

Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Stress Triaxiality and Lode Angle Parameter on the Ductile Fracture of 321 Stainless Steel

Mohammad Mazrae Kazemi, Mehdi Ganjiani* , Mohsen Mansouri

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

ABSTRACT: In this study, the effect of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the fracture strain of AISI 321 stainless steel was investigated. Although the influence of stress triaxiality has been extensively studied, the role of the Lode angle parameter remains unclear. This research was conducted with the aim of clarifying these effects in the ductile fracture of AISI 321 stainless steel. To this end, five specimens under tensile loading and two specimens under compressive loading, each with different geometries, were designed and simulated in the ABAQUS software. The specimens were also subjected to experimental tests, and the distributions of strain and stress were recorded up to the point of fracture. A power-law model was employed to define the stress-strain curve, and experimental data were used to calibrate the model. The extracted force-displacement results from both experimental and numerical approaches were found to be in good agreement. The results indicate that stress triaxiality has a direct effect on fracture strain, while the Lode angle parameter exhibits a nonlinear influence on fracture behavior. Moreover, slight changes in specimen geometry can lead to significant variations in the final fracture strain values. Overall, it was found that within a stress triaxiality range of -0.63 to 0.6 and a Lode angle parameter range of -0.78 to 1 , the fracture strain varies from 0.6 to 0.9 .

Review History:

Received: Jun. 15, 2025

Revised: Aug. 15, 2025

Accepted: Aug. 19, 2025

Available Online: Aug. 30, 2025

Keywords:

Stress Triaxiality

Lode Angle Parameter

Fracture Strain

Finite Element Simulation

1- Introduction

Ductile fracture is one of the most important research topics in mechanical and damage mechanics due to its significant role in the design and manufacturing of engineering components. Understanding the mechanisms of ductile failure is essential for achieving higher precision in the production of safer and more reliable parts [1]. In metallic alloys, fracture usually occurs through the nucleation, growth, and coalescence of microscopic voids. These processes are strongly influenced by microstructural features such as inclusions and second-phase particles, as well as by the stress state [2].

The stress state in metals is often characterized by two key parameters: stress triaxiality (η), which is the ratio of hydrostatic stress to equivalent von Mises stress, and the Lode angle parameter ($\bar{\theta}$), which is related to the third invariant of the deviatoric stress tensor [3]. A high positive stress triaxiality promotes void nucleation and accelerates void growth, leading to tensile-dominated fracture, whereas low or negative stress triaxiality is associated with shear-dominated fracture mechanisms. Similarly, the Lode angle parameter controls the transition between shear and tensile fracture modes, thus providing a more complete description of the stress state [4].

Several theoretical and experimental studies have shown that fracture strain decreases exponentially with increasing

stress triaxiality, but stress triaxiality alone is not sufficient to capture the complexity of ductile fracture. Therefore, the combined consideration of stress triaxiality and the Lode angle parameter has been proposed in recent works [5].

Despite these advances, the simultaneous influence of stress triaxiality and the Lode angle parameter on ductile fracture has not been comprehensively investigated for many engineering alloys. In this regard, the current study focuses on 321 austenitic stainless steel, a material widely used in aerospace, petrochemical, and power generation industries due to its excellent oxidation resistance and high-temperature mechanical properties [9]. The aim is to evaluate the combined effect of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the fracture strain of this steel through both experimental tests and finite element simulations, thereby providing more accurate predictive criteria for ductile fracture under multiaxial loading conditions [6].

2- Methodology

In this study, experimental tests were conducted on AISI 321 austenitic stainless steel sheets with a thickness of 4.5 mm. The chemical composition of the alloy was determined using optical emission spectroscopy, confirming its high resistance to oxidation and strength retention at elevated temperatures due to titanium stabilization.

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

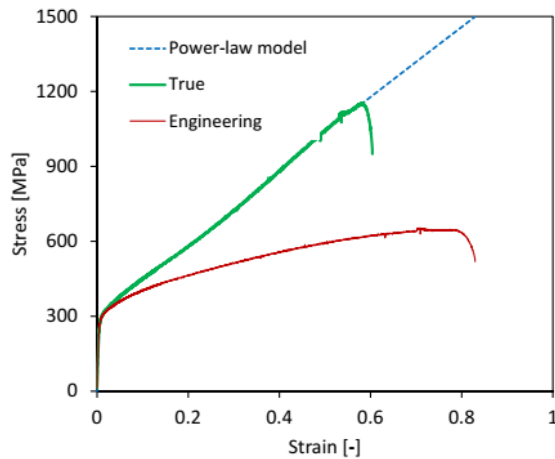


Fig. 1. True stress-strain curve, engineering stress-strain curve, and power-law model

To evaluate the effect of stress triaxiality (ζ) and the Lode angle parameter ($\bar{\theta}$), seven different specimen geometries were designed, including five tensile specimens and two compressive specimens. The tensile specimens consisted of standard dog-bone samples (ASTM E8-13a) and notched samples with various notch angles and depths, while the compressive specimens were cylindrical specimens with flat ends and “butterfly-shaped” geometries. All specimens were fabricated by wire-cutting and milling to ensure dimensional accuracy.

The tests were performed using Instron 8502 (300 kN capacity) for tensile loading and Instron 4208 (250 kN capacity) for compressive loading. A constant displacement rate was applied, equal to 1 mm/min for tensile tests and 3 mm/min for compressive tests, under quasi-static conditions at room temperature. Each test was repeated five times to minimize experimental scatter.

During testing, force-displacement curves were recorded, from which true stress-strain curves were derived. The fracture strain was calculated based on principal strain components at the failure point. Additionally, failure initiation and propagation were monitored, and the experimental data were later used to calibrate the finite element model in Abaqus.

Overall, the experimental procedure provided reliable datasets for evaluating the influence of stress state parameters on ductile fracture behavior, serving as a foundation for subsequent numerical simulations.

3- Discussion and Results

To evaluate the mechanical response of 321 stainless steel, tensile tests were first performed on standard dog-bone specimens, and the obtained load-displacement data were converted into true stress strain curves. A power-law hardening model was then calibrated using these experimental results to describe the plastic behavior of the material. The calibrated

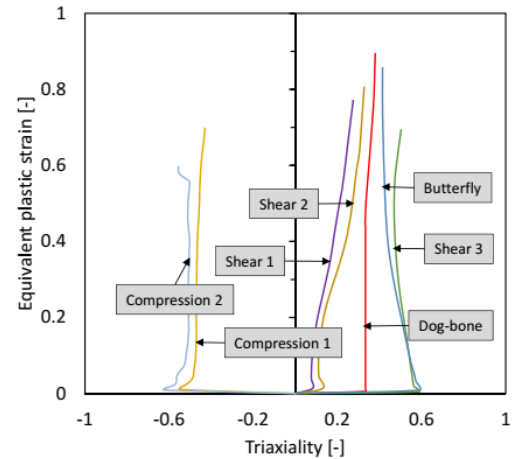


Fig. 2. Plastic strain as a function of triaxial stress in the specimens

parameters were implemented in the finite element model to enable accurate prediction of fracture strain. Finite element simulations were carried out in Abaqus. The geometries of all specimens including dog-bone, shear, butterfly, and compression types were designed in SolidWorks and imported into the FE software. Three-dimensional hexahedral elements were applied, and mesh sensitivity studies confirmed that the chosen element density yielded converged results. For instance, in the butterfly specimen, increasing the element count beyond ~26,000 produced negligible change in the load displacement curve. The material was modeled as isotropic elastic plastic with an elastic modulus of 210 GPa and Poisson's ratio of 0.3. Surface to surface contact with a friction coefficient of 0.35 was considered in compression tests. The diagram of force-displacement and true stress-strain of the Dog-bone specimen of experimental test and numerical simulation can be seen in Figure 1.

In order to represent stress triaxiality and the Lode angle, a critical element in the fracture region was selected, and the corresponding parameter values were tracked throughout the loading process (Figures 2). For the seven investigated specimens, stress triaxiality values were reported within the range of -0.6 to $+0.6$ (Figure 2). The results indicate that as the stress triaxiality increases up to about 0.33, the fracture strain rises monotonically.

As shown in Figure 2, however, the variation of plastic strain with the Lode angle does not follow a uniform trend. Unlike stress triaxiality, which exhibits a relatively stable and monotonic influence, the relationship with the Lode angle is parabolic in nature. Moreover, even small geometric differences among specimens resulted in noticeably different behaviors. As a novel observation, it can be stated that while distinct levels of stress triaxiality were generated in different geometries, the triaxiality parameter itself remained nearly constant during the deformation process, indicating its relative stability under loading.

4- Conclusion

In this study, the effects of stress triaxiality and the Lode angle parameter on the fracture strain of 321 stainless steel were evaluated through numerical simulations and experimental tests. The results revealed that even small changes in notch geometry, such as notch angle or specimen thickness, significantly affected stress triaxiality, Lode angle, and consequently the fracture strain.

At high triaxiality levels, hydrostatic stress dominated the fracture process, while at low triaxiality levels, shear stresses played a more critical role. Pure shear fracture occurred when stress triaxiality was close to zero, indicating the governing influence of the Lode angle in this condition. A nonlinear relationship between triaxiality and fracture strain was observed: the fracture strain increased up to $\eta \approx 0.33$, but beyond this point the trend became unstable, and at $\eta > 0.4$ the strain decreased due to the detrimental effect of hydrostatic stress concentration. Under negative triaxiality (compressive loading), the fracture mechanism shifted to shear failure with a distinct fracture pattern.

Unlike the relatively monotonic effect of triaxiality, fracture strain showed a parabolic and non-uniform dependence on the Lode angle, with more complex geometries (e.g., butterfly specimens or notched samples) exhibiting stronger fluctuations. This highlights the coupled influence of stress triaxiality and the Lode angle on ductile damage, particularly in regions with severe stress and strain localization.

Comparison of experimental and numerical results demonstrated good agreement in the plastic regime. The use of a calibrated power-law constitutive model allowed accurate prediction of fracture behavior up to failure. Overall,

the findings emphasize the necessity of accounting for exact specimen geometry in finite element damage analyses and confirm that simultaneous consideration of stress triaxiality and the Lode angle is essential for reliable prediction of ductile fracture, especially under complex loading paths. These insights can serve as a foundation for developing advanced fracture criteria and designing safer components in critical industries such as aerospace, energy, and petrochemicals.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] M. Basaran, D. Weichert, Stress state dependent damage modeling with a focus on the lode angle influence, *Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Mechanik*, 2011.
- [4] Z. Wang, H. Wang, X. Li, D. Wang, Q. Zhang, G. Chen, Z. Ren, Aluminum and silicon based phase change materials for high capacity thermal energy storage, *Applied Thermal Engineering*, 89 (2015) 204-208.
- [5] W.F. Hosford, R.M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge university press, 2011.
- [6] T. Gu, Z. Wang, P. Ran, A phase field model for ductile fracture considering the strain rate, stress triaxiality and Lode angle parameter, *International Journal of Fracture*, 246(1) (2024) 59-76.



تحلیل تجربی و عددی اثر تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه‌ی لود بر شکست نرم فولاد زنگ نزن ۳۲۱

محمد مزرعه کاظمی، مهدی گنجیانی* , محسن منصوری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:

تنش سه‌محوره
پارامتر زاویه لود
کرنش شکست
شبیه‌سازی اجزای محدود

خلاصه: در این پژوهش، تأثیر تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود بر روی کرنش شکست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه اثر تنش سه‌محوری به‌خوبی مطالعه شده، اما نقش پارامتر زاویه لود و تعامل آن با این تنش همچنان مبهم است. این پژوهش با هدف روشن‌سازی این اثرات در شکست نرم فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ انجام شد. برای این منظور، پنج نمونه تحت بارگذاری کششی و دو نمونه تحت بارگذاری فشاری با هندسه‌های متفاوت طراحی و در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شدند. نمونه‌ها همچنین تحت آزمون‌های تجربی در دمای اتاق و به صورت استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند و توزیع کرنش، تنش و پارامترهای آسیب تا لحظه شکست ثبت گردید. برای مدل‌سازی رفتار ماده، از مدل توانی جهت تعریف منحنی تنش-کرنش و از داده‌های آزمایشگاهی جهت کالیبراسیون مدل استفاده شد. نتایج استخراج شده نیرو-جابجایی در هر دو روش تجربی و عددی با یکدیگر مطابقت دارد. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر تنش سه‌محوره تأثیر مستقیم بر کرنش شکست دارد، در حالی که پارامتر زاویه لود تأثیر غیرخطی بر رفتار شکست از خود نشان می‌دهد. همچنین تغییرات جزئی در هندسه نمونه‌ها منجر به تفاوت قابل‌توجهی در مقادیر نهایی کرنش شکست خواهد شد. در مجموع، مطالعه حاضر بر روی زنگ‌نزن ۳۲۱ نشان می‌دهد که در بازه تنش سه‌محوره -0.63 تا 0.6 و بازه پارامتر زاویه لود -0.78 تا 1 مقدار کرنش شکست از 0.6 تا 0.9 تغییر می‌کند.

۱- مقدمه

جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها می‌شود، در حالی که تنش هیدرواستاتیک فشاری این پدیده را به تأخیر می‌اندازد [۱]. شکست نرم در سه مرحله اتفاق می‌افتد: جوانه‌زنی حفره‌ها، رشد حفره‌ها (ناشی از افزایش تغییرشکل مومسان)، و در نهایت به هم پیوستن حفره‌ها برای ایجاد میکروتکرک‌ها. تنش سه‌محوره^۱ بالا (نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون میزز) سرعت رشد حفره‌ها را در مرحله دوم افزایش می‌دهد و به هم پیوستن آن‌ها در مرحله سوم معمولاً از طریق گلوپی‌شدن داخلی در ناحیه ارتباطی بین حفره‌ها رخ می‌دهد که به نام شکست حفره‌ای شناخته می‌شود. در شرایطی که رشد حفره‌ها کم است، به هم پیوستن آن‌ها از طریق اتصال برشی در راستای تنش برشی حداکثر صورت می‌گیرد و به نام شکست برشی شناخته می‌شود [۲]. بسیاری از مطالعات نظری و تجربی اولیه نشان داده‌اند که تنش سه‌محوره یک پارامتر کلیدی است که شکل‌پذیری مواد فلزی را کنترل می‌کند [۳]. وجود تنش کششی هیدرواستاتیک باعث تسریع در تشکیل، رشد و ادغام حفره‌ها در ماده می‌شود و می‌تواند به ایجاد ترک‌های کلان یا سطح شکست در نمونه

مکانیک آسیب، یکی از مهمترین رویکردهایی است که امروزه در ساخت و تولید قطعات نقش بسزایی دارد. به همین جهت محققین در علم مکانیک شکست و مکانیک آسیب، برای تولید بهتر و دقیق‌تر قطعات، پژوهش‌های گسترده‌ای انجام داده‌اند. امروزه اندازه‌گیری آسیب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران رشته‌های فنی و مهندسی، به ویژه مهندسی مکانیک قرار گرفته است. شکست نرم تا حد زیادی تحت تأثیر جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها قرار دارد. در آلیاژهای صنعتی، معمولاً رسوب‌ها و ذرات فاز دومی وجود دارند که به عنوان مراکز جوانه‌زنی عمل می‌کنند. اگر استحکام فصل مشترک بین ذره و زمینه پایین باشد، پس از تغییرشکل، ذره از زمینه جدا شده و حفره‌ها در محل فصل مشترک ایجاد می‌شوند. حتی اگر استحکام فصل مشترک زیاد باشد، ولی خود ذره ترد و شکننده باشد، جوانه‌زنی حفره‌ها در محل فصل مشترک رخ می‌دهد. مهم است که بدانیم تنش هیدرواستاتیک تأثیر زیادی بر جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها دارد؛ تنش هیدرواستاتیک کششی باعث تسریع

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



منجر شود. مک کلینتاک [۴]، رشد و پیوند دو حفره استوانه‌ای بلند را در یک ماده سخت-پلاستیک تحلیل کرد و نشان داد که رشد حفره‌ها به شدت به تنش سه‌محوره وابسته است. رایس و همکاران [۵]، مدلی نظری برای رشد حفره‌ها کروی در یک ماده سخت-پلاستیک بی‌نهایت تحت تنش کششی هیدرواستاتیک پیشنهاد کردند. تحلیل آن‌ها نشان داد که کرنش شکست ماده به‌طور نمایی با تنش سه‌محوره کاهش می‌یابد. باو و ویربیزی [۶] اولین کسانی بودند که نشان دادند تنش سه‌محوره برای توصیف کامل شکست نرم کافی نیست. در آزمایش‌های آن‌ها، کرنش‌های شکست آلیاژ آلومینیوم تحت حالت‌های برش خالص و فشاری بر روی امتداد منحنی شکست رایس-تریسی قرار نداشتند، با انجام آزمونهای گسترده بر روی آلیاژ آلومینیوم ۳۵۱ تلاش کردند تا مکان هندسی کرنش شکست را در بازه‌های مختلف چند محوری تنش به‌دست آورند و برای بازه‌های مختلف تنش سه‌محوره، رابطه‌ی بین کرنش شکست و تنش سه‌محوره را بدست آوردند. همچنین، با انجام آزمونهای گسترده بر روی آلیاژ آلومینیوم توانستند به صورت همزمان ارتباط کرنش شکست و پارامتر پایای سوم تانسور تنش انحرافی و تنش سه‌محوره را بیان کردند. بارسوم و فالساک [۷] نشان دادند که تنش سه‌محوره به تنهایی نمی‌تواند رشد حفره و سایر رفتارهای متناسب با نرم‌شوندگی و موضعی‌شدن را مشخص نماید. از این رو لازم است، ضریب دیگری به نام پارامتر زاویه لود^۱، در مطالعات شکست نرم به کار گرفته شود. استفاده همزمان تنش سه‌محوره و زاویه لود می‌تواند رفتار مواد نرم را تحت شرایط بارگذاری پیچیده بهتر توصیف کرد. چنگ و همکاران [۸] مدل شکستی را با در نظر گرفتن تغییرات نسبت تنش‌های صفحه‌ای در هنگام بارگذاری و ناهمسانگردی ورق ارائه دادند. آنها همچنین با استفاده از تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود^۲، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها را مدل کردند. معیارهای آسیب نرمی که اخیراً توسعه داده شده‌اند، بر این اساس هستند که کرنش شکست به تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود وابسته است. اثر تنش سه‌محوره در پیش‌بینی آسیب در پژوهش‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته است ولی نقش پارامتر زاویه لود و مکانیزم‌های فیزیکی آن تاکنون به صورت جامع تحلیل نشده است. زو [۹]، مدلی پلاستیک آسیب برای شکست نرم توسعه داد که تأثیرات مشترک فشار هیدرواستاتیک و زاویه لود را لحاظ می‌کند. ژیان پنگ و همکاران [۱۰]، بررسی کردند که زاویه شیب بریدگی در نمونه‌های فلزی تخت تأثیر زیادی بر استحکام و شکل‌پذیری دارد. با افزایش زاویه شیب، حداکثر نیرو کاهش می‌یابد و تنش سه‌محوره کاهش

پیدا کرده و مکان آن از ریشه شکاف به سمت جهت کشش تغییر می‌کند. ژیفان لو و همکاران [۱۱] بررسی کردند که زاویه لود بر شروع شکست در فولادها تأثیر دارد. با استفاده از نمونه‌های با سطح مقطع مستطیلی و مدل‌های اجزای محدود سه‌بعدی، نشان دادند که کرنش شکست با افزایش زاویه لود کاهش می‌یابد و این وابستگی با یک تابع نمایی مشخص می‌شود. ونچلی و همکاران [۱۲]، به بررسی شکست فولاد چینی پرداختند و نشان دادند که مکانیزم‌های شکست در نواحی با تنش سه‌محوره مختلف، متفاوت است. در تنش سه‌محوره برابر با صفر، شکست به صورت برشی است، و با افزایش تنش سه‌محوره، شکل‌پذیری کاهش و شکست به ترکیبی از برش و فضای خالی تبدیل می‌شود. پارامتر زاویه لود نیز به طور قابل توجهی بر کرنش شکست و شکل‌پذیری تأثیر می‌گذارد. اثر زاویه لود با کاهش تنش سه‌محوره بیشتر شده و برای فولادهای با استحکام بالا آشکارتر است. مطالعه‌های بعدی اهمیت پارامتر زاویه لود در شکست ماده را نشان دادند. از آن زمان، معیارهای مختلفی برای شکست نرم پیشنهاد شده‌اند تا تأثیر زاویه لود را در نظر بگیرند. یو و همکاران [۱۳]، یک مدل آسیب ویسکوپلاستیک وابسته به تنش سه‌محوره و اثر زاویه لود پیشنهاد کردند و با انجام آزمون کشش ساده بر روی نمونه‌های گرد صاف و دارای بریدگی با روش ترکیبی عددی-تجربی، پارامترهای مدل را تعیین نمودند. برخی مدل‌های اصلاح شده نیز هستند که مدلسازی شکست را با در نظر گرفتن اثرات تنش سه‌محوره و زاویه لود بهبود داده‌اند. به عنوان مثال، بای و ویربیزی [۱۴] مدل موهر-کلمب را به عنوان ناحیه شکستگی نامتقارن سه‌بعدی، در فضای کرنش شکست معادل، تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود گسترش دادند که نتایج آن قابل قبول‌تر است. نیا و وورال [۱۵] در تحقیقی تأثیر همزمان تنش سه‌محوره و زاویه لود نرمال‌شده را بر شکست شکل‌پذیر آلیاژ آلومینیوم ۲۰۳۹-تی ۸ بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که این دو عامل به طور قابل توجهی بر مقدار کرنش شکست تأثیر می‌گذارند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش تنش سه‌محوره باعث کاهش کرنش شکست می‌شود، در حالی که زاویه لود نرمال‌شده نیز نقش مهمی در رفتار شکست دارد؛ به‌ویژه در شرایط تنش‌های پایین و منفی، زاویه لود نرمال‌شده تغییرات قابل توجهی در شکست ماده ایجاد می‌کند. آن‌ها با توسعه یک مدل جدید و مقایسه آن با مدل‌های موجود، مانند مدل‌های رایس و تریسی (۱۹۶۹) و باوی و ویربیزی (۲۰۱۰)، نشان دادند که مدل پنهادی دقت بهتری در پیش‌بینی شکست در شرایط مختلف تنش و زاویه لود دارد. گنجیانی و منصور [۱۶] اثر سه‌محوره تنش منفی بر کرنش شکست فولاد اس تی ۳۷ با انجام آزمون‌های کشش و

1. Lode angle
2. Lode angle parameter

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۲۱

Table 1. Chemical Composition of Stainless Steel 321

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
۰/۰۲۴	۰/۴۷	۱/۲۰	۰/۰۲۹	۰/۰۰۳	۱۷/۶۷	۰/۰۵	۹/۳۴
Cu	Ti	V	W	N	Al	Co	FE
۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۰۷۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۴۶	۰/۲۴	پایه

۲- روش آزمایش و روابط تئوری

۲-۱- مقدمه

در این آزمایش از ورق استیل زنگ نزن ۳۲۱ با ضخامت ۴/۵ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آن به درصد وزنی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای تعیین ترکیب شیمیایی این استیل از روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) استفاده شده است. فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ یک نوع فولاد آستنیتی است که به دلیل مقاومت بالای آن در برابر دماهای بالا و اکسیداسیون، شناخته شده است. فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ ترکیبی از ویژگی‌های فولاد زنگ‌نزن با مقاومت بهتر در دماهای بالا است. به لطف حضور تیتانیوم، توانایی این فولاد در مقاومت در برابر اکسیداسیون و حفظ استحکام در دماهای بالا، آن را به ماده‌ای با ارزش در صنایعی که به این ویژگی‌ها نیاز دارند، تبدیل می‌کند.

۲-۲- مباحث تئوری

می‌توان وضعیت تنش را با استفاده از تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود توصیف کرد. برای کمی‌سازی تأثیر وضعیت تنش بر کرنش شکست مواد، مفهوم فضای تنش معرفی می‌شود. برای مواد ایزوتروپیک، رفتار مکانیکی مستقل از جهت فضایی است، بنابراین سه مقدار مشخصه تانسور تنش، یعنی تنش‌های اصلی ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) را می‌توان در فضای تنش اصلی سه‌بعدی در نظر گرفت. در همین حال، فضای تنش اصلی متعامد را می‌توان معادل در مختصات لود که یک سیستم مختصات استوانه‌ای است و در آن تنش هیدرواستاتیک محور تقارن است، دوباره تعریف کرد. مختصات لود می‌تواند از سه پارامتر تنش (p, q, r) ساخته شود که به صورت زیر تعریف

فشار، شبیه‌سازی اجزای محدود و روش همبستگی تصویری دیجیتال بررسی و تطابق نتایج تجربی و عددی تأیید شد و هر دو روش تجربی و عددی، با کاهش مقدار سه محوره تنش منفی، ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. وولنوبر و همکاران [۱۷] رفتار دوفازی فولاد دی پی ۸۰۰ را تحت دو مسیر کرنش بررسی کردند: مسیر اول کشش ساده و مسیر دوم ترکیب کشش و خمش. نتایج نشان داد تحت سه‌محوره تنش مثبت، آسیب بیشتری به دلیل افزایش تعداد حفره‌ها ایجاد می‌شود، اما آغاز تغییر شکل با سه‌محوره تنش منفی و ادامه آن با سه‌محوره مثبت، میزان آسیب را کاهش می‌دهد. ژانگ و همکاران [۱۸] با آزمون فشردن شیار هفتی و تحلیل اجزای محدود، دیاگرام شکست کششی فولاد را در بازه تنش سه‌محوری ۰/۵۸ تا ۱/۳۱ ترسیم کردند و نشان دادند رویکردشان رفتار شکست را در هر دو ناحیه تنش مثبت و منفی به‌دقت پیش‌بینی می‌کند.

در این پژوهش، شکست ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ آلیاژی آستنیتی با رفتار پلاستیک متمایز به‌صورت تلفیقی از شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی بررسی شد. بدین منظور پنج نمونه کششی و دو نمونه فشاری در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و سپس آزمون‌های متناظر در دمای اتاق اجرا گردید. تغییر شکل نمونه‌ها از آغاز تا لحظه گسیختگی پایش شد و مؤلفه‌های کلیدی شامل کرنش شکست (ϵ_f)، تنش سه‌محوره (η) و پارامتر زاویه لود ($\bar{\theta}$) برای هر هفت نمونه استخراج گردید. تحلیل نتایج امکان ارزیابی همبستگی بین پارامتر زاویه لود و کرنش شکست را در نمونه‌های ناچدار را فراهم ساخت. هدف اصلی مقاله، تبیین کمی اثر پارامتر زاویه لود بر کرنش شکست و ارائه بینشی برای بهینه‌سازی طراحی اجزاء تحت بارگذاری پیچیده است.

می‌شوند:

استفاده شود. زاویه لود θ از طریق سومین پایای تانسور تنش انحرافی نرمال شده ξ در معادله (۶) تعریف می‌شود [۲۰].

$$\xi = \left(\frac{r}{q}\right)^3 = \cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} = \frac{27}{2} \frac{J_3}{q^3} \quad (۶)$$

محدوده زاویه لود $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ است و در نتیجه محدوده ξ برابر با $-1 \leq \xi \leq 1$ است [۲۱]. پارامتر زاویه لود $\bar{\theta}$ به عنوان زاویه لود بی‌بعد شناخته می‌شود و می‌توان آن را طبق رابطه (۷) بیان کرد.

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos(\xi) \quad (۷)$$

۳- آزمایش تجربی

برای به حداقل رساندن تأثیر ناهمسانگردی در آزمایش‌های فعلی، تمام نمونه‌ها در جهت نورد ماشین‌کاری شدند، به‌طوری که جهت کشش یا فشار با جهت نورد صفحه نورد سرد هم راستا باشد. برای آزمایش‌های کشش از دستگاه بارگذاری الکترومکانیکی اینسترون ۸۵۰۲ با ظرفیت ۳۰۰ کیلونیوتن استفاده شد (شکل ۱)، در حالی که آزمایش‌های فشار با استفاده از دستگاه اینسترون ۴۲۰۸ با ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن انجام گرفت (شکل ۲). تمام آزمایش‌ها تحت شرایط شبه استاتیکی با نرخ جابجایی ثابت انجام شدند. برای انجام آزمایش‌های کشش نرخ جابجایی برابر با ۳ میلی متر بر دقیقه و در آزمایش‌های فشار نرخ جابجایی برابر با ۱ میلی متر بر دقیقه انجام شد. برای کاهش خطا و افزایش دقت، آزمون برای هر نمونه پنج بار تکرار شد.

در این پژوهش، از هفت نمونه برای تست‌های تجربی استفاده شد تا بازه‌ای از تنش سه‌محوره مثبت و منفی حاصل شود. برای انجام تست‌های کششی از پنج نمونه با هندسه‌های مختلف بهره گرفته شد. یکی از این نمونه‌ها به شکل دمبلی طراحی شده است. ابعاد نمونه دمبلی شکل طبق استاندارد انجمن آزمایش و مواد آمریکا^۳ طراحی شد و از طریق آزمون کشش ساده، خواص مکانیکی آن به دست آمد [۲۲]. سه نمونه دیگر دارای هندسه‌ای شبیه به هم اما با شیارهای متفاوت هستند؛ این تفاوت در زاویه و اندازه ناحیه ناچ آن‌ها است که موجب تفاوت‌هایی در نمودارهای نیرو-جابجایی و تنش-کرنش می‌شود. همچنین، دو نمونه با هندسه مستطیلی و کلاهد-مانند برای تست فشار طراحی و شبیه‌سازی شد تا تحت شرایط

$$p = -\sigma_m = -\frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۱)$$

$$q = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (۲)$$

$$r = \left[\frac{27}{2} \det(\mathbf{S}) \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_3 - \sigma_m) \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{27}{2} J_3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} + p\mathbf{I} \quad (۴)$$

در این روابط، σ_m تنش هیدرواستاتیک، $\bar{\sigma}$ یا q تنش معادل فون میز، J_2 دومین ناوردای تنش انحرافی^۱، J_3 (یا به عبارتی r) سومین ناوردای تنش انحرافی^۲، $\mathbf{S}$ تانسور تنش انحرافی، $\mathbf{I}$ تانسور همانی واحد و σ تانسور تنش است. مقدار پارامتر p در فشار مثبت است، اما σ_m در کشش مثبت است. تنش سه‌محوره (η) یک پارامتر مهم برای ارزیابی محدودیت پلاستیک است همچنین یک پارامتر بدون بعد است و در مدل آسیب پلاستیک در نظر گرفته می‌شود، که به‌صورت نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش معادل فون میز در معادله (۵) تعریف می‌شود [۱۹].

$$\eta = -\frac{p}{q} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\bar{\sigma}} \quad (۵)$$

بسیاری از مشاهدات تجربی و مطالعات عددی نشان داده‌اند که تأثیر حالت تنش بر رفتار شکست را نمی‌توان تنها با تنش سه‌محوره در تعیین معادله ساختاری آسیب مواد نرم به‌طور کامل منعکس کرد. بنابراین، تنش سه‌محوره به تنهایی برای توصیف کامل حالت تنش کافی نیست و باید از پارامتر زاویه لود که به حالت تنش انحرافی مرتبط است، به‌طور مشترک

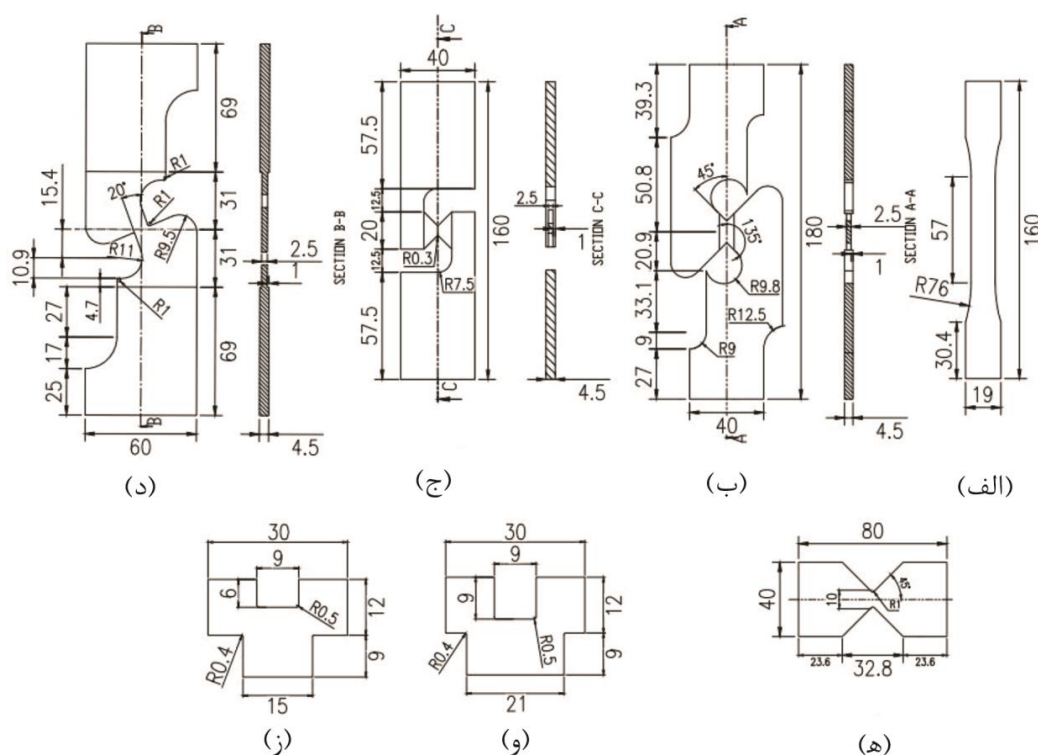
1. Second invariant of deviatoric stress
2. Third invariant of deviatoric stress

3. ASTM-E8-13a



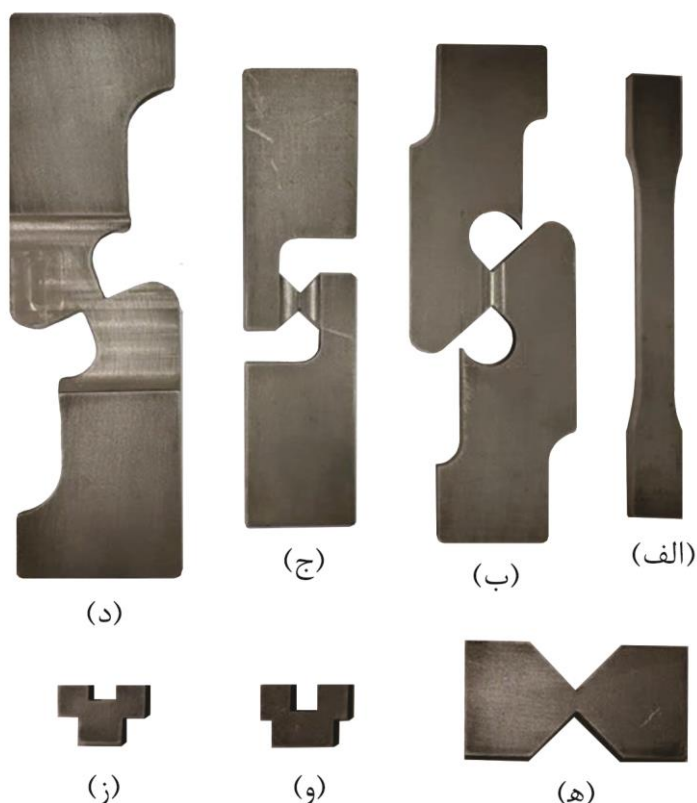
شکل ۱. نمایی از دستگاه‌های تست (الف) کشش اینسترون ۸۵۰۲ و (ب) فشار اینسترون ۴۲۰۸.

Fig. 1. A view of the testing devices: a) Instron 8502 tension and b) Instron 4208 compression.



شکل ۲. نقشه ساخت (الف) نمونه دمبلی، (ب) نمونه برشی ۱، (ج) نمونه برشی ۲، (د) نمونه برشی ۳، (ه) نمونه پروانه ای، (و) نمونه فشاری ۱، (ز) نمونه فشاری ۲.

Fig. 2. Manufacturing drawing of (a) dog-bone specimen, (b) shear specimen 1, (c) shear specimen 2, (d) shear specimen 3, (e) butterfly specimen, (f) compression specimen 1, (g) compression specimen 2.



شکل ۳. هندسه های ساخته شده (الف) نمونه دمبلی، (ب) نمونه برشی ۱، (ج) نمونه برشی ۲، (د) نمونه برشی ۳، (ه) نمونه پروانه ای، (و) نمونه فشاری ۱، (ز) نمونه فشاری ۲.

Fig. 3. Fabricated geometries of (a) dog-bone specimen, (b) shear specimen 1, (c) shear specimen 2, (d) shear specimen 3, (e) butterfly specimen, (f) compression specimen 1, (g) compression specimen 2.

یکی از خواص مهم مکانیکی، کرنش شکست است که نشان‌دهنده حداکثر میزان کرنشی است که ماده تحت تنش می‌تواند قبل از شکست تحمل کند. این کرنش در تمامی جهات بر ماده وارد می‌شود و به صورت معادله زیر بیان می‌گردد [۲۳]:

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (8)$$

در این رابطه، ε_f نشان‌دهنده کرنش معادل ماده است و ε_1 ، ε_2 و ε_3 به ترتیب کرنش‌های اصلی ایجادشده در لحظه شکست می‌باشند. همچنین، تنش واقعی ماده از طریق روابط تحلیلی زیر محاسبه شد:

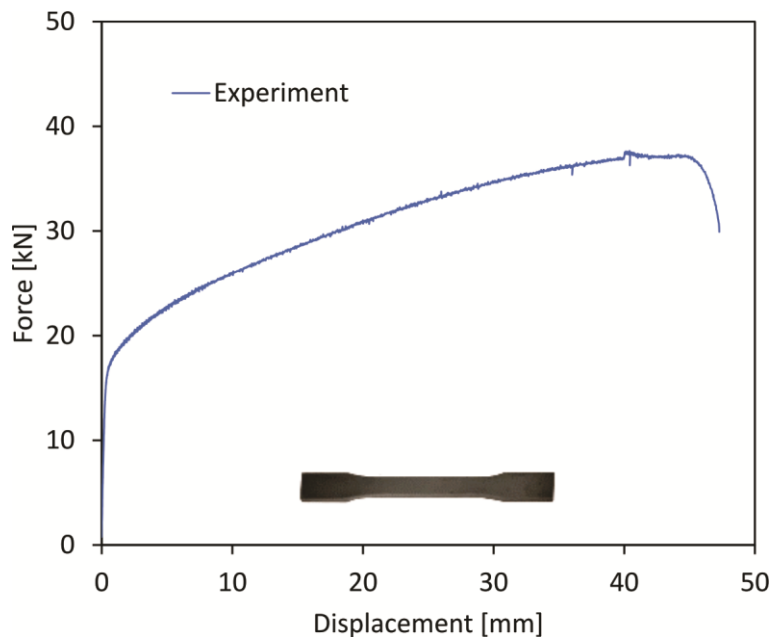
$$\sigma_1^{true} = \left(\frac{F}{A_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (9)$$

فشاری نیز داده‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند. ضخامت این نمونه ۴/۵ میلی‌متر است. تمامی نمونه‌ها طبق شکل ۳ در نرم سالی‌دورک طراحی و با استفاده از روش برشکاری وایرکات برش زده شده‌اند. همچنین برای هر سه نمونه برشی با استفاده از دستگاه فرز، در ناحیه ناچ هر سه نمونه از بالا و پایین به اندازه یک میلی‌متر لایه برداری شد. نمونه‌های تهیه شده در نهایت مطابق شکل ۴ می‌باشد.

۴- تحلیل عددی

۴-۱ رفتار مکانیکی ماده

برای تعیین خواص مکانیکی ماده از تست کشش روی نمونه‌ای دمبلی‌شکل با ابعاد مشخص‌شده در شکل ۳ استفاده شد. داده‌های نیرو-جابجایی به دست‌آمده از این آزمایش (شکل ۴) برای استخراج نمودار تنش-کرنش حقیقی مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۵). این نمودار با استفاده از روابطی که در ادامه ذکر خواهد شد، محاسبه شد.



شکل ۴. منحنی نیرو-جابجایی نمونه استاندارد تست کشش (دمبلی شکل).

Fig. 4. Force-Displacement Curve of the Standard Tensile Test Specimen (Dog-Bone Shaped).

توانست رفتار تنش-کرنش ماده را برای کشش تک‌محوری توصیف کند. این رابطه برای توصیف منحنی تنش-کرنش قبل از گلوپی شدن استفاده شده که می‌توان آن را بصورت زیر بیان کرد:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\varepsilon_p)^n \quad (11)$$

که در آن σ_0 تنش تسلیم، K ضریب استحکام، ε_p کرنش پلاستیک و n توان سخت‌شوندگی است [۲۴]. ثوابت پارامترهای معادله (۱۱) که برای تطابق نمودارهای شبیه‌سازی با تجربی مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۲ آمده است.

۴-۲- مدل اجزاء محدود

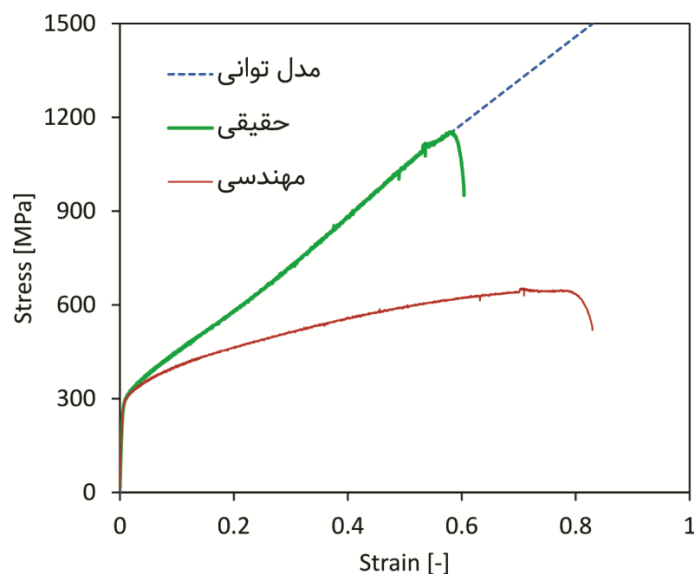
تحلیل نمونه‌های آزمایش‌شده با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شد. برای تحلیل و آنالیز نمونه‌ها، توجه به تعریف دقیق خواص و ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده ضروری است. در این مطالعه، برای تعیین خواص ماده، یک نمونه دمبلی شکل تحت تست کششی قرار گرفت و خواص مکانیکی آن استخراج شد. بر اساس نتایج آزمایش،

کرنش حقیقی نیز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{true} &= \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \\ \varepsilon_3^{true} &= \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه (۹) σ_1^{true} تنش واقعی، F نیروی کششی و A_0 حداقل سطح مقطع اولیه است. ΔL تغییرات طول و L_0 طول اولیه نمونه مورد آزمایش هستند. در رابطه (۱۰) نیز ε_1^{true} کرنش واقعی می‌باشد. در رابطه (۸)، ε_1^{true} کرنش حقیقی در راستای محور بارگذاری است که از معادله (۱۰) به‌دست می‌آید. کرنش‌های حقیقی ε_2^{true} و ε_3^{true} به‌صورت غیرمستقیم از قانون پواسون و با استفاده از تغییرات ابعادی نمونه در جهات عرضی محاسبه می‌شوند، در این مطالعه مقدار کرنش معادل از قسمت شبیه‌سازی استخراج شده است.

برای ایجاد تطابق بین نمودارهای تجربی با عددی از رابطه توانی، در توصیف رفتار تنش-کرنش فولاد زنگ نزن ۳۲۱ استفاده شد به نحوی که



شکل ۵. منحنی تنش-کرنش حقیقی، مهندسی و مدل توانی.

Fig. 5. True Stress-Strain, Engineering Stress-Strain, and Power-Law Model Curves.

جدول ۲. ثوابت رابطه توانی برای بیان سخت‌شوندگی فولاد ۳۲۱.

Table 2. Constants of the power-law relation for representing the work hardening of 321 steel.

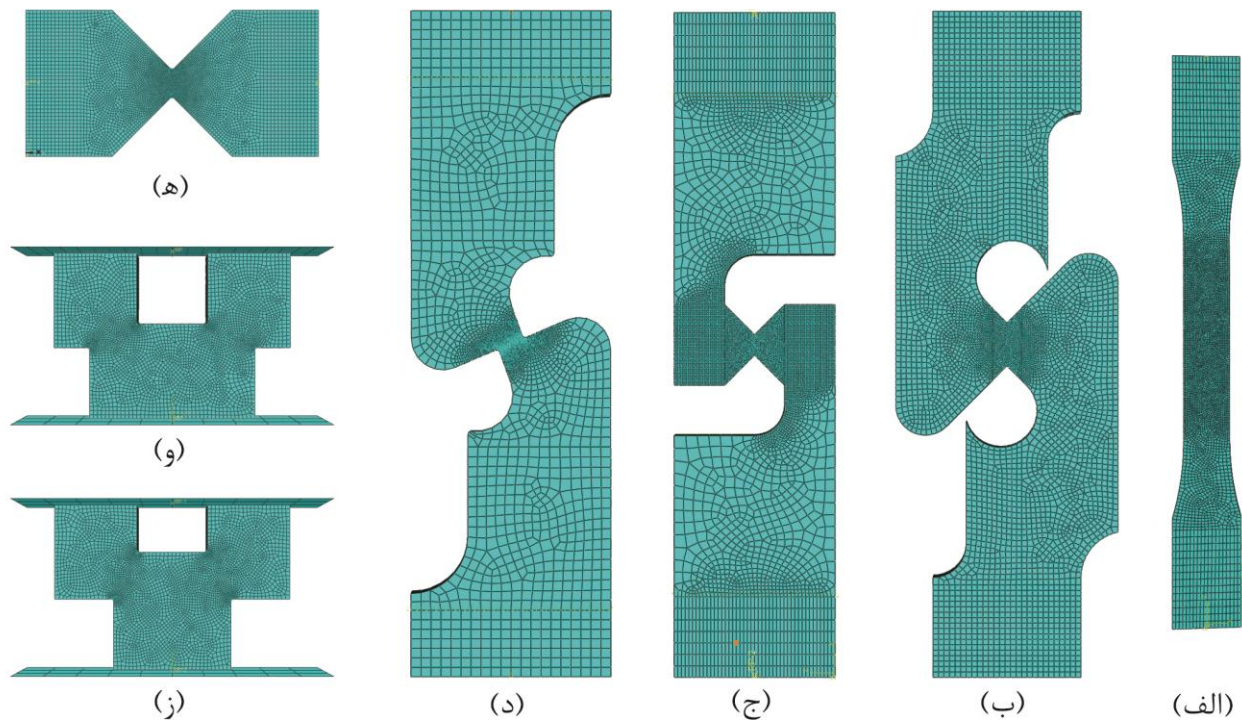
σ_0 (MPa)	K (MPa)	n
۲۸۵	۱۴۵۰	۰/۹۵

بالای ۲۶۰۰۰ نمودار همگرا می‌شود.

برای شرایط مرزی در نمونه‌های تحت کشش، دو سر نمونه به دلیل قرار گرفتن در فک به عنوان تکیه‌گاه در نظر گرفته شده و کشش تنها در یک جهت اعمال می‌گردد. در نمونه‌های فشاری نیروهای اعمالی به صفحات بالا و پایین نمونه وارد شد. همچنین برای تماس بین صفحات و نمونه در محیط تماس با ضریب اصطکاک ۰/۳۵ تعریف شد. در این تحلیل بارگذاری به‌صورت استاتیکی انجام شده است. در این مدل نرم‌افزاری، از تأثیرات دمایی و نرخ کرنش صرف‌نظر شده است. برای تعریف پارامترهای آسیب نرم، از تنش سه‌محوره و کرنش شکست به دست آمده از آزمایش‌های تجربی مطابق جدول ۳ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، داده‌های تجربی و عددی هم‌خوانی مناسبی دارند که این تطابق تا محدوده انتهای ناحیه پلاستیک ماده ادامه یافته است. برای ارزیابی بهتر

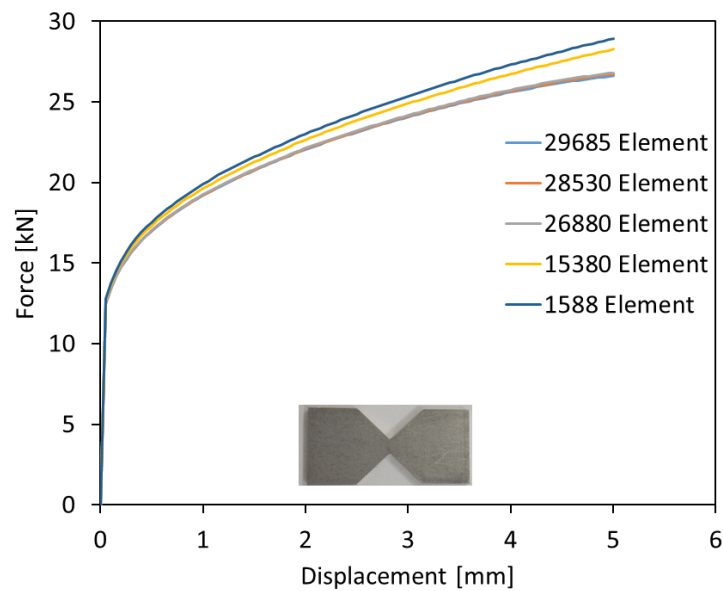
مدول الاستیک نمونه برابر ۲۱۰ گیگاپاسکال به دست آمد و ضریب پواسون مقدار ۰/۳ فرض شد [۲۵]. جهت تعریف خواص پلاستیک ماده، از داده‌های تنش-کرنش حقیقی استفاده گردید که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش تجربی تهیه شده بودند. این داده‌ها به نرم‌افزار معرفی شده و به عنوان ورودی در تحلیل‌های عددی اعمال شدند.

در شبیه‌سازی از المان هگزاگونال سه‌بعدی استفاده شده است. در مرحله بعد، المان‌بندی برای تمامی نمونه‌ها همانند شکل ۶ انجام شد که برای نمونه پروانه‌ای، نمودار همگرایی المان رسم شده است. برای اطمینان یافتن از مناسب بودن تعداد المان‌ها، مدل‌سازی‌های متعددی با تعداد المان‌های گوناگون انجام شد تا همگرایی المان بررسی شود. مولفه انتخابی برای مقایسه تأثیر تعداد المان‌ها، مقدار نیرو جابجایی بود. مطابق شکل ۷ که نمودار همگرایی نمونه پروانه‌ای را توصیف می‌کند، برای تعداد المان‌های



شکل ۶. نمونه‌های المان‌بندی شده در آباکوس (الف) دمبلی، (ب) برشی ۱، (ج) برشی ۲، (د) برشی ۳، (ه) پروانه‌ای، (و) فشاری ۱، (ز) فشاری ۲.

Fig. 6. Meshed specimens in Abaqus: (a) dog-bone, (b) shear 1, (c) shear 2, (d) shear 3, (e) butterfly, (f) compression 1, (g) compression 2.



شکل ۷. بررسی همگرایی المان در مدل‌سازی نمونه‌ی پروانه‌ای.

Fig. 7. Mesh convergence study for the butterfly specimen model.

جدول ۳. وابستگی کرنش شکست به تنش سه‌محوره برای شبیه‌سازی آسیب نرم.

Table 3. Dependence of fracture strain on stress triaxiality for ductile damage simulation.

کرنش شکست	تنش سه‌محوره
۰/۲۱۱	-۰/۱۷۹
۰/۱۹	-۰/۱۲
۰/۶۲۸	-۰/۱۹۱
۰/۶۹	۰/۲۵۲
۰/۴۴۱	۰/۳۳۳
۰/۶۵۷	۰/۴۴
۰/۴۳۶	۰/۴۸

جدول ۴. میزان درصد اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی در ناحیه شکست.

Table 4. Percentage difference between experimental and numerical data in the fracture region.

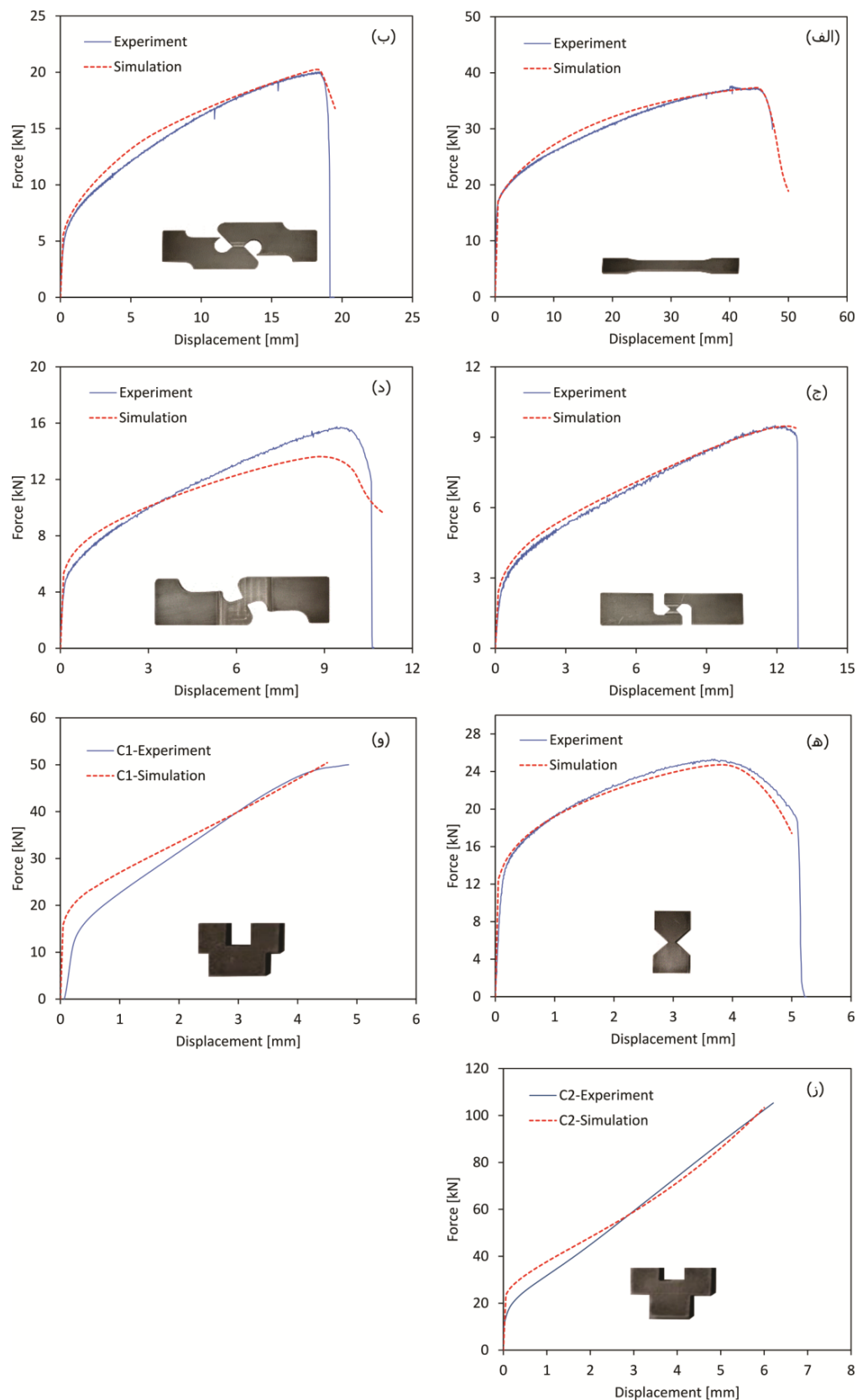
درصد اختلاف در نیرو	نمونه
۰/۶۹	دمبلی
۱/۲۱	برشی ۱
۱/۷۱	برشی ۲
۹/۳۲	برشی ۳
۱/۶۴	پروانه‌ای
۰/۴۳	فشاری ۱
۰/۱۹	فشاری ۲

نواحی نزدیک به شیارها به‌وضوح قابل مشاهده است. بیشینه تنش سه‌محوره در اطراف ریشه ناچ رخ می‌دهد که به‌عنوان نقطه آغاز جوانه‌زنی حفره‌ها عمل می‌کند. توزیع تنش سه‌محوره در برخی نواحی نوسان دارد که به هندسه شیار (زاویه و عمق) وابسته است. برای نمونه پروانه‌ای ناحیه تمرکز تنش سه‌محوره در مرکز نمونه مشاهده می‌شود. برای نمونه‌های فشاری مقادیر تنش سه‌محوره در این نمونه‌ها منفی است که کاملاً با ماهیت بارگذاری فشاری سازگار است. مقادیر تنش سه‌محوره در نواحی تماس نمونه با فک دستگاه تست بیشینه است، جایی که احتمال تمرکز تنش فشاری و آغاز شکست برشی بیشتر است. توزیع تنش سه‌محوره در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های کششی گسترده‌تر و غیرمتمرکزتر است، که از تفاوت در مکانیزم‌های شکست فشاری ناشی می‌شود.

شکل ۱۰ میزان پیشرفت محلی کرنش پلاستیک معادل تحت بارگذاری‌های مختلف را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۰ می‌توان در هر نمونه، منطقه شروع آسیب و شکست را پیش‌بینی کرد. برای نمونه دمبلی شکل

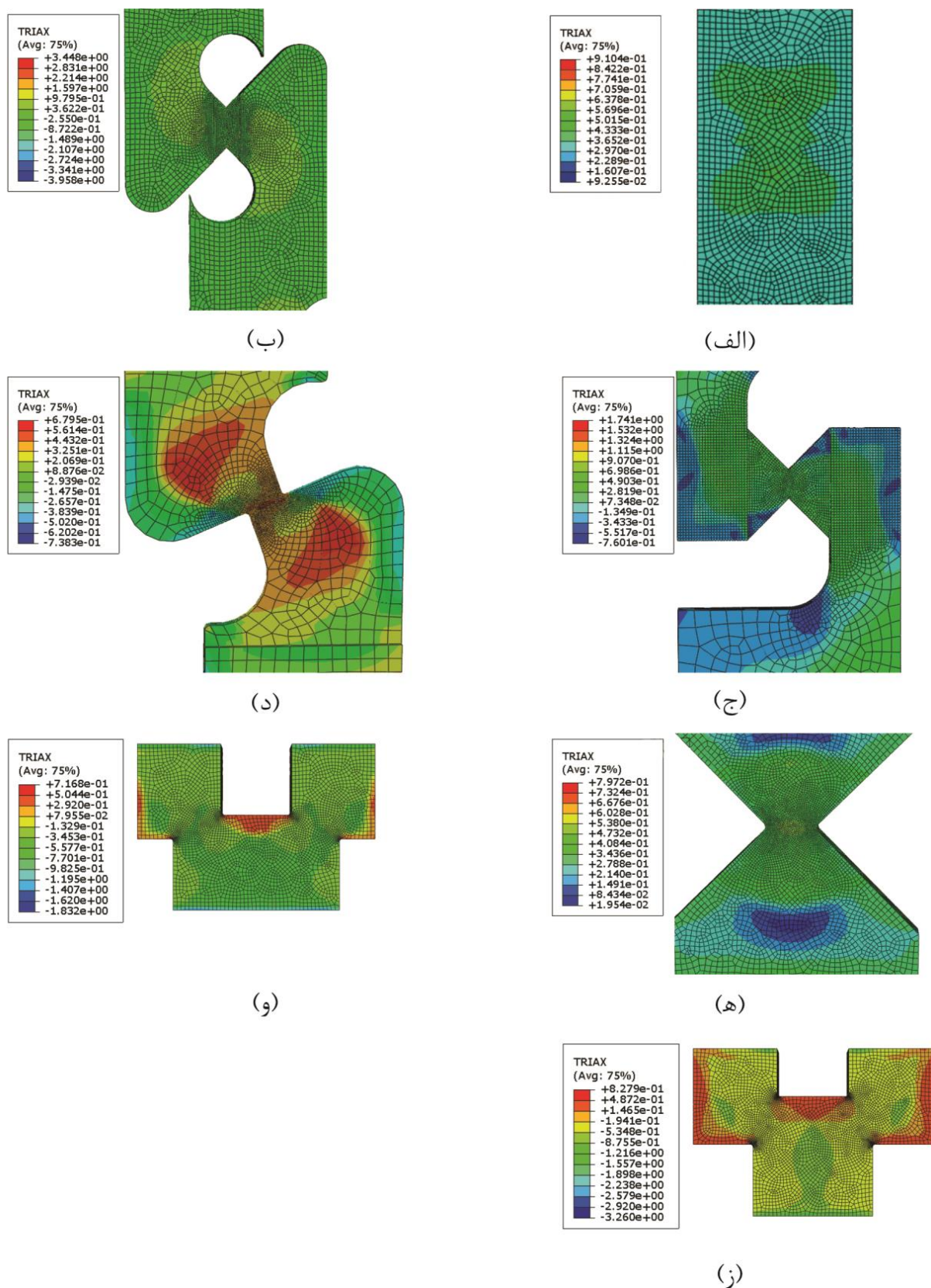
میزان درصد اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی در ناحیه شکست در جدول ۴ ارائه شده است.

در شکل ۹ توزیع تنش سه‌محوره (۱۷) را در هفت نمونه مختلف، شامل نمونه‌های کششی (دمبلی، برشی ۱ تا ۳، پروانه‌ای) و نمونه‌های فشاری (۱ و ۲)، نشان می‌دهد. تنش سه‌محوره یک شاخص بی‌بعد است که نقش مهمی در مکانیزم‌های شکست نرم بازی می‌کند. این پارامتر نشان‌دهنده نسبت حالت کششی یا فشاری به تنش کلی موثر در نمونه است. مقدار تنش سه‌محوره مثبت، حاکی از غلبه تنش کششی (احتمال رشد حفره و شکست نرم)، و مقدار منفی، بیانگر غالب بودن تنش‌های فشاری (تمایل به شکست برشی) است. برای نمونه دمبلی توزیع تنش سه‌محوره در راستای محور مرکزی نسبتاً متقارن و یکنواخت است. بیشینه تنش سه‌محوره در ناحیه گلویی شدن مشاهده می‌شود. تنش سه‌محوره با نزدیک شدن به ناحیه شکست به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده مکانیزم شکست کششی کلاسیک است. برای نمونه‌های برشی تمرکز تنش سه‌محوره در



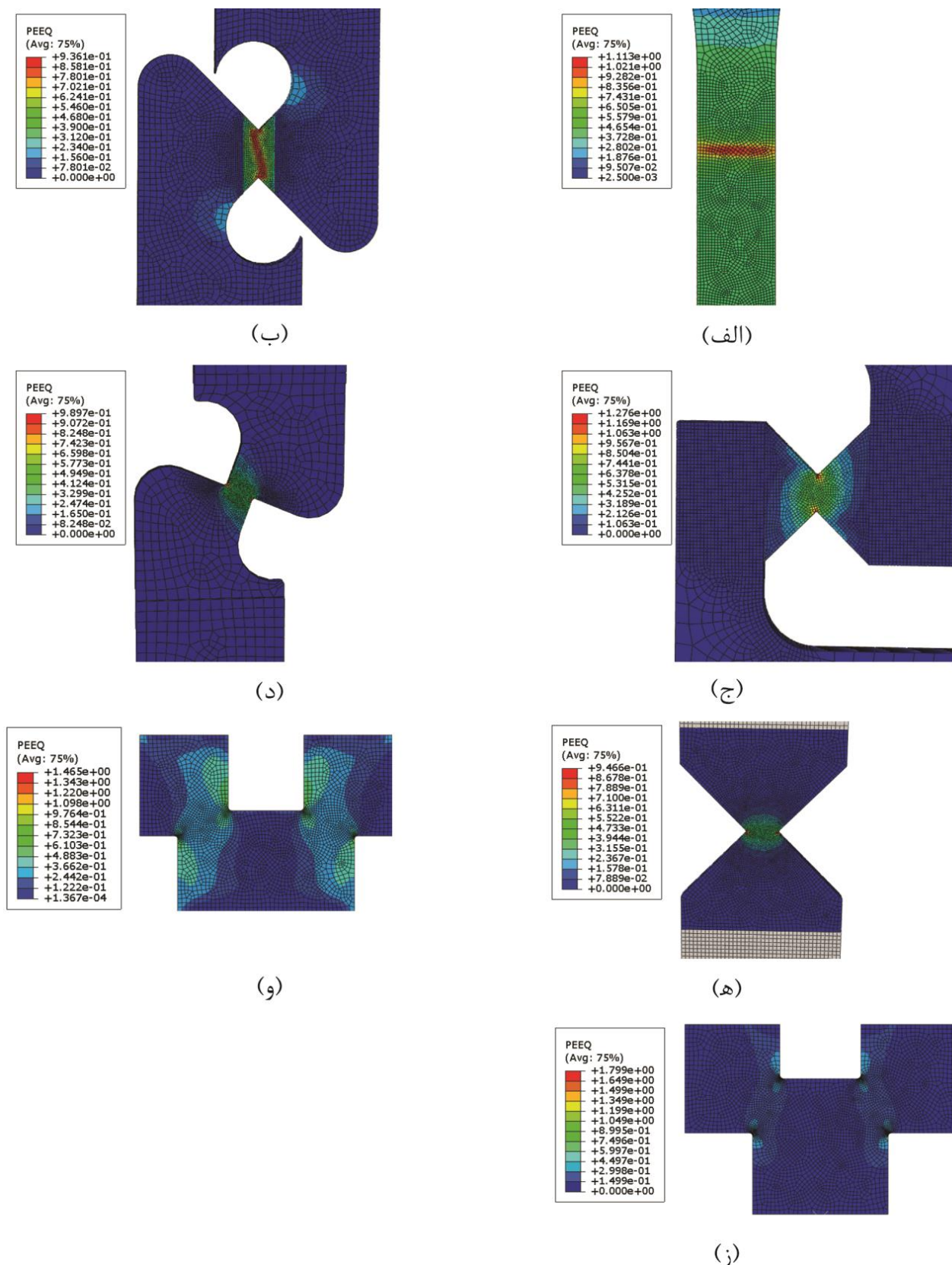
شکل ۸. نمودارهای نیرو جابجایی (الف) دمبلی، (ب) برشی ۱، (ج) برشی ۲، (د) برشی ۳، (ه) پروانه ای، (و) فشاری ۱، (ز) فشاری ۲.

Fig. 8. Force-displacement diagrams of (a) dog-bone, (b) shear 1, (c) shear 2, (d) shear 3, (e) butterfly, (f) compression 1, (g) compression 2.



شکل ۹. توزیع تنش سه محوره در نمونه‌های (الف) دمبلی، (ب) برشی ۱، (ج) برشی ۲، (د) برشی ۳، (ه) پروانه ای، (و) فشاری ۲، (ز) فشاری ۱.

Fig. 9. Stress triaxiality distribution in (a) dog-bone, (b) shear 1, (c) shear 2, (d) shear 3, (e) butterfly, (f) compression 2, (g) compression 1 specimens.



شکل ۱۰. توزیع کرنش پلاستیک (الف) دمبلی، (ب) برشی ۱، (ج) برشی ۲، (د) برشی ۳، (ه) پروانه ای، (و) فشاری ۲، (ز) فشاری ۱.

Fig. 10. Plastic strain distribution in (a) dog-bone, (b) shear 1, (c) shear 2, (d) shear 3, (e) butterfly, (f) compression 2, (g) compression 1 specimens.

زاویه لود با نرمی بیشتر و شکست کششی همبستگی دارند. این یافته‌ها ضرورت استفاده همزمان از پارامترهای سهمحوری تنش و زاویه لود را برای پیش‌بینی دقیق شکست نرم تحت بارگذاری‌های پیچیده تأیید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای تنش سهمحوره و زاویه لود بر کرنش شکست فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ از طریق شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل نتایج منجر به استنتاج‌های کلیدی زیر گردید: نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که تغییرات کوچک در هندسه شیار، مانند تغییر زاویه، اثر قابل‌توجهی بر تنش سهمحوره و زاویه لود دارد و به تبع آن، مقادیر کرنش شکست تغییر می‌کند. علاوه بر این، رفتار کرنش در بازه‌های مختلف تنش سهمحوره و زاویه لود متفاوت بود. در تنش سهمحوره‌های بالا، تنش هیدرواستاتیک نقش غالب را در شکست ماده داشت، در حالی که در تنش سهمحوره‌های پایین، حالت تنش برشی مؤثرتر بود. شکست برشی زمانی رخ داد که تنش سهمحوره برابر صفر باشد، که نشان می‌دهد در این حالت، زاویه لود عامل غالب بر شکست ماده است. رابطه‌ای غیرخطی میان تنش سهمحوره و کرنش مشاهده شد. با افزایش تنش سهمحوره تا حدود $0/33$ ، کرنش شکست به‌طور یکنواخت افزایش یافت، اما پس از این مقدار روند تغییرات ناپایدار شد. در محدوده‌های بالای تنش سهمحوره (بیش از $0/4$)، کرنش شکست کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر منفی تمرکز شدید تنش هیدرواستاتیک بر تضعیف ماده و آغاز زود هنگام شکست نرم است. در شرایطی که تنش سهمحوره به مقادیر منفی میل می‌کند (بارگذاری فشاری)، مکانیزم شکست به حالت برشی تغییر یافته و الگوی گسیختگی متفاوتی مشاهده شد.

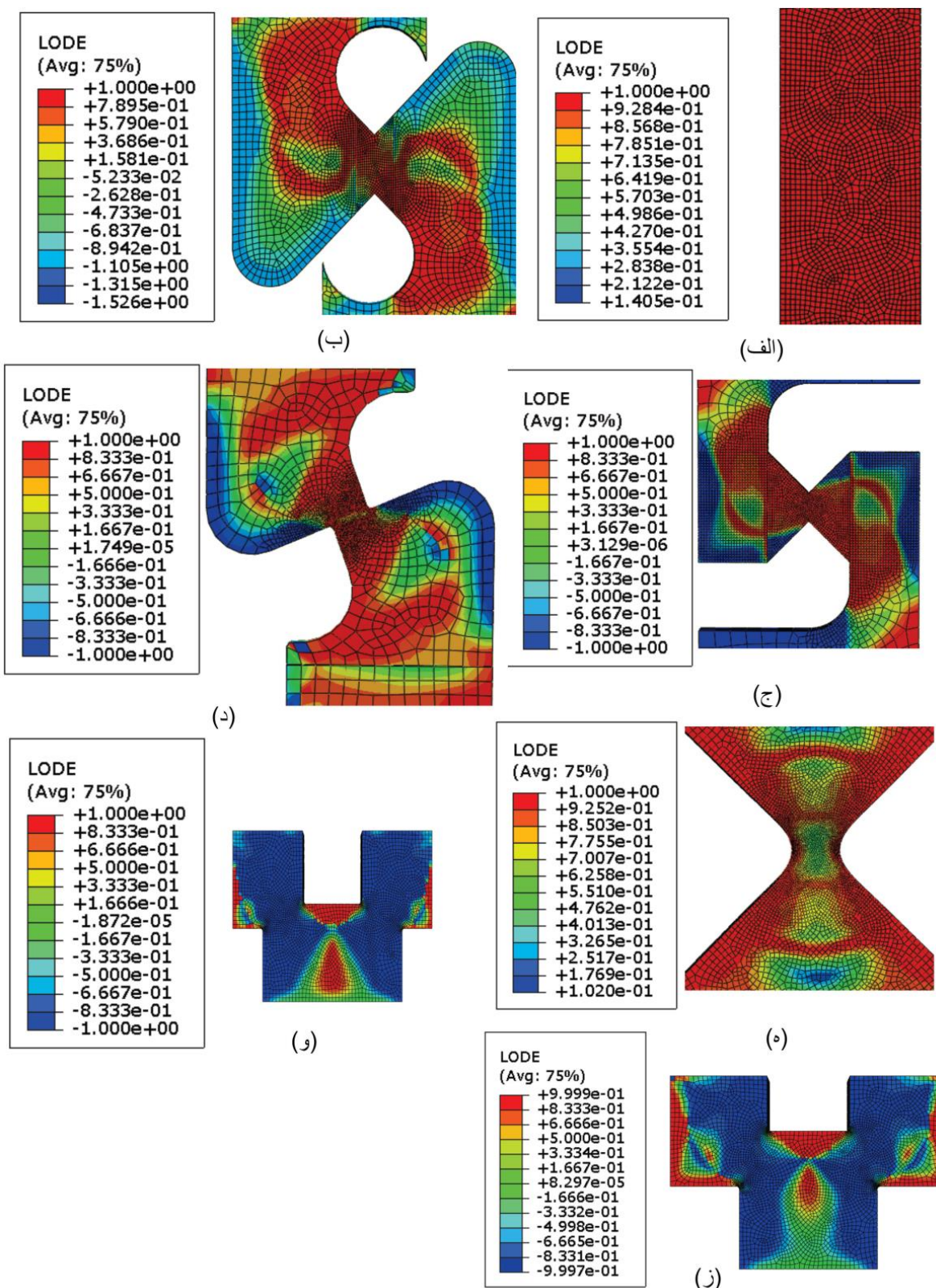
برخلاف تنش سهمحوره که روندی نسبتاً مشخص داشت، تغییرات کرنش شکست نسبت به زاویه لود تابعی سهموی و غیریکنواخت نشان داد. نمونه‌هایی با هندسه پیچیده‌تر (مانند نمونه‌های پروانه‌ای یا با ناچ) نوسانات شدیدتری در مقدار زاویه لود و در نتیجه در کرنش شکست از خود نشان دادند. این موضوع حاکی از تأثیر همزمان و متقابل پارامترهای تنش سهمحوره (η) و زاویه لود ($\bar{\theta}$) بر مکانیزم آسیب ماده، به ویژه در نواحی با تمرکز تنش و کرنش بالا، است.

با مقایسه داده‌های تجربی و تئوری انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی در حوزه رفتار پلاستیک مشاهده شد. استفاده از مدل توانی برای تعریف منحنی تنش-کرنش و تعریف دقیق پارامترهای شکست

(شکل ۱۰الف) نشان می‌دهد که شکست از مرکز شروع می‌شود و به خرابی کلی نمونه ختم می‌شود. برای نمونه برشی هم همانند نمونه دمبلی شکست از مرکز نمونه شروع می‌شود (شکل ۱۰ب). برای مابقی نمونه‌ها کانتور پلاستیک نشان می‌دهد که شکست از ناحیه ناچ‌دار شروع می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی می‌تواند بخوبی نتایج آزمایشگاهی دوبعدی را پیش‌بینی نماید و در نتیجه از مدل‌های عددی می‌توان به منظور محاسبه کرنش پلاستیک محلی معادل در لحظه شکست در نمونه‌های مختلف نیز استفاده نمود.

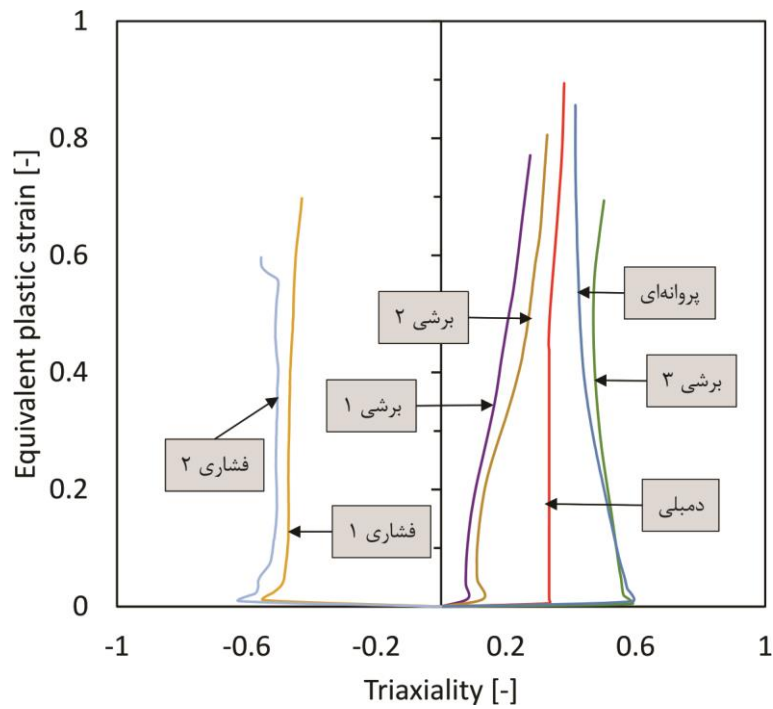
برای بیان تنش سهمحوره و زاویه لود، المان بحرانی در ناحیه شکست انتخاب شده و مقادیر پارامترهای مرتبط با آن در طول بارگذاری به تصویر کشیده شده است (شکل ۱۲ و شکل ۱۳). در هفت نمونه مورد بررسی، مقادیر تنش سهمحوره در محدوده‌ای از $-0/6$ تا $0/6$ گزارش شده‌اند (شکل ۱۲). نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقدار تنش سهمحوره تا $0/33$ ، کرنش شکست به‌طور صعودی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تغییرات کرنش پلاستیک با زاویه لود به‌صورت یکنواخت نیست و برخلاف تنش سهمحوره، روند ثابتی ندارد و به شکل سهموی تغییر می‌کند. همچنین، هندسه‌های نمونه‌ها با تغییرات جزئی، رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده‌اند. همچنین به‌عنوان یک نوآوری، می‌توان به این نکته اشاره کرد که در کنار ایجاد سهمحوره‌های متفاوت، پارامتر تنش سهمحوره نوسانات قابل توجهی در هنگام تغییر شکل نداشته است و می‌توان گفت که این پارامتر در هنگام بارگذاری مقداری ثابت داشته است.

شکل ۱۱ کانتور زاویه لود را نشان می‌دهد. زاویه لود در آباکوس به‌صورت یک خروجی میانی بر اساس تنسور تنش محاسبه و برای هر المان در هر مرحله بارگذاری ارائه می‌شود. در این نتایج، کانتورهای زاویه لود در لحظه شکست یا نزدیک به آن برای هندسه‌های مختلف نمونه رسم شده‌اند. مقادیر زاویه لود بین -1 تا $+1$ تغییر می‌کند و ماهیت حالت تنش را مشخص می‌نماید. بررسی کانتورهای زاویه لود برای هفت هندسه مختلف نشان داد که تغییر شکل نمونه‌ها با حالت‌های تنش متفاوتی همراه است؛ از کشش محوری ($Lode \approx 1$) در نمونه‌های کششی بدون ناچ تا برش و فشار محوری ($Lode \approx 0$ تا -1) در نمونه‌های فشاری. این تغییرات بیانگر آن است که هندسه نمونه به‌طور غیرمستقیم، از طریق تغییر توزیع پارامتر زاویه لود، بر مکانیزم شکست و مقدار کرنش شکست تأثیر می‌گذارد. هرچه زاویه لود به سمت مقادیر منفی (برشی یا فشاری) حرکت می‌کند، کرنش شکست کاهش یافته و رفتار شکست تردتر می‌شود، در حالی که مقادیر مثبت بالاتر



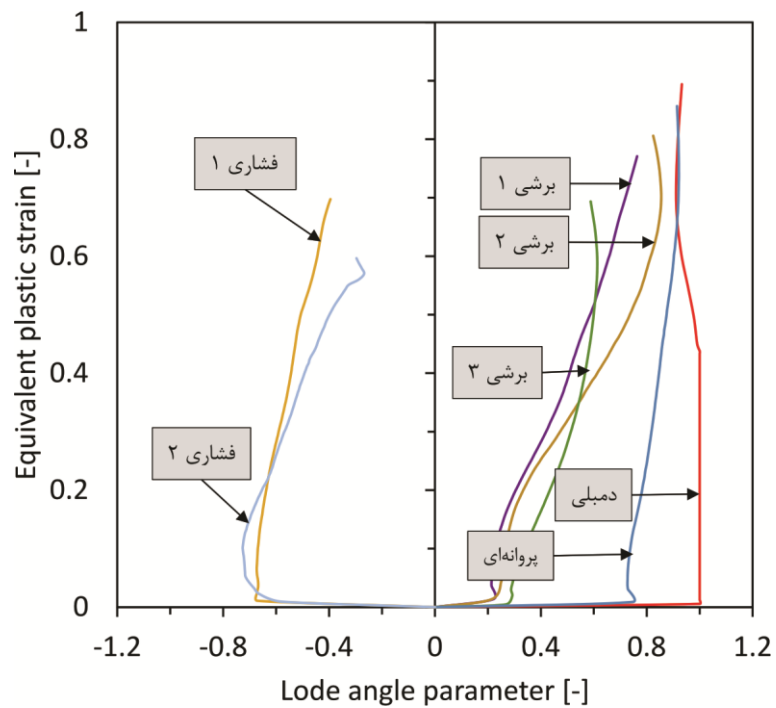
شکل ۱۱. توزیع زاویه لود (الف) دمبلی، (ب) برشی ۱، (ج) برشی ۲، (د) برشی ۳، (ه) پروانه ای، (و) فشاری ۲، (ز) فشاری ۱.

Fig. 11. Lode angle distribution in (a) dog-bone, (b) shear 1, (c) shear 2, (d) shear 3, (e) butterfly, (f) compression 2, (g) compression 1 specimens.



شکل ۱۲. کرنش پلاستیک بر حسب تنش سه‌محوره در نمونه‌ها.

Fig. 12. Plastic strain versus stress triaxiality in the specimens.



شکل ۱۳. کرنش پلاستیک بر حسب پارامتر زاویه لود در نمونه‌ها.

Fig. 13. Plastic strain versus Lode angle parameter in the specimens.

International journal of solids and structures, 44(16) (2007) 5163-5181.

[10] J. Peng, P. Zhou, Y. Wang, Q. Dai, D. Knowles, M. Mostafavi, Stress Triaxiality and Lode Angle Parameter Characterization of Flat Metal Specimen with Inclined Notch, Metals, 11(10) (2021) 1627.

[11] X. Liu, S. Yan, K.J. Rasmussen, G.G. Deierlein, Experimental investigation of the effect of Lode angle on fracture initiation of steels, Engineering Fracture Mechanics, 271 (2022) 108637.

[12] 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.

[13] F. Yu, P.-Y.B. Jar, M.T. Hendry, Constitutive analysis of pressure-insensitive metals under axisymmetric tensile loading: A stress triaxiality-dependent plasticity damage model, International Journal of Mechanical Sciences, 142 (2018) 21-32.

[14] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, International journal of plasticity, 24(6) (2008) 1071-1096.

[15] M. Nia, M. Vural, Effect of stress triaxiality and normalized Lode angle on ductile fracture of aluminum 2139-T8, Journal of Materials Science, 59(5) (2024) 2155-2178.

[۱۶] م. منصوری، س. گنجیانی، اثر سه محوره تنش منفی و زاویه لود بر رفتار شکست نرم فولاد اس تی-۳۷، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۵۶ (۲۰۲۴) ۱۳۰۳-۱۳۲۶.

[17] M.A. Wollenweber, S. Medghalchi, L.R. Guimarães, N. Lohrey, C.F. Kusche, U. Kerzel, T. Al-Samman, S. Korte-Kerzel, On the damage behaviour in dual-phase DP800 steel deformed in single and combined strain paths, Materials & Design, 231 (2023) 112016.

[18] J.-H. Kwon, J.-M. Heo, N.-T. Nguyen, M.T. Tran, H.W. Lee, S.-H. Kang, H.S. Joo, K. Rhee, S.-S. Park, D.W. Kim, Ductile fracture locus under various deformation modes with negative-to-positive stress triaxiality, International Journal of Mechanical Sciences, 279 (2024) 109615.

منجر به پیش‌بینی مناسب رفتار ماده تا لحظه گسیختگی شد. تغییرات کوچک در شکل شیار، زاویه ناچ یا ضخامت نمونه تأثیر چشم‌گیری بر توزیع تنش و مکانیزم شکست داشتند. این نتایج ضرورت در نظر گرفتن هندسه دقیق نمونه در مدل‌سازی‌های اجزاء محدود و تحلیل‌های آسیب را برجسته می‌سازد.

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که مدل‌سازی همزمان تأثیر تنش سه‌محوره و پارامتر زاویه لود برای پیش‌بینی دقیق رفتار شکست نرم فولادهای نرم، به‌ویژه در شرایط بارگذاری پیچیده، ضروری است. یافته‌ها می‌توانند مبنایی برای توسعه معیارهای شکست پیشرفته‌تر و طراحی ایمن‌تر قطعات تحت تنش در صنایع حساس (نظیر هوافضا، انرژی و پتروشیمی) باشند.

منابع

[1] W.F. Hosford, R.M. Caddell, Metal forming: mechanics and metallurgy, Cambridge university press, 2011.

[2] J. Besson, Continuum models of ductile fracture: a review, International Journal of Damage Mechanics, 19(1) (2010) 3-52.

[3] W.-M. Chi, A. Kanvinde, G. Deierlein, Prediction of ductile fracture in steel connections using SMCS criterion, Journal of structural engineering, 132(2) (2006) 171-181.

[4] F.A. McClintock, A criterion for ductile fracture by the growth of holes, (1968).

[5] J.R. Rice, D.M. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 17(3) (1969) 201-217.

[6] 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.

[7] I. Barsoum, J. Faleskog, Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments, International Journal of Solids and Structures, 44(6) (2007) 1768-1786.

[8] C. Cheng, B. Meng, J. Han, M. Wan, X. Wu, R. Zhao, A modified Lou-Huh model for characterization of ductile fracture of DP590 sheet, Materials & Design, 118 (2017) 89-98.

[9] L. Xue, Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading,

- [23] S. Bharti, A. Gupta, H. Krishnaswamy, S. Panigrahi, M.-G. Lee, Evaluation of uncoupled ductile damage models for fracture prediction in incremental sheet metal forming, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37 (2022) 499-517.
- [24] J. Cao, F. Li, W. Ma, D. Li, K. Wang, J. Ren, H. Nie, W. Dang, Constitutive equation for describing true stress-strain curves over a large range of strains, *Philosophical Magazine Letters*, 100(10) (2020) 476-485.
- [25] M. Fukuhara, A. Sanpei, Elastic moduli and internal friction of low carbon and stainless steels as a function of temperature, *ISIJ international*, 33(4) (1993) 508-512.
- [19] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Y. Bai, Calibration and evaluation of seven fracture models, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(4-5) (2005) 719-743.
- [20] M. Basaran, D. Weichert, Stress state dependent damage modeling with a focus on the lode angle influence, *Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Mechanik*, 2011.
- [21] Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture, *International journal of fracture*, 161(1) (2010) 1-20.
- [22] A. Standard, E8. Standard test method for tension testing of metallic materials, West Conshohocken (USA): ASTM, (2004).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mazrae Kazemi, M. Ganjiani, M. Mansouri, *Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Stress Triaxiality and Lode Angle Parameter on the Ductile Fracture of 321 Stainless Steel*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 57(5) (2025) 545-566.

DOI: [10.22060/mej.2025.24291.7854](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24291.7854)



