مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 361-371

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تعیین تجربی و پیش‌بینی منحنی‌های حد شکل‌دهی گلویی و شکست ورق آلومینیوم 2024 با استفاده از معیار آسیب

علی زاهدی[1]، بیژن ملائی داریانی[2*]، محمدجواد میرنیا[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
* تهران، صندوق پستی 4413-15875، dariani@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 تیر 1396
پذیرش: 14 مرداد 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:
شکل‌پذیری ورق
منحنی حد شکل‌دهی
المان محدود
معیار آسیب

چکیده

منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق از ابزارهای مفید در بررسی شکل‌پذیری ورق به‌منظور طراحی محصولات صنعتی به شمار می‌رود. برای تعیین این منحنی‌ها روش‌ها و دستورالعمل‌هایی در قالب آزمایش‌های تجربی تدوین و ارائه شده است. هزینه‌بر و زمان‌بر بودن انجام این آزمایش‌های تجربی باعث شده است تا پژوهش‌های متعددی در استفاده از روش‌های تحلیلی و نرم‌افزارهای المان محدود در تعیین این منحنی‌ها صورت بگیرد. در تحقیق حاضر، منحنی‌های حد شکل‌دهی گلویی و حد شکست ورق‌های آلومینیوم آلیاژی 2024 با استفاده از روش اتساع نیم کروی به صورت تجربی و عددی به دست آمده است. برای این منظور هندسه‌های متفاوتی از ورق فلزی برای ایجاد مسیر کرنش‌های مختلف به کار گرفته شده است. برای شبیه‌سازی آزمایش‌های تجربی، از حل گر صریح نرم‌افزار تحلیلی آباکوس استفاده گردید. با استفاده از روابط تئوری و آزمایش‌های تجربی، خواص شکست ورق آلومینیومی برحسب کرنش شکست، تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود تعیین و به نرم‌افزار معرفی شد. با استفاده از مدل آسیب نرم، کرنش‌های حد شکل‌دهی شکست توسط مدل عددی صحه‌گذاری شده، استخراج گردید. برای تعیین کرنش‌های حد شکل‌دهی گلویی از روشی براساس تغییرات کرنش بیشینه در ناحیه گلویی شدن، بهره گرفته شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل عددی به کار گرفته شده، می‌تواند با بیشترین خطایی حدود 6% کرنش‌های حد شکل‌دهی گلویی و شکست ورق آلومینیومی 2024 را پیش‌بینی نماید.

Experimental Determination and Numerical Prediction of Necking and Fracture Forming Limit Curves of 2024 Aluminum Alloy Sheet Using Damage Criterion

Ali Zahedi[1], Bijan Mollaei-Dariani[1*], Mohammad Javad Mirnia[2]

1- Department of Mechanical Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, dariani@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 July 2017
Accepted 05 August 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Sheet formability
Forming Limit Diagram
Finite Element
Damage Criterion

ABSTRACT

Forming limit diagram (FLD) is one of the useful tools in the assessment of the sheet formability for designing industrial products. Experimental methods have been developed to determine FLDs. Costly and time-consuming experiments have led to several studies on the use of analytical methods and finite element software for predicting FLDs. In the present study, the necking and fracture forming limit curves of AA2024 aluminum alloy sheet were experimentally and numerically obtained through the hemispherical stretching test. Different geometries of the initial blank were considered to create different strain paths. The commercial finite element code Abaqus/Explicit was utilized to simulate experimental tests. Using theoretical equations and experimental results, fracture properties of the aluminum sheet in terms of the equivalent plastic strain at fracture, the stress triaxiality and the Lode angle parameter were captured and implemented in the Abaqus software. In order to capture necking forming limit strains, a numerical criterion based on the major strain variation in the necking zone has been considered. Comparison of the results shows that the numerical model can predict the forming and fracture limit strains with the maximum error of about 6%.

1- مقدمه

برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی یک ورق فلزی به‌طور سنتی از نمودار حد شکل‌دهی استفاده می‌شود. این نمودار، ترکیب کرنش‌هایی (کرنش بیشینه[1] و کرنش کمینه[2]) را که ورق می‌تواند تا آستانه گلویی شدن موضعی و شکست تحمل کند، نشان می‌دهد. ترکیب کرنش‌هایی را که ورق فلزی قبل از گلویی شدن موضعی تحمل می‌کند، منحنی حد شکل‌دهی گلویی (NFLC[3]) و

[1] Major Strain
[2] Minor Strain
[3] Necking Forming Limit Curve

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. J. Mirnia, Experimental Determination and Numerical Prediction of Necking and Fracture Forming Limit Curves of 2024 Aluminum Alloy Sheet Using Damage Criterion , *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

ترکیب کرنش‌هایی را که ورق فلزی قبل از شکست تحمل می‌کند، منحنی حد شکل‌دهی شکست (FFLC[1]) گویند. درواقع منحنی حد شکل‌دهی، میزان حداکثر کرنش‌های حدی را در بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. نظریه نمودار حد شکل‌دهی برای اولین بار توسط کیلر [1] و گودوین [2] در سال 1968 مطرح شد، مارسینیاک و کوزینسکی این نظریه را بسط دادند و مدلی را بنا نهادند که قادر بود گلویی شدن موضعی را پیش‌بینی کند [4,3]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که شکست در ورق به‌طور ناگهانی اتفاق نمی‌افتد بلکه غیریکنواختی و ناهمگنی در ریزدانه‌های تشکیل‌دهنده ماده، سبب ایجاد باریک شدگی موضعی و درنهایت شکست می‌شود. این ناهمگنی به‌صورت یک شیار فرض می‌شود که سطح ورق را به دو قسمت همگن و ناهمگن تقسیم می‌کند.

لازم است که منحنی‌های حد شکل‌دهی فلزات و آلیاژهایی که در صنعت شکل‌دهی کاربرد دارند، با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف تعیین شود. آلیاژهای آلومینیوم به‌واسطه شکل‌پذیری خوب در عین داشتن استحکام مکانیکی بالا، چگالی کم، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا و مقاومت نسبتاً بالا به خوردگی از دسته آلیاژهای پرکاربرد و موردتوجه صنعت شکل‌دهی می‌باشند. تعیین و تحلیل شکل‌پذیری ورق‌های آلومینیومی می‌تواند در طراحی محصول و فرایند تولیدی کمک شایانی به مهندسین نماید.

تعیین تجربی منحنی‌های NFLC فرایندی زمان‌بر بوده و نیاز به تجهیزات خاص خود دارد که ممکن است همیشه در دسترس مهندسین و محققین نباشد. از طرفی دیگر، در کنار هزینه پایین روش عددی، می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری سودمند در تحلیل فرایندهای مختلف از جمله در حوزه تحلیل تنش و کرنش بهره‌مند شد. ازاین‌رو محققین در سال‌های اخیر روش‌های عددی متفاوتی را به‌منظور پیش‌بینی حد شکل‌دهی ورق فلزی توسعه داده‌اند. سیتو (2006) [5] برای اولین بار با استفاده از مشتق دوم کرنش بیشینه و استفاده از تاریخچه کرنش‌های نزدیک محل گلویی شدن ورق، منحنی حد شکل‌دهی را به روش تجربی و عددی تعیین کرد. در این راستا، روش‌های مختلف عددی با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود ارائه شد. ژانگ و همکاران (2011) [6] با استفاده از معیارهای مختلف روش عددی، منحنی‌های NFLC آلومینیوم آلیاژی را به‌دست آوردند و نتیجه گرفتند که سه معیار نسبت کرنش پلاستیک معادل، نقطه انشقاق برای تغییرات ضخامت المان بحرانی و مشتق دوم کرنش ضخامتی المان بحرانی با نتایج تجربی به‌دست آمده انطباق قابل قبولی دارند. ماموسی و همکاران (2013) [7] منحنی حد شکل‌دهی و مکان گلویی شدن ورق‌های TWB را با استفاده از سه معیار مشتق دوم کرنش ضخامتی، مشتق دوم کرنش بیشینه و مشتق دوم کرنش پلاستیک معادل به دست آوردند. کمی و همکاران (2015) [8] با موفقیت از مدل GTN به‌منظور بررسی موقعیت گلویی شدن و تعیین منحنی‌های NFLC ورق‌های ساندویچی استفاده کردند. کلاسنگیانی و همکاران (2015) [9] به تعیین عددی منحنی‌های NFLC و لحظه گلویی شدن با استفاده از مشتق دوم کرنش ضخامتی و سه مدل آسیب نرم مختلف پرداختند. با استفاده از این مدل‌های عددی، سمت چپ منحنی بالاتر از مقادیر تجربی گزارش شده و سمت راست آن با دقت خوبی پیش‌بینی شده است. ظهور و همکاران (2016) [10] با استفاده از معیارهای تسلیم جدید و مدل اصلاح شده مارسینیاک-کوزینسکی به تعیین تئوری منحنی حد شکل‌دهی ورق آلومینیومی 2024 پرداختند. بررسی این تحقیق نشان می‌دهد که از آزمایش‌های تجربی قابل‌توجهی برای کالیبره کردن معیارهای تسلیم و صحه‌گذاری آن‌ها استفاده شده است. کرجی بانی و همکاران (2016) [11] با استفاده از دو معیار شتاب کرنش بیشینه و شتاب کرنش ضخامتی، NFLC ورق دولایه آلومینیوم/فولاد را به دست آوردند و با مقایسه با نتایج تجربی، این منحنی‌ها را صحه‌گذاری کردند. باقرزاده و همکاران (2016) [12] به‌عنوان کاربردی از روش‌های عددی در پیش‌بینی گلویی شدن، از نرخ تغییرات کرنش پلاستیک معادل در پیش‌بینی آسیب در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی ورق‌های کامپوزیتی آلومینیوم/فولاد استفاده کردند. در عین‌حال، این محققین به لزوم استفاده از یک مدل آسیب مناسب به منظور پیش‌بینی دقیق شروع شکست اشاره کرده‌اند. حبیبی و همکاران (2017) [13] با استفاده از دو روش المان محدود به بررسی حد شکل‌دهی ورق پرداختند. در مدل اول از طریق گنجاندن معیار گلوئی مارسینیاک-کوزینسکی در مدل المان محدود آزمون ناکازیما، منحنی حد شکل‌دهی به دست آورده شد. در مدل دوم، منحنی حد شکل‌دهی از طریق شبیه‌سازی تئوری مارسینیاک-کوزینسکی به‌دست آمد.

پژوهش‌هایی به منظور بررسی و ارزیابی مدل‌های آسیب مختلف برای تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی شکست (FFLC) انجام شده است. لای و همکاران (2010) [14] با تصحیح مدل آسیب مور-کلمب به پیش‌بینی شکست ناشی از برش در شکل‌دهی ورق‌های فلزی پرداختند. لو و همکاران (2012) [15] با در نظر گرفتن جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در شکست فلزات و آلیاژها، مدلی را ارائه و صحه‌گذاری کردند. محققان این مدل را با در نظر گرفتن اثر تنش سه محوری و تنش برشی بیشینه معرفی کرده‌اند که مورد توجه سایر محققان قرار گرفته است. ژینکای و همکاران (2015) [16] با در نظر گرفتن مدول الاستیک به صورت متغیر و تنش سه محوری و شرایط کرنش مختلف، معیار آسیب نرمی را ارائه و گلویی شدن غیریکنواخت را مدل کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل ارائه شده، پیش‌بینی دقیق‌تری از حد شکل‌دهی ورق St14 نسبت به مدل‌های سوئیفت و هیل دارد و تغییر ضخامت، تغییری در کرنش‌های شکست ایجاد نمی‌کند. لو و همکاران (2017) [17] با در نظر گرفتن به هم پیوستگی برشی حفره‌ها و کنترل کردن پیچش آن‌ها، مدل آسیبی را در محدوده برش تا کشش دومحوری با عنوان مدل DF2015 ارائه دادند. چنگ و همکاران (2017) [18] مدل شکستی را با در نظر گرفتن تغییرات نسبت تنش‌های صفحه‌ای در حین بارگذاری و ناهمسانگردی ورق ارائه دادند. آن‌ها همچنین با استفاده از تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود[2]، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها را مدل کردند. معیارهای آسیب نرمی که اخیراً توسعه داده شده‌اند بر این اساس هستند که کرنش پلاستیک معادل در شکست به تنش سه محوری و پارامتر زاویه لود وابسته است. اثر تنش سه محوری در پیش‌بینی آسیب در پژوهش‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته است ولی نقش پارامتر زاویه لود و مکانیزم‌های فیزیکی آن تاکنون به صورت جامع تحلیل نشده است. بارسوم و فالساک (2007) [19] نشان دادند که تنش سه محوری[3] به تنهایی نمی‌تواند رشد حفره و سایر رفتارهای مربوط و متناسب با نرم شوندگی و موضعی شدن را مشخص نماید. از این رو لازم است، فاکتور دیگری به نام پارامتر (زاویه) لود، در مطالعات شکست نرم به کار گرفته شود. با استفاده هم‌زمان و در کنار هم تنش سه محوری و زاویه لود می‌توان رفتار مواد نرم را تحت شرایط بارگذاری پیچیده بررسی کرد.

در این تحقیق، منحنی حد شکل‌دهی گلویی (NFLC) و منحنی حد

[1] Fracture Forming Limit Curve

[2] Lode angle

[3] Triaxiality Stress

شکل‌دهی شکست (FFLC) آلومینیوم آلیاژی 2024 با استفاده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی با کد تجاری المان محدود آباکوس به دست آمده و مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اثر پارامتر لود در تعیین منحنی‌های FFLC را در نظر نگرفته و نیز این دو منحنی برای ورق مورد مطالعه در قالب یک پژوهش ارائه نشده است. در این مقاله، برای پیش‌بینی منحنی‌های FFLC از یک مدل آسیب پدیدار شناختی با در نظر گرفتن تنش سه محوری، پارامتر لود و کرنش پلاستیک معادل استفاده شده است. همچنین برای پیش‌بینی منحنی‌های NFLC، از روشی با دقت بالاتر و براساس نرخ تغییرات کرنش بیشینه در مرز بین ناحیه گلویی و تغییر شکل همگن استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های استخراج کرنش‌های حدی جامع‌تر بوده و اثر کرنش ضخامتی در ورق را در بر می‌گیرد.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- خواص ماده

در این پژوهش ورق آلومینیومی آلیاژی 2024 با ضخامت 1mm استفاده شده است. به منظور استخراج خواص کششی ورق، آزمایش کشش تک‌محوری با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام با ظرفیت 15 تن، طبق استاندارد ASTM E8-15 در دمای اتاق و در جهت نورد انجام شد. سرعت آزمایش کشش برابر با 2mm/min در نظر گرفته شد و آزمایش برای سه نمونه تکرار گردید. با توجه به طول گیج 50mm هر نمونه، تنش و کرنش مهندسی از آزمایش‌های کشش به‌دست آمد و با استفاده از روابط (1) تنش کرنش حقیقی قبل از گلویی شدن تعیین شد. منحنی تنش کرنش حقیقی با میانگینی از سه نمونه آزمایش‌شده در "شکل 1" ارائه شده است.

$$\sigma_T = \sigma_E(1+\varepsilon_E) \qquad \varepsilon_T = ln(1+\varepsilon_E) \tag{1}$$

در این رابطه (σ_Eوε_E) تنش و کرنش مهندسی و (σ_Tوε_T) تنش و کرنش حقیقی هستند. همچنین رفتار پلاستیک ورق را می‌توان با رابطه سوئیفت، رابطه (2)، بیان کرد.

$$\sigma = k\varepsilon^n \tag{2}$$

در رابطه (2)، k و n به ترتیب ضریب استحکام و توان کرنش سختی ماده هستند. خواص مکانیکی ورق آلومینیومی 2024 بررسی شده در این پژوهش در جدول 1 ارائه شده است.

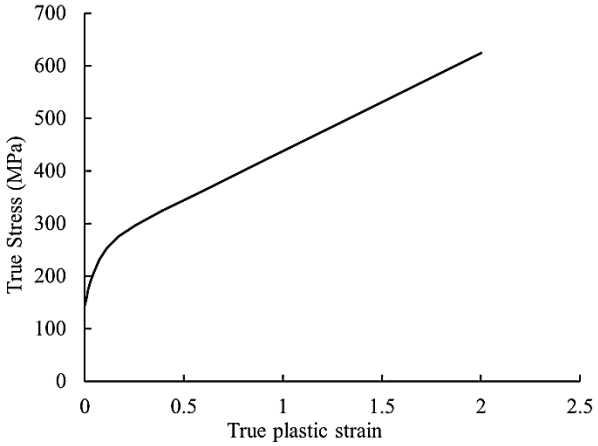

Fig. 1 The stress-strain curve of the 2024 Aluminum alloy.

شکل 1 منحنی تنش کرنش حقیقی آلومینیوم 2024.

جدول 1 خواص مکانیکی ورق آلومینیومی 2024

Table 1 Mechanical properties of 2024 aluminum alloy.

تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت پواسون	چگالی (kg/m^3)	n	k (MPa)
145	70	0.3	7800	0.20	432.51

2-2- آزمایش اتساع نیم کروی

به‌منظور تعیین تجربی منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق از روش اتساع با سنبه نیم‌کروی استفاده شده است. همان‌طور که در "شکل 2" ارائه شده است، هندسه‌های متفاوتی از ورق در این آزمایش به‌منظور پوشش طیف مناسبی از شرایط تنشی و کرنشی در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه در نظر گرفته شده از شکست (پارگی) ورق در قسمت ورق گیر و نزدیک به آن جلوگیری می‌کند و باعث تمرکز کرنش‌های پلاستیک در نواحی نزدیک به مرکز نمونه‌ها می‌شود. ابعاد ورق‌های بریده شده در "شکل 3" نشان داده شده است، در این شکل W نشان‌دهنده عرض متغیر ورق است که برای نمونه‌های مختلف برابر 20، 30، 40، 50، 60، 80 و 90 میلی‌متر می‌باشد. همچنین ابعاد نمونه مربعی، برای ایجاد کشش دو محوره در ورق، 120 در 120 میلی‌متر است.

بعد از آماده‌سازی ورق‌ها در راستای نورد آن‌ها، به‌منظور تعیین کرنش‌های حدی شبکه‌های دایروی[1] به شعاع 2.5mm به روش اچ شیمیایی بر روی تمامی ورق‌ها ایجاد شد. ورق‌ها با استفاده از بید[2] در محیط جانبی خود محکم می‌شوند (شکل 6). ابعاد بیدها به گونه‌ای انتخاب شده است که هم از

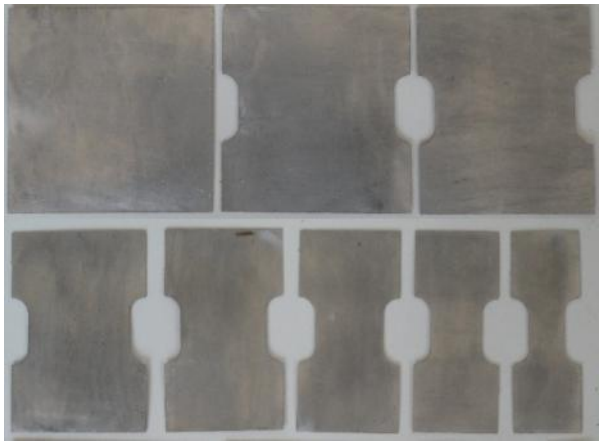

Fig. 2 Prepared hemispherical punch test specimens.

شکل 2 نمونه‌های آماده شده برای آزمایش اتساع نیم کروی

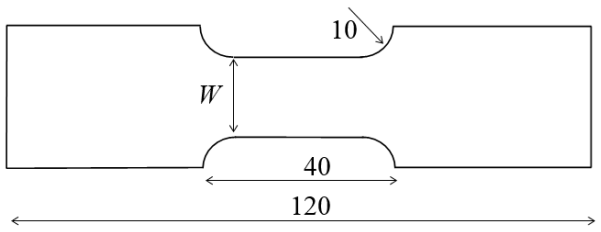

Fig. 3 Dimensional characteristics of hemispherical punch test specimens (all dimensions are in mm).

شکل 3 ابعاد نمونه‌های آزمایش اتساع نیم کروی (ابعاد به میلی‌متر است.)

[1] Circular Grid Analysis
[2] Lock Bead

به داخل کشیده شدن ورق‌ها جلوگیری شود و از طرفی نیروی بیشتری به ورق‌ها وارد نشود به‌طوری که باعث پارگی آن در نزدیکی شعاع ماتریس شود. همچنین در همه این آزمایش‌ها برای کاهش اصطکاک بین سنبه و ورق و بهبود شرایط شکل‌دهی، از روان‌کار SAE50w استفاده شد. به‌طوری‌که پارگی در تمامی نمونه‌ها در موقعیت نزدیک سر سنبه اتفاق افتاد.

بعد از انجام آزمایش‌ها، با استفاده از روش آنالیز شبکه‌های دایروی منحنی حد شکل‌دهی تجربی ورق به دست آمد. در این روش به صورتی که در "شکل 4" نشان داده شده است، دایره‌های حک شده بر روی نمونه‌ها در منطقه تغییر شکل به بیضی تبدیل می‌شوند و کرنش‌های حد شکل‌دهی گلوئی با استفاده از روابط (3) و (4) به دست می‌آیند.

$$\varepsilon_1 = \ln(\frac{a}{d}) \tag{3}$$

$$\varepsilon_2 = \ln(\frac{b}{d}) \tag{4}$$

در رابطه (3) و (4) مانند آنچه در "شکل 4" نشان داده شده است، d قطر اولیه دایره، a و b به ترتیب قطر بزرگ و کوچک بیضی هستند که در نهایت حاصل رابطه (3) کرنش بیشینه حدی و حاصل رابطه (4) کرنش کمینه حدی خواهد بود.

به منظور خواندن کرنش‌های سطحی از دوربین میکروسکوپی دینو لایت[1] با بزرگ‌نمایی 230 برابر استفاده شده است. با استفاده از این تجهیز و اتصال آن به یک کامپیوتر، می‌توان سطح تغییر شکل یافته در ناحیه شکست را با بزرگ‌نمایی مطلوب بر روی صفحه نمایشگر کامپیوتر مشاهده و با نرم‌افزار مربوطه کرنش‌های حدی را محاسبه کرد. با توجه به انعطاف‌پذیری این ابزار، می‌توان آن را عمود بر سطح تغییر شکل یافته (بیضی‌هایی که در ناحیه گلوئی قرار دارند) کرد و طول a و b را با استفاده از صفحه نمایشگر کامپیوتر و نرم‌افزار آن، به دست آورد.

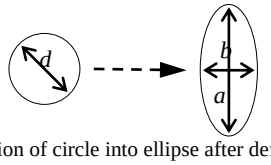

Fig. 4 Transformation of circle into ellipse after deformation

شکل 4 تبدیل دایره به بیضی بعد از تغییر شکل

Fig. 5 The testing machine with the die set mounted

شکل 5 مجموعه قالب و دستگاه استفاده شده برای انجام آزمایش‌های تجربی

در "شکل 5" مجموعه قالب تعیین منحنی حد شکل‌دهی و دستگاه استفاده شده برای انجام آزمایش های تجربی نشان داده شده است. همچنین در "شکل 6" شماتیکی از اجزای قالب به همراه ابعاد آن‌ها ارائه شده است. از نمونه‌های تغییر شکل یافته مشاهده شد که پارگی ورق در نزدیکی مرکز آن اتفاق می‌افتد و سپس به سمت لبه ورق حرکت می‌کند به‌طوری‌که پارگی به صورت یک مسیر خطی و نه زیگزاگی دیده می‌شود (شکل 14). همچنین قابل ذکر است که با توجه به نمونه‌های آزمایش، شکست در راستای ضخامت رخ می‌دهد و سپس به سمت لبه‌های ورق گسترش می‌یابد و با نزدیک شدن به کشش دومحوری این رخداد مشهودتر است.

3- پیش‌بینی عددی منحنی حد شکل‌دهی گلویی و شکست

3-1- معیار شکست نرم پدیدار شناختی

با توجه به مکانیزم رشد و گسترش ترک، شکست در دو حالت برشی و نرم تقسیم می‌شود. شکست نرم به‌دلیل تنش‌های هیدرواستاتیک ایجاد می‌شود و شامل جوانه‌زنی حفره‌ها، رشد و به هم پیوستن آن‌ها می‌شود. همچنین شکست برشی زمانی که باند برشی در ابعاد ماکروسکوپیک و به دلیل نرخ پایین کار سختی تشکیل می‌شود، رخ می‌دهد [19]. در مورد شکست برشی، حفره‌هایی که در باند برشی جوانه می‌زنند سطح مقطع تحمل بار را در این باند کاهش می‌دهند و درنهایت منجر به افزایش تنش و موضعی شدن آن می‌شوند. ادامه بارگذاری و تداوم برش، سطح مقطع حفره‌ها را بزرگ‌تر کرده و این پدیده درنهایت منجر به هم پیوستگی حفره‌ها و شکست می‌شود. حفره‌های بزرگ شده در ضمن برش، نیازی به افزایش حجمی ندارند و از این‌رو شکست برشی در مقایسه با شکست نرم وابستگی کمتری به فشار دارد [15]. در ورق فلزی نازک، شکست می‌تواند با هر دو حالت دچار شکست شود و محتمل است که با ترکیبی از این دو حالت نیز شکست رخ دهد.

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی رفتار مواد نرم نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی بهتر رفتار مواد در طول مسیر بارگذاری باید مدل آسیب مناسبی را در تئوری پلاستیسیته کلاسیک لحاظ نمود. در مدل‌های مکانیک آسیب محیط پیوسته، زوال مواد توسط یک متغیر داخلی به نام پارامتر آسیب تشریح می‌شود و مقدار آن در هر لحظه از بارگذاری توسط پارامتر عددی D تعیین می‌شود. مدل آسیب نرم استفاده شده یک مدل پدیدار شناختی برای پیش‌بینی شروع آسیب است. در این مدل فرض می‌شود که کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب، تابعی از تنش سه محوره و کرنش پلاستیک معادل است. در سال 2008 بای و ویرزبیکی [20] با استفاده از آزمایش‌های تجربی نشان دادند که شکست نرم برای آلیاژهای آلومینیومی و سایر فلزات، به نامتغیر سوم[2] تنش انحرافی که می‌تواند توسط زاویه لود بیان شود، مربوط

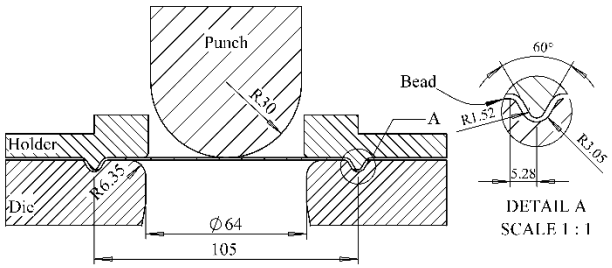

Fig. 6 Hemispherical punch test schematic (dimensions are in mm).

شکل 6 شماتیک آزمایش اتساع نیم کروی (واحد ابعاد میلی‌متر است.)

[1] Dino lite

[2] Third Invariant

می‌شود. با توجه به این موارد می‌توان کرنش پلاستیک در آستانه شکست را به صورت تابعی از این سه پارامتر و به صورت رابطه (5) نوشت:

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \xi(\theta), \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}) \tag{5}$$

در رابطه (5)، η بیانگر تنش سه محوری و $\xi(\theta)$ تابعی از زاویه لود و $\bar{\varepsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل است و این سه، به صورت روابط (6)، (7) و (8) ارائه می‌شوند [21]:

$$\eta = -\frac{p}{q} \tag{6}$$

$$\xi(\theta) = \cos(3\theta)) = \left(\frac{r}{q}\right)^3 \tag{7}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \tag{8}$$

در این روابط p تنش هیدرواستاتیک فشاری، q تنش معادل وون میزز و r نامتغیر سوم تنش انحرافی است. این سه متغیر به ترتیب از روابط (9)، (10) و (11) به دست می‌آیند:

$$p = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{9}$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + (\sigma_3 + \sigma_2)^2]} \tag{10}$$

$$r = \left(\frac{9}{2} S \cdot S : S\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{27}{2} S_1 S_2 S_3\right)^{\frac{1}{3}} \tag{11}$$

در این روابط ترم‌های σ_1، σ_2 و σ_3 به ترتیب به‌عنوان تنش‌های اصلی بیشینه، متوسط و کمینه و ترم‌های S_1، S_2 و S_3 به ترتیب به‌عنوان تنش‌های انحرافی اصلی بیشینه، متوسط و کمینه تعریف می‌شوند.

حال زمانی که رابطه (12) ارضا شود، طبق این مدل آسیب نرم، شکست در ورق شروع می‌شود:

$$w_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \xi(\theta), \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl})} = 1 \tag{12}$$

در رابطه (12)، w_D متغیری است که با تغییر شکل پلاستیک به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. به‌منظور استفاده از این مدل در بررسی فرایندهای شکل‌دهی ورق و همین‌طور در پیش‌بینی FLC، با فرض تنش صفحه‌ای ($\sigma_3 = 0$) و بارگذاری تناسبی روابط (13) و (14) نوشته می‌شود:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{13}$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{14}$$

در این روابط $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ به ترتیب کرنش‌های صفحه‌ای بیشینه و کمینه می‌باشند. حال با استفاده از قانون جریان لوی میزز[1] و با فرض حجم ثابت در طی تغییر شکل پلاستیک، می‌توان بین نسبت تنش و کرنش ارتباط برقرار کرد. برای این منظور قانون جریان لوی میزز و تنش‌های انحرافی اصلی به صورت روابط (15) و (16) نوشته می‌شود [21]:

$$\frac{d\varepsilon_1}{S_1} = \frac{d\varepsilon_2}{S_2} = \frac{d\varepsilon_3}{S_3} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= \sigma_1 - p = \frac{2-\alpha}{3}\sigma_1 \\ S_2 &= \sigma_2 - p = \frac{2\alpha - 1}{3}\sigma_1 \\ S_3 &= \sigma_3 - p = -\frac{1+\alpha}{3}\sigma_1 \end{aligned} \tag{16}$$

با جایگذاری معادلات (16) در رابطه (15) رابطه بین جزء کرنش‌ها به صورت معادله (17) تبدیل می‌شود.

$$\frac{d\varepsilon_1}{2-\alpha} = \frac{d\varepsilon_2}{2\alpha - 1} = -\frac{d\varepsilon_3}{1+\alpha} \tag{17}$$

حال با در نظر داشتن فرضیات گفته شده و استفاده از روابط (14) و (17) ارتباط بین α, β به صورت $\alpha = (2\beta + 1)/(2 + \beta)$ به دست می‌آید. به این صورت می‌توان روابط (6) و (7) را که براساس نسبت تنش هستند، با استفاده از این رابطه براساس نسبت کرنش نوشت. در این صورت، تنش سه محوره، کرنش پلاستیک معادل و زاویه لود به ترتیب به صورت روابط (18)، (19) و (20) به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\beta + 1}{\sqrt{3(\beta^2 + \beta + 1)}} \tag{18}$$

$$\xi(\theta) = -\frac{3\sqrt{3}}{2}\frac{\beta(\beta+1)}{(\beta^2 + \beta + 1)^{3/2}} \tag{19}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_1}{\sqrt{3}}\sqrt{\beta^2 + \beta + 1} \tag{20}$$

با استفاده از روابط به‌دست آمده، خواص شکست ورق مورد مطالعه با استفاده از آزمایش‌های تجربی استخراج می‌شود. با انجام شبیه‌سازی عددی و صحه‌گذاری آن، مسیرهای کرنش (β) برای هر آزمایش به‌دست می‌آید. اندازه ε_1 نیز برای هر آزمایش، مقدار کرنش بیشینه است. با محاسبه تنش سه محوری و پارامتر لود و کرنش معادل، مشخصه‌های شکست به این ترتیب به نرم‌افزار معرفی می‌شود. همچنین باید در نظر داشت که در بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی ورق بارگذاری صفحه‌ای انجام شده به‌صورت تناسبی و یا نزدیک به آن است و از این‌رو فرض در نظر گرفته شده، قابل قبول است.

3-2- معیار گلوئی شدن

به منظور تعیین کرنش‌های صفحه‌ای حدی از روش مشتق اول کرنش بیشینه استفاده گردید. در این روش تاریخچه کرنش در سه مسیر عمود بر ترک ورق در نظر گرفته می‌شود و با توجه به تغییرات کرنش، محدوده گلویی شدن بر روی ورق معین می‌گردد. در "شکل 7" شماتیکی از تغییرات کرنش دو نقطه A و B در ناحیه گلویی شدن نشان داده شده است. در این‌جا روش استفاده شده به‌منظور تعیین کرنش‌های حدی به صورت زیر است:

ابتدا اندازه طول ناحیه گلویی شدن باید مشخص شود. کرنش اصلی نقاط داخل ناحیه گلویی تا لحظه پارگی به صورت ممتد افزایش می‌یابد تا این‌که آن المان حذف می‌شود و به نقطه شکست می‌رسد؛ اما در نقاط نزدیک به ناحیه گلویی کرنش نقاط بعد از رسیدن به حدی رشد نکرده و مقدار ثابتی به خود می‌گیرد. به این صورت تفاوت بین نقاط داخل ناحیه گلویی شدن و مرز آن مشخص می‌شود.

نتایج تجربی [22] نشان می‌دهد که شروع گلویی شدن با کاهش نرخ کرنش در نقاط نزدیک به ناحیه گلویی هم‌زمان است؛ بنابراین گلویی زمانی اتفاق می‌افتد که نرخ کرنش در مرز ناحیه ناپایداری به مقدار بیشینه موضعی خود ($\varepsilon_1^{\max A}$) می‌رسد.

حال با توجه به این موارد می‌توان کرنش‌های حدی در ناحیه گلویی شدن را ثبت کرد. در لحظه مربوط به گلویی شدن، کرنش‌های بیشینه و کمینه المان واقع بر مرکز گلویی (مانند نقطه B) به‌عنوان کرنش‌های حدی ثبت می‌شود. این کار برای سه مسیر عمود بر ترک انجام شده و میانگینی از مقادیر به دست آمده به‌عنوان کرنش‌های حدی تمام نمونه‌های مورد بررسی گزارش می‌شود.

4- شبیه‌سازی المان محدود

[1] Levy-Mises

4-1- مدل‌سازی آزمایش اتساع نیم کروی

به‌منظور شبیه‌سازی و تحلیل عددی آزمایش اتساع نیم کروی، از حل‌گر صریح نرم‌افزار آباکوس 6-14 استفاده گردید. در این شبیه‌سازی سنبه، ماتریس و ورق گیر به صورت صلب گسسته[1] و ورق به صورت تغییر شکل‌پذیر تعریف شد و تمام اجزای قالب و ورق، دقیقاً براساس ابعاد و هندسه آزمایش‌های تجربی به نرم‌افزار معرفی شد. به‌منظور مشاهده محل دقیق بروز ترک و مسیر رشد آن، فرایند به‌صورت کامل و بدون در نظر گرفتن تقارن مدل گردید. در این شبیه‌سازی برای مش‌بندی ورق از المان‌های پوسته مربعی با چهار گره از نوع S4R با انتگرال‌گیری کاهشی استفاده شد. با توجه به مرجع [23] المان‌ها در منطقه گلویی شدن و آسیب نهایی به صورت مستطیلی و با اندازه 1mm در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این موارد برای مثال نمونه‌ها با عرض 20mm، 60mm و 120mm به ترتیب دارای 3874، 8508 و 14400 المان هستند.

ضخامت ورق مانند آزمایش‌های تجربی 1mm در نظر گرفته شده است و در راستای ضخامت هر المان از 5 نقطه انتگرال‌گیری به‌منظور استخراج تنش‌ها و کرنش‌ها استفاده شده است. در این حالت با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی از تکنیک حذف المان استفاده شده، درصورتی‌که تمامی نقاط انتگرال‌گیری در راستای ضخامت یک المان به D=1 رسیدند، آن المان حذف خواهد شد.

با استفاده از نتایج آزمایش کشش یک محوره (شکل 1)، رفتار ماده به صورت همسانگرد الاستوپلاستیک و براساس معیار تسلیم وون میزز به نرم‌افزار معرفی شد. همچنین در این شبیه‌سازی تماس بین ورق و اجزای قالب براساس مدل اصطکاکی کلمبی تعریف شد. ضریب اصطکاک بین ورق و ماتریس و نیز بین ورق و ورق گیر، 0.15 و بین ورق و سنبه 0.09 در نظر گرفته شد.

در "شکل 8" مدل المان محدود شبیه‌سازی آزمایش انجام‌شده نشان داده شده است. به‌منظور نمایش ورق مابین ورق گیر و ماتریس، از نمای برش یافته ورق گیر استفاده شده است.

در این شبیه‌سازی درحالی‌که ماتریس در موقعیت خود ثابت است، بعد از این‌که ورق گیر ورق را محکم می‌گیرد، نیروی ورق گیری برابر با 100kN از طرف ورق گیر به ورق وارد می‌شود تا طبق استاندارد از ورود ورق به ناحیه در معرض کشش جلوگیری شود. سپس سنبه با سرعت 1000mm/min به سمت ورق و در راستای محور خود حرکت کرده و تا پارگی ورق پیش می‌رود. سرعت سنبه با توجه به شبه استاتیک بودن فرایند انتخاب شده و جزئیات آن در [7] ارائه شده است.

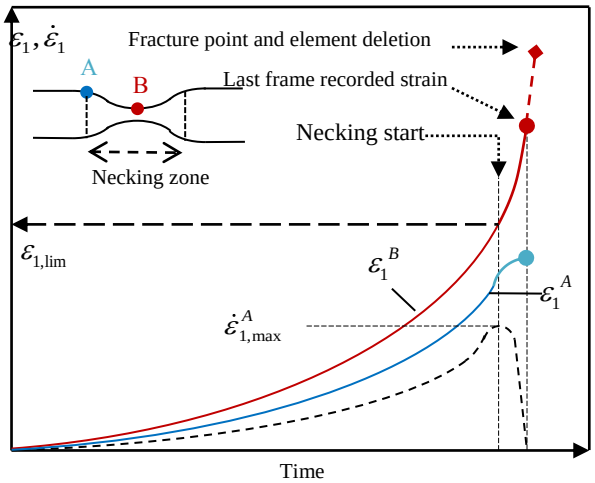

Fig. 7 Schematic of the methodology used in FE model to obtain limit strains

شکل 7 شماتیک روش استخراج کرنش‌های حدی از مدل FE

[1] Discrete Rigid

4-2- اعمال معیار آسیب

در این مطالعه به منظور معرفی معیار آسیب از معیار آسیب نرم استفاده شده است. در قسمت تعریف رفتار ماده در فایل ورودی نرم‌افزار می‌توان مشخصه‌های تنش سه محوری، کرنش پلاستیک معادل و پارامتر لود را به نرم‌افزار به عنوان خواص شکست ماده معرفی کرد. با استفاده از روابط تئوری ارائه شده در بخش 3 و کرنش‌های اندازه‌گیری شده از نمونه‌های کشش در آزمایش اتساع نیم کروی و مدل عددی صحه‌گذاری شده، سه مشخصه اشاره شده به دست می‌آید.

برای مثال، برای نمونه با عرض 120mm، کرنش بیشینه صفحه‌ای به دست آمده از اندازه‌گیری نمونه تجربی، برابر 0.39 می‌باشد. از طرفی، با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده، مسیر کرنش‌های صفحه‌ای این نمونه مانند آنچه در "شکل 9" ارائه شده است به دست می‌آید. حال با استفاده از این مسیر کرنش، مقدار β برابر 0.83 محاسبه می‌شود. درنهایت با استفاده از

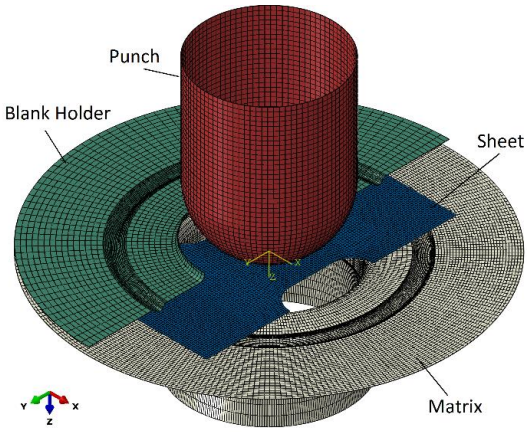

Fig. 8 Finite element model of hemispherical punch test

شکل 8 مدل المان محدود آزمایش سنبه نیم کروی

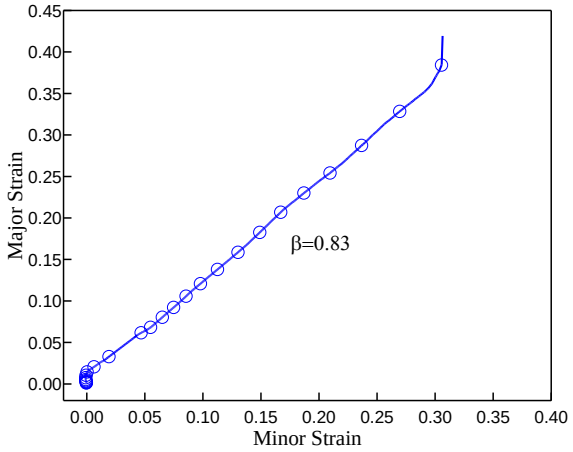

Fig. 9 The predicted strain path in W120 specimen

شکل 9 مسیر کرنش پیش بینی شده در نمونه W120

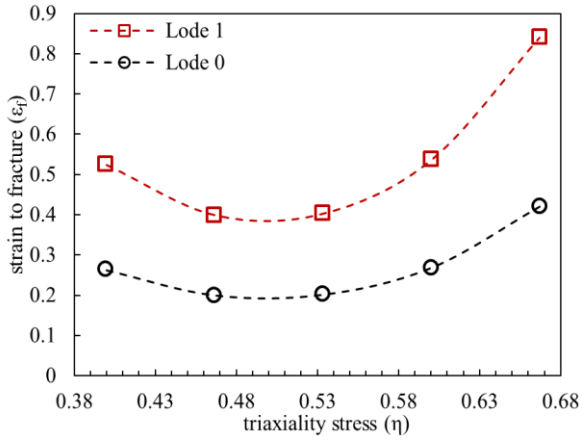

Fig. 10 Ductile damage characteristics of AA 2024

شکل 10 منحنی تجربی خواص شکست نرم آلومینیوم آلیاژی 2024

روابط (18)، (19) و (20) مقادیر $(\bar{\varepsilon},\eta,\xi(\theta))$ برای این نمونه، برابر با (0.751,0.666,-0.987) می‌شوند. به این ترتیب برای سایر آزمایش‌های انجام شده، این روند تکرار می‌شود و اطلاعات مربوط به شکست ورق وارد کد المان محدود می‌شود. منحنی کرنش شکست براساس تنش سه محوره (η,ε_f) در "شکل 10" ارائه شده است. با توجه به نتایج تجربی به دست آمده اثر پارامتر لود برای مقادیر 1- و 1+ به یک صورت است و در این منحنی فقط به ارائه نتایج برای اندازه پارامتر لود 1+ بسنده شده است. در این منحنی تنش‌های سه محوره با مقادیر ابتدای منحنی مربوط به نمونه‌های با عرض کم (کشش تک محوری) و تنش های سه محوری با مقادیر انتهای منحنی مربوط به حالت کشش دومحوری است.

5- نتایج و بحث

به‌منظور صحت سنجی مدل عددی، محل بروز ترک و منحنی نیرو جابجایی پیش‌بینی شده برای سه نمونه مختلف بررسی می‌گردد. مطابق "شکل‌های 11، 12 و 13" مشاهده می‌گردد که ترک در نمونه‌های شبیه‌سازی شده تقریباً از وسط نمونه‌ها (تمامی هندسه‌ها) شروع شده و رشد می‌نماید. در "شکل‌های 14، 15 و 16" نمونه‌های آزمایش تجربی نظیر ارائه شده است. مقایسه نمونه‌های اتساع عددی و تجربی نشان‌دهنده پیش‌بینی مناسب موقعیت و مسیر رشد ترک در شبیه‌سازی انجام شده است.

در ادامه به‌منظور بررسی و صحه‌گذاری مدل عددی از منحنی نیرو جابجایی سنبه استفاده می‌شود. این منحنی در "شکل 17" برای آزمایش‌های تجربی در مقایسه با شبیه‌سازی‌های عددی برای دو نمونه با کمترین و

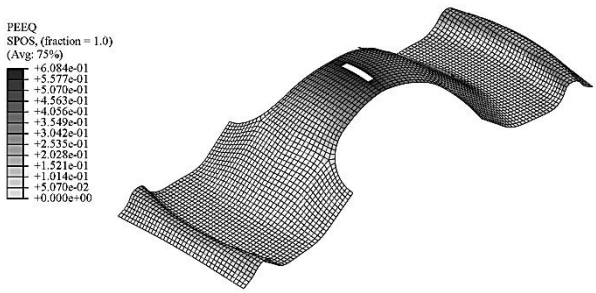

Fig. 11 Equivalent plastic strain distribution in W20 specimen after fracture

شکل 11 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 20mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن

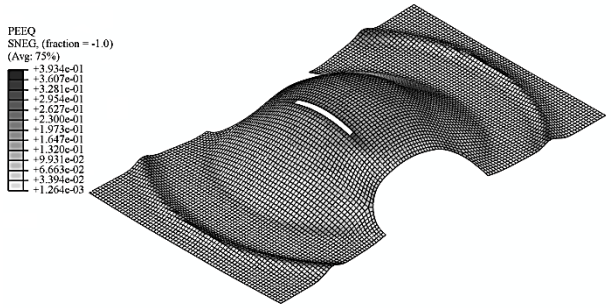

Fig. 12 Equivalent plastic strain distribution in W50 specimen after fracture

شکل 12 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 50mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن

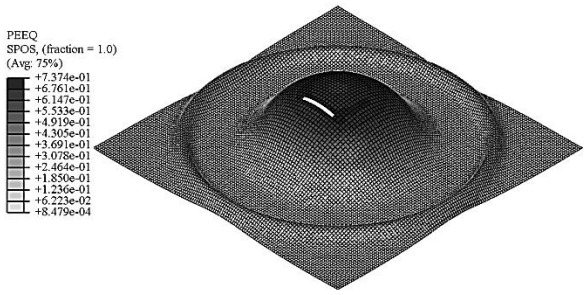

Fig. 13 Equivalent plastic strain distribution in W120 specimen after fracture

شکل 13 توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض 120mm در لحظه بعد از مشاهده پارگی در آن

Fig. 14 W20 deformed specimen at onset of fracture in experiments

شکل 14 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 20mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایش‌های تجربی

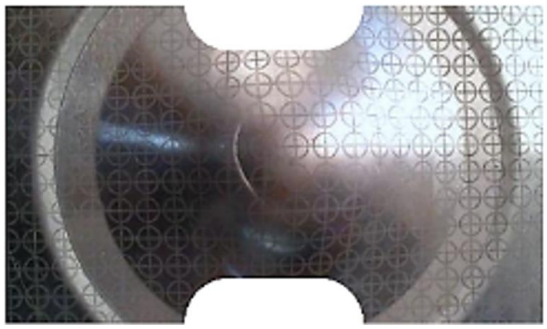

Fig. 15 W50 deformed specimen at onset of fracture in experiments

شکل 15 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 50mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایش‌های تجربی

بیشترین عرض ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق مناسبی بین این دو دسته نتیجه حاصل شده است. مقدار حداکثر نیروی اتساع برای نمونه برش خورده با عرض 30 میلی‌متر در حدود 5 کیلو نیوتن و در مورد نمونه مستطیلی در حدود 29 کیلو نیوتن می‌باشد. مطابق با این مقایسه، منحنی نیرو جابجایی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی با اختلافی

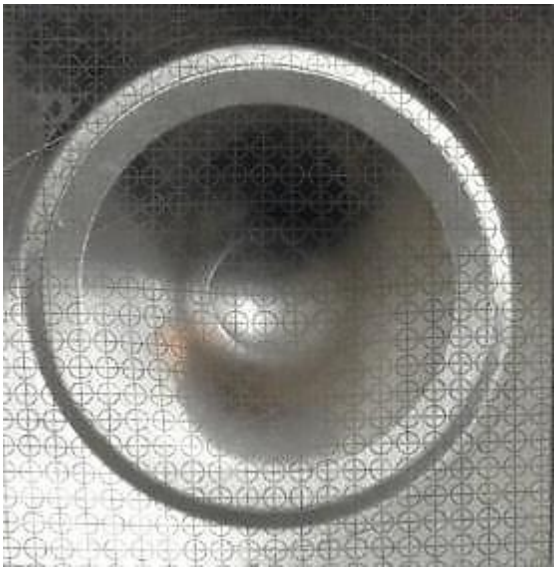

Fig. 16 W120 deformed specimen at onset of fracture in experiments

شکل 16 نمونه تغییر شکل یافته با عرض 120mm در لحظه بعد از وقوع پارگی در آزمایش‌های تجربی

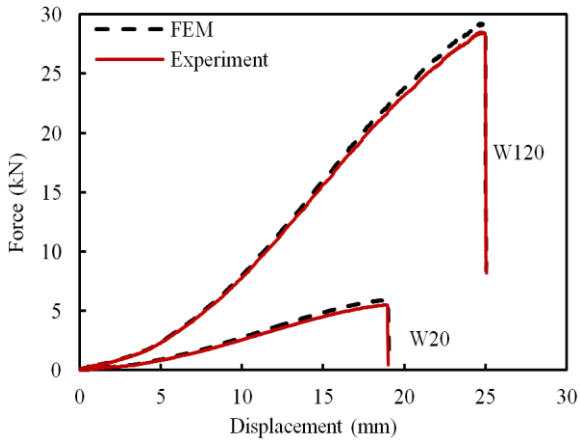

Fig. 17 Comparison of numerical and experimental force displacement curve

شکل 17 مقایسه منحنی نیرو جابجایی حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی

حدود 2.5% بالاتر از منحنی تجربی قرار گرفته است. مقایسه نمودارهای نیرو نشان می‌دهد که هم مقدار حداکثر نیروی شکل‌دهی و هم زمان پارگی ورق با دقت قابل قبولی پیش‌بینی شده‌اند.

5-1- منحنی NFLC و FFLC عددی

کرنش‌های حد گلویی بیشینه و کمینه با استفاده از نرخ تغییرات کرنش بیشینه، به‌صورتی که در بخش 3 به آن پرداخته شد، به دست می‌آید. شماتیک این روش به همراه تغییرات کرنش دو نقطه A و B در ناحیه گلویی شدن در "شکل 7" نشان داده شده است.

کرنش‌های حدی به همراه مسیرهای کرنش برای تمام نمونه‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی به دست آمد. این مسیرها در فضای کرنش‌های صفحه‌ای که در "شکل 18" ارائه شده، رسم شده است. حالت‌های تنش در سمت چپ و راست منحنی NFLC متفاوت از هم است؛ سمت چپ منحنی شامل کشش-فشار است درحالی‌که سمت راست آن، هر دو حالت تنش به صورت

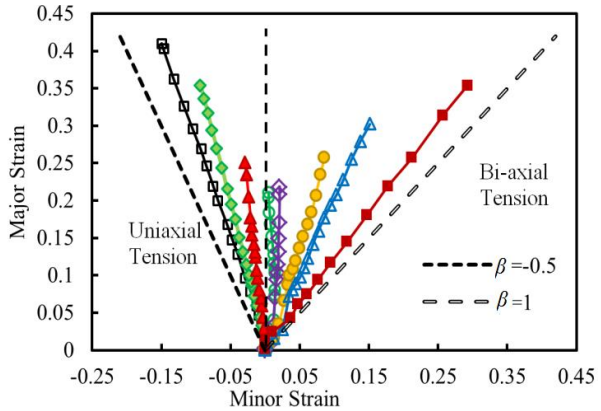

Fig. 18 Predicted strain paths up to necking point (for specimens with width of 20 mm to 120 mm, from left to right respectively)

شکل 18 مسیرهای کرنش به دست آمده تا نقطه گلویی حاصل از شبیه‌سازی عددی (از چپ به راست به ترتیب برای نمونه‌ها با عرض 20 تا 120 میلی‌متر)

کشش-کشش است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مسیرهای به دست آمده در محدوده کشش تک‌محوری (β=-0.5) و کشش دومحوری (β=1.0) است و نیز این مسیرهای کرنش به صورت خطی و یا بسیار نزدیک به آن است. از این‌رو فرض بارگذاری تناسبی در نظر گرفته شده در این آزمایش‌ها فرض درستی است. همچنین، دیده شد که در حالتی که المان‌های ناحیه گلویی شدن شکل مستطیلی نداشته باشند، مسیرهای کرنش به‌دست آمده غیرخطی خواهند شد که برای نمونه‌هایی نزدیک به حالت کرنش صفحه‌ای این امر مشهودتر است.

با استفاده از معیار آسیب معرفی‌شده به نرم‌افزار و با توجه به تکنیک حذف المان، کرنش‌های شکست نمونه‌های مورد آزمایش را می‌توان از تحلیل عددی فرایند به دست آورد. برای این منظور کرنش‌های صفحه‌ای اولین المانی که از نمونه حذف می‌شود، به‌عنوان کرنش شکست در نظر گرفته می‌شود. به این صورت منحنی حد شکل‌دهی شکست (FFLC) به دست می‌آید.

در "شکل 19" منحنی NFLC و FFLC به دست آمده از تحلیل عددی ارائه شده است. دیده می‌شود که با نزدیک شدن به حالت کشش تک‌محوری و دومحوری اختلاف بیشتری بین گلویی شدن و شکست نهایی در نمونه‌ها وجود دارد و در حالت کرنش صفحه‌ای این اختلاف به کمترین مقدار خود می‌رسد.

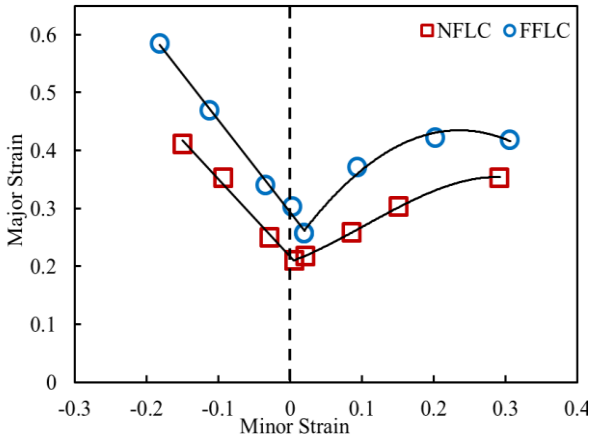

Fig. 19 AA 2024 NFLC and FFLC derived from FE

شکل 19 منحنی NFLC و FFLC ورق آلومینیومی 2024 حاصل از شبیه‌سازی عددی

5-2- منحنی NFLC و FFLC تجربی

بعد از تغییر شکل ورق، دایره‌های حک شده بر روی ورق در ناحیه تغییر شکل، به بیضی تبدیل شده و کرنش‌های حدی گلوئی نمونه‌ها با استفاده از روابط (3) و (4) محاسبه می‌شوند. میانگینی از کرنش‌های حد گلوئی برای هر نمونه محاسبه شده و منحنی NFLC به صورت "شکل 21" به دست می‌آید.

به منظور ترسیم منحنی حد شکل‌دهی براساس شکست می‌توان از روش معکوس استفاده کرد [24]. ارتفاعی که نمونه‌های آزمایش‌های تجربی دچار شکست شده‌اند اندازه‌گیری شده و در جدول 2 ارائه شده است. با استفاده از مدل عددی ساخته و صحه‌گذاری شده، تغییرات کرنش‌های صفحه‌ای در طول حرکت سنبه برای 8 نمونه مورد آزمایش به دست می‌آید. در "شکل 20" نمونه‌ای از این تغییرات برای ورق با عرض 90 میلی‌متر ارائه شده است. در شکل رسم شده برای این هندسه، مشاهده می‌شود که تغییرات کرنش‌های صفحه‌ای یکنواخت و افزایشی است. این روند تغییرات برای نمونه‌های که حالت تنش در ناحیه گلویی آن‌ها به صورت کشش-کشش است برقرار می‌باشد. همچنین در این‌جا فرض می‌شود که شرایط کرنش‌ها در شروع شکست مشابه با نظیر آن‌ها در آزمایش‌های تجربی است.

نتایج به‌دست‌آمده در "شکل 21" ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود کرنش‌های شکست بالاتر از کرنش‌های گلویی شدن قرار دارند و البته این اختلاف قابل ملاحظه است. در واقع این امر نشان دهنده این است که در این جنس بعد از اینکه ورق دچار گلویی شد تا رسیدن به شکست نهایی ماده انعطاف بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

5-3- مقایسه نتایج عددی و تجربی

نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های انجام گرفته برای دو منحنی NFLC و FFLC به ترتیب در "شکل‌های 22 و 23" ارائه شده است.

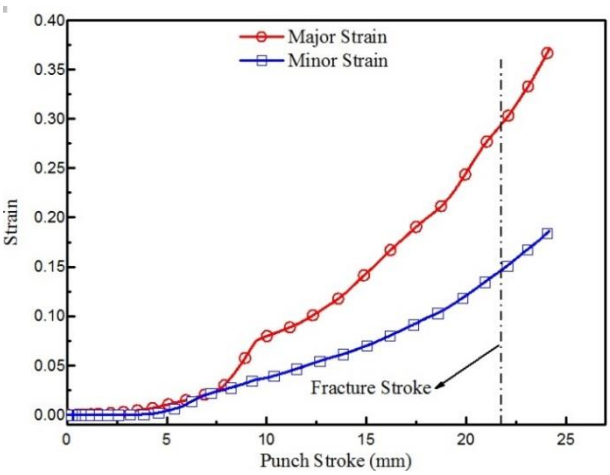

Fig. 20 In-plane strains variation along punch stroke and fracture strains by the inverse method for the W90 specimen

شکل 20 منحنی تغییرات کرنش‌های صفحه‌ای اصلی با جابجایی سنبه و تعیین کرنش شکست به روش معکوس برای نمونه با عرض 90 میلی‌متر

جدول 2 ارتفاع پارگی محاسبه شده از نمونه‌های آزمایش (واحد:mm)

Table 2 Limiting dome height measured from fractured specimens of AA 2024 [unit: mm]

عرض نمونه	120	90	80	60	50	40	30	20
ارتفاع شکست	25.01	21.21	18.36	17.77	19.03	19.80	20.00	19.03

با استفاده از رابطه (21) اختلاف نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای پیش‌بینی منحنی‌های NFLC و FFLC تعیین می‌شود.

$$\text{Error of } \bar{\varepsilon}_f = \left| \frac{\bar{\varepsilon}_f^{\text{FEM}} - \bar{\varepsilon}_f^{\text{Exp}}}{\bar{\varepsilon}_f^{\text{Exp}}} \right| \times 100 \qquad (21)$$

در این رابطه $\bar{\varepsilon}_f^{\text{FEM}}$ کرنش معادل به دست آمده از روش المان محدود و $\bar{\varepsilon}_f^{\text{Exp}}$ کرنش معادل حاصل از آزمایش‌های تجربی است. با استفاده از رابطه (21)، بیشترین مقدار خطای به دست آمده برای منحنی‌های NFLC عدد 6.32% و برای منحنی‌های FFLC عدد 6.87% می‌باشد. اختلاف مقادیر را می‌توان مناسب برای یک مدل عددی معرفی کرد و از این مدل عددی برای بررسی اثر سایر پارامترها بر روی منحنی‌های NFLC و FFLC این آلیاژ آلومینیومی استفاده کرد.

6-نتیجه‌گیری

در این تحقیق منحنی‌های NFLC و FFLC ورق آلومینیومی 2024 با استفاده از آزمون‌های تجربی و نیز شبیه‌سازی با کد المان محدود آباکوس به دست آمد. هندسه‌های مختلف ارائه شده برای ورق و ابعاد قالب طراحی شده، کرنش‌های حدی را در محدوده مناسبی از شرایط تنش کرنش مابین کشش تک‌محوری و دومحوری به دست می‌دهد. همچنین وابستگی کرنش‌های

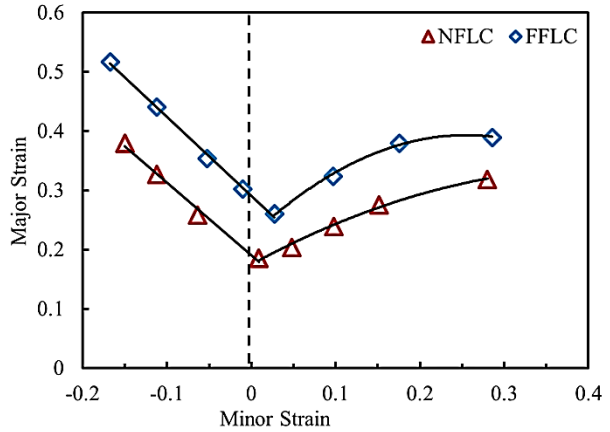

Fig. 21 Experimental NFLC and FFLC of AA 2024

شکل 21 منحنی NFLC و FFLC ورق آلومینیومی 2024 به دست آمده از آزمایش‌های تجربی

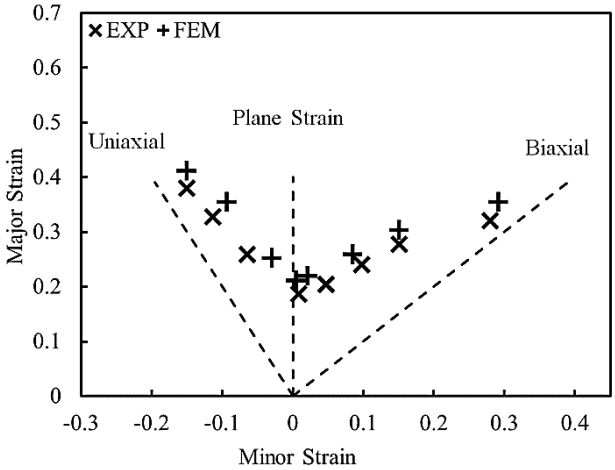

Fig. 22 Comparison of experimental and numerical NFLC

شکل 22 مقایسه منحنی‌های NFLC عددی و تجربی

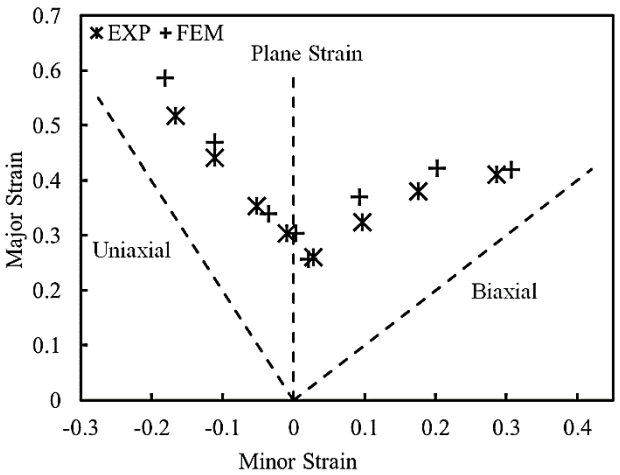

Fig. 23 Comparison of experimental and numerical FFLC

شکل 23 مقایسه منحنی‌های FFLC عددی و تجربی

شکست ماده به تنش سه محوری و پارامتر لود در شرایط مختلف بارگذاری نشان داده شد و به صورت تجربی مقادیر آن‌ها به دست آمد.

- هندسه‌های در نظر گرفته شده برای ورق آلومینیوم 2024، طیف مناسبی از شرایط تنشی و کرنشی در محدوده کشش تک‌محوره تا دومحوری به‌دست آورده است.
- نتایج نشان می‌دهد که در طی آزمایش‌های تجربی، کرنش‌های شکست به‌طور میانگین به اندازه 2.77% بالاتر از کرنش‌های گلویی قرار می‌گیرند.
- نتایج مدل عددی ایجاد شده برای پیش‌بینی کرنش‌های حدی و شکست و مسیر کرنش در نرم‌افزار آباکوس با نتایج آزمایش‌های تجربی صحه‌گذاری شده است و از این مدل می‌توان برای بررسی اثر سایر پارامترهای مؤثر بر روی دو منحنی مورد مطالعه در این مقاله استفاده کرد.
- پیش‌بینی کرنش‌های حدی گلوئی براساس نرخ کرنش بیشینه با بیشترین اختلاف 6.32% انجام گرفته است. این روش پیش‌بینی، در حالتی که شعاع سنبه شکل‌دهی کمتر از حالت استاندارد باشد نیز مورد استفاده قرار گرفته و در مقایسه سایر روش‌ها از دقت و جامعیت[22] بیشتری برخوردار است.
- با استفاده از معیار آسیب پدیدار شناختی و با در نظر گرفتن اثر تنش سه محوره، پارامتر زاویه لود و کرنش پلاستیک معادل، کرنش‌های شکست ورق آلومینیومی 2024 با بیشترین اختلاف 6.87% در مقایسه با نتایج تجربی پیش‌بینی شده است. این دقت پیش‌بینی مناسب درنتیجه‌ی در نظر گرفته شدن شکست برشی درون ضخامتی و اثر پارامتر زاویه لود است.
- نتایج حاصل از مدل عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان می‌دهد، موقعیت و مسیر رشد ترک در مدل عددی به‌درستی پیش شده است.

از مدل عددی توسعه شده می‌توان به عنوان ابزاری جهت بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر روی شکل‌پذیری ورق مانند ضخامت، ناهمسانگردی و نرخ بارگذاری استفاده کرد که در کار آتی مؤلفین مورد توجه قرار خواهد گرفت.

7- فهرست علایم

p	تنش هیدرواستاتیک فشاری (MPa)
q	تنش معادل میزز (MPa)
r	نامتغیر سوم تنش انحرافی
S_i	تنش انحرافی در جهت i (MPa)

علایم یونانی

α	نسبت تنش صفحه‌ای بیشینه به کمینه
β	نسبت کرنش صفحه‌ای بیشینه به کمینه
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	کرنش پلاستیک معادل
ε_i	کرنش صفحه‌ای اصلی در جهت i
η	تنش سه محوری
θ	زاویه لود
σ_i	تنش اصلی در جهت i (MPa)

8- مراجع

[1] S. P. Keeler, Circular Grid System—A Valuable Aid for Evaluating Sheet Metal Formability, SAE Technical Paper, pp. 1-9, 1968.

[2] G. M. Goodwin, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, SAE Technical Paper, pp. 10-18, 1968.

[3] Z. Marciniak, K. Kuczyński, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, No. 9, pp. 609-620, 1967.

[4] Z. Marciniak, K. Kuczyński, T. Pokora, Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 15, No. 10, pp. 789-800, 1973.

[5] Q. Situ, M. K. Jain, M. Bruhis, A suitable criterion for precise determination of incipient necking in sheet materials, material science forum, Vol. 519, pp. 111-116, 2006.

[6] C. Zhang, L. Leotoing, G. Zhao, D. Guines, E. Ragneau, A comparative study of different necking criteria for numerical and experimental prediction of FLCs, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 20, No. 6, pp. 1036-1042, 2011.

[7] H. Mamusi, A. Masoumi, R. Hashemi, R. Mahdavinejad, A novel approach to the determination of forming limit diagrams for tailor-welded blanks, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, No. 11, pp. 3210-3221, 2013.

[8] A. Kami, B. M. Dariani, A. S. Vanini, D. S. Comsa, D. Banabic, Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 216, pp. 472-483, 2015.

[9] K. Kolasangiani, M. Shariati, K. Farhangdoost, Prediction of forming limit curves (FLD, MSFLD and FLSD) and necking time for SS304L sheet using finite element method and ductile fracture criteria, Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME), Vol. 4, No. 2, pp. 121-132, 2015.

[10] M. Zohoor, S. Shahi, M. HoseinpourGollo, An experimental and theoretical investigation for determination of advanced yield criteria parameters and forming limit diagram of Aluminum alloy 2024, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 192-202, 2016. (in Persianفارسی)

[11] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 230, No. 6, pp. 1018-1029, 2016.

[12] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.

[13] M. Habibi, A. Ghazanfari, A. Assempour, R. Naghdabadi, R. Hashemi, Determination of forming limit diagram using two modified finite element models, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 48, pp. 379–388, 2017. (in Persian فارسی)

[14] Y. Li, M. Luo, J. Gerlach, T. Wierzbicki, Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 14, pp. 1858-1869, 2010.

[15] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, K. Pack, New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals, International Journal of Solids and Structures, Vol. 49, No. 25, pp. 3605-3615, 2012.

[16] X. Ma, F. Li, J. Li, Q. Wang, Z. Yuan, Y. Fang, Analysis of forming limits based on a new ductile damage criterion in St14 steel sheets, Materials & Design, Vol. 68, pp. 134-145, 2015.

[17] 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, Vol. 112, pp. 169-184, 2017.
[18] C. Cheng, B. Meng, J. Han, M. Wan, X. Wu, R. Zhao, A modified Lou-Huh model for characterization of ductile fracture of DP590 sheet, Materials & Design, Vol. 118, pp. 89-98, 2017.
[19] I. Barsoum, J. Faleskog, Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, No. 6, pp. 1768-1786, 2007.
[20] Y. Bai, T. Wierzbicki, A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, International Journal of Plasticity, Vol. 24, No. 6, pp. 1071-1096, 2008.
[21] S. J. Hu, Z. Marciniak, J. L. Duncan, Mechanics of Sheet Metal Forming, Second Edition, pp 2.20-2.26, London, Butterworth-Heinemann, 2002.
[22] A. J. Martínez-Donaire, F. J. García-Lomas, C. Vallellano, New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under through-thickness strain gradients, Materials & Design, Vol. 57, pp. 135-145, 2014.
[23] F. Ozturk, D. Lee, Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, No. 1, pp. 247-253, 2005.
[24] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, No. 1, pp. 81-98, 2004.