

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.

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

* Corresponding Author: Email: username@EmailServer.com

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 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, 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.

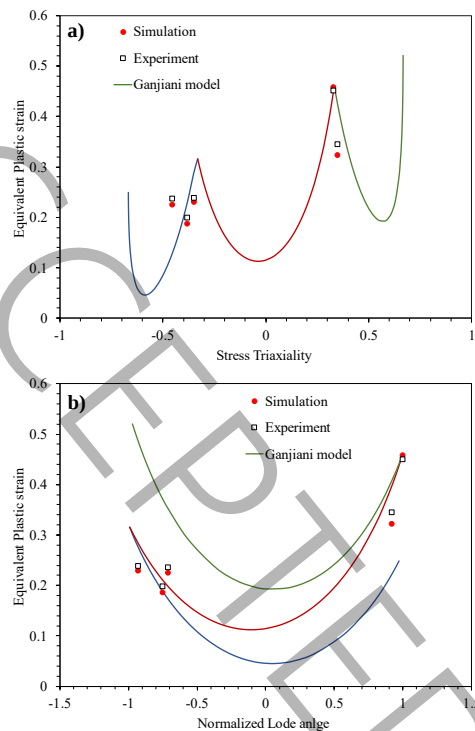


Figure 1. Fracture strain with respect to different stress parameters, comparing experimental results and Ganjiani model predictions: (a) stress triaxiality, (b) normalized Lode angle parameter

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.

5. 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

* ganjiani@ut.ac.ir

چکیده

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 بیضوی، 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 قابل‌توجهی بر شکست نرم دارد و همچنین مشاهده شد که تغییرات کرنش شکست تحت تنش سه‌محوره مثبت و منفی روندهای یکسانی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

کرنش شکست، تنش سه‌محوره منفی، پارامتر زاویه لود، رفتار شکست نرم، فولاد اس تی-۳۷.

فولاد استی-۳۷ به عنوان یکی از پرکاربردترین فولادهای ساختمانی است و به دلیل کاربرد گسترده در صنایع مختلف، از جمله ساخت و ساز، تجهیزات صنعتی و قطعات ماشین آلات، برای این مطالعه انتخاب شد. این فولاد دارای شکل پذیری مناسب، قابلیت جوشکاری و ماشین کاری مطلوب بوده و به عنوان یکی از پرمصرف ترین فولادهای کم کربن در کاربردهای مهندسی شناخته می شود. به همین دلیل، ارزیابی دقیق رفتار این فولاد تحت بارگذاری های پیچیده ضروری است. شکست نرم یکی از حالت های مهم شکست در فولادهای ساختمانی به شمار می رود که اغلب منجر به ایجاد ترک در اجزا یا اتصالات شده و می تواند فروپاشی کامل سازه های ساختمانی را در پی داشته باشد. از این رو، بررسی و تبیین سازوکار شکست نرم و همچنین ارائه رویکردهای عددی قابل اتکا برای شبیه سازی این نوع شکست در فولادهای ساختمانی امری ضروری است [۱، ۲].

تحقیقات گسترده ای بر بررسی شکست نرم در فلزات انجام شده و در نتیجه، مدل های متنوعی برای پیش بینی این نوع شکست توسعه یافته اند. این مدل ها را می توان به طور کلی در دو دسته مدل های شکست جفت نشده^۱ و جفت شده^۲ طبقه بندی کرد. در مدل های جفت شده، تکامل آسیب و رفتار پلاستیک به صورت همزمان مدل سازی شده و اثر تجمع آسیب در طول تغییر شکل پلاستیک بر پاسخ مکانیکی ماده لحاظ می شود. در نتیجه، با پیشرفت آسیب مقاومت ماده به تدریج کاهش می یابد [۳]. در مقابل، در مدل های جفت نشده، تکامل آسیب مستقل از رفتار پلاستیک در نظر گرفته می شود و اثر آن تا لحظه وقوع شکست بر پاسخ تنش- کرنش اعمال نمی شود [۴]. اگرچه مدل های جفت شده توصیف واقع بینانه تری از سازوکارهای فیزیکی شکست نرم ارائه می دهند، اما استفاده از آن ها مستلزم تعیین پارامترهای مادی بیشتری است که شناسایی دقیق آن ها معمولاً دشوار بوده و علاوه بر آن، به دلیل جفت شدن رفتار پلاستیسیته و آسیب، هزینه محاسباتی بالاتری نسبت به مدل های جفت نشده دارند [۵، ۶].

به دلیل سادگی ساختاری، در سال های اخیر مدل های جفت نشده فراوانی مبتنی بر فرضیات و روش های تجربی مختلف توسعه یافته اند. فریدنتال^۳ [۷] نخستین مدل جفت نشده مبتنی بر انرژی را ارائه کرد و نشان داد که شکست نرم زمانی رخ می دهد که کار پلاستیک بر واحد حجم از یک مقدار بحرانی تجاوز کند. همچنین مشخص شد که آغاز شکست نرم معمولاً در ناحیه ای اتفاق می افتد که تحت بیشترین تنش اصلی قرار دارد. پس از آن، کاکرفت^۴ و لاتام^۵ مدلی که بر اساس معیار حداکثر تنش اصلی ارائه کردند [۸]. در مقایسه با مدل های جفت شده، مدل های جفت نشده به دلیل چارچوب ساده تر و سهولت تعیین پارامترهایشان، در صنعت کاربرد بیشتری یافته اند [۹]. یکی از مزایای کلیدی مدل های جفت نشده، فرآیند کالیبراسیون ساده تر آن ها است که امکان کالیبره سازی مستقل پاسخ پلاستیک و آسیب نرم را فراهم می کند.

شبک^۶ 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 می دهد که چگونه می توان از آزمون های کوچک مقیاس برای پیش بینی قابل اعتماد شکست استفاده کرد، به ویژه زمانی که نمونه های تمام مقیاس در دسترس نیستند. برای کالیبره سازی یک معیار پدیده شناختی شکست نرم، از آزمون های کشش کوچک مقیاس و پانچ کوچک استفاده شد و اثرات تنش سه محوره^۷ و زاویه لود^۸ در آن لحاظ گردید. نتایج نشان داد که اثر اندازه در شکست نرم قابل توجه نیست، زیرا نمونه های کوچک و استاندارد رفتار شکست مشابهی از نظر کرنش شکست و تنش سه محوره ارائه دادند. گنجیانی و همکاران [۱۱] ویژگی های شکست نرم آلیاژ برنج را تحت تنش سه محوره و زاویه های لود مختلف، که برای درک رفتار ماده تحت سناریوهای بارگذاری گوناگون اهمیت دارند، بررسی کردند. آن ها از یک مدل جفت شده ی آسیب-پلاستیسیته که اثرات تنش سه محوره و زاویه لود را دربرمی گیرد استفاده نمودند. رفتار شکست ماده با به کارگیری هندسه های مختلف نمونه تحلیل شد. نتایج نشان

¹ Uncoupled

² Coupled

³ Freudenthal

⁴ Cockcroft

⁵ Latham

⁶ Šebek

⁷ Stress triaxiality

⁸ Lode angle

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^۱ [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 به شدت به فشار هیدرواستاتیک وابسته است. بائو^۲ و ویرزبیک^۳ [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 لیو [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. کوبیک^۴ 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^۵ 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 بارگذاری برشی‌محور، تنها تنش سه‌محوره برای توصیف کامل رفتار شکست کافی نیست و پارامتر زاویه لود نیز به‌عنوان یک شاخص مهم در تمایز میان حالات برشی مختلف، به‌ویژه در فرایند هم‌جوشی حفره‌ها و محلی‌شدن کرنش، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. نتایج این مطالعه مبتنی بر توموگرافی درجا در فولاد دوفازی نشان می‌دهد که در برش خالص و برش ساده، با وجود آن‌که تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود هر دو می‌توانند 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 مدل‌سازی دقیق شکست نرم، به‌ویژه در شرایط برشی و نزدیک به ناحیه هم‌جوشی، در نظر گرفتن هم‌زمان تنش سه‌محوره و زاویه لود ضروری است [۱۸]. کاپولا^۶ و همکاران نیز به بررسی اثر زاویه لود در توصیف کامل رفتار شکست پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش تنش سه‌محوره معمولاً به تشدید جوانه‌زنی، رشد و هم‌جوشی حفره‌ها و در نتیجه کاهش شکل‌پذیری منجر می‌شود. همچنین، اثر زاویه لود یا پارامتر مرتبط با آن نشان می‌دهد که مسیر تنش و سهم برش نیز در کنترل شکست نرم اهمیت دارد. نتایج آزمایش‌های کششی، پیچشی، پهن‌سازی و خمش همراه با شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی دقیق‌تر شکست نرم، باید تنش سه‌محوره و پارامتر لود به‌صورت هم‌زمان در مدل‌های آسیب و شکست در نظر گرفته شوند [۱]. به همین دلیل مدل‌هایی که تنها بر اساس سه‌محوره تنش هستند، ممکن است دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار شکست نرم ماده، به خصوص در سه‌محوره تنش منفی را نداشته باشند. یکی از شناخته‌شده‌ترین معیارها برای شکست نرم فلزات مدل جانسون-کوک^۷ است، اما این مدل عمدتاً بر پایه تنش سه‌محوره توسعه یافته و در شرایط تنش سه‌محوره پایین و به‌ویژه منفی، که در آن‌ها تنش‌های برشی و اثر زاویه لود نقش مهمی در آغاز

¹ Bridgman

² Bao

³ Wierzbicki

⁴ Kubík

⁵ Brünig

⁶ Coppola

⁷ Johnson-Cook

شکست دارند، دقت محدودی دارد. در مقابل، مدل گنجیانی^۱ اثر همزمان تنش سه‌محوره و زاویه لود را در پیش‌بینی کرنش شکست لحاظ می‌کند و به‌طور ویژه برای بهبود پیش‌بینی رفتار شکست در محدوده‌های تنش سه‌محوره منفی توسعه یافته است [۱۵].

منصوری و گنجیانی در پژوهش‌هایی به بررسی اثر تنش سه‌محوره منفی بر روی کرنش شکست و رفتار شکست نرم پرداختند. در ابتدا، رفتار شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷ تحت حالت‌های مختلف تنش بررسی شده است. برای ایجاد حالت‌های تنش متفاوت، از نمونه‌های کششی و فشاری با سوارخ و انحنا استفاده شده که موجب ایجاد شرایط چندمحوره و تغییر در تنش سه‌محوره تحت آزمون تک‌محوره شد. نتایج نشان می‌دهد که آسیب در ناحیه انحنا متمرکز می‌شود و کرنش شکست به‌شدت به تنش سه‌محوره و زاویه لود است، به‌طوری که با تغییر این پارامترها، کرنش شکست نیز تغییر می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که شکست نرم در فولاد اس‌تی-۳۷ به‌طور مستقیم تحت تأثیر حالت تنش و مسیر بارگذاری قرار دارد [۱۹]. در پژوهش‌های دیگری، رفتار شکست نرم در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-تی ۶ با تأکید بر نقش تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کرنش شکست به‌شدت تابع حالت تنش بوده و در تنش سه‌محوره مثبت و منفی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در این مطالعه از نمونه‌های طراحی شده‌ی خاص در آزمون‌های کشش و فشار استفاده شده و با ایجاد تنش سه‌محوره منفی در بازه‌ی 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 پیاده‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه شده که توافق مناسبی بین پیش‌بینی عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. این امر بیانگر نقش همزمان تنش سه‌محوره و زاویه لود در کنترل آغاز آسیب، تمرکز کرنش پلاستیک و نهایتاً وقوع شکست نرم است [۲۰، ۲۱]. پیش‌بینی دقیق شکست نرم در کاربردهای مهندسی، یک نیاز صنعتی حیاتی محسوب می‌شود. تنش سه‌محوره نقش محوری در کنترل آغاز و پیشروی شکست نرم تحت شرایط پیچیده بارگذاری چندمحوره ایفا می‌کند. چنین توانایی پیش‌بینی برای بخش‌های گوناگون صنعتی ضروری است، از جمله طراحی ایمنی ضربه در سازه‌های خودرویی و ریلی [۲۲، ۲۳]، بهینه‌سازی وزن در قطعات هوافضا [۲۴]، جلوگیری از شکست در فرآورده‌های شکل‌دهی [۲۵، ۲۶]، و ارزیابی یکپارچگی سازه‌ای خطوط لوله و مخازن تحت فشار [۲۷].

در پژوهش‌های پیشین این گروه، با استفاده از روش همبستگی تصویری دیجیتال^۲ کرنش شکست اس‌تی-۳۷ در تنش سه‌محوره 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، آزمایش‌های کشش و فشار تک‌محوره بر روی اس‌تی-۳۷ تحت شرایط مختلف تنش سه‌محوره انجام شد. هندسه‌های مختلف نمونه، از جمله نمونه‌های دمبلی و نمونه‌های مستطیلی دارای حفره بیضوی، طراحی گردید تا مقادیر گوناگون تنش سه‌محوره تولید شود. این طرح‌ها امکان دستیابی به سه‌محوره‌های منفی را تنها با آزمایش تک‌محوره فراهم کردند. آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس^۳ مدل‌سازی شدند و از مدل شکست گنجیانی در تحلیل عددی بهره گرفته شد. برای اعمال رفتار شکست ماده در مدل گنجیانی، زیرروال‌های وی‌یوهارد^۴ و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی^۵ به کار 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].

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

¹ Ganjiani's model

² Digital Image Correlation

³ Abaqus

⁴ VUHARD

⁵ VUSDFLD

در این معادله، $\bar{\sigma}$ بیانگر تنش مؤثر (وون میزز)، 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، 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.

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

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.

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

در این رابطه $\bar{\sigma}_f$ ، $\bar{\sigma}_f^{\text{ref}}$ ، η^{ref} و $\bar{\theta}^{\text{ref}}$ 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.

$$\bar{\epsilon}_f = \left\{ \left[\frac{\sigma_0}{K} + (\bar{\epsilon}_f^{\text{ref}})^n \right] \left[1 + c_\eta(\eta - \eta^{\text{ref}}) - c_\theta(\bar{\theta} - \bar{\theta}^{\text{ref}})^2 \right]^{-1} - \frac{\sigma_0}{K} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

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 ($\bar{\epsilon}_f$) 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} ، $\bar{\theta}^{\text{ref}}$) 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. از این‌رو، 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. به عبارت 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. از این‌رو، در پژوهش حاضر از مدل آسیب جفت‌شده استفاده شده است تا اثر متقابل تغییر شکل پلاستیک و تکامل 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.

$$\Delta D = \beta m \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)^{m-1} \left\{ 1 - \tanh^2 \left[\beta \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)^m \right] \right\} \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \quad (8)$$

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.

$$D = \tanh \left[\beta \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)^m \right] \quad (9)$$

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. از این‌رو، 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.

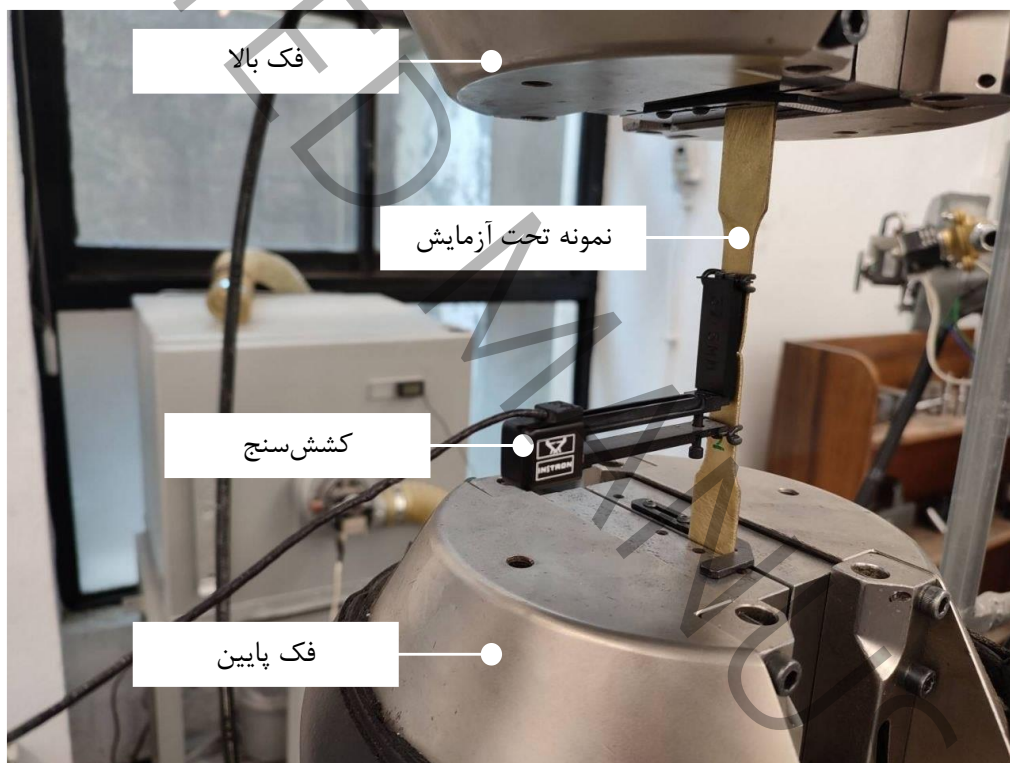
این مدل‌ها در چارچوب روش اجزای محدود پیاده‌سازی شده و از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده‌اند. در این تحلیل، از زیرروال‌های وی‌یوهارد و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. زیرروال وی‌یوهارد امکان اعمال مدل گنجیانی همراه با مدل آسیب را فراهم می‌کند. برای تعریف دقیق مدل،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

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = Kn\bar{\varepsilon}^{n-1}(1-D) - \frac{dD}{d\bar{\varepsilon}}(\sigma_0 + K\bar{\varepsilon}^n)$$

$$= Kn\bar{\varepsilon}^{n-1}(1-D) - \beta m \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \right)^{m-1} \left\{ 1 - \tanh^2 \left[\beta \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \right)^m \right] \right\} \frac{\sigma_0 + K\bar{\varepsilon}^n}{\bar{\varepsilon}_f} \quad (10)$$

۲-۲- تحلیل تجربی

به منظور مطالعه ویژگی‌های شکست نرم فولاد اس‌تی-۳۷، آزمون‌های 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 ام ۱ انجام شدند، در حالی که آزمون‌های فشاری روی نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ اجرا گردید. نمونه‌های ام ۱ تحت بار کششی با عنوان ام ۱_تی شناخته می‌شوند و نمونه‌های ام ۱ تا ام ۳ تحت بار فشاری با نام‌های ام ۱_سی تا ام ۳_سی مشخص شده‌اند.



شکل ۱ تصویر دستگاه آزمون تجربی به همراه اجزا آن.

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

آزمون کشش نمونه دمبلی شکل مطابق با استاندارد دین ۵۰۱۲۵^۱ انجام شد. نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ 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

¹ DIN 50125

² Instron 8502

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 جابه‌جایی 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 به‌گونه‌ای 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 ۲۱/۸۷۵ و ۱۳/۵ 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.

۳-۲- 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 هشت‌گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته^۵ ایجاد شد. این المان‌ها به دلیل کارایی محاسباتی مناسب و توانایی مطلوب در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مواد، پلاستیسیته، تماس و تغییرشکل‌های بزرگ، برای تحلیل حاضر انتخاب شدند. همچنین، به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی میدان تنش، کرنش و آغاز آسیب، شبکه‌بندی در ناحیه بحرانی نمونه‌ها به‌صورت موضعی ریزتر در نظر گرفته شد. شکل ۳ مش استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

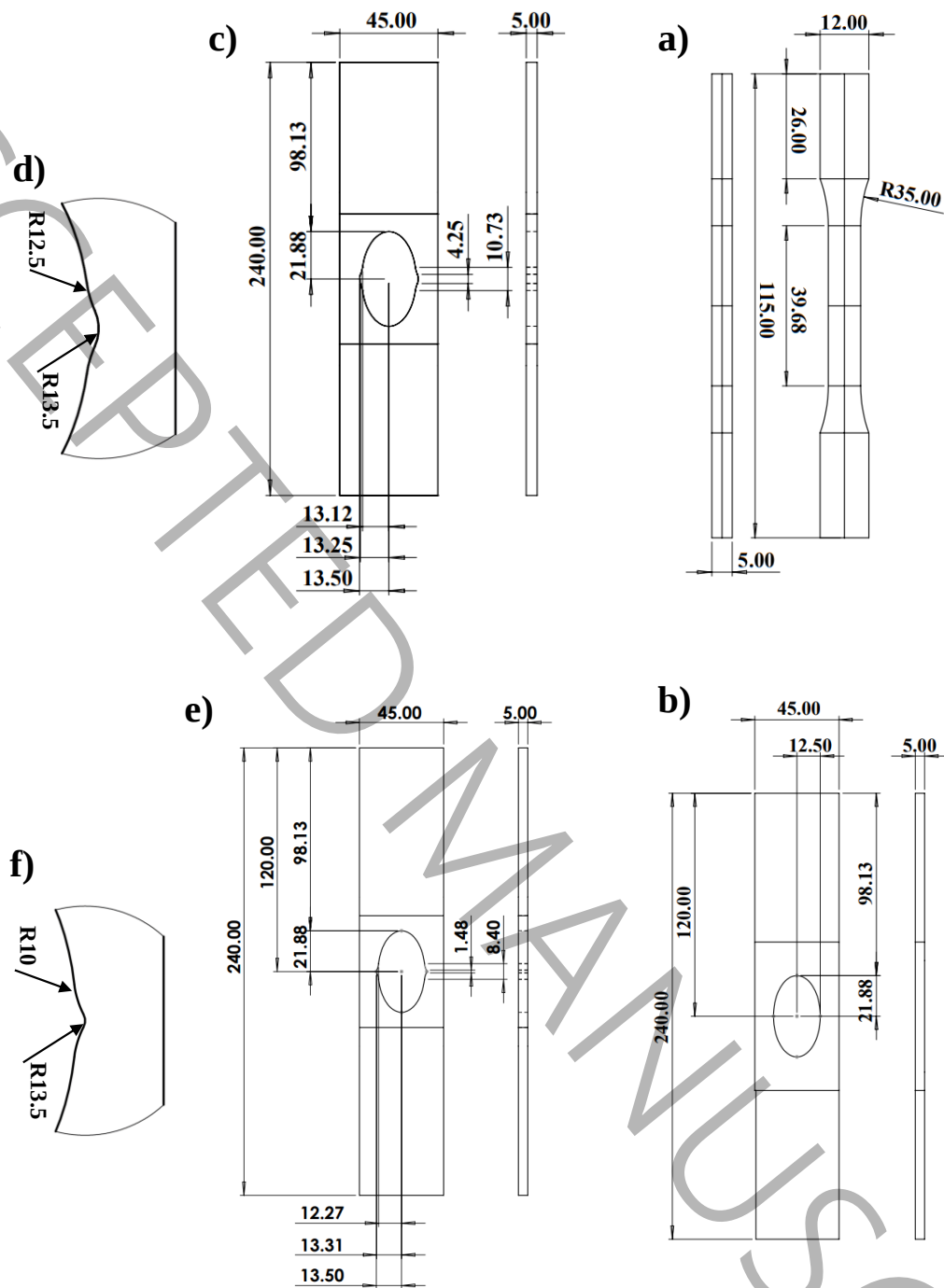
¹ Extensometer

² CMOS

³ QHY410C

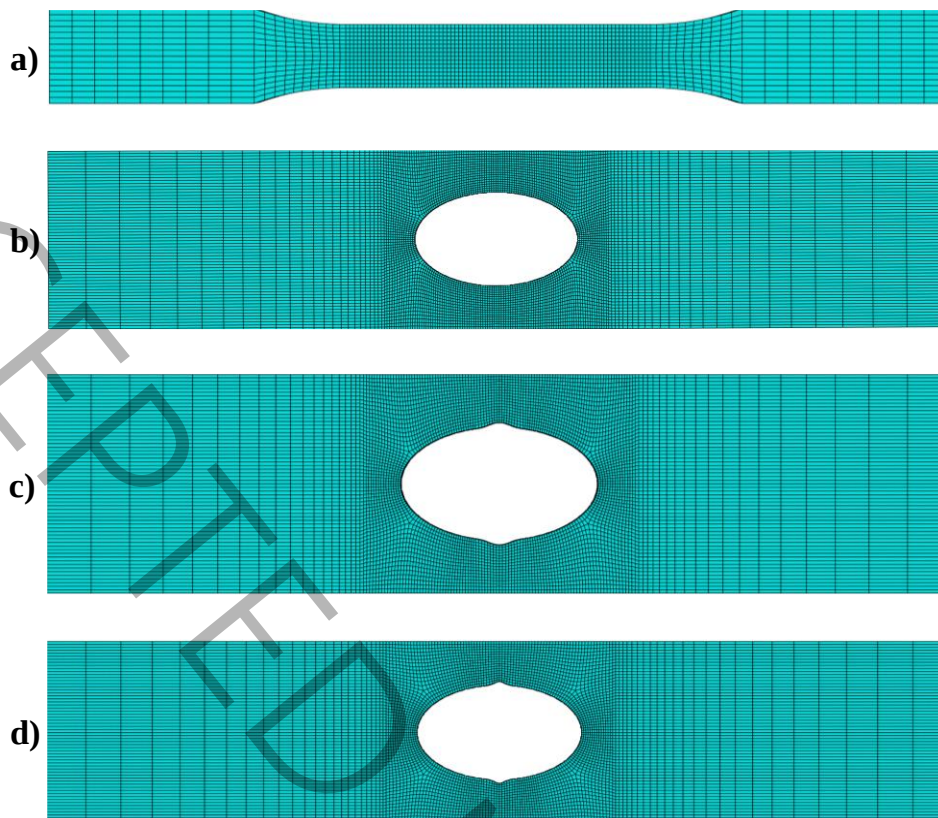
⁴ Ncorr

⁵ C3D8R



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

۳- نتایج و بحث

این بخش به بررسی تنش سه محوره، کالیبراسیون مدل و اعتبارسنجی آزمایشگاهی می پردازد. ابتدا کرنش شکست نمونه ها تحت شرایط مختلف بارگذاری و سطوح گوناگون تنش سه محوره توضیح داده می شود. سپس پارامترهای مدل گنجیانی تنظیم می شوند تا پیش بینی رفتار ماده با دقت مناسب انجام گیرد. در پایان، نتایج مدل با داده های آزمایشی مقایسه می شوند تا میزان قابلیت اعتماد و دقت مدل ارزیابی شود.

۳-۱- تنش سه محوره منفی

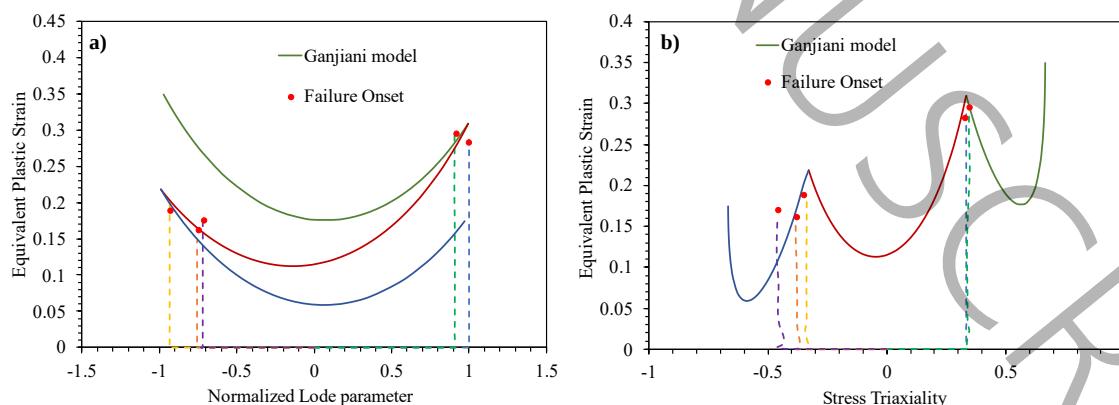
با توجه به اینکه در نمونه دمبلی تحت آزمون کشش، حالت تنش همچنان یک محوره باقی می ماند، مقدار تنش سه محوره طبق معادله (۲) برابر با $0/33$ است. با این حال، بررسی رفتار شکست در دامنه وسیع تری از مقادیر تنش سه محوره معمولاً مستلزم انجام آزمون های چندمحوره است. اجرای این آزمون ها به تجهیزات تخصصی، آماده سازی دقیق نمونه، هم محوری مناسب نمونه و فک ها و همچنین تحلیل پیچیده تر نتایج نیاز دارد. به منظور اجتناب از این محدودیت ها، در پژوهش حاضر هندسه نمونه ها به گونه ای طراحی شد که با ایجاد تغییرات هندسی، از جمله انحنا و حفره، حالت تنش از تک محوره به چندمحوره تغییر یابد. در این شرایط، به دلیل پیچیدگی میدان تنش، معادله (۲) دیگر قابلیت محاسبه مستقیم تنش سه محوره را ندارد و تعیین این پارامتر با استفاده از تحلیل اجزای محدود انجام شد. بنابراین، استفاده از هندسه های ویژه در کنار آزمون های کشش و فشار تک محوره، روشی عملی و کارآمد برای ایجاد دامنه گسترده ای از مقادیر تنش سه محوره، به ویژه در ناحیه منفی، فراهم می کند.

از آنجا که در این هندسه ها حالت تنش همزمان با تغییر شکل پلاستیک تکامل می یابد، مقدار متوسط تنش سه محوره طی فرآیند تغییر شکل ملاک قرار داده شد. در رویکرد عددی، خواص ماده الاستوپلاستیک مطابق بخش شبیه سازی تعریف و بارگذاری اعمال شد. مقادیر تنش سه محوره مستقیماً از خروجی های مدل اجزای محدود استخراج گردید. برای هر نمونه، مقدار تنش سه محوره با میانگین گیری

از مقادیر المان‌ها در ناحیه موردنظر محاسبه شد. تکامل تنش سه‌محوره در طول تاریخچه بارگذاری ردیابی گردید و مقدار متناظر با ناحیه پایدار به‌عنوان 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 به‌عنوان سه‌محوره تنش مرجع η^{ref} ، زاویه لود مرجع θ^{ref} و کرنش معادل مرجع $\bar{\epsilon}_f^{\text{ref}}$ تعیین گردیدند و در مدل شکست گنجیانی به کار گرفته شدند. داده‌های آزمون نمونه دمبلی شکل به‌عنوان 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 گلوپی، 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، شروع آسیب که به‌عنوان 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 پیش‌بینی‌شده توسط مدل گنجیانی، فرآیند گسترش آسیب آغاز می‌شود و متغیر آسیب D به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. با رشد آسیب و هنگامی که مقدار D به مقدار بحرانی تعیین‌شده 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 قابل‌ملاحظه نیرو مشاهده شد که حاکی از باریک و موضعی بودن ناحیه گلوپی و شکل‌گیری تقریباً هم‌زمان آن با شروع آسیب است. کرنش شکست با مقایسه دقیق شبیه‌سازی‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی به‌صورت دقیق تعیین شد. بررسی مکان‌های کرنش شکست، همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، پیش‌بینی‌های مدل گنجیانی را ارائه می‌کند و ثابت‌های کالیبره‌شده متناظر در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.



شکل ۴ کرنش شکست نمونه‌های مختلف به‌دست‌آمده از مدل گنجیانی و وابستگی آن به: (الف) پارامتر لود، (ب) تنش سه‌محوره.

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

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 سه‌محوره 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 سه‌محوره را نیز دارد، اما در این پژوهش داده‌های تجربی مستقلی برای ارزیابی صحت پیش‌بینی‌ها خارج از محدوده استفاده نشده است.

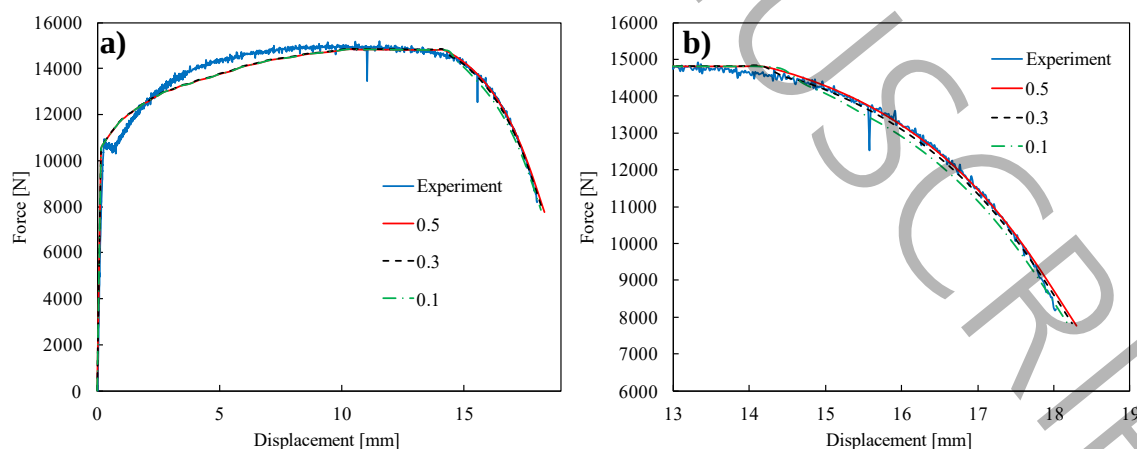
جدول ۱ پارامترهای مدل گنجیانی به کاررفته برای پیش‌بینی شکست نرم.

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

m	β	C_n	C_n	$\bar{\varepsilon}_f^{ref}$	$\bar{\theta}^{ref}$	η^{ref}
۰/۴	۰/۰۵	۰/۱۵۵	-۰/۱۲	۰/۲۸۲	۱	۰/۳۳۳

۳-۳- مقایسه نتایج

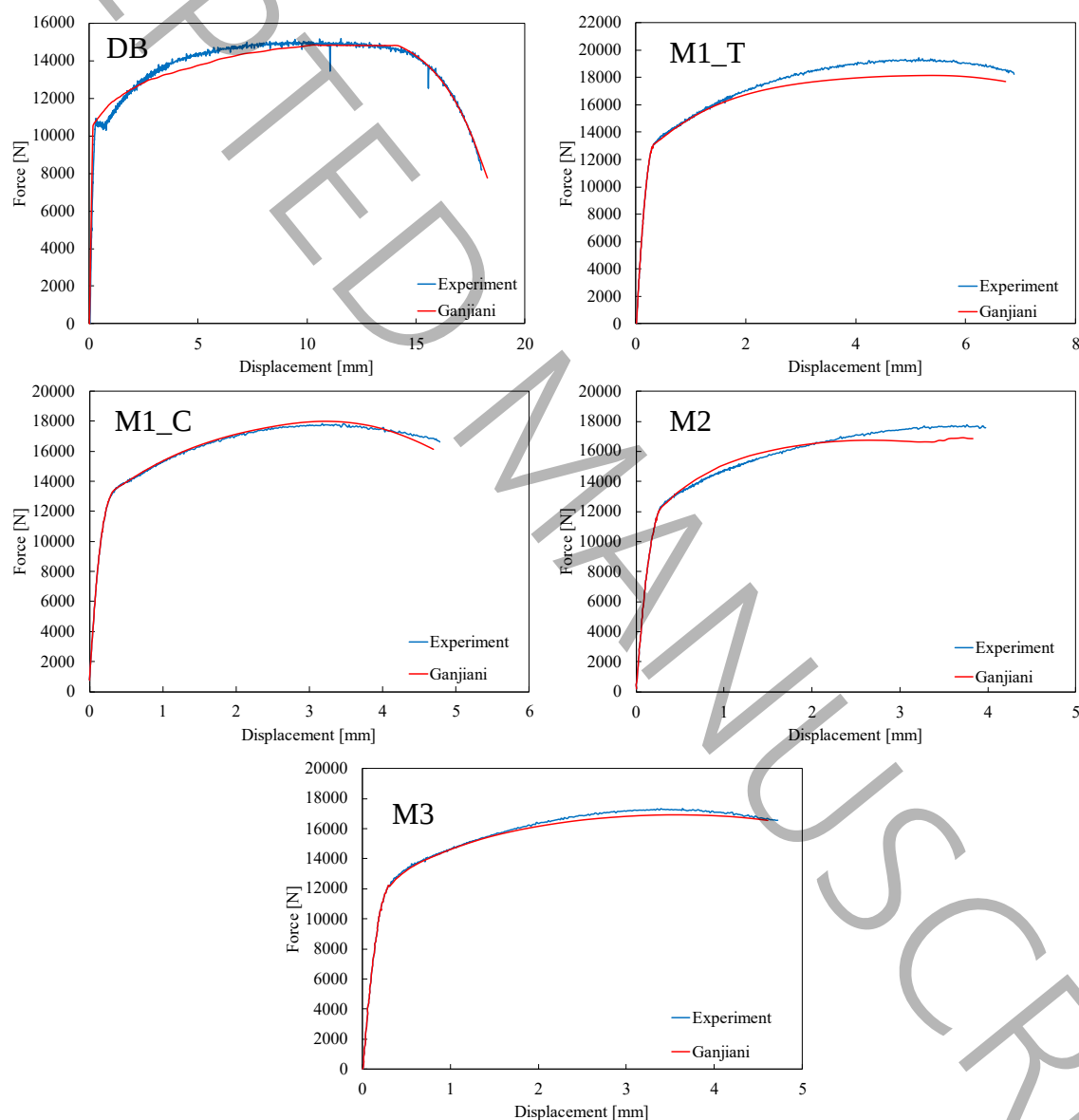
تحلیل منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل ۶ مقایسه‌ای بین پیش‌بینی‌های مدل شکست نرم گنجیانی و داده‌های آزمایشگاهی متناظر ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، تمامی نمونه‌ها در این مقایسه تطابق مناسبی بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهند. در آزمون‌های کششی، لحظه شکست بر اساس افت ناگهانی نیروی ثبت شده پس از رسیدن به بیشینه بار و گسیختگی نمونه تعیین شد. در مقابل، در آزمون‌های فشاری به دلیل احتمال وقوع کمانش در تغییرشکل‌های بزرگ، آزمون پیش از رسیدن به ناحیه کمانش 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 انتخاب شده 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 اس-تی-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. 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.



شکل ۵ تحلیل همگرایی شبکه با سه اندازه مختلف المان

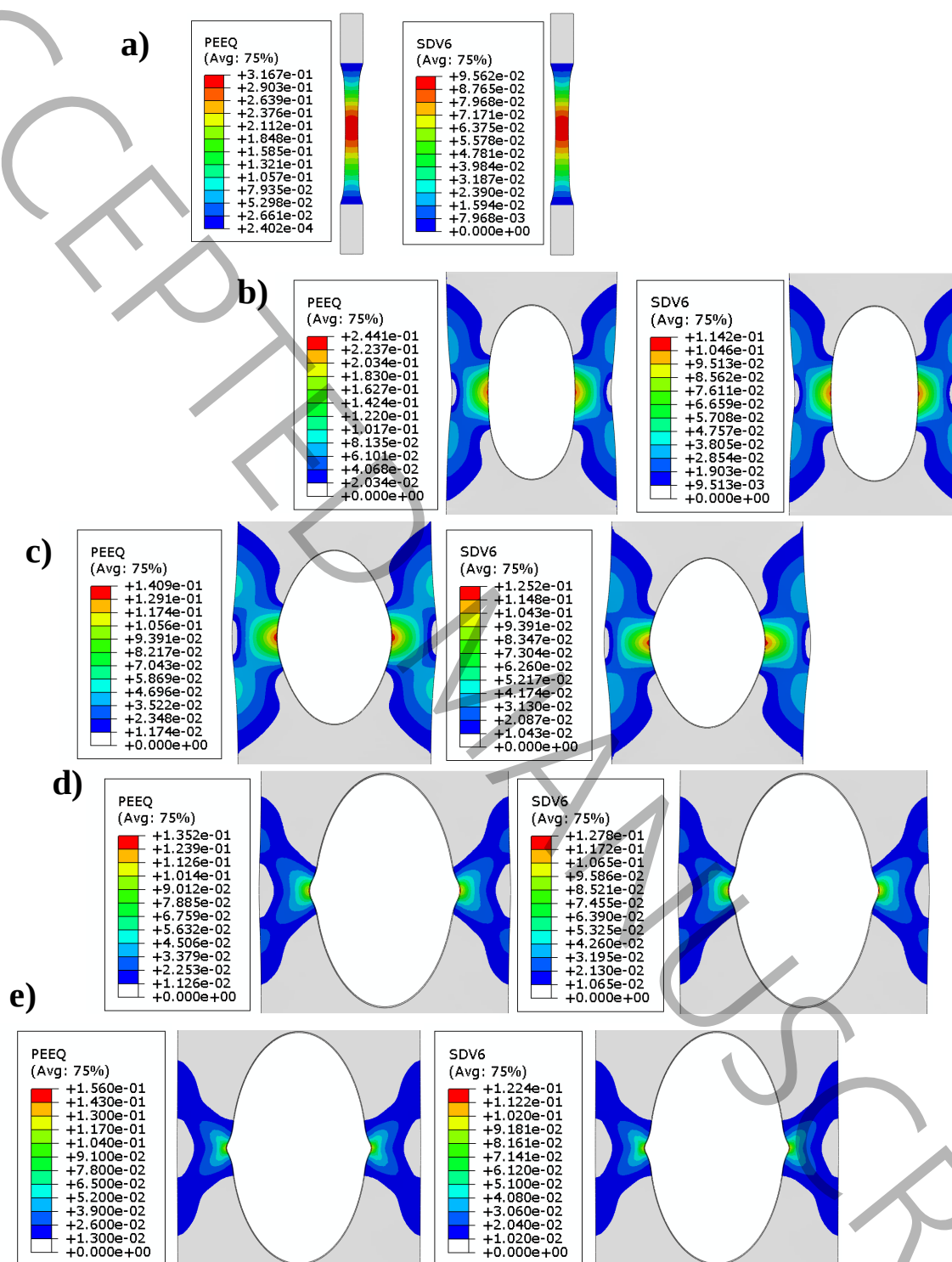
Fig. 5. Convergence analysis using four element sizes to ensure sufficient mesh refinement

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 طراحی شده بر تغییر مسیر تنش و ایجاد شرایط تنشی متفاوت است.



شکل ۶ منحنی‌های بار جابجایی نمونه‌های مختلف حاصل از آزمون‌های تجربی و پیش‌بینی‌های مدل گنجیانی: 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



شکل ۷ کانطورهای 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. Contours of equivalent plastic strain (PEEQ) and damage variable (SDV6) predicted by the Ganjiani model at failure onset: (a) dog-bone, (b) M1_T, (c) M1_C, (d) M2, (e) M3

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 ۲ام و ۳ام، شروع آسیب عمدتاً در نواحی اطراف انحنا 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 بر این، مقایسه نتایج عددی و تصاویر واقعی شکست در شکل ۸ نشان می‌دهد که مدل گنجیانی نه تنها مقدار کرنش شکست را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند، بلکه قادر است محل آغاز شکست و مسیر گسترش آن را نیز به درستی 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 نتایج مطالعه را ارائه می‌دهد که شامل تنش سه‌محوره، زاویه لود و کرنش شکست به دست آمده از مدل گنجیانی 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، گلوئی شدن و در نهایت، شکست نهایی هستند. بر اساس نتایج، تمام 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 ۱ام-تی رخ داد. تفاوت‌های جزئی مشاهده شده بین این روش‌ها را می‌توان با عوامل مختلفی توضیح داد. به عنوان 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، ۱ام، ۲ام و ۳ام 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 ۱ام و ۲ام، 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 ۳ام، کرنش شکست عددی افزایش به ۰/۲۲۴ را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که کرنش‌های شکست اندازه‌گیری شده تجربی برای نمونه‌های ۱ام، ۲ام و ۳ام 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.

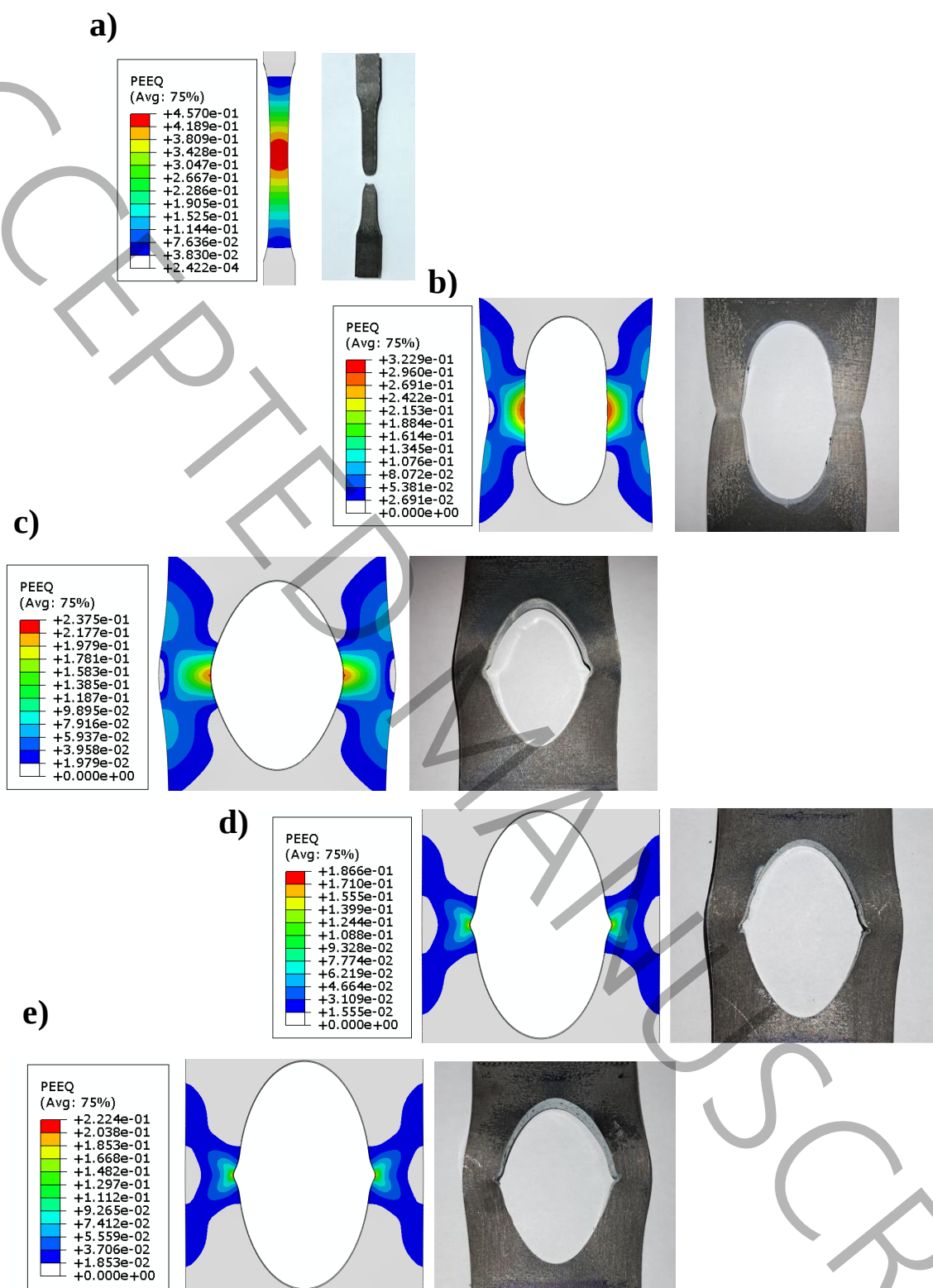
جدول ۲ مقادیر تنش سه‌محوره، پارامتر زاویه لود، و کرنش شکست متناظر.

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

نمونه	تنش سه‌محوره	زاویه لود بی‌بعد شده	کرنش شکست (تجربی)	کرنش شکست (گنجیانی)
دمبلی	۰/۳۳	۱	۰/۴۵	۰/۴۵۷
۱ام (کشش)	۰/۳۴۸	۰/۹۹	۰/۳۴۴	۰/۳۲۲

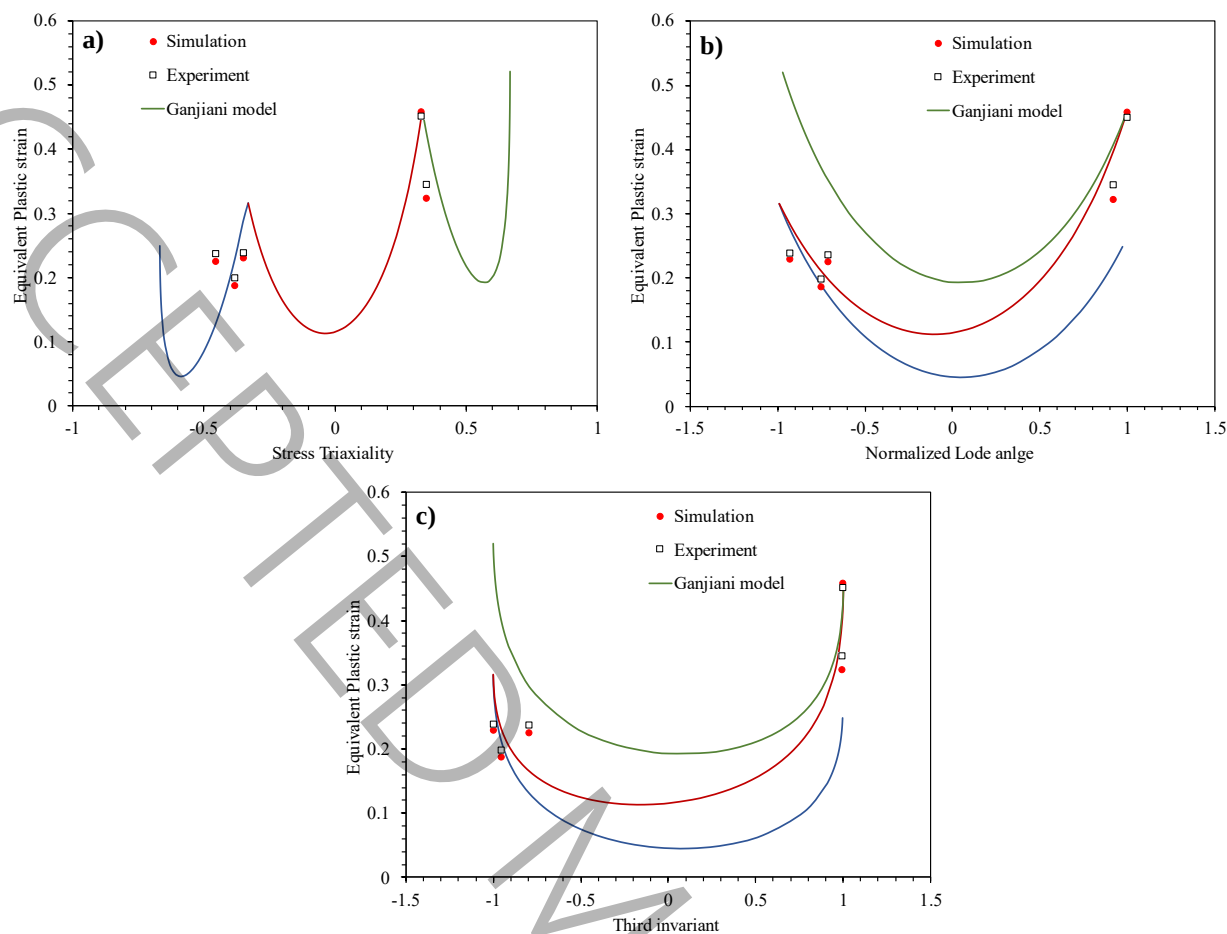
۰/۲۲۹	۰/۲۳۸	-۰/۹۹	-۰/۳۴۸	ام ۱ (فشار)
۰/۱۸۶	۰/۱۹۸	-۰/۹۵	-۰/۳۸۱	ام ۲
۰/۲۲۴	۰/۲۳۶	-۰/۷۹	-۰/۴۵۶	ام ۳

علاوه بر این، 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 ۸ مقایسه تصاویر شکست حاصل از نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی برای نمونه‌های مختلف: (الف) دمبلی، (ب) نمونه دمبلی، (ج) ام ۱_تی، (د) ام ۲_سی، (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



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

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

۴- نتیجه‌گیری

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 بیضی بودند. همچنین، با اعمال انحنای متفاوت در اطراف سوراخ‌های بیضی، مقادیر گوناگونی از تنش سه‌محوره ایجاد شد. نمونه‌های طراحی‌شده بازه‌ای از تنش سه‌محوره منفی بین -0.348 تا -0.456 را پوشش دادند. آزمایش‌های کشش و فشار تک‌محوره انجام و نتایج آن‌ها با شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شد. برای تحلیل رفتار شکست از مدل گنجیانی در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از زیرروال‌های وی‌یوهارد و وی‌یواس‌دی‌اف‌ال‌دی بهره گرفته شد. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی‌شده نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب در پیش‌بینی کرنش شکست و نیروی بیشینه بود. بیشترین کرنش شکست در نمونه دمبلی که مقدار آن 0.457 در تنش‌های سه‌محوره 0.333 به دست آمد. در مقابل، کمترین کرنش شکست مربوط به نمونه ام ۲ تحت فشار بود که مقدار آن 0.186 در تنش‌های سه‌محوره -0.381 ثبت شد.

بر اساس کانتورهای آسیب حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، بیشترین 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.

مراجع

- [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 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.
- [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) (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.

Calibration and validation of a ductile failure model for ST-37 steel under various stress states

Mohsen Mansouri^a, Mehdi Ganjiani^{a1}

^a Department of Mechanical Engineering, University of Tehran

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.

KEYWORDS

Fracture strain, Negative stress triaxiality, Lode angle parameter, ductile fracture behavior, ST-37 steel

¹ Corresponding Author: Email: ganjiani@ut.ac.ir