



The effect of negative stress triaxiality and lode angle on ductile fracture of ST-37

Mohsen Mansouri, Seyed Mehdi Ganjiani*

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran

ABSTRACT: In this article, the effect of negative stress triaxiality on the fracture strain has been studied. First, the geometric model was obtained for samples with three negative stress triaxialities. To obtain negative stress triaxialities in the uniaxial compression test, the geometry of samples was designed somehow that prevent multiaxial tests. Samples were manufactured from ST-37 steel. Then tensile and compression tests were performed on them in order to obtain the fracture strain. Tensile and compression tests were simulated by Abaqus software. The digital image correlation method was used to obtain the strain values and validate the simulation results. The shape and damage mode of different samples were compared after the test and simulation in which the mode of fracture was the same in both methods. The strain contours of the finite element method and digital image correlation were compared and it was observed that the strain values of both methods match each other. The fracture strains were depicted in terms of stress triaxialities, the normalized Lode angle, and the third invariant. In both experimental and numerical methods, by decreasing the amount of negative stress triaxiality, the amount of fracture strain first decreases and then increases.

Review History:

Received: Aug. 01, 2024

Revised: Oct. 15, 2024

Accepted: Jan. 26, 2025

Available Online: Feb. 13, 2025

Keywords:

Stress Triaxiality

Fracture Strain

Digital Image Correlation

Lode Angle

Mechanical Test

1- Introduction

Ductile fracture is a critical fracture mode in steel components, and its precise assessment is of practical importance for the safe design of structures. This fracture mechanism has been investigated through various approaches, including micromechanical analyses, experimental studies, and numerical simulations. Each of these methods contributes to the advancement of others and enhances the understanding of ductile fracture [1]. The energy-based uncoupled model was first introduced by Freudenthal [2], who proposed that ductile fracture occurs when the plastic work per unit volume of material exceeds a certain threshold. Consequently, it was concluded that ductile fracture always initiates in regions subjected to the maximum principal stress. Building on this phenomenon, Cockcroft and Latham [3] proposed a fracture model in which the maximum principal stress governs fracture initiation. Subsequently, Oh et al. [4] normalized the maximum principal stress using the equivalent stress in the Cockcroft–Latham model. Their findings demonstrated that the modified model could predict ductile fracture in extrusion and tensile forming processes. Ganjiani [5] introduced a fracture model within the framework of continuum damage mechanics. This model employs the von Mises plastic yield surface along with a damage yield surface, which depends on stress triaxiality and the Lode angle parameter. The predicted

results include stress states for plane stress conditions. The model successfully predicts fracture strain over a wide range of stress triaxialities, from 0 to -1.3. The fracture strain dependent on the Lode angle in the proposed model has been compared with the experimental data of Bao and Wierzbicki [6], demonstrating the model's capability to predict fracture strain.

In this study, the fracture strain of geometries subjected to negative stress triaxiality was determined both numerically and experimentally and subsequently compared. Due to the challenges associated with performing multiaxial testing, the specimen geometries were specifically designed to induce multiaxial stress states under tensile and compressive loading. Various curvature radii were employed to achieve negative stress triaxiality without the need for complex multiaxial tests. To obtain fracture strain, tensile and compressive tests were conducted on the specimens. Digital Image Correlation (DIC) was utilized to ensure accurate strain measurement during the experiments. Additionally, finite element simulations of the specimens were performed to further analyze the fracture behavior.

2- Methodology

To investigate the effect of negative stress triaxiality on fracture strain, several specimen types with different

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



Table 1. Values of the stress triaxiality, the normalized Lode angle, and their corresponding fracture strain

Stress triaxiality	Normalized Lode angle	Fracture strain
-0.456	-0.70	0.24
-0.381	-0.75	0.20
-0.348	-0.93	0.24
0.333	1	0.46
0.348	0.92	0.35

geometries were designed to achieve negative stress triaxiality. The presence of curvature and notches altered the stress state from uniaxial to multiaxial. The tensile test for the standard dog-bone specimen was conducted in accordance with DIN 50125. Since the geometries of specimens M1, M2, and M3 were specifically designed to examine the effect of different stress triaxialities under uniaxial testing and have not been previously studied, no standard testing protocol exists for these specimens. For each specimen type, the test was repeated three times, and the average values were reported. Numerical analyses were conducted using the finite

element software Abaqus to evaluate different geometries under negative stress triaxiality. To capture ductile damage in the simulations, the ductile damage model available in the Abaqus was implemented.

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 finite element method (FEM) was used to determine the stress triaxiality in different geometries. In this approach, the elastic and plastic properties of the samples were first assigned according to the numerical simulation section, and the loading process was carried out. Subsequently, the stress triaxiality was measured using the field output section of the software. The variations in stress triaxiality were calculated at different displacements, and the value at the point where it stabilized was considered the stress triaxiality of the samples. Table 1 presents the stress triaxiality results obtained for the different samples. The values obtained for M1, M2, and M3 samples are displayed in Figure 1.

In tensile tests, the reduction in cross-sectional area indicates ductile failure. Similar to tensile testing, in compression tests, the most significant deformation occurs in

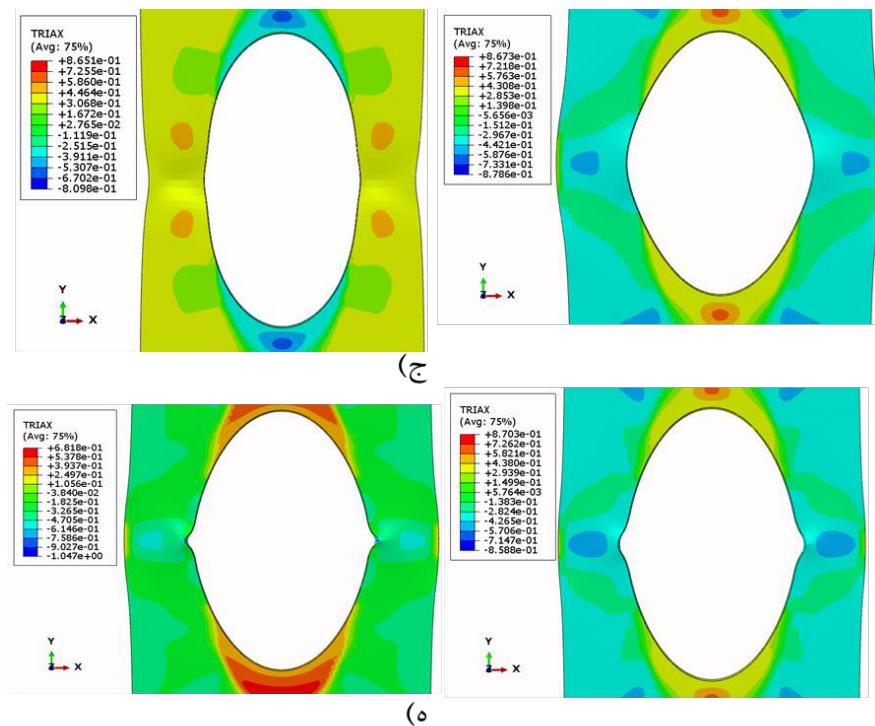


Fig. 1. The stress triaxiality contours for different a) the stress triaxiality contour for M1 under tension, c) the stress triaxiality contour for M1 under compression, e) the stress triaxiality contour for M2, and g) the stress triaxiality contour for M3

the central region, particularly in areas with curvature. Based on the damage contours of the samples, damage initiation occurs in the curved region, where deformation is more pronounced compared to other areas. The variation in fracture strain with decreasing stress triaxiality and normalized Lode angle can be attributed to the type of damage mechanism occurring under different stress triaxiality conditions. For example, when transitioning from the dog-bone to M1 in tension and increasing the stress triaxiality, micro-voids tend to grow more rapidly, leading to a reduction in fracture strain [7]. The presence of curvature alters the stress state, meaning that each sample exhibits a unique stress condition corresponding to its geometry. Since ductile fracture is dependent on stress triaxiality, fracture occurs at the location where stress triaxiality reaches its maximum. This explains why, in the damage patterns obtained from both experiments and simulations, the fracture location is observed at the center of the sample. The designed sample geometries were developed to induce different stress states using a flat specimen subjected to uniaxial loading. This approach eliminates the need for specialized equipment or complex multi-axial test setups. By utilizing these geometries, ductile failure can be examined across a wide range of low to moderate-stress triaxialities and strain states. Notably, this novel experimental technique may also serve as a validation method for mechanism-based ductile fracture models.

4- Conclusion

In this study, experimental tests were conducted on various specimens under both positive and negative stress triaxiality to investigate fracture behavior under different triaxial stress states. The specimens were rectangular steel components made of ST-37, featuring a central rectangular cavity with curved edges. Under uniaxial loading, the presence of curvature induced a multiaxial stress state within the specimen, eliminating the need for complex multiaxial testing. This approach allowed for the examination of a wide range of stress triaxialities using specially designed geometries. The deformation patterns of the specimens under loading were found to be consistent between experimental testing and numerical simulations. Additionally, DIC was

employed to achieve more accurate strain measurements and validate the simulation results. A comparison between the strain contours obtained from DIC and numerical simulations showed strong agreement. Analysis of the damage contour derived from the simulations indicated that damage initiation occurred in the curved region. Furthermore, the experimentally measured fracture strain was higher than the simulated values, likely due to manufacturing defects and testing errors. The experimentally and numerically obtained fracture strain values were plotted as a function of stress triaxiality. The fracture behavior of ST-37 steel under negative stress triaxiality, in terms of the normalized Lode angle and the third stress invariant, was consistent across both experimental and numerical methods, exhibiting an initial decrease in fracture strain followed by an increase.

References

- [1] Y. Zhu, M.D. Engelhardt, Z. Pan, Simulation of ductile fracture initiation in steels using a stress triaxiality–shear stress coupled model, *Acta Mechanica Sinica*, 35 (2019) 600-614.
- [2] A.M. Freudenthal, *The inelastic behavior of engineering materials and structures*, Wiley, (1950).
- [3] M. Cockcroft, Ductility and workability of metals, *J. of Metals*, 96 (1968).
- [4] S. Oh, C. Chen, S. Kobayashi, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—part 2: workability in extrusion and drawing, *J. Eng. Ind. Feb*, 101(1) (1979) 36-44.
- [5] M. Ganjiani, A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 84 (2020) 104048.
- [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] Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture, *International journal of fracture*, 161(1) (2010) 1-20.



اثر سه محوره تنش منفی و زاویه لود بر رفتار شکست نرم فولاد اس تی-۳۷

محسن منصوری، سید مهدی گنجیانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

کلمات کلیدی:

سه محوره تنش منفی
کرنش شکست
همبستگی تصویری دیجیتال
زاویه لود
آزمون مکانیکی

خلاصه: در این مقاله اثر سه محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مدل هندسی برای نمونه‌ها با سه محوره تنش منفی به دست آمد. نمونه‌ها از جنس فولاد اس تی-۳۷ ساخته شدند. برای به دست آوردن سه محوره تنش منفی در آزمون تک‌محوری فشار، هندسه قطعات به نوعی طراحی شدند که از انجام آزمون چندمحوری جلوگیری می‌کند. آزمون‌های کشش و فشار به منظور دستیابی کرنش شکست بر روی آن‌ها انجام شد. آزمون کشش و فشار توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی شدند. از روش همبستگی تصویری دیجیتال برای به دست آوردن مقادیر کرنش و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. شکل و نحوه آسیب نمونه‌های مختلف پس از آزمون و شبیه‌سازی باهم مقایسه شدند که نحوه شکست در هر دو روش یکسان بود. کانتورهای کرنش روش اجزای محدود و همبستگی تصویری دیجیتال با هم مقایسه شدند و مشاهده شد که مقدار کرنش هر دو روش با یکدیگر تطابق دارند. مقادیر کرنش شکست برحسب سه محوره تنش، زاویه لود بی‌بعد شده و نوردای سوم رسم شدند. در هر دو روش تجربی و عددی، با کاهش مقدار سه محوره تنش منفی، ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

منجر به تمرکز کرنش غیرالاستیک و تنش‌های چندمحوری می‌شوند، مانند مقاطع خالص اتصالات پیچ‌شده، اتصالات جوش داده‌شده و نواحی دارای تسلیم موضعی در قطعه‌های فولادی. شکست نرم در مواد فلزی از طریق رشد تدریجی، هسته‌زایی و در نهایت هم‌جوشی حفره‌ها رخ می‌دهد. در میان این فرآیندها، رویدادهای هسته‌زایی و هم‌جوشی حفره‌ها به شدت تصادفی هستند، که منجر به کمبود داده‌های تجربی کمی می‌شود. با فرض اینکه رشد حفره گام تعیین‌کننده برای شروع ترک نرم است، مدل‌هایی که هدفشان پیش‌بینی شکست نرم است باید اثرات ترکیبی سه محوره تنش و کرنش پلاستیک را به‌خوبی ثبت کنند. چندین محقق آزمایش‌های کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های صاف و بدون انحنا انجام داده‌اند. با این حال، شروع و گسترش ترک نرم حساس به سه محوره تنش است و مطالعه‌های جامع در مورد تکامل میکروحفره‌ها تحت سه محوره تنش مختلف از جنبه‌های کاربردی مهندسی است [۲]. با مطالعه ادبیات موضوعی، می‌توان متوجه شد که حالت تنش یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر آغاز شکست نرم است. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی شکست توسعه یافته‌اند تا نقطه

شکست نرم یک حالت شکست مهم در اجزای فولادی است که ارزیابی دقیق آن برای طراحی ایمنی سازه‌ها اهمیت عملی دارد. شکست نرم از طریق روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، از جمله تحلیل‌های میکرومکانیکی، تحقیق‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی. هر یک از این روش‌ها به توسعه سایر روش‌ها کمک کرده و به درک شکست نرم کمک می‌کند. مشاهدات تجربی اطلاعات اساسی را برای صحت‌سنجی از مطالعه‌های میکرومکانیکی فراهم می‌کنند. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های عددی به یک ابزار کلیدی برای توسعه و پیاده‌سازی مدل‌های مبتنی بر میکرومکانیک تبدیل شده است [۱].

شکست نرم به عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که شامل اتلاف قابل توجهی از انرژی مکانیکی بوده و قبل از شکست دچار تغییر شکل پلاستیک در مقیاس بزرگ می‌شود. شکست نرم مقاومت نهایی قطعه‌های فولادی را در شرایط مختلفی تعیین می‌کند. به خصوص در نقاطی که ناپیوستگی‌ها

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



مهندسی محدودیت‌هایی دارند: اول آن‌که، آن‌ها معمولاً پارامترهای مهم فیزیکی زیادی دارند که به‌دست آوردن دقیق آن‌ها دشوار است [۸]. دوم آن‌که، شبیه‌سازی با مدل‌های شکست کوپل شده در مقایسه با مدل‌های شکست کوپل نشده زمان‌بر است [۹].

به دلیل سادگی ساختار، تعداد زیادی از مدل‌های کوپل نشده در طی سال‌های گذشته با فرضیه‌های مختلف یا روش‌های آزمایشگاهی مختلف توسعه یافته‌اند. مدل کوپل نشده بر مبنای انرژی برای اولین بار توسط فرودنتال [۱۰] اختراع شد، وی کسی بود که گفت شکست نرم هنگامی رخ می‌دهد که کار پلاستیک در هر واحد حجم ماده که از یک آستانه بگذرد. نتیجه چنین شده است که شکست نرم همیشه در ناحیه‌ای با اولین تنش اصلی ظاهر می‌شود و با این پدیده‌ها، کاکرافت و لاتام [۱۱]. یک مدل شکست پیشنهاد کردند که توسط اولین تنش اصلی ایجاد می‌شود. سپس اوه و همکارانش [۱۲] اولین تنش اصلی را با تنش معادل در مدل کاکرافت و لاتام نرمالیزه کردند. طبق نتایج آن‌ها، مدل توسعه یافته می‌تواند شکست نرم را در اکستروژن^۳ و فرایند شکل‌دهی کشش پیش‌بینی کند. بروزو و همکارانش [۱۳] مدل کاکرافت و لاتام را به‌وسیله در نظرگیری اثر تنش میانگین بر شکست نرم توسعه دادند. اوپان و همکارانش [۱۴] معتقدند که نسبت انباشتگی آسیب با سه محوره تنش خطی است و از این به بعد محققان فهمیدند که سه محوره تنش در شکست نرم نقش بسیار مهمی دارد. گنجیانی [۱۵] یک مدل شکست در چارچوب مکانیک آسیب پیوسته ارائه کرده است. این مدل، از سطح تسلیم پلاستیک فون میسز و یک سطح تسلیم آسیب بهره می‌گیرد که به تنش سه محوری و پارامتر زاویه لوود بستگی دارد. نتایج پیش‌بینی شده شامل حالت تنش برای وضعیت تنش صفحه‌ای می‌باشند. این مدل، کرنش شکست را در محدوده وسیعی از سه محوره تنش از جمله سه محوره تنش صفر تا ۱/۳- پیش‌بینی می‌کند. کرنش شکست وابسته به زاویه لوود مربوط به مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی باثو و ویرزیبکی [۱۶] مقایسه شده‌اند و مشاهده شد که این مدل توانایی پیش‌بینی کرنش شکست را دارد.

وولنوبر^۴ و همکاران، رفتار دوفازی فولاد دی‌پی^۵ ۸۰۰ تحت مسیر کرنش‌های مختلف، بررسی کردند [۱۷]. مسیر کرنش یک شامل آزمون کشش ساده ولی مسیر کرنش دو از ترکیب آزمون‌های کشش و خمش تشکیل شده بود. هنگامی که تغییر شکل در مسیرهای کرنش یک و دو تحت

آغاز شکست نرم را پیش‌بینی کنند. این مدل‌های پیش‌بینی شکست به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل شکست کوپل نشده و مدل شکست کوپل شده. مدل‌های شکست نرم کوپل نشده تأثیر آسیب را بر معادلات رفتاری نادیده می‌گیرند، در حالی که مدل‌های شکست نرم کوپل شده، تجمع آسیب را در معادلات رفتاری در نظر می‌گیرند [۳].

از دیدگاه فیزیکی، آسیب به‌صورت کاهش سطح مقطع نامی در المان حجمی مرجع^۱ که تمام متغیرها در این عنصر حجمی هموزن در نظر گرفته می‌شود، تعریف می‌شود. کاهش سطح مقطع به خاطر جوانه‌زنی، رشد میکروتکرک‌ها و میکروحفره‌ها است. ناپیوستگی‌ها و آسیب‌ها با توجه به اندازه‌ی المان حجمی، کوچک هستند اما در مقایسه با فضاهای اتمی ماده بزرگ هستند.

متغیر آسیب، وابسته به انتخاب بردار نرمال \vec{n} است و باید برای توصیف آن از رابطه‌ی تانسوری استفاده شود. در حالت بارگذاری محوری که نیروی F عمود بر سطح مقطع در المان حجمی مرجع اعمال می‌شود و با در نظر گرفتن تعریف تنش $\sigma = F / A_0$ و جایگذاری $A_{eff} = A_0 (1 - D)$ با فرض همسانگرد بودن ماده، رابطه‌ی تنش مؤثر به‌صورت معادله ۱ (تعریف می‌شود که این معادله مفهوم بنیادین در مکانیک آسیب پیوسته است.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (1)$$

σ_{eff} را برخی مراجع با $\tilde{\sigma}$ نمایش می‌دهند. بر اساس تعریف تنش مؤثر، رفتار ماده در حالت آسیب‌دیده تنها تحت تأثیر تنش مؤثر است، به‌عبارت‌دیگر، معادلات در حالت بررسی آسیب مثل معادلات در حالت عادی است با این تفاوت که تنش مؤثر جایگزین تنش در معادلات می‌شود.

آسیب نرم در فلزات می‌تواند در اثر رشد و به هم پیوستن میکروحفره‌های درون ماده گسترش یابد. بر این اساس گرسون مدلی را برای فلزات نرم ارائه داد [۴، ۵]. مدل اصلی گرسون اولین مدل میکرو مکانیکی است که تأثیر رشد فضای خالی را بر تابع تسلیم و قانون جریان^۲ فلز توصیف می‌کند. آسیب انباشته‌شده در طول تغییر شکل با کسر حجمی فضای خالی نشان داده می‌شود. تلاش‌های زیادی برای اصلاح مدل گرسون صورت گرفته است [۶، ۷]. اگرچه مدل‌های شکست کوپل شده دارای مزایایی در توضیح مکانیزم‌های فیزیکی زیربنایی شکست نرم هستند، اما همچنان در کاربردهای

3 Extrusion
4 Wollenweber
5 DP800

1 Representative element volume
2 Flow rule

نشان داده شود. همچنین، ثابت‌های تنش بدون بعد معمولاً در مکانیک پلاستیسیته و شکست برای نمایش حالت تنش استفاده شده‌اند. معیارهای شکست نرم غالباً یک تابعی از ثابت‌های تنش برای شرح تأثیر حالت تنش روی انباشت آسیب و رفتار شکست می‌باشند. بخش ناوردای تانسور تنش، از طریق ناوردای اول تانسور تنش کوشی σ (یعنی I_1)، و ناوردهای دوم و سوم تانسور تنش انحرافی متناظر یعنی J_2 و J_3 ، $s = \sigma - (tr \sigma / 3)$ توصیف می‌شود،

$$I_1 = tr \sigma, \quad J_2 = \frac{1}{2} s : s, \quad J_3 = \det(s) \quad (2)$$

تنش متوسط (یا هیدروستاتیک) σ_m و تنش معادل (یا وون میسز) $\bar{\sigma}$ (یا σ_{eq} یا σ_{VM}) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3}, \quad \sigma_{VM} = \sqrt{3J_2} \quad (3)$$

سه محوره تنش η ، تنش هیدروستاتیک σ_m و تنش وون میسز σ_{VM} از طریق عبارت زیر با یکدیگر مرتبط شده‌اند:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}} = \frac{I_1}{3\sqrt{3J_2}} \quad (4)$$

که $-\infty \leq \eta \leq \infty$ ، ناوردای سوم نرمالیزه ξ عبارت است از:

$$\xi = \frac{27 J_3}{2 \sigma_{VM}^3} = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}} \quad (5)$$

که در بازه $-1 \leq \xi \leq 1$ قرار می‌گیرد؛ این پارامتر، مکان تنش اصلی دوم σ_{II} را نسبت به تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه، یعنی σ_I و σ_{III} تعیین می‌کند. توجه داشته باشید که ξ به ازای $\sigma_I = \sigma_{II} > \sigma_{III}$ برابر -1 ، و به ازای $\sigma_I > \sigma_{II} = \sigma_{III}$ برابر یک است، و به ازای $\sigma_{II} = (\sigma_I + \sigma_{III})/2$ برابر صفر است. مدل‌های شکست به کاررفته در این پژوهش، مستقیماً برحسب ناوردای سوم نرمالیزه ξ فرمول‌بندی نشده‌اند. مدل موهر-کولمب اصلاح‌شده، مبتنی بر

سه محوره تنش مثبت صورت می‌گیرد، آسیب بیشتری ایجاد می‌شود چون تعداد حفره‌های ایجاد شده در مسیر یک زیاد است. درحالی که اگر تغییر شکل ابتدا در سه محوره تنش منفی و سپس با تغییر مسیر کرنش سه محوره تنش مثبت ادامه یابد، مقدار آسیب کاهش می‌یابد. رفتار شکست آلیاژ منگنزیم زدکی $60'$ با سه محوره‌های تنش مختلف تحت آزمون کشش توسط ژو و همکاران مورد تحقیق قرار گرفت [۱۸]. مشاهده شد که با تغییر سه محوره تنش از صفر به $0/66$ ، نوع شکست از بین‌دانه‌ای به میان‌دانه‌ای تغییر کرد. پارک و همکاران، یک معیار شروع ترک بر پایه ترک ارائه دادند که اثر سه محوره تنش در نظر گرفته شد [۱۹]. از مدل گرسون برای توصیف آسیب پیوسته با رشد فضای خالی استفاده شد، درحالی که مدل ناحیه منسجم برای معرفی ترک‌های ناپیوسته و نشان دادن رفتار نرم شدن غیرخطی استفاده می‌شود. در این مدل، تخلخل درون ترک با افزایش مقدار سه محوره تنش، کاهش می‌یابد.

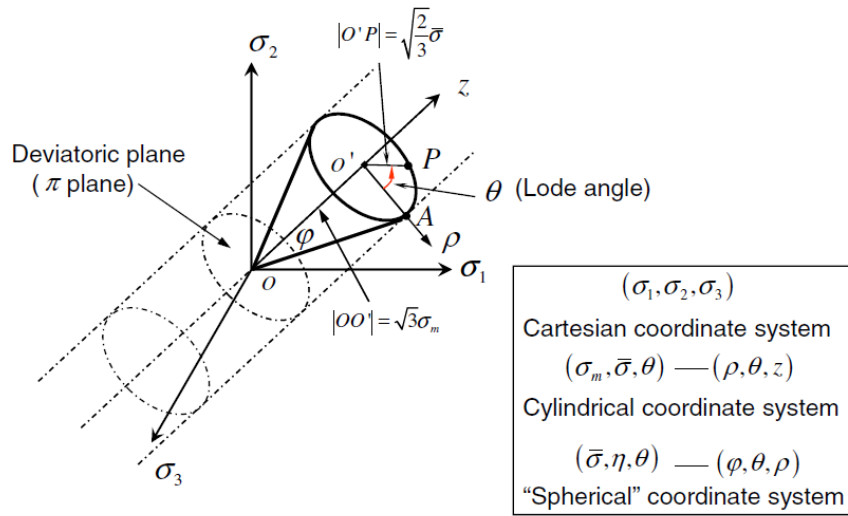
در این مقاله، کرنش شکست هندسه‌های تنش سه محوره منفی به‌طور عددی و تجربی به‌دست‌آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به دلیل دشوار بودن انجام آزمون چندمحوری، در این پژوهش سعی شد هندسه نمونه‌ها با طراحی خاصی، حالت تنش چندمحوری تحت آزمون کشش و فشار در آن‌ها به وجود بیاید. از انحنای شعاع‌های مختلف استفاده شد تا سه محوره تنش منفی بدون نیاز به آزمون چندمحوری به‌دست بیاید. به‌منظور به دست آوردن کرنش شکست، آزمون‌های کشش و فشار بر روی نمونه‌ها انجام و برای اندازه‌گیری صحیح کرنش در آزمون‌ها، از روش همبستگی تصویری دیجیتال^۲ استفاده شد. همچنین، نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شدند. کانتورهای کرنش برای تمامی نمونه در دو روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند. برای درک درست از رفتار آسیب نرم نمونه‌ها، معیار آسیب نرم به شبیه‌سازی اضافه شدند. اثر هندسه متفاوت نمونه‌ها بر روی مشخصه سه محوره تنش^۳ و آسیب نرم مطالعه شدند. درنهایت، به‌منظور بررسی اثر سه محوره تنش منفی بر روی رفتار شکست نرم ماده، کرنش شکست به ازای سه محوره‌های متفاوت بررسی و رفتار ماده در سه محوره تنش منفی مطالعه شد.

۲- تعریف حالت تنش

۲-۱- تحلیل تئوری

حالت تنش می‌تواند با استفاده از تانسور تنش یا مقادیر تنش اصلی

- 1 ZK60
- 2 Digital Image Correlation
- 3 Triaxiality



شکل ۱. سه نوع سیستم مختصات در فضای تنش‌های اصلی [۲۰]

Fig. 1. Three types of coordinate systems are considered in the principal stress space

و برش تک‌محوری، وضعیت تنش چندمحوری ایجاد کرد. مدل هندسی نمونه‌های آزمون کشش و فشار در شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها دارای ضخامت پنج میلی‌متر هستند. هندسه نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به صورت مستطیل هستند که درون آن‌ها سوراخی بیضوی شکل ایجاد شده است. ابعاد مستطیل در نمونه‌های ام ۱ و ام ۳ به طول ۲۰۴ و عرض ۴۵ میلی‌متر هستند در حالی که نمونه ام ۲ مستطیلی به طول ۲۰۳/۷۵ و عرض ۴۵ میلی‌متر است. حفره بیضوی شکل با شعاع‌های ۲۱/۸۷۵ و ۱۳/۵ میلی‌متر ایجاد شده که در نمونه‌های ام ۲ و ام ۳، در راستای شعاع کوچک‌تر، دو انحنا با شعاع‌های متفاوت تشکیل شده است.

۲-۳- تحلیل تجربی

آزمون‌های کشش و فشار توسط دستگاه کشش یونیورسال اینسترون ۴۸۵۰۲ در دانشگاه تهران انجام شد. بر روی نمونه دمبلی شکل آزمون کشش، ام ۲ و ام ۳ آزمون فشار و ام ۱ هر دو آزمون فشار و کشش انجام شد. برای اندازه‌گیری کرنش، از فک دستگاه و همچنین از روش همبستگی تصویری دیجیتال استفاده شد. برای انجام این کار، ابتدا سطح نمونه با رنگ

پارامتر زاویه لود نرمالیزه $\bar{\theta}$ است، که در ادامه به معرفی آن می‌پردازیم. پارامتر زاویه لود θ ، ثابت تنش بدون بعد مهم دیگر است که در شکل ۱ نشان داده شده و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\theta = \frac{1}{3} \left(\cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \right) \quad (6)$$

پارامتر زاویه لود بی‌بعد شده $\bar{\theta}$ به صورت زیر تعریف شده است:

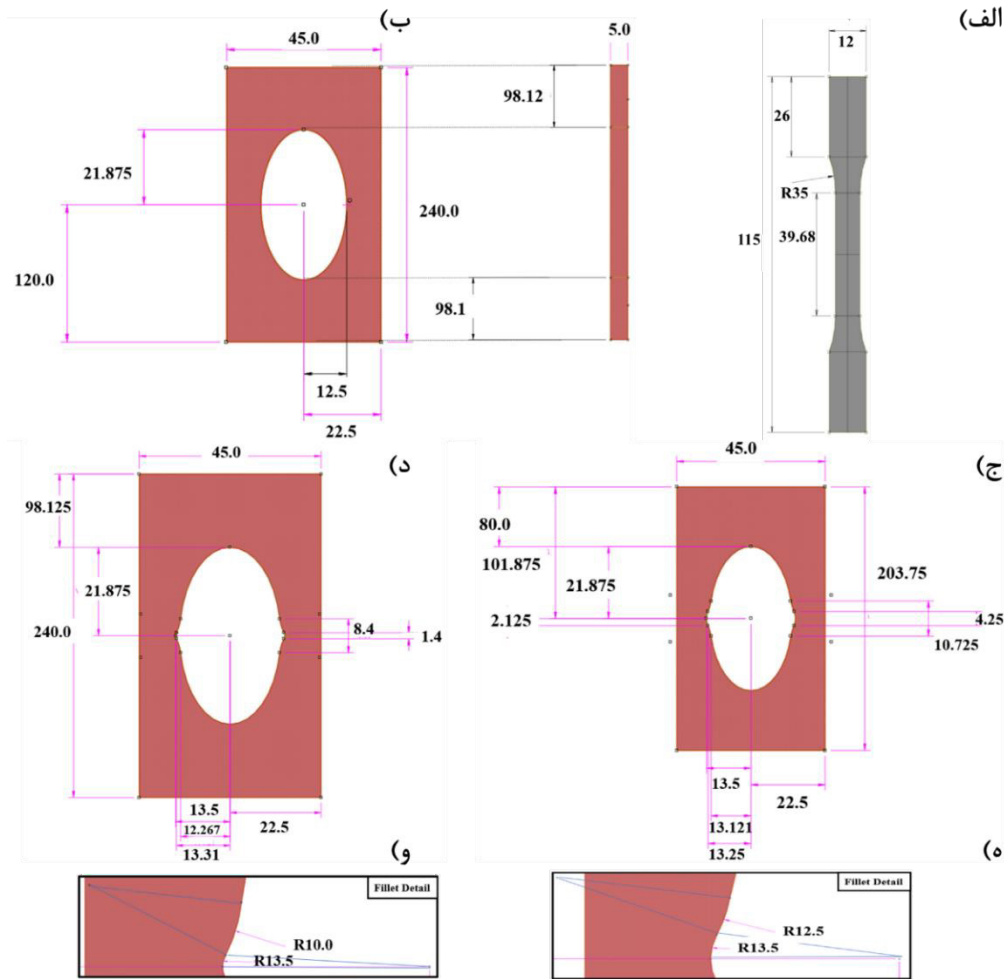
$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} \quad (7)$$

بنابراین، حالت تنش می‌تواند با $\bar{\theta}$ و η نشان داده شود.

۲-۲- مدل‌های هندسی

به منظور بررسی اثر چند محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست، چند نوع نمونه با هندسه‌های مختلف طراحی شدند تا سه محوره تنش منفی به دست بیاید. وجود انحنا و شیار منجر به تغییر وضعیت تنش از حالت تک‌محوری به چندمحوری می‌شود. بنابراین می‌توان با آزمون کشش، فشار

- 1 M1
- 2 M2
- 3 M3
- 4 Instron 8502



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

های نمونه ام ۱، ام ۲ و ام ۳ طوری طراحی شدند که اثر سه محوره تنش مختلف تحت آزمون تک محوره مورد بررسی قرار بگیرد و تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته اند، هنوز استاندارد برای این نمونه‌ها ایجاد نشده است. برای هر نمونه، تعداد سه بار آزمون تکرار شد و مقدار متوسط آن‌ها گزارش شد. در شکل ۳-الف، نمونه دمبلی را نشان می‌دهد که برای کرنش سنجی همبستگی تصویری دیجیتال اسپری زده شده و درون فک دستگاه قرار گرفته است. در شکل ۳-ب نیز آزمون مکانیکی به همراه دوربین عکس برداری نمایش داده شده است. نمونه‌ها از جنس فولاد اس تی-۳۷^۵ هستند که در جدول ۱ خواص مادی به کاررفته در این مطالعه ذکر شده است.

سفید اسپری و سپس یک لگوی لکه‌های سیاه بر روی آن ایجاد شد. سپس لگوی نامنظم توسط دوربین سی ام او اس^۱ مدل کیواچ‌وای ۴۱۰ سی^۲ ثبت شد. تصاویر به دست آمده از روش همبستگی تصویری دیجیتال، توسط نرم افزار منبع باز ان کر^۳ تحلیل شدند و جابه‌جایی و کرنش برای آزمون‌های مختلف از تصاویر ثبت شده، به دست آمد. دستگاه‌های انجام آزمون و کرنش سنجی همبستگی تصویری دیجیتال در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمون کشش نمونه دمبلی طبق استاندارد دین ۵۰۱۲۵^۴ انجام شد. به دلیل این که هندسه

- 1 CMOS
- 2 QHY410C
- 3 Ncorr
- 4 DIN 50125

جدول ۱. پارامترهای ماده برای فولاد اس تی-۳۷ به کاررفته در شبیه سازی

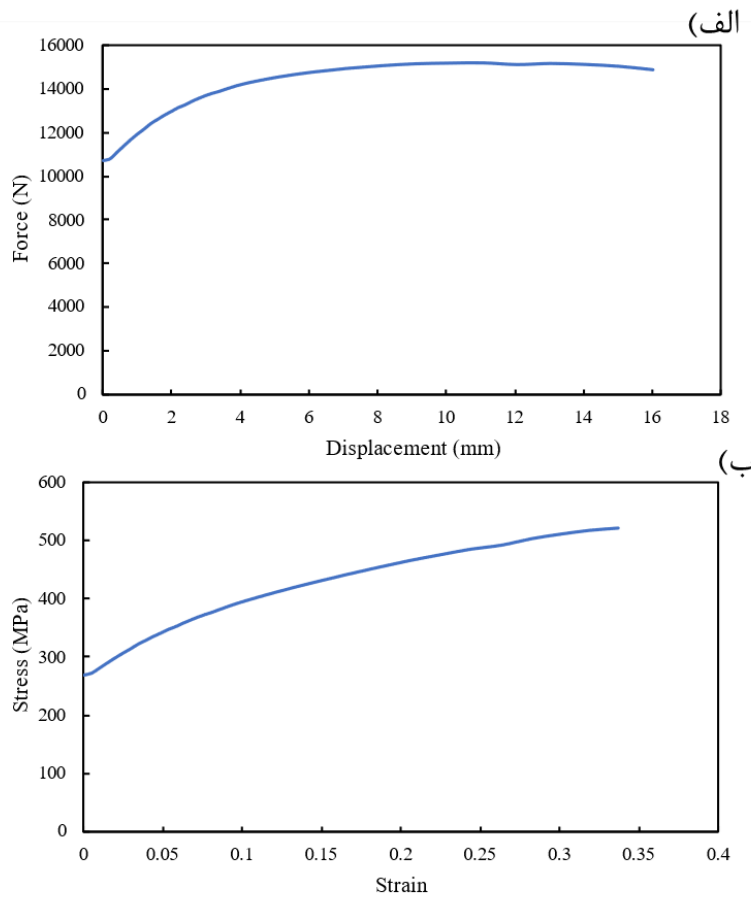
Table 1. The material parameters for ST-37 steel used in the simulations

مقدار	ویژگی
۷۸۳۰	چگالی (kg/m^3)
۲۰۵	(GPa) E
۰/۳	ν



شکل ۳. آزمون مکانیکی الف) نمونه دمبلی آماده شده برای روش همبستگی تصویری دیجیتال ب) دستگاه کشش و دوربین برای کرنش سنجی توسط روش همبستگی تصویری دیجیتال

Fig. 3. Mechanical test a) the preparation of a dog-bone specimen for the Digital Image Correlation (DIC) method and b) the use of a tensile testing machine along with a camera setup for strain measurement via DIC



شکل ۴. الف) نمودار نیرو جابه‌جایی (ب) نمودار تنش کرنش استفاده‌شده در شبیه‌سازی

Fig. 4. a) the force-displacement curve and b) the stress-strain curve used in the simulations

مطالعه از نوع نمایی است که مقادیر ۱ برای جابه‌جایی در شکست و ۰/۸ برای پارامتر نمایی لا^۱ در مدل آسیب استفاده شد. از المان مکعبی هشت گره‌ای^۲ برای شبکه زدن استفاده شد. مدل‌های عددی شبکه‌بندی شده نمونه‌ها، در شکل ۵ نشان داده شده است. در طول سنجش نمونه دمبلی نحوه شبکه‌بندی به‌نوعی انجام شده که تعداد المان بیشتری در مرکز قرار گرفتند تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد. برای نمونه دمبلی ۱۰۵۶۰، ۱م، ۳۰۳۴۰، ۲م ۲۵۹۴۰ و ۳م ۲۸۴۴۰ المان ایجاد شده است. در نمونه‌های ۱م، ۲م و ۳م قسمتی که در فک دستگاه قرار دارد به‌صورت جسم صلب مدل شدند تا هزینه محاسباتی کاهش یابد. بار خارجی به‌صورت جابه‌جایی در راستای Y اعمال می‌شود و در سایر جهت‌ها، جابه‌جایی مقید شده است.

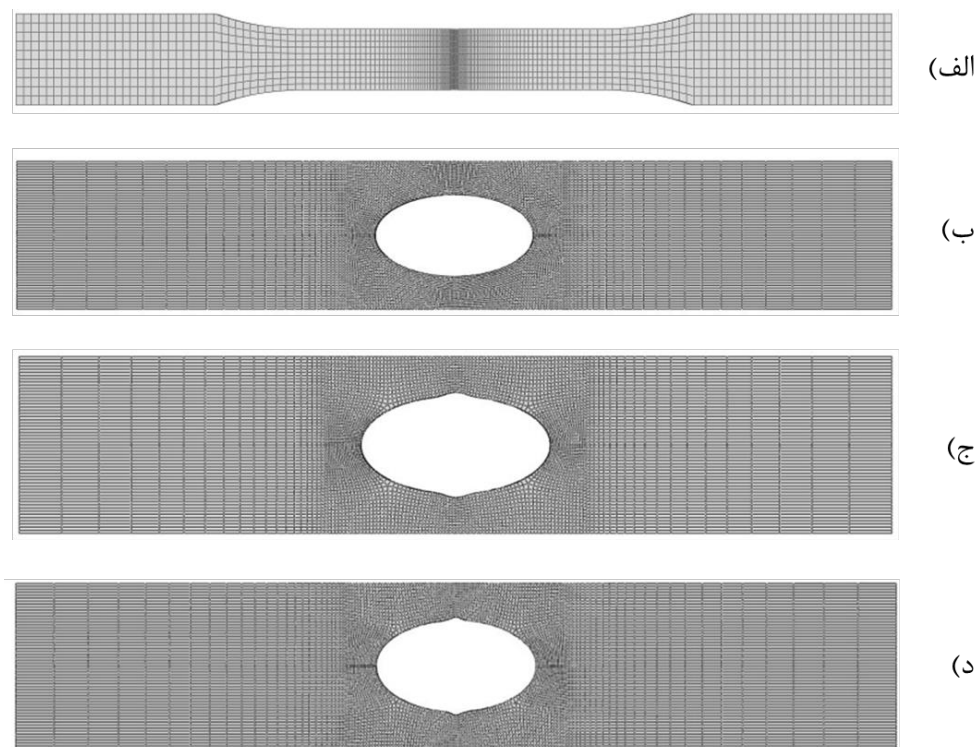
- 1 Law
- 2 Eight-node brick element

۲-۴- تحلیل عددی

تحلیل‌های عددی برای بررسی هندسه‌های مختلف سه محوره تنش منفی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. منحنی تنش برحسب کرنش پلاستیک استفاده‌شده در شبیه‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است. برای مشاهده آسیب نرم در شبیه‌سازی، از مدل آسیب نرم در نرم‌افزار استفاده شده است. فرم کلی قانون آسیب به‌صورت زیر است [۲۰]:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_f(\eta, \bar{\theta})} \quad (8)$$

که D شاخص آسیب و $\bar{\epsilon}_f$ کرنش پلاستیک معادل است. شکست زمانی آغاز می‌شود که D به واحد برسد. مدل آسیب استفاده شده در این



شکل ۵. مدل اجزای محدود نمونه الف) دمبلی، ب) ام ۱، ج) ام ۲ و د) ام ۳

Fig. 5. The finite element models of the specimens a) dog-bone, b) the M1, c) the M2, and d) the M3 specimen

عددی اعمال شده و بارگذاری انجام می‌شود. سپس، سه محوره تنش با استفاده از بخش خروجی میدان نرم‌افزار، اندازه‌گیری می‌شود. تغییرات سه محوره تنش در جابه‌جایی مختلف محاسبه شد و در نقطه‌ای که مقدار آن به عدد ثابتی رسید، به‌عنوان سه محوره تنش نمونه‌ها انتخاب شد. در جدول ۲ نتایج سه محوره تنش به‌دست‌آمده برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.

۳-۲- نمونه دمبلی

در شکل ۶ نمونه پس از آزمون کشش به همراه کانتور آسیب و کرنش در راستای y نمایش داده شده است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال (شکل ۶ ج) با کانتور کرنش در جهت y در شبیه‌سازی (شکل ۶ د) مقایسه شدند. همچنین، نتایج آزمون کشش بر نمونه دمبلی شامل مقادیر بار و جابجایی و مقادیر تنش و کرنش به ترتیب در شکل ۷ الف و ب به دو روش مختلف تجربی (داده‌های

۳- تفسیر نتایج

در این بخش، نتایج آزمون‌های مکانیکی انجام‌شده برای نمونه‌های دمبلی، ام ۱، ام ۲ و ام ۳ به تفکیک ارائه خواهد شد. این نتایج برای هر نمونه به دو طریق شامل داده‌های خروجی دستگاه (بار و جابجایی) و داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نمایش داده شدند.

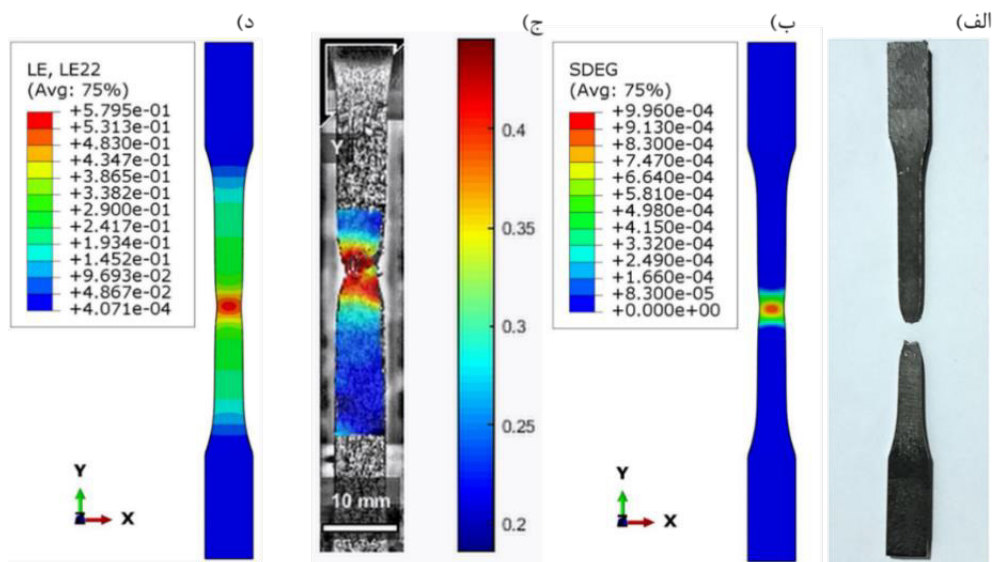
۳-۱- تنش سه محوره منفی

از آنجایی که تنش تحت آزمون کشش در نمونه دمبلی به‌صورت تک‌محوری باقی می‌ماند، طبق معادله (۴)، مقدار سه محوره تنش برابر $0/33$ است. وجود انحنای در سایر نمونه، منجر به تغییر وضعیت تنش از حالت تک‌محوری به چند محوری می‌شود. به همین دلیل، نمی‌توان از معادله (۴) برای هندسه‌های دارای انحنا استفاده کرد و روش اجزای محدود به کار گرفته شد تا سه محوره تنش در هندسه‌های مختلف به دست بیاید. در این روش، ابتدا خواص الاستیک و پلاستیک نمونه‌ها طبق بخش شبیه‌سازی

جدول ۲. مقادیر تنش سه محوره به دست آمده برای نمونه‌های مختلف

Table 2. The stress triaxiality values obtained for different samples

سه محوره تنش	نمونه
۰/۳۳	دمبلی
۰/۳۴۸	ام ۱ (کشش)
-۰/۳۴۸	ام ۱ (فشار)
-۰/۳۸۱	ام ۲
-۰/۴۵۶	ام ۳

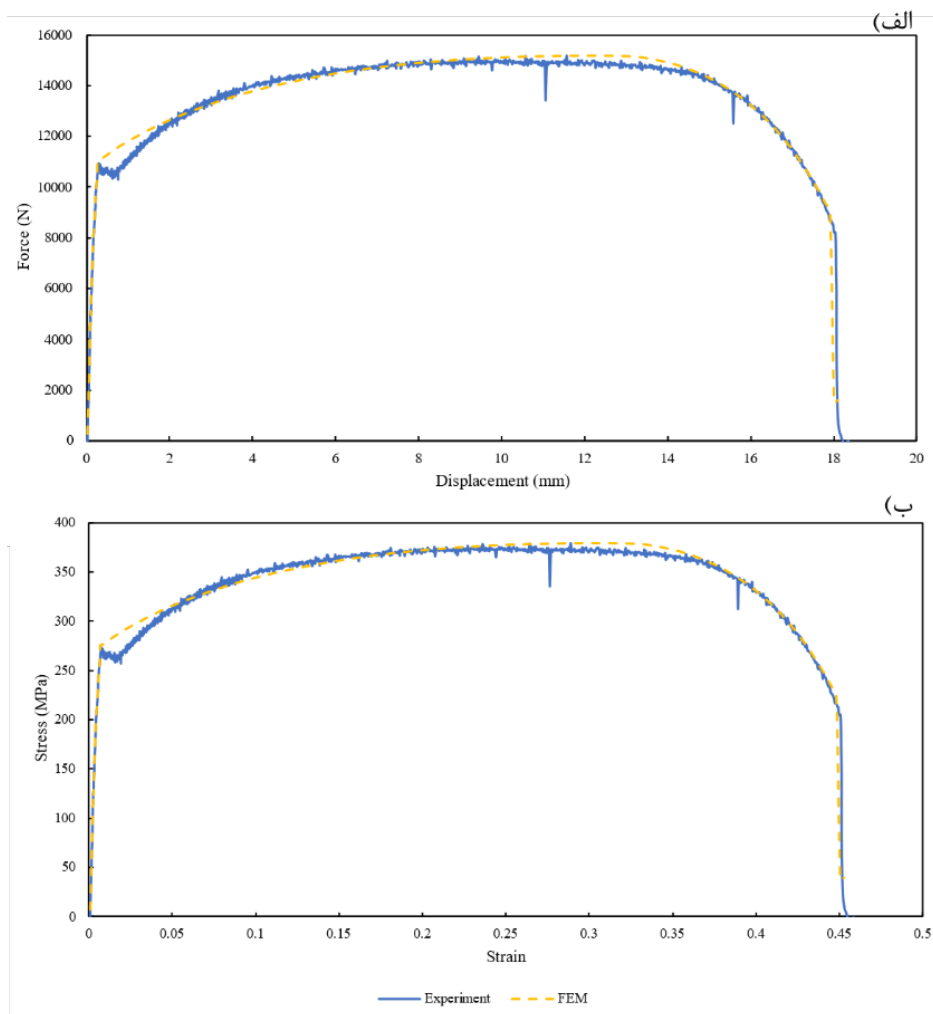


شکل ۶. نمونه دمبلی (الف) پس از آزمون کشش، (ب) پارامتر آسیب، (ج) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و (د) کرنش در راستای Y

Fig. 6. The dog-bone, a) the post-tensile test condition, b) the damage parameter, c) the strain contour obtained from DIC, and d) the strain in the y-direction

مقدار پارامتر شروع آسیب برای تمامی نمونه‌ها، مقدار یک است. در این تحلیل نشان داده شده است که هنگامی که مقدار پارامتر شروع آسیب به یک می‌رسد، المان‌ها دچار کاهش سختی می‌شوند. به علت تعداد زیاد تصاویر، تنها پارامتر کاهش سختی نشان داده شده است.

دستگاه کشش) و اجزای محدود نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نتایج تنش و کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در پیش‌بینی مقادیر تنش تسلیم، استحکام نهایی، تنش در لحظه شکست و کرنش شکست موفق عمل کرده است.



شکل ۷. مقایسه نتایج به دست آمده به روش تجربی و اجزای محدود برای نمونه دمبلی (الف) نمودار بار-جابجایی (ب) نمودار تنش-کرنش

Fig. 7. Comparison between the experimental and FEM results for the dog-bone, a) the load-displacement curve and b) the stress-strain curve

ساخت قطعه و در نظر نگرفته شدن این عیب ها در شبیه سازی اشاره کرد. همچنین، از مقادیر جابه جایی فک دستگاه استفاده شد که با مقادیر جابه جایی طول سنجه نمونه تا حدی متفاوت بوده و ممکن است باعث ایجاد اختلاف نتایج شود.

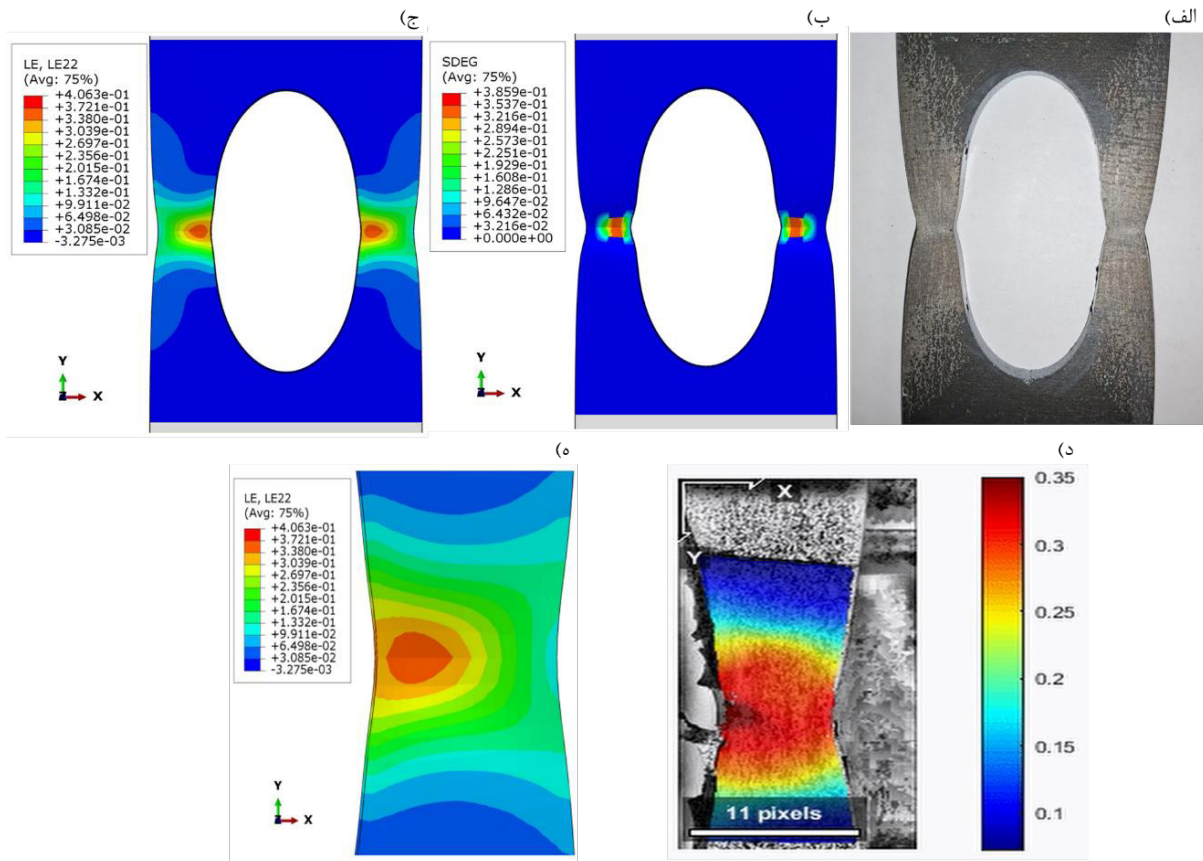
۳-۳-۲ فشار

در شکل ۱۰ نمونه پس از آزمون، کانتور آسیب و کانتور کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و اجزای محدود نشان داده شده اند. مشاهده می شود که شکل نمونه پس از آزمون همانند شکل تغییر یافته در شبیه سازی است. نتایج نیروی فشاری-جابجایی برای نمونه ام ۱ در قالب شکل ۱۱ ارائه شده است.

۳-۳-۳ نمونه ام ۱

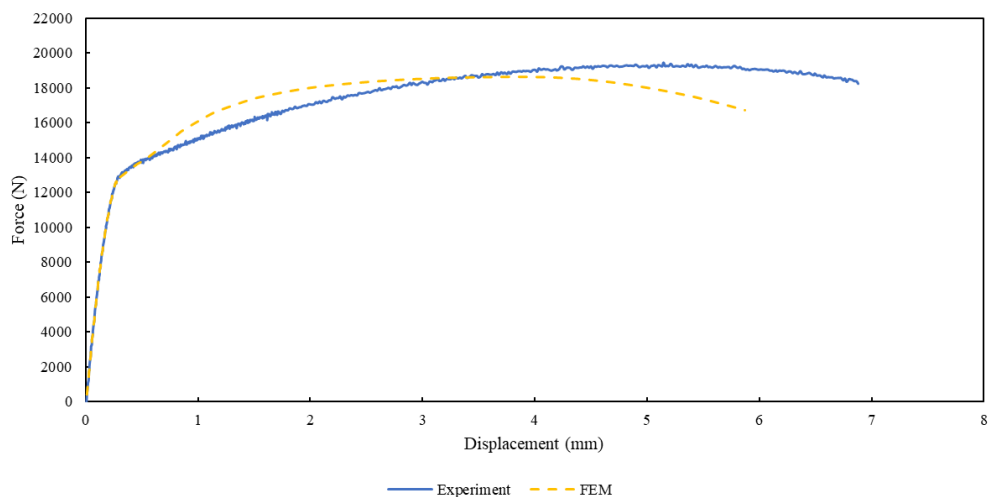
۳-۳-۱ کشش

در شکل ۸ و شکل ۹، نتایج آزمون کشش بر نمونه ام ۱ به ترتیب شامل نمونه واقعی به همراه کانتور آسیب، کانتورهای کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه سازی و مقادیر بار و جابه جایی نمایش داده شده است. از مقایسه شکل نمونه ها در دو روش، مشاهده می شود که نتایج شبیه سازی با آزمون کشش مطابقت دارند. در شکل ۸ پارامتر کاهش افت سفتی نشان داده شده است، هنگامی که مقدار پارامتر شروع آسیب به یک می رسد، سفتی ماده شروع به کاهش می کند. در تمام ناحیه ای که دچار افت سفتی شده اند، مقدار پارامتر آسیب به حد بحرانی رسیده است. تفاوت میان نمودارهای شکل ۹ می توان به دلیل عیب های به وجود آمده هنگام



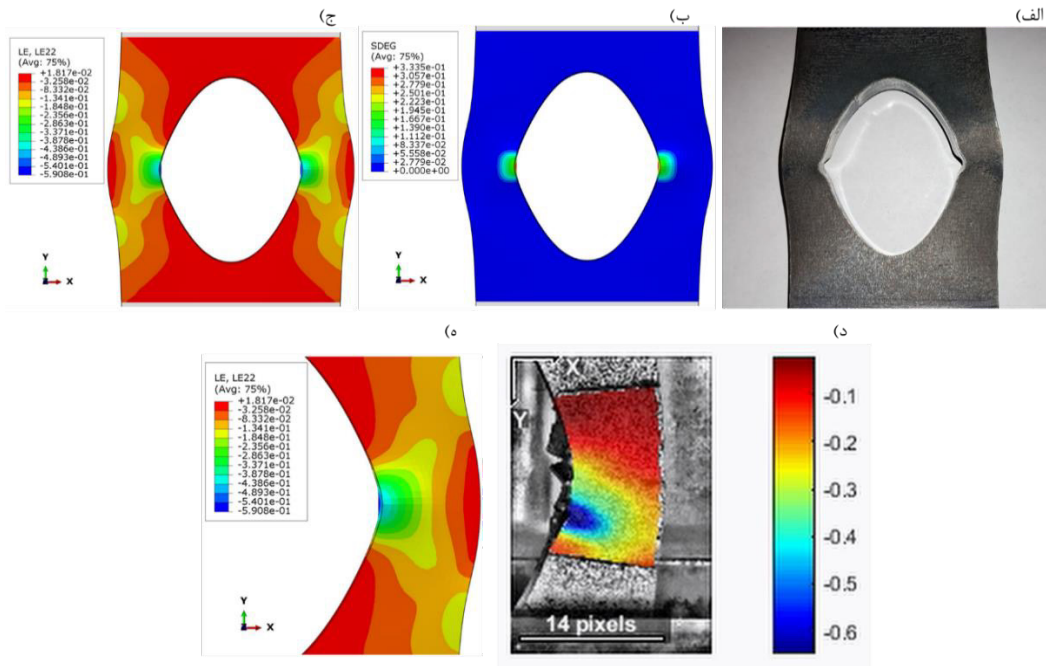
شکل ۸. نمونه ام ۱ (الف) پس از آزمون کشش، (ب) پارامتر آسیب و (ج) کرنش در راستای y، (د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و (ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Fig. 8. M1 specimen, a) the post-tensile test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y-direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



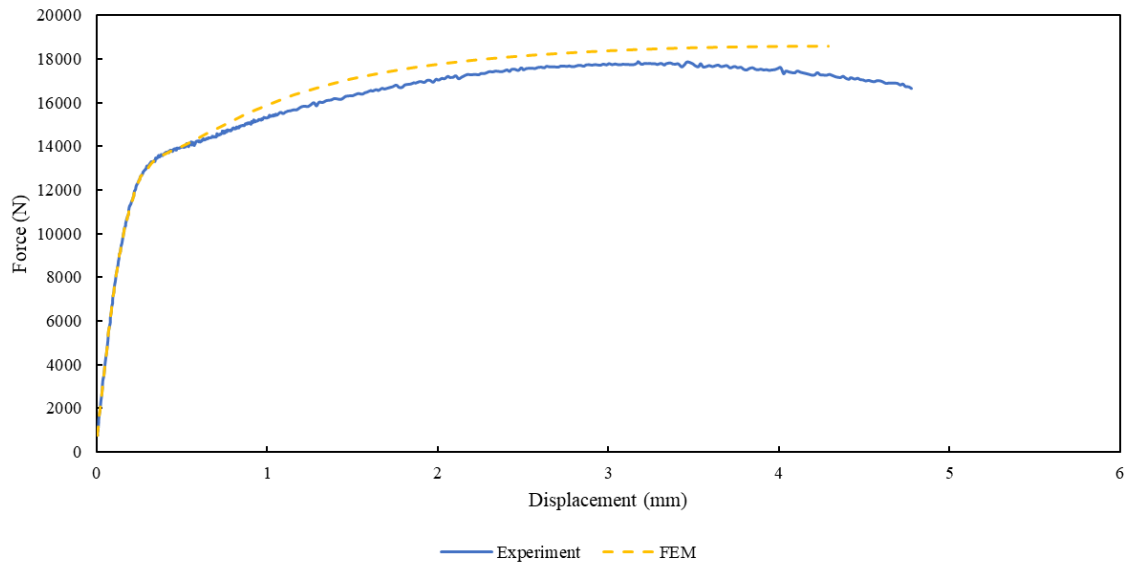
شکل ۹. نمودار بار کششی - جابجایی نمونه ام ۱

Fig. 9. The tensile load-displacement curve for M1



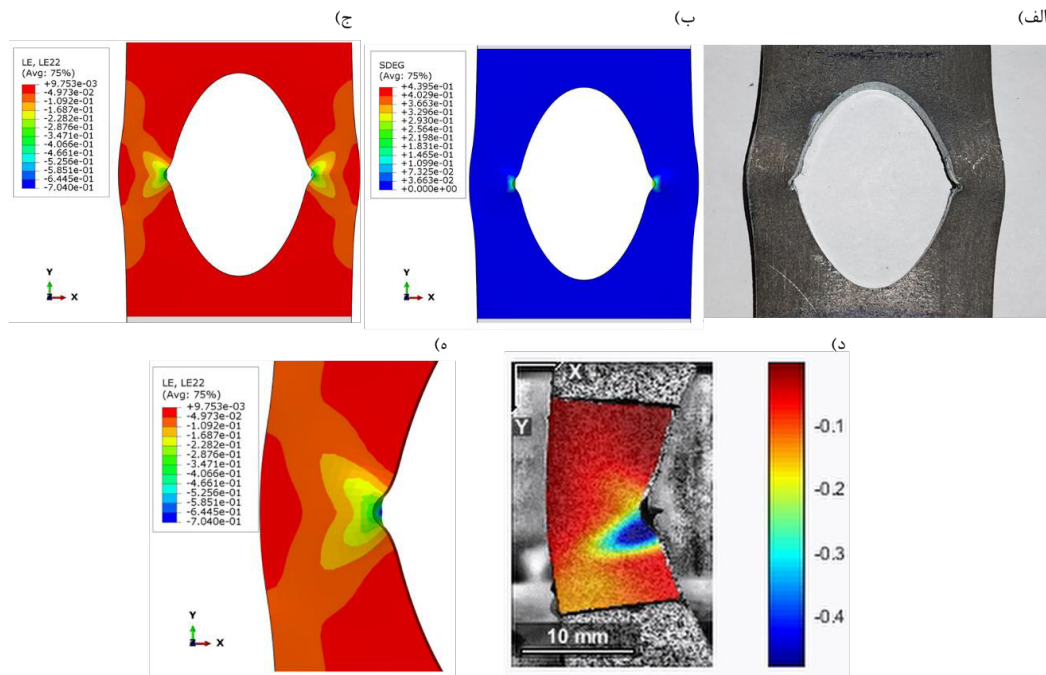
شکل ۱۰. نمونه ام ۱ الف) پس از آزمون فشار، ب) پارامتر آسیب و ج) کرنش در راستای y ، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Fig. 10. M1 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y -direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



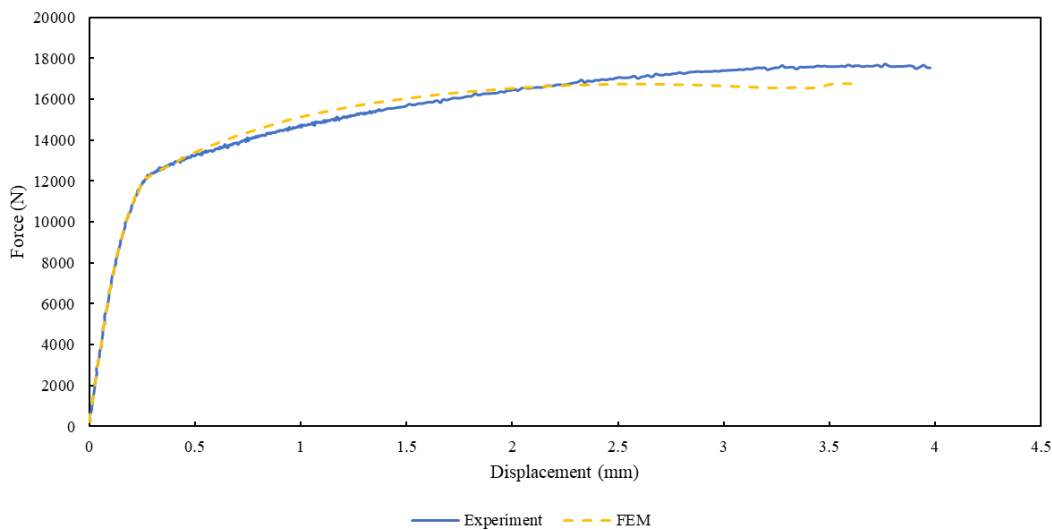
شکل ۱۱. نمودار بار فشاری-جابجایی نمونه ام ۱

Fig. 11. The compression load-displacement curve for M1



شکل ۱۲. نمونه ۲م (الف) پس از آزمون فشار، (ب) پارامتر آسیب، (ج) کرنش در راستای y، (د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و (ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Fig. 12. M2 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y-direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



شکل ۱۳. نمودار بار-جابجایی نمونه ۲م

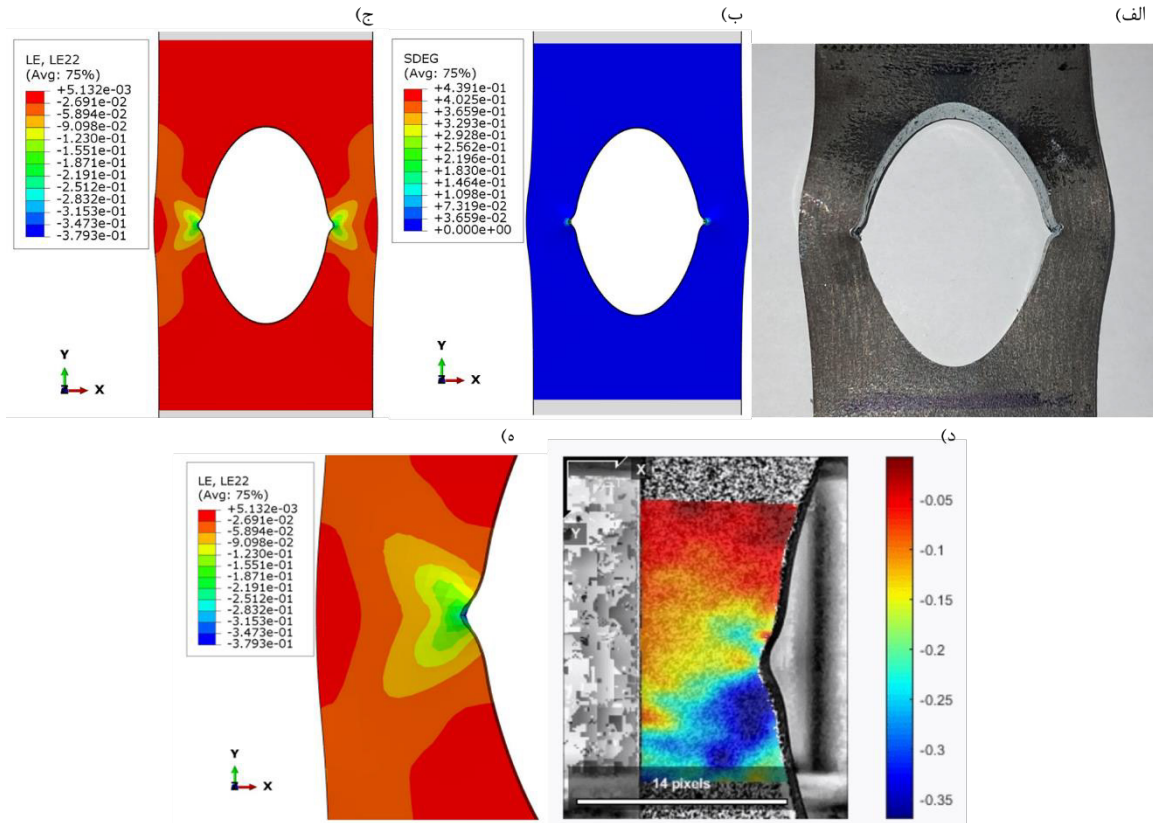
Fig. 13. The compression load-displacement curve for M2

۳-۵- نمونه ۳م

در شکل ۱۴ نمونه پس از آزمون فشار، کانتور آسیب، کانتورهای کرنش از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی و کانتور کرنش و شکل ۱۵ نتایج نیرو-جابجایی برای نمونه ۳م نشان داده شده است که مطابقت میان نتایج حاصل از دو روش تجربی و اجزای محدود، به خوبی قابل مشاهده است.

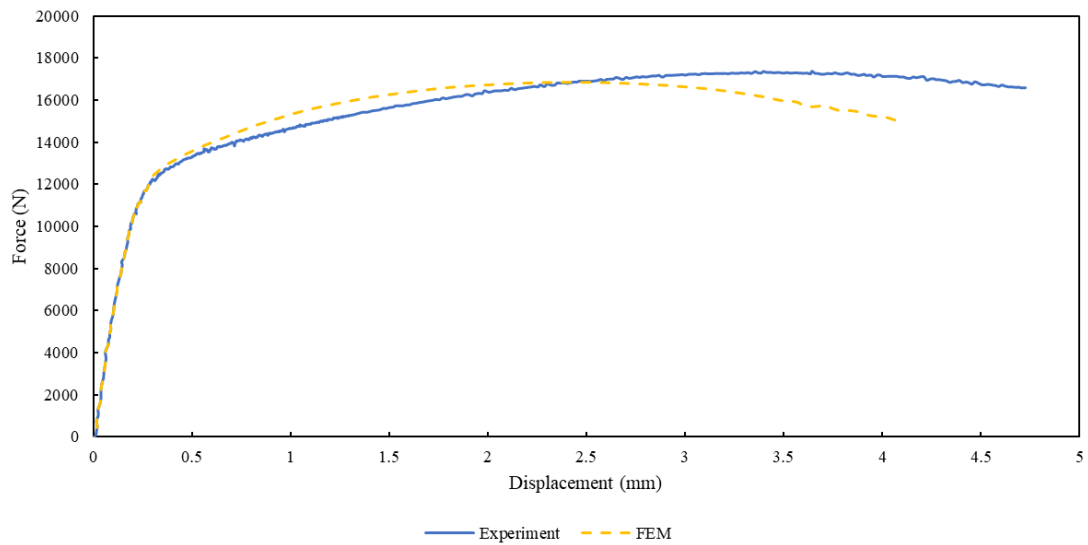
۳-۴- نمونه ۲م

نتایج کانتورهای آسیب و کرنش و نیروی فشاری-جابجایی برای نمونه ۲م در قالب شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ارائه شده است. با مقایسه شکل نمونه با کانتورهای به دست آمده، مشاهده می‌شود که بین شبیه‌سازی و آزمون مطابقت وجود دارد.



شکل ۱۴. نمونه ام ۳ الف) پس از آزمون فشار، ب) پارامتر آسیب و ج) کرنش در راستای y، د) کانتور کرنش همبستگی تصویری دیجیتال و ه) تصویر بزرگنمایی شده کانتور کرنش شبیه‌سازی

Fig. 14. M3 specimen, a) the post-compression test condition, b) the damage parameter, c) the strain in the y-direction, d) the strain contour obtained from DIC, and e) a magnified image of the simulated strain contour



شکل ۱۵. نمودار بار-جابجایی نمونه ام ۳

Fig. 15. The compression load-displacement curve for M3

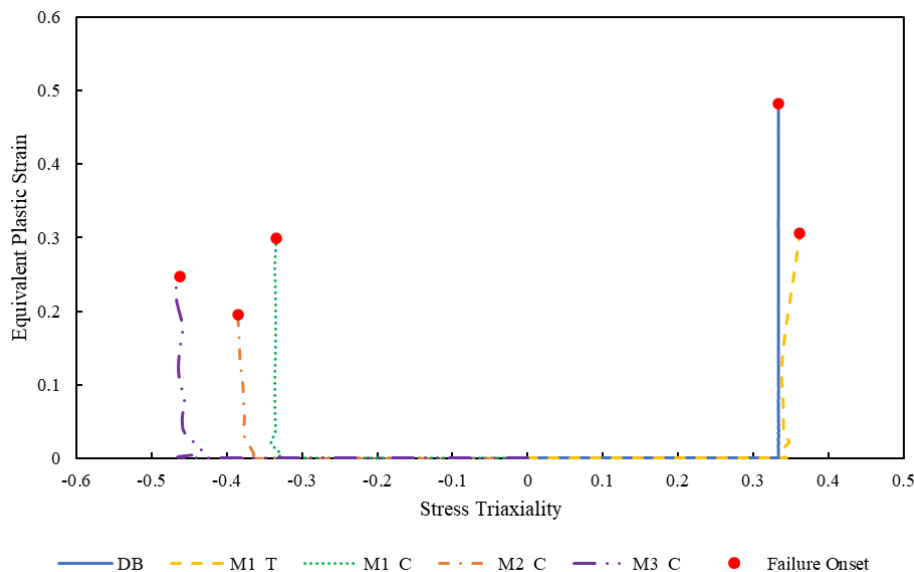
شده‌اند. در تمامی نمونه‌ها، پس از چند نوسان اولیه در کرنش‌های ابتدایی، به مقدار پایدار رسیده‌اند. در جدول ۳ کرنش شکست به ازای سه محوره تنش و زاویه لوده‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نیز کانتورهای کانتور سه محوره تنش و زاویه لود بی‌بعد شده برای نمونه‌های ۱ام، ۲ام و ۳ام نشان داده شده است که با مقادیر جدول ۳ مطابقت دارد. همچنین، مقادیر کرنش در لحظه شکست برای بازه مشخصی از سه محوره‌های تنش، زاویه لود بی‌بعد شده و نوردای سوم در شکل ۱۷ رسم شده است. در شکل ۱۷-الف، سه محوره تنش منفی به صورت خط و سه محوره‌های مثبت به صورت نقطه نمایش داده شده است. در هر دو روش تجربی و اجزای محدود، تغییرات کرنش شکست یکسان است. برای سه محوره‌های تنش مثبت، با افزایش مقدار سه محوره تنش، کرنش شکست کاهش می‌یابد. کرنش شکست برای سه محوره تنش مثبت ۰/۳۳ (دمبلی) و ۰/۳۴۸ (ام ۱ کششی)، در روش تجربی ۰/۴۵ و ۰/۳۵ و در شبیه‌سازی برابر ۰/۴۴ و ۰/۲۹ هستند. در مورد سه محوره‌های تنش منفی، ابتدا مقدار کرنش شکست با کاهش سه محوره تنش ابتدا کم می‌شود و سپس افزایش می‌یابد. با کاهش سه محوره تنش از ۰/۳۴۸ تا ۰/۴۵۶-، کرنش شکست در روش تجربی ابتدا از ۰/۲۴ تا ۰/۲۰ و سپس با افزایش از ۰/۲۰ تا ۰/۲۴ مواجه شده است. در روش شبیه‌سازی نیز مقدار کرنش شکست از ۰/۲۱ تا ۰/۱۸ کاهش یافته و در نهایت از ۰/۱۸ تا ۰/۲۰ افزایش می‌یابد. در شکل ۱۷-ب و ج نیز کرنش شکست برحسب زاویه لود بی‌بعد شده و نوردای سوم رسم شده است. در این شکل‌ها نیز ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش یافته و در نهایت افزایش می‌یابد. وابستگی فولاد استی-۳۷ به سه محوره تنش و زاویه لود بی‌بعد شده در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. بنابراین برای پیش‌بینی کرنش شکست، تنها بررسی سه محوره تنش کافی نیست و زاویه لود بی‌بعد شده باید در مدل‌های محاسباتی در نظر گرفته شود.

کاهش و افزایش کرنش شکست با کاهش مقدار سه محوره تنش و زاویه لود نرمالیزه شده، می‌توان به دلیل نوع آسیب ایجاد شده در سه محوره تنش‌های مختلف است. به عنوان مثال با تغییر نمونه از دمبلی به ام ۱ کششی و افزایش مقدار سه محوره تنش، ریزحفره‌ها تمایل دارند که سریعتر افزایش یابند و کرنش شکست کاهش می‌یابد [۲۱]. وجود انحنای باعث تغییر وضعیت تنش می‌شود و بنابراین در هر نمونه یک نوع وضعیت تنش خاص مرتبط به هندسه خود را دارد. از آنجایی که شکست نرم به سه محوره تنش وابسته است، محل شکست در نقطه‌ای به وجود می‌آید که در آن سه محوره تنش بیشترین مقدار را دارد. به همین دلیل است که در شکل‌های آسیب حاصل از

از نظر کیفی، تمام آزمایش‌ها پاسخ مشابهی از جمله یک دوره بارگذاری الاستیک اولیه و به دنبال آن، یک دوره تسلیم، کرنش سختی و در انتها شکست نهایی را نشان دادند. مطابق نتایج، تمام حالت‌های شکست نمونه‌ها، شکست نرم بودند. با بررسی نمودارهای مربوط به کانتور کرنش حاصل از روش همبستگی تصویری دیجیتال و اجزای محدود، شبیه‌سازی‌های انجام شده اعتبارسنجی شدند. مشاهده شد که در تمامی نمونه‌ها، نتایج حاصل از دو روش مشابهت قابل قبولی دارند. در نمونه دمبلی، تمامی پارامترها به خوبی در دو روش با هم تطابق داشتند. در حالی که برای نمونه ام ۱ کششی، کرنش شکست دو روش با هم ۱۵٪ تفاوت دارد. همچنین در آزمون فشار، با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی بیشترین مطابقت مربوط به نمونه‌های ام ۱ و ام ۲ بوده که کرنش در لحظه شکست را با خطای معادل ۱۰٪ نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. بیشترین اختلاف نیز مربوط به نمونه ام ۳ با درصد خطای ۱۴٪ در پیش‌بینی کرنش در لحظه شکست است. تصاویر نمونه‌های ام ۱، ام ۲ و ام ۳ مربوط به انتهای آزمون فشار هستند که آزمون پس از شکست نرم ادامه یافته است. به همین خاطر تصاویر آزمون فشار مقداری کم‌انرژی محلی مشاهده می‌شود که البته این قسمت از نمودار حذف شده است. تفاوت بین آزمون و شبیه‌سازی ممکن است به موارد مختلفی مرتبط است. جابه‌جایی فک دستگاه با ناحیه طول سنجی نمونه‌ها متفاوت است و به همین دلیل، ممکن است باعث اختلاف نتایج شود. مورد دیگر، نادیده گرفتن برخی جزئیات نمونه در مدل اجزای محدود است که کارایی محاسباتی و دشواری همگرایی را افزایش می‌دهد و ممکن است باعث تفاوت نتایج شود. برخی از عیوب فنی، مانند ابعاد هندسی و آسیب‌های در هنگام ساخت، اجتناب‌ناپذیر هستند که باعث تفاوت نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌شود.

در شکل‌های بخش ۳، تصاویر تغییر شکل یافته برای نمونه‌های مختلف پس از انجام آزمون و شبیه‌سازی نشان داده شده‌اند. برای تمامی نمونه‌ها، شکل روش تجربی و شبیه‌سازی یکسان است. در آزمون‌های کشش، کم شدن سطح مقطع بیانگر شکست نرم است. همانند آزمون کشش، در آزمون فشار نیز بیشترین تغییر شکل در ناحیه مرکزی رخ داده است به خصوص در ناحیه‌ای که انحنای قرار گرفته است. با توجه به کانتورهای آسیب نمونه‌ها، در ناحیه انحنای آسیب شروع می‌شود و تغییر شکل در این ناحیه بیشتر از سایر نقاط است.

سابقه شکست نمونه‌ها با سه محوره تنش مختلف در شکل ۱۶ رسم



شکل ۱۶. سابقه شکست نمونه‌ها با سه محوره تنش مختلف

Fig. 16. The fracture behavior of samples under different stress triaxialities

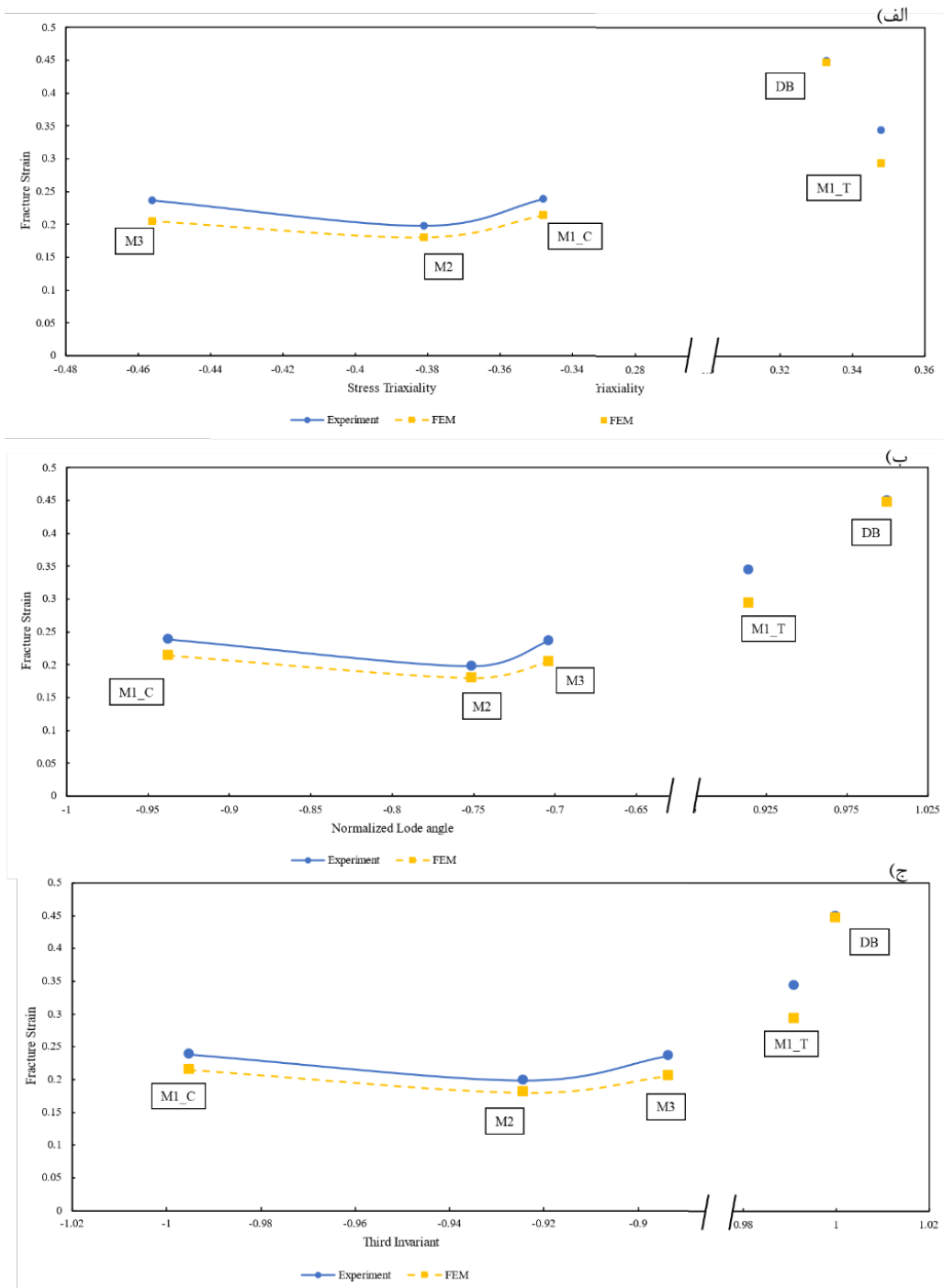
جدول ۳. مقادیر سه محوره تنش، زاویه لود بی‌بعدشده و کرنش شکست متناظر آن‌ها

Table 3. Values of the stress triaxiality, the normalized Lode angle, and their corresponding fracture strain

سه محوره تنش	نمونه
۰/۳۳	دمبلی
۰/۳۴۸	۱م (کشش)
-۰/۳۴۸	۱م (فشار)
-۰/۳۸۱	۲م
-۰/۴۵۶	۳م

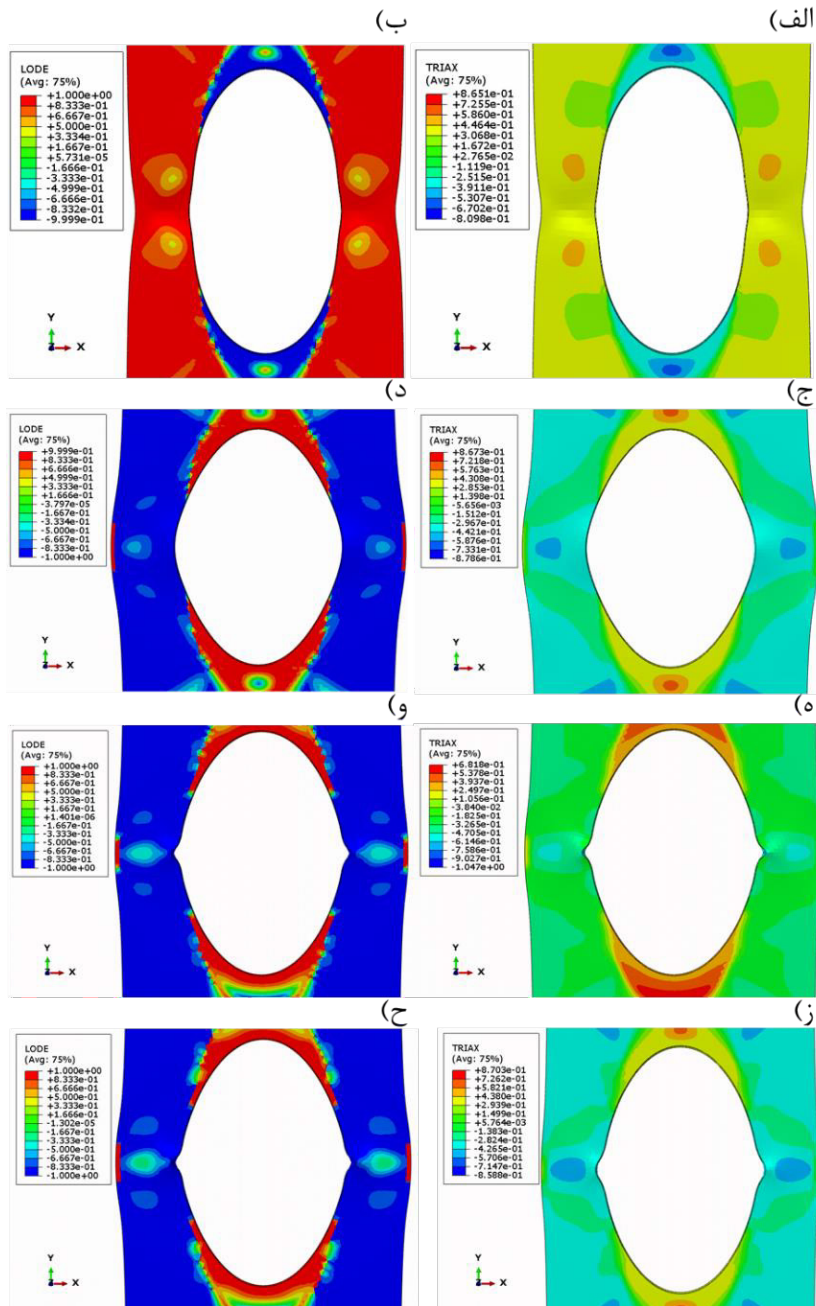
مطالعه کرد. شایان ذکر است که این تکنیک آزمایشی جدید ممکن است برای اعتبارسنجی مدل‌های مبتنی بر مکانیزم برای شکست نرم نیز مورد استفاده قرار گیرد. توسعه این فرآیند ترکیبی تجربی-عددی به دلیل نیاز صنعت به ابزارهای مهندسی برای پیش‌بینی شکستگی در فلزات حائز اهمیت است. به همین دلیل، تحقیق برای توسعه معیارهای شروع پیش‌بینی کرنش شکست در بازه وسیع‌تر سه محوره تنش به خصوص در بخش منفی، در حال انجام است.

آزمون و شبیه‌سازی نمونه‌ها، محل شکست نرم مرکز نمونه به دست می‌آید. هندسه نمونه‌های طراحی شده به نوعی ایجاد شدند تا با استفاده از نمونه مسطح که تحت بارگذاری تک‌محوره، وضعیت تنش مختلف ایجاد می‌شود. این فرآیند بدون نیاز به دستگاه خاصی برای قابل انجام است و نیازی به چیدمان آزمون چندمحوره نیست. با بهره‌گیری از هندسه‌های طراحی شده، شکست نرم را می‌توان برای طیف وسیعی از سه محوره تنش کم و متوسط و حالات کرنش



شکل ۱۷. نمودار کرنش در لحظه شکست برحسب الف) سه محوره تنش منفی، ب) زاویه لود بی‌بعدشده و ج) ناوردای سوم با روش‌های تجربی و اجزای محدود

Fig. 17. The fracture strain at failure as a function of a) negative stress triaxiality, b) normalized Lode angle, and c) the third invariant using both experimental and FEM



شکل ۱۸. الف) کانتور سه محوره تنش ام ۱ کششی، ب) زاویه لود بی‌بعدشده ام ۱ کششی، ج) کانتور سه محوره تنش ام ۱ فشاری، د) زاویه لود بی‌بعدشده ام ۱ فشاری، ه) کانتور سه محوره تنش ام ۲، و) زاویه لود بی‌بعدشده ام ۲، ز) کانتور سه محوره تنش ام ۳ و ح) زاویه لود بی‌بعدشده ام ۳

Fig. 18. The stress triaxiality and normalized Lode angle contours a) the stress triaxiality contour for M1 under tension, b) normalized Lode angle for M1 under tension, c) the stress triaxiality contour for M1 under compression, d) normalized Lode angle for M1 under compression, e) the stress triaxiality contour for M2, f) normalized Lode angle for M2, g) the stress triaxiality contour for M3, and h) normalized Lode angle for M3

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمون‌های تجربی بر روی نمونه‌های مختلف با مقادیر سه محوره تنش مثبت و منفی صورت گرفت و رفتار شکست تحت سه محوره‌های تنش متفاوت بررسی شد. مدل هندسی نمونه‌ها، قطعاتی مستطیلی از جنس فولاد اس‌تی-۳۷ انتخاب شده و درون آن را حفره مستطیلی به همراه انحنا در میان آن‌ها ایجاد شد. با اعمال بار تک‌محوره، به دلیل وجود انحنا، وضعیت تنش چندمحوری درون نمونه ایجاد می‌شود. بدین صورت نیاز به انجام آزمون چندمحوری نیست و با استفاده از هندسه‌های طراحی شده، بازه مختلفی از سه محوره تنش مورد بررسی قرار گرفتند. تغییر شکل نمونه‌ها پس از اعمال بارگذاری در دو روش تجربی و شبیه‌سازی همانند هم بودند. همچنین، از روش همبستگی تصویری دیجیتال برای ثبت دقیق‌تر کرنش و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده شد. کانتور کرنش به‌دست‌آمده از روش همبستگی تصویری دیجیتال و شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند که نتایج با هم تطابق داشتند.

با بررسی کانتور آسیب حاصل از شبیه‌سازی، مشخص شد که آسیب در ناحیه انحنا ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد که مقدار کرنش شکست حاصل از دستگاه بیشتر از روش شبیه‌سازی بوده که ممکن است به علت عیب‌های ساخت و خطاهای آزمون است. مقادیر کرنش شکست به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی و عددی برحسب تنش سه محوره رسم شد. رفتار فولاد اس‌تی-۳۷ در سه محوره تنش منفی، زاویه لود بی‌بعد شده و ناوردای سوم در روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی به یک صورت هست، به‌طوری‌که ابتدا مقدار کرنش شکست کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در مطالعه‌های آینده، سعی می‌شود که مدل تحلیل ارائه شود تا اثر سه محوره تنش منفی بر روی کرنش شکست را به‌درستی پیش‌بینی کند.

منابع

- triaxiality, *International Journal of Plasticity*, 145 (2021) 103057.
- [4] A.L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *J. Eng. Mater. Technol.*, 99(1) (1977) 2-15.
- [5] M. Homayounfar, M. Ganjiani, A large deformation constitutive model for plastic strain-induced phase transformation of stainless steels at cryogenic temperatures, *International Journal of Plasticity*, 156 (2022) 103344.
- [6] C. Chu, A. Needleman, Void nucleation effects in biaxially stretched sheets, *J. Eng. Mater. Technol.*, 102(3) (1980) 249-256.
- [7] V. Tvergaard, Material failure by void growth to coalescence, *Advances in applied Mechanics*, 27 (1989) 83-151.
- [8] 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.
- [9] Y. Lou, J.W. Yoon, Anisotropic ductile fracture criterion based on linear transformation, *International Journal of Plasticity*, 93 (2017) 3-25.
- [10] A.M. Freudenthal, *The inelastic behavior of engineering materials and structures*, Wiley, (1950).
- [11] M. Cockcroft, Ductility and workability of metals, *J. of Metals*, 96 (1968) 2444.
- [12] S. Oh, C. Chen, S. Kobayashi, Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—part 2: workability in extrusion and drawing, *J. Eng. Ind. Feb*, 101(1) (1979) 36-44.
- [13] P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina, A new method for the prediction of formability limits in metal sheets, in: *Proc. 7th biennial Conf. IDDR*, 1972.
- [14] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, Criteria for ductile fracture and their applications, *Journal of Mechanical Working Technology*, 4(1) (1980) 65-81.
- [15] M. Ganjiani, A damage model for predicting ductile fracture initiation in steels using a stress triaxiality–shear stress coupled model, *Acta Mechanica Sinica*, 35 (2019) 600-614.
- [2] L. Kang, H. Ge, X. Fang, An improved ductile fracture model for structural steels considering effect of high stress triaxiality, *Construction and Building Materials*, 115 (2016) 634-650.
- [3] Z. Peng, H. Zhao, X. Li, New ductile fracture model for fracture prediction ranging from negative to high stress

- Mg alloy rolling sheet under different stress triaxiality, *Journal of Materials Research and Technology*, 27 (2023) 7368-7379.
- [19] J. Park, S. Kweon, K. Park, Gurson-Cohesive modeling (GCM) for 3D ductile fracture simulation, *International Journal of Plasticity*, 175 (2024) 103914.
- [20] Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture, *International journal of fracture*, 161(1) (2010) 1-20.
- [21] R. Kiran, K. Khandelwal, A triaxiality and Lode parameter dependent ductile fracture criterion, *Engineering Fracture Mechanics*, 128 (2014) 121-138.
- fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 84 (2020) 104048.
- [16] 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.
- [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] S. Xu, L. Qian, C. Sun, F. Liu, C. Wang, Z. Sun, Y. Zhou, Investigation into the fracture behavior of ZK60

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mansouri, S. M. Ganjani, *The effect of negative stress triaxiality and lode angle on ductile fracture of ST-37*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(9) (2024) 1303-1326.

DOI: [10.22060/mej.2025.23401.7756](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23401.7756)



