



Experimental and numerical analysis of the effect of stress triaxiality and Lode angle on ductile failure of Ti-6Al-4V alloy

Javad Ghaffari, Mehdi Ganjiani*

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

ABSTRACT: In this article, the effect of stress triaxiality and Lode angle on the ductility of titanium grade 2 alloy has been investigated. For this research, four samples with different geometries, including Dog-bone samples, notched samples, and two shear samples, were designed and manufactured. A uniaxial tensile test at ambient temperature was performed on these samples. A Dog-bone sample was used to extract the mechanical properties of titanium alloy. The simulations were done in Abaqus software and the failure behavior of the samples was analyzed until the end of the plastic zone. To match the force-displacement diagrams, Swift's combined equation and fourth-order polynomial were used. Comparing the results of experimental tests and simulation with Abaqus shows a good agreement between the diagrams up to the end of the plastic zone. In this research, the stress triaxiality varied between zero and 0.5 for four different samples. Specifically, for one of the triaxial shear samples, the stress value was zero, and for the other shear sample, 0.2. Also, the stress triaxiality for Dog-bone and notched sample was recorded as 0.33 and 0.5 respectively.

Review History:

Received: Jul. 24, 2024

Revised: Oct. 08, 2024

Accepted: Oct. 10, 2024

Available Online: Oct. 20, 2024

Keywords:

Ti-6AL-4V

Lode Angle

Stress Triaxiality

Fracture Strain

1- Introduction

Titanium alloys are excellent candidates for aerospace applications due to their high strength-to-weight ratio and high corrosion resistance. Also, one of the primary justifications for using titanium in the aerospace industry is weight saving, operating temperature, corrosion resistance, and composite compatibility [1]. Steelways et al. [2] investigated the results of tensile and shear loading tests as well as simulations for 6061 aluminum samples. The numerical results showed that the stress triaxiality ranges from 0.07 to 0.58. The fracture strain values of the samples were measured using digital image correlation. Also, the failure strain decreased uniformly with increasing triaxiality. In the research work of Zistel et al. [3], damage was investigated in aluminum 6082. The failure of this alloy was mainly caused by the creation of holes, their growth, and integration; While the formation of fine cracks is caused by shear and compressive stress conditions. In addition, the damage behavior also strongly depends on the loading direction of the material sample. Common Dog-bone samples are used to identify the parameters of elastic-plastic materials. With different grooved samples, the effect of the stress state on the behavior of the material can be investigated because the triaxial stress increases with the decrease of the groove radius. This article examines the fracture behavior of samples of titanium grade 2 sheet and four different

samples have been simulated using Abaqus software. The geometry of these samples was selected by numerous analyses and simulations and subjected to tensile loading at room temperature. The results show that the plastic behavior is specific to the material and the common models for the hardening of metals do not simulate the behavior of titanium well. To match the simulation results with the experimental data, a new hybrid relation is used. Also, by changing the geometry at the point of failure, the state of stress has changed and an analysis of the failure behavior has been performed on the material.

2- Method

In this article, titanium grade 2 alloy is used, which is a two-phase alloy and has mechanical properties such as a high strength-to-weight ratio, high-temperature creep resistance, microstructure stability, and corrosion resistance. Usually, in fracture studies, two stress triaxiality parameters and Lode angle have a significant effect on material behavior. The stress triaxiality is considered as an unavoidable parameter to check the damage of the sample and it is defined as the ratio of the average stress or hydrostatic pressure to the von Mises equivalent stress:

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





Fig. 1. Two sheared samples, Dog-bone and grooved specimen.

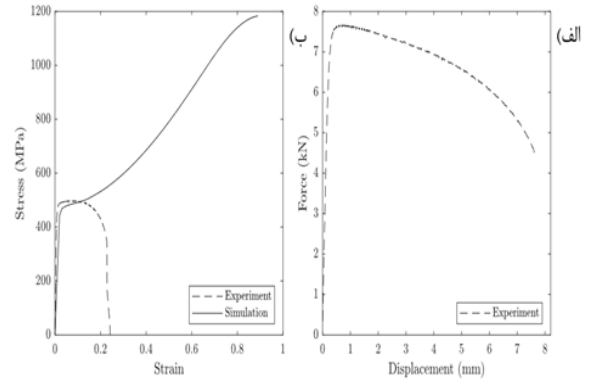


Fig. 2. Force-displacement and true stress-strain of the Dog-bone specimen of experimental test and numerical simulation

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{eq}} \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (2)$$

In equation (1), η is stress triaxiality and greatly affects the amount of plastic strain before soft failure occurs. In relation (2) σ_{eq} the stresses are the stresses of the main direction.

This research examines the effects of stress triaxiality and Lode angle on the spread of damage in materials. Static tensile loading was performed for four samples, including Dog-bone, grooved, and two sheared samples, and the deformation in the plastic region was investigated. For loading, one side of the sample is fixed in the jaw of the tension device, and loading is applied from the other side. The samples were loaded at a speed of 3 mm/min with an Instron 8502 machine and force-displacement diagrams were recorded. All samples have a thickness of two millimeters and 120*25 mm² length and width, and each sample has been tested four times to increase the accuracy of the results.

In order to obtain the mechanical properties of the desired material, the tensile test of the Dog-bone sample was used. In this work, the Dog-bone sample was designed and manufactured based on ASTM E8/E8M 16a [4]. 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 2. Also, in figure 3. the force-displacement diagram of all four samples can be seen.

The true stress-strain diagram of the experimental test of the Dog-bone sample is compared with the test done in the work of Gatti et al [5]. To match the experimental and numerical diagrams, the combined hardening relationship of

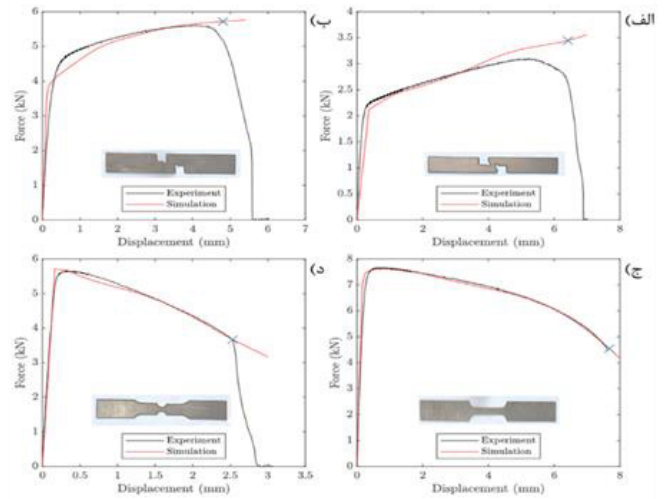


Fig. 3. Force-displacement and true stress-strain of the Dog-bone specimen of experimental test and numerical simulation

the Swift model and a fourth-order polynomial as relation (3) were used to describe the stress-strain behavior of second-grade titanium alloys in a way that could describe the stress-strain behavior of the material for uniaxial tension [6]:

$$\sigma_{eq} = qk(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n + (1-q)(a\varepsilon_p^4 + b\varepsilon_p^3 + c\varepsilon_p^2 + d\varepsilon_p + e) \quad (3)$$

For the Dog-bone sample, element independence analysis has been done to reach a more accurate result. The results of this analysis are presented in Figure 4. In all samples, 0.5 mm element has been used in the fracture area. The boundary

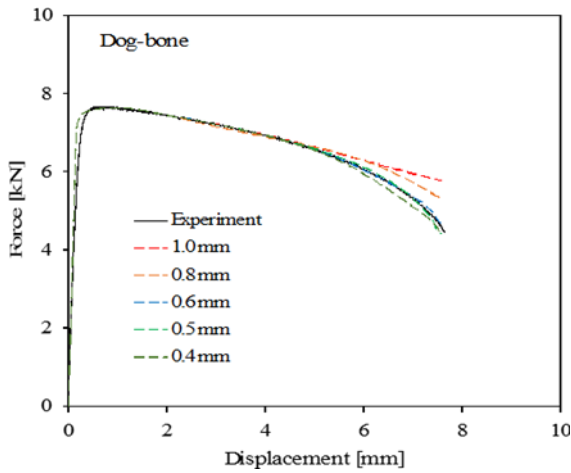


Fig. 4. Effect of element size on force-displacement convergence of Dog-bone specimen.

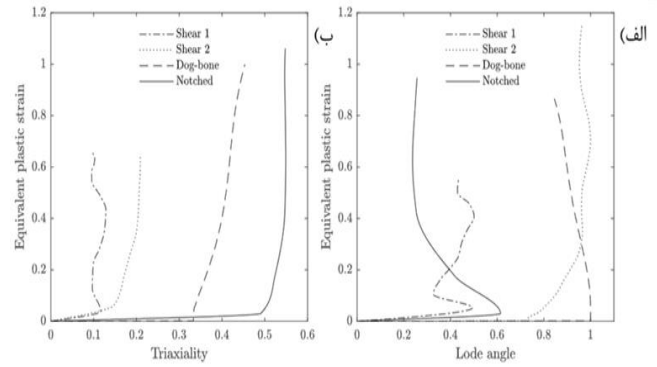


Fig. 5. Plastic strain in terms of Lode angle and stress triaxiality of samples.

conditions are considered in such a way that one end of the samples is fixed from one side and does not move, and displacement is applied from the other side.

To express stress triaxiality and Lode angle, the critical element was selected in the fracture area and the corresponding parameters were drawn according to Figure 5 during loading. As can be seen from Figure 5, the Lode angle changes are not uniform. Also, in these four samples, the stress triaxiality was obtained from the range of zero to 0.5.

3- Conclusion

This research deals with the numerical and experimental analysis of four titanium grade two samples under tensile loading and examines the effect of different grooves on fracture behavior. Creating a groove in the samples causes a change in the stress triaxiality and Lode angle. The results show that with the increase of stress triaxiality, the Lode angle does not have a constant trend and the strain behavior is different based on the structure of the material. To simulate the hardening behavior, a hybrid equation is fitted on the stress-strain data, and the dependence of the fracture strain on the stress triaxiality and Lode angle is introduced. Finally, the findings show that in different stress conditions, variable parameters have an effect on material failure and there is a good agreement between theoretical and experimental data.

References

- [1] R.R. Boyer, An overview on the use of titanium in the aerospace industry, *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2) (1996) 103-114.
- [2] M. Scales, N. Tardif, S. Kyriakides, Ductile failure of aluminum alloy tubes under combined torsion and tension, *International Journal of Solids and Structures*, 97 (2016) 116-128.
- [3] M. Zistl, S. Gerke, M. Brüning, Biaxial experiments on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture behavior of ductile metals, *Procedia Structural Integrity*, 13 (2018) 57-62.
- [4] I. Astm, ASTM E8/E8M-16a: standard test methods for tension testing of metallic materials, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, (2016).
- [5] S. Gatea, B. Lu, J. Chen, H. Ou, G. McCartney, Investigation of the effect of forming parameters in incremental sheet forming using a micromechanics based damage model, *International Journal of Material Forming*, 12 (2019) 553-574.
- [6] 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.



تحلیل تجربی و عددی اثر سه‌محوره‌ی تنش و زاویه‌ی لود بر شکست نرم آلیاژ تیتانیوم

جواد غفاری، مهدی گنجیانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳

کلمات کلیدی:

تیتانیوم درجه دو
زاویه لود
سه‌محوره تنش
کرنش شکست

خلاصه: در این مقاله، تأثیر سه‌محوره تنش و زاویه لود بر شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم درجه دو مورد بررسی قرار گرفته است. برای این تحقیق، چهار نمونه با هندسه‌های مختلف شامل نمونه‌های دمبلی‌شکل، شیاردار و دو نمونه برشی طراحی و ساخته شد. آزمایش کشش تک‌محوره در دمای محیط بر روی این نمونه‌ها انجام پذیرفت. از نمونه دمبلی‌شکل برای استخراج خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت و رفتار شکست نمونه‌ها تا پایان ناحیه پلاستیک تحلیل گردید. برای مطابقت نمودارهای نیرو-جابجایی، معادله ترکیبی سویفت و چند جمله‌ای مرتبه چهار به کار گرفته شد. مقایسه نتایج آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی با آباکوس نشان‌دهنده تطابق خوبی بین نمودارها تا انتهای ناحیه پلاستیک است. در این تحقیق، سه‌محوره تنش برای چهار نمونه مختلف بین صفر تا ۰/۵ متغیر بود. به‌طور خاص، برای یکی از نمونه‌های برشی سه‌محوره تنش عدد صفر و برای دیگر نمونه برشی ۰/۲ به‌دست آمد. همچنین، سه‌محوره تنش برای نمونه دمبلی‌شکل و شیاردار به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۵ ثبت شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که نزدیکی سه‌محوره تنش به صفر منجر به شکست برشی در آزمایشات می‌شود و روند تغییرات زاویه لود نیز تأثیر متناظری بر کرنش شکست دارد.

۱- مقدمه

که آلیاژهای تیتانیوم با محیط‌های حاوی هیدروژن در تماس باشند، مشکلات شدیدی را ایجاد می‌کنند [۱]. آلیاژهای تیتانیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی بالا، از نامزدهای عالی برای کاربردهای هوافضا هستند. همچنین از توجهات اولیه برای استفاده از تیتانیوم در صنعت هوافضا می‌توان به صرفه‌جویی در وزن، دمای عملیاتی، مقاومت در برابر خوردگی و سازگاری کامپوزیت اشاره نمود [۲]. آلیاژهای تیتانیوم به‌عنوان موفق‌ترین ماده فلزی در زمینه مهندسی پزشکی استفاده شده است. برخی خواص تیتانیوم مثل افزایش مقاومت در برابر خوردگی موجب شده است تا موارد استفاده برای تولید ایمپلنت‌های زیست پزشکی و رایج‌ترین کاربردهای تیتانیوم و آلیاژهای آن، از ایمپلنت‌های ارتوپدی گرفته تا پروتزهای دندانی و دستگاه‌های قلبی عروقی را پوشش می‌دهد [۳].

خواص و رفتار آسیب تیتانیوم در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است، به‌عنوان مثال در کار پژوهشی یوگانجانیولو و همکاران [۴]، رفتار شکست تیتانیوم درجه دو را تحت تغییرات هندسه نمونه‌ها و سرعت اعمال بارگذاری بررسی شد. با به‌دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی می‌توان

تیتانیوم به‌عنوان یک فلز سبک وزن، نسبت استحکام به چگالی بالا در برابر خوردگی و ساختاری کارآمد برای کاربردهای حیاتی و با کارایی بالا شناخته شده است. در مطالعات زیادی تغییر شکل و رفتار شکست تیتانیوم برای کاربردهای متنوعی مورد بحث قرار گرفته است. رفتار شکست و تغییر شکل تیتانیوم تحت تأثیر عوامل مختلف مثل نرخ بارگذاری، تأثیر دما، ساختار ماده و خوردگی قرار دارد. با وجود خواص متعدد، رفتار خاص در قسمت پلاستیک این ماده در مقایسه با خصوصیات سایر فلزات نرم، به دلیل ماهیت پیچیده آن بسیار نادیده گرفته شده است که در این مطالعه به آن پرداخته خواهد شد.

تیتانیوم درجه دو^۱ به دلیل استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی در مقایسه با آلومینیوم و فولاد، پرکاربردترین ماده در کاربردهای هوافضا، دریایی و صنایع پزشکی است. اما از نظر واکنش شیمیایی، هنگامی

1 Ti-6Al-4V

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



کشش تک‌محوری و پیچشی ترکیبی بود. همچنین مسیرهای بارگذاری غیرتناسبی شامل کشش تک‌محوری و سپس پیچش یا پیچش به‌دنبال کشش تک‌محوری بود. در کار تحقیقاتی زیستل و همکاران [۹]، آسیب در آلومینیوم ۶۰۸۲ بررسی شد. شکست این آلیاژ عمدتاً ناشی از ایجاد حفره‌ها، رشد و ادغام آنها بود؛ درحالی‌که شکل‌گیری ترک‌های ریز، ناشی از شرایط تنش برشی و فشاری است. علاوه بر این، رفتار آسیب نیز به شدت به مسیر بارگذاری نمونه مواد بستگی دارد. بنابراین، این وابستگی مسیر باید به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گیرد. حالت تنش در ناحیه مورد نظر را می‌توان با بار اعمال شده و هندسه نمونه کنترل کرد. بنابراین، آزمایش‌های زیادی از ورق‌های فلزی، توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف با نمونه‌های مختلف پیشنهاد شده است. نمونه دمبلی‌شکل معمول برای شناسایی پارامترهای مواد الاستیک-پلاستیک استفاده می‌شوند. با نمونه‌های شیاردار متفاوت تأثیر حالت تنش بر رفتار مواد را می‌توان بررسی کرد زیرا تنش سه‌محوره با کاهش شعاع شیار افزایش می‌یابد.

نتایج تجربی به‌دست آمده از مقاله استفن گرک [۱۰] نشان می‌دهد که نمونه ایکس‌صفر مناسب برای مطالعه آسیب و رفتار شکستگی آلیاژی از جنس آلومینیوم در یک طیف گسترده‌ای از سه‌محوره تنش است. برای بارگذاری کششی-کششی (سه‌محوره تنش مثبت) رشد فضای خالی عمده را می‌توان مشاهده کرد درحالی‌که برای بارگذاری کششی-فشاری (سه‌محوره تنش در اطراف صفر) تنش برشی غالب مشاهده شده است. آزمایش‌ها با مسیرهای بارگذاری غیرتناسبی منجر به رفتار آسیب متفاوت نمونه می‌شود، یعنی رفتار آسیب وابسته به مسیر به وضوح نشان داده می‌شود و بنابراین اطلاعات اضافی در مورد فرآیندهای آسیب و شکست می‌توان استخراج کرد. به‌طور کلی، نمونه ایکس‌صفر برای مطالعه آسیب و رفتار شکست ورق فلز برای طیف گسترده‌ای از حالت‌های تنش مناسب است و بنابراین می‌توان اطلاعات ارزشمندی برای کالیبراسیون مدل‌های آسیب و شکست به‌دست آورد.

در تحقیق شن‌یان و همکاران [۱۱]، تأثیر زاویه لود بر کرنش شکست فولاد ضد زنگ آستنیتی بررسی شد. نتایج نشان داد که تأثیر زاویه لود بر مقادیر کرنش شکست نسبت به سه‌محوره تنش، بیشتر است. همچنین می‌توان گفت که مکان شکست با توجه به پارامتر زاویه لود نامتقارن است، درحالی‌که بسیاری از مدل‌های شکست موجود آن را متقارن فرض می‌کنند. علاوه بر این، داده‌ها نشان می‌دهند که اثر زاویه لود با کاهش مقدار سه‌محوره تنش افزایش می‌یابد و برای فولادهای با استحکام بالا برجسته‌تر است. در

به این نکته پی برد که با افزایش سرعت بارگذاری و بیشتر شدن شعاع شیار ایجاد شده، مقدار کرنش واقعی افزایش می‌یابد و با کاهش آنها، مقادیر کرنش واقعی نیز کاهش می‌یابد. در پژوهش مشابه، ژیانزو و همکاران [۵]، برای درک جامع رابطه بین کرنش شکست آلیاژ تیتانیوم درجه دو و حالت تنش آن، نمونه‌های جدید برشی، فشاری و کششی طراحی کردند. در مجموع از هفت نوع نمونه برای دستیابی به کنترل دقیق حالت‌های تنش، در محدوده‌های وسیع سه‌محوره تنش و زاویه لود استفاده شد. یک روش تجربی-عددی ترکیبی برای تعیین کرنش پلاستیک معادل، سه‌محوره تنش و پارامتر زاویه لود برای تعیین نقطه شکست این آلیاژ استفاده شد. براساس نتایج تجربی، یک مدل شکست نرم جدید وابسته به سه‌محوره تنش و پارامتر زاویه لود، پیشنهاد شد و از طریق کدنویسی در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی شد. مطالعات مقایسه‌ای با برخی از معیارهای شکست دیگر نشان می‌دهد که مدل شکست پیشنهادی می‌تواند ویژگی غیر یکنواخت کرنش شکست را به تصویر بکشد و کرنش شکست را با دقت بهتر در طیف وسیعی از حالت‌های تنش پیش‌بینی کند. با توجه به جابجایی شکست و رشد آسیب مشاهده شده، نتایج نشان‌دهنده تطابق خوبی بین آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی است. این مطالعه راه را برای توصیف و پیش‌بینی رفتار شکست مواد فلزی تحت شرایط تنش پیچیده هموار می‌کند و یک داده اطلاعاتی جامع برای تحلیل و طراحی ساختارهای آلیاژی تیتانیوم فراهم می‌کند.

ولادیمیر اسکریپنیاک و همکاران [۶]، آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های تخت و شیاردار از جنس تیتانیوم درجه پنج در سه‌محوره تنش در بازه $0/33$ تا $0/6$ انجام دادند. کرنش شکست نمونه‌ها با روش کرنش‌سنج تصویری^۱ اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که شکست در ناحیه شیاردار اتفاق می‌افتد.

استیلویز و همکاران [۷]، نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری کششی و برشی و همچنین شبیه‌سازی را برای نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی کردند. نتایج عددی نشان داد سه‌محوره تنش از $0/07$ تا $0/58$ می‌باشد. مقادیر کرنش شکست نمونه‌ها با استفاده از کرنش‌سنج تصویری اندازه‌گیری شد. همچنین کرنش شکست به‌طور یکنواخت با افزایش سه‌محوره کاهش یافت. در پژوهشی مشابه غلام عباس افتخار و همکاران [۸]، یک بررسی تجربی و عددی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حرارت‌دیده ارائه کردند که در معرض مسیرهای بارگذاری تناسبی و غیرتناسبی در سطوح مختلف پیش‌کرنش محدود قرار گرفته بود. بارگذاری تناسبی شامل مسیرهایی در

شبیه‌سازی نشده که در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است. مدل‌های متداولی که برای سخت‌شوندگی فلزات استفاده می‌شود (مثل نمایی، توانی و سوپت) به‌خوبی رفتار تیتانیوم را شبیه‌سازی نمی‌کنند. در این مقاله از یک رابطه جدید برای تطابق نمودارهای شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی استفاده شده است. این رابطه ترکیبی از رابطه سوپت و چند جمله‌ای درجه چهار برای رفتار تنش-کرنش تیتانیوم است. با توجه به این که تعداد ضرایب موجود در مدل سخت‌شوندگی / نرم‌شوندگی زیاد هستند، به‌دست آوردن آن‌ها، یکی از چالش‌های این تحقیق می‌باشد. برای دستیابی به ضرایب معادله چند جمله‌ای، ضرایب مذکور به‌طور متناوب تنظیم شدند و به‌گونه‌ای بدست آمدند تا نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی هم‌خوانی پیدا کند. علاوه بر این با تغییر هندسه در نقطه شکست، حالت تنش (تنش سه‌محوره و زاویه لود) عوض شده و در نتیجه باعث می‌شود شکست در کرنش‌های مختلف اتفاق بیفتد. با انجام تست روی این نمونه‌ها رفتار شکست روی ماده مورد نظر بررسی و تحلیل شده است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مقدمه

در این مقاله، آلیاژ تیتانیوم درجه دو مورد استفاده قرار گرفته است که یک آلیاژ دوفازی بوده و دارای خواص مکانیکی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خزش در دمای بالا، پایداری ریزساختار و مقاومت در برابر خوردگی است. آلیاژهای تیتانیوم در زمینه‌های مختلفی از جمله صنایع شیمیایی، پتروشیمی، دریایی، مهندسی پزشکی و صنایع هوافضا استفاده می‌شوند. تیتانیوم درجه دو یک آلیاژ خالص تجاری است. اگرچه به اندازه تیتانیوم درجه پنج قوی نیست، ولی این آلیاژ مقاومت در برابر خوردگی فوق‌العاده‌ای در انواع محیط‌های شیمیایی دارد. تیتانیوم درجه دو که معمولاً در صنعت استفاده می‌شود، دارای بسیاری از کیفیت‌های مشابه با تیتانیوم درجه یک است. بنابراین، مطالعات بر روی تغییر شکل و شکست این آلیاژ در کاربرد و طراحی قطعات اهمیت بالایی دارد [۱۴]. آنالیز شیمیایی به‌دست آمده برای این آلیاژ در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- روابط نظری

در این بخش روابط نظری مدل آسیب برای ارزیابی رشد آسیب و شکست مواد فلزی تحت بارگذاری کششی معرفی می‌گردند. معمولاً در مطالعات شکست، دو پارامتر سه‌محوره تنش و زاویه لود تأثیر به‌سزایی در رفتار ماده دارند. سه‌محوره تنش به‌عنوان یک پارامتر اجتناب‌ناپذیر برای

یک پژوهش دیگر توسط یون جائه کیم و همکاران [۱۲]، آزمایش بارگذاری کششی روی میله صاف و شیاردار فولاد ۳۰۴ انجام شد تا تأثیر سه‌محوره تنش و نرخ کرنش بر کرنش شکست بررسی شود. داده‌های آزمایش نشان می‌دهد با افزایش سه‌محوره تنش و نرخ کرنش، کرنش شکست تمایل به کاهش دارد. سپس داده‌های آزمایش به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با داده‌های متناظر مدل کرنش شکست جانسون-کوک مقایسه می‌شوند. لازم بذکر است که مدل جانسون-کوک اثرات ترکیبی سه‌محوره تنش و نرخ کرنش را در برمی‌گیرد. آنها نتیجه گرفتند که مدل جانسون-کوک برای ماده مورد نظر می‌تواند کرنش شکست را به‌طور کلی محافظه‌کارانه با اختلاف کمتر از بیست درصد پیش‌بینی کنند.

شکست نرم تحت مسیرهای بارگذاری غیرتناسبی در روش چوکسی و همکاران [۱۳] مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های شکست پیوسته در نظر گرفتن بارگذاری غیرتناسبی برای تفسیر داده‌های شکست تجربی مهم است. شکست نرم با رشد فضای خالی در یک ماده الاستوپلاستیک که در معرض بارگذاری غیرتناسبی می‌باشد، شامل تغییرات در سه‌محوره تنش و پارامتر زاویه لود، بررسی شد. با استفاده از شبیه‌سازی مدل، شکست با شروع ادغام حفره‌ها که به عنوان محل شکل‌گیری آسیب تعریف می‌شود، به عنوان تابعی از پارامترهای مسیر بارگذاری تعیین می‌شود. وابستگی مسیر شکست شکل‌پذیر تحت شرایط بارگذاری غیرتناسبی، نشان داده که پارامتر زاویه لود بر کرنش شکست تأثیر بیشتری می‌گذارد. با تأثیر نسبتاً جزئی پارامتر مسیرهای بارگذاری مشخص نتایج حاکی از آن است که معیار شکست مستقل است و برخلاف مدل‌های شکست نرم که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، وابسته به مسیر بارگذاری هستند.

در این مقاله، رفتار شکست نمونه‌هایی از ورقی به جنس تیتانیوم درجه دو مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس چهار نمونه مختلف در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. هندسه این نمونه‌ها پس از تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های متعدد انتخاب شده‌اند که در سایر مقالات گزارش نشده بودند. نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی در دمای اتاق قرار گرفته و تغییرشکل نمونه‌ها در ناحیه شکست تحلیل می‌شود. در نتایج عددی مقادیر کرنش شکست، سه‌محوره تنش و همچنین زاویه لود برای هر چهار نمونه ارائه می‌شود. بررسی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که رفتار پلاستیک ماده خاص می‌باشد. رفتار ماده در قسمت سخت‌شوندگی / نرم‌شوندگی در مقالات مختلف آورده شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد بازه نرم‌شوندگی، که ناحیه وسیعی می‌باشد در مقالات زیادی

جدول ۱. ترکیب شیمیایی تیتانیوم درجه دو (%).

Table 1. Chemical composition of titanium grade 2%.

تیتانیوم	هیدروژن	نیترژن	کربن	اکسیژن	آهن
۹۹/۳۲۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۳

به طوری که در رابطه، J_3 ناوردای سوم تنش انحرافی^۱ است و رابطه آن به شرح زیر می باشد:

$$J_3 = \det(\sigma_{ij}) = \frac{1}{3} \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \quad (۴)$$

در واقع با استفاده از پارامترهای زاویه لود و سهمحوره تنش می توان به تحلیل دقیق تری از رفتار شکست مواد تحت شرایط بارگذاری مختلف پرداخت. با بررسی و مقایسه اثر این دو پارامتر می توان به این نکته پی برد که شکست می تواند تحت تأثیر تنش هیدرواستاتیک باشد یا تنش برشی اثر بیشتری در شکست ماده می گذارد [۱۵].

۳- آزمایش های تجربی

آزمایش کشش یک روش مهندسی استاندارد است که برای مشخص کردن برخی از متغیرهای الاستیک و پلاستیک مرتبط با رفتار مکانیکی فلزات نرم استفاده می شود. تغییرات هندسی موجود در نمونه ها می تواند باعث تغییر در سهمحوره تنش و زاویه لود شود که در نتیجه، مقادیر کرنش شکست نیز تغییر خواهد کرد [۱۶]. در مواد فلزی، زمانی که تغییر شکل پلاستیک به حد معینی برسد، دچار رشد آسیب و در نهایت شکست می شود. بنابراین پیش بینی دقیق آسیب یک ماده در طراحی، و بهینه سازی فرآیندها از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۷].

در این پژوهش، تغییر شکل ماده تحت اثر بارگذاری کششی بررسی شده است. ارزیابی نحوه صحیح رشد آسیب و شکست مواد در بسیاری

بررسی آسیب نمونه در نظر گرفته می شود و نسبت تنش متوسط یا فشار هیدرواستاتیک (σ_h) به تنش معادل فون میزس (σ_{eq}) تعریف می شود:

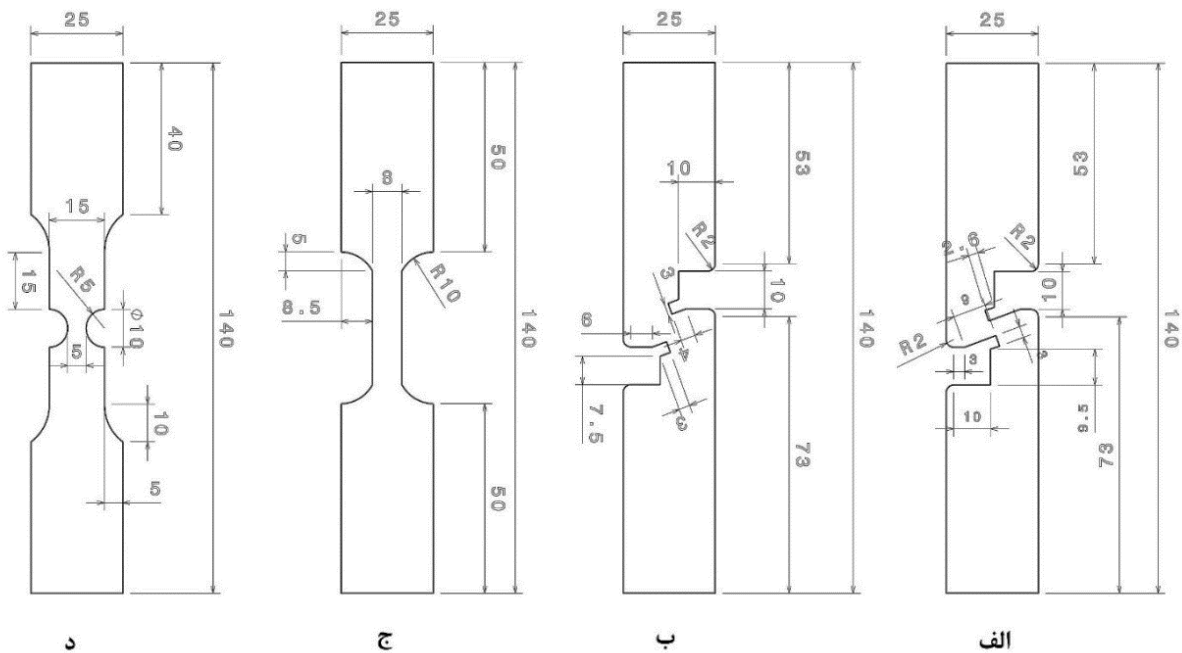
$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_{eq}} \quad (۱)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (۲)$$

در رابطه، η سهمحوره تنش است و به میزان زیادی بر مقدار کرنش پلاستیک قبل از وقوع شکست نرم تأثیر می گذارد. در رابطه نیز تنش های σ_1 و σ_2 و σ_3 ، تنش های جهت اصلی هستند. در بارگذاری تک محوره، تنش فقط در یک راستا به ماده اعمال می شود و در دو راستای دیگر برابر با صفر است؛ در نتیجه مقدار سهمحوره تنش برابر یک سوم به دست خواهد آمد. در بارگذاری های پیچیده تر، بسته به نوع بارگذاری، مقدار سهمحوره تنش متفاوت خواهد بود. این مقدار تنش در شرایط اعمال تنش های فشاری به ماده می تواند منفی نیز باشد. با توجه به تحقیق های پیشین در رابطه با شکست مواد نرم، میزان کرنش ایجاد شده در ماده در طول فرآیند بارگذاری تا لحظه ی شکست، تابع مقدار سهمحوره تنش است. زاویه لود نیز نشان دهنده موقعیت تنش اصلی میانی نسبت به حداکثر و حداقل است. بر حسب متغیرهای تانسور تنش انحرافی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{27}{2} \frac{J_3}{\sigma_{eq}^3}\right) \quad (۳)$$

1 Third invariant of deviatoric stress



شکل ۱. ابعاد هندسی نمونه‌ها؛ (الف) برشی ۱، (ب) برشی ۲، (ج) دمبلی‌شکل، (د) شیاردار (کلیه ابعاد به میلی‌متر می‌باشد).

Fig. 1. Geometric dimensions of samples; (a) shear 1, (b) shear 2, (c) Dog-bone, (d) notched (all dimensions are in mm).

داشتند، تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند تا رشد آسیب و تغییر شکل بوجود آمده در ناحیه پلاستیک، در قسمت طول گیج^۲ بررسی شود. برای اعمال بارگذاری کششی در روش تجربی، یک سمت نمونه در فک دستگاه کشش قرار گرفته و هیچگونه جابجایی ندارد. از سمت دیگر نمونه نیز بارگذاری کششی اعمال می‌شود و در نهایت نمونه به شکست می‌رسد. لازم بذکر است که بارگذاری به صورت استاتیک و با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نمودارهای نیرو-جابجایی هریک از نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی به دست آمد. لازم به ذکر است تمامی نمونه‌ها با دستگاه اینسترون ۸۵۰۲ تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. همچنین ظرفیت دستگاه ۳۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که برای اطمینان از نتایج کار و کاهش درصد خطا، هر نمونه چهار بار تکرار شده است. ضخامت تمامی نمونه‌ها دو میلی‌متر می‌باشد که طول و عرض آنها به ترتیب ۱۴۰ و ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۱ و هندسه‌ی آمده شده آنها در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

از صنایع تولیدی بسیار مهم است. در سال‌های اخیر، موضوع آسیب نرم^۱ به‌طور گسترده مورد بررسی واقع شده است که منجر به توسعه مدل‌های تجربی و عددی شده است. تست‌های تجربی انجام شده در تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که شکست نرم فلزات وابسته به سه‌محوره تنش و زاویه لود است. این پارامترها بر کرنش شکست تأثیر می‌گذارد و منجر می‌شود مقدار آن به صورت غیر یکنواخت شود. در همین راستا که مدل‌هایی ارائه شده که می‌توان به مدل گنجیانی [۱۸]، شبک [۱۹] و لیو [۲۰] اشاره کرد که به تأثیر سه‌محوره تنش و زاویه لود بر کرنش شکست پرداخته‌اند. در این کار اثرات سه‌محوره تنش و زاویه لود، که از عوامل اصلی در رشد آسیب هستند بررسی شده است. اولین وابستگی شکست مواد مربوط به سه‌محوره تنش، تحت بارگذاری کششی استاتیک ایجاد شد. نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها نیز ثبت شدند و با کمال شگفتی، با بسیاری از مواد شکل‌پذیر، قسمت نرم‌شوندگی متفاوتی دارند. چهار نمونه (شکل ۱) شامل یک نمونه دمبلی‌شکل، یک نمونه شیاردار و دو نمونه برشی ۱ و ۲ که شیاردار خاص

2 Gauge length

1 Ductile damage



شکل ۲. (الف) نمونه برشی ۱ با سه محوره تنش ۰/۰۸، (ب) نمونه برشی ۲ با سه محوره تنش ۰/۲، (ج) دمبلی شکل با سه محوره تنش ۰/۳۳، (د) نمونه شیاردار با سه محوره تنش ۰/۵.

Fig. 2. (a) Shear specimen 1 with stress triaxiality of 0.08, (b) Shear specimen 2 with stress triaxiality of 0.2, (c) Dog-bone specimen with stress triaxiality of 0.33, (d) notched specimen with stress triaxiality of 0.5.

۴- تحلیل عددی

۴-۱ رفتار مکانیکی ماده

$$\varepsilon^{true} = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (۶)$$

که در آن σ_1^{true} تنش واقعی، F نیروی کششی و A_0 سطح مقطع اولیه است. ΔL تغییرات طول، L_0 طول اولیه نمونه مورد آزمایش و ε_1^{true} کرنش واقعی می باشد. همچنین کرنش معادل به کرنشی گفته می شود که در همه جهتها به ماده وارد می شود و آن را می توان به صورت معادله زیر نوشت:

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (۷)$$

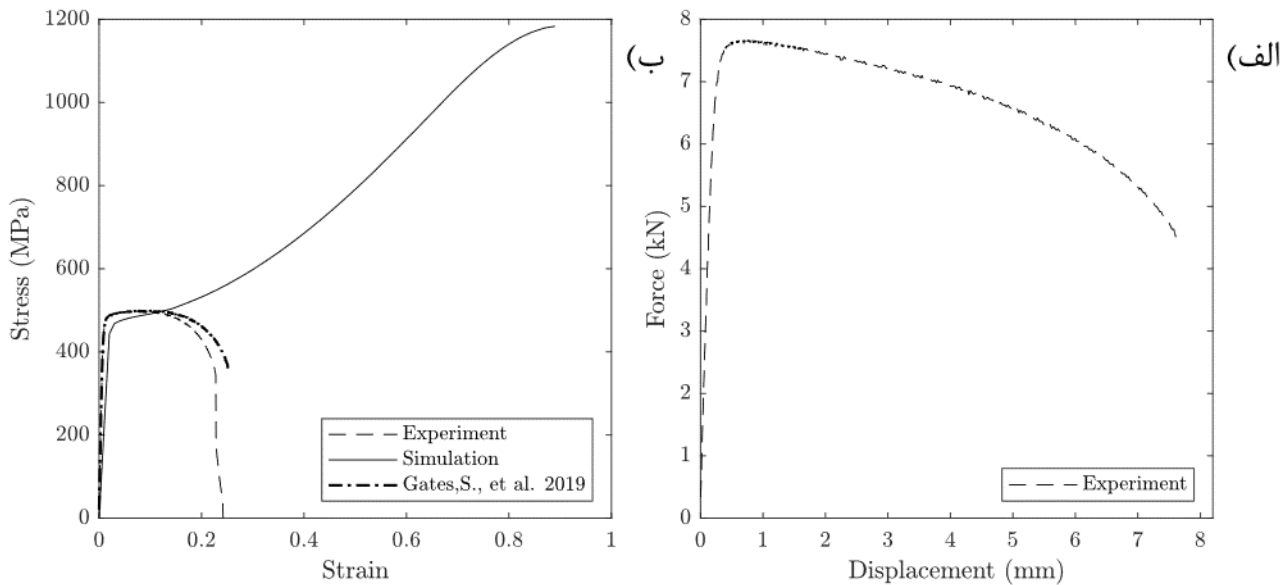
در این رابطه ε_f کرنش معادل ماده، ε_1 ، ε_2 و ε_3 کرنشهای در جهت اصلی هستند [۱۵].

برای ایجاد تطابق بین نمودارهای تجربی با عددی، از رابطه

به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی ماده مورد نظر، از تست کشش نمونه دمبلی شکل استفاده شد. در این کار نمونه دمبلی شکل بر اساس استاندارد ASTM E 8/M8E-a16 طراحی و ساخته شده است [۲۱]. سه نمونه دیگر طراحی جدیدی دارند و تابع استاندارد خاصی نمی باشند. نمودار نیرو-جابجایی و تنش-کرنش حقیقی نمونه دمبلی شکل تست تجربی و شبیه سازی عددی در شکل ۳ مشاهده می شود. ضریب الاستیسیته و ضریب پواسون به دست آمده نیز در جدول ۲ آمده است.

نمودار تنش-کرنش حقیقی تست تجربی نمونه دمبلی شکل با تست انجام شده در کار گاتی و همکاران [۲۲] مقایسه شده که تطابق خوبی بین نمودارهای تجربی، مطابق شکل ۳-ب دیده می شود. جهت به دست آوردن تنش-کرنش حقیقی از روابط ریاضی زیر استفاده شده است:

$$\sigma^{true} = \left(\frac{F}{A_0}\right)\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \quad (۵)$$



شکل ۳. (الف) نمودار نیرو-جابجایی (ب) تنش-کرنش حقیقی آزمایش تجربی و شبیه‌سازی نمونه دمبلی شکل.

Fig. 3. (a) Force-displacement diagram (b) True stress-strain experimental test and simulation of Dog-bone sample.

تجربی مقایسه شده و فرآیند تا حصول کمترین اختلاف ادامه داده شد. مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون از مقادیر متداول آنها، موجود در مراجع، برای تیتانیوم استفاده شده است [۱۴].

۴-۲- مدل اجزاء محدود

در این مقاله، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. بر این اساس چهار نمونه را به صورت دوعدی شبیه‌سازی کرده که دارای طول، عرض و ضخامت یکسانی می‌باشند. تنها تفاوت نمونه‌ها، در شیارها و در قسمت طول گیج نمونه‌ها می‌باشد. همانطور که از شکل ۱ مشخص است اندکی تفاوت در شیار هندسه نمونه‌های برشی ۱ و برشی ۲ مشاهده می‌شود که باعث تغییر در سهم‌محوره تنش، زاویه لود و همچنین نمودار نیرو-جابجایی شده است. این شبیه‌سازی‌ها به منظور پیش‌بینی شکست در نمونه‌ها انجام شده است و کرنش شکست را می‌توان با مقایسه آنها با منحنی‌های نیرو-جابجایی تجربی تعیین کرد. برای بررسی دقیق‌تر حالت شکست نمونه‌ها، اندازه‌المان‌ها در ناحیه شکست (طول گیج) ریزتر شد تا نتایج بهتر دیده

سخت‌شوندگی ترکیبی مدل سوئیفت^۱ و یک چند جمله‌ای مرتبه چهار، در توصیف رفتار تنش-کرنش آلیاژهای تیتانیوم درجه دو استفاده شد [۲۳] به نحوی که توانست رفتار تنش-کرنش ماده را برای کشش تک‌محوری توصیف کند. این رابطه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma_{eq} = qK(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n + (1-q) \times (a\varepsilon_p^4 + b\varepsilon_p^3 + c\varepsilon_p^2 + d\varepsilon_p + e) \quad (8)$$

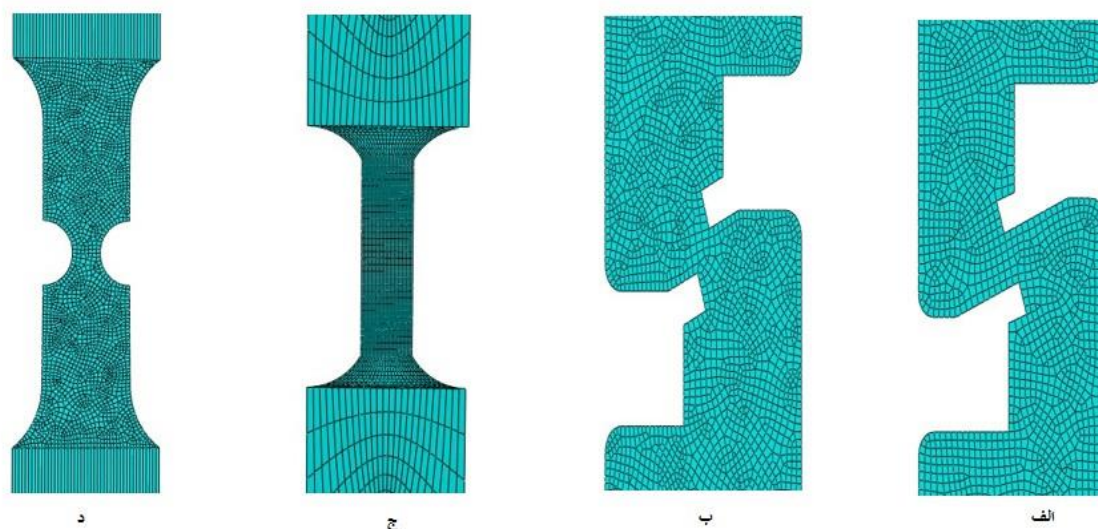
که در آن K ضریب سخت‌شوندگی، q فاکتور وزنی، ε_0 کرنش پلاستیک تسلیم اولیه و n توان سخت‌شوندگی است. ثوابت پارامترهای رابطه که برای تطابق نمودارهای شبیه‌سازی با تجربی مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۲ آمده است. این داده‌ها، طی یک فرآیند تجربی-شبیه‌سازی ترکیبی با استفاده از نرم‌افزار متلب برازش داده شده است. در این فرآیند، در هر مرحله اجرای شبیه‌سازی، نیروی ناشی از شبیه‌سازی با نتایج

1 Swift model

جدول ۲. خواص مکانیکی و پارامترهای ثابت در مدل سخت‌شوندگی برای آلیاژ تیتانیوم درجه دو.

Table 2. Mechanical properties and constant parameters in the hardening model for titanium grade 2.

E (G Pa)	ν	a (M Pa)	b (M Pa)	c (M Pa)	d (M Pa)	e (M Pa)	q	ϵ_0	n	K (M Pa)
۱۰۵	۰/۳۷	-۷۰۰	۸۰۰	۱۰۵۰	۶۰۰	۳۰۰	۰/۷۳	۰/۰۰۱	۰/۰۲۵	۶۱۰

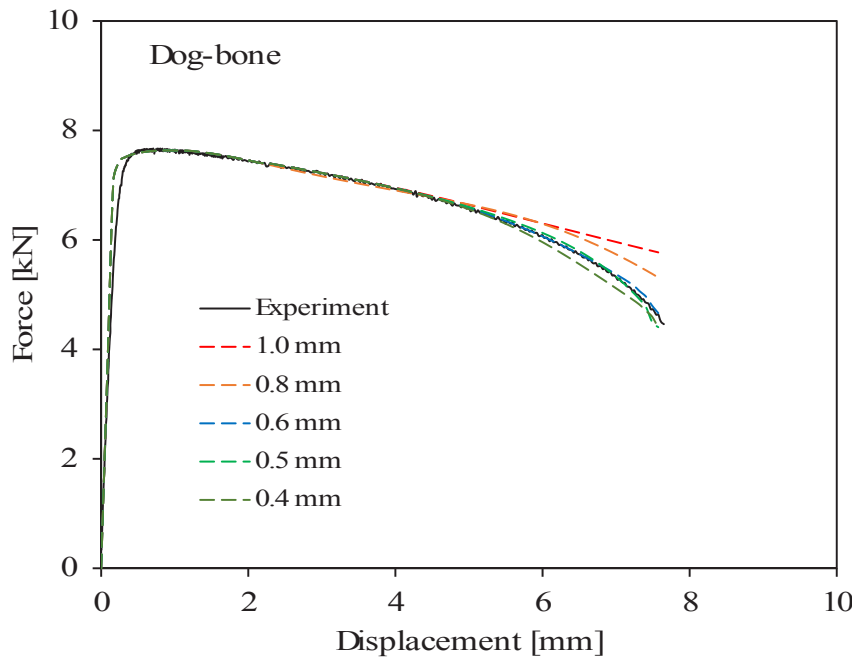


شکل ۴. نحوه مش طول گیج نمونه‌ها؛ (الف) نمونه برشی ۱، (ب) نمونه برشی ۲، (ج) نمونه دمبلی‌شکل، (د) نمونه شیاردار.

Fig. 4. Form of mesh the gauge length of the samples; (a) Shear sample 1, (b) Shear sample 2, (c) Dog-bone sample, (d) notched sample.

مرزی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که یک سر نمونه‌ها از یک سمت ثابت بوده و حرکتی ندارند و از سمت دیگر جابجایی اعمال می‌شود. با استفاده از رابطه، همه نمونه‌ها شبیه‌سازی شدند که می‌توان نمودار نیرو-جابجایی هر کدام از آنها را در شکل ۶ مشاهده نمود. بر اساس نتایج نشان داده شده در نمودارها، مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و عددی تا انتهای ناحیه شکست دیده می‌شود. با توجه به تطابق نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی عددی، به این اطمینان می‌توان رسید که اعتبارسنجی مدل عددی به‌طور دقیق نتایج تجربی را باز تولید

شود (شکل ۴). در شبیه‌سازی‌ها از المان چهاروجهی تنش صفحه‌ای^۱ استفاده شده است. نتایج عددی با تغییر اندازه‌ی المان تغییر خواهد کرد و هنگامی که مقادیر یک کمیت مانند نیرو، همگرا شد، نشانگر این است که المان‌بندی به درستی انجام شده و دیگر نیاز به تغییر اندازه‌ی المان نیست. برای نمونه دمبلی‌شکل، تحلیل استقلال از المان انجام شده است تا به نتیجه دقیق‌تر رسیده شود. نتایج این تحلیل در شکل ۵ ارائه شده است. در همه نمونه‌ها، در ناحیه‌ی شکست، از المان با اندازه ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. شرایط



شکل ۵. نتایج اندازه المان بر همگرایی نیرو-جابجایی نمونه دمبلی شکل.

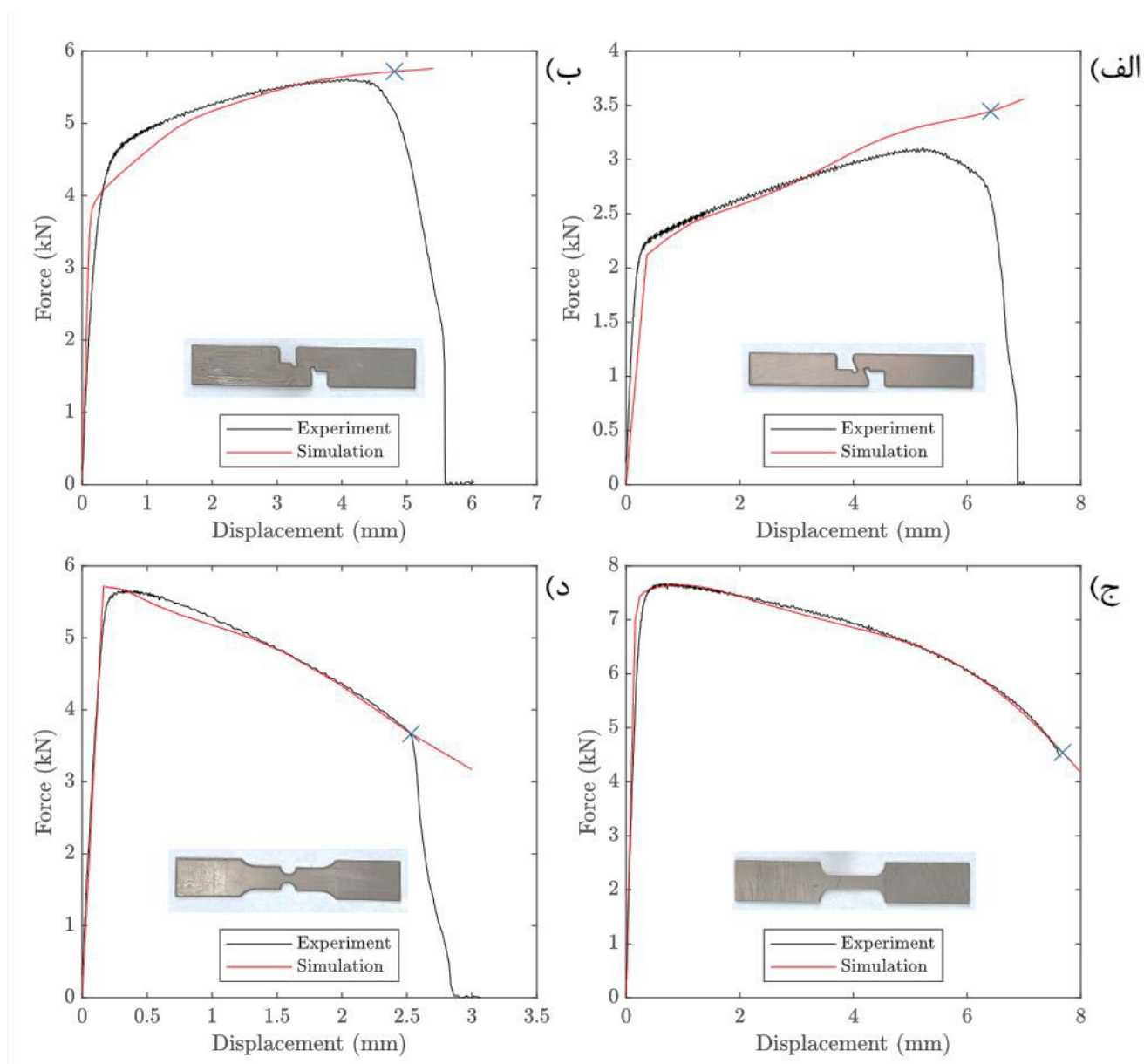
Fig. 5. Effect of element size on force-displacement convergence of Dog-bone specimen.

نیز برای سهمحوره پایین ارائه شده است؛ مانند مدل جیانگ و همکاران [۲۴]، مالچر و همکاران [۲۵] بای و ویرزیکی [۲۶] که آزمایشات تجربی در مقالات آنها نشان می‌دهد که شکست در سهمحوره نزدیک صفر، به صورت برشی اتفاق افتاده است.

برای تعیین مقدار سهمحوره تنش و زاویه لود، کلیه نمونه‌ها در آباکوس و با حلگر استاتیک شبیه‌سازی شدند. نتیجه‌ی سهمحوره تنش ناشی از این شبیه‌سازی‌ها، در شکل ۷ مشاهده می‌گردد. همچنین، در شکل ۸ توزیع کرنش پلاستیک معادل نمونه‌ها در ناحیه طول گیج نشان داده شده است. برای بیان سهمحوره تنش و زاویه لود، المان بحرانی در ناحیه شکست انتخاب شده و پارامترهای مربوطه مطابق شکل ۹ حین بارگذاری رسم شدند. همانطور که از شکل ۹-الف مشخص است، تغییرات زاویه لود یکنواخت نیست. همچنین در این چهار نمونه، سهمحوره تنش از حدود بازه صفر تا ۰/۵ به دست آمدند (شکل ۹-ب). در طراحی دو نمونه برشی ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که هندسه‌هایی بسیار شبیه به هم دارند که با تغییر جزئی در هندسه

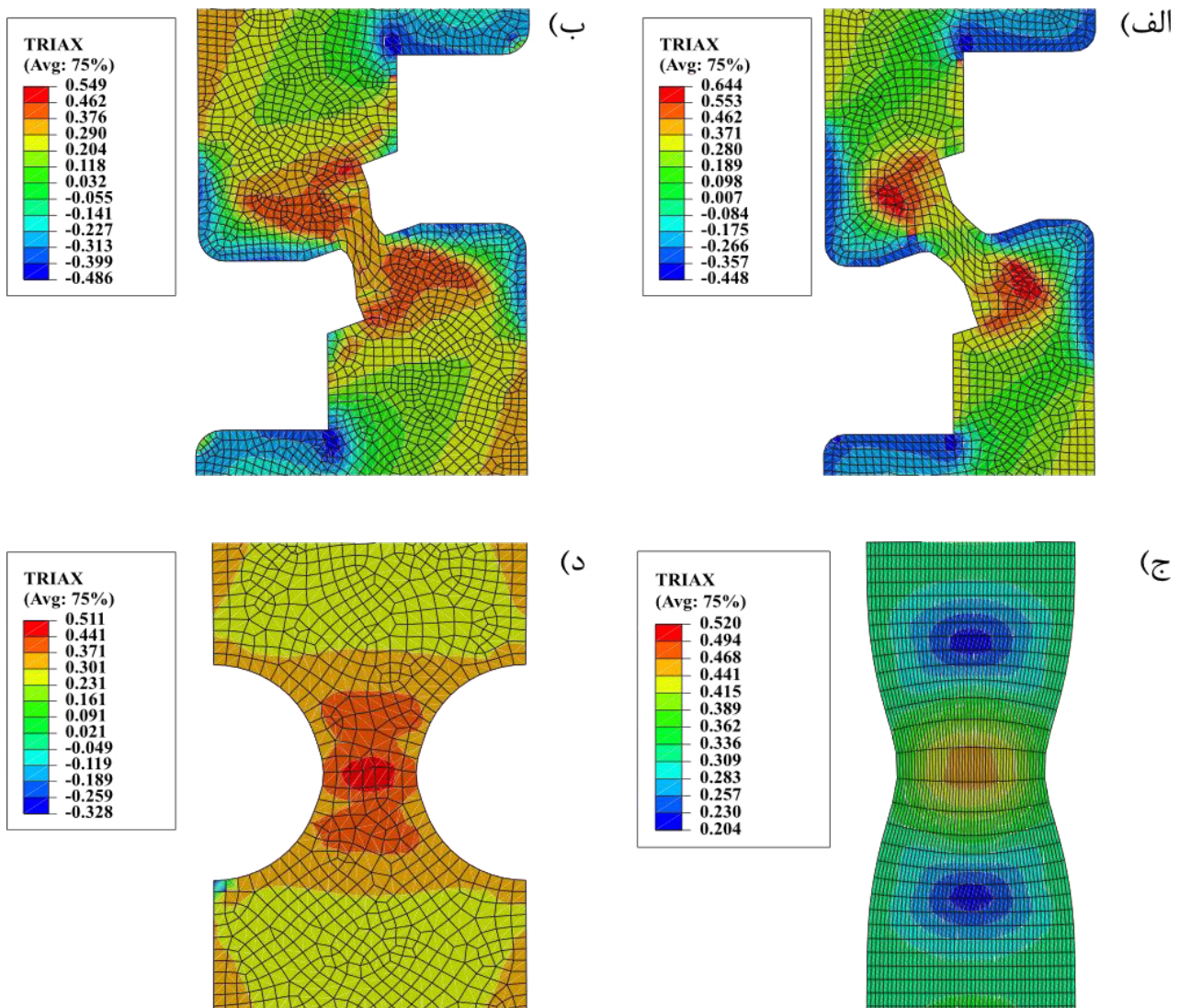
می‌کند. علاوه بر این برای اطمینان از دقت نتایج تجربی، برای هر نمونه، تست‌های کشش چهار بار تکرار شدند. در این نمودارها، علامت ضریب به عنوان نقطه شکست انتخاب شده است. مقدار کرنش موثر پلاستیک متناظر با این نقطه، به عنوان کرنش شکست نمونه ارائه می‌گردد.

شکل‌پذیری را می‌توان به عنوان توانایی یک ماده برای انجام مقدار مشخصی تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست درک کرد. با این حال، به خوبی شناخته شده است که شکل‌پذیری آلیاژ تیتانیوم در شرایط بارگذاری مختلف یکسان نیست. حالت تنش تأثیر زیادی بر شکل‌پذیری فلزات نرم دارد. سهمحوره تنش و زاویه لود دو پارامتر اصلی هستند که به شدت بر پدیده شکست نرم به ویژه تحت بارگذاری برشی تأثیر می‌گذارند و می‌توان گفت در سهمحوره تنش نزدیک صفر یک شکست برشی مشاهده می‌شود. این موضوع در مقالات مختلف به صورت تست تجربی ثابت شده است. در تست‌های آزمایشگاهی دیده شده که هرچه مقدار سهمحوره تنش به صفر نزدیک باشد، شکست به صورت برشی اتفاق افتاده است. مدل‌های مختلفی



شکل ۶. مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی داده‌های تجربی با شبیه‌سازی، (الف) نمونه برشی ۱، (ج) نمونه برشی ۲، (ج) نمونه دمبلی شکل، (د) نمونه شیاردار. علامت ضربدر به عنوان نقاط شکست نمونه‌ها مشخص شده است.

Fig. 6. Comparison of force-displacement diagrams of experimental data with simulation, (a) Shear sample 1, (c) Shear sample 2, (c) Dog-bone sample, (d) notched sample. The cross marks are marked as the fracture points of the samples.



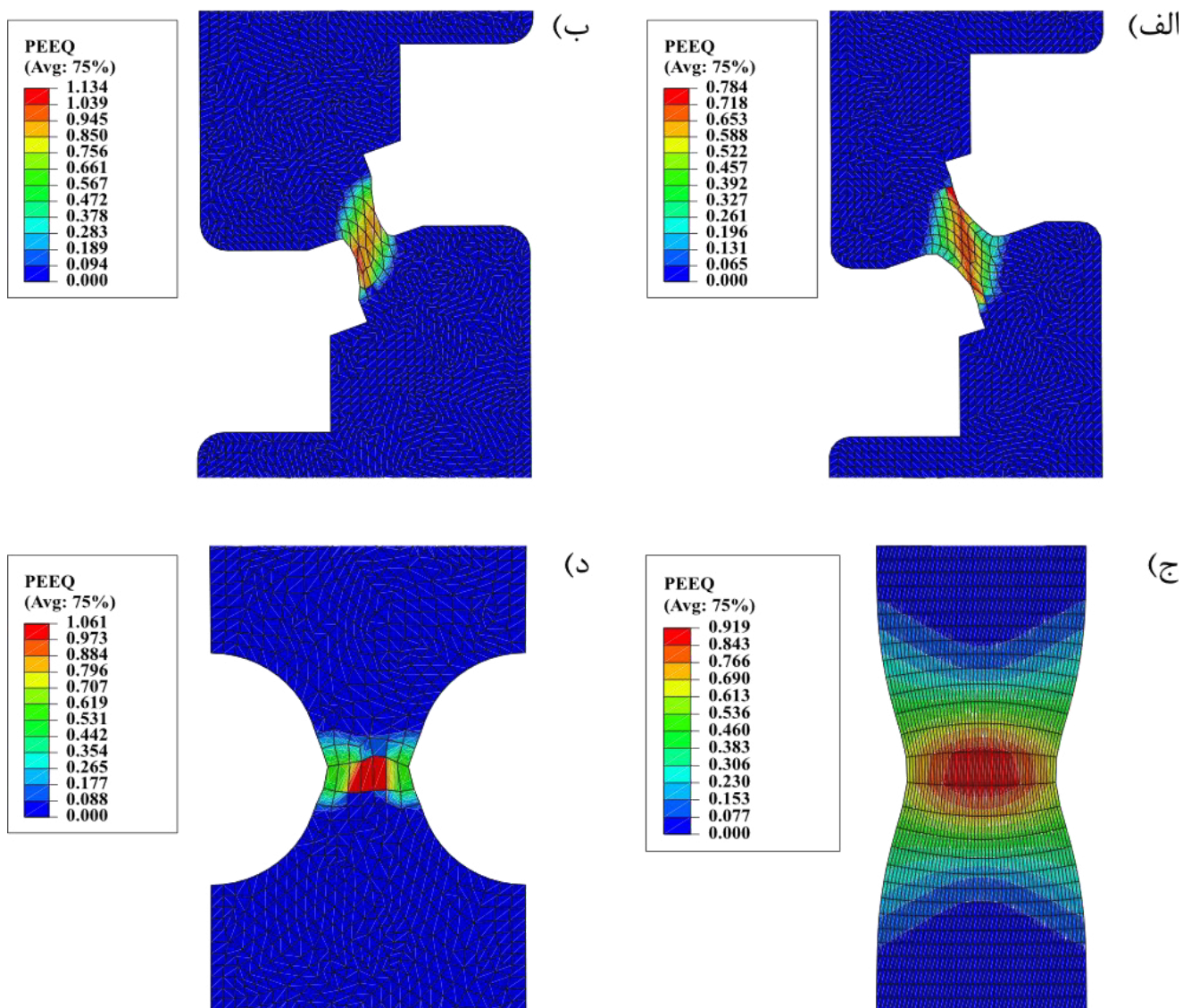
شکل ۷. توزیع سهمحوره تنش حاصل از شبیه‌سازی‌ها (الف) نمونه برشی ۱ (سهمحوره تنش ۰/۰۸)، (ب) نمونه برشی ۲ (سهمحوره تنش ۰/۲)، (ج) نمونه دمبلی‌شکل (سهمحوره تنش ۰/۳۳)، (د) نمونه شیاردار (سهمحوره تنش ۰/۵).

Fig. 7. Stress triaxiality contour from simulations (a) shear sample 1 (triaxial stress 0.08), (b) shear sample 2 (triaxial stress 0.2), (c) Dog-bone (triaxial stress 0.33), (d) notched sample (triaxial stress 0.5).

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقدار سهمحوره تنش، کرنش شکست روندی صعودی دارد. ولی برخلاف آن، زاویه لود روند ثابتی ندارد و به صورت سهموی تغییر می‌کند.

همچنین نتایج حاصل از شکل ۹، به‌طور خلاصه در جدول ۳ بیان شده و

آنها نمودار سهمحوره تنش بر حسب کرنش پلاستیک تغییر می‌کند. در نمونه برشی ۱ نمودار سهمحوره تنش بر حسب کرنش ۰/۰۸ به‌دست آمد که نزدیک به صفر است ولی با تغییر کمی در هندسه که به عنوان نمونه برشی ۲ نامیده می‌شود، این نمودار روندی افزایشی داشته و به مقدار ۰/۲ رسیده است.

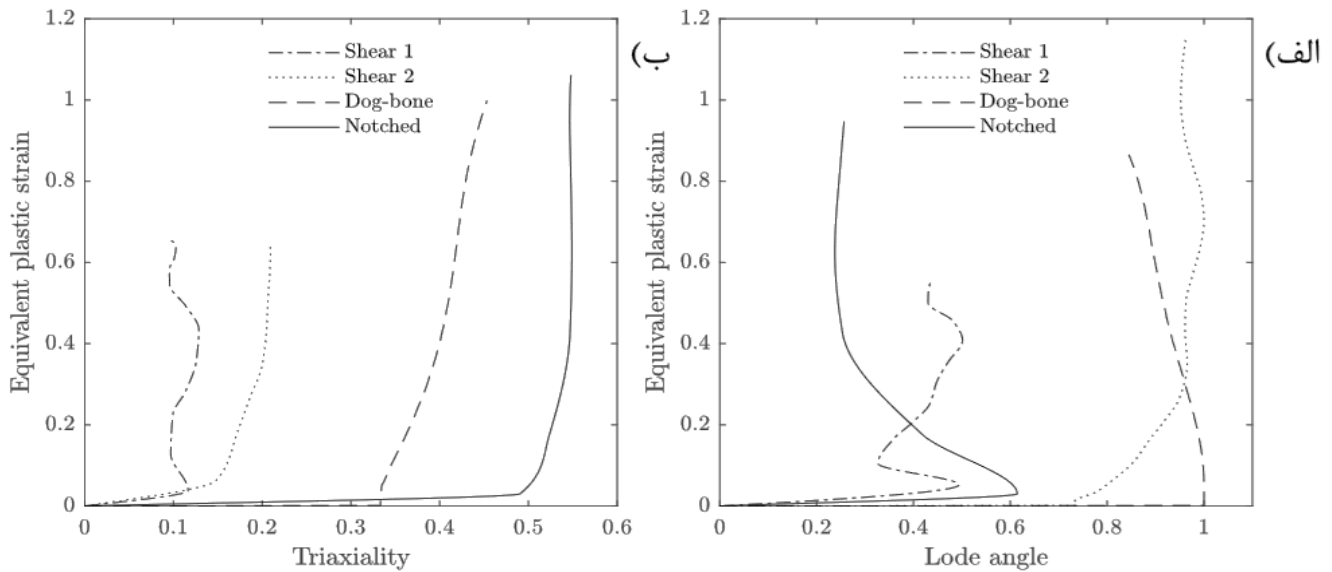


شکل ۸. توزیع کرنش نمونه‌های (الف) برشی ۱، (ب) برشی ۲، (ج) دمبلی شکل، (د) شیاردار.

Fig. 8. Strain contour of samples (a) shear 1, (b) shear 2, (c) Dog-bone, (d) notched.

تنش دیده نشده است که می‌توان آن‌را به عنوان یک نوگرایی در نظر گرفت. جدول ۳ مقادیر میانگین سهمحوره تنش، کرنش شکست و زاویه لود برای نمونه‌های مورد آزمایش آورده شده است. همچنین به‌عنوان نوآوری می‌توان این مورد را مطرح کرد که در کنار

مشاهده می‌شود که تغییر هندسه، منجر به تغییر سهمحوره تنش و به همین ترتیب زاویه لود می‌شود. تغییرات سهمحوره تنش و زاویه لود ناشی از تغییر حالت تنش می‌باشد. علاوه بر این، در کنار ایجاد سهمحوره‌های متفاوت، تغییرات زیادی در حین تغییر شکل در دو پارامتر زاویه لود و سهمحوره



شکل ۹. کرنش پلاستیک برحسب الف) زاویه لود ب) سه‌محوره نمونه‌ها.

Fig. 9. Plastic strain in terms of a) Lode angle b) triaxial samples

جدول ۳. مقدار کرنش شکست، سه‌محوره تنش و زاویه لود نمونه‌ها در ناحیه شکست.

Table 3. The amount of fracture strain, stress triaxiality and Lode angle of samples in the fracture zone.

نام نمونه	سه‌محوره تنش	زاویه لود	کرنش شکست
برشی ۱	۰/۰۸	۰/۴	۰/۶۶
برشی ۲	۰/۲	۰/۹	۰/۶۵
دمبلی شکل	۰/۳۳	۰/۵	۰/۹
شیاردار	۰/۵	۰/۲	۱

استفاده کرد. علاوه بر این می‌توان جهت دستیابی به کرنش در ناحیه شکست از روش کرنش سنج دیجیتالی^۱ استفاده نمود. علاوه بر این‌ها می‌توان از هندسه‌های جدیدی استفاده کرد که در سایر مقالات ارائه نشده است.

ایجاد سه‌محوره‌های متفاوت، تغییرات زیادی در حین تغییر شکل در دو پارامتر زاویه لود و سه‌محوره تنش دیده نشده است که در مطالعات آینده نیز می‌تواند مورد توجه بیشتری قرار گیرد. در این مقاله، بازه سه‌محوره و زاویه لود مختلف تحت بارگذاری کششی به‌دست آمد که در مطالعات آینده می‌توان از بارگذاری‌های جایگزین مثل پیچش و یا بارگذاری دو محوره

1 Digital Image Correlation

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تحلیل عددی و تجربی چهار نمونه از جنس تیتانیوم درجه دو، تحت بارگذاری کششی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی حالت‌های گوناگون شکست بر روی نمونه‌ها، شیارهای متفاوت در آنها ایجاد شد. به طوری که یک تغییر کوچک در شیار نمونه‌ها، باعث تغییر رفتار شکست در این ماده می‌شود و همچنین منجر به تغییر مقدار سهم‌محوره تنش و زاویه لود می‌گردد. برای این کار، سهم‌محوره تنش از بازه صفر تا ۰/۵ از نتایج عددی به دست آمد و همانطور که پیش‌بینی می‌شد با اعمال تست کشش، ترک در ناحیه گلویی شدن نمونه‌ها ایجاد شده و سپس ماده دچار شکست شد. نتایج نشان می‌دهد که اثر زاویه لود را نمی‌توان نادیده گرفت. در این مقاله همچنین مشاهده شد که با افزایش سهم‌محوره تنش، زاویه لود روند ثابتی ندارد و روند آن به صورت سهموی است و این به دلیل رفتار خاص در قسمت نرم‌شوندگی می‌باشد که ناشی از خاصیت ساختاری ماده است. برای شبیه‌سازی رفتار سخت‌شوندگی این ماده، با استفاده از نمونه دمبلی شکل یک معادله ترکیبی مدل سوئیفت و یک معادله مرتبه چهار به داده‌های تنش- کرنش برازش داده شد. با تحلیل نتایج آزمایش کشش تک‌محوره، وابستگی کرنش شکست به سهم‌محوره تنش و زاویه لود به عنوان پارامترهای اصلی در شبیه‌سازی آباکوس معرفی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که یک تغییر کوچک در قسمت شیار نمونه‌ها، مانند افزایش یا کاهش زاویه، روی سهم‌محوره تنش و زاویه لود تأثیر می‌گذارد که در نتیجه باعث شده مقادیر کرنش شکست تغییر کند. همچنین در بازه‌های مختلف سهم‌محوره تنش و زاویه لود، رفتار کرنش متفاوت بود. علاوه بر آن مشاهده شد که در سهم‌محوره تنش بالا، تنش هیدرواستاتیک پارامتر غالب بر شکست ماده است. در حالی که در سهم‌محوره تنش پایین، حالت تنش برشی بر شکست ماده غالب می‌باشد. هنگامی که سهم‌محوره تنش برابر با صفر است، شکست به صورت برشی اتفاق می‌افتد. در واقع این بدان معناست که در سهم‌محوره‌های تنش پایین، زاویه لود پارامتر غالب است که بر شکست ماده تأثیرگذار است. همچنین با مشاهده نتایج، تطابق خوبی بین داده‌های تئوری و تجربی در نمودارهای نیرو-جابجایی دیده شد.

۶- فهرست علائم

مساحت	A_0
ضریب الاستیسیته	E
نیرو	F
ناوردای سوم تانسور تنش انحرافی	J_3
ضریب استحکام	K
طول اولیه	L_0
توان سخت‌شوندگی	n
فاکتور وزنی	q
تغییرات طول	ΔL
کرنش شکست	ε_f
کرنش در جهت‌های اصلی	$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$
کرنش حقیقی	ε^{true}
ضریب پواسون	ν
سهم‌محوره تنش	η
تنش	σ
تنش هیدرواستاتیک	σ_h
تنش معادل فون میزز	σ_{eq}
تنش حقیقی	σ^{true}
تنش در جهت‌های اصلی	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$

منابع

- [1] E. Tal-Gutelmacher, D. Eliezer, Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys, *Materials transactions*, 45(5) (2004) 1594-1600.
- [2] R.R. Boyer, An overview on the use of titanium in the aerospace industry, *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2) (1996) 103-114.
- [3] W. Ahmed, M.J. Jackson, *Surgical tools and medical devices*, Springer, 2016.

- [13] M. Chouksey, S.M. Keralavarma, Ductile failure under non-proportional loading, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 164 (2022) 104882.
- [14] B. Wang, X. Xiao, V.P. Astakhov, Z. Liu, The effects of stress triaxiality and strain rate on the fracture strain of Ti6Al4V, *Engineering Fracture Mechanics*, 219 (2019) 106627.
- [15] P. Abedinimanesh, F. Hazinia, M. Ganjiani, Numerically and Experimentally Investigation of the Effect of Anisotropy and Stress Triaxiality on the Fracture Strain, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 39(1) (2023) 27-34.
- [16] E.E. Cabezas, D.J. Celentano, Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens, *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(5-6) (2004) 555-575.
- [17] H. Li, M. Fu, J. Lu, H. Yang, Ductile fracture: Experiments and computations, *International journal of plasticity*, 27(2) (2011) 147-180.
- [18] 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
- [19] F. Šebek, J. Petruška, P. Kubík, Lode dependent plasticity coupled with nonlinear damage accumulation for ductile fracture of aluminium alloy, *Materials & Design*, 137 (2018) 90-107.
- [20] Y. Lou, L. Chen, T. Clausmeyer, A.E. Tekkaya, J.W. Yoon, Modeling of ductile fracture from shear to balanced biaxial tension for sheet metals, *International Journal of Solids and Structures*, 112 (2017) 169-184.
- [21] I. Astm, ASTM E8/E8M-16a: standard test methods for tension testing of metallic materials, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, (2016).
- [22] S. Gatea, B. Lu, J. Chen, H. Ou, G. McCartney, Investigation of the effect of forming parameters in incremental sheet forming using a micromechanics based damage model, *International Journal of Material Forming*, 12 (2019) 553-574.
- [4] G. Yoganjaneyulu, C.S. Narayanan, R. Narayanasamy, Investigation on the fracture behavior of titanium grade 2 sheets by using the single point incremental forming process, *Journal of Manufacturing Processes*, 35 (2018) 197-204.
- [5] W. Dou, Z. Xu, Y. Han, F. Huang, A ductile fracture model incorporating stress state effect, *International Journal of Mechanical Sciences*, 241 (2023) 107965.
- [6] V.V. Skripnyak, E.G. Skripnyak, V.A. Skripnyak, Fracture of titanium alloys at high strain rates and under stress triaxiality, *Metals*, 10(3) (2020) 305.
- [7] M. Scales, N. Tardif, S. Kyriakides, Ductile failure of aluminum alloy tubes under combined torsion and tension, *International Journal of Solids and Structures*, 97 (2016) 116-128.
- [8] C.M.A. Iftikhar, Y.L. Li, C.P. Kohar, K. Inal, A.S. Khan, Evolution of subsequent yield surfaces with plastic deformation along proportional and non-proportional loading paths on annealed AA6061 alloy: Experiments and crystal plasticity finite element modeling, *International Journal of Plasticity*, 143 (2021) 102956.
- [9] M. Zistl, S. Gerke, M. Brünig, Biaxial experiments on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture behavior of ductile metals, *Procedia Structural Integrity*, 13 (2018) 57-62.
- [10] S. Gerke, M. Zistl, A. Bhardwaj, M. Brünig, Experiments with the X0-specimen on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture mechanisms in aluminum alloys, *International Journal of Solids and Structures*, 163 (2019) 157-169.
- [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] J.-M. Seo, H.-T. Kim, Y.-J. Kim, H. Yamada, T. Kumagai, H. Tokunaga, N. Miura, Effect of strain rate and stress triaxiality on fracture strain of 304 stainless steels for canister impact simulation, *Nuclear Engineering and Technology*, 54(7) (2022) 2386-2394.

- [25] L. Malcher, F.A. Pires, J.C. De Sá, An assessment of isotropic constitutive models for ductile fracture under high and low stress triaxiality, *International Journal of Plasticity*, 30 (2012) 81-115.
- [26] Y. Bai, T. Wierzbicki, Application of extended Mohr–Coulomb criterion to ductile fracture, *International journal of fracture*, 161(1) (2010) 1-20.
- [23] 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.
- [24] W. Jiang, Y. Li, J. Su, Modified GTN model for a broad range of stress states and application to ductile fracture, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 57 (2016) 132-148.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Barzegar Rahimi, Y. Barzegar Rahimi, M. Salari, Investigating the effect of creating a vertical groove on the surface of a semi-submerged propeller blades, Amirkabir J. Mech Eng., 56(6) (2024) 791-810.

DOI: [10.22060/mej.2024.23378.7751](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23378.7751)



