داده شده است. جهت x، عمود بر صفحه ترک و تنش در این جهت، تنش بازشوندگی (Opening stress) نامیده می‌شود. جهت y، جهت رشد ترک و جهت z در راستای ضخامت است. برای بررسی دقیق توزیع تنش‌میزز و بازشوندگی در سطح شکست نمونه سه لایه مختلف در جهت ضخامت در نظر گرفته شده است: لایه میانی (Mid layer) که به صفحه متقارن (Symmetrical plane) و لایه سطحی (Surface layer) که به سطح نمونه اشاره دارد و لایه متوسط (Intermediate layer) که در حد وسط دو لایه میانی و سطحی قرار دارد. برای محاسبه رشد ترک، طول مسیر مستقیم اجزای حذف شده از نوک ترک اولیه تا نوک ترک حاضر در راستای لایه میانی، اندازه‌گیری می‌شود.

۴-۳- نتایج مدل‌سازی کامپیوتری

۴-۳-۱- منحنی نیرو-جابجایی

شکل ٦ منحنی نیرو-جابجایی را برای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی کامپیوتری نشان می‌دهد. در این شکل تطابق خوب نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نمایش داده شده است. مقدار نیروی حداکثر در مدل اجزاء محدود ۲۰۷ کیلونیوتن می‌باشد که در جابجایی ۱۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است. این نیرو برای داده‌های تجربی ۲۰۹ کیلونیوتن در جابجایی ۱۹/٦۰ میلی‌متر می‌باشد.

کانتورهای کسر حجمی حفره‌ها و نحوه رشد ترک در جابجایی‌های مختلف نیز درشکل ٦ نمایش داده شده است. رشد ترک در مرحله شروع گسترش ترک همراه با تونلزنی (Crack tunelling) صورت می‌گیرد که افت شدید نیرو را به دنبال دارد و تا مرحله پایان گسترش ترک ادامه دارد.

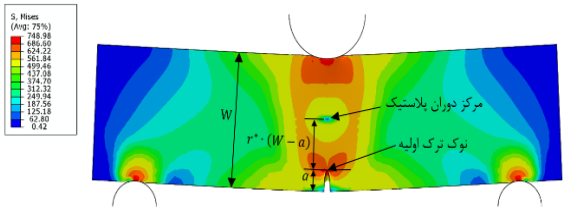


شکل ۶) مقایسه منحنی نیرو-جابجایی بین داده‌های تجربی و مدل اجزاء محدود

۴-۳-۲- تعیین ضریب دوران پلاستیک

با توجه به رابطه(۱) تنها ثابت قابل تنظیم در فرآیند تخمین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک، ضریب دوران پلاستیک است. تغییر در این ضریب منجر به تغییر جدی نتایج اندازه‌گیری شده می‌شود، بنابراین تعیین دقیق ضریب دوران پلاستیک، اساس محاسبه دقیق زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک است. ضریب دوران پلاستیک معمولا به صورت تجربی یا عددی محاسبه می‌شود. محققان کارهای زیادی بر روی روش‌های تعیین ضریب دوران پلاستیک انجام داده‌اند، از جمله روش آزمایش سختی (Hardness test method) که توسط فانگ و همکاران پیشنهاد شد[30]، روش تار خنثی (Neutral axis method) که توسط زو و همکاران ارائه شد[6] و روش تنش میزز (Mises stress method) که توسط شوآی و همکاران[21] مطرح شد. عدم صحت روش آزمایش سختی برای تعیین ضریب دوران پلاستیک توسط تایسون و همکاران [۳۱] نشان داده شد. بنابراین در تحقیق حاضر از دو روش تار خنثی و تنش میزز برای محاسبه ضریب دوران پلاستیک استفاده می‌شود. به دلیل ضخیم شدن نمونه در نقطه‌ی بارگذاری، مقدار قابل ملاحظه‌ی بیشتر از ۰/۵ برای ضریب دوران پلاستیک مناسب‌تر است[16]. در تحقیق انجام شده توسط زو و همکاران[6] برای نمونه آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X70 گزارش شد که به دلیل وابستگی ضریب دوران پلاستیک به عوامل هندسی از جمله ضخامت نمونه و خواص مواد از جمله تنش تسلیم و انرژی شارپی، ضریب دوران پلاستیک بین مقادیر ۰/۵۳ تا ۰/۶ متغیر خواهد بود.

در شکل ۷ کانتور تنش میزز پس از ۸ میلی‌متر جابجایی چکش نمایش داده شده است.



شکل ۷) کانتور تنش میزز و پارامترهای هندسی در نمونه آزمایش ضربه سقوطی فولادAPI X65 پس از ۸ میلی‌متر جابجایی چکش

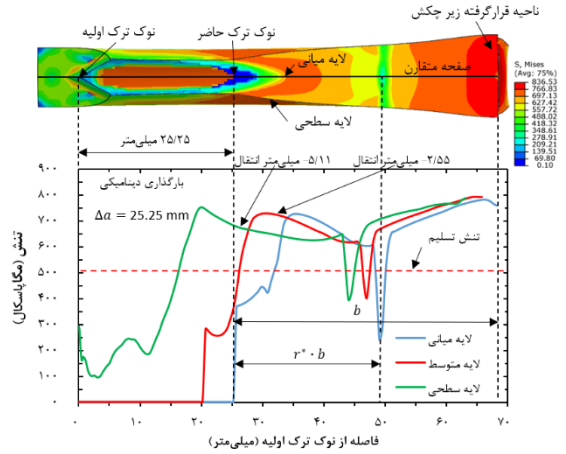
با توجه به شکل تنش‌هادر نزدیکی نوک ترک و نواحی تماس چکش و تکیه‌گاه‌ها با نمونه، متمرکز شده‌اند. تنش‌ها در ناحیه رشد ترک جز در یک ناحیه کوچک به رنگ آبی، از تنش تسلیم بیشتر هستند. این ناحیه به رنگ آبی همان مرکز دوران پلاستیک می‌باشد که با افزایش جابجایی چکش محل آن تغییر می‌کند. مرکز دوران پلاستیک در ناحیه‌ای نزدیک به مرکز عرض بدون ترک قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۷، در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه حول یک مرکز (نقطه لولایی (Hing point)) دوران می‌کند. موقعیت این نقطه لولایی با افزایش جابجایی چکش تغییر میکند. فاصله‌ی نوک ترک تا این مرکز دوران پلاستیک است[21].

در روش میزز، ضریب دوران پلاستیک برابر است با فاصله‌ی نوک ترک تا مرکز دوران پلاستیک (L) نسبت به عرض بدون ترک و در روش تار خنثی ضریب دوران پلاستیک برابر است با فاصله نوک ترک تا تار خنثی (L) نسبت به عرض بدون ترک که طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$b = w - a \quad , \quad r^* = \frac{L}{b} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، w، a و b به ترتیب عرض نمونه، طول ترک و عرض بدون ترک است. برای تعیین محل تار خنثی در خمش از ترسیم توزیع تنش بازشوندگی در سطح شکست نمونه استفاده می‌شود؛ جایی که تنش بازشوندگی صفر است به عنوان تار خنثی در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۸ توزیع تنش‌های میزز مربوط به لایه‌های مختلف را در سطح شکست نمونه در جابجایی ۲۸ میلی‌متر چکش نشان می‌دهد. در این جابجایی، نیرو ۱۸۲/۷۷ کیلونیوتن می‌باشد و ترک ۲۵/۲۵ میلی‌متر رشد می‌کند. با توجه به سطح شکست نمونه، ناحیه قرار گرفته شده زیر چکش افزایش ضخامت زیادی از خود نشان می‌دهد.



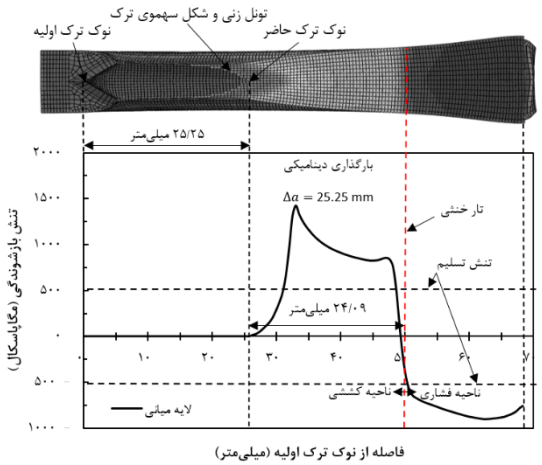
شکل ۸) توزیع تنش میزز مربوط به لایه‌های مختلف در جلوی نوک ترک پس از ۲۸ میلیمتر جابجایی چکش

با توجه به منحنی شکل ۸ ابتدا تنش در امتداد جهت رشد ترک افزایش می‌یابد، سپس برای هر لایه کاهش و دوباره افزایش پیدا می‌کند. در عرض بدون ترک برای هر سه لایه در یک ناحیه کوچک، تنش میزز کمتر از تنش تسلیم است. در این ناحیه کمترین تنش برای لایه میانی ۲۴۲/۵۸ مگاپاسکال است. موقعیت با توجه به کمترین تنش در ناحیه کوچک در هر لایه به عنوان مرکز دوران پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به هندسه شیار ماشین‌کاری شده و جهت رشد ترک، برای اندازه‌گیری دقیق عرض بدون ترک و تعیین ضریب دوران پلاستیک از لایه میانی استفاده می‌شود. با توجه به مسیر رشد ترک، در لایه میانی، تا فاصله‌ی ۲۵/۲۴ میلی‌متری از نوک ترک اولیه، تنش صفر است. عرض نمونه در جابجایی ۲۸ میلی‌متر چکش به ۷۳/۳۹ میلی‌متر می‌رسد. عرض بدون ترک برای لایه

میانی ۴۳/۰۴ میلی‌متر است ($b = 43.04$ mm). فاصله از نوک ترک تا مرکز دوران پلاستیک برای لایه میانی، ۲۳/۸۴ میلی‌متر است ($r^* * b = 23.84$ mm)، یعنی مرکز دوران پلاستیک در فاصله‌ی ۲۳/۸۴ میلی‌متری از نوک ترک قرار دارد. با جای‌گذاری مقادیر اندازه‌گیری شده در رابطه(۲)، ضریب دوران پلاستیک، ۰/۵۵۳۹ به دست می‌آید.

شکل ۹ توزیع تنش بازشوندگی مربوط به لایه میانی را در سطح شکست نمونه در جابجایی ۲۸ میلی‌متر چکش نشان می‌دهد. بیشترین تنش بازشوندگی در حالت کششی، ۱۴۲۰/۱۰ مگاپاسکال است که در فاصله‌ی ۷/۷۳ میلی‌متری از نوک ترک و در حالت فشاری، ۹۰۲/۶۰ مگاپاسکال است که در فاصله‌ی ۳۷/۰۵ میلی‌متری از نوک ترک اتفاق می‌افتد. تا فاصله‌ی ۵/۹۱ میلی‌متری از نوک ترک تنش بازشوندگی کمتر از تنش تسلیم، از فاصله‌ی ۵/۹۱ میلی‌متر تا ۲۳/۶۰ میلی‌متر بیشتر از تنش تسلیم، از فاصله‌ی ۲۳/۶۰ میلی‌متر تا ۲۵/۱۰ میلی‌متر کمتر از تنش تسلیم و از فاصله‌ی ۲۵/۱۰ میلی‌متر تا ۴۳/۰۵ میلی‌متر بیشتر از تنش تسلیم است. تنش در فاصله‌ی ۲۴/۰۹ میلی‌متری از نوک ترک صفر می‌شود که این فاصله محل تار خنثی (خط چین قرمز رنگ) را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل اجزای روشن، در سمت چپ تار خنثی، تحت کشش و اجزای تیره، در سمت راست تار خنثی تحت فشار هستند. با جای‌گذاری $L = 24.09$ mm در رابطه (۲)، ضریب دوران پلاستیک، ۰/۵۵۹۷ به دست می‌آید. با توجه به سطح شکست نمونه در شکل ۹، می‌توان پدیده تونل‌زنی ترک را مشاهده کرد. برای شکل‌گیری این پدیده ابتدا اجزای وسط حذف شده و سپس اجزای 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.



شکل ۹) توزیع تنش بازشوندگی مربوط به لایه‌میانی در جلوی نوک ترک پس از ۲۸ میلیمتر جابجایی چکش

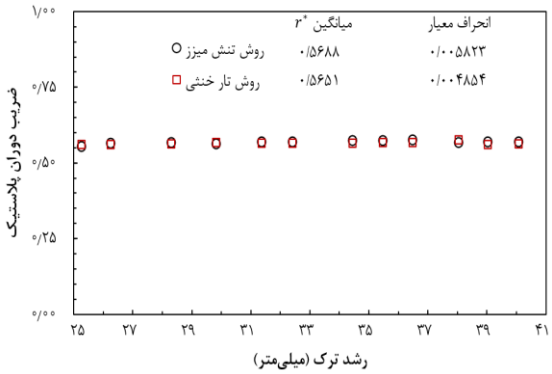
در ادامه به روش مشابه با جابجایی ۲۸ میلی‌متر چکش، برای سایر جابجایی‌های چکش در ناحیه رشد ترک پایدار (تا ۳۹ میلی‌متر) ضریب دوران پلاستیک به طور دقیق محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴) ضریب دوران پلاستیک در ناحیه رشد ترک پایدار برای نمونه آزمایش ضربه سقوطی فولاد API X65

جابجایی چکش (mm)	رشد ترک (mm)	ضریب دوران پلاستیک		درصد اختلاف (%)
		روش تنش میزز	روش تار خنثی	
۲۸	۲۵/۲۵	۰/۵۵۳۹	۰/۵۵۹۷	۱/۰۳
۲۹	۲۶/۲۶	۰/۵۶۶۳	۰/۵۶۰۴	۱/۰۵
۳۰	۲۸/۳۰	۰/۵۶۷۸	۰/۵۶۱۶	۱/۱۰
۳۱	۲۹/۸۴	۰/۵۶۲۹	۰/۵۶۹۳	۱/۱۲
۳۲	۳۱/۳۷	۰/۵۷۰۸	۰/۵۶۴۱	۱/۱۸
۳۳	۳۲/۴۰	۰/۵۷۱۳	۰/۵۶۴۵	۱/۲۰
۳۴	۳۴/۴۵	۰/۵۷۳۴	۰/۵۶۶۲	۱/۲۷
۳۵	۳۵/۴۷	۰/۵۷۴۴	۰/۵۶۷۰	۱/۳۰
۳۶	۳۶/۴۹	۰/۵۷۵۳	۰/۵۶۷۷	۱/۳۴
۳۷	۳۸/۰۳	۰/۵۶۹۰	۰/۵۷۷۰	۱/۳۹
۳۸	۳۹/۰۵	۰/۵۶۹۶	۰/۵۶۱۳	۱/۴۸
۳۹	۴۰/۰۸	۰/۵۷۰۶	۰/۵۶۲۱	۱/۵۱

در تحقیق انجام شده توسط فونزو و همکاران[32] بر روی نمونه آزمایش ضربه سقوطی نشان داده شده است که دامنه تغییرات ضریب دوران پلاستیک باید بین ۰/۵ و ۰/۶ باشد. همچنین در تحقیق انجام شده توسط پاسگودا و همکاران[18] گزارش شده است که حداکثر مقدار قابل قبول ضریب دوران پلاستیک، ۰/۶ می‌باشد. مطابق جدول همه مقادیر محاسبه شده برای ضریب دوران پلاستیک بین ۰/۵ و ۰/۶ هستند که نشان دهنده صحت محاسبات و دقت بالای مدل‌سازی می‌باشد.

در شکل ۱۰ تغییرات ضریب دوران پلاستیک بر حسب میزان رشد ترک در ناحیه رشد ترک پایدار نشان داده شده است. مطابق شکل، در ناحیه رشد ترک پایدار ضریب دوران پلاستیک تقریباً ثابت است و به مقدار رشد ترک و نیرو بستگی ندارد. داده‌های مربوط به روش تنش میزز کمی پراکنده‌تر از داده‌های مربوط به روش تار خنثی هستند. بنابراین می‌توان گفت که روش تار خنثی دقیق‌تر است. در ناحیه رشد ترک پایدار، ضریب دوران پلاستیک به دست آمده از دو روش تنش میزز و تار خنثی، اختلاف خیلی کمی دارند که مطابق جدول ٤، این اختلاف، حداکثر ۱/۵۱ درصد است. مقدار میانگین در دو روش تنش میزز و تار خنثی به ترتیب، ۰/۵٦۸۸ و ۰/۵٦۵۱ است، بنابراین مقدار میانگین مربوط به هر دو روش به مقدار تجربی ۰/۵۷ برای فولاد با استحکام بالا نزدیک است.



شکل ۱۰) تغییرات ضریب دوران پلاستیک در ناحیه رشد ترک پایدار برای نمونه آزمایش ضربه سقوطی فولادAPI X65

۵- تعیین زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک

با جای‌گذاری مقادیر محاسبه شده ξ و r* در رابطه (۱)، مقدار زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک در تحقیق حاضر ۱۲/۰۰ و ۱۲/۰۸ درجه تعیین می‌شود. در جدول ۵ مقادیر زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک گزارش شده در تحقیق حاضر و سایر مراجع مقایسه شده‌اند. مقادیر زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک گزارش شده در تحقیق حاضر به مقدار ۱۱±۰/۵ درجه در مرجع ردیف پنجم با فولاد با تنش تسلیم و ضخامت یکسان، نزدیک هستند. همچنین این مقادیر با مقدار ۱۱/۴±۰/۵ و ۱ ± ۱۳/۶ درجه در مرجع ردیف دوم و سوم و مقدار ۱۱/۷ درجه در مرجع ردیف چهارم قابل مقایسه است. مقادیر زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک گزارش شده در تحقیق حاضر از مقدار ۱۴/۲ درجه در مرجع ردیف اول کمتر می‌باشد، در این مرجع نمونه آزمایش ضربه سقوطی، تنش تسلیم و ضخامت بیشتری نسبت به نمونه تحقیق حاضر دارد. مقدار بالای ۱ ± ۲۰ گزارش شده در مرجع ردیف ششم به دلیل اثر قید مرتبط با ضخامت نمونه است.

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای نخستین بار با استفاده از روش تک نمون‌های ساده شده، زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک نمونه با شیار ماشین‌کاری شده (شورون) از جنس فولاد API X65 از طریق آزمایش ضربه سقوطی به دست آمد. نتایج حاصل شده در این تحقیق عبارت است از:

۱- 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.

۲- روند توزیع تنش‌های میزز در جابجایی‌های مختلف چکش در سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی برای سه لایه میانی، متوسط و سطحی تقریبا یکسان است و در یک ناحیه کوچک تنشهای میزز تا کمتر از تنش تسلیم افت می‌کنند.

۳- در آزمایش ضربه سقوطی، نمونه حول یک نقطه لولایی دوران می‌کند که مرکز دوران پلاستیک نامیده می‌شود. موقعیت این مرکز دوران پلاستیک با بررسی توزیع تنش‌های میزز برای لایه میانی در سطح شکست نمونه، نقطه‌ای با کمترین مقدار تنش میزز در یک ناحیه کوچک است که در این ناحیه، تنش میزز در تمامی جابجایی‌های چکش غیر از جابجایی ۴۷ میلی‌متر چکش، کمتر از تنش تسلیم است. همچنین مشخص شد که این مرکز دوران در ناحیه‌ای نزدیک به مرکز عرض بدون ترک قرار می‌گیرد.

۴- با بررسی توزیع تنش بازشوندگی در لایه میانی سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی، محل تار خنثی مشخص شد (جایی که تنش بازشوندگی صفر است). تار خنثی، عرض بدون ترک را در سطح شکست نمونه آزمایش ضربه سقوطی به دو ناحیه تحت فشار و تحت کشش تقسیم‌بندی می‌کند. با افزایش فاصله از تار خنثی مقدار تنش بازشوندگی به صورت غیر خطی افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

جدول ۵) مقادیر زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک گزارش شده در سایر مراجع و تحقیق حاضر برای فولاد API X65

ردیف	مرجع	نمونه	تنش تسلیم (*MPa*)	ضخامت (*mm*)	زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک (درجه)		روش اندازه‌گیری
۱	اودانهیو و همکارانش[12] (۱۹۹۷)	DWTT	۵۲۹	۱۸/۷	۱۴/۲		آزمون دو نمونه
۲	روون و همکارانش[10] (۲۰۰۸)	MDCB	۵۱۹	۸	۱۱/۴ ± ۱/۲		بصری (لبه‌های ترک)
۳	روون و همکارانش[10] (۲۰۰۸)	MDCB	۵۱۹	۸	۱۳/۶ ± ۱/۰		بصری (خطوط شبکه)
۴	زو و همکارانش[11] (۲۰۱۰)	MDCB	۵۲۱	۸	۱۱/۷		بصری (خطوط شبکه)
۵	هاشمی و همکارانش[9] (۲۰۱۳)	MDCB	۵۰۵	۱۴/۳	۱۱/۰ ± ۱/۲		بصری (خطوط شبکه)
۶	بنامارا و همکارانش[5] (۲۰۱۹)	MCT	۴۶۵	۶	۲۰/۰ ± ۱/۰		۱- بصری (لبه‌های ترک) ۲- عددی ترکیبی
۷	تحقیق حاضر (۲۰۲۲)	DWTT	۵۰۵	۱۴/۳	r* = ۰/۵۶۸۸ ۱۲/۰۸	r * =۰/۵۶۵۱ ۱۲/۰۰	تک نمونه‌ای ساده شده

DWTT: آزمایش ضربه سقوطی **MDCB: تیر یکسر گیردار دوتایی اصلاح شده** **MCT: اصلاح‌شده کشش فشرده**

۵- با افزایش جابجایی چکش، ترک در مسیر مستقیم خود شروع به رشد می‌کند. رشد ترک به صورت سهموی بوده و پدیده تونل زنی به خوبی در لحظه رشد ترک مشخص است. این پدیده نشان می‌دهد که ترک ابتدا از مرکز سپس از کناره‌ها شروع به رشد می‌کند (در کانتور کسر حجمی حفره‌ها در مدل‌سازی کامپیوتری ابتدا اجزای میانی حذف شده و بعد اجزای روی سطح آزاد حذف می‌شوند).

٦- در ناحیه رشد ترک پایدار مقدار میانگین ضریب دوران پلاستیک در دو روش تنش میزز و تار خنثی به ترتیب، ۰/٥٦٨٨ و ۰/٥٦٥١ به دست آمد که این مقدار میانگین مربوط به هر دو روش به مقدار تجربی ۰/۵۷ برای فولاد با استحکام بالا نزدیک است. این موضوع نشان دهنده صحت و دقت بالای مدل‌سازی است.

۷- مقدار زاویه بحرانی گشودگی نوک ترک، ۱۲/۰۰ و ۱۲/۰۸ درجه به دست آمد. این مقادیر با مقادیر گزارش شده در سایر مراجع قابل مقایسه هستند. این موضوع نشان‌دهنده کارآمدی روش تک نمون‌های ساده شده در مقایسه با سایر روش‌ها است.

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: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با پایان نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- Shibanuma K, Hosoe T, Nakai H, Morita A, Aihara S. A model to evaluate unstable ductile crack arrestability of offshore pipeline. Engineering Fracture Mechanics. 2017;178:126-47.
2- Shuai J. Study on crack growth resistance curve test of pipeline steel. J China Univ Petrol (Ed Nat Sci). 2013;5:174-80.
3- Nordhagen HO, Munkejord ST, Hammer M, Gruben G, Fourmeau M, Dumoulin S. A fracture-propagation-control model for pipelines transporting CO2-rich mixtures including a new method for material-model calibration. Engineering Structures. 2017;143:245-60.
4- Shterenlikht A, Hashemi SH, Howard IC, Yates JR, Andrews RM. A specimen for studying the resistance to ductile crack propagation in pipes. Engineering Fracture Mechanics. 2004;71(13):1997-2013.
5- Ben Amara M, Pluvinage G, Capelle J, Azari Z. New numerical tools to calibrate the Two Curves Method using the CTOA criterion. Engineering Fracture Mechanics. 2019;205:532-46.
6- Gesing MA, Simha CHM, Xu S, Tyson WR. Geometric and material property dependencies of the plastic rotation factor in the drop-weight-tear test. Engineering Fracture Mechanics. 2016;153:399-406.
7- Shibanuma K, Hosoe T, Yamaguchi H, Tsukamoto M, Suzuki K, Aihara S. Crack tip opening angle during unstable ductile crack propagation of a high-pressure gas pipeline. Engineering Fracture Mechanics. 2018;204:434-53.
8- Lu L, Wang S, Tong G. Relationship between incremental J integral and crack tip opening angle in elastic plastic materials. European Journal of Mechanics - A/Solids. 2019;75:399-409.
9- Hashemi SH, Dastani H, Sadri J. A new data analysis technique to examine crack tip opening angle values tested in API X65 pipe steel. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2013;36(7):614-22.
10- Reuven R, McCowan C, Drexler E, Shtechman A, Darcis P, Treinen JM, et al. CTOA Results for X65 and X100 Pipeline Steels: Influence of Displacement Rate2008.
11- Xu S, Tyson W, Eagleson R, McCowan C, Drexler E, McColskey J, et al. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWITT specimens2010.
12- O'Donoghue PE, Kanninen MF, Leung CP, Demofonti G, Venzi S. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1997;70(1):11-25.
13- ASTM E. Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions. ASTM E2472-12: American Society of Testing and Materials; 2018.
14- Heerens J, Schödel M. On the determination of crack tip opening angle, CTOA, using light microscopy and δ5 measurement technique. Engineering Fracture Mechanics. 2003;70(3):417-26.
15- Lloyd WR, McClintock FA. Microtopography for ductile fracture process characterization Part 2: application for CTOA analysis. Engineering Fracture Mechanics. 2003;70(3):403-15.
16- Xu S, Bouchard R, Tyson WR. Simplified single-specimen method for evaluating CTOA. Engineering Fracture Mechanics. 2007;74(15):2459-64.
17- Martinelli A, Venzi S. Tearing modulus, J-integral, CTOA and crack profile shape obtained from the load-displacement curve only. Engineering Fracture Mechanics. 1996;53(2):263-77.
18- Pussegoda LN, Verbit S, Dinovitzer A, Tyson W, Glover A, Collins L, et al., editors. Review of CTOA as a Measure of Ductile Fracture Toughness. 2000 3rd International Pipeline Conference; 2000. V001T02A021.
19- Fang J, Zhang J, Wang L. Evaluation of cracking behavior and critical CTOA values of pipeline steel

from DWTT specimens. Engineering Fracture Mechanics. 2014;124-125:18-29.
20- Fang J, Zhang JW, Wang L. An energy based regression method to evaluate critical CTOA of pipeline steels by instrumented drop weight tear tests. International Journal of Fracture. 2014;187(1):123-31.
21- Shuai J, Tu S, Wang J, Ren X, He J, Zhang Z. Determining critical CTOA from energy-load curves with DWTT specimen. Engineering Fracture Mechanics. 2017;186:47-58.
22- ASTM E. Standard Test Method for Determination of Crack-Tip-Opening Angle of Pipe Steels Using DWTT Specimens. ASTM E3039-16: American Society of Testing and Materials; 2016.

23- Fathi-Asgarabad E, Hashemi SH. 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):1145-56.
24- Department APIP. API Recommended Practice for Conducting Drop-weight Tear Tests on Line Pipe. 3th ed. Washigton DC: American Petroleum Institute; 1996.
25- Fathi E, Hashemi SH. Analysis of fracture energy in drop weight tear testing of API X65 gas pipeline steel. Journal of Pipeline Science and Engineering. 2021;1(2):225-32.
26- Department APIP. API Specification 5L. Specification for line pipe. 43rd ed. Washigton DC: American Petroleum Institute; 2004.
27- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012;98:8-15.
28- Hari Manoj Simha C, Xu S, Tyson WR. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the Drop-Weight Tear Test. Engineering Fracture Mechanics. 2014;118:66-82.
29- Tanguy B, Besson J, Piques R, Pineau A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part II: modeling of the Charpy transition curve. Engineering Fracture Mechanics. 2005;72(3):413-34.
30- Fang J, Zhang JW, Zhou YD. Determination of dynamic rotation factor for DWTT specimens by strain analysis and hardness measurement. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2016;39(7):830-8.
31- Tyson WR, Gesing MA, Simha CHM, Xu S. Comments and replies on the paper 'Determination of dynamic rotation factor for DWTT specimens by strain analysis and hardness measurement', FFEMS, 2016, 39, 830–838, by J. Fang, J.W. Zhang, and Y.D. Zhou. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2017;40(9):1501-5.
32- Fonzo A, Salvini P, Di Biagio M. Fracture propagation in DWT back slotted specimens. International Journal of Fracture. 2004;128(1):159-69.