

Calibration and Validation of a Ductile Failure Model for ST-37 Steel under Various Stress States

Mohsen Mansouri, Seyed Mehdi Ganjiani * 

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

ABSTRACT: The effects of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the ductile fracture behavior in ST-37 steel are studied in this research. To examine negative stress triaxiality conditions, uniaxial tensile and compressive tests were performed on specimens with specific geometries, including dog-bone specimens and rectangular specimens containing curved elliptical holes. Negative stress triaxiality values in the range of -0.348 to -0.456 were generated. A combined experimental-numerical approach was employed to analyze the fracture behavior. In the numerical part, the Ganjiani fracture model was implemented within a finite element framework using Abaqus software through the VUHARD and VUSDFLD user subroutines, considering the relevant damage parameters. A comparative analysis of the experimental and numerical results showed good agreement in predicting fracture strain. The numerical evaluation indicated that fracture occurs in regions where plastic strain is highly localized. The results confirm that stress triaxiality has a significant influence on ductile fracture, and was also observed that the variation of fracture strain under positive and negative stress triaxiality exhibits similar trends.

Review History:

Received: Apr. 28, 2026

Revised: Jun. 28, 2026

Accepted: Jul. 27, 2026

Available Online: Aug. 03, 2026

Keywords:

Fracture Strain

Negative Stress Triaxiality

Lode Angle Parameter

Ductile Fracture Behavior

ST-37 steel

1- Introduction

ST-37 steel is one of the most widely used structural steels in engineering applications. Extensive experimental studies have demonstrated that the influence of the stress state on ductile fracture mechanisms varies among different materials. Bridgman investigated the deformation and fracture behavior of cylindrical specimens made from twenty types of mild steel under hydrostatic pressures ranging from 0 to 2700 MPa [1]. Bao and Wierzbicki re-examined Bridgman's findings by conducting compression tests on short cylindrical specimens with different aspect ratios. Their results showed that the fracture location is independent of the material type [2]. Kubik et al. proposed new specimen geometries for uniaxial compression testing. Their cylindrical specimens incorporating spherical indentations enabled the generation of negative stress triaxiality values as low as -0.473 in aluminum alloys [3]. Lu et al. presented the results of uniaxial compression and plane-strain tests using two different specimen geometries to investigate the influence of the Lode parameter on the stress triaxiality threshold [4]. Mansouri and Ganjiani investigated the influence of negative stress triaxiality on fracture strain and ductile fracture behavior in ST-37 steel [5].

In the present study, uniaxial tensile and compression tests were performed on ST-37 steel under a wide range of

stress triaxiality conditions. Different specimen geometries, including standard dog-bone specimens and rectangular specimens containing elliptical holes, were designed to produce various levels of stress triaxiality. The experiments were simulated with finite element method (FEM), and the Ganjiani fracture model was implemented for the numerical analyses. The material failure behavior was incorporated through the VUHARD and VUSDFLD subroutines. Fracture strain under different combinations of stress triaxiality and Lode angle was determined experimentally and numerically, providing a comprehensive assessment of the ductile fracture behavior of ST-37 steel.

2- Methodology

To investigate the influence of negative stress triaxiality on fracture strain, four specimen geometries were designed to generate different levels of stress triaxiality under conventional uniaxial loading conditions. The introduction of elliptical holes and curved sections modified the local stress state from uniaxial to multiaxial, enabling the generation of negative stress triaxiality. Tensile tests on the standard dog-bone specimen were performed in accordance with the DIN 50125 standard. The M1, M2, and M3 specimens were specifically designed to produce different negative stress triaxiality levels during uniaxial tensile and compression tests, eliminating the

*Corresponding author's email: ganjiani@ut.ac.ir

need for more complex biaxial loading configurations. The Ganjani fracture model was developed to predict fracture strain and to describe the stress–strain response of ductile materials up to the onset of fracture. A coupled damage model was employed to account for the interaction between plastic deformation and damage evolution, providing a more realistic prediction of the material response up to failure. The model was implemented within the finite element framework and validated through comparison with experimental results. The implementation in Abaqus was carried out using the VUHARD and VUSDFLD user subroutines.

3- Discussion and Results

Since the stress in the dog-bone sample remains uniaxial under tensile testing, the stress triaxiality value, is 0.33. The presence of curvature in the other samples alters the stress state from uniaxial to multiaxial. As a result, the FEM was used to determine the stress triaxiality in different geometries. The numerical model parameters employed in this study were calibrated using the experimentally obtained stress–strain data. The parameters were optimized to achieve the best agreement between the numerical predictions and the experimental observations. Incorporating the coupled damage formulation into the constitutive model enabled the simulation of the material softening behavior observed in the stress–strain response. The results indicate that the maximum strain is concentrated at the damage initiation site, confirming that fracture initiates in regions of peak strain concentration. Furthermore, the regions with the highest damage variable coincide with those exhibiting the largest equivalent plastic strain, demonstrating the consistency of the damage model with the underlying deformation mechanisms. Modifying the specimen geometry shifted the damage localization from the center of the standard dog-bone specimen to the vicinity of the elliptical holes, confirming the effectiveness of the proposed geometries in altering the stress path and generating different stress states. For the standard dog-bone specimen, fracture initiated at the center of the gauge section and subsequently propagated across the specimen width, a behavior that was accurately reproduced by the numerical simulations. In the M2 and M3 specimens, damage initiation occurred primarily around the curved regions, where stress concentration reached its maximum. Due to stress concentration in these regions, fracture was more likely to initiate there and subsequently propagate toward the outer edges of the specimens. Comparison of the numerical predictions with the experimentally observed fracture patterns demonstrates that the Ganjani model not only predicts the fracture strain with high accuracy but also successfully captures both the fracture initiation site and the subsequent crack propagation path. The excellent agreement between the predicted damage localization and the actual fracture locations validates the capability of the proposed model to reproduce ductile fracture behavior under different stress paths. The Figure 1 results indicate that fracture strain does not vary monotonically with stress triaxiality. Under negative stress triaxiality, fracture is predominantly governed by shear deformation,

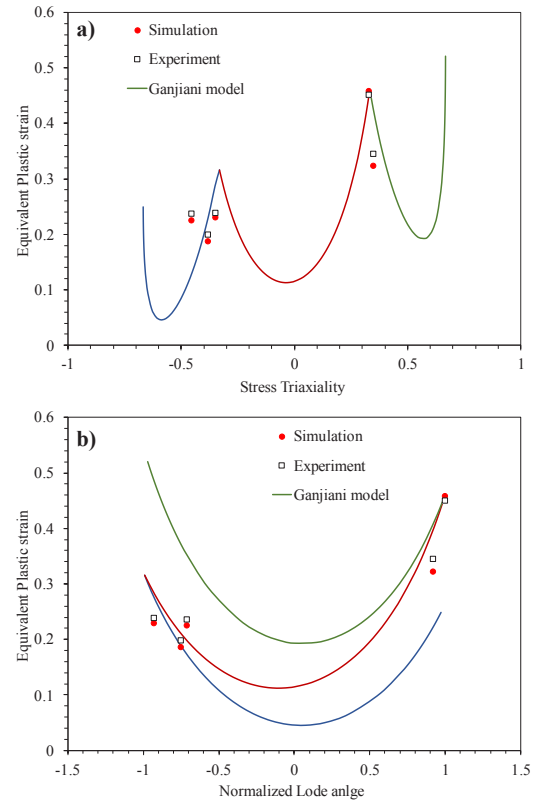


Fig. 1. Fracture strain with respect to different stress parameters, comparing experimental results and Ganjani model predictions: (a) stress triaxiality, (b) normalized Lode angle parameter.

whereas increasing stress triaxiality toward the tensile regime shifts the dominant fracture mechanism to void growth and coalescence. Consequently, within the transition region, fracture strain is simultaneously influenced by both shear-controlled and void-controlled mechanisms, resulting in a nonlinear response. This transition in the dominant fracture mechanism explains why fracture strain does not necessarily decrease with increasing absolute stress triaxiality.

4- Conclusion

This study employed a combined experimental and numerical approach to investigate the effects of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the ductile fracture behavior of ST-37 steel. Different specimen geometries were designed to enable the evaluation of negative stress triaxiality using conventional uniaxial tensile and compression tests, thereby eliminating the need for biaxial testing. Four specimen configurations were considered, including one standard dog-bone specimen and three rectangular specimens containing elliptical holes. The proposed specimen geometries covered a negative stress triaxiality range from -0.348 to -0.456 . Uniaxial tensile and compression experiments were

conducted, and the results were compared with finite element simulations. The Ganjiani fracture model was implemented in Abaqus through the VUHARD and VUSDFLD user subroutines to simulate the fracture behavior. A comparison between the experimental and simulated force–displacement curves demonstrated excellent agreement in predicting both the fracture strain and the maximum load. The damage contours obtained from the numerical simulations revealed that the highest damage values were concentrated in the regions adjacent to the curved sections of the specimens. Similarly, the strain contour distributions indicated that the maximum strain was localized in the same regions. The results showed that the fracture strain decreases with increasing positive stress triaxiality. Under negative stress triaxiality, the fracture strain initially decreases as the stress triaxiality approaches zero, but increases again with further reductions in stress triaxiality. Furthermore, the variation of fracture strain with respect to the normalized Lode angle parameter and the third stress invariant exhibited a consistent trend, with fracture strain increasing for both positive and negative values of the normalized Lode angle parameter and the third invariant.

References

- [1] P.W. Bridgman, *Studies in large plastic flow and fracture: with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure*, Harvard University Press, 1964.
- [2] Y. Bao, T. Wierzbicki, On the cut-off value of negative triaxiality for fracture, *Engineering fracture mechanics*, 72(7) (2005) 1049-1069.
- [3] P. Kubík, F. Šebek, J. Hůlka, J. Petruška, Calibration of ductile fracture criteria at negative stress triaxiality, *International Journal of Mechanical Sciences*, 108 (2016) 90-103.
- [4] Y. Lou, J.W. Yoon, H. Huh, Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for stress triaxiality, *International Journal of plasticity*, 54 (2014) 56-80.
- [5] M. Mansouri, M. Ganjiani, The effect of negative stress triaxiality and lode angle on ductile fracture of ST-37, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 56(9) (2024) 1303-1326 (in Persian).



کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل شکست نرم برای فولاد اس تی ۳۷- تحت حالت‌های مختلف تنش

محسن منصوری، سید مهدی گنجیانی * 

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

کلمات کلیدی:

کرنش شکست

تنش سه‌محوره منفی

پارامتر زاویه لود

رفتار شکست نرم

فولاد اس تی- ۳۷

خلاصه: اثرات تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود بر رفتار شکست نرم در فولاد اس تی- ۳۷ در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه شرایط تنش سه‌محوره منفی، آزمایش‌های کشش و فشار تک‌محوره بر روی نمونه‌هایی با هندسه‌های ویژه، شامل نمونه‌های دمبلی و نمونه‌های مستطیلی دارای سوراخ‌های منحنی بیضی، انجام شده است. مقادیر تنش سه‌محوره منفی در بازه ۰/۳۴۸- تا ۰/۴۵۶- ایجاد شدند. یک رویکرد ترکیبی تجربی- عددی برای تحلیل رفتار شکست به کار گرفته شد. در بخش عددی، مدل شکست گنجیانی با در نظر گرفتن پارامترهای آسیب در قالب شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از زیرروال‌های وی‌یوهارد و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی پیاده‌سازی شد. تحلیل مقایسه‌ای نتایج تجربی و عددی نشان‌دهنده تطابق مناسب در پیش‌بینی کرنش شکست است. ارزیابی عددی نشان داد که شکست در ناحیه‌ای رخ می‌دهد که بیشترین کرنش پلاستیک در آن متمرکز می‌شود. نتایج تأیید می‌کنند که تنش سه‌محوره تأثیر قابل توجهی بر شکست نرم دارد و همچنین مشاهده شد که تغییرات کرنش شکست تحت تنش سه‌محوره مثبت و منفی روندهای یکسانی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

تحقیقات گسترده‌ای بر بررسی شکست نرم در فلزات انجام شده و در نتیجه، مدل‌های متنوعی برای پیش‌بینی این نوع شکست توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به‌طور کلی در دو دسته مدل‌های شکست جفت‌نشده^۱ و جفت‌شده^۲ طبقه‌بندی کرد. در مدل‌های جفت‌شده، تکامل آسیب و رفتار پلاستیک به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی شده و اثر تجمع آسیب در طول تغییر شکل پلاستیک بر پاسخ مکانیکی ماده لحاظ می‌شود. در نتیجه، با پیشرفت آسیب مقاومت ماده به‌تدریج کاهش می‌یابد [۳]. در مقابل، در مدل‌های جفت‌نشده، تکامل آسیب مستقل از رفتار پلاستیک در نظر گرفته می‌شود و اثر آن تا لحظه وقوع شکست بر پاسخ تنش-کرنش اعمال نمی‌شود [۴]. اگرچه مدل‌های جفت‌شده توصیف واقع‌بینانه‌تری از سازوکارهای فیزیکی شکست نرم ارائه می‌دهند، اما استفاده از آن‌ها مستلزم تعیین پارامترهای مادی بیشتری است که شناسایی دقیق آن‌ها معمولاً دشوار بوده و علاوه بر آن، به دلیل جفت‌شدن رفتار پلاستیسیته و آسیب، هزینه محاسباتی بالاتری

فولاد اس تی- ۳۷ به عنوان یکی از پرکاربردترین فولادهای ساختمانی است و به دلیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف، از جمله ساخت‌وساز، تجهیزات صنعتی و قطعات ماشین‌آلات، برای این مطالعه انتخاب شد. این فولاد دارای شکل‌پذیری مناسب، قابلیت جوشکاری و ماشین‌کاری مطلوب بوده و به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین فولادهای کم‌کربن در کاربردهای مهندسی شناخته می‌شود. به‌همین دلیل، ارزیابی دقیق رفتار این فولاد تحت بارگذاری‌های پیچیده ضروری است. شکست نرم یکی از حالت‌های مهم شکست در فولادهای ساختمانی به شمار می‌رود که اغلب منجر به ایجاد ترک در اجزا یا اتصالات شده و می‌تواند فروپاشی کامل سازه‌های ساختمانی را در پی داشته باشد. از این‌رو، بررسی و تبیین سازوکار شکست نرم و همچنین ارائه رویکردهای عددی قابل اتکا برای شبیه‌سازی این نوع شکست در فولادهای ساختمانی امری ضروری است [۱، ۲].

1. Uncoupled
2. Coupled

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ganjiani@ut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



نسبت به مدل‌های جفت‌نشده دارند [۵، ۶].

به دلیل سادگی ساختاری، در سال‌های اخیر مدل‌های جفت‌نشده فراوانی مبتنی بر فرضیات و روش‌های تجربی مختلف توسعه یافته‌اند. فریدنثال^۱ [۷] نخستین مدل جفت‌نشده مبتنی بر انرژی را ارائه کرد و نشان داد که شکست نرم زمانی رخ می‌دهد که کار پلاستیک بر واحد حجم از یک مقدار بحرانی تجاوز کند. همچنین مشخص شد که آغاز شکست نرم معمولاً در ناحیه‌ای اتفاق می‌افتد که تحت بیشترین تنش اصلی قرار دارد. پس از آن، کاکرفت^۲ و لاتام^۳ مدلی که بر اساس معیار حداکثر تنش اصلی ارائه کردند [۸]. در مقایسه با مدل‌های جفت‌شده، مدل‌های جفت‌نشده به دلیل چارچوب ساده‌تر و سهولت تعیین پارامترهایشان، در صنعت کاربرد بیشتری یافته‌اند [۹]. یکی از مزایای کلیدی مدل‌های جفت‌نشده، فرآیند کالیبراسیون ساده‌تر آنهاست که امکان کالیبره‌سازی مستقل پاسخ پلاستیک و آسیب نرم را فراهم می‌کند.

شیک^۴ و همکاران [۱۰]، اثر اندازه را در رفتار شکست نرم آلیاژ آلومینیوم تی ۳۵۱، که از مواد کلیدی در صنایع هوافضا و خودروسازی است، بررسی کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از آزمون‌های کوچک‌مقیاس برای پیش‌بینی قابل‌اعتماد شکست استفاده کرد، به‌ویژه زمانی که نمونه‌های تمام‌مقیاس در دسترس نیستند. برای کالیبره‌سازی یک معیار پدیده‌شناختی شکست نرم، از آزمون‌های کشش کوچک‌مقیاس و پانچ کوچک استفاده شد و اثرات تنش سه‌محوره^۵ و زاویه لود^۶ در آن لحاظ گردید. نتایج نشان داد که اثر اندازه در شکست نرم قابل توجه نیست، زیرا نمونه‌های کوچک و استاندارد رفتار شکست مشابهی از نظر کرنش شکست و تنش سه‌محوره ارائه دادند. گنجیانی و همکاران [۱۱] ویژگی‌های شکست نرم آلیاژ برنج را تحت تنش سه‌محوره و زاویه‌های لود مختلف، که برای درک رفتار ماده تحت سناریوهای بارگذاری گوناگون اهمیت دارند، بررسی کردند. آنها از یک مدل جفت‌شده آسیب-پلاستیسیته که اثرات تنش سه‌محوره و زاویه لود را در برمی‌گیرد استفاده نمودند. رفتار شکست ماده با به‌کارگیری هندسه‌های مختلف نمونه تحلیل شد. نتایج نشان داد که میان مشاهدات آزمایشگاهی و خروجی‌های عددی همبستگی بالایی وجود دارد و مدل‌های شکست قادرند محل و کرنش آغاز شکست را با دقت پیش‌بینی کنند. این

مطالعه بر اهمیت تلفیق آسیب با پلاستیسیته در بهبود پیش‌بینی شکست نرم تأکید کرده و نقش اساسی تنش سه‌محوره و زاویه لود را در آغاز و پیشروی شکست برجسته می‌سازد.

تحقیقات آزمایشگاهی گسترده نشان داده است که تأثیر حالت تنش بر سازوکارهای شکست در مواد مختلف متفاوت است. بریجمن^۷ [۱۲] ویژگی‌های تغییر شکل و شکست میله‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از ۲۰ نوع فولاد نرم را تحت فشارهای هیدرواستاتیک در بازه ۰ تا ۲۷۰۰ مگاپاسکال بررسی کرد. وی مشاهده کرد که همه نمونه‌ها دچار شکست نمی‌شوند و نتیجه گرفت که وقوع شکست به‌شدت به فشار هیدرواستاتیک وابسته است. بائو^۸ و ویرزیکی^۹ [۱۳] یافته‌های بریجمن را مجدداً ارزیابی کرده و آزمایش‌های فشاری را بر روی استوانه‌های کوتاه با نسبت‌های ابعادی مختلف انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که محل شکست مستقل از نوع ماده است و مقدار آستانه‌ای ثابت برای تنش سه‌محوره برابر با ۰/۳۳- به دست آمد. ژنگ و همکاران [۱۴] آزمایش‌های فشاری را بر روی نمونه‌های لوله‌ای با دیواره نازک انجام دادند و برای اعتبارسنجی مدل تکامل آسیب خود، مقادیر تنش سه‌محوره منفی تا ۰/۱۴- را به دست آوردند. خان و ليو [۱۵] با استفاده از آزمایش‌های فشار دوماحوره بر روی آلیاژهای آلومینیوم، حداقل مقدار تنش سه‌محوره برابر با ۰/۴۹۶- را گزارش کردند که در آن همچنان شکست نرم رخ می‌داد. کویک^{۱۰} و همکاران [۴] طرح‌های جدیدی برای نمونه‌های آزمایش فشار تک‌محوره ارائه کردند. در این روش، نمونه‌های استوانه‌ای دارای فرورفتگی کروی امکان دستیابی به مقادیر تنش سه‌محوره منفی تا ۰/۴۷۳- را برای آلیاژهای آلومینیوم فراهم کردند. لو و همکاران [۱۶] نتایج آزمایش‌های فشار تک‌محوره و کرنش صفحه‌ای را با استفاده از دو هندسه متفاوت نمونه ارائه کردند تا اثر پارامتر لود بر مقدار آستانه تنش سه‌محوره بررسی شود. با این حال، این آزمایش‌ها تنها برای نمونه‌های ضخیم مناسب بودند و برای نمونه‌های تخت حاصل از ورق‌های نازک نیاز به روش‌های جایگزین وجود داشت. برونینگ^{۱۱} و همکاران [۱۷] با توسعه یک رویکرد آزمایشگاهی اصلاح‌شده به این مسئله پرداختند.

در شکست نرم مواد چندبلوری، جوانه‌زنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها سازوکارهای اصلی آسیب هستند و نرخ رشد حفره‌ها عمدتاً تحت تأثیر تنش سه‌محوره و کرنش پلاستیک معادل قرار دارد. با این حال، در شرایط

1. Freudenthal
2. Cockcroft
3. Latham
4. Šebek
5. Stress triaxiality
6. Lode angle

7. Bridgman
8. Bao
9. Wierzbicki
10. Kubik
11. Brünig

بارگذاری برشی محور، تنها تنش سه محوره برای توصیف کامل رفتار شکست کافی نیست و پارامتر زاویه لود نیز به عنوان یک شاخص مهم در تمایز میان حالات برشی مختلف، به ویژه در فرایند هم جوشی حفره ها و محلی شدن کرنش، نقش تعیین کننده ای دارد. نتایج این مطالعه مبتنی بر توموگرافی درجا در فولاد دوفازی نشان می دهد که در برش خالص و برش ساده، با وجود آن که تنش سه محوره و پارامتر زاویه لود هر دو می توانند نزدیک به صفر باشند، پاسخ مکانیکی و مسیر تکامل آسیب یکسان نیست و رفتار شکست به شدت به ریزساختار و مسیر بارگذاری وابسته است. بنابراین، برای مدل سازی دقیق شکست نرم، به ویژه در شرایط برشی و نزدیک به ناحیه هم جوشی، در نظر گرفتن هم زمان تنش سه محوره و زاویه لود ضروری است [۱۸]. کاپولا^۱ و همکاران نیز به بررسی اثر زاویه لود در توصیف کامل رفتار شکست پرداختند. آن ها مشاهده کردند که افزایش تنش سه محوره معمولاً به تشدید جوانه زنی، رشد و هم جوشی حفره ها و در نتیجه کاهش شکل پذیری منجر می شود. همچنین، اثر زاویه لود یا پارامتر مرتبط با آن نشان می دهد که مسیر تنش و سهم برش نیز در کنترل شکست نرم اهمیت دارد. نتایج آزمایش های کششی، پیچشی، پهن سازی و خمش همراه با شبیه سازی عددی نشان می دهد که برای پیش بینی دقیق تر شکست نرم، باید تنش سه محوره و پارامتر لود به صورت هم زمان در مدل های آسیب و شکست در نظر گرفته شوند [۱]. به همین دلیل مدلهایی که تنها بر اساس سه محوره تنش هستند، ممکن است دقت کافی برای پیش بینی رفتار شکست نرم ماده، به خصوص در سه محوره تنش منفی را نداشته باشند. یکی از شناخته شده ترین معیارها برای شکست نرم فلزات مدل جانسون-کوک^۲ است، اما این مدل عمدتاً بر پایه تنش سه محوره توسعه یافته و در شرایط تنش سه محوره پایین و به ویژه منفی، که در آن ها تنش های برشی و اثر زاویه لود نقش مهمی در آغاز شکست دارند، دقت محدودی دارد. در مقابل، مدل گنجیانی^۳ اثر هم زمان تنش سه محوره و زاویه لود را در پیش بینی کرنش شکست لحاظ می کند و به طور ویژه برای بهبود پیش بینی رفتار شکست در محدوده های تنش سه محوره منفی توسعه یافته است [۱۵].

منصوری و گنجیانی در پژوهش هایی به بررسی اثر تنش سه محوره منفی بر روی کرنش شکست و رفتار شکست نرم پرداختند. در ابتدا، رفتار شکست نرم فولاد اس تی-۳۷ تحت حالت های مختلف تنش بررسی شده است. برای ایجاد حالت های تنش متفاوت، از نمونه های کششی و فشاری

1. Coppola
2. Johnson-Cook
3. Ganjani's model

با سوارخ و انحنا استفاده شده که موجب ایجاد شرایط چندمحوره و تغییر در تنش سه محوره تحت آزمون تک محوره شد. نتایج نشان می دهد که آسیب در ناحیه انحنا متمرکز می شود و کرنش شکست به شدت به تنش سه محوره و زاویه لود است، به طوری که با تغییر این پارامترها، کرنش شکست نیز تغییر می یابد. این رفتار نشان می دهد که شکست نرم در فولاد اس تی-۳۷ به طور مستقیم تحت تأثیر حالت تنش و مسیر بارگذاری قرار دارد [۱۹]. در پژوهش های دیگری، رفتار شکست نرم در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی ۶ با تأکید بر نقش تنش سه محوره و پارامتر زاویه لود به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که کرنش شکست به شدت تابع حالت تنش بوده و در تنش سه محوره مثبت و منفی رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. در این مطالعه از نمونه های طراحی شده ی خاص در آزمون های کشش و فشار استفاده شده و با ایجاد تنش سه محوره منفی در بازه ی حدود ۰/۳۵۵- تا ۰/۵۵۴-، وابستگی شکست نرم به شرایط تنش مختلف ارزیابی شده است. همچنین، مدل شکست گنجیانی با استفاده از اجزای محدود پیاده سازی و با نتایج تجربی مقایسه شده که توافق مناسبی بین پیش بینی عددی و داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. این امر بیانگر نقش هم زمان تنش سه محوره و زاویه لود در کنترل آغاز آسیب، تمرکز کرنش پلاستیک و نهایتاً وقوع شکست نرم است [۲۰، ۲۱]. پیش بینی دقیق شکست نرم در کاربردهای مهندسی، یک نیاز صنعتی حیاتی محسوب می شود. تنش سه محوره نقش محوری در کنترل آغاز و پیشروی شکست نرم تحت شرایط پیچیده بارگذاری چندمحوره ایفا می کند. چنین توانایی پیش بینی برای بخش های گوناگون صنعتی ضروری است، از جمله طراحی ایمنی ضربه در سازه های خودرویی و ریلی [۲۲، ۲۳]، بهینه سازی وزن در قطعات هوافضا [۲۴]، جلوگیری از شکست در فرایندهای شکل دهی [۲۵]، [۲۶]، و ارزیابی یکپارچگی سازه ای خطوط لوله و مخازن تحت فشار [۲۷].

در پژوهش های پیشین این گروه، با استفاده از روش همبستگی تصویری دیجیتال^۴ کرنش شکست اس تی-۳۷ در تنش سه محوره مختلف بررسی و با روش عددی مطالعه شد. به منظور به دست آوردن نتایج عددی که با روش تجربی تطابق بهتری داشته باشد، در این مقاله از مدل گنجیانی استفاده شده است. در این پژوهش، آزمایش های کشش و فشار تک محوره بر روی اس تی-۳۷ تحت شرایط مختلف تنش سه محوره انجام شد. هندسه های مختلف نمونه، از جمله نمونه های دبل می و نمونه های مستطیلی دارای حفره بیضوی، طراحی گردید تا مقادیر گوناگون تنش سه محوره تولید شود. این

زیرا اطلاعاتی درباره شکل فضای تنش و نوع بارگذاری ارائه نمی‌دهد. با وجود نقش مهم تنش سه‌محوره در توصیف رفتار شکست، این پارامتر به‌تنهایی قادر به توصیف کامل حالت‌های مختلف تنش، به‌ویژه در شرایط برشی، نیست. از این‌رو، برای در نظر گرفتن تأثیر حالت تنش، زاویه لود بی‌بعد شده $\bar{\theta}$ نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مدل‌های شکست نرم معرفی می‌شود است که از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \left(\frac{27 J_3}{2 \bar{\sigma}^3} \right) \quad (4)$$

که J_3 نامتغیر سوم تنش است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$J_3 = \det(\boldsymbol{\sigma} - \sigma_m \mathbf{I}) \quad (5)$$

که σ تانسور تنش و $\mathbf{I}$ تانسور مرتبه دو همانی است. برای محاسبه کرنش شکست $\bar{\epsilon}_f$ و تعیین مقادیر متناظر تنش سه‌محوره و زاویه لود در لحظه آغاز شکست، از مدل شکست نرم گنجیانی [۱۵] استفاده شده است. این مدل اثر تنش سه‌محوره و زاویه لود را که از عوامل مهم و تأثیرگذار بر رفتار شکست نرم مواد هستند، در نظر می‌گیرد. معادله (۶) بیانگر مدل گنجیانی برای مواد نرم است.

$$\frac{\bar{\sigma}_f^{\text{ref}}}{\bar{\sigma}_f} = \frac{\sigma_0 + K (\bar{\epsilon}_f^{\text{ref}})^n}{\sigma_0 + K (\bar{\epsilon}_f)^n} = 1 + c_\eta (\eta - \eta^{\text{ref}}) - c_\theta (\theta - \theta^{\text{ref}})^2 \quad (6)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}_f^{\text{ref}}$ ، η^{ref} ، $\bar{\theta}^{\text{ref}}$ و $\bar{\epsilon}_f^{\text{ref}}$ به ترتیب تنش مؤثر در شروع شکست، تنش مؤثر مرجع، تنش سه‌محوره مرجع، زاویه لود مرجع و کرنش معادل مرجع هستند. دو پارامتر دیگر، c_η و c_θ ، به ترتیب حساسیت کرنش شکست نسبت به تنش سه‌محوره و زاویه لود را نشان می‌دهند. این ضرایب امکان تنظیم مدل را مطابق با پاسخ مکانیکی ویژه ماده تحت شرایط مختلف بارگذاری فراهم می‌کنند. فرم نهایی مدل نیز به صورت زیر ارائه می‌شود.

طرح‌ها امکان دستیابی به سه‌محوره‌های منفی را تنها با آزمایش تک‌محوره فراهم کردند. آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۱ مدل‌سازی شدند و از مدل شکست گنجیانی در تحلیل عددی بهره گرفته شد. برای اعمال رفتار شکست ماده در مدل گنجیانی، زیرروال‌های وی‌یوهارد^۲ و وی‌یواس‌دی‌افال‌دی^۳ به‌کار گرفته شدند. کرنش شکست در شرایط مختلف تنش سه‌محوره و زاویه لود، هم به‌صورت تجربی و هم عددی اندازه‌گیری شد که امکان تحلیل جامع ویژگی‌های شکست نرم آلومینیوم را فراهم کرد.

۲- الگوسازی نظری، تجربی و عددی

۲-۱- معادلات حاکم

در این مطالعه، برای مدل‌سازی رفتار شکست فولاد اس‌تی-۳۷ از قانون سخت‌شوندگی توانی مطابق معادله زیر استفاده شده است [۱۱].

$$\bar{\sigma} = (1 - D)(\sigma_0 + K \bar{\epsilon}^n) \quad (1)$$

در این معادله، $\bar{\sigma}$ بیانگر تنش مؤثر (وون‌میزز)، σ_0 تنش تسلیم، $\bar{\epsilon}$ کرنش پلاستیک معادل، K ضریب سخت‌شوندگی، n توان سخت‌شوندگی و D پارامتر آسیب است. از آنجا که پارامتر آسیب در معادله (۱) وارد شده، این مدل در گروه مدل‌های آسیب جفت‌شده قرار می‌گیرد. در صورتی که اثر آسیب در معادله (۱) لحاظ نشود، مدل به صورت جفت‌نشده در نظر گرفته می‌شود. تنش سه‌محوره توسط تقسیم تنش هیدرواستاتیک σ_m به تنش مؤثر $\bar{\sigma}$ تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3\bar{\sigma}} \quad (2)$$

که در آن

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right] \quad (3)$$

تنش مؤثر $\bar{\sigma}$ به‌تنهایی برای توصیف کامل حالت تنش کافی نیست،

1. Abaqus
2. VUHard
3. VUSDFLD

آسیب به‌طور هم‌زمان در تحلیل لحاظ شود و پیش‌بینی واقع‌بینانه‌تری از رفتار ماده تا لحظه شکست حاصل گردد. در این مدل فرض می‌شود که آغاز آسیب می‌تواند هم‌زمان با شروع تغییر شکل ماده رخ دهد.

$$\Delta D = \beta m \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \right)^{m-1} \left\{ 1 - \tanh^2 \left[\beta \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \right)^m \right] \right\} \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \quad (۸)$$

معادله حاکم بر تکامل آسیب، روند پیشرفت تدریجی آسیب در مواد شکل‌پذیر را در طول تغییر شکل پلاستیک توصیف می‌کند. در این معادله، با در نظر گرفتن هم‌زمان کرنش پلاستیک و حالت تنش، شرایط آغاز و تکامل آسیب تا وقوع شکست مدل‌سازی می‌شود. بر این اساس، تغییرات مقاومت ماده در حین بارگذاری نیز قابل پیش‌بینی خواهد بود. علاوه بر این، با اعمال برخی فرض‌های ساده‌کننده بر معادله (۸) می‌توان یک بیان تحلیلی ساده‌تر برای معیار آغاز آسیب به‌دست آورد که در آن کرنش شکست مستقل از حالت تنش در نظر گرفته می‌شود.

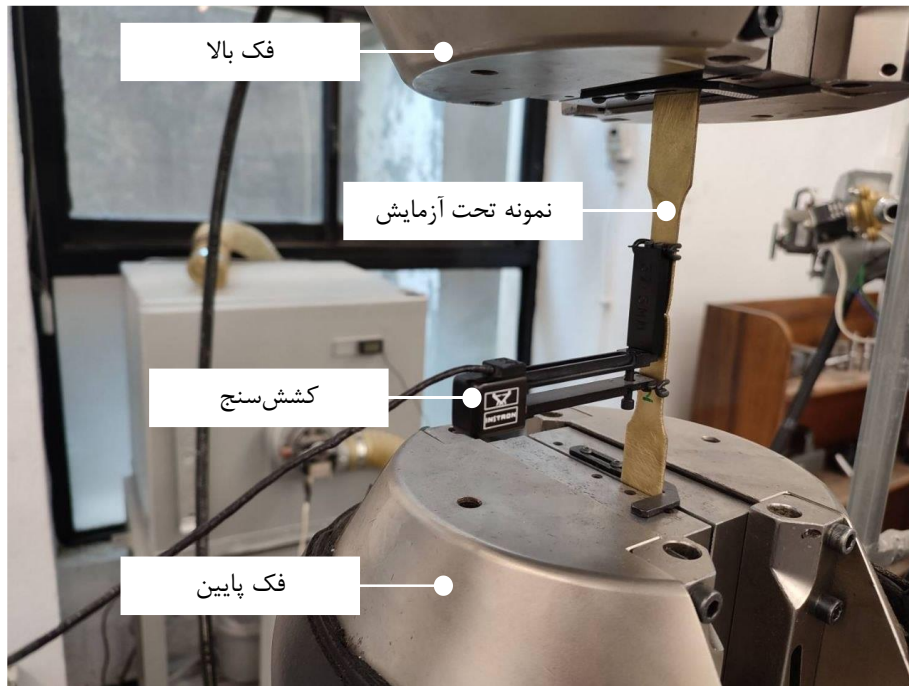
$$D = \tanh \left[\beta \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \right)^m \right] \quad (۹)$$

در معادله (۹)، پارامترهای m و β به ترتیب نمای آسیب و ضریب آسیب را نشان می‌دهند. این پارامترها روند تکامل آسیب در مواد نرم را کنترل می‌کنند، به‌طوری که m بر سرعت افزایش آسیب با کرنش و β بر نقطه آغاز نرم‌شدن برای یک کرنش معین تأثیر می‌گذارد. این تابع نقش مهمی در شبیه‌سازی گذار تدریجی و واقع‌بینانه از حالت بدون آسیب به شکست نهایی ماده ایفا می‌کند. در شرایط بارگذاری غیرتناسبی، که در آن حالت تنش در طول مسیر بارگذاری به‌طور پیوسته تغییر می‌کند، استفاده از رویکرد افزایشی برای محاسبه متغیر آسیب امکان لحاظ کردن این تغییرات و اثرات غیرخطی ناشی از تکامل آسیب بر رفتار پلاستیک را فراهم می‌سازد. به‌ویژه در نواحی با تمرکز شدید تغییر شکل مانند ناحیه گلوئی، که تغییرات حالت تنش بسیار سریع و غیر یکنواخت است، انجام انتگرال‌گیری تحلیلی از رابطه تکامل آسیب در معادله (۸) عملاً امکان‌پذیر نیست. ازاین‌رو، مقدار به‌روز شده پارامتر آسیب، D_{n+1} ، به‌صورت عددی و از طریق جمع افزایشی آسیب در هر گام بارگذاری بر مقدار قبلی، D_n ، محاسبه می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_f = \left\{ \left[\frac{\sigma_0}{K} + (\bar{\varepsilon}_f^{ref})^n \right] \times \left[1 + c_\eta (\eta - \eta^{ref}) - c_\theta (\bar{\theta} - \bar{\theta}^{ref})^2 \right]^{-1} - \frac{\sigma_0}{K} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (۷)$$

مدل گنجیانی بر پایه ویژگی‌های سخت‌شوندگی ماده بنا شده است که به‌صورت رابطه توانی بیان می‌شود. این وابستگی در قسمت اول معادله (۷) نشان داده شده است. علاوه بر این، مدل ارتباط بین کرنش شکست ($\bar{\varepsilon}_f$) و حالت تنش، شامل تنش سه‌محوره η و زاویه لود $\bar{\theta}$ را نسبت به یک آزمون مرجع مشخص تعریف می‌کند. بخش دوم معادله، کرنش شکست را بر اساس اختلاف بین حالت تنش فعلی (η ، $\bar{\theta}$) و حالت مرجع (η^{ref})، $\bar{\theta}^{ref}$ ، تنظیم می‌کند. این مدل به‌طور ویژه طراحی شده تا پیش‌بینی شکست را در بازه گسترده‌ای از تنش سه‌محوره، از جمله مقادیر منفی (شرایط مسلط بر برش) بهبود بخشد، شرایطی که در آن مدل‌های معمول از دقت کافی برخوردار نیستند.

مدل شکست گنجیانی برای پیش‌بینی کرنش شکست و توصیف رفتار تنش-کرنش مواد شکل‌پذیر تا لحظه شکست توسعه یافته است. در این مدل، مفهوم آسیب به‌منظور توصیف کاهش تدریجی مقاومت ماده در فرآیند تغییر شکل در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند به دو صورت جفت‌شده و جفت‌نشده با رفتار پلاستیسیته مدل‌سازی شود. در رویکرد جفت‌شده آسیب-پلاستیسیته، تکامل آسیب و تغییر شکل پلاستیک به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. ازاین‌رو، حالت تنش تأثیر مستقیمی بر هر دو پدیده تغییر شکل پلاستیک و رشد آسیب، به‌ویژه پس از آغاز گلوئی شدن، دارد. اگرچه این رویکرد فرآیند تعیین دقیق حالت تنش در لحظه آغاز شکست را پیچیده‌تر می‌کند، اما در مقایسه با مدل‌های جفت‌نشده، توصیف واقع‌بینانه‌تری از رفتار نرم‌شوندگی و روند گسترش آسیب ارائه می‌دهد. در مقابل، در مدل‌های جفت‌نشده، اثر متقابل میان تغییر شکل پلاستیک و تکامل آسیب در نظر گرفته نمی‌شود. به‌عبارت دیگر، رشد آسیب تأثیری بر پاسخ تنش-کرنش ماده ندارد. در نتیجه، این مدل‌ها معمولاً قادر به بازتولید مناسب رفتار نرم‌شوندگی پس از آغاز آسیب نیستند و ممکن است استحکام ماده را بیش‌برآورد کرده یا وقوع شکست را در کرنش‌هایی بزرگ‌تر از مقادیر واقعی پیش‌بینی کنند، به‌ویژه در موادی مانند فولاد اس‌تی-۳۷ که پیش از شکست، نرم‌شوندگی قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر از مدل آسیب جفت‌شده استفاده شده است تا اثر متقابل تغییر شکل پلاستیک و تکامل



شکل ۱. تصویر دستگاه آزمون تجربی به همراه اجزا آن.

Fig. 1. Experimental testing setup and its main components.

کششی و فشاری بر روی این نوع فولاد در دانشگاه تهران انجام شد. آزمایش‌ها در دمای محیط و تحت بارگذاری شبه‌استاتیک صورت گرفتند. شکل ۱ تصویر دستگاه کشش به همراه اجزا آن نشان داده شده است. پژوهش تست‌های کششی روی نمونه‌های دمبلی و همچنین نمونه ۱ام انجام شدند، در حالی که آزمون‌های فشاری روی نمونه‌های ۱ام، ۲ام و ۳ام اجرا گردید. نمونه‌های ۱ام تحت بار کششی با عنوان ۱ام-تی شناخته می‌شوند و نمونه‌های ۱ام تا ۳ام تحت بار فشاری با نام‌های ۱ام-سی تا ۳ام-سی مشخص شده‌اند.

آزمون کشش نمونه دمبلی شکل مطابق با استاندارد دین ۵۰۱۲۵^۱ انجام شد. نمونه‌های ۱ام، ۲ام و ۳ام دارای هندسه مستطیلی با سوراخ بیضی شکل هستند که به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا امکان بررسی اثر سه‌محوره‌های تنش مختلف را در قالب آزمون کشش تک‌محوره فراهم آورند. به همین دلیل، هنوز استاندارد آزمون برای آن‌ها وجود ندارد و اعتبارسنجی طراحی آن‌ها از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شده است. آزمایش‌های تک‌محوره با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال اینسترون ۸۵۰۲^۲ با ظرفیت بار ۲۵۰

این مدل‌ها در چارچوب روش اجزای محدود پیاده‌سازی شده و از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند. در این تحلیل، از زیرروال‌های وی‌یوهارد و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. زیرروال وی‌یوهارد امکان اعمال مدل گنجیانی همراه با مدل آسیب را فراهم می‌کند. برای تعریف دقیق مدل، لازم است مشتق تنش تسلیم نسبت به کرنش پلاستیک معادل مطابق معادله (۱۰) در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} &= Kn\bar{\epsilon}^{n-1}(1-D) - \frac{dD}{d\bar{\epsilon}}(\sigma_0 + K\bar{\epsilon}^n) \\ &= Kn\bar{\epsilon}^{n-1}(1-D) - \beta m \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)^{m-1} \\ &\quad \times \left\{ 1 - \tanh^2 \left[\beta \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)^m \right] \right\} \frac{\sigma_0 + K\bar{\epsilon}^n}{\bar{\epsilon}_f} \end{aligned} \quad (10)$$

۲-۲- تحلیل تجربی

به منظور مطالعه ویژگی‌های شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷، آزمون‌های

1. DIN 50125
2. Instron 8502

هشت‌گرای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته^۵ ایجاد شد. این المان‌ها به دلیل کارایی محاسباتی مناسب و توانایی مطلوب در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مواد، پلاستیسیته، تماس و تغییر شکل‌های بزرگ، برای تحلیل حاضر انتخاب شدند. همچنین، به منظور افزایش دقت پیش‌بینی میدان تنش، کرنش و آغاز آسیب، شبکه‌بندی در ناحیه بحرانی نمونه‌ها به صورت موضعی ریزتر در نظر گرفته شد. شکل ۳ مش استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

این بخش به بررسی تنش سه‌محوره، کالیبراسیون مدل و اعتبارسنجی آزمایشگاهی می‌پردازد. ابتدا کرنش شکست نمونه‌ها تحت شرایط مختلف بارگذاری و سطوح گوناگون تنش سه‌محوره توضیح داده می‌شود. سپس پارامترهای مدل گنجیانی تنظیم می‌شوند تا پیش‌بینی رفتار ماده با دقت مناسب انجام گیرد. در پایان، نتایج مدل با داده‌های آزمایشی مقایسه می‌شوند تا میزان قابلیت اعتماد و دقت مدل ارزیابی شود.

۳-۱- تنش سه محوره منفی

با توجه به اینکه در نمونه دمبل تحت آزمون کشش، حالت تنش همچنان یک‌محوره باقی می‌ماند، مقدار تنش سه‌محوره طبق معادله (۲) برابر با $0/33$ است. با این حال، بررسی رفتار شکست در دامنه وسیع‌تری از مقادیر تنش سه‌محوره معمولاً مستلزم انجام آزمون‌های چندمحوره است. اجرای این آزمون‌ها به تجهیزات تخصصی، آماده‌سازی دقیق نمونه، هم‌محوری مناسب نمونه و فک‌ها و همچنین تحلیل پیچیده‌تر نتایج نیاز دارد. به منظور اجتناب از این محدودیت‌ها، در پژوهش حاضر هندسه نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شد که با ایجاد تغییرات هندسی، از جمله انحنا و حفره، حالت تنش از تک‌محوره به چندمحوره تغییر یابد. در این شرایط، به دلیل پیچیدگی میدان تنش، معادله (۲) دیگر قابلیت محاسبه مستقیم تنش سه‌محوره را ندارد و تعیین این پارامتر با استفاده از تحلیل اجزای محدود انجام شد. بنابراین، استفاده از هندسه‌های ویژه در کنار آزمون‌های کشش و فشار تک‌محوره، روشی عملی و کارآمد برای ایجاد دامنه گسترده‌ای از مقادیر تنش سه‌محوره، به‌ویژه در ناحیه منفی، فراهم می‌کند.

از آنجا که در این هندسه‌ها حالت تنش همزمان با تغییر شکل پلاستیک تکامل می‌یابد، مقدار متوسط تنش سه‌محوره طی فرآیند تغییر شکل ملاک قرار داده شد. در رویکرد عددی، خواص ماده الاستوپلاستیک مطابق بخش شبیه‌سازی تعریف و بارگذاری اعمال شد. مقادیر تنش سه‌محوره مستقیماً

5. C3D8R

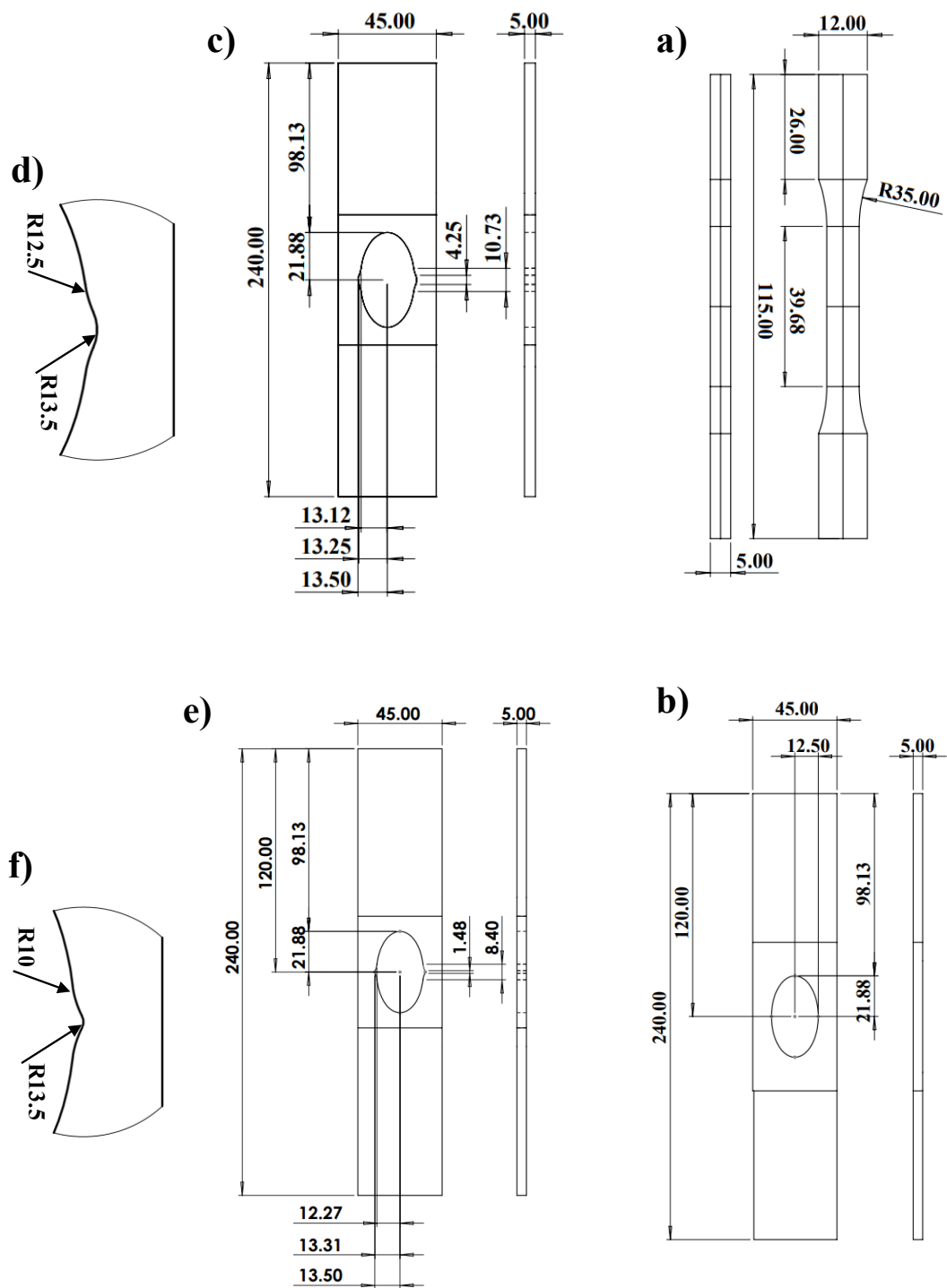
کیلونیوتن انجام شد. نرخ بارگذاری برابر ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. داده‌های نیرو جابجایی به‌طور هم‌زمان توسط دستگاه تست و یک سیستم اندازه‌گیری نوری ثبت گردید. از کشش‌سنج^۱ برای اعتبارسنجی ناحیه الاستیک استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری کرنش، از روش همبستگی تصویری دیجیتال به‌کار گرفته شد. برای انجام این کار، ابتدا سطح نمونه با رنگ سفید اسپری و سپس یک الگوی لکه‌های سیاه بر روی آن ایجاد شد. سپس الگوی نامنظم توسط دوربین سی‌ام‌اواس^۲ مدل کیواچ‌وای ۴۱۰ سی^۳ ثبت شد. تصاویر به‌دست‌آمده از روش همبستگی تصویری دیجیتال، توسط نرم‌افزار منبع باز ان‌کر^۴ تحلیل شدند و جابجایی و کرنش برای آزمون‌های مختلف از تصاویر ثبت‌شده، به دست آمد.

به‌منظور بررسی رفتار شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷ تحت شرایط مختلف تنش سه‌محوره تنش و زاویه لود، آزمایش‌های مکانیکی بر روی چهار هندسه متفاوت از نمونه‌ها انجام شد. با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر بررسی رفتار ماده در محدوده تنش سه‌محوره منفی است، هندسه نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شدند که امکان ایجاد این شرایط تنشی را در هر دو حالت بارگذاری کششی و فشاری فراهم کنند. اگرچه آزمون‌های کششی و فشاری به‌طور ذاتی موجب ایجاد حالت تنش تک‌محوره می‌شوند، اعمال تغییرات هندسی مناسب در نمونه‌ها، مانند ایجاد انحنا و حفره، سبب تغییر توزیع تنش و ایجاد حالت‌های تنش چندمحوره می‌شود. بر این اساس، نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به‌صورت صفحات مستطیلی با یک حفره بیضوی در مرکز طراحی شدند تا شرایط تنشی مورد نظر در ناحیه بحرانی نمونه ایجاد شود. این نمونه‌های مستطیلی دارای طول ۲۰۴ میلی‌متر و عرض ۴۵ میلی‌متر هستند و سوراخ بیضوی آن‌ها دارای شعاع‌های $21/875$ و $13/5$ میلی‌متر است. در نمونه‌های ام ۲ و ام ۳ دو انحنای اضافی با شعاع‌های متفاوت در راستای محور کوچک سوراخ بیضوی ایجاد شده است. ضخامت تمامی نمونه‌ها ۵ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۳- تحلیل عددی

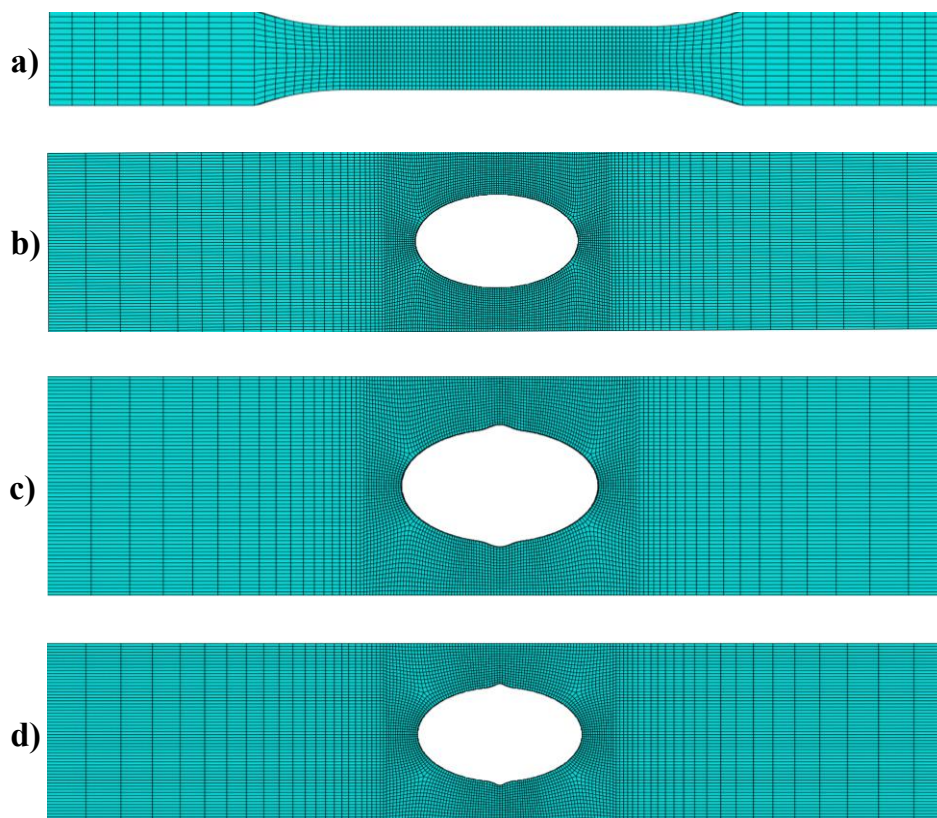
شبیه‌سازی عددی تمامی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد و مقادیر سه‌محوری تنش، زاویه لود و کرنش شکست برای هر نمونه استخراج گردید. مدل اجزای محدود با استفاده از المان‌های

1. Extensometer
2. CMOS
3. QHY410C
4. Ncorr



شکل ۲. مدل هندسی نمونه‌ها الف) دمبلی، ب) ام ۱، ج) ام ۲ و د) ام ۳.

Fig. 2. The geometric models of the specimens a) a dog-bone specimen, b) an M1 specimen, c) an M2 specimen, d) an M3 specimen, e) the curvature of the M2 specimen, and f) the curvature of the M3 specimen



شکل ۳. مش استفاده شده برای نمونه الف (دمبلی، ب) ام ۱، ج) ام ۲ و د) ام ۳.

Fig. 3. The mesh used for different specimens: (a) dog-bone, (b) M1, (c) M2, (d) M3.

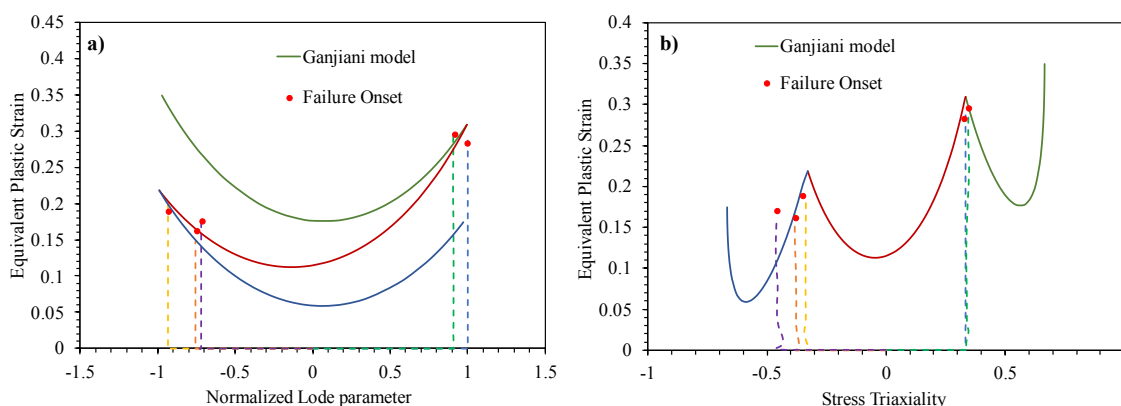
تعیین گردیدند و در مدل شکست گنجیانی به کار گرفته شدند. داده‌های آزمون نمونه دمبلی شکل به عنوان مبنای کالیبراسیون این پارامترهای مرجع استفاده شد. به منظور انطباق پوش شکست با نقاط کالیبراسیون، پارامترهای تکمیلی مدل یعنی C_θ و C_η از طریق برازش منحنی تخمین زده شدند.

ادغام مدل سخت‌شوندگی جفت‌شده در روابط ساختاری، امکان مدل‌سازی رفتار نرم‌شوندگی در منحنی تنش-کرنش را فراهم می‌کند. قانون تکامل آسیب، مطابق معادله (۸)، دو پارامتر کلیدی را معرفی می‌کند که رفتار تنش-کرنش را کنترل می‌نمایند. با تنظیم این پارامترها، می‌توان مدل را به‌خوبی با نتایج تجربی منطبق کرد. پارامتر m سرعت تجمع آسیب را کنترل می‌کند و در نتیجه بر شیب ناحیه نرم‌شوندگی در منحنی تنش-کرنش اثر می‌گذارد، در حالی که پارامتر β دامنه آسیب و زمان شروع نرم‌شوندگی را تعیین می‌کند. برای توصیف دقیق ناحیه گلوئی، ضریب آسیب و توان آسیب به‌گونه‌ای بهینه شدند که ناحیه نرم‌شوندگی به‌درستی بازنمایی شود و مقادیر آن‌ها مطابق توصیه مرجع [۱۱] انتخاب گردید. در پاسخ نیرو-جابجایی،

از خروجی‌های مدل اجزای محدود استخراج گردید. برای هر نمونه، مقدار تنش سه‌محوره با میانگین‌گیری از مقادیر المان‌ها در ناحیه موردنظر محاسبه شد. تکامل تنش سه‌محوره در طول تاریخچه بارگذاری ردیابی گردید و مقدار متناظر با ناحیه پایدار به عنوان تنش سه‌محوره نماینده برای آن نمونه انتخاب شد.

۳-۲- کالیبراسیون پارامترهای مدل

پارامترهای مدل عددی مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی تنش-کرنش به دست آمده‌اند. این پارامترها به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که بهترین انطباق بین داده‌های عددی و تجربی حاصل گردد. پارامترهای σ_0 ، K و n از طریق تحلیل داده‌های تنش-کرنش بدون در نظر گرفتن اثر آسیب شناسایی شدند. سپس سه‌محوره تنش، زاویه لود و کرنش شکست متناظر با لحظه شروع آسیب، به ترتیب به عنوان سه‌محوره تنش مرجع η^{ref} ، زاویه لود مرجع θ^{ref} و کرنش معادل مرجع $\bar{\epsilon}_f^{\text{ref}}$



شکل ۴. کرنش شکست نمونه‌های مختلف به دست آمده از مدل گنجیانی و وابستگی آن به: الف) پارامتر لود، ب) تنش سه محوره.

Fig. 4. Failure strain of different specimens obtained from Ganjiani model and its dependency on: (a) Lode parameter and (b) stress triaxiality.

جدول ۱. پارامترهای مدل گنجیانی به کاررفته برای پیش‌بینی شکست نرم.

Table 1. Parameters of the Ganjiani model employed for ductile fracture prediction.

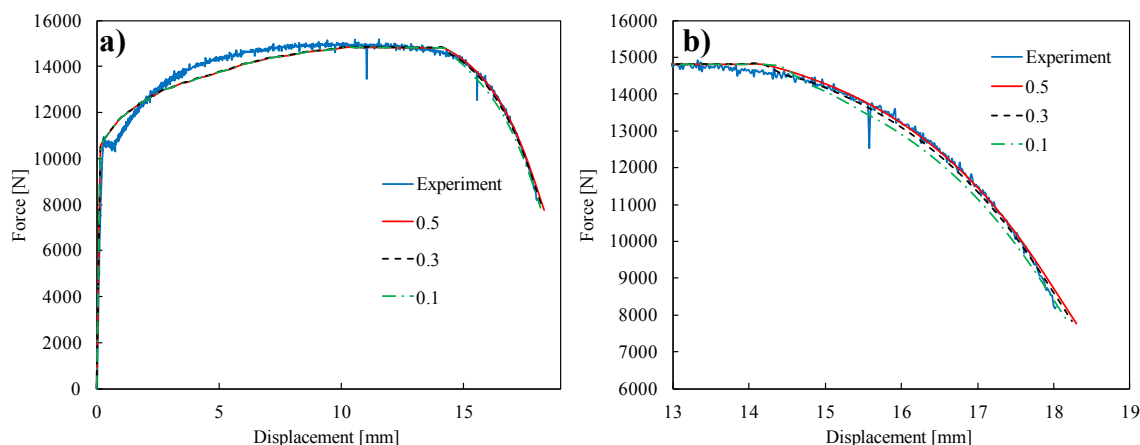
m	β	c_n	c_n	$\bar{\epsilon}_f^{ref}$	θ^{ref}	η^{ref}
۰/۴	۰/۰۵	۰/۱۵۵	-۰/۱۲	۰/۲۸۲	۱	۰/۳۳۳

را ارائه می‌کند و ثابت‌های کالیبره شده متناظر در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. این نکته حائز اهمیت است که پارامترهای مدل در این پژوهش با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از نمونه‌های مورد بررسی و در محدوده تنش سه محوره ایجاد شده توسط این نمونه‌ها کالیبره و اعتبارسنجی شده‌اند. در خارج از این محدوده، مدل قابلیت پیش‌بینی رفتار ماده در مقادیر بالاتر یا پایین‌تر تنش سه محوره را نیز دارد، اما در این پژوهش داده‌های تجربی مستقلی برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌ها خارج از محدوده استفاده نشده است.

۳-۳- مقایسه نتایج

تحلیل منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل ۶ مقایسه‌ای بین پیش‌بینی‌های مدل شکست نرم گنجیانی و داده‌های آزمایشگاهی متناظر ارائه می‌دهد. به طور کلی، تمامی نمونه‌ها در این مقایسه تطابق مناسبی

شروع آسیب که به عنوان کرنش شکست شناخته می‌شود، با واگرایی یا کاهش نیرو مشخص می‌گردد و نشان‌دهنده آغاز تخریب ماده است. پس از رسیدن کرنش پلاستیک معادل به مقدار کرنش شکست پیش‌بینی شده توسط مدل گنجیانی، فرآیند گسترش آسیب آغاز می‌شود و متغیر آسیب D به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. با رشد آسیب و هنگامی که مقدار D به مقدار بحرانی تعیین شده در مدل برسد، المان از تحلیل حذف می‌شود. در نتیجه، حذف تدریجی المان‌ها امکان شبیه‌سازی گسترش ناحیه آسیب و توسعه مسیر شکست را فراهم می‌کند. در این حالت، افزایش سریع پارامتر آسیب همراه با افت قابل ملاحظه نیرو مشاهده شد که حاکی از باریک و موضعی بودن ناحیه گلوئی و شکل‌گیری تقریباً هم‌زمان آن با شروع آسیب است. کرنش شکست با مقایسه دقیق شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی به صورت دقیق تعیین شد. بررسی مکان‌های کرنش شکست، همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، پیش‌بینی‌های مدل گنجیانی



شکل ۵. تحلیل همگرایی شبکه با سه اندازه مختلف المان

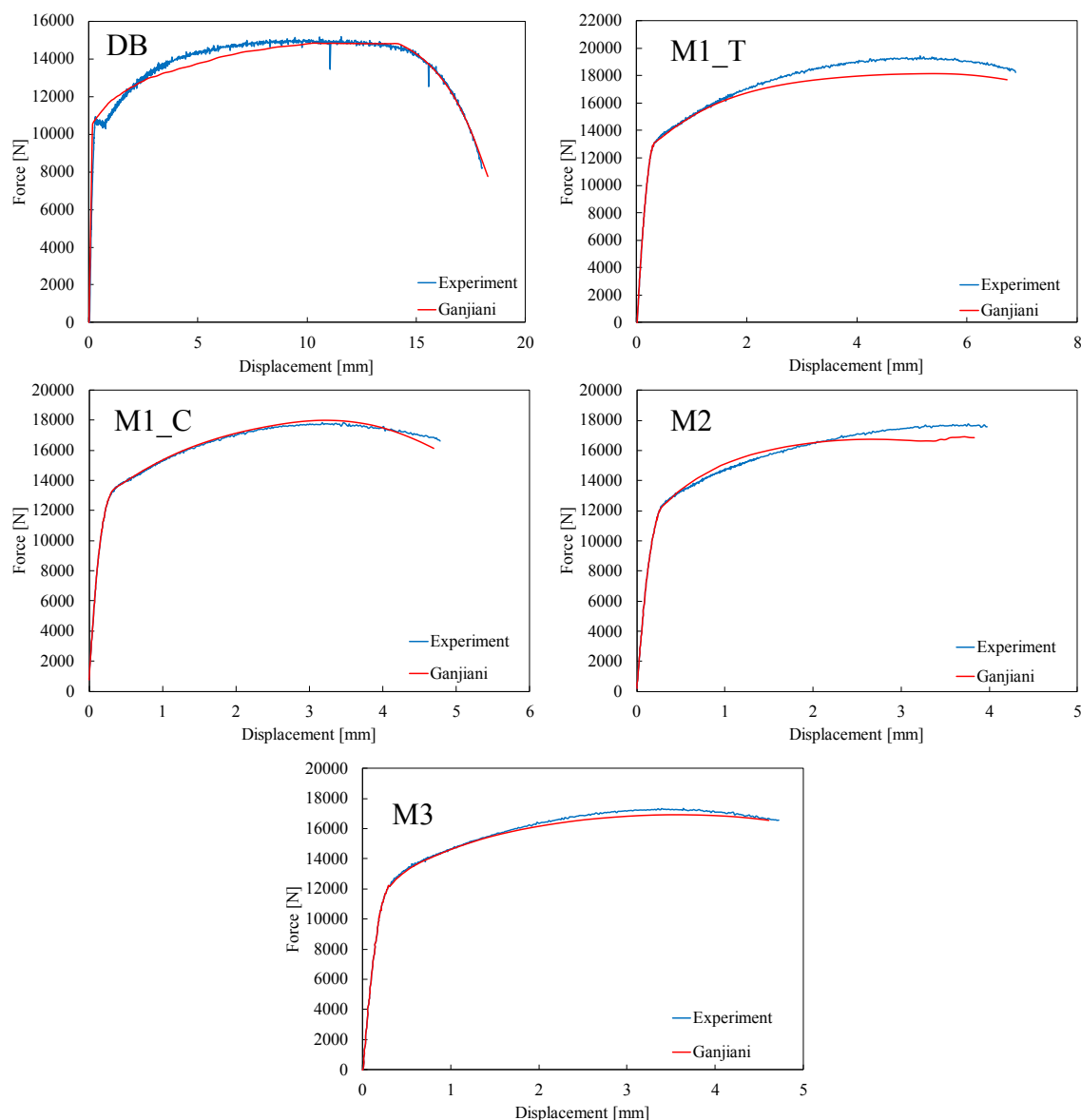
Fig. 5. Convergence analysis using four element sizes to ensure sufficient mesh refinement.

در نتیجه، نقطه شکست در این منحنی‌ها بیشترین مقدار نیرو است که در آن شیب منحنی به صفر می‌رسد و آغاز شکست ماده را نشان می‌دهد.

بررسی کانتورهای آسیب و توزیع متناظر کرنش شکست، همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، پیش‌بینی‌های مدل گنجیانی را برجسته می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه کرنش در محل آغاز آسیب متمرکز می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که ناحیه شروع شکست با تمرکز کرنش بیشینه همراه بوده و به‌عنوان محل اولیه تخریب ماده عمل می‌کند. همچنین، نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که نواحی دارای بیشترین مقدار متغیر آسیب با نواحی تمرکز کرنش پلاستیک معادل منطبق هستند که بیانگر سازگاری مدل آسیب با مکانیزم تغییر شکل ماده است. علاوه بر این، با تغییر هندسه نمونه‌ها، محل تمرکز آسیب از ناحیه مرکزی نمونه دمبلی به اطراف حفره‌های بیضوی منتقل می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر موفق هندسه‌های طراحی‌شده بر تغییر مسیر تنش و ایجاد شرایط تنشی متفاوت است.

تصاویر شکست حاصل از آزمایش و همچنین نتایج عددی در شکل ۸ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در نمونه دمبلی، شکست از ناحیه میانی نمونه آغاز شده و سپس در عرض نمونه گسترش می‌یابد. مدل‌های عددی نیز این رفتارها را تأیید کرده‌اند. در نمونه‌های ام ۲ و ام ۳، شروع آسیب عمدتاً در نواحی اطراف انحنای رخ می‌دهد، جایی که تمرکز تنش به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به دلیل مقادیر بالای تمرکز تنش در این نواحی، شکست با احتمال بیشتری در همان مناطق اتفاق می‌افتد. پس از آغاز آسیب در این نواحی، گسترش آسیب به سمت لبه بیرونی نمونه ادامه می‌یابد. علاوه

برین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهند. در آزمون‌های کششی، لحظه شکست بر اساس افت ناگهانی نیروی ثبت‌شده پس از رسیدن به بیشینه بار و گسیختگی نمونه تعیین شد. در مقابل، در آزمون‌های فشاری به دلیل احتمال وقوع کماتش در تغییر شکل‌های بزرگ، آزمون پیش از رسیدن به ناحیه کماتش متوقف شد تا حالت تنش مورد نظر حفظ شده و نتایج تحت تأثیر ناپایداری هندسی قرار نگیرد. به‌منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه المان، تحلیل همگرایی شبکه با استفاده از سه اندازه مختلف المان در شکل ۵ انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، اندازه المان انتخاب‌شده از دقت کافی برخوردار بوده و کاهش بیشتر اندازه المان تأثیر محسوسی بر نتایج شبیه‌سازی نداشت. نتایج این تحلیل در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، کرنش معادل شکست، تنش سه‌محوره و زاویه لود متناظر با آغاز ناحیه شکست استخراج شده‌اند. این داده‌ها برای مدل گنجیانی در ارائه شده‌اند. سازگاری پیش‌بینی‌های مدل نشان می‌دهد که ارزیابی آن از ویژگی‌های شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷ تحت حالات مختلف تنش قابل اعتماد و پایدار است. علاوه بر این، توافق قوی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کارایی مدل را نشان داده و اعتماد به توانایی آن در پیش‌بینی رفتار ماده در شرایط واقعی را افزایش می‌دهد. منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌های دمبلی و همچنین نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، در طول فرآیند تغییر شکل روندی نزولی از خود نشان می‌دهند. این الگو بیانگر آن است که ماده در اثر افزایش تدریجی کرنش دچار سخت‌شوندگی شده تا زمانی که به بیشینه نیرو برسد و پس از آن وارد مرحله نرم‌شوندگی می‌شود.

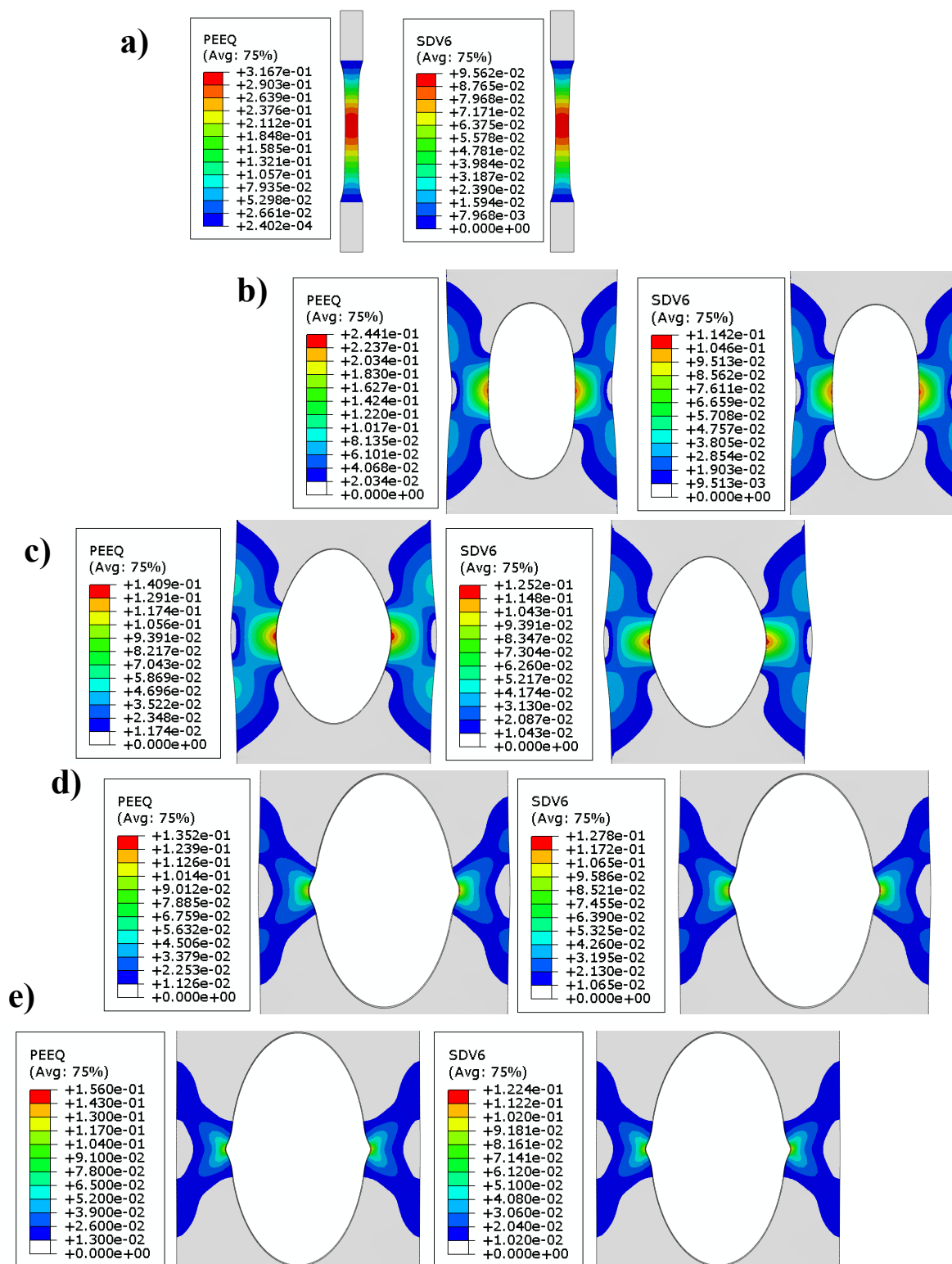


شکل ۶. منحنی‌های بار جابجایی نمونه‌های مختلف حاصل از آزمون‌های تجربی و پیش‌بینی‌های مدل گنججانی: الف) نمونه دمبلی، ب) ام ۱-تی، ج) ام ۱-سی، د) ام ۲، ه) ام ۳.

Fig. 6. Load-displacement curves for various specimens from experimental tests and Ganjiani model predictions: (a) dog-bone, (b) M1_T, (c) M1_C, (d) M2, (e) M3

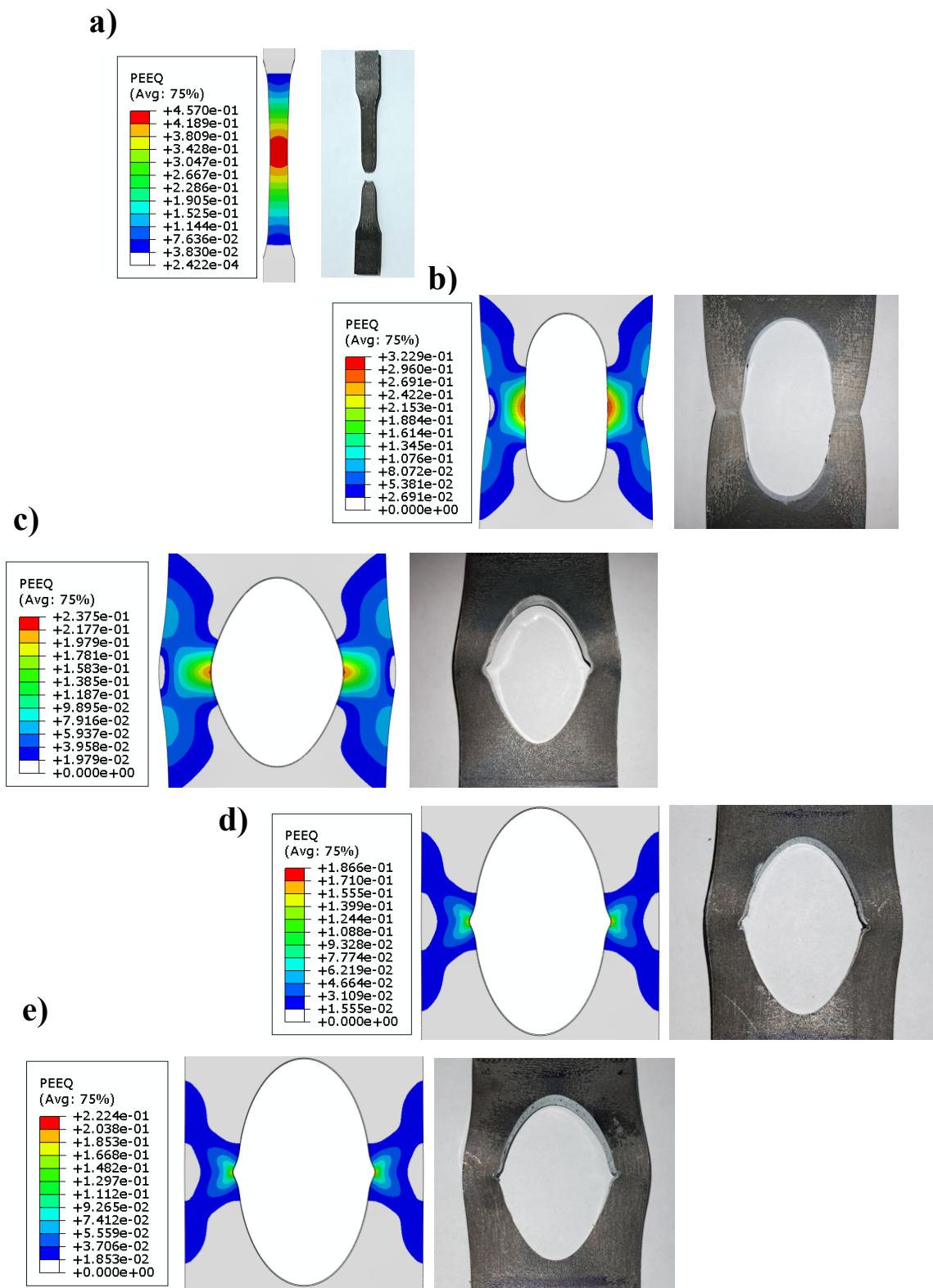
نتایج مطالعه را ارائه می‌دهد که شامل تنش سه‌محوره، زاویه لود و کرنش شکست به‌دست‌آمده از مدل گنججانی و روش تجربی است. بررسی منحنی‌های نیرو-جابجایی نشان می‌دهد که الگوهای کیفی کلی آن‌ها در تمام نمونه‌ها به یک صورت است. این منحنی‌ها شامل یک رفتار الاستیک اولیه، به دنبال آن ناحیه تسلیم، ناحیه پلاستیک، گلوپی شدن و در نهایت، شکست نهایی هستند. بر اساس نتایج، تمام

بر این، مقایسه نتایج عددی و تصاویر واقعی شکست در شکل ۸ نشان می‌دهد که مدل گنججانی نه تنها مقدار کرنش شکست را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند، بلکه قادر است محل آغاز شکست و مسیر گسترش آن را نیز به‌درستی شناسایی کند. تطابق بین ناحیه آسیب پیش‌بینی‌شده و محل واقعی شکست در نمونه‌های آزمایش‌شده، اعتبار مدل را در بازتولید رفتار شکست تحت مسیرهای تنش مختلف تأیید می‌کند. جدول ۲ خلاصه‌ای از



شکل ۷. کانتورهای کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) و متغیر آسیب (SDV6) پیش‌بینی شده توسط مدل گنجیانی در آغاز شکست: (الف) نمونه دمبلی، (ب) ام ۱-تی، (ج) ام ۱-سی، (د) ام ۲، (ه) ام ۳.

Fig. 7. Load-displacement curves for various specimens from experimental tests and Ganjiani model predictions: (a) dog-bone, (b) M1_T, (c) M1_C, (d) M2, (e) M3



شکل ۸. مقایسه تصاویر شکست حاصل از نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی برای نمونه‌های مختلف: الف) دمبلی، الف) نمونه دمبلی، ب) ام ۱-تی، ج) ام ۱-سی، د) ام ۲، ه) ام ۳.

Fig. 8. Comparison of fracture images from experimental results and simulation predictions for various specimens: (a) dog-bone, (b) M1_T, (c) M1_C, (d) M2, (e) M3.

جدول ۲. مقادیر تنش سه‌محوره، پارامتر زاویه لود، و کرنش شکست متناظر.

Table 2. Stress triaxiality, Lode angle parameter, and corresponding fracture strain values.

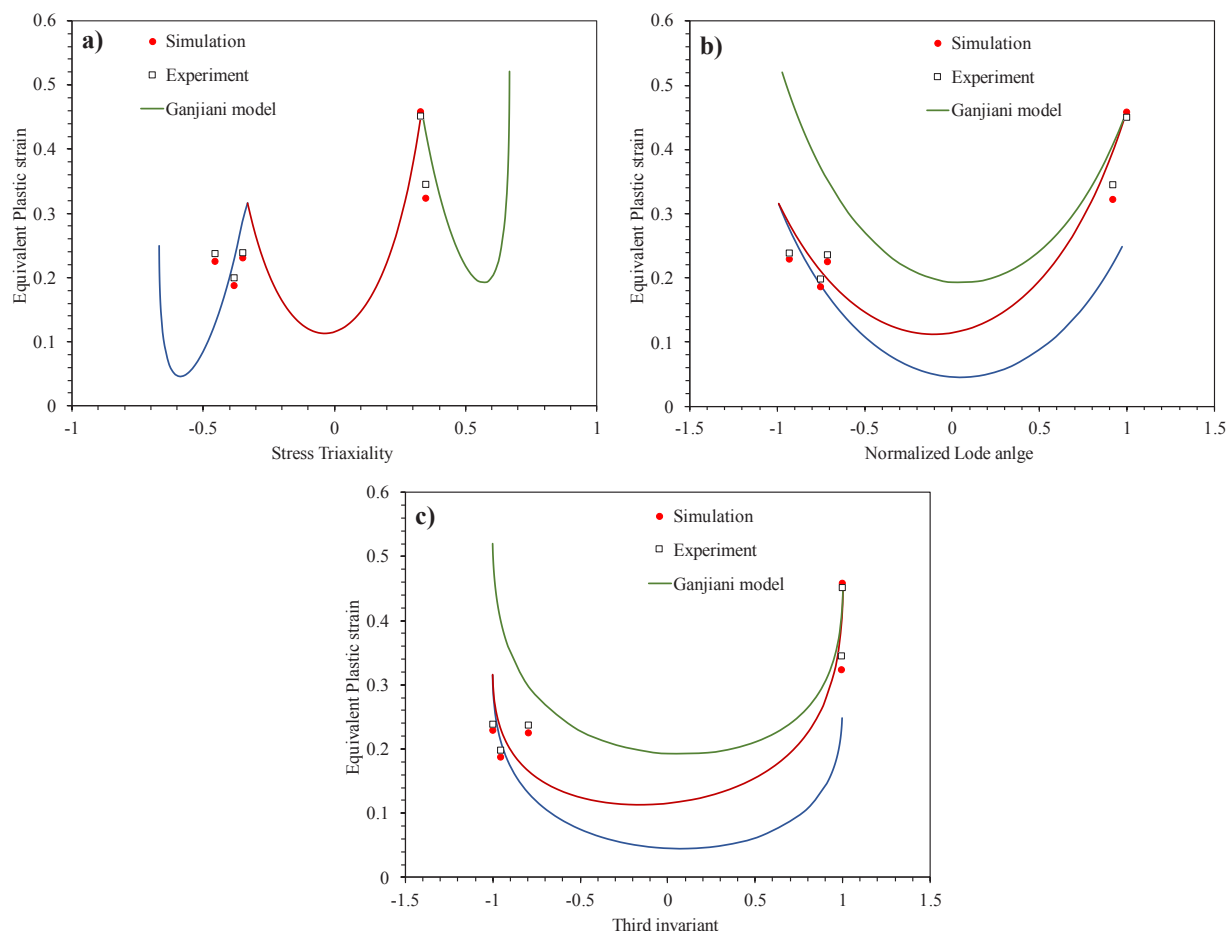
نمونه	تنش سه‌محوره	زاویه لود بی‌بعدشده	کرنش شکست (تجربی)	کرنش شکست (گنجیانی)
دمبلی	۰/۳۳	۱	۰/۴۵	۰/۴۵۷
ام ۱ (کشش)	۰/۳۴۸	۰/۹۹	۰/۳۴۴	۰/۳۲۲
ام ۱ (فشار)	-۰/۳۴۸	-۰/۹۹	۰/۲۳۸	۰/۲۲۹
ام ۲	-۰/۳۸۱	-۰/۹۵	۰/۱۹۸	۰/۱۸۶
ام ۳	-۰/۴۵۶	-۰/۷۹	۰/۲۳۶	۰/۲۲۴

حالت‌های شکست مشاهده شده در نمونه‌ها مربوط به شکست نرم است. اگرچه توافق خوبی بین یافته‌های تجربی و عددی مشاهده شد، اما با مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی می‌توان تفاوت جزئی بین نتایج وجود دارد که بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در نمونه ام ۱-تی رخ داد. تفاوت‌های جزئی مشاهده شده بین این روش‌ها را می‌توان با عوامل مختلفی توضیح داد. به‌عنوان مثال، برخی جزئیات هندسی در مدل اجزای محدود برای افزایش کارایی محاسباتی و پایداری همگرایی کاهش یافتند. علاوه بر این، نقص‌های فنی اجتناب‌ناپذیر مانند انحرافات جزئی در ابعاد نمونه و نقص‌های ایجاد شده در طول ساخت ممکن است باعث تفاوت‌های مشاهده شده شود.

الگوهای تغییر شکل و شکست نمونه‌های دمبلی، ام ۱، ام ۲ و ام ۳ برای هر دو روش تجربی و عددی ارائه شده است. در هر دو رویکرد، حالت‌های شکست ویژگی‌های مشابهی را نشان می‌دهند. در آزمایش‌های کشش، کاهش سطح مقطع همراه با تغییر شکل غالب در نواحی مرکزی نشان‌دهنده شکست نرم است. به طور مشابه، در آزمایش‌های فشار بیشترین درجه تغییر شکل در قسمت مرکزی، به ویژه در مقاطع منحنی متمرکز شده است. بررسی کرنش شکست در شکل ۹، رابطه آن را با تنش سه‌محوره، زاویه لود نرمال شده و ناوردهای تنش فاش می‌کند. با مقایسه نتایج از دو رویکرد تجربی و محاسباتی، توافق بالا در مقادیر کرنش شکست از مدل گنجیانی با نتایج تجربی را نشان می‌دهند. با افزایش تنش سه‌محوره مثبت، کرنش شکست روند کاهشی را نشان می‌دهد. به طور خاص، در رویکرد عددی، کرنش شکست در تنش سه‌محوره ۰/۳۳۳، ۰/۴۵۷ است، در حالی که در تنش سه‌محوره ۰/۳۴۸ به ۰/۳۲۲ کاهش

می‌یابد. در نتایج تجربی، این مقادیر به ترتیب ۰/۴۵۰ و ۰/۳۴۴ هستند که روند مشاهده شده را تأیید می‌کند. تغییر در کرنش شکست تحت تنش سه‌محوره منفی از الگوی متفاوتی پیروی می‌کند، در نمونه‌های ام ۱ و ام ۲، با کاهش تنش سه‌محوره از ۰/۳۴۸- به ۰/۳۸۱-، کرنش شکست عددی از ۰/۲۲۹ به ۰/۱۸۶ کاهش می‌یابد. با این حال، در نمونه ام ۳، کرنش شکست عددی افزایش به ۰/۲۲۴ را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که کرنش‌های شکست اندازه‌گیری شده تجربی برای نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به ترتیب ۰/۲۳۸، ۰/۱۹۸ و ۰/۲۳۶ هستند که این روند مشاهده شده را تقویت می‌کند. در شکل ۹، کرنش شکست به عنوان تابعی از زاویه لود نرمال شده و ناوردهای تنش نشان داده شده است. واضح است که برای مقادیر مثبت زاویه لود نرمال شده، کرنش شکست با افزایش زاویه لود افزایش می‌یابد. در مقابل، برای مقادیر منفی زاویه لود استاندارد شده، کرنش شکست با کاهش زاویه لود افزایش می‌یابد. روند مشابهی نیز در شکل ۹ مشاهده می‌شود که مشاهدات شکل ۹-ب را تأیید می‌کند.

علاوه‌براین، نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که کرنش شکست رابطه یکنواختی با تنش سه‌محوره ندارد. در ناحیه تنش سه‌محوره منفی، شکست عمدتاً تحت تأثیر تغییر شکل‌های برشی قرار دارد، در حالی که با افزایش تنش سه‌محوره و ورود به ناحیه کششی، مکانیزم شکست به سمت رشد و هم‌جوشی حفرات تغییر می‌کند. از این رو، در ناحیه گذار، کرنش شکست تحت تأثیر همزمان دو مکانیزم برشی و حفره‌ای قرار گرفته و رفتار غیرخطی مشاهده می‌شود [۲۸]. این تغییر در مکانیزم غالب شکست موجب می‌شود که کرنش شکست لزوماً با افزایش قدر مطلق تنش سه‌محوره کاهش نیابد.



شکل ۹. کرنش شکست نسبت به پارامترهای مختلف تنش، با مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های مدل گنجانی: (الف) تنش سه‌محوره، (ب) پارامتر لود نرمال شده، (پ) نامتغیر سوم تنش.

Fig. 9. Fracture strain with respect to different stress parameters, comparing experimental results and Ganjani model predictions: (a) stress triaxiality, (b) normalized Lode angle parameter, and (c) third invariant of the stress.

۴- نتیجه‌گیری

۰/۴۵۶- را پوشش دادند. آزمایش‌های کشش و فشار تک‌محوره انجام و نتایج آن‌ها با شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شد. برای تحلیل رفتار شکست از مدل گنجانی در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از زیرروال‌های وی‌یوهارد و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی بهره گرفته شد. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب در پیش‌بینی کرنش شکست و نیروی بیشینه بود. بیشترین کرنش شکست در نمونه دمبلی که مقدار آن ۰/۴۵۷ در تنش‌های سه‌محوره ۰/۳۳۳ به دست آمد. در مقابل، کمترین کرنش شکست مربوط به نمونه ۲ تحت فشار بود که مقدار آن ۰/۱۸۶ در تنش‌های سه‌محوره ۰/۳۸۱- ثبت شد.

بر اساس کانتورهای آسیب حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، بیشترین

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکردهای تجربی و عددی به بررسی اثر تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود بر رفتار شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷ پرداخته است. هندسه‌های مختلف نمونه به‌گونه‌ای طراحی شدند که امکان ارزیابی تنش سه‌محوره منفی از طریق آزمون‌های کشش و فشار تک‌محوره فراهم شود و نیاز به روش آزمون دوم‌محوره برطرف گردد. در این راستا، چهار طرح نمونه انتخاب شد که شامل یک نمونه دمبلی و ۳ نمونه مستطیلی دارای سوراخ‌های بیضوی بودند. همچنین، با اعمال انحنای متفاوت در اطراف سوراخ‌های بیضوی، مقادیر گوناگونی از تنش سه‌محوره ایجاد شد. نمونه‌های طراحی شده بازه‌ای از تنش سه‌محوره منفی بین ۰/۳۴۸- تا

- materials and structures, John Wiley & Sons, Inc, (1950).
- [8] M. Cockcroft, Ductility and workability of metals, *J. of Metals*, 96 (1968) 2444.
- [9] R. Li, Z. Zheng, M. Zhan, H. Zhang, X. Cui, Y. Lei, Fracture prediction for metal sheet deformation under different stress states with uncoupled ductile fracture criteria, *Journal of Manufacturing Processes*, 73 (2022) 531-543.
- [10] F. Šebek, P. Salvat, P. Boháč, R. Adámek, S. Věchet, T. Návrát, J. Zapletal, M. Ganjani, Size Effect on the Ductile Fracture of the Aluminium Alloy 2024-T351, *Experimental Mechanics*, 64(9) (2024) 1483-1495.
- [11] M. Ganjani, S. Ghobadi, G. Faraji, Evaluating the ductile failure characteristics of CuZn30 brass under different stress conditions, *Engineering Failure Analysis*, 167 (2025) 108932.
- [12] P.W. Bridgman, *Studies in large plastic flow and fracture: with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure*, Harvard University Press, 1964.
- [13] Y. Bao, T. Wierzbicki, On the cut-off value of negative triaxiality for fracture, *Engineering fracture mechanics*, 72(7) (2005) 1049-1069.
- [14] M. Zheng, C. Hu, Z. Luo, X. Zheng, Further study of the new damage model by negative stress triaxiality, *International journal of fracture*, 63 (1993) R15-R19.
- [15] A.S. Khan, H. Liu, A new approach for ductile fracture prediction on Al 2024-T351 alloy, *International Journal of Plasticity*, 35 (2012) 1-12.
- [16] Y. Lou, J.W. Yoon, H. Huh, Modeling of shear ductile fracture considering a changeable cut-off value for stress triaxiality, *International Journal of plasticity*, 54 (2014) 56-80.
- [17] M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, Damage and failure at negative stress triaxialities: Experiments, modeling and numerical simulations, *International Journal of Plasticity*, 102 (2018) 70-82.
- [18] W. Li, F. Liao, T. Zhou, H. Askes, Ductile fracture of Q460 steel: Effects of stress triaxiality and Lode angle, *Journal of Constructional Steel Research*, 123 (2016) 1-17.

مقادیر آسیب در نواحی مجاور انحنای مشاهده گردید. تحلیل کانتورهای کرنش نیز نشان داد که بیشینه مقادیر کرنش در همین نواحی منحنی رخ می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش تنش سه‌محوره مثبت، کرنش شکست کاهش می‌یابد و به‌طور مشابه، با کاهش تنش سه‌محوره منفی نیز کرنش شکست افت می‌کند و سپس با کاهش بیشتر تنش سه‌محوره، مقدار آن افزایش می‌یابد. روند تغییرات کرنش شکست نسبت به پارامتر زاویه لود نرمال شده و نامتغیر سوم تنش رفتار یکنواختی را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که برای هر دو مقادیر مثبت و منفی زاویه لود نرمال شده و نامتغیر سوم، روندی افزایشی مشاهده می‌شود. در مطالعات آینده، بررسی اثر شرایط نرخ کرنش بالا به‌منظور افزایش دامنه کاربرد مدل در برنامه‌های آتی در نظر گرفته شده است.

منابع

- [1] T. Coppola, L. Cortese, P. Folgarait, The effect of stress invariants on ductile fracture limit in steels, *Engineering Fracture Mechanics*, 76(9) (2009) 1288-1302.
- [2] M. As'ad, B.W. Febriantoko, T.W.B. Riyadi, R.F. Pahlevi, The Influence of Air Pressure on Surface Roughness Values in the Sandblasting Process of ST-37 Steel Plates, *Engineering Proceedings*, 63(1) (2024) 28.
- [3] R. Yu, X. Li, Z. Yue, A. Li, Z. Zhao, X. Wang, H. Zhou, T.J. Lu, Stress state sensitivity for plastic flow and ductile fracture of L907A low-alloy marine steel: From tension to shear, *Materials Science and Engineering: A*, 835 (2022) 142689.
- [4] P. Kubík, F. Šebek, J. Hůlka, J. Petruška, Calibration of ductile fracture criteria at negative stress triaxiality, *International Journal of Mechanical Sciences*, 108 (2016) 90-103.
- [5] C. Wang, X.-g. Liu, J.-t. Gui, Z.-f. Xu, B.-f. Guo, Influence of inclusions on matrix deformation and fracture behavior based on Gurson–Tvergaard–Needleman damage model, *Materials Science and Engineering: A*, 756 (2019) 405-416.
- [6] Y. Lou, J.W. Yoon, Anisotropic ductile fracture criterion based on linear transformation, *International Journal of Plasticity*, 93 (2017) 3-25.
- [7] A.M. Freudenthal, The inelastic behavior of engineering

- (2023) 1834.
- [24] S. Hiremath, D. Alapur, D. Roy Mahapatra, Stress triaxiality in damage models, in: Blast Mitigation Strategies in Marine Composite and Sandwich Structures, Springer, 2017, pp. 247-264.
- [25] O. Hering, A. Dunlap, A.E. Tekkaya, A. Aretz, A. Schwedt, Characterization of damage in forward rod extruded parts, International Journal of Material Forming, 13(6) (2020) 1003-1014.
- [26] T. Pardoen, Numerical simulation of low stress triaxiality ductile fracture, Computers & structures, 84(26-27) (2006) 1641-1650.
- [27] K. Kofiani, A. Nonn, T. Wierzbicki, New calibration method for high and low triaxiality and validation on SENT specimens of API X70, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 111 (2013) 187-201.
- [28] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, International journal of mechanical sciences, 46(1) (2004) 81-98.
- [19] M. Mansouri, M. Ganjiani, The effect of negative stress triaxiality and lode angle on ductile fracture of ST-37, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 56(9) (2024) 1303-1326 (in Persian).
- [20] M. Mansouri, M. Ganjiani, Effect of stress state on the fracture behavior of Al6061-T6 via combined experimental and numerical approaches, Forces in Mechanics, 21 (2025) 100332.
- [21] M. Mansouri, M. Ganjiani, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HYDROSTATIC PRESSURE IN DUCTILE FRACTURE OF AL-6061T6, Sharif Journal of Mechanical Engineering, 41(2) (2025) 77-92 (in Persian).
- [22] S. Xu, C. Simha, M. Gesing, J. Liang, J. Lo, Critical mechanical properties and FEA simulation for crashworthiness assessment of a coarse-grained cast AM50 alloy, Journal of Magnesium and Alloys, 3(3) (2015) 188-196.
- [23] S. Jonsson, J. Kajberg, Evaluation of Crashworthiness Using High-Speed Imaging, 3D Digital Image Correlation, and Finite Element Analysis, Metals, 13(11)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mansouri, S. M. Ganjiani, Calibration and Validation of a Ductile Failure Model for ST-37 Steel under Various Stress States, Amirkabir J. Mech Eng., 58(1) (2026) 67-88.

DOI: [10.22060/mej.2026.25765.7969](https://doi.org/10.22060/mej.2026.25765.7969)



