

مطالعه تاثیر روش‌های کالیبراسیون بر دقت معیارهای شکست نرم پدیدار شناختی در فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی

حسین طالبی قادیکلایی^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*}، محمدجواد میرنیا^۳، محمدعلی میرزایی^۴، حمیدگرچی^۵ و سوسرگی الکساندروف^۵

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
^۳ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان
^۴ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
^۵ استادیار، مهندسی مکانیک، آکادمی علوم روسیه، مسکو

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳

چکیده

در این مقاله، تعیین لحظه شکست توسط معیارهای شکست نرم و تاثیر توابع وزنی آسیب، روش‌ها و آزمون‌های کالیبراسیون، بر دقت پیش‌بینی لحظه شکست مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های حالت تنش، سه آزمون کالیبراسیون کشش تک محوری، کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی به منظور تعیین مقادیر بحرانی معیارهای شکست به کار گرفته شدند. به منظور بررسی رفتار شکست در آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱، معیارهای شکست نرم پدیدارشناختی آيادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، از طریق روش ترکیبی تجربی-شبیه‌سازی کالیبره شدند. نرم‌افزار اجزای محدود اباکوس به منظور شبیه‌سازی فرایند استفاده شد و معیارهای شکست توسط زیربرنامه مناسب به بررسی‌های اجزای محدود اعمال شدند. مقادیر نیرو-جابجایی و طول کورس شکست در آزمون‌های تجربی، به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی و بررسی دقت معیارها مورد استفاده قرار گرفتند. مطابق با نتایج، روش کالیبراسیون بر مبنای تاریخچه حالت تنش در مقایسه با روش مقدار میانگین نتایج دقیق‌تری در پیش‌بینی لحظه شکست ارائه می‌نماید (۳/۴ درصد کاهش در میانگین خطای پیش‌بینی شکست). در میان تمامی حالات، معیار کوکرافت-لاتهام نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه-ای، مناسب‌ترین معیار و آزمون کالیبراسیون به منظور پیش‌بینی شکست در مقادیر مثبت پارامتر سه محوری تنش می‌باشند.

کلمات کلیدی: شکست؛ معیارهای شکست نرم پدیدارشناختی؛ آزمون‌های کالیبراسیون؛ پارامتر سه محوری تنش؛ آلومینیوم ۶۰۶۱

Study of the Effect of Calibration Procedure on the Accuracy of the Phenomenological Ductile Fracture Criteria in Sheet Metal Forming

H. Talebi-Ghadikolaei¹, H. Moslemi Naeini^{2,*}, M.J. Mirnia³, M.A. Mirzai⁴, H. Gorji³, S. Alexandrov⁵

¹Ph.D. St., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran. ²Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

³Assis. Prof., Mech. Eng., Babol Noshirvani Univ. of Tech., Babol, Iran. ⁴Assis. Prof., Mech. Eng., Hormozgan Univ., Hormozgan, Iran.

⁵Prof., Mech. Eng., Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract

In this paper, determination of the fracture onset by the ductile fracture criteria was studied and the effect of damage function, calibration method, and calibration tests were investigated on the fracture prediction accuracy. Based on the stress state analysis, three different tension tests including the uniaxial, plane strain, and notched tension tests were conducted to determine the critical value of the ductile fracture criteria. In order to investigate the fracture behavior of AA6061-T6 aluminum alloy sheets, The Ayada, Rice-Tracey, and normalized Cockcroft-Latham phenomenological ductile fracture criteria were calibrated through a hybrid experimental-numerical method. The finite element (FE) method were used to simulate the process and calibrated fracture criteria were implemented using an appropriate user subroutine. Experimental force-displacement curve and the fracture displacement were used to validate the numerical simulation and investigate the fracture prediction accuracy. According to the result, calibration method based on the history of the stress state lead to higher fracture prediction accuracy compared to average value method (3.4% decrease in average value of the fracture prediction error). Among all the possible condition, the normalized Cockcroft-Latham fracture criteria with the plane strain tension test are the most suitable fracture criterion and calibration test to predict the fracture in the positive value of the stress triaxiality.

Keywords: Fracture; Phenomenological Ductile Fracture Criteria; Calibration Tests; Stress Triaxiality; AA 6061.

۱- مقدمه

دو نوع ناپایداری^۱ در فرایندهای شکل‌دهی فلزات غالب می‌باشند: گلوئی^۲ و شکست نرم^۳. پدیده گلوئی شدن در حالت کشش^۴ روی می‌دهد، در حالی که شکست نرم نه تنها در حالت کشش، بلکه در بارگذاری‌های برشی و فشاری نیز اتفاق می‌افتد. در ورق‌های فلزی پدیده گلوئی تحت عنوان ناپایداری اصلی در شرایط کشش تک محوری تا کشش دو محوری مورد پذیرش قرار گرفته است [۱].

بسیاری از مدل‌های تحلیلی بر مبنای وقوع گلوئی [۲، ۳]، به منظور پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی، توسعه داده شده‌اند. حدود شکل‌دهی که با مدل‌های گلوئی شدن پیش‌بینی می‌شوند، در فضای کرنش‌های اصلی رسم شده و نمودارهای حد شکل‌دهی بر پایه گلوئی (NFLC^۵) نامیده می‌شوند. از آنجایی که کاهش ضخامت در بارگذاری-های برشی غیر قابل توجه بوده و همچنین، بدلیل وقوع ضخیم‌شدگی در بارگذاری فشاری، مدل‌های ارائه شده بر مبنای گلوئی شدن نمی‌توانند حدود شکل‌دهی را در شرایط برش و فشار تعیین نمایند.

از سوی دیگر، شکست نرم ناپایداری رایج‌تری نسبت به وقوع گلوئی در شکل‌دهی فولادهای استحکام بالا، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم است [۴]؛ زیرا این مواد بدون ایجاد کاهش ضخامت قابل توجه، به ناپایداری خواهند رسید و ناپایداری با حالت گلوئی جزئی را نمی‌توان به صورت منطقی با منحنی حد شکل‌دهی و یا سایر مدل‌هایی پیش‌بینی نمود که بر مبنای گلوئی می‌باشند.

با توجه به مطالب بیان شده، شکست نرم توجه ویژه‌ای را در بین محققان و مهندسان به خود جلب کرده است که ناشی از کاربرد روزافزون فولادهای استحکام بالا، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم (نسبت استحکام به وزن بالا) به منظور دستیابی به سطح بالایی از کاهش وزن و افزایش مقاومت به ضربه است. در این شرایط، معیارهای شکست نرم می‌توانند به عنوان ابزاری به منظور تعیین لحظه شکست در فرایند

شکل‌دهی فلزات مورد استفاده قرار گیرند [۵، ۶]. این معیارها شروع شکست در طول فرایند را بر مبنای ایجاد حفره‌ها در مناطق دارای عیب، رشد و به هم پیوستگی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌دهند. با توجه به اهمیت موضوع، معیارهای متفاوتی توسط محققان ارائه شده است. آنان، بر مبنای مشاهدات تجربی، پارامترهایی را به عنوان عوامل موثر بر میزان کرنش شکست در نظر گرفته و بر این اساس، معیارهای شکست نرم (معیارهای پدیدارشناختی) متفاوتی برای پیش‌بینی مکان هندسی شکست ارائه نمودند. در این میان، می‌توان به معیارهای رایس-تریسی [۷] آیدا [۸]، بروزو [۹]، اوپانه [۱۰] و کوکرافت-لاتهام [۱۱] اشاره نمود.

با توجه به قابلیت معیارهای شکست نرم در تعیین لحظه وقوع ناپایداری، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از معیارهای شکست نرم به منظور پیش‌بینی حد شکل‌دهی و شکست در طی تغییر شکل فلزات انجام شده است. تاکودا^۶ و همکاران [۱۲] با استفاده از معیار اوپانه حد شکل‌دهی آلومینیوم ۱۱۰۰ و ۵۱۸۲ را پیش‌بینی نمودند. آنان فرایند کشش با سنبه استوانه‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر را روی ورق مستطیلی با سوراخ مرکزی به قطر ۲۰ میلی‌متر انجام دادند. طول ورق را ۱۲۰ میلی‌متر و عرض آن را به منظور ایجاد نسبت کرنش متفاوت، از ۹۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر متغیر در نظر گرفتند. مطابق با نتایج آنان، پیش‌بینی حدود شکل‌دهی توسط معیار شکست نرم اوپانه، انطباق مناسبی با نتایج تجربی خواهد داشت.

ژان^۷ و همکاران [۱۳] معیارهای شکست نرم کوکرافت-لاتهام^۸ و لمایتره^۹ را به منظور پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی چرخشی^{۱۰} و خم‌کاری لوله مورد استفاده قرار دادند. با توجه به نتایج بدست آمده توسط این پژوهشگران، معیار شکست نرم لمایتره قابلیت پیش‌بینی شکست در فرایند خم‌کاری لوله و شکل‌دهی چرخشی را خواهد داشت؛ اما نتایج حاصل از معیار کوکرافت-لاتهام نشان می‌دهد که این معیار قابلیت پیش‌بینی دقیق لحظه وقوع شکست را نخواهد داشت.

⁶ Takuda

⁷ Zhan

⁸ Cockroft-Latham

⁹ Lemaitre

¹⁰ Spinning

¹ Failure

² Necking

³ Ductile Fracture

⁴ Tension

⁵ Necking Forming Limit Curve

ناهمسانگرد در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ به خوبی توسط معیار توسعه داده شده، قابل پیش‌بینی است.

علاوه بر پژوهش‌هایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است، فرایند کالیبراسیون معیار می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر دقت معیارهای شکست باشد که در پژوهش‌های پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به تغییرات حالت تنش در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، لازم است تا عملکرد معیارها پس از کالیبراسیون، در مسیرهای بارگذاری متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، در این مقاله، رفتار شکست آلومینیوم آلیاژی 6061-T6 مورد بررسی قرار گرفته است. سه معیار شکست نرم به همراه آزمون‌های کالیبراسیون کشش تک محوری، کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی، به منظور تعیین رفتار شکست مورد استفاده قرار گرفتند. کالیبراسیون معیارها تحت روش‌ها و آزمون‌های مختلف انجام شده و مقادیر بحرانی آسیب بر مبنای آزمون‌های کالیبراسیون تعیین شدند. هدف این مقاله تعیین مناسب‌ترین (دقیق‌ترین) معیار، روش و آزمون کالیبراسیون به منظور پیش‌بینی شکست در حالات تنش مختلف است. بدین منظور، پس از اتمام فرایند کالیبراسیون، دقت معیارها در پیش‌بینی شکست در مسیرهای بارگذاری متفاوت، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. همچنین، به کمک بررسی تغییرات حالت تنش، علل تاثیر معیارها و آزمون‌های کالیبراسیون بر دقت پیش‌بینی شکست مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- حالت تنش

بیان مقادیر تنش در یک نقطه از ماده با استفاده از روش‌هایی همچون تانسور تنش و یا مقادیر تنش‌های اصلی امکان پذیر است. در پلاستیسیته و مباحث مرتبط با مکانیک شکست نرم، به کارگیری نسبت‌های بی بعد^۷ از نامتغیرهای تنش^۸ بسیار رایج است. در این میان می‌توان به پارامتر سه محوری تنش^۹ و زاویه لود نرماله^{۱۰} اشاره نمود. $\bar{\sigma}$ ، η ، θ و $\bar{\theta}$ به ترتیب

هاشمی و همکاران [۱۴] منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی در فرایند هیدروفرمینگ گرم را با استفاده از معیارهای شکست نرم اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند. آنان به منظور در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش در فرایند کالیبراسیون معیارهای شکست و محاسبه ثابت‌های معیار، آزمایش‌های کشش تک محوری در راستای طولی را تحت دما و نرخ کرنش‌های مختلف انجام دادند. با توجه به نتایج بدست آمده، معیار شکست اصلاح شده آیادا به خوبی محل و زمان ترکیدگی قطعه مربعی را در دماهای مختلف پیش‌بینی می‌کند.

میرنیا و همکاران [۱۵] پدیده شکست را در فرایند شکل‌دهی تدریجی^۱ مورد بررسی قرار دادند. آنان از معیار مور-کلمب اصلاح شده^۲ به منظور تعیین لحظه شکست در شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده نمودند. طبق نتایج آنان، بارگذاری غیرخطی بر فرایند شکل‌دهی تدریجی حاکم است؛ لذا، تابع انباشت آسیب غیرخطی را به منظور پیش‌بینی شکست به کار گرفتند. مقایسه نتایج بیانگر اختلاف ۱۰ درصدی بین نتایج تجربی و مدل اصلاح شده است. لیناردون^۳ و همکاران [۱۶]، به بررسی قابلیت کشش لوله‌هایی از جنس آلیاژ کرم-کبالت با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداختند. از میان معیارهای مورد بررسی، معیار کوکرافت-لاتهام بهترین نتایج را در مقایسه با مشاهدات تجربی ارائه نمود. همچنین وو^۴ و همکاران [۱۷]، پدیده پارگی در فرایند سوراخ‌کاری ورق با سیال^۵ را با معیارهای شکست نرم مورد بررسی قرار دادند. مطابق با گزارشات آنان، نتایج حاصل از معیار شکست رایس-تریسی، انطباق بیشتری با نتایج تجربی خواهد داشت. لو^۶ و همکاران [۱۸] رفتار شکست ناهمسانگرد را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنان، علاوه بر اهمیت ناهمسانگردی در مدل‌سازی تغییر شکل مومسان، این پارامتر در توصیف رفتار شکست نیز، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد؛ لذا، با اصلاح تابع وزنی آسیب، معیار شکست نرم را به صورت ناهمسانگرد توسعه دادند. طبق نتایج، شکست

¹ Incremental forming

² Modified Mohr-Coulomb

³ Linardona

⁴ Wua

⁵ Hydropiercing

⁶ Lou

⁷ Dimensionless

⁸ Stress invariant

⁹ Stress triaxiality

¹⁰ Normalized Lode angle parameters (NLAP)

$$\frac{D}{D_{crit}} \geq 1 \quad (۶)$$

میزان آسیب بحرانی شکست (D_{crit}) برای هر معیار از طریق آزمون‌های کالیبراسیون بدست می‌آید. معیارهای شکست نرم مختلفی بر مبنای مشاهدات تجربی (معیارهای پدیدارشناختی) به منظور پیش‌بینی شکست بر اساس متغیرهایی همچون تنش موثر، تنش هیدرواستاتیک، کرنش مومسان معادل و بیشینه تنش اصلی، ارائه شده است. معیارهای پدیدارشناختی آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله به منظور تعیین وقوع شکست در این پژوهش، مورد استفاده قرار گرفتند. روابط تعیین آسیب بر مبنای معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، به ترتیب در معادلات ۷ تا ۹ نشان داده شده است.

$$D_1 = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}_p \quad (۷)$$

$$D_2 = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \exp\left(\frac{1.5 \sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon}_p \quad (۸)$$

$$D_3 = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \left(\frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon}_p \quad (۹)$$

در معادلات فوق، D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب برابر با مقدار بحرانی آسیب بر اساس معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله می‌باشند؛ همچنین، σ_m و $\bar{\sigma}$ به ترتیب تنش هیدرواستاتیک، تنش معادل و میزز و کرنش مومسان معادل می‌باشند.

۴- تعیین خواص مکانیکی

ورق آلومینیوم آلیاژی 6061-T6 با ضخامت ۲ میلی‌متر در آزمون‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. تعیین خواص مکانیکی یکی از بخش‌های مهم و تاثیرگذار در مدل‌سازی فرایند و کالیبراسیون معیارها است. به همین منظور، از نتایج آزمون کشش تک محوری^۳ برای تعیین ویژگی‌های مورد نیاز ورق استفاده شده است. نمونه‌های آزمون کشش تک محوری توسط دستگاه برش سیمی تهیه شدند. نمونه آزمون کشش تک محوری و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

تنش معادل و میزز^۱، پارامتر سه محوری تنش، زاویه لود^۲ و زاویه لود نرماله می‌باشند که بر اساس نامتغیرهای تنش طبق معادلات ۱ تا ۴ تعریف می‌شوند [۱].

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2} \quad (۱)$$

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (۲)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (۳)$$

$$\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} \quad (۴)$$

در معادلات مذکور، σ_m برابر با تنش هیدرواستاتیک و پارامترهای J_2 و J_3 به ترتیب نامتغیرهای دوم و سوم ماتریس تنش‌های انحرافی می‌باشند. در این مقاله، از پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله به منظور تعیین حالت تنش استفاده خواهد شد.

۳- معیارهای شکست نرم

معیارهای شکست نرم پدیده شکست را بر حسب متغیرهای مکانیکی مانند، تنش، کرنش و کار مکانیکی، توصیف می‌کنند. مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش بر اساس توابعی است که به این متغیرها بستگی دارند.

این معیارها قابلیت پیش‌بینی شکست را در زمانی خواهند داشت که مقدار توابع آسیب به مقدار بحرانی برسد. به منظور پیش‌بینی لحظه شکست، تاریخچه مقادیر تنش و کرنش توسط معیارهای شکست در نظر گرفته می‌شود. صورت کلی معادلات آسیب در معادله ۵ نشان داده شده است [۱۶]:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_p} f(\sigma) d\bar{\epsilon}_p \quad (۵)$$

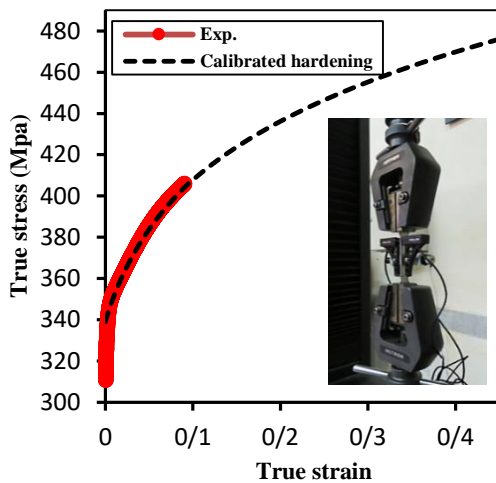
تابع وزنی $f(\sigma)$ تعیین کننده نحوه ارتباط غیرخطی کرنش مومسان معادل ($\bar{\epsilon}_p$) با میزان آسیب (D) در طول فرایند است. اگر مقدار آسیب (معادله ۵) بیشتر از مقدار بحرانی گردد، نشان دهنده وقوع شکست در طول فرایند است. این موضوع در معادله ۶ نشان داده شده است.

^۱ Von mises

^۲ Lode angle

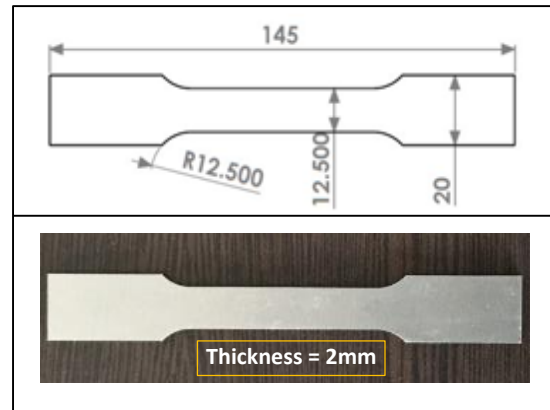
^۳ Uniaxial Tension

k , ε_0 , $\bar{\varepsilon}_p$, $\bar{\varepsilon}_{necking}^p$, n , $\bar{\sigma}_{UTS}$ به ترتیب برابر با ضریب استحکام، کرنش اولیه، کرنش مومسان، کرنش گلوبی، نمای کرنش سختی و استحکام نهایی می‌باشند. سه پارامتر k ، ε_0 و n از طریق انطباق مقادیر تنش-کرنش حاصل از معادله سوئیفت بر داده‌های تجربی تا لحظه گلوبی، محاسبه شدند. پارامتر سخت شون‌دگی فراگلوبی^۵ (Q) از طریق روش معکوس به کمک شبیه‌سازی‌های تکرار شونده به نحوی انتخاب شد که انطباق منحنی نیرو-جابجایی تجربی (آزمون کشش تک محوری در راستای نورد) و شبیه‌سازی، در محدوده فراتر از لحظه گلوبی تا حد امکان افزایش یابد. شکل ۲ نشان‌دهنده دستگاه آزمون کشش، منحنی تجربی تنش-کرنش حقیقی تا لحظه گلوبی و منحنی تنش-کرنش به کمک معادله کارسختی است.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش ورق AA6061-T6 در راستای نورد

به منظور در نظر گرفتن رفتار مومسان ناهمسانگرد، نمونه‌های کشش در جهت نورد، قطری و عمود بر جهت نورد (صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) تهیه شدند. ضرایب لنگفورد (r_{45} , r_{90}) به کمک انجام آزمون کشش تا قبل از گلوبی و محاسبه کرنش طولی و عرضی، تعیین شدند. مقادیر تعیین شده برای پارامترهای موجود در معادله ۱۰، ضرایب لنگفورد، مدول یانگ و تنش تسلیم در جدول ۱ نشان‌داده شده است.



شکل ۱- نمونه آزمون کشش تک محوری

پس از آماده‌سازی نمونه‌ی آزمون، فرایند کشش تا لحظه جدایش توسط دستگاه کشش اینسترون^۱ انجام گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به انجام آزمایشات شکل‌دهی در دمای محیط، نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی و شکست تاثیر نداشته و سرعت کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه برای انجام آزمون کشش تک محوری در نظر گرفته شده است تا طبیعت شبه‌استاتیک مسئله حفظ شود. تغییر طول نمونه تا لحظه شکست، توسط اکستنسومتر^۲ یا کشش سنج با محدوده اندازه‌گیری^۳ ۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مطابق با نتایج حاصل از آزمون تجربی کشش تک محوری در راستای نورد، مقادیر تنش-کرنش حقیقی محاسبه شده است. مشابه با دیدگاه به کارگرفته شده توسط موهر و مارکادت^۴ [۱۹]، رفتار ماده تا لحظه گلوبی و بعد از آن توسط معادله ۱۰ تعیین شد. در معادله ۱۰ که به نام معادله کار سختی مشهور است، رفتار ماده تا لحظه گلوبی توسط معادله سوئیفت تعریف شده و در محدوده فراتر از گلوبی ضریب اصلاح Q در معادله در نظر گرفته شد.

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n & \bar{\varepsilon}_p \leq \bar{\varepsilon}_{necking}^p \\ Q[K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}_p)^n] + (1 - Q)[\bar{\sigma}_{UTS}] & \bar{\varepsilon}_p > \bar{\varepsilon}_{necking}^p \end{cases} \quad (10)$$

¹ INSTRON

² Extensometer

³ Gage length

⁴ Mohr and Marcadet

⁵ Post-Necking Hardening Parameter

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق AA6061-T6

مقادیر	واحد	پارامترها
۷۲/۰۱	GPa	مدول یانگ (E)
۳۳۵/۵	MPa	تنش تسلیم (σ_y)
۵۲۸/۳	MPa	ضریب استحکام (K)
۰/۱۲۷	-	نمای کرنش سختی (n)
۰/۰۳	-	ϵ_0
۰/۹۶	-	Q
۰/۰۹۵	-	$\bar{\epsilon}_{necking}^p$
۰/۵۷	-	r_0
۰/۸۶	-	r_{45}
۰/۷۸	-	r_{90}

شدند که حالت تنش مطلوب در طول فرایند ایجاد شود [۱۵]؛ همچنین، سرعت آزمون‌های تجربی کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی برابر با ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری جابجایی تا لحظه شکست^۳، از اکستنسومتر^۴ یا کشش سنج با محدوده اندازه‌گیری^۵ ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی، طول کورس شکست در آزمون‌های کشش تک محوری، کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی، به ترتیب برابر با ۷/۰۶، ۱/۰۳، ۱/۲۱ میلی‌متر است.

در ادامه، به منظور بررسی و تعیین حالت تنش و تاریخچه مقادیر پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله در آزمون‌های مورد نظر، مدل‌سازی اجزای محدود هر یک از آزمون‌ها به کمک نرم‌افزار آباکوس با روش حل صریح^۶ انجام گرفت. آزمون‌ها بدون در نظر گرفتن تقارن هندسی و به صورت کامل مدل شدند. تقسیم بندی هندسه‌ی مدل اجزای محدود با استفاده از المان‌های C3D8R (۸ گره‌ای مکعبی، سه بعدی و دارای فرمول‌بندی کاهش یافته^۷) انجام گرفت. المان‌هایی با ابعاد ۰/۵ میلی‌متر در نواحی مرکزی و المان‌هایی با ابعاد بزرگتر در نواحی دور از مرکز برای شبکه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند؛ همچنین، ۴ المان برای شبکه‌بندی ورق در راستای ضخامت در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌ها بر اساس آنالیز حساسیت مش تعیین شد. همچنین، مشابه با پژوهش بسن [۲۰]، به منظور از بین بردن تأثیرات احتمالی عدم همگرایی مش، ابعاد المان‌ها در تمامی آزمون‌ها (در ناحیه تغییر شکل) یکسان در نظر گرفته شد. به خواص مکانیکی ورق مطابق با موارد ذکر شده در جدول ۱، به نرم‌افزار اعمال شدند. معیار تسلیم هیل^۸ ۴۸ به منظور در نظر گرفتن ناهمسانگردی مومسان مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب ناهمسانگردی تنش مطابق با توضیحات باقرزاده و همکاران [۲۱]، بر مبنای ضرایب لنگفورده محاسبه شده و در شبیه‌سازی اجزای محدود در نظر گرفته شدند. نرخ بارگذاری

۵- کالیبراسیون معیارهای شکست نرم

در این مقاله، از روش ترکیبی تجربی-شبیه‌سازی به منظور کالیبراسیون معیارهای شکست نرم استفاده شد. در ابتدا، به منظور تعیین طول کورس تجربی شکست، آزمون‌های طراحی شده به صورت تجربی انجام شدند. سپس، مقادیر کرنش معادل، پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله تا لحظه شکست، از شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون‌های کشش استخراج شدند. در نهایت، به کمک اطلاعات بدست‌آمده و با توجه به تابع انتگرالی آسیب در معیارهای شکست نرم، ثابت‌های بحرانی معیارهای شکست تعیین می‌شوند.

بر این اساس، به منظور بررسی رفتار شکست در حالت تنش‌های مختلف، آزمون‌های کشش تک محوری (شکل ۱)، کشش کرنش صفحه‌ای^۱ و کشش نمونه دارای تورفتگی^۲، در نظر گرفته شدند. نمونه‌های آزمون تجربی کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی و ابعاد آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌ها به نحوی انتخاب

³ Fracture displacement

⁴ Extensometer

⁵ Gage length

⁶ ABAQUS/Explicit

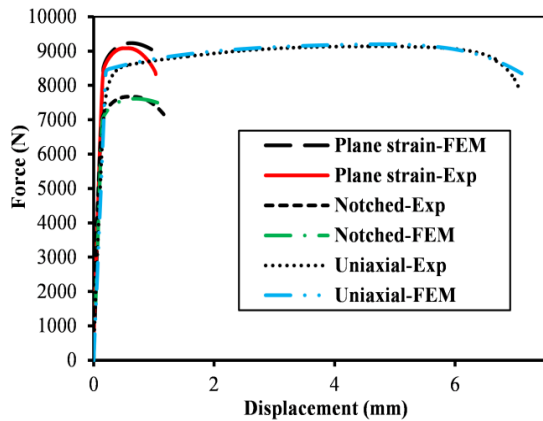
⁷ Reduced integration

⁸ Hill

¹ Plane strain tension

² Notched Tension

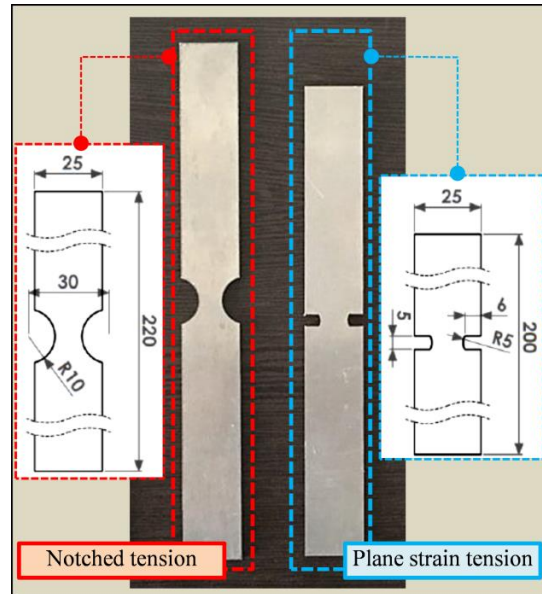
نتایج شبیه‌سازی محاسبه شدند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی اجزای محدود تا طول کورس شکست (محاسبه شده از آزمون تجربی) انجام شد. مدل المان محدود آزمون‌های کالیبراسیون و موقعیت المان بحرانی در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین مقدار کرنش مومسان معادل در آزمون‌ها، در قسمت میانی ضخامت ورق است.



شکل ۴- منحنی نیرو جابجایی آزمون‌های کالیبراسیون

نتایج حالت تنش در المان بحرانی آزمون‌های کشش به ازای مقادیر کرنش مومسان معادل تا لحظه شکست (کرنش شکست)، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج ارائه شده در شکل ۶ پیداست، مقادیر پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله در طول فرایند کشش تغییراتی را خواهند داشت. بر این اساس، کالیبراسیون معیارها بر مبنای دو دیدگاه انجام گرفت؛ در دیدگاه اول (روش مقدار میانگین)، مقادیر میانگین پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله به منظور کالیبراسیون معیارها مورد استفاده قرار گرفتند. در دیدگاه دوم (روش تاریخچه حالت تنش)، مقادیر آسیب بحرانی بر مبنای معیارهای مختلف، با در نظر گرفتن تغییرات حالت تنش در طول فرایند تعیین شدند. پیش از در نظر گرفتن اثر آزمون‌های کالیبراسیون، تاثیر روش مقدار میانگین و روش تاریخچه حالت تنش بر دقت معیارها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور، معیارهای شکست نرم بر مبنای آزمون کشش تک محوری کالیبره شدند. در ابتدا، کالیبراسیون معیارها به کمک روش مقدار میانگین مورد ارزیابی قرار گرفت. در دیدگاه اول، تعیین

به نحوی تعیین شد که نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در طول فرایند کمتر از ۱ درصد باشد تا طبیعت شبه استاتیکی مسئله حفظ شود؛ همچنین، لحظه افت ناگهانی نیرو در منحنی تجربی نیرو-جابجایی (طول کورس شکست تجربی)، به عنوان شروع شکست در شبیه‌سازی اجزای محدود در نظر گرفته شد.



شکل ۳- نمونه‌های تجربی آزمون کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی

منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود، به منظور ارزیابی صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر انطباق مناسب بین منحنی‌های حاصل از آزمون‌های تجربی و بررسی‌های عددی می‌باشند. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی در شکل ۴ نشان داده شده است.

تکمیل فرایند کالیبراسیون، نیازمند تعیین حالت تنش در هر یک از آزمون‌ها است. بدین منظور، متغیرهایی همچون η و $\bar{\theta}$ که توسط معادلات ۱ تا ۴ محاسبه می‌شوند، از طریق زیربرنامه VUSDFLD به نرم افزار اجزای محدود معرفی شدند. پس از اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقادیر پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله در المان بحرانی (المانی با بیشترین کرنش مومسان معادل) به کمک

شکست می‌باشند. مقادیر میانگین پارامتر سه محوری تنش، میانگین زاویه لود نرماله و کرنش معادل شکست برای آزمون‌های کشش تک محوری، کشش کرنش صفحه‌ای، کشش نمونه دارای تورفتگی در جدول ۲ نشان داده شده است.

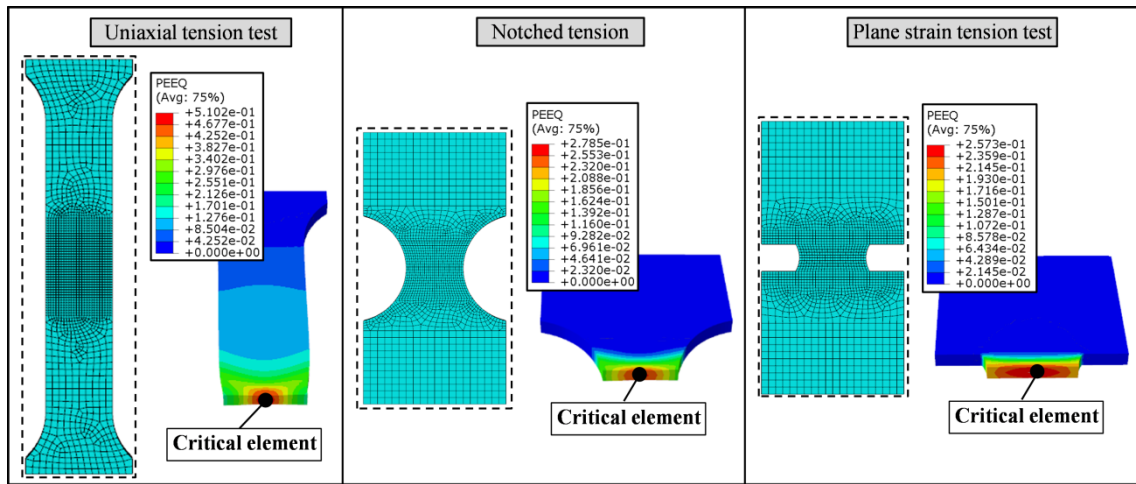
سپس، به کمک معادلات ۷ تا ۹ و مقادیر ارائه شده در جدول ۲، مقادیر بحرانی آسیب در معیارهای آیداد، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است.

مقدار بحرانی آسیب بر اساس مقادیر میانگین پارامتر سه محوری تنش (η_{ave}) و زاویه لود نرماله ($\bar{\theta}_{ave}$) انجام خواهد شد. مقادیر میانگین حالت تنش با استفاده از معادلات ۱۱ و ۱۲ و بر مبنای نتایج شکل ۶ محاسبه شدند.

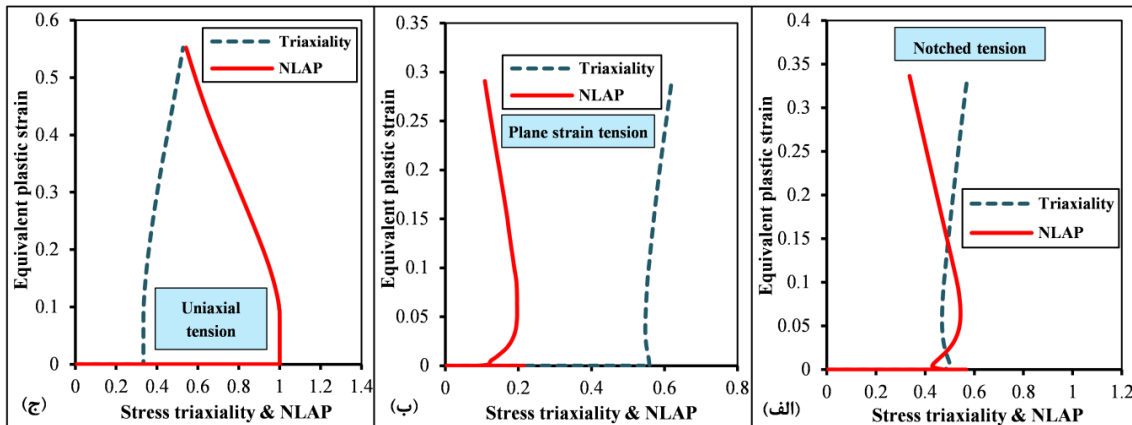
$$\eta_{ave} = \frac{1}{\bar{\epsilon}_p^u} \int_0^{\bar{\epsilon}_p^u} \eta(\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_p \quad (11)$$

$$\bar{\theta}_{ave} = \frac{1}{\bar{\epsilon}_p^u} \int_0^{\bar{\epsilon}_p^u} \bar{\theta}(\bar{\epsilon}_p) d\bar{\epsilon}_p \quad (12)$$

$\bar{\epsilon}_p^u$ و $\bar{\epsilon}_p$ در معادلات ۱۱ و ۱۲، به ترتیب برابر با کرنش مومسان معادل و بیشینه کرنش مومسان معادل پیش از



شکل ۵- مدل المان محدود آزمون‌های کالیبراسیون به همراه موقعیت المان بحرانی



شکل ۶- حالت تنش در آزمون‌های کالیبراسیون؛ (الف) کشش تک محوری، (ب) کشش کرنش صفحه‌ای و (ج) کشش نمونه دارای تورفتگی

جدول ۴- معیارهای آسیب بر مبنای پارامتر سه

محوری تنش و زاویه لود نرماله	
معیار	تابع آسیب
آیادا	$\int_0^{\bar{\epsilon}_p} \eta d\bar{\epsilon}_p$
رایس-تریسی	$\int_0^{\bar{\epsilon}_p} \exp(1.5 \eta) d\bar{\epsilon}_p$
کوکرافت-لاتهام نرماله	$\int_0^{\bar{\epsilon}_p} \left(\eta + \frac{2(\cos(\frac{\pi}{6}(1-\bar{\theta})))}{3} \right) d\bar{\epsilon}_p$

بیشینه‌ی مقدار آسیب در لحظه شکست (لحظه‌ای که میزان جابجایی در شبیه‌سازی با میزان جابجایی در لحظه شکست در آزمون تجربی برابر است) تعیین کننده مقدار بحرانی آسیب در معیار شکست نرم است. به عنوان نمونه، در شکل ۷ روند تجمیع آسیب و مقدار بحرانی آسیب در معیار شکست نرم آیادا بر اساس آزمون کشش تک محوری نشان داده شده است. بر این اساس، مقدار بحرانی آسیب در معیار شکست نرم آیادا بر مبنای آزمون کشش تک محوری برابر با ۰/۱۹۹ است. آسیب بحرانی در سایر معیارها نیز به شیوه مذکور و بر مبنای کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. در ادامه، به منظور بررسی تاثیر روش کالیبراسیون بر دقت پیش‌بینی شکست، معیارهای کالیبره شده تحت آزمون کشش تک محوری برای پیش‌بینی شکست در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی به کار گرفته شدند. در لحظه‌ای که مقدار آسیب برابر با حد بحرانی گردد، میزان جابجایی به عنوان طول کورس شکست در نظر گرفته خواهد شد.

بر این اساس، طول کورس شکست در آزمون‌های کشش نمونه دارای تورفتگی و کشش کرنش صفحه‌ای، توسط معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت لاتهام نرماله، محاسبه شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. به منظور بررسی کمی اثر روش کالیبراسیون بر دقت معیارهای شکست، میزان خطای پیش‌بینی شکست به کمک رابطه ۱۳ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خطای معیارها از طریق مقایسه طول کورس شکست در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود، محاسبه شد.

جدول ۲- مقادیر حالت تنش در آزمون‌های کشش

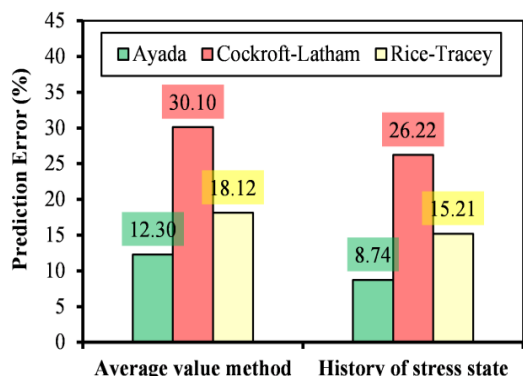
آزمون کشش	$\bar{\theta}_{ave}$	η_{ave}	$\bar{\epsilon}_p^u$
کشش تک محوری	۰/۸۲۴	۰/۳۹۹	۰/۵۳۲
کشش کرنش صفحه‌ای	۰/۱۵۱	۰/۵۸۳	۰/۲۹۴
کشش نمونه دارای تورفتگی	۰/۴۴۱	۰/۵۱۷	۰/۳۳۵

جدول ۳- کالیبراسیون معیارهای شکست نرم تحت

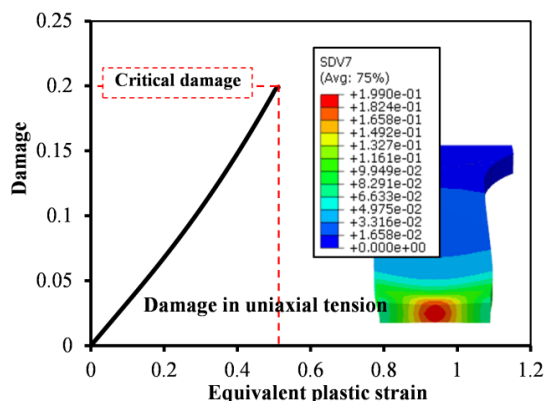
آزمون کشش تک محوری

روش کالیبراسیون		مقدار بحرانی آسیب
مقدار میانگین	تاریخچه حالت تنش	
۰/۲۱۲	۰/۱۹۹	آیادا (D_1)
۰/۹۶۸	۰/۹۱۷	رایس-تریسی (D_2)
۰/۵۶۶	۰/۵۳۵	کوکرافت-لاتهام نرماله (D_3)

در گام بعد، فرایند کالیبراسیون معیارها به کمک روش تاریخچه حالت تنش انجام گرفت. بدین منظور، معادلات ۷ تا ۹ در زیربرنامه VUSDFLD تعریف شده و از طریق تعیین پارامتر سه محوری تنش، زاویه لود نرماله، کرنش مومسان در هر بازه‌ی زمانی و بازنویسی معیارها بر مبنای پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله، مقدار متغیر آسیب در طول فرایند محاسبه می‌شود. در واقع، زیر برنامه مذکور برای تعریف توابع و متغیرهای جدید که بر مبنای خروجی‌های تحلیل اجزای محدود محاسبه می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس، در ابتدا اطلاعات مورد نیاز (تنش-کرنش) از المان‌ها فراخوانی شده و توابع آسیب هر یک از معیارهای شکست نرم آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله بر مبنای پارامتر سه محوری تنش و زاویه لود نرماله (روابط ارائه شده در جدول ۴)، به صورت یک متغیر تعریف می‌شوند. هر متغیر بر مبنای اطلاعات فراخوانی شده و نوع تابع آسیب، محاسبه شده و تغییرات آن در طول فرایند به عنوان مقدار آسیب در آزمون‌های کشش در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- تاثیر روش‌های کالیبراسیون بر دقت پیش‌بینی شکست توسط معیارهای شکست نرم



شکل ۷- کالیبراسیون معیار آیادا بر مبنای آزمون کشش محوری

کالیبراسیون معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، به طور متوسط موجب ۳/۴ درصد افزایش در خطای پیش‌بینی شکست می‌شود.

بنابراین، در ادامه، از روش کالیبراسیون تاریخچه حالت تنش به منظور بررسی اثر آزمون‌های کالیبراسیون و تعیین مقادیر بحرانی بر مبنای آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی، استفاده خواهد شد.

۶- بررسی اثر آزمون‌های کالیبراسیون

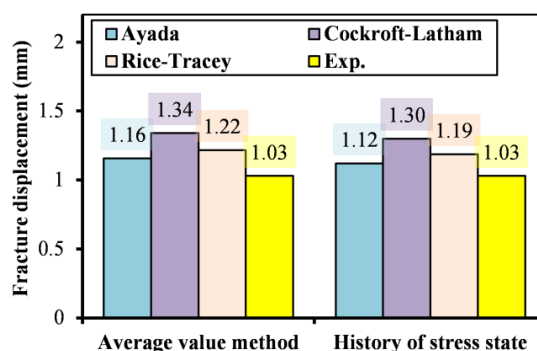
مطابق با روند اشاره شده در بخش ۴، مقادیر بحرانی آسیب در معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، به کمک آزمون‌های کشش نمونه دارای تورفتگی و کشش کرنش صفحه‌ای و بر مبنای روش تاریخچه حالت تنش، تعیین شده و به همراه مقادیر آسیب بر مبنای آزمون کشش تک محوری، در جدول ۵ نشان داده شده است.

بر اساس مقادیر بحرانی آسیب بر مبنای آزمون‌های کالیبراسیون (جدول ۵) و توابع آسیب معیارهای شکست (معادلات ۷ تا ۹)، منحنی شکست برای معیارها و روش‌های مختلف کالیبراسیون، با فرض حالت تنش صفحه‌ای تعیین شد (شکل ۱۰). همانطور که از نتایج پیداست، تغییرات تابع وزنی (معیار) و آزمون کالیبراسیون موجب تغییر منحنی شکست (کرنش شکست به ازای مقادیر مختلف پارامتر سه محوری تنش) می‌گردد. مطابق با نتایج ارائه شده، یکی از محدودیت‌های معیار آیادا در محدوده منفی پارامتر سه محوری تنش است. به ازای

$$e = \left(\frac{d_p - d_e}{d_e} \right) \times 100 \quad (13)$$

پارامترهای d_p و d_e در معادله (۱۳)، به ترتیب بیانگر طول کورس شکست در آزمون‌های تجربی، طول کورس شکست در شبیه‌سازی اجزای محدود و مقدار خطا در پیش‌بینی شکست می‌باشند. مقادیر خطای پیش‌بینی شکست توسط معیارهای شکست نرم تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری بر مبنای روش‌های مقدار میانگین و تاریخچه حالت تنش، در شکل ۹ نشان داده شده است.

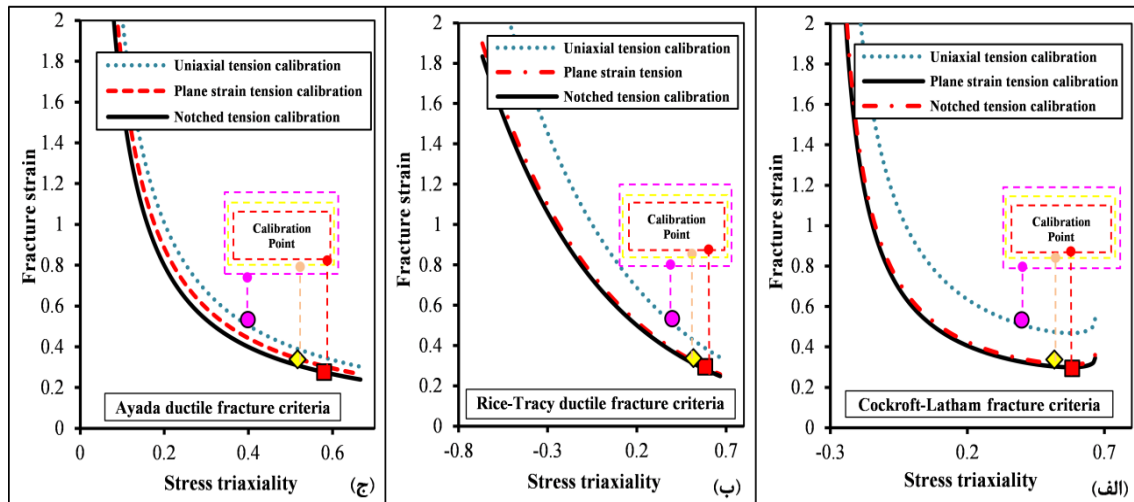
طبق نتایج بدست‌آمده، تغییرات حالت تنش در طی آزمون‌های کالیبراسیون تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر دقت معیارهای شکست خواهند داشت. مطابق با نتایج، استفاده از روش مقدار میانگین (فرض بارگذاری یکنواخت) در



شکل ۸- طول کورس شکست بر مبنای روش‌های کالیبراسیون مقدار میانگین و تاریخچه حالت تنش

جدول ۵- مقادیر بحرانی آسیب

معیار شکست	پارامتر آسیب	کشش تک محوری	کشش نمونه دارای تورفتگی	کشش کرنش صفحه‌ای
آیادا	D_1	۰/۱۹۹	۰/۱۶۰	۰/۱۶۹
رایس-تریسی	D_2	۰/۹۱۷	۰/۶۷۵	۰/۶۹۵
کوکرافت-لاتهام نرماله	D_3	۰/۵۳۵	۰/۳۶۲	۰/۳۴۵



شکل ۱۰- سطح شکست بر مبنای معیارها و آزمون‌های کالیبراسیون الف) کوکرافت-لاتهام نرماله، ب) رایس-تریسی و ج) آیادا

دارای تورفتگی نسبت به آزمون کشش کرنش صفحه‌ای، تغییر آزمون کالیبراسیون از کشش نمونه دارای تورفتگی به کشش کرنش صفحه‌ای در معیارهایی که وابسته به پارامتر سه محوری تنش می‌باشند (آیادا و رایس-تریسی)، موجب کاهش مقدار بحرانی آسیب می‌شود. مطابق با نتایج، تغییرات معیار و آزمون کالیبراسیون دارای تاثیر قابل توجهی بر منحنی شکست می‌باشند. تغییرات حد شکست نقش تعیین کننده‌ای در دقت معیارها خواهند داشت که در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت.

به منظور ارزیابی اثر معیارها و روش‌های کالیبراسیون بر دقت معیارها، طول کورس شکست در حالات مختلف محاسبه شده و با مقادیر تجربی مقایسه شدند. مطابق با نتایج بدست آمده، طول کورس شکست بر مبنای معیار آیادا و تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری، فراتر از مقدار تجربی تخمین زده خواهد شد؛ همچنین، سایر

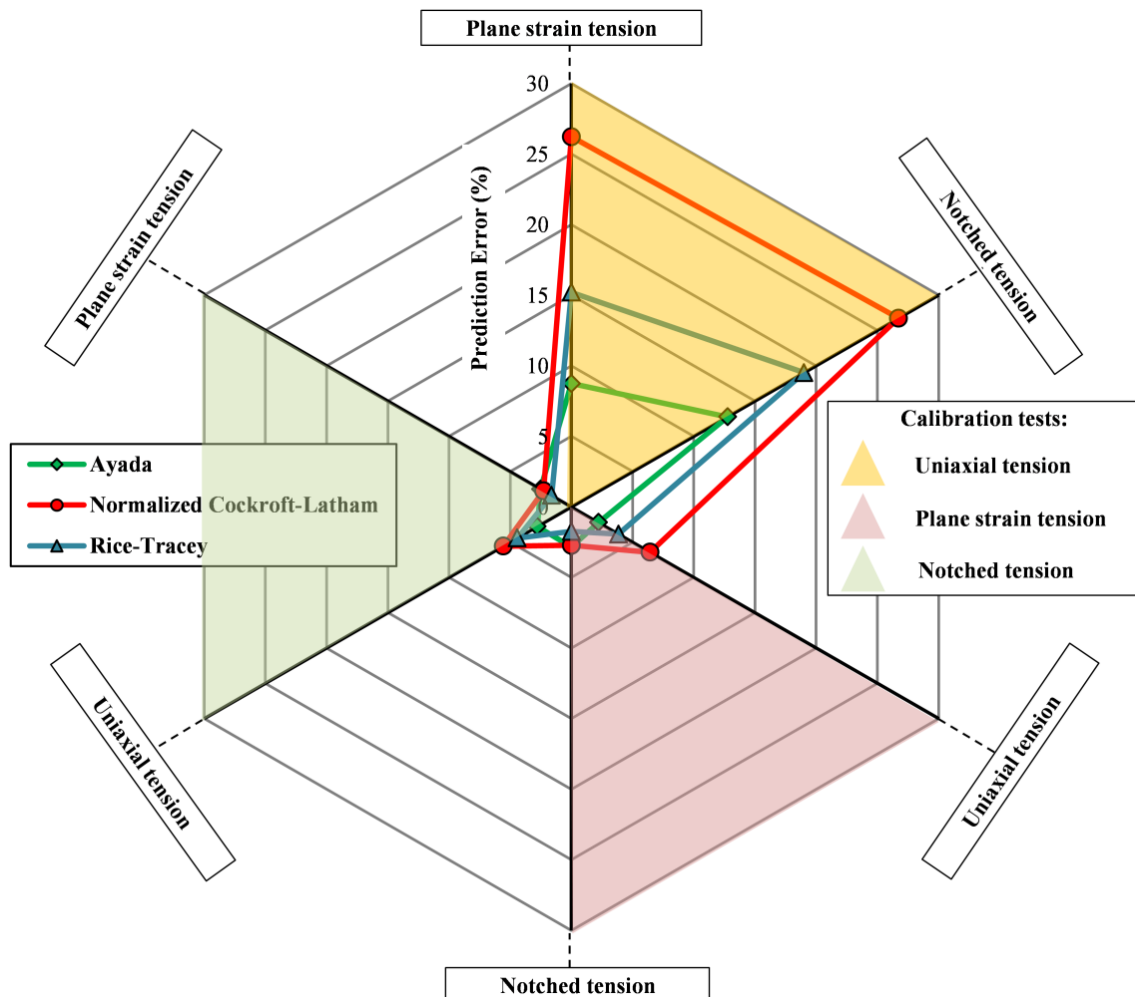
مقادیر منفی پارامتر سه محوری تنش، هیچگاه تساوی موجود در معادله ۷ برقرار نمی‌شود؛ لذا، قابلیت پیش‌بینی کرنش شکست در این محدوده توسط معیار آیادا امکان پذیر نمی‌باشد؛ همچنین، با توجه به تابع آسیب در این معیار (حاصل ضرب پارامتر سه محوری تنش در کرنش مومسان معادل)، با افزایش مقدار پارامتر سه محوری تنش، مقدار کرنش مومسان مورد نیاز برای افزایش مقدار تابع به حد بحرانی کاهش می‌یابد.

در نتیجه، همانطور که در شکل (۱۰، الف) نشان داده شده است، سطح شکست با افزایش مقدار پارامتر سه محوری تنش، کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که محدودیت معیار آیادا در مقادیر منفی پارامتر سه محوری تنش، توسط معیارهای رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله برطرف می‌شود؛ همچنین، با توجه به کاهش مقدار میانگین پارامتر سه محوری تنش در آزمون کشش نمونه

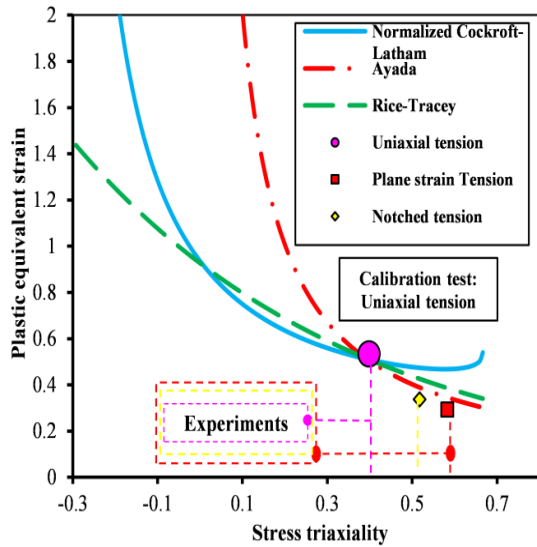
رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری، از طریق مقایسه طول کورس شکست (تجربی و شبیه‌سازی) در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی تعیین شد. همچنین خطای معیارهای مذکور تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای، از طریق مقایسه مقادیر تجربی و شبیه‌سازی طول کورس در آزمون‌های کشش تک محوری و کشش نمونه دارای تورفتگی، ارزیابی شد. به طریق مشابه، تاثیر کالیبراسیون با آزمون کشش نمونه دارای تورفتگی بر دقت معیارها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، در

معیارها (رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله) نیز طول کورس شکست در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و نمونه دارای تورفتگی را بیشتر از مقادیر تجربی تعیین می‌نمایند؛ همچنین، نتایج حاصل از معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی، بیانگر کاهش اختلاف طول کورس شکست تجربی و شبیه‌سازی است.

به منظور بررسی دقیق اثر روش‌های کالیبراسیون بر دقت معیار، خطای پیش‌بینی شکست به کمک رابطه ۱۳ محاسبه شد. خطای پیش‌بینی شکست در معیارهای آیادا،



شکل ۱۱- تاثیر آزمون کالیبراسیون و تابع وزنی آسیب بر خطای پیش‌بینی طول کورس شکست



شکل ۱۲- تغییرات کرنش شکست در نواحی قبل و بعد از نقطه کالیبراسیون بر مبنای معیارهای مختلف

نتایج آزمون‌های تجربی قرار دارد. به همین دلیل، مقادیر طول کورس شکست در بررسی‌های عددی، بیشتر از مقادیر تجربی تخمین زده می‌شوند. در شرایطی که از آزمون کشش تک محوری برای کالیبراسیون معیارها استفاده شود، تمامی معیارها در نقطه‌ای که مرتبط با میانگین حالت تنش در آزمون کشش تک محوری است، همگرا می‌شوند. منحنی شکست حاصل از معیارهای شکست نرم در سایر نواحی (قبل و بعد از نقطه همگرایی)، با روند متفاوتی واگرا خواهند شد. این موضوع موجب تغییرات دقت پیش‌بینی شکست می‌شود. معیار کوکرافت-لاتهام نرماله کمترین وابستگی به پارامتر سه محوری تنش را از خود نشان می‌دهد (در بازه پارامتر سه محوری ۰/۳ تا ۰/۶). تفاوت حالت تنش در آزمون کشش تک محوری با آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی و همچنین، تاثیر اندک پارامتر سه محوری تنش بر کرنش شکست در معیار کوکرافت-لاتهام نرماله، موجب پیش‌بینی غیر دقیق کرنش شکست به ازای حالات تنش در محدوده خارج از آزمون کالیبراسیون می‌شود (اختلاف قابل توجه منحنی شکست در این معیار با نتایج تجربی آزمون‌های کشش نمونه دارای تورفتگی و کشش کرنش صفحه‌ای). این موضوع موجب می‌شود تا بیشترین میزان خطا در پیش‌بینی شکست توسط معیار کوکرافت-لاتهام

شرایطی که از آزمون کشش محوری به منظور کالیبراسیون معیارهای شکست استفاده می‌شود، معیار آیدا دقیق‌ترین معیار در پیش‌بینی شکست در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای (۸/۷۴ درصد خطا) و کشش نمونه دارای تورفتگی (۱۲/۷۶ درصد خطا) است. معیار کوکرافت-لاتهام نرماله دارای بیشترین خطا در این شرایط (کالیبراسیون تحت آزمون کشش تک محوری) است. این معیار، تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری، با درصد خطای کشش کرنش صفحه‌ای و وقوع شکست را به ترتیب در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی پیش‌بینی می‌کند.

با در نظر گرفتن آزمون کشش نمونه دارای تورفتگی به عنوان آزمون کالیبراسیون، طول کورس شکست با دقت بالاتری نسبت به کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری پیش‌بینی می‌شود. مطابق با نتایج بدست‌آمده، با تغییر آزمون کالیبراسیون از کشش تک محوری به کشش نمونه دارای تورفتگی، میانگین خطای پیش‌بینی شکست در معیارهای شکست نرم از ۱۸/۱۱ درصد تحت کالیبراسیون با آزمون کشش محوری به ۳/۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین، طبق نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، کالیبراسیون معیارهای شکست تحت آزمون کشش کرنش صفحه‌ای موجب افزایش دقت پیش‌بینی شکست (نسبت به کالیبراسیون تحت آزمون کشش تک محوری) در آزمون‌های کشش می‌شود. مقدار میانگین خطای پیش‌بینی شکست توسط معیار آیدا، رایس-تریسی و کوکرافت لاتهام نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای، به ترتیب برابر است با ۲/۵۳، ۲/۸۰ و ۴/۵۷ درصد است؛ لذا، معیار آیدا تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای، دقیق‌ترین نتایج را در پیش‌بینی شکست ارائه می‌نماید.

به منظور بررسی علت تغییرات خطای معیار در پیش‌بینی شکست، منحنی شکست حاصل از معیارها (کرنش شکست به ازای مقادیر مختلف پارامتر سه محوری تنش) تحت آزمون کالیبراسیون کشش تک محوری، در شکل ۱۲ مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از نتایج پیداست، منحنی شکست حاصل از تمامی معیارها تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری، فراتر از

نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری بدست آید. همچنین، طبق نتایج ارائه شده در شکل ۱۲، بیشترین وابستگی کرنش شکست به پارامتر سه محوری تنش و کمترین اختلاف با نتایج تجربی، در منحنی شکست معیار آیادا مشاهده شد (نزدیکترین منحنی به نقاط تجربی). همین موضوع سبب می‌گردد تا کمترین میزان خطا در پیش‌بینی شکست، به کمک این معیار حاصل شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، رفتار شکست آلومینیم آلیاژی 6061-T6 در آزمون‌های کشش (حالات تنش گوناگون)، تاثیر توابع وزنی آسیب (معیارهای شکست نرم) و روش‌های کالیبراسیون بر دقت تعیین لحظه شکست مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا خواص مکانیکی ورق به کمک آزمون‌های استاندارد تعیین شد. در کنار آزمون کشش تک محوری، آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی نیز به منظور کالیبراسیون معیارهای شکست نرم استفاده شدند. تغییرات حالت تنش و کرنش شکست در آزمون‌های مذکور، به کمک ترکیب روش‌های تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه، سه معیار شکست نرم پدیدارشناختی آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله به کمک آزمون‌های کشش کالیبره شدند. کالیبراسیون معیارها بر مبنای روش‌های مقدار میانگین و تاریخچه حالت تنش انجام شد. در ادامه، تاثیر توابع وزنی آسیب، روش کالیبراسیون و آزمون‌های کالیبراسیون بر دقت پیش‌بینی شکست مورد بررسی قرار گرفتند. اهم نتایج بدست‌آمده به اختصار بیان می‌گردد:

- استفاده از روش تاریخچه حالت تنش در مقایسه با روش مقدار میانگین (فرض بارگذاری یکنواخت) در کالیبراسیون معیارهای آیادا، رایس-تریسی و کوکرافت-لاتهام نرماله، به طور متوسط موجب ۳/۴۰ درصد کاهش در خطای پیش‌بینی شکست نسبت به روش مقدار میانگین می‌شود.

- در شرایطی که از آزمون کشش تک محوری به منظور کالیبراسیون معیارهای شکست استفاده

- می‌شود، معیار آیادا دقیق‌ترین معیار در پیش-بینی شکست در آزمون‌های کشش کرنش صفحه‌ای (۸/۷۴ درصد خطا) و کشش نمونه دارای تورفتگی (۱۲/۷۶ درصد خطا) است.
- معیار کوکرافت-لاتهام نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش تک محوری، با میانگین خطای ۲۶/۴۷ درصد، بیشترین درصد خطا در پیش-بینی شکست را ارائه می‌نماید.
- افزایش مقدار پارامتر سه محوری تنش در نقطه کالیبراسیون (با تغییر آزمون کالیبراسیون از کشش تک محوری به کشش نمونه دارای تورفتگی)، موجب افزایش دقت پیش‌بینی شکست در سایر حالات تنش می‌شود. در این حالت، با تغییر آزمون کالیبراسیون از کشش محوری به کشش نمونه دارای تورفتگی، میانگین خطای پیش‌بینی شکست توسط معیارهای شکست نرم از ۱۸/۱۱ درصد به ۳/۲۰ درصد کاهش یافت.
- دقیق‌ترین نتایج در پیش‌بینی محدوده شکست به ازای مقادیر مثبت پارامتر سه محوری تنش، از طریق کالیبراسیون معیارها تحت آزمون کشش کرنش صفحه‌ای حاصل می‌شود. در این میان، معیار آیادا با میانگین خطای ۲/۵۳ درصد (تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای)، دقیق‌ترین نتایج را در پیش‌بینی شکست ارائه می‌نماید.
- تغییرات دقت پیش‌بینی شکست ناشی از میزان وابستگی کرنش شکست به پارامتر سه محوری تنش، میزان اختلاف حالت تنش فرایند نسبت به حالت تنش در آزمون کالیبراسیون و نحوه واگرایی منحنی شکست پس از نقطه کالیبراسیون است. همین موضوع موجب می‌گردد تا سطح شکست حاصل از معیار کوکرافت-لاتهام پس از واگرایی از نقطه کالیبراسیون، بیشترین اختلاف را با نتایج داشته و در نهایت، این معیار بیشترین خطای پیش-بینی شکست در سایر آزمون‌ها (کشش کرنش

- [7] Rice JR, Tracey DM (1969) On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *J Mech Phys Solids* 17(3): 201-217.
- [8] Ayada M, Higashino T, Mori K (1987) Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials. *Adv Technol Plast* 1: 553-558.
- [9] Brozzo P, Deluca B, Rendina R (1972) A new method for the prediction of formability limits of metal sheets, sheet metal forming and formability. *Proceedings of the Seventh Biennial Congress of International Deep Drawing Research Group*.
- [10] Oyane M, Sato T (1980) Criteria for ductile fracture and their applications. *J Mech Work Technol* 4(1): 65-81.
- [11] Oh SI, Chen CC, Kobayashi S (1979) Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. *J Eng Ind* 101(1): 36-44.
- [12] Takuda H, Mori K, Takakura N, Yamaguchi K (2000) Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture. *Int J Mech Sci* 42(4): 785-798.
- [13] Zhan M, Gu C, Jiang Z, Hu L, Yang H (2009) Application of ductile fracture criteria in spin forming and tube-bending processes. *Comput Mater* 47(2): 353-365.
- [14] Hashemi SJ, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Azizi Tafti R (2015) Prediction of bulge height in warm hydroforming of aluminum tubes using ductile fracture criteria. *Arch Civ Mech Eng* 15(1): 19-29.
- [15] Mirnia MJ, Shamsari M (2017) Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. *J Mater Process Technol* 244: 17-43.
- [16] Linardona C, Favierb D, Chagnonb G, Grueza B (2014) A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria. *J Mater Process Technol* 214(2): 347-357.
- [17] Wua Z, Li S, Zhang W, Wanga W (2010) Ductile fracture simulation of hydropiercing process based on various criteria in 3D modeling. *Mater Des* 31(8): 3661-3671.
- [18] Lou Y, Yoon JW (2019) Alternative approach to model ductile fracture by incorporating anisotropic yield function. *Int J Solids Struct* 164(1): 12-24.
- [19] Mohr D, Marcadet SJ (2015) Micromechanically-motivated phenomenological Hosford-Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities. *Int J Solids Struct* 67-68: 40-55.

صفحه‌ای و کشش نمونه دارای تورفتگی) را خواهد داشت. در مقابل، افزایش تاثیر پارامتر سه محوری تنش بر مقدار کرنش شکست در معیار آیادا، موجب می‌گردد تا تخمین دقیق‌تری از کرنش شکست توسط این معیار در سایر حالات تنش حاصل شود.

- با توجه به پراکندگی حالت تنش در آزمون‌های کالیبراسیون کشش محوری در بازه [۰/۳ - ۰/۶]، استفاده از آزمون‌های استاندارد ناکازیما به منظور تحت پوشش قرار دادن حالات تنش وسیع‌تر (تا محدوده کشش دومحوری)، به عنوان پژوهش‌های آینده توسط نویسندگان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۸- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (شماره پروژه: ۹۶۰۰۴۲۰۴) کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۹- مراجع

- [1] Lou Y, Huh H (2013) Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. *Int J Solids Struct* 50(2): 447-455.
- [2] Swift HW (1952) Plastic instability under plane stress. *J Mech Phys Solids* 1(1): 1-18.
- [3] Zhu X, Weinmann K, Chandra A (2001) A unified bifurcation analysis of sheet metal forming limits. *J Eng Mater Technol* 123(3): 329-333.
- [4] Lou Y, Lim SJ, Huh H (2013) Prediction of fracture forming limit for DP780 steel sheet. *J Mech Phys Solids* 19(4): 697-705.
- [5] Permeh M, Hosseinipour SJ, Jamshidi Aval H (2016) GTN damage model parameters for ductile fracture simulation in aluminum alloy 5083-O. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(1): 129-142. (in Persian)
- [6] Ghaforian Nosrati H, Gerdooei M, Falahati Naghibi M (2015) A new approach to identify the ductile damage constants of seamed metallic tube using hydro-bulging process. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 5(2): 139-150. (in Persian)

of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets. J Manuf Processes 18: 131-140.

[20] Besson J (2010) Continuum models of ductile fracture: A review. Int J Damage Mech 19: 3-52.

[21] Bagherzadeha S, Mirnia MJ, Mollaei Dariani B (2015) Numerical and experimental investigations