ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(07):485-496

Prediction of 6061-T6 Aluminum Fracture Behavior Using the Extended GTN Criterion

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Khademi M.[1],
Moslemi Naeini H.[1*],
Mirnia M. J.[2]

How to cite this article
Khademi M, Moslemi Naeini H,* Mirnia M J. Prediction of 6061-T6 Aluminum Fracture Behavior Using the Extended GTN Criterion. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(07):485-496.

[1] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
[2] Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University. of Technology, Babol, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
moslemi@modares.ac.ir

Article History
Received: February 08, 2022
Accepted: April 03, 2022
ePublished: June 06, 2022

ABSTRACT

In this paper, fracture prediction accuracy was evaluated by the GTN ductile fracture criterion and the effect of its evolution. To investigate the stress states, three calibration tests, including uniaxial tension, plane strain tension, and In-plane shear tension, were used to calibrate the failure criterion and determine the accuracy of fracture prediction. For simulation of the fracture behavior in Aluminum 6061-T6, the GTN ductile fracture criterion was calibrated using the combined experimental-simulation method. ABAQUS software was used to simulate the forming process, and fracture criteria were implemented to the software by the VUMAT subroutine. The force-displacement values and the fracture displacement in the experimental tests were used to validate the numerical results and evaluate the fracture criterion accuracy. According to the results, calibration using uniaxial tension and In-plane shear tension tests predicts failure with an average error of 6.17%. While the original GTN criterion cannot predict the fracture of the In-plane shear tension test, the error value in the plane strain tension test reaches 24%. A U- bending test was performed to investigate the fracture behavior of Aluminium 6061-T6 sheets and validate the calibrated fracture criterion in a more complex process other than tension tests. The Extended GTN criterion was found to predict the onset of fracture in the U-bending process with an error of 3%.

Keywords Fracture; GTN Criteria; Calibration Test; Stress Triaxiality; Bending

CITATION LINKS

[1] Principles of Fracture Mechanics. [2] Mechanical metallurgy. [3] Metal forming: mechanics and metallurgy. [4] Fracture mechanics: fundamentals and applications. [5] A continuous damage mechanics model for ductile fracture. [6] An Investigation on the limit drawing using GTN damage model in tube drawing process ... [7] Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model. [8] Ductile fracture prediction in aluminium alloy 5A06 sheet forming based on GTN damage model. [9] Influence of ductile damage on the bending behaviour of aluminium alloy thin sheets. [10] Mechanism of increasing spinnability by multi-pass spinning forming–Analysis of damage evolution using a modified GTN model. [11] Experimental and numerical investigation of ductile fracture using GTN damage model on in-situ tensile tests. [12] Identification of material parameters of a shear modified GTN damage model by small punch test. [13] Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. [14] Prediction of Failure in High Temperature Using GTN Model and Finite Element Simulation in AA 5083 Sheets ... [15] Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank. [16] On the numerical integration of an advanced Gurson model. [17] A comparative study of three ductile damage approaches for fracture prediction in cold forming processes. [18] An extended GTN model for ductile fracture under high and low stress triaxiality. [19] Evaluation of shear mechanisms and influence of the calibration point on the numerical results of the GTN model. [20] An assessment of isotropic constitutive models for ductile fracture under high and low stress triaxiality. [21] Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. [22] Experimental and numerical characterization of anisotropic damage evolution of forged Al6061-T6 alloy. [23] Aluminum alloy damage evolution for different strain paths–Application to hemming process. [24] Fracture analysis on U-bending of AA6061 aluminum alloy sheet using phenomenological ductile fracture criteria.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

پیش‌بینی رفتار شکست آلومینیوم 6061-T6 با استفاده از معیار GTN توسعه‌یافته

مازیار خادمی

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

حسن مسلمی نائینی*

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمدجواد میرنیا

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در این مقاله، توسط معیار شکست GTN و تأثیر تکامل آن، دقت پیش‌بینی شکست مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی حالت‌های تنش، سه آزمون کالیبراسیون کشش تک‌محوری، کشش برشی و کشش کرنش صفحه‌ای برای کالیبراسیون معیار شکست و همچنین تعیین دقت معیار در پیش‌بینی شکست به کار گرفته شدند. برای مدل‌سازی رفتار شکست در آلومینیوم ۶۰۶۱-T، معیار شکست نرم GTN توسعه‌یافته، از طریق روش ترکیبی تجربی-شبیه‌سازی کالیبره شد. نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به‌منظور شبیه‌سازی فرایند استفاده شد و معیارهای شکست توسط زیر برنامه VUMAT به این نرم‌افزار اضافه شدند. مقادیر نیرو-جابجایی و طول کورس شکست در آزمون‌های تجربی، به‌منظور صحت‌سنجی نتایج عددی و بررسی دقت معیار مورد استفاده قرار گرفت. مطابق با نتایج، کالیبراسیون با استفاده از آزمون کشش تک‌محوری و کشش برشی، شکست را به‌طور میانگین با خطای ۶/۱۷ درصد پیش‌بینی می‌کند درحالی‌که معیار اصلی GTN قادر به پیش‌بینی شکست در آزمون کشش برشی نمی‌باشد و میزان خطا در رابطه با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای به ۲۴ درصد می‌رسد. به‌منظور بررسی رفتار شکست آلومینیوم ۶۰۶۱-T و صحت‌سنجی معیار کالیبره شده در فرایند پیچیده‌تر و غیر از آزمون‌های کشش، آزمون خم‌کاری U شکل انجام شد. مشخص شد که معیار GTN توسعه‌یافته می‌تواند شروع شکست را در فرآیند خم‌کاری U شکل با خطای ۳ درصد پیش‌بینی کند.

کلیدواژه‌ها: شکست؛ معیارهای GTN؛ آزمون کالیبراسیون؛ پارامتر سه محوری تنش، خم‌کاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

*نویسنده مسئول: moslemi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

در شکست نرم در اثر نیروی کششی، پس از گلویی شدن، حفره‌های کوچکی در داخل سطح مقطع گلویی تشکیل می‌شود و با ادامه تغییر شکل این ریز حفره‌ها بزرگ شده و به هم می‌پیوندند تا یک ترک را ایجاد نمایند[1,2]. آلیاژهای صنعتی، معمولاً شامل رسوب‌ها و ذرات فاز دوم می‌باشند. این ذرات می‌توانند در اثر اعمال تغییر شکل به‌عنوان محل‌های جوانه‌زنی ترک عمل کنند. لازم به ذکر است یکی از پارامترهای مؤثر در جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها تنش هیدرواستاتیک است؛ به‌طوری‌که تنش هیدرواستاتیک کششی روند رشد حفره‌ها را سرعت بخشیده درحالی‌که تنش هیدرواستاتیک فشاری این روند را به تأخیر می‌اندازد[3]. پدیده شکست در علم مکانیک را می‌توان از دو دیدگاه کلاسیک و میکرومکانیکی مورد ارزیابی قرارداد. در مواردی به دلیل وجود هم‌زمان سازوکارهای شکست به‌صورت ترد و نرم، پیاده‌سازی مفاهیم دیدگاه کلاسیک دشواری‌هایی را در پی دارد. با توجه به همین نکته امروزه به‌کارگیری معیارهای میکرومکانیکی به‌عنوان یک روش کارآمد در پیش‌بینی شکست مورد توجه قرارگرفته است[4]. از مزایای کلی این روش در مقایسه با مکانیک شکست کلاسیک می‌توان به این نکته اشاره کرد که اصولاً متغیرهای مدل، وابسته به خواص ماده هستند و به هندسه بستگی ندارند[5,6]؛ بنابراین گسترش مدل از نمونه‌های استاندارد به ساختارها با ابعاد و هندسه‌های مختلف، اصلی‌ترین مزیت این روش است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده بررسی شکست نرم موضوع قابل توجه‌ای در بین پژوهشگران بوده است. در همین راستا معیارهای متعددی برای پیش‌بینی شکست ارائه گردیده است. معیارهای پیشنهادی را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی کرد. رویه اول بر مبنای قوانین تجربی یا نیمه تجربی است که برای تعیین کرنش شکست پیشنهاد شده‌اند. این دسته از معیارهای شکست نرم (معیارهای پدیدار شناختی)، وقوع شکست را بر مبنای رسیدن تابع شکست، به حدی بحرانی پیش‌بینی می‌کند. رویه دوم بر اساس وجود و شکل‌گیری، رشد و در ادامه انعقاد حفره‌ها است (معیارهای میکرومکانیکی). اهمیت بررسی شکست نرم ناشی از نیاز روزافزون صنعت به قطعاتی با نسبت استحکام به وزن بالا در نتیجه کاهش هزینه‌ها می‌باشد. بنابراین از مواد جدید مانند فولادهای با استحکام بالا و آلیاژهای آلومینیوم به شکل روزافزونی در صنعت استفاده می‌شود. ازآنجایی‌که رفتار شکست در این‌گونه مواد معمولاً مبتنی بر پدیده نازک‌شدگی نمی‌باشد، بررسی رفتار شکست این مواد از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به قابلیت‌های معیارهای شکست نرم در تعیین لحظه شکست، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از این نوع معیارها برای پیش‌بینی حد شکست در فرآیندهای تغییر شکل فلزات انجام گرفته است. گاتآ و همکاران[7] با استفاده از مدل GTN توسعه‌یافته، شکست را در فرایند شکل‌دهی تدریجی نمونه‌های تیتانیوم مورد بررسی قرار دادند. محققان یاد شده با در نظر گرفتن این نکته که شکست مواد متخلخل در مرحله پایانی با برش همراه است، پارامتری را به‌عنوان نرخ افزایش کسر حجمی حفره‌ها در اثر تنش برشی به پارامتر کسر حجمی حفره‌ها اضافه کردند. پژوهشگران مذکور به‌منظور تعیین پارامترهای اولیه معیار GTN توسعه‌یافته از آزمون کشش تک‌محوری و کشش برشی، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی و همبستگی تصویر دیجیتالی استفاده نمودند. پس از انجام مراحل فوق یک نمونه مخروطی و یک نمونه هرم ناقص را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای شکل داده شد. نتایج نشان داد هنگامی‌که از مدل GTN توسعه‌یافته استفاده شد،

بیش‌ترین ارتفاع شکل‌دهی قبل از شکست به حالت تجربی بسیار نزدیک است. در پژوهشی دیگر تنگ و همکاران[8] شکست در فرایند هیدروفرمینگ قطعات کروی ورق آلومینیوم 5A06 را با به‌کارگیری معیار GTN اصلی بررسی کردند. محققان یادشده برای تعیین پارامترهای معیار GTN از روش تحلیل معکوس استفاده کردند. در این روش مقادیر مناسب پارامترها به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مقایسه نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی با منحنی نیرو-جابجایی آزمون کشش در حالت تجربی نتایج یکسانی را در پی داشته باشد. چا و همکاران[9] به پیش‌بینی شکل‌گیری ترک در دو نوع ورق فولادی استحکام بالا در فرایند شکل‌دهی غلتکی مقاطع U شکل با استفاده از معیار GTN اصلی پرداختند. برای به دست آوردن پارامترهای مجهول معیار GTN از آزمون کشش و خمش با روش پاسخ سطح استفاده کردند. نتایج نشان داد با کالیبراسیون دقیق معیار GTN می‌توان با دقت مناسبی ترک‌های ریز را در ناحیه خم پیش‌بینی کرد. سویلیئر و همکاران[9] شکست را در نمونه‌های آلومینیوم ٦٠١٦-T٤ با به‌کارگیری معیار اصلی GTN مورد مطالعه قرار دادند. محققان مذکور نشان دادند که به دقت قابل قبولی در یافتن مقدار کسر حجمی حفره بحرانی به‌دست‌آمده از نمونه کشش شکاف دار و کشش دو محوری برای پیش‌بینی شروع توسعه ترک در ناحیه خم می‌توان دست یافت. وو و همکاران[10] در پژوهشی به بررسی تجمیع آسیب در فرایند شکل‌دهی چرخشی با استفاده معیار GTN توسعه‌یافته پرداختند. نتایج آنان نشان داد که نرخ نازک‌شدگی و تعداد مرحله شکل‌دهی تأثیرات مهمی در حد شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲٤ دارند. گل‌پور و همکاران[11] با استفاده از معیار اصلی GTN به بررسی پدیده شکست در حالت‌های مختلف تنش نمونه‌های In-situ پرداختند. نتایج آنان نشان داد که به‌هم‌پیوستگی حفره‌های ریز و حالت ترکیبی شکست (هم حفره‌های ریز و هم میکرو ترک) به‌عنوان سازوکار اصلی شکست در نمونه‌های ۹۰ و ٤٥ درجه می‌باشد. سان و همکاران[12] یک روش جدید برای شناسایی پارامترهای آسیب مدل برشی اصلاح‌شده GTN با ترکیب الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی و آزمون سنبه کوچک ارائه دادند. نتایج نشان داد که پارامترهای مشخص شده مدل آسیب GTN توسعه‌یافته برشی برای توصیف رفتار مکانیکی و همچنین تکامل آسیب و شکست مواد در طی آزمایش سنبه کوچک بسیار مؤثر هستند. بررسی پژوهش‌های یاد شده نشان می‌دهد که جایگاه فرایند کالیبراسیون معیارهای میکرومکانیکال و تأثیر آن بر دقت معیار شکست به میزان کافی مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین در فرآیند شکل‌دهی فلزات معمولاً حالت تنش دارای تغییرات می‌باشد و ثابت نیست. بنابراین همواره نیاز است تا عملکرد معیار کالیبراسیون حالت‌های مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه در این مقاله رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم ٦٠٦١-T٦ با استفاده از یک معیار ریزساختاری ناهمسانگرد مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف اغلب پژوهش‌ها در این مقاله به‌منظور بررسی اثر کالیبراسیون آزمون کشش تک‌محوری، کشش کرنش صفحه‌ای و کشش برشی به‌منظور تعیین رفتار شکست استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از معیار اولیه ریزساختاری GTN به‌منظور مقایسه با معیار توسعه‌یافته استفاده شده است. کالیبراسیون معیار GTN با استفاده از آزمون‌های مختلف انجام شده و پارامترهای آسیب معیار GTN بر مبنای آزمون‌های کالیبراسیون تعیین شد. در مرحله بعد به‌منظور بررسی صحت و دقت معیار کالیبره شده رفتار شکست در فرایند خم‌کاری U شکل بررسی شد. در نهایت هدف از این مقاله ارائه یک روش مناسب برای کالیبراسیون و همچنین ارائه معیار GTN توسعه‌یافته با دقت بالا در پیش‌بینی شکست و بررسی دقت این معیار در مسیرهای بارگذاری متفاوت می‌باشد.

۲- مدل‌سازی شکست

۲-۱- حالت تنش

با استفاده از مقادیر تانسور تنش و تنش‌های اصلی همواره می‌توان مقدار حالت تنش در یک نقطه از ماده را تعیین کرد. در شکل‌دهی فلزات و همچنین بررسی شکست مواد استفاده از پارامترهای بی‌بعد مشتق شده از تانسور تغییرات تنش امری مرسوم می‌باشد. از جمله مهم‌ترین این پارامتر می‌توان به پارامتر سه محوری تنش (η) زاویه لود نرماله ($\bar{\theta}$) و مقدار کرنش موم‌سان معادل (ε^{pl}) اشاره کرد که به‌صورت معادلات (۱) تا (۳) زیر تعریف می‌شوند[13]:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \quad (۱)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{2}{\pi}\arccos(\xi) \quad (۲)$$

$$\xi = \frac{27}{2}\frac{J_3}{\bar{\sigma}^3} \quad (۳)$$

در معادلات فوق σ_h، $\bar{\sigma}$، و ξ به ترتیب تنش معادل، تنش میانگین و نامتغیر سوم تنش انحرافی می‌باشد که بر اساس نامتغیرهای دوم و سوم ماتریس تنش‌های انحرافی (J_2 و J_3) تعریف می‌شوند.

۲-۲- مدل توسعه‌یافته GTN

مفهوم اصلی در مدل اولیه GTN بیان می‌دارد که تابع تسلیم، اثر آسیب نرم ریزساختاری بر روی رفتار تسلیم را در نظر می‌گیرد و آسیب موضعی ناشی از جوانه‌زنی، رشد و انعقاد پی‌درپی حفره‌ها در درون ماده است که در نهایت منجر به شکست می‌شود[14]. از میان توابع پتانسیل موم‌سان که اثر بخش هیدروستاتیک تنش و کسر حجمی حفره را در نظر می‌گیرند، مدل GTN اصلی یک الگوی ساختاری برای مواد نرم متخلخل (شامل حفره‌های استوانه‌ای و کروی) بر اساس تئوری حد بالای پلاستیسیته و رفتار صلب- کاملاً موم‌سان که از الگوی فون‌میزز پیروی می‌کند، می‌باشد. تابع تسلیم معیار GTN اصلی که شامل حفره‌های کروی است، به‌صورت معادله (٤) است[15]:

$$\varphi = \frac{(\sigma_e)^2}{(\sigma_m)^2} + 2q_1 f^* cosh(3q_2\sigma_h/k\sigma_m) - (1 + q_3 f^*) = 0 \quad (٤)$$

در معادله (٤) σ_m تنش سیلان کششی ماده، σ_e تنش معادل، σ_h تنش هیدرواستاتیک می‌باشند. همچنین، f^* معرف کسر حجمی مؤثر حفره، q_1 تا q_3 ثوابت وابسته به خواص ماده و k پارامتر ناهمسانگردی بر اساس ضرایب لنکفورد است[16]. توسعه اصلی مدل GTN در پارامتر کسر حجمی مؤثر اتفاق افتاده است. هنگامی‌که ماده بدون تخلخل و غیرقابل تراکم باشد f^* صفر است. تابع الحاقی حفره‌ها به‌صورت زیر نشان داده می‌شود[17]:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & f \le f_c \\ f_c + G(f - f_c) & f > f_c \end{cases} \quad (٥)$$

$$G = \frac{f_u - f_c}{f_f - f_c} \quad (٦)$$

$$f_u = \frac{1}{q_1} \quad (٧)$$

که f_C کسر حجمی بحرانی حفره، G نرخ انعقاد حفره‌ها و f_f کسر حجمی حفره در شکست نهایی مواد است. نرخ تغییرات کسر حجمی حفره‌ها در مدل آسیب GTN اصلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود[18]:

$$\dot{f} = \dot{f}_g + \dot{f}_n \quad (٨)$$

که در آن f_g نرخ رشد و f_n نرخ جوانه‌زنی حفره‌ها و رابطه آن به‌صورت زیر است:

$$\dot{f}_n = \frac{f_N}{s_N\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon^{pl} - \varepsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (٩)$$

$$\dot{f}_g = (1 - f)\frac{3f^* q_1 q_2}{2} \sinh\left(\frac{3}{2}q_2\eta\right) \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (١٠)$$

که f_n بیان‌گر کسر حجمی حفره‌های مستعد جوانه‌زنی و ε_N کرنش شروع جوانه‌زنی حفره‌ها و ε^{pl} کرنش مومسان معادل می‌باشد. همچنین در این معیار فرض شده است حفره‌ها دارای یک توزیع نرمال با انحراف معیار s_N هستند. بنابراین شکست در مدل بیان‌شده به جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها در تنش‌های کششی وابسته است. مطالعات جدید[18-20] نشان می‌دهد که افزایش کسر حجمی حفره‌ها به عواملی دیگری مانند شرایط بارگذاری برشی وابسته است. تحت بارهای غالب کششی، میکرو حفره‌ها به دلیل تنش‌های هیدرواستاتیکی کششی زیاد ایجاد می‌شوند و گسترش می‌یابند؛ اما هنگامی‌که ماده تحت بارهای برشی قرار می‌گیرد، در مرحله اول میکرو حفره‌های جدید ایجاد می‌شوند سپس با افزایش نیروی برشی حفره‌ها تغییر طول می‌یابند. در ادامه با توجه به عدم انسجام در باندهای برشی، حفره‌های تغییر طول یافته به هم می‌پیوندند و ترک‌های ریزی را شکل می‌دهند: بنابراین طبق معادله (١١) در مدل‌های جدید اثر نیروهای برشی باید در حفره‌زایی در نظر گرفته شود.

$$\dot{f} = \dot{f}_g + \dot{f}_n + \dot{f}_{shear} \quad (١١)$$

$$\dot{f}_{shear} = k_w f(1 - \xi^2)\,\dot{\varepsilon}^{pl} \quad (١٢)$$

که در آن k_w ثابت جدید ماده می‌باشد که نرخ آسیب برشی را تعیین می‌کند و ξ وابسته به زاویه لود نرماله ($\bar{\theta}$) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از این تابع آسیب می‌توان معیار GTN اصلی را به زاویه لود نرماله وابسته کرد. بنابراین انتظار می‌رود دقت پیش‌بینی شکست افزایش یابد. معادلات فوق در قالب یک زیر برنامه طبق شکل ١ به نرم‌افزار اجزای محدود اعمال شد. در زیربرنامه هدف یافتن مقادیر کرنش معادل مومسان و مقدار کسر حجمی حفره‌ها در هر لحظه است. طبق شکل ١ پس از مقداردهی اولیه به ثابت‌ها، ابتدا تغییر شکل را به‌صورت الاستیک در نظر گرفته و سپس با کنترل تابع تسلیم، وضعیت تغییر شکل ماده به‌روز می‌گردد. درصورتی‌که میزان تغییر شکل و سطح تنش‌های حاصل از آن کمتر از نقطه تسلیم باشد، حل مسئله طبق قوانین روابط و معادلات هوک ادامه می‌یابد. چنانچه تسلیم رخ داده باشد، حل مسئله در گام‌های بعد، در ناحیه مومسان انجام خواهد شد.

$$\sigma_{t+\Delta t}^{trial} = \sigma_t + C : \Delta\varepsilon_{t+\Delta t} \quad (١٣)$$

در معادله فوق، C تانسور مرتبه چهار سفتی الاستیک است. در ادامه به‌منظور کنترل شرایط تسلیم در مرحله بعد، نیاز به محاسبه تنش هیدرواستاتیک و تنش معادل می‌باشد که طبق معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$P_{t+\Delta t}^{trial} = \frac{1}{3}\sigma_{t+\Delta t}^{trial} : I \quad (١٤)$$

$$q_{t+\Delta t}^{trial} = \sqrt{\frac{1}{2}s_{t+\Delta t}^{trial} : s_{t+\Delta t}^{trial}} \quad (١٥)$$

که در آن I تانسور واحد و S تانسور تنش انحرافی می‌باشد. سپس تابع پتانسیل که همان تابع معیار GTN (معادله ٤) می‌باشد کنترل می‌شود.

$$\phi_{t+\Delta t}^{trial} = \left(P_{t+\Delta t}^{trial} \cdot q_{t+\Delta t}^{trial}\right) \quad (١٦)$$

$\phi_{t+\Delta t}^{trial} > 0$، بیانگر ورود به ناحیه مومسان می‌باشد. در نتیجه با استفاده از روش تکراری نیوتن رافسون، معادلات غیرخطی VUMAT حل می‌گردد. هدف از این مرحله یافتن نمو کرنش پلاستیک و نمو کسر حجمی حفره‌ها است.

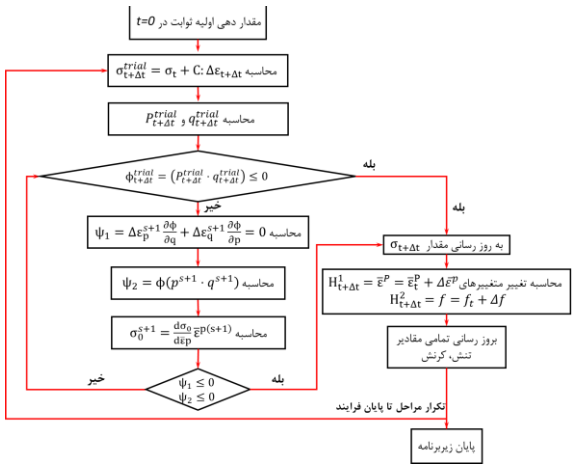
$$\psi_1 = \Delta\varepsilon_p^{s+1}\frac{\partial\phi}{\partial q} + \Delta\varepsilon_q^{s+1}\frac{\partial\phi}{\partial p} = 0 \quad (١٧)$$

$$\psi_2 = \phi(p^{s+1} \cdot q^{s+1}) \quad (١٨)$$

در معادلات (١٧) و (١٨)، s دستور تکرار مورد استفاده در روش نیوتون رافسون است (شکل ١). در نتیجه مقادیر زیر به‌روزرسانی می‌گردد که ΔH_1 نمو کرنش پلاستیک و ΔH_2 نمو کسر حجمی حفره‌ها است:

$$\Delta H_1 = \Delta\bar{\varepsilon}^p \quad (١٩)$$

$$\Delta H_2 = \Delta f \quad (٢٠)$$



شکل ۱) نمودار گردش کار زیر برنامه VUMAT

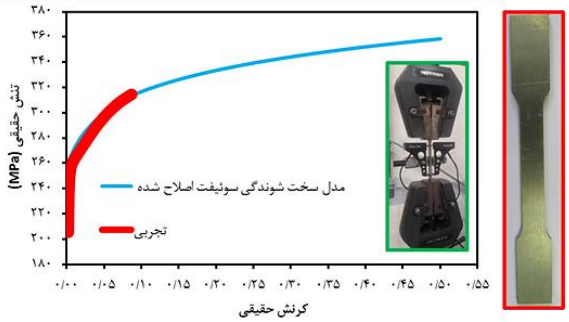
۳- تعیین خواص مکانیکی

ورق آلومینیوم آلیاژی ٦٠٦١-T٦ با ضخامت ۲/۰۵ میلی‌متر برای انجام آزمون‌های تجربی استفاده شد. به‌منظور تعیین دقیق رفتار ماده در هنگام شکست، محاسبه دقیق خواص مکانیکی همواره یکی از بخش‌های تأثیرگذار است. در همین راستا با استفاده از نتایج آزمون کشش تک‌محوری خواص پلاستیک و رفتار شکست ماده تعیین شد. نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری در راستای نورد با استفاده از دستگاه برش سیمی بر اساس استاندارد ASTM-E08 تهیه شدند. در مرحله بعد نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه کشش اینسترون تا لحظه شکست کشیده شدند. به‌منظور حفظ شرایط شبه استاتیک سرعت کشش یک میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد تا از اثرات نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی و شکست جلوگیری شود. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری تغییر طول نمونه و یا کرنش تا لحظه شکست از یک کشش سنج با محدوده اندازه‌گیری ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. پس از آن با استخراج نمودار نیرو-جابجایی مقادیر تنش و کرنش حقیقی محاسبه شده است. با توجه به اینکه رفتار ماده پس از نقطه گلویی در نمودار تنش-کرنش حقیقی همواره با خطا همراه است. در این پژوهش با استفاده از روش به کار گرفته شده توسط میرنیا و همکاران[21] رفتار ماده تا لحظه گلویی و بعد از آن توسط معادله ۲۱ تعیین شد. در معادله ۲۱ مشاهده می‌شود رفتار کار سختی ماده تا لحظه گلویی توسط معادله سوئیفت تعریف شده و بعد از نقطه گلویی با به‌کارگیری یک ضریب اصلاح به نام Q رابطه بین تنش و کرنش پلاستیک فرمول‌بندی شده است.

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n & \bar{\varepsilon}^p < \bar{\varepsilon}^p{}_{necking} \\ Q[K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n] + (1-Q)\bar{\sigma}_{UTS} & \bar{\varepsilon}^p > \bar{\varepsilon}^p{}_{necking} \end{cases} \quad (۲۱)$$

k، ε_0، $\bar{\varepsilon}^p{}_{necking}$، n و $\bar{\sigma}_{UTS}$ به ترتیب برابر با ضریب استحکام، کرنش اولیه، کرنش مومسان، کرنش گلویی، نمای کرنش سختی و استحکام نهایی می‌باشند. پارامترهای k، ε_0 و n با استفاده از انطباق معادله سوئیفت با داده‌های تجربی تا لحظه گلویی به‌دست آمده است. همچنین پارامتر سخت‌شوندگی Q با استفاده از شبیه‌سازی‌های تکرارشونده و انطباق منحنی نیرو-جابجایی تجربی با منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی در محدوده بعد از نقطه گلویی حاصل می‌شود. شکل ۲ نمونه آزمون کشش تک‌محوری را در دستگاه آزمون کشش به همراه منحنی تجربی تنش-کرنش حقیقی تا نقطه گلویی و منحنی تنش-کرنش با استفاده از معادله کار سختی را نشان می‌دهد.

برای تعیین رفتار ناهمسانگردی، نمونه‌های کشش در جهت نورد، ۴۵ درجه و عمود بر جهت نورد تهیه شدند. ضرایب لنکفورد با استفاده از آزمون کشش و تا قبل از نقطه گلویی محاسبه شدند. جدول ۱ مقادیر معادله (۲۱) به همراه ضرایب لنکفورد و تنش تسلیم را نشان می‌دهد.



شکل ۲) منحنی تنش-کرنش ورق T۶-۶۰۶۱ در راستای نورد

جدول ۱) خواص مکانیکی ورق Al6061-T6

پارامتر	واحد	مقدار
تنش تسلیم (σ_y)	MPa	۲۵۴/۱
ضریب استحکام (k)	MPa	۳۹۰
نمای کرنش سختی (n)	–	۰/۰۹۵
ε_0	–	۰/۰۱۱۵
Q	–	۰/۸۵
$\bar{\varepsilon}^p{}_{necking}$	–	۰/۰۸۷
r0	–	۰/۴۸
r45	–	۰/۵۹
r90	–	۰/۵۱

۴- کالیبراسیون معیار GTN توسعه‌یافته

قدم اول در فرایند کالیبراسیون، تعیین طول کورس شکست تجربی آزمون‌های کشش می‌باشد. بعد از آن باید مقادیر کرنش پلاستیک معادل، پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله تا لحظه شکست به‌منظور تعیین حالت تنش از شبیه‌سازی اجزای محدود استخراج شود. در این پژوهش از روش ترکیبی تجربی- شبیه‌سازی به‌منظور کالیبراسیون معیار GTN توسعه‌یافته استفاده شد. آزمون‌های انتخاب شده برای بررسی رفتار شکست در حالت تنش‌های مختلف شامل آزمون کشش تک‌محوری، کشش کرنش صفحه‌ای و کشش برشی درون صفحه‌ای می‌باشد. آزمون‌های مذکور به‌منظور بررسی پیش‌بینی شکست توسط معیار GTN توسعه‌یافته در دامنه مختلفی از حالت‌های تنش انتخاب شدند.

علاوه بر این موضوع برای کالیبراسیون معیار GTN توسعه‌یافته، استفاده از آزمون نمونه کشش برشی جز الزامات است زیرا تعیین ثابت برشی معیار یادشده در افزایش یا کاهش دقت پیش‌بینی شکست بسیار مؤثر می‌باشد و این ثابت صرفاً با یک آزمون کشش برشی به‌دست می‌آید. ابعاد نمونه آزمون تجربی کشش کرنش صفحه‌ای و کشش برشی بر اساس مرجع[21] انتخاب شده است.

با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی طول کورس شکست به دست آمده از آزمون‌های کشش تک‌محوری، کرنش صفحه‌ای و برشی به ترتیب برابر با ۶/۵۱، ۱/۱۳۳ و ۱/۸۳ میلی‌متر تعیین گردید. همچنین شرایط انجام آزمون کشش برشی و کشش کرنش صفحه‌ای هم مانند آزمون کشش تک‌محوری بوده است. سپس به‌منظور تعیین حالت تنش، تغییرات مقادیر پارامتر تنش سه محوری و زاویه لود نرماله برای هر یک از آزمون‌های کشش به کمک نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از حل‌گر صریح شبیه‌سازی استخراج شد. تمامی آزمون‌های کشش به‌جز آزمون کشش برشی بدون در نظر گرفتن تقارن هندسی به‌صورت کامل مدل‌سازی شدند. المان بندی مدل اجزای محدود هر یک از نمونه‌ها با استفاده از المان‌های ۸ گره‌ای مکعبی سه‌بعدی (C3D8R) صورت گرفت و ابعاد المان‌ها در نواحی مرکزی و ضخامت که از کرنش بیشتری برخوردار هستند در حدود ۰/۴ میلی‌متر انتخاب و در نواحی دورتر از مرکز برای شبکه‌بندی از المان‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر استفاده شد و تعداد ۵ المان در راستای ضخامت ورق در نظر گرفته شد. خواص مکانیکی ورق مطابق با مقادیر ذکر شده در جدول ۱ اعمال شد. همچنین زمان شبیه‌سازی به نحوی انتخاب گردید که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی کمتر از یک درصد باشد تا مسئله به‌صورت شبه استاتیک حل شود. خروجی شبیه‌سازی‌ها شامل نمودار نیرو-جابجایی به‌عنوان شاخصی برای مقایسه با مقادیر تجربی انتخاب شد و در تمامی نمودارها لحظه افت ناگهانی نیرو در منحنی تجربی نیرو-جابجایی به‌عنوان لحظه شروع شکست در شبیه‌سازی اجزای محدود در نظر گرفته شد. مدل GTN توسعه‌یافته در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus/explicit با استفاده از زیر برنامه VUMAT پیاده‌سازی شد و از روش حذف المان به‌منظور تعیین لحظه شکست استفاده شد. به‌منظور استفاده از معیار GTN توسعه‌یافته، ۹ پارامتر معیار باید به‌صورت زیر کالیبره شوند:

کسر حجمی اولیه حفره‌ها f_0، کسر حجمی حفره‌ها بحرانی f_c، و کسر حجمی حفره‌ها در شروع شکست f_f

پارامترهای f_N، ε_N و S_n

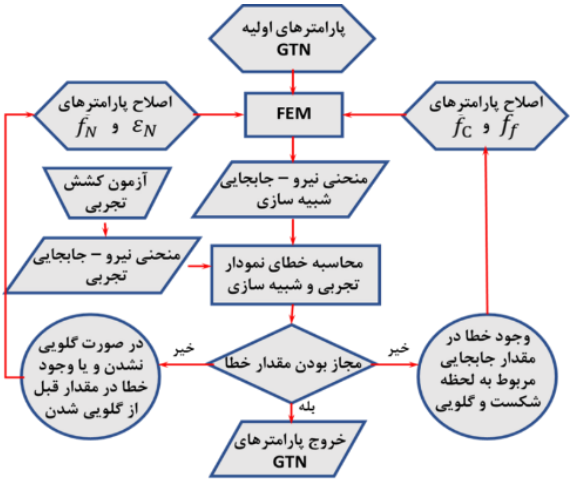
ضرایب اصلاح معیار q_1 و q_2

پارامتر آسیب برشی k_w

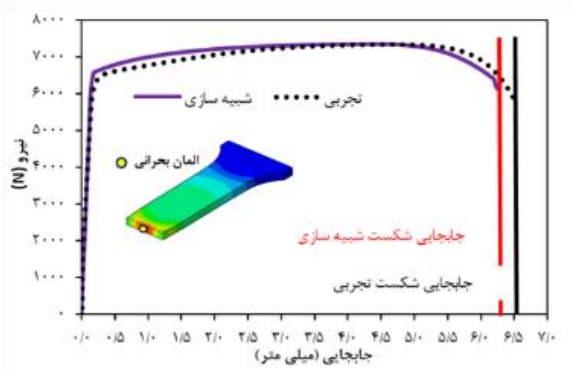
برای کالیبراسیون پارامترهای مدل شکست، از آزمون کشش تک‌محوری و کشش برشی استفاده شد. در ادامه از روش کالیبراسیون معکوس مبتنی بر نمودار شکل ۳ برای شناسایی بیشتر پارامترهای معیار شکست استفاده شد. با استفاده از روش ارائه شده در شکل ۳ و تطبیق لحظه شکست در نمودار نیرو جابجایی نشان داده شده در شکل ٤ (نمونه کشش محوری) و با بهره‌گیری از روش سعی و خطا چهار پارامتر مهم کسر حجمی حفره‌های بحرانی، کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شکست، کرنش جوانه‌زنی و کسر حجمی حفره‌ها در حالت جوانه‌زنی پیدا شدند. همچنین ضرایب q_1 و q_2 با استفاده از تطبیق نمودار نیرو جابجایی آزمون کشش محوری در زمانی که نمودار با افت نیرو مواجه هست به‌دست آمد. سایر پارامترها با استفاده از[22,23] پیدا شد.

شکل ٤ نتایج حاصل از کالیبراسیون آزمون کشش تک‌محوری را در بهترین حالت نشان می‌دهد. مقادیر پارامترهای کالیبره شده در این آزمون در جدول ۲ آمده است.

پارامتر مهم دیگر که نیاز است تا تعیین شود ضریب آسیب برشی (k_w) می‌باشد. در همین راستا به کمک آزمون کشش برشی و استفاده از مقادیر پارامترهای کالیبره شده در آزمون کشش محوری،



شکل ۳) روش کالیبراسیون معکوس



شکل ۴) نتایج کالیبراسیون آزمون کشش محوری به همراه موقعیت المان بحرانی

جدول ۲) مقادیر پارامترهای کالیبره شده در آزمون کشش محوری

f_0	f_c	f_f	f_N	s_N	ε_N	q_1	q_2
۰/۰۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹۵	۰/۰۳	۰/۱	۰/۳	۱	۱

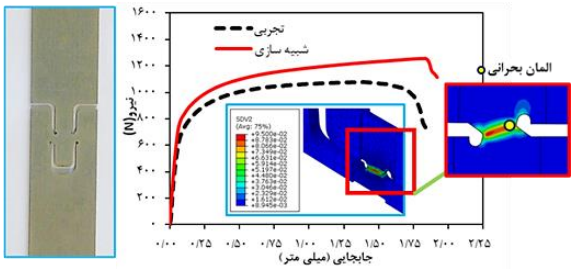
مقدار ضریب تنظیم آسیب برشی k_w=۱/۵ تعیین شد. شکل ۵ نتایج کالیبراسیون ضریب مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر جابجایی شکست در نمودار نیرو-جابجایی در حالت تجربی و شبیه‌سازی از تطابق مناسبی برخوردار هستند.

به‌منظور تکمیل فرایند کالیبراسیون باید حالت تنش برای هر یک از آزمون‌های کشش تعیین شود. پس از صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقادیر پارامترهای یادشده در بحرانی‌ترین المان یا المانی با بیشترین کرنش مومسان معادل محاسبه شدند. ذکر این نکته ضروری است که مقادیر محاسبه شده تا مقدار طول کورس شکست خروجی آزمون تجربی انجام گرفت. خروجی حالت تنش در بحرانی‌ترین المان در آزمون‌های کشش به ازای مقادیر مختلف کرنش مومسان معادل تا لحظه شکست در شکل ٦ نشان داده شده است. بررسی نمودار شکل ٦ نشان می‌دهد که مقادیر پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله در طی فرآیند کشش ثابت نیستند و همواره دارای تغییراتی می‌باشند. در نتیجه به‌منظور تعیین دقیق حالت تنش نیاز به محاسبه مقدار میانگین پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله با استفاده از معادلات ۲۲ و ۲۳ است:

$$\eta_{ave} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_u^p}\int_0^{\bar{\varepsilon}_u^p} \eta(\bar{\varepsilon}^p)d\bar{\varepsilon}^p \qquad (۲۲)$$

$$\bar{\theta}_{ave} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_u^p}\int_0^{\bar{\varepsilon}_u^p} \bar{\theta}(\bar{\varepsilon}^p)d\bar{\varepsilon}^p \qquad (۲۳)$$

دو پارامتر کرنش در معادلات ۲۲ و ۲۳ نماینده کرنش معادل مومسان و بیشینه کرنش مومسان معادل قبل از لحظه شکست می‌باشند. جدول ۳ مقادیر میانگین پارامتر سه محوری تنش و میانگین زاویه لود نرماله به همراه کرنش معادل شکست را برای آزمون‌های کشش تک‌محوری و کشش برشی نشان می‌دهد.



شکل ۵) نتایج کالیبراسیون آزمون کشش برشی به همراه کانتور آسیب در مدل شبیه‌سازی اجزای محدود

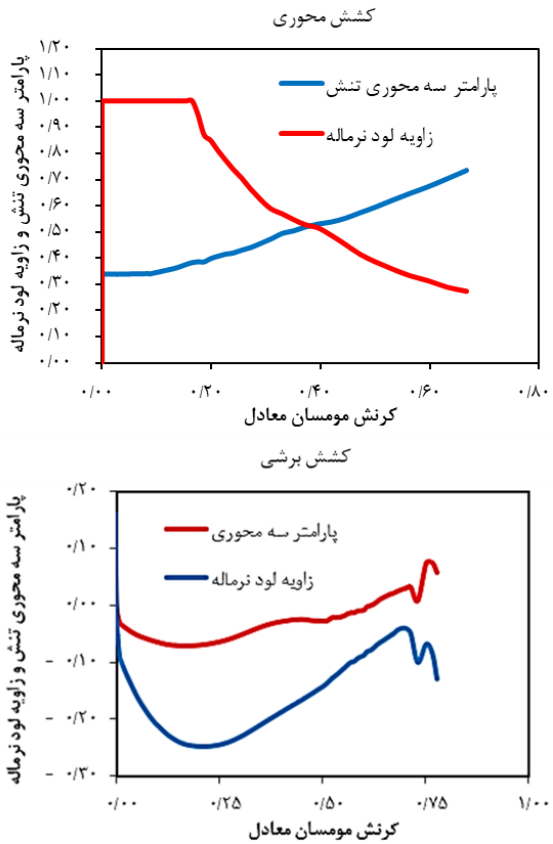
جدول ۳) مقادیر حالت تنش در آزمون‌های کشش

آزمون کشش	η_{ave}	$\bar{\theta}_{ave}$	$\bar{\varepsilon}_u^p$
کشش محوری	۰/۴۹	۰/۶۳	۰/۶۳
کشش برشی	۰/۰۲۷	-۰/۱۵	۰/۷۶

مقایسه مقادیر حالت تنش بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های اجزای محدود بر مبنای معیار GTN با مقادیر تئوری حالت تنش در آزمون کشش محوری ($\bar{\theta}=1$ و $\eta=0/333$)، و کشش برشی ($\bar{\theta}=0$ و $\eta=0$)، بیانگر قابلیت آزمون‌های مدل‌سازی شده در توصیف رفتار شکست تحت بارگذاری‌های گوناگون می‌باشد.

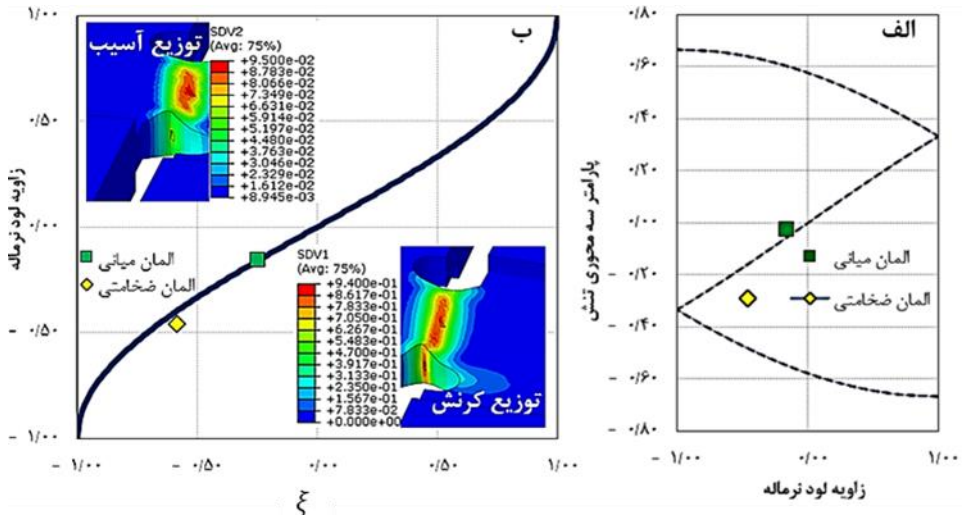
بررسی وضعیت تنش اولین المان حذف‌شده در نمونه برش اصلاح‌شده نشان می‌دهد که این المان دارای کرنش معادل مومسان حداکثر نمی‌باشد. درحالی‌که محل حذف این المان بر روی قسمت میانی نمونه اصلاح‌شده کشش برشی است، محل حذف المانی که کرنش معادل بیشتری دارد در قسمت ضخامتی قرار داد. **Error! Reference source not found.**-الف بررسی وضعیت تنش این دو المان نشان را می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود المان سطح میانی نزدیک‌ترین حالت را به وضعیت برشی دارد درحالی‌که المان ضخامتی که دارای کرنش مومسان معادل بیشتری است دارای وضعیت برشی نمی‌باشد. بنابراین بررسی علت اینکه چرا المانی که دارای کرنش معادل بیشتری است دیرتر به مرحله شکست رسیده، دارای اهمیت است. بررسی وضعیت مقدار پارامتر زاویه لود نرماله این دو المان بر اساس پارامتر ξ نشان می‌دهد که در المان میانی مقدار پارامتر ξ نزدیک‌تر به صفر است درحالی‌که در المان ضخامتی نزدیک‌تر به مقدار ۱- می‌باشد (شکل ۷-ب).

همچنین از بررسی حالت‌های تنش می‌دانیم هر چه مقدار پارامتر ξ برای یک المان نزدیک به ۱- باشد، توزیع و تجمیع آسیب بر



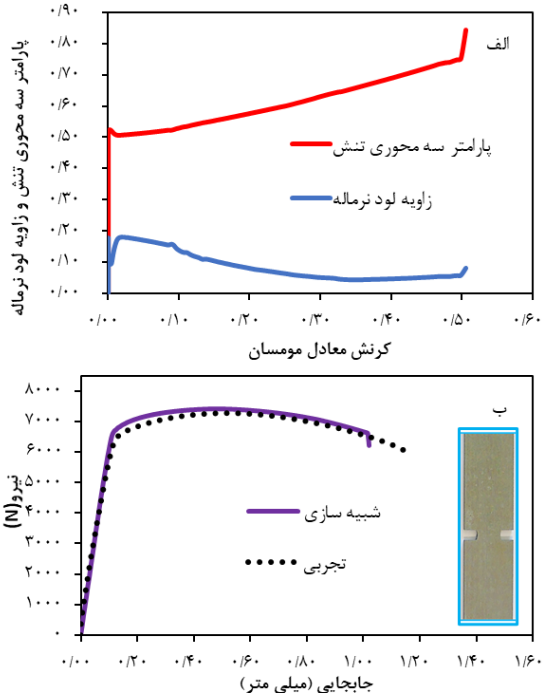
شکل ۶) حالت تنش در آزمون‌های کالیبراسیون

اساس رابطه ۱۲ در آن کمتر است. بنابراین تأثیر پارامتر ξ در



شکل ۷) بررسی وضعیت الف) تنش ب) مقدار پارامتر زاویه لود نرماله بر اساس پارامتر ξ در دو المان میانی و ضخامتی

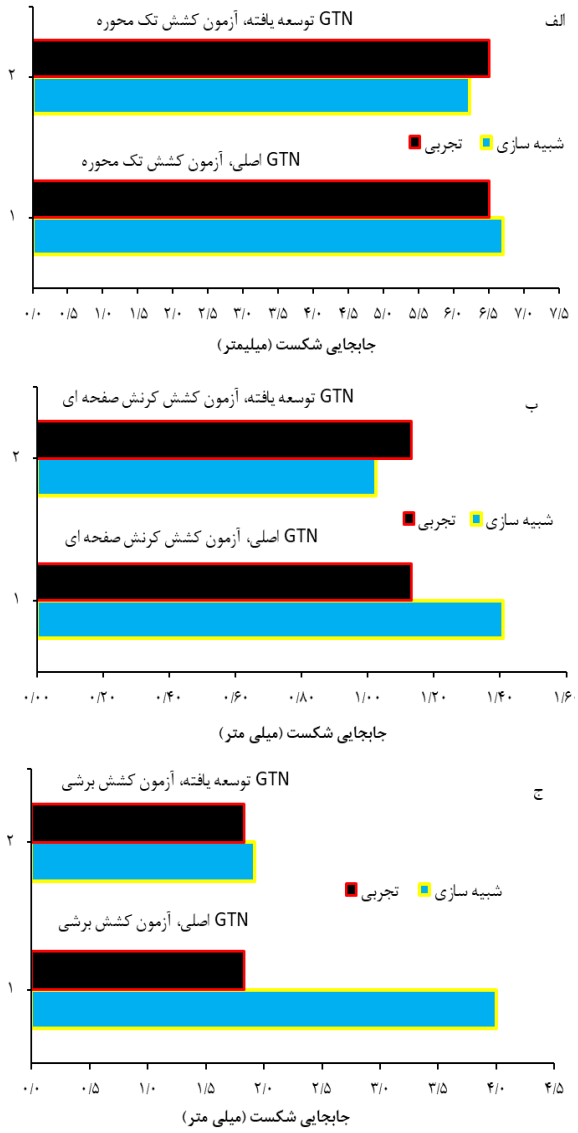
حفره‌زایی در المان ضخامتی کمتر از المان میانی می‌باشد، در نتیجه حفره‌زایی کمتری در المان ضخامتی رخ می‌دهد. بنابراین المان در سطح میانی دارای کرنش معادل کمتر اما تجمیع آسیب بیشتری است درنتیجه زودتر به شکست می‌رسد. این بررسی نشان می‌دهد که تجمیع آسیب درنتیجه حالت تنش تأثیر بیشتری نسبت به حداکثر میزان کرنش مومسان معادل در پیش‌بینی شکست دارد. بنابراین حذف المان در سطح میانی نتیجه درستی است زیرا در آزمون کشش نمونه برشی فرض صحیح، حذف المانی است که دارای حالت تنش برشی باشد. در ادامه به‌منظور بررسی دقت کالیبراسیون در پیش‌بینی شکست معیار کالیبره شده، ضرایب استخراج شده از آزمون کشش تک‌محوری و کشش برشی برای پیش‌بینی شکست در آزمون کشش کرنش صفحه‌ای به علت حالت تنش مشابه با فرایند خم‌کاری به کار گرفته شد. طول کورس شکست در آزمون کشش کرنش صفحه‌ای محاسبه شده و به همراه حالت تنش المان بحرانی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین تغییرات پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله در محدوده حالت کرنش صفحه‌ای ($\bar{\theta}=0$ و $\eta=0/57$) می‌باشد. همچنین بررسی نمودار نیرو-جابجایی در حالت تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جابجایی شکست در مدل شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌شود. در نتیجه معیار کالیبره شده با استفاده از آزمون کشش محوری و برشی توانایی پیش‌بینی شکست در حالت‌های دیگر تنش را دارد. در نهایت تطابق بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی در رابطه با جابه‌جایی شکست نمونه‌های کالیبراسیون دارای اختلافی در حدود ۴/۱، ۹/۵ و ۴/۹ درصد به ترتیب برای آزمون‌های کشش تک-محوری، کرنش صفحه‌ای و برشی درون صفحه‌ای است. به‌منظور بررسی تأثیر پارامتر آسیب برشی در معیار GTN توسعه‌یافته و مقایسه آن با معیار اصلی، شبیه‌سازی‌های انجام شده با مقادیر کالیبراسیون حاصل از آزمون کشش محوری بار دیگر با در نظر



شکل ۸) الف) حالت تنش ب) نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش کرنش صفحه‌ای

نگرفتن پارامتر آسیب برشی و استفاده از معیار اصلی GTN انجام گرفت. شکل ۹ مقایسه پیش‌بینی شکست در آزمون‌های کشش را با استفاده از دو معیار GTN توسعه‌یافته و GTN اصلی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با توجه به نوع شکست در ورق آلومینیوم T۶-۶۰۶۱، اگر پارامتر حفره‌زایی در اثر شرایط برشی در نظر گرفته نشود، مقدار خطا تا ۲۴ درصد در نمونه کشش کرنش صفحه‌ای افزایش خواهد یافت. همچنین در رابطه آزمون کشش

برشی دیده می‌شود که با حذف پارامتر آسیب برشی، نمونه به‌هیچ‌وجه دچار شکست نمی‌شود. بنابراین استفاده از معیار شکست متناسب با نوع شکست و همچنین استفاده از آزمون‌های کالیبراسیون مناسب تأثیر بسزایی در پیش‌بینی خرابی ماده خواهد



شکل ۹) مقایسه جابجایی شکست در حالت شبیه‌سازی و تجربی با استفاده از معیارهای مختلف برای نمونه‌های کشش الف. تک‌محوری ب. کرنش صفحه‌ای ج. برشی درون صفحه‌ای

داشت. در نتیجه چنانچه فرآیند کالیبراسیون به‌درستی انجام پذیرد و دارای دقت بالایی باشد، معیار کالیبره شده قادر به پیش‌بینی شکست در حالت‌های مختلف تنش خواهد بود.

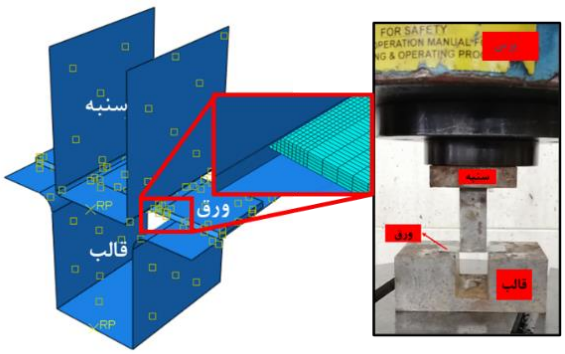
۵- فرایند خم‌کاری

به‌منظور بررسی رفتار شکست ورق آلومینیوم ٦٠٦١-T٦ و صحت سنجی معیار کالیبره شده در فرایند پیچیده‌تر و غیر از آزمون‌های کشش، آزمون خم‌کاری U شکل صورت پذیرفت. ابعاد ورق اولیه ۷۰*۲۵ میلی‌متر بوده است. در فرایند تجربی ورق میان سنبه و ماتریس قرار گرفته و با استفاده از دستگاه ماشین پرس ٦٠t با حرکت سنبه ورق شکل می‌گیرد. شعاع قالب و سنبه به ترتیب ۱ و ۵ میلی‌متر و عرض کانال ماتریس ۳۱ میلی‌متر می‌باشد. همچنین فاصله بین سنبه و ماتریس برابر با ضخامت ورق در نظر گرفته شد. سرعت پرس با توجه به لزوم حفظ شرایط شبه استاتیک برابر با ۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید.

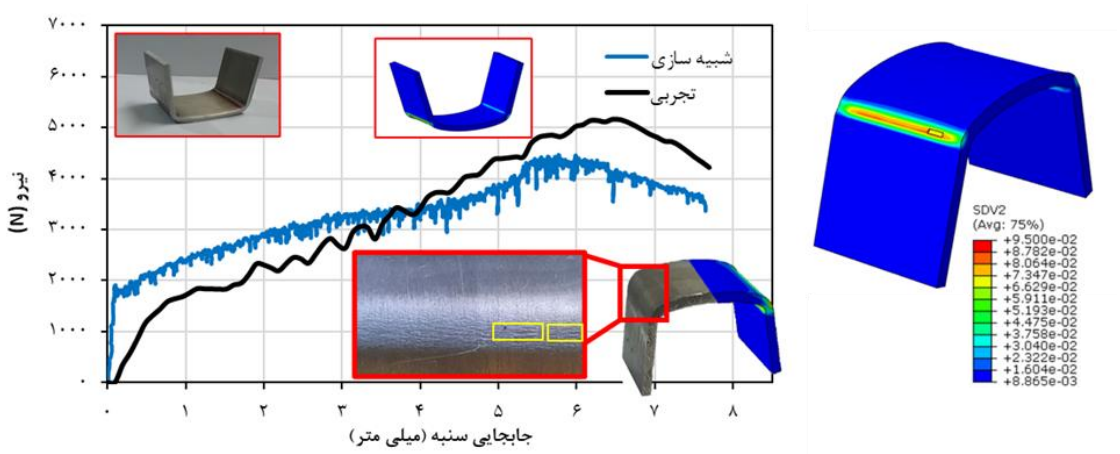
خروجی فرآیند شکل‌دهی شامل نمودار نیرو-جابجایی در طول فرایند ثبت شد. با توجه به افت نیرو و همچنین بروز ترک در مقیاس ماکروسکوپیک، نمونه در جابجایی سنبه برابر با ۷/۵۱ میلی‌متر در ناحیه خم دچار شکست شد. در ادامه فرایند خم‌کاری U شکل در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. شکل ۱۰ مدل اجزای محدود را در نرم‌افزار شبیه‌سازی به همراه قالب فرایند خم‌کاری U شکل شامل سنبه و ماتریس را نشان می‌دهد. نشان می‌دهد. سنبه و ماتریس به‌عنوان اجزای شکل‌دهی به‌صورت صلب و همچنین ورق به‌صورت شکل‌پذیر با استفاده از المان‌های مشابه برای شبیه‌سازی آزمون‌های کشش مدل‌سازی شدند. خواص مکانیکی، پلاستیک و همچنین خواص شکست بر مبنای آزمون‌های کشش ارائه‌شده در بخش قبلی در قسمت تعریف خواص نرم‌افزار ارائه شد. شرایط مرزی منطبق با فرایند تجربی بوده به‌نحوی‌که سنبه تنها در راستای عمودی جابجا می‌شود و قالب به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد. از شرایط تماس سطح به سطح و از نوع پنالتی برای اعمال بر سطوح تماس و شرایط مرزی لغزشی بین ورق و سایر اجزای ابزار استفاده شد. ضریب اصطکاک بین سنبه و لایه بالایی ورق و همچنین بین قالب و لایه زیرین ورق برابر با ۰/۱۵ بر اساس پژوهش پیشین[24] در نظر گرفته شده است.

۵-۱- پیش‌بینی شکست در فرایند خم‌کاری U شکل

در مرحله اول نیاز به صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی با نتایج تجربی می‌باشد. بر این اساس همان‌طور که در شکل ۱۱ آمده است، نمودار نیرو-جابجایی شبیه‌سازی در مقایسه با خروجی حاصل از نتایج تجربی در تطابق مناسبی است. بنابراین مدل عددی ارائه شده قابلیت مناسبی در توصیف رفتار تجربی ورق در هنگام شکل‌دهی دارد.



شکل ۱۰) قالب فرایند خم‌کاری U شکل شامل سنبه و ماتریس به همراه مدل اجزای محدود

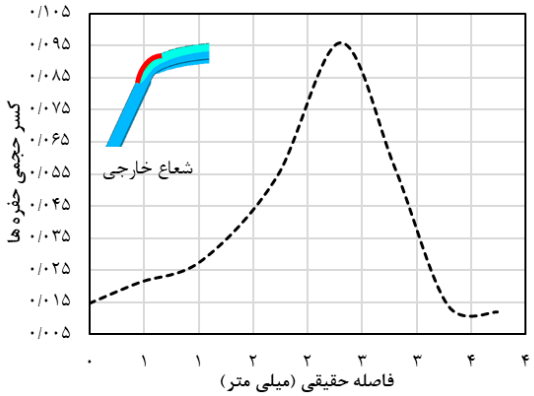


شکل ۱۱) منحنی نیرو-جابجایی تجربی و عددی فرآیند خم‌کاری U شکل

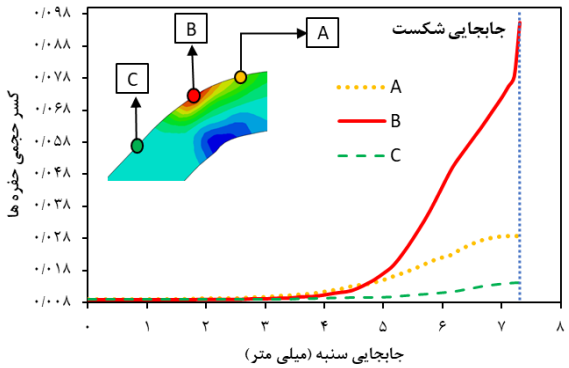
در مرحله بعد به‌منظور بررسی دقت مدل GTN توسعه‌یافته و اصلی کالیبره شده لحظه شکست در مدل شبیه‌سازی بررسی شد. همان‌طور که در بخش قبل عنوان شد، جابجایی تجربی تا لحظه شکست برابر با ۷/۵۱ میلی‌متر بوده است. همچنین جابجایی سنبه در لحظه‌ای که مقدار کسر حجمی حفره‌ها برابر با مقدار کسر حجمی حفرها در شکست بوده است با استفاده از مدل GTN توسعه‌یافته در حالت شبیه‌سازی برابر با ۷/۳۱۵ میلی‌متر محاسبه شد. درصورتی‌که معیار GTN اصلی قادر به پیش‌بینی شکست نبوده و در جابجایی شکست تجربی مقدار آسیب به میزان ٥٤/٢ درصد کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شکست می‌رسد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، نرخ رشد حجمی حفره‌ها در لایه بیرونی خم از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود استخراج شد. شکل ۰ نمودار توزیع آسیب در ناحیه بیرونی خم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در ناحیه بیرونی خم به علت وجود تنش‌های کششی و هیدرواستاتیک مثبت، آسیب در قسمت میانی شعاع بیرونی خم برابر با مقدار نهایی در لحظه شکست شده است، این موضوع با مشاهدات تجربی که در آن ترک از سطح بیرونی رشد می‌کند تطابق خوبی دارد. در شکل ۱۳ نحوه رشد کسر حجمی حفره‌ها بر مبنای معیار مذکور، در نواحی مختلف در لایه بیرونی خم نشان داده شده است. مطابق با نتایج، کسر حجمی المان‌های واقع بر لایه بیرونی خم افزایش یافته و پس از جابجایی سنبه به میزان ۷/۳۱۵ میلی‌متر، مقدار کسر حجمی در المان میانی به حد بحرانی در لحظه شکست خواهد رسید. در نتیجه شروع شکست در طول فرآیند خم‌کاری U شکل در ناحیه شعاع سنبه اتفاق می‌افتد و در ادامه فرایند شکل‌دهی توسعه می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار شکست آلومینیم آلیاژی ٦٠٦١-T٦ در آزمون‌های کشش (حالات تنش گوناگون) و تأثیر استفاده از معیار اولیه و توسعه‌یافته شکست GTN بر دقت تعیین لحظه شکست مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آزمون کشش تک‌محوری و کشش



شکل ۱۲) نمودار توزیع آسیب در ناحیه بیرونی خم



شکل ۱۳) رشد کسر حجمی حفره‌ها در نواحی مختلف در لایه بیرونی خم

برشی، دقت معیار در آزمون کشش کرنش صفحه‌ای نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین روند تغییرات حالت تنش و کرنش تا لحظه شکست در آزمون‌های مذکور، به کمک ترکیب روش‌های تجربی و شبیه‌سازی بررسی شد. در ادامه، معیار شکست GTN کالیبره شد. اهم نتایج به دست آمده به‌اختصار بیان می‌گردد:

در شرایطی که از آزمون کشش تک‌محوری و کشش برشی به‌منظور کالیبراسیون معیارها GTN توسعه‌یافته استفاده می‌شود، شکست

در آزمون کشش کرنش صفحه‌ای با درصد خطای مناسب پیش‌بینی می‌شود درحالی‌که با استفاده از معیار اصلی GTN خطا به ۲٤ درصد می‌رسد.

معیار اصلی GTN تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک‌محوری قادر به پیش‌بینی شکست در نمونه کشش برشی نمی‌باشد.

مقایسه جابجایی‌های شکست تجربی و پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد که شروع شکست در طول فرآیند خم‌کاری U شکل با دقت قابل قبولی با استفاده از مدل شکست GTN توسعه‌یافته قابل پیش‌بینی است.

با توجه به وجود تنش کششی در لایه بیرونی خم، تکامل آسیب در لایه بیرونی بیشتر از لایه داخلی بوده است. این منجر به شروع شکست از لایه بیرونی می‌شود. درحالی‌که سطح داخلی بدون آسیب باقی می‌ماند. این موضوع با مشاهدات تجربی که در آن ترک از سطح بیرونی رشد می‌کند تطابق خوبی دارد.

تغییرات دقت پیش‌بینی شکست ناشی از میزان وابستگی کرنش شکست به پارامتر سه محوری تنش، زاویه لود نرماله و میزان اختلاف حالت تنشِ فرایند نسبت به حالت تنش در آزمون کالیبراسیون است. به‌منظور کاهش خطا در پیش‌بینی شکست پیشنهاد می‌شود از آزمون‌های کشش با حالت‌های تنش متنوع برای کالیبراسیون معیار شکست استفاده شود. همچنین به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی در یافتن مقادیر بهینه ضرایب مجهول معیار شکست می‌تواند در افزایش دقت پیش‌بینی معیار مؤثر باشد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: مقاله حال حاضر هیچ‌گونه تعارض منافع‌ای با نویسندگان این مقاله یا اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

منابع مالی: منابع مالی این مقاله توسط نویسندگان تأمین گردیده است.

منابع

1- Sanford RJ. Principles of fracture mechanics. Pearson College Division; 2003.
2- Dieter, G.E. and D.J. Bacon, Mechanical metallurgy, McGraw-hill New Yor, Vol. 3, 1986.
3- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge university press; 2011.
4- Anderson TL. Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press; 2017.
5- Lemaitre, J., A continuous damage mechanics model for ductile fracture. Journal of engineering materials and technology, 1985. 107(1): p. 83-89.
6- Iraj, N.V., An Investigation on the limit drawing using GTN damage model in tube drawing process, in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad: Iran. p. 99, 2017.
7- Gatea S, Ou H, Lu B, McCartney G. Modelling of ductile fracture in single point incremental forming using a modified GTN model. Engineering Fracture Mechanics. 2017; 186:59-79.
8- Teng B, Wang W, Xu Y. Ductile fracture prediction in aluminium alloy 5A06 sheet forming based on GTN damage model. Engineering Fracture Mechanics. 2017; 186:242-54.
9- Thuillier S, Le Maoût N, Manach PY. Influence of ductile damage on the bending behaviour of aluminium alloy thin sheets. Materials & Design. 2011;32(4):2049-57.
10- Wu H, Xu W, Shan D, Jin BC. Mechanism of increasing spinnability by multi-pass spinning forming–analysis of damage evolution using a modified GTN model. International Journal of Mechanical Sciences. 2019; 159:1-9.
11- Gholipour H, Biglari FR, Nikbin K. Experimental and numerical investigation of ductile fracture using GTN damage model on in-situ tensile tests. International Journal of Mechanical Sciences. 2019; 164:105170.
12- Sun Q, Lu Y, Chen J. Identification of material parameters of a shear modified GTN damage model by small punch test. International Journal of Fracture. 2020;222(1):25-35.
13- Lou Y, Huh H. Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. International Journal of Solids and Structures. 2013;50(2):447-55.
14- Permeh, M., Prediction of Failure in High Temperature Using GTN Model and Finite Element Simulation in AA 5083 Sheets, in Manufacturing Engineering, Babol Noshirvani University of Technology: Iran, 2015.
15- Abbasi M, Bagheri B, Ketabchi M, Haghshenas DF. Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank. Computational Materials Science. 2012;53(1):368-76.
16- Bettaieb MB, Lemoine X, Duchêne L, Habraken AM. On the numerical integration of an advanced Gurson model. International journal for numerical methods in engineering. 2011;85(8):1049-72.
17- Cao TS, Bobadilla C, Montmitonnet P, Bouchard PO. A comparative study of three ductile damage approaches for fracture prediction in cold forming processes. Journal of Materials Processing Technology. 2015; 216:385-404.
18- Malcher L, Pires FA, De Sá JC. An extended GTN model for ductile fracture under high and low stress triaxiality. International Journal of Plasticity. 2014; 54:193-228.
19- Malcher L, Reis FJ, Pires FA, de Sá JC. Evaluation of shear mechanisms and influence of the calibration point on the numerical results of the GTN model. International Journal of Mechanical Sciences. 2013; 75:407-22.
20- Malcher L, Pires FA, De Sá JC. An assessment of isotropic constitutive models for ductile fracture under high and low stress triaxiality. International Journal of Plasticity. 2012; 30:81-115.
21- Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. Journal of Materials Processing Technology. 2017; 244:17-43.

22- Shen Y, Garnier J, Allais L, Crepin J, Ancelet O, Hiver JM. Experimental and numerical characterization of anisotropic damage evolution of forged Al6061-T6 alloy. Procedia Engineering. 2011; 10:3429-34.
23- Le Maoût N, Thuillier S, Manach PY. Aluminum alloy damage evolution for different strain paths–Application to hemming process. Engineering Fracture Mechanics. 2009;76(9):1202-14.
24- Talebi-Ghadikolaee H, Naeini HM, Mirnia MJ, Mirzai MA, Gorji H, Alexandrov S. Fracture analysis on U-bending of AA6061 aluminum alloy sheet using phenomenological ductile fracture criteria. Thin-Walled Structures. 2020; 148:106566.