

منحنی حد شکل دهی و منحنی حد پارگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله های آلومینیومی

سیدجلال هاشمی^۱، حسن مسلمی نائینی^۲ و غلامحسین لیاقت^۳ حامد دیلمی عضدی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اراک

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۱۱)

چکیده

ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله از مهم ترین عیوب به شمار می رود که پیش بینی وقوع آن می تواند به طراحی بهتر فرآیند کمک کند. هدف از این مقاله، بررسی کاربرد معیارهای شکست نرم برای پیش بینی عیب ترکیدگی و همچنین منحنی حد شکل دهی و حد پارگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله می باشد. معیارهای شکست نرم مختلفی کالیبره شده و در شبیه سازی به کار گرفته شده اند تا بهترین معیار برای پیش بینی زمان و محل ترکیدگی لوله شناخته شود. یک دستگاه بالچ آزاد با طول بالچ ثابت و قابلیت اعمال تغذیه محوری نیز برای بررسی صحت نتایج عددی ساخته شده است. برای انجام آزمایش بالچ آزاد و به دست آوردن منحنی حد شکل دهی تحت شرایط نسبت کرنش ثابت در حالت دو محوری مسیرهای بارگذاری تغییر فشار داخلی و تغذیه محوری ایجاد شده اند. با به کارگیری مسیرهای بارگذاری و معیارهای شکست، منحنی حد شکل دهی و پارگی به دست آمده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. منحنی حد شکل دهی پیش بینی شده به وسیله معیارهای شکست نرم با پیش بینی مدل مارسینیاک-کوچینزکی نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد معیارهایی که تأثیر سه محوره بودن تنش را در پیش بینی شکست در نظر می گیرند، برای فرآیند هیدروفرمینگ مناسب تر می باشند. پیش بینی معیارهای آيادا و رایس بهترین تطابق را با نتایج تجربی دارا می باشد.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، منحنی حد شکل دهی، معیار شکست نرم

Forming Limit Curve at Neck and Forming Limit Curve at Fracture in Hydroforming of Aluminum Tubes

S.J. Hashemi, H. Moslemi Naeini and G. H. Liaghat

Department of Mechanical Engineering
Tarbiat Modares University

H. Deylami Azodi

Department of Mechanical Engineering
Arak University of Technology

(Received: 10 June, 2013; Accepted: 02 September, 2013)

ABSTRACT

Bursting is the most important defect in tube hydroforming. Prediction of bursting can help to design the process. Aim of this paper is the application of ductile fracture criteria for prediction of bursting, forming limit curve at neck and forming limit curve at fracture in tube hydroforming process. Different ductile fracture criteria have been calibrated and applied in simulation to identify the best criterion for prediction of fracture zone. A free bulge setup has been manufactured to verify the simulation results. This setup has fixed bulging length and the ability of applying axial feed. To bulge the tube under fixed strain ratio, different loading curves (internal pressure versus axial feed) have been created. Using loading curves and prediction of ductile fracture criteria, FLCN and FLCF have been obtained and compared with experimental ones. Predicted FLCN using ductile fracture criteria have been compared with M-K Model too. Results show that the criteria which consider the effect of stress triaxiality on the prediction of fracture are more appropriate for tube hydroforming. Prediction of Ayada's criterion and Rice's criterion have the best conformity with the experimental results.

Keywords: Tube Hydroforming, Forming Limit Curve, Ductile Fracture Criteria

۱- دانشجوی دکتری: J_hashemi@modares.ac.ir

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): moslemi@modares.ac.ir

۳- استاد: ghlia530@modares.ac.ir

۴- استادیار: h.d.azodi@iustarak.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ، قطعات یکپارچه لوله‌ای شکل را در یک مرحله و با نسبت استحکام به وزن بالا، تولید می‌کند. در این فرآیند، قطعه اولیه یک لوله ساده مستقیم یا با خم می‌باشد. با اعمال فشار سیال به داخل لوله و اعمال نیروی محوری به دو انتها، لوله تغییر شکل داده و شکل داخلی قالبی را که در آن قرار دارد به خود می‌گیرد. بالچ آزاد لوله، فرآیندی است که برای تعیین مقدار هیدروفرم‌پذیری لوله‌ها انجام می‌شود. مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی زیادی بر روی شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفرمینگ صورت گرفته است. احمد و هشمی [۱] یک روش تحلیل برای برآورد پارامترهای مانند فشار، نیروی محوری و نیروی کلمپ در فرآیند بالچ ارائه دادند. آنها همچنین اصولی را برای طراحی قالب‌ها و ابزار مطرح کردند. سوکولوسکی^۱ و همکارانش [۲] روشی تحلیلی- تجربی برای به دست آوردن منحنی تنش- کرنش از طریق آزمایش بالچ آزاد توسعه دادند. یک مدل ریاضی برای تغییر شکل پلاستیک لوله حین فرآیند بالچ توسط هوانگ و لین^۲ [۳] ارائه شد. آنها در این مدل سطح لوله را به صورت بیضی گون فرض کردند و اثر نازک‌شدگی غیریکنواخت در محل بالچ و اصطکاک بین لوله و قالب را نیز در نظر گرفتند. زینگ و ماکینوچی^۳ [۴] مسیر تغییر شکل بهینه را برای لوله‌های همسانگرد و غیرهمسانگرد تحت فشار داخلی و تغذیه محوری به دست آوردند. در مطالعه آنها تأثیر مسیر تغییر شکل، خواص ماده و نسبت طول به قطر فعال بر روی نحوه شروع و توسعه چروکیدگی مورد بررسی قرار گرفت. دونالد و هشمی^۴ [۵] شبیه‌سازی سه‌بعدی بالچ آزاد لوله را تحت تأثیر فشار داخلی یک واسطه سخت مورد بررسی قرار دادند و تأثیر تغییر ضریب اصطکاک بین واسطه و لوله را بر روی فرآیند آزمایش کردند. کیم^۵ و همکارانش [۶] برای پیش‌بینی ترکیدگی در بالچ آزاد، این فرآیند را شبیه‌سازی کردند. آنها به این منظور، از معیار شکست نرم اویانه براساس تابع پتانسیل درجه دوم هیل استفاده کردند. در این مطالعه، تأثیر خواص ماده در ناحیه جوش نیز در نظر گرفته شد.

سانگ^۶ و همکارانش [۷] برای پیش‌بینی شروع گلوبی شدن در فرآیند بالچ از معیار سوئیفت و معیار شکست نرم کوکرافت و لاتهام استفاده کردند. هوانگ^۷ و همکارانش [۸] با اندازه‌گیری همزمان فشار داخلی و ارتفاع بالچ در بالاترین نقطه، یک مدل تحلیلی جدید برای به دست آوردن خواص مکانیکی لوله ارائه دادند. یوشیدا و کوابارا^۸ [۹] وابستگی منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های فولادی را به مسیر کرنش برای مسیرهای تنشی خطی و ترکیبی به‌وسیله یک دستگاه کشش- فشار مورد بررسی قرار دادند. جانسون^۹ و همکارانش [۱۰] در مقاله‌ای، همه روش‌های عددی و تحلیلی به دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی را مورد مطالعه قرار داده و برای یک قالب مخروطی به کار گرفتند. فرجی و همکارانش [۱۱] شکل‌دهی بی‌لوزهای فلزی را به روش هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار دادند. در این فرآیند ابتدا لوله هیدروفرم شده و سپس تحت فولدینگ قرار می‌گیرد. الیاسی و همکارانش [۱۲] یک قالب جدید را برای تولید قطعه پله‌ای با گوشه تیز و از جنس فولاد زنگ‌نزن با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ لوله طراحی کردند. با استفاده از قالب جدید یک قطعه با توزیع ضخامت یکنواخت تولید شد. افتخاری شهری و همکارانش [۱۳] تأثیر ارتعاش بدنه قالب را بر روی توزیع ضخامت محصول مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ارتعاش می‌تواند باعث بهبود ضخامت محصول شود، به شرطی که دامنه مناسبی برای ارتعاشات انتخاب شود. ملک‌زاده فرد و همکارانش [۱۴] تولید یک قطعه چهار راهی کامپوزیتی سه‌لایه با استفاده از هیدروفرمینگ را شبیه‌سازی کردند. لایه میانی کامپوزیت از فوم آلومینیوم بود و نشان داده شد که فشار نوسانی به بهبود توزیع ضخامت قطعه کمک می‌کند.

هدف مقاله حاضر انتخاب یک معیار شکست نرم مناسب برای پیش‌بینی عیب ترکیدگی منحنی حد شکل‌دهی و پارگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله می‌باشد. به این منظور، ابتدا معیارهای شکست نرم که دارای یک ثابت می‌باشند، معرفی شده‌اند. در مرحله بعد، آزمایش بالچ لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA ۶۰۶۵ در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده و مسیرهای بارگذاری فشار

6- Song

7- Hwang

8- Yoshida And Kuwabara

9- Jansson

1- Sokolowski

2- Hwang And Lin

3- Xing And Makinouchi

4- Donald And Hashmi

5- Kim

همسانگرد می‌تواند برحسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان شود. معیار انرژی یا کار پلاستیک کلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = C_2, \quad (3)$$

که در آن، $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر، $d\bar{\epsilon}$ جزء کرنش مؤثر، $\bar{\epsilon}_f$ کرنش مؤثر در لحظه شکست و C_2 مقدار بحرانی معیار شکست می‌باشد. در حالت ساده آزمون کشش تک‌محوری، مقدار C_2 برای معیار انرژی برابر با سطح زیر منحنی تنش حقیقی برحسب کرنش حقیقی خواهد بود. در این معیار، شکل گلوبی تأثیری بر کرنش شکست ندارد.

۲-۳- معیار کوکرافت و لاتهام

کوکرافت و لاتهام^۲ [۱۷] معیار شکستی بر مبنای نرمی حقیقی یا کرنش طبیعی در زمان شکست پیشنهاد کردند. مطابق این معیار، شکست در مواد نرم زمانی رخ می‌دهد که معادله (۴) برقرار شود.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_3 \quad (4)$$

که در آن، σ^* بزرگ‌ترین تنش اصلی کششی است.

۲-۴- معیار آه

شکل بدون بعد شده معیار کوکرافت و لاتهام توسط آه^۳ و همکاران [۱۸] به صورت زیر ارائه شده است. در این معیار تأثیر هر دو متغیر $\bar{\sigma}$ و σ^* در نظر گرفته شده است.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_5. \quad (5)$$

۲-۵- معیار آیادا

آیادا^۴ [۱۹] معیاری را توسعه داد که در آن، تأثیر تنش هیدرواستاتیک یا تنش میانگین (σ_m) نیز در شروع شکست در نظر گرفته شده است. در واقع، این معیار با جایگزینی σ_m به جای σ^* در معیار آه به دست آمده است.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_5. \quad (6)$$

داخلی و تغذیه محوری برای ایجاد مسیر کرنش خطی دوماحوری روی لوله به دست آمده‌اند. سپس با استفاده از این مسیرهای بارگذاری و معیارهای شکست نرم، منحنی حد شکل‌دهی و حد پارگی به دست آمده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- معیارهای شکست نرم

به منظور انتخاب بهترین معیار شکست نرم برای پیش‌بینی ترکیدگی در فرآیند بالج آزاد، هفت معیار مورد بررسی قرار گرفته است. این معیارها براساس متغیرهای گوناگونی مانند کرنش پلاستیک، تنش هیدرواستاتیک، بیشینه تنش اصلی و از این قبیل شکست را پیش‌بینی می‌کنند.

۲-۱- معیار کرنش پلاستیک معادل

در این معیار فرض می‌شود وقتی که مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ای به مقدار بحرانی C_1 رسید، شکست رخ خواهد داد.

$$\bar{\epsilon}_p = C_1. \quad (1)$$

مقدار کرنش پلاستیک معادل برای یک ماده تراکم‌ناپذیر با رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\bar{\epsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p} \quad (2)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{9} ((\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2)}$$

در این رابطه، ϵ_{ij}^p مؤلفه‌های تانسور کرنش پلاستیک و ϵ_1, ϵ_2 و ϵ_3 کرنش‌های پلاستیک اصلی می‌باشند [۱۵].

۲-۲- معیار فرودنتال

فرودنتال^۱ [۱۶] پیشنهاد کرد که آغاز و انتشار شکست در ماده به سطح انرژی کرنشی، که نمی‌تواند پیش از آزاد شدن در اثر ایجاد جدایش در ماده، به صورت گرما تلف شود، بستگی دارد. در واقع، شکست راهکار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزاد شدن برمی‌گزیند. بنابراین، معیار شکست می‌تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقدار بحرانی برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه شکست تعریف نماید. در نتیجه، معیار شکست برای مواد

2- Cockroft and Latham

3- Oh

4- Ayada

1 - Freudenthal

۲-۶- معیار بروزو

وابستگی کرنش شکست به دو پارامتر بزرگ‌ترین تنش اصلی کششی و تنش هیدرواستاتیکی با بهبود تجربی معیار کوکرافت توسط بروزو^۱ و همکاران [۲۰] مطرح گردید.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{2\sigma^*}{3(\sigma^* - \sigma_m)} d\bar{\epsilon} = C_6. \quad (7)$$

۲-۷- معیار رایس و تریسی

رایس و تریسی^۲ [۲۱] با مطالعه رشد حفره‌های کروی در ماده صلب- پلاستیک، معیاری برای پیش‌بینی شکست نرم پیشنهاد نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش هیدرواستاتیکی کششی، شکست نرم به سرعت رخ خواهد داد.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \exp\left(\frac{a\sigma_m}{\sigma}\right) d\bar{\epsilon} = C_7. \quad (8)$$

بر اساس تئوری، $a = 1.5$ خواهد بود.

۳- تعیین خواص ماده

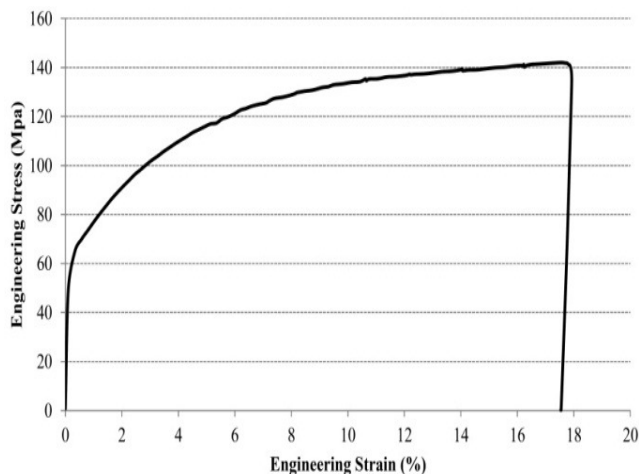
در مقاله حاضر، تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA6065 مورد بررسی قرار گرفته که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. لوله‌های مورد آزمایش، دارای قطر خارجی ۴۰ و ضخامت اولیه ۱/۵ میلی‌متر می‌باشند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی لوله.

Al	Mg	Si	Fe	Zn	Cu
Base	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۰۶
Mn	Pb	Ti	Sn	Ni	Ga
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲	۰/۰۱

نمونه کشش در راستای طولی لوله بر طبق استاندارد ASTM-E8M تهیه شده و آزمون کشش تک‌محوری بر روی آن، به‌وسیله دستگاه کشش انجام شده است. منحنی تنش-کرنش مهندسی به‌دست آمده در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای به‌دست آوردن دقیق ثوابت معیارهای شکست، آزمایش کشش

تک‌محوری شبیه‌سازی شده است. کشش نمونه در شبیه‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد تا کرنش اصلی بیشینه در یک المان به مقدار کرنش شکست در حالت تجربی برسد [۲۲]. بیشینه کرنش اصلی حقیقی اندازه‌گیری شده با آزمایش کشش برابر ۰/۱۷۲ می‌باشد. در آزمایش کشش تک‌محوری و در زمانی که گلوپی شدن در نمونه کشش شروع به رخ دادن می‌کند، در ناحیه گلوپی تنش از حالت تک‌محوری خارج شده و حالت سه‌محوری پیدا می‌کند. به‌همین دلیل مقدار تنش معادل به‌دست آمده از کشش تک‌محوری در نزدیکی شکست نمونه صحیح نمی‌باشد. به‌منظور دقیق کردن نتایج آزمایش کشش شبیه‌سازی شده و مقادیر تنش حقیقی وارد شده به نرم‌افزار در نزدیکی شکست طوری تغییر داده می‌شود تا منحنی نیرو- جابه‌جایی در شبیه‌سازی و حالت عملی برابر شود [۲۳].



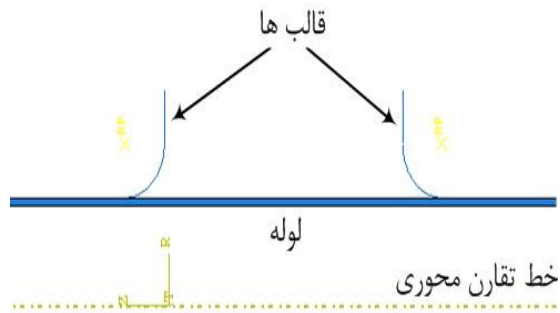
شکل (۱): منحنی تنش-کرنش مهندسی ماده.

شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌محوری در نرم‌افزار ABAQUS و با ابعاد منطبق بر نمونه تجربی و شرایط یکسان بارگذاری با المان‌های نوع C3D8R انجام شده است. برای اطمینان از نتایج، شبیه‌سازی منحنی نیرو- جابه‌جایی با حالت تجربی مقایسه می‌شود. در صورت تطابق منحنی نیرو- جابه‌جایی در نمونه تجربی و شبیه‌سازی، با استفاده از مقادیر تنش و کرنش در المانی که به کرنش شکست رسیده، مقادیر ثوابت معیارهای شکست به‌دست می‌آیند. ثوابت معیارهای شکست معرفی شده در جدول ۲ آمده است. همچنین شکل ۲، نمونه کشش را در حالت تجربی و شبیه‌سازی نمایش می‌دهد.

1 -Brozzo

2 -Rice and Tracey

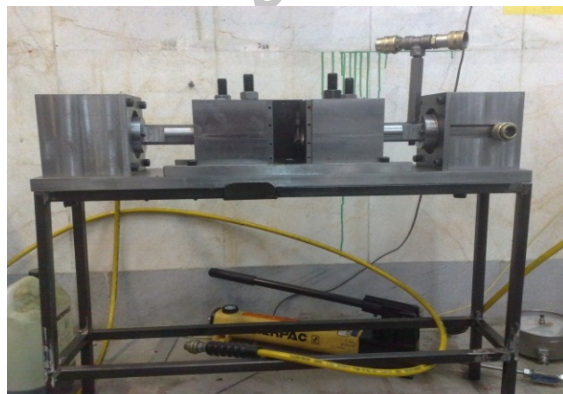
کرنش در هنگام ترکیدگی به کمک معیارهای شکست انجام شده است. منحنی تنش-کرنش حقیقی ماده به نرم‌افزار معرفی شد. به علت هندسه لوله و قالب‌ها، شبیه‌سازی به صورت تقارن محوری انجام شده است. قالب‌ها به صورت سطح صلب مدل شده و ضریب اصطکاک بین قالب و لوله ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و برای مدل کردن لوله از المان نوع CAX4R استفاده شده است. فاصله بالچ بین قالب‌ها ۶۰ میلی‌متر و شعاع گوشه قالب‌ها ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. مدل شبیه‌سازی بالچ آزاد در شکل ۴ نشان داده شده است. فشار سیال در شبیه‌سازی با فشار یکنواخت سطحی جایگزین شده است.



شکل (۴): مدل شبیه‌سازی بالچ آزاد لوله.

۵- دستگاه بالچ آزاد لوله

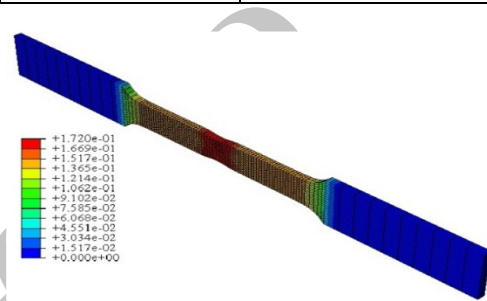
به منظور انجام بالچ آزاد لوله‌های آلومینیومی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف و به دست آوردن حداکثر ارتفاع بالچ و منحنی حد شکل‌دهی و پارگی، یک دستگاه با قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیه محوری ساخته شد. دستگاه مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): شکل دستگاه بالچ آزاد لوله.

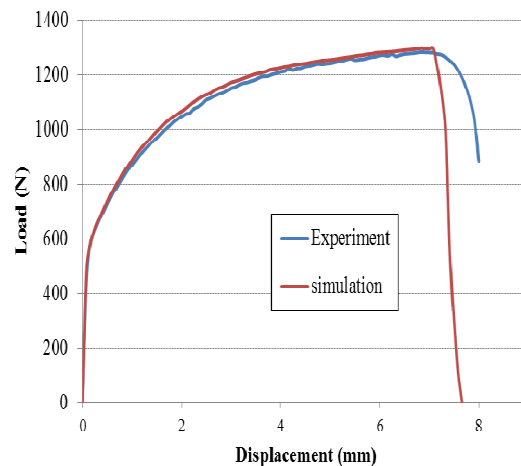
جدول (۲): ثوابت معیارهای شکست.

معیار شکست نرم	ثابت
کرنش پلاستیک	$C_1 = 0.1724$
فرودنتال	$C_2 = 23/185$
کوکرافت و لاتهام	$C_3 = 23/167$
اُه	$C_4 = 0.1715$
آیادا	$C_5 = 0.05707$
بروزو	$C_6 = 0.1715$
رایس و تریسی	$C_7 = 0.2835$



شکل (۲): نمونه کشش.

مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمون کشش در شبیه‌سازی و حالت تجربی در شکل ۳، تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

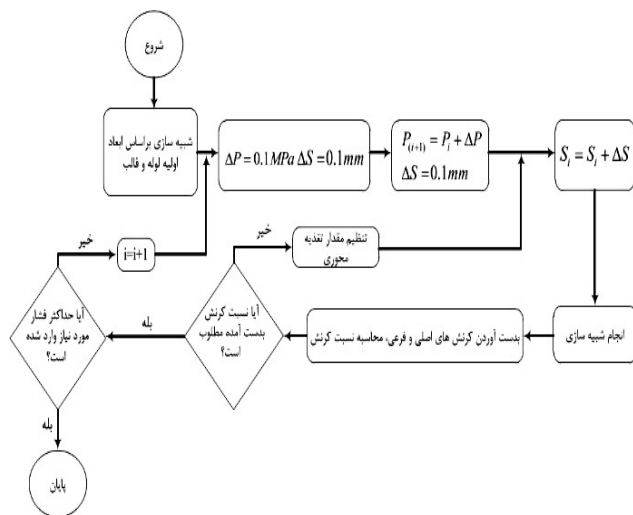


شکل (۳): مقایسه منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی و تجربی.

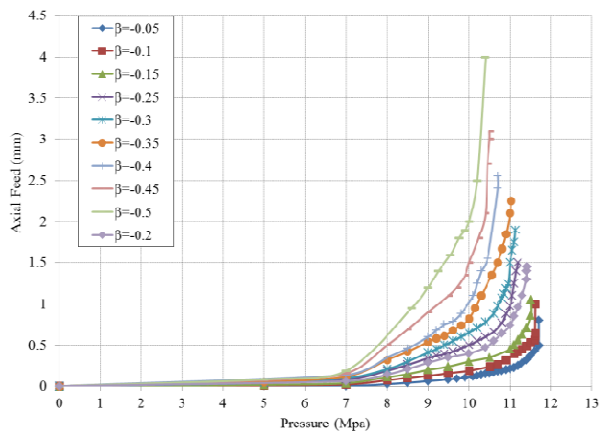
۴- شبیه‌سازی بالچ آزاد لوله

شبیه‌سازی فرآیند بالچ آزاد لوله در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به منظور به دست آوردن حداکثر مقدار بالچ و مقادیر

۷ نشان داده شده است. در مقادیر کمتر نسبت کرنش، تغذیه محوری بیشتری مورد نیاز است.



شکل (۶): الگوریتم ثابت نگهداشتن نسبت کرنش.



شکل (۷): منحنی های بارگذاری برای ایجاد نسبت کرنش خطی.

با انجام شبیه سازی بالچ آزاد لوله تحت منحنی های بارگذاری به دست آمده، زمان ترکیدگی توسط معیارهای مختلف شکست نرم معرفی شده، پیش بینی شده است. به این منظور، مقادیر توابع معیارهای شکست نرم در نقطه حداکثر بالچ لوله که بیشترین احتمال ترکیدگی را دارد، به دست آمده و با مقدار ثابت مربوط به آن معیار مقایسه می شود. به این ترتیب، اگر نسبت دو مقدار معیار شکست و ثابت آن بالاتر از یک شود، شکست پیش بینی خواهد شد. شکل ۸ نمونه ای از پیش بینی معیارها را نمایش می دهد که معیار کرنش شکست زودتر از بقیه معیارها ترکیدگی

فشار داخلی به وسیله فشارسنج و تغذیه محوری به وسیله یک LVDT کنترل می شود. تغذیه محوری توسط جک های هیدرولیکی در دو طرف انجام می شود. برای اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری، از دو پمپ هیدرولیکی استفاده شده است.

۶- نتایج و بحث

منحنی حد شکل دهی، از روش های مختلفی که شامل روش تئوری و تجربی است، به دست می آید. وجه مشترک همه این روش ها در این است که، مسیر تغییرات کرنش در دو راستای اصلی و فرعی ($\beta = \text{constant}$) خطی فرض می شود. در حل اجزای محدود، اگر بارگذاری که شامل فشار داخلی و تغذیه محوری است به صورت خطی وارد شود، لزوماً منجر به مسیر کرنش (معادله ۹) خطی نخواهد شد. به همین منظور باید بارگذاری به صورت پله ای و غیر خطی وارد شود تا مسیر کرنش خطی به دست آید. کرنش محیطی (ϵ_θ)، کرنش ضخامتی (ϵ_t) و کرنش طولی (ϵ_l)، به ترتیب از معادلات (۱۰-۱۲) به دست می آیند.

$$\beta = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_\theta}, \quad (9)$$

$$\epsilon_\theta = \ln(D/D_0), \quad (10)$$

$$\epsilon_t = \ln(t/t_0), \quad (11)$$

$$\epsilon_l = -(\epsilon_\theta + \epsilon_t), \quad (12)$$

که در این روابط، D و D_0 به ترتیب قطر اولیه لوله و قطر لوله در لحظه ترکیدگی، t و t_0 به ترتیب ضخامت لوله در زمان ترکیدگی و ضخامت اولیه لوله می باشند. در این راستا باید برای هر مسیر کرنشی یک نسبت ثابت در نظر گرفت و با تغییر جزئی در مقادیر بارگذاری از تغییر این نسبت کرنش جلوگیری کرد. برای رسیدن به این هدف، مقدار فشار داخلی در هر پله مقداری ثابت در نظر گرفته می شود و مقدار تغذیه محوری طوری تنظیم می شود تا مسیر کرنش خطی در محل بیشترین بالچ به دست آید.

شکل ۶ الگوریتم این روش را نمایش می دهد. S و P به ترتیب نشان دهنده مقدار تغذیه محوری دو انتهای لوله و فشار داخلی می باشند.

با به کار گرفتن الگوریتم معرفی شده در شبیه سازی، منحنی بارگذاری در نسبت کرنش های مختلف به دست آمده که در شکل

المانی که دچار شکست است، محاسبه می‌شوند. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در کار تجربی نیز یک طرح شبکه‌ای دایره‌ای منظم با قطر دو میلی‌متر بر روی آن حک شده که پس از تغییر شکل، با اندازه‌گیری قطر دایره‌ها در راستای طولی و محیطی لوله کرنش‌ها به‌دست آمده‌اند. نمونه‌های تجربی و طرح شبکه‌ای اندازه‌گیری کرنش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



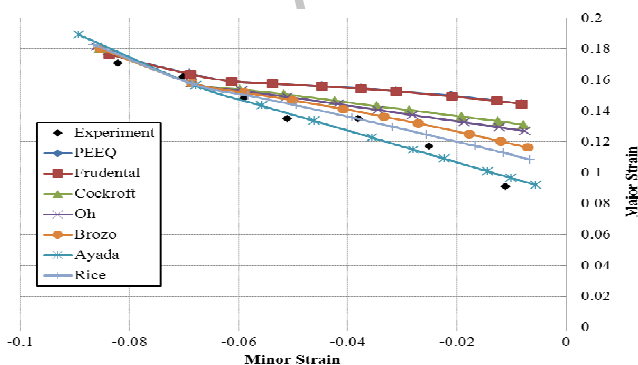
شکل (۱۰): نمونه‌های تجربی.

تغییر شکل دایره‌ای حک‌شده بر روی لوله بعد از فزاینده‌ی بالچ، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



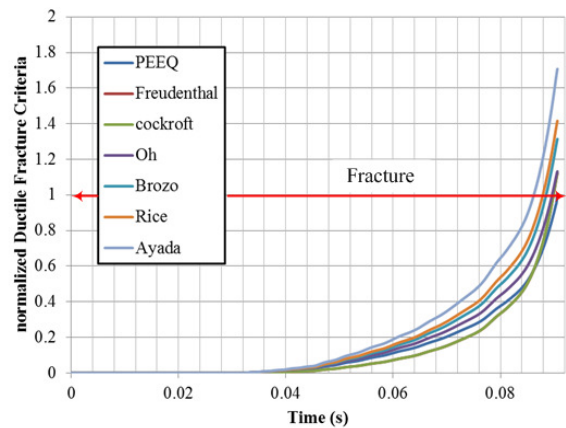
شکل (۱۱): تغییر اندازه دایره‌های حک شده بر روی لوله.

در شکل ۱۲ نمودارهای حد پارگی پیش‌بینی شده توسط معیارهای شکست نرم کرنش با نتایج تجربی مقایسه شده است.



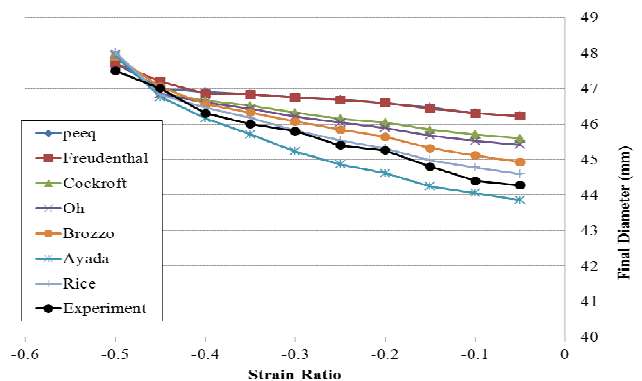
شکل (۱۲): منحنی حد پارگی پیش‌بینی شده با معیارهای شکست نرم.

را پیش‌بینی کرده و معیار آیادا دیرتر از بقیه معیارها وقوع شکست را پیش‌بینی کرده است.



شکل (۸): پیش‌بینی زمان وقوع ترک‌گذاری لوله به‌وسیله معیارهای شکست نرم.

شکل ۹ قطر نهایی لوله را که توسط معیارهای مختلف پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌دهد. با افزایش تغذیه محوری، ماده راحت‌تر به ناحیه بالچ لوله رسیده و نازک‌شدگی و درنهایت ترک‌گذاری دیرتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه، ارتفاع بالچ افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بهترین پیش‌بینی را برای حداکثر ارتفاع بالچ معیار رایس داشته است. اما معیارهای کرنش شکست و فرودنتال در نسبت کرنش‌های پایین اختلاف زیادی با نتایج تجربی دارند.

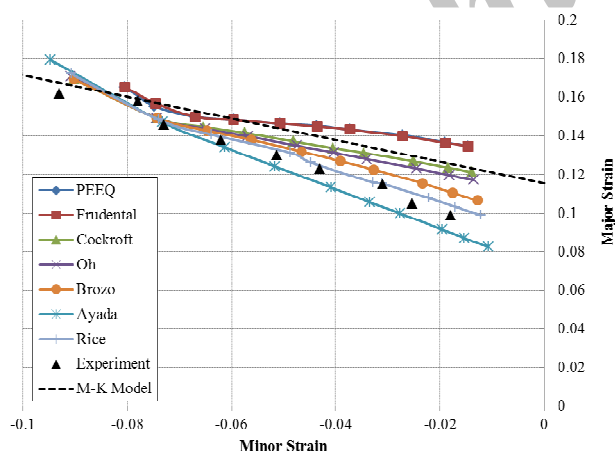


شکل (۹): پیش‌بینی حداکثر ارتفاع بالچ توسط معیارهای شکست.

برای به‌دست آوردن منحنی حد پارگی طبق پیش‌بینی معیارهای شکست نرم، مقدار کرنش‌های محیطی و طولی در

منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده به‌وسیله معیارهای شکست نرم همراه با پیش‌بینی مدل مارسینیاک-کوچینزکی [۲۴] در شکل ۱۴ با نتایج تجربی مقایسه شده است. مدل مارسینیاک نسبت به نتایج تجربی فاصله زیادی دارد و در واقع شکل‌پذیری بیش از حد را برای لوله پیش‌بینی کرده است. در اینجا نیز معیارهای کرنش شکست و فرودنتال پیش‌بینی خوبی ندارند. به‌دلیل اینکه گلوبی شدن قبل از پارگی رخ می‌دهد، مقادیر کرنش در منحنی حد شکل‌دهی پایین‌تر از مقادیر کرنش در منحنی حد پارگی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر منحنی حد شکل‌دهی خیلی زیادی با منحنی حد پارگی ندارند. این مسئله را می‌توان از آزمایش کشش تک‌محوری ماده نیز توجه شد که بعد گلوبی شدن تا پارگی، نمونه کرنش زیادی را تحمل نمی‌کند. در اینجا نیز بهترین پیش‌بینی به‌وسیله معیارهای رایس و آیدا صورت گرفته است.

معیارهایی که تأثیر سه‌محوره بودن تنش یعنی نسبت تنش میانگین به تنش مؤثر را در شکست در نظر گرفته‌اند، بهترین پیش‌بینی را برای زمان و مکان وقوع شکست در بالچ لوله‌های آلومینیومی داشته‌اند. نزدیک بودن معیار به‌روز و به نتایج تجربی این موضوع را تأیید می‌کند. در پژوهش‌های پیشین بر روی پیش‌بینی شکست نرم ماده نیز به تأثیر زیاد این پارامتر بر به‌وجود آمدن ترک و رشد آن تأکید شده است [۲۷-۲۵].

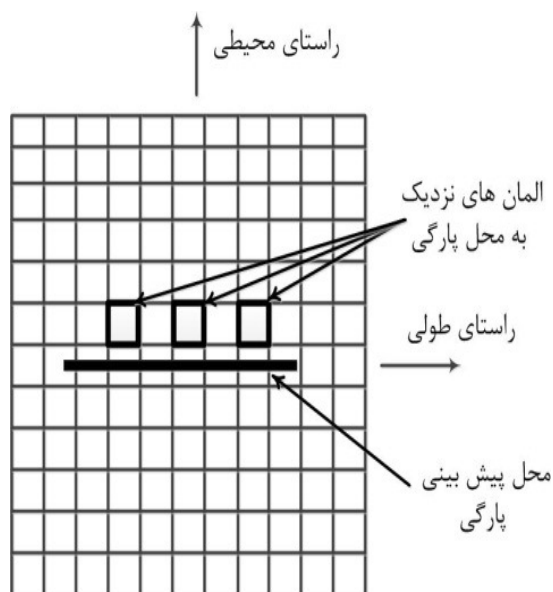


شکل (۱۴): منحنی‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده به‌وسیله معیارهای شکست نرم.

۷- نتیجه‌گیری

منحنی حد شکل‌دهی و پارگی لوله‌های آلومینیومی با آلیاژ AA ۶۰۶۳ به‌کمک معیارهای شکست نرم پیش‌بینی شد. ثوابت

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌بینی دو معیار ذکر شده اختلاف خیلی زیادی با نتایج تجربی دارد. این دو معیار مقادیر کرنش منحنی حد پارگی را بسیار نزدیک به هم پیش‌بینی کرده‌اند. دلیل این شباهت نتایج را می‌توان مرتبط به افزایش بودن کرنش و استفاده از سطح تسلیم فون میسر دانست. چون برای استخراج ثوابت معیارهای شکست نیز از معیار فون میسر استفاده شده، هنگامی که کرنش پلاستیک ماده افزایش می‌یابد، تنش نیز مطابق با آن کرنش از روی منحنی تنش کرنش بالا می‌رود، در نتیجه سطح زیر منحنی تنش-کرنش المانی که به کرنش شکست رسیده تقریباً برابر با ثابت معیار فرودنتال خواهد شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه معیارها در محدوده کرنش طولی ۰/۰۷- پیش‌بینی برابری دارند. در این حالت کرنشی، تنش‌ها در صفحه حالت تک‌محوری پیدا می‌کند. در نتیجه چون حالت تنش شبیه آزمایش کشش تک‌محوری می‌باشد و ثوابت معیارهای شکست از نتیجه آزمایش کشش به‌دست آمده، پیش‌بینی همه معیارها تقریباً برابر است. پیش‌بینی هیچکدام از معیارهای شکست نرم به‌طور کامل با نتایج تجربی تطابق ندارد ولی معیارهای آیدا و رایس بهترین پیش‌بینی را داشته‌اند. برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی، کرنش‌های محیطی و طولی المان‌های کناری المانی که در آن شکست پیش‌بینی شده، محاسبه گردیده است. در واقع، این المان‌ها به‌عنوان نقاط بروز گلوبی در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱۳، نحوه در نظر گرفتن المان‌های مذکور در صفحه را نمایش می‌دهد.



شکل (۱۳): محل قرار گرفتن المان‌های گلوبی.

- Aluminium Extrusions”, *J. Materials Proc. Tech.* Vol. 195, No. 1, pp. 3–14, 2008.
11. Faraji, G., Kashanizadeh, H., Mosavi, M., and Besharati, M.K. “Experimental and Finite Element Analysis of Metal Bellows Manufacturing”, *Aero. Mech J.* Vol. 2, No. 2, pp. 41-49, 2006 (In Persian).
 12. Elyasi, M., Zoghipour, P., Bakhshi, M., and Gorji, A.H. “Analysis of Geometry and Thickness Distribution in a New Hydroforming Die for Cylindrical Stepped Tubes”, *J. Applied and Computational Sci. in Mech.*, Vol. 2, No. 1, pp. 47-57, 2010 (In Persian).
 13. Eftekhari Shahri, S.E., Ahmadi Brooghani, S.Y., Khalili, K., and Kang, B. S. “Ultrasonic Tube Hydroforming A numerical and analytical Study”, *J. Modares Mech. Eng.*, Vol. 13, No. 4, pp. 46-59 2013 (In Persian).
 14. Malek Zadeh Fard, K., Shahbazi-Karami, J. and Payganeh, G. H. “Effect of Geometrical and Physical Parameters on Hydro-Forming of a New Three-Layered Composite Tube with Finite Element Simulation”, *Aero.Mech.J.* Vol. 9, No. 3, pp. 19-29, 2013 (In Persian).
 15. Hambli, R., and Reszka, M. “Fracture Criteria Identification Using an Inverse Technique Method and Blanking Experiment”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, No. 7, pp. 1349–1361, 2002.
 16. Freudenthal, A.M. “The Inelastic Behavior of Engineering Materials and Structures”, Published by Wiley, New York, 1950.
 17. Cockroft, M.G. and Latham, D.J. “Ductility and Workability of Metals”, *J. the Institute of Metals*, Vol. 96, No. 1, pp. 33-39, 1968.
 18. Oh, S.I., Chen, C. C. and Kobayashi, S. “Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing”, *J. Eng. Ind. Trans. ASME*, Vol. 101, No. 1, pp. 36-44, 1979.
 19. Ayada, M., Higashino, T., and Mori, K. “Central Bursting in Extrusion of Inhomogeneous Materials”, *Adv. Technol. Plast.*, Vol. 1, No. 1, pp. 553-558, 1987.
 20. Brozzo, P., De Luca, B., and Rendina, R. “A New Method for the Prediction of Formability in Metal Sheets”, *Proc. of the 7th Biennial Conf. Int. Deep Drawing Research Group*, 1972.
 21. Rice, J.R. and Tracey, D. M. “On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields”, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 17, No. 3, pp. 201-217, 1969.
 22. Zhan, M., Gu, C., Jiang, Z., Hu, L., and Yang, H. “Application of Ductile Fracture Criteria in Spin-Forming and Tube-Bending Processes”, *Computational Materials Sci.*, Vol. 47, No. 2, pp. 353–365, 2009.
 23. Yingbin, B., and Wierzbicki, T. “A Comparative Study on Various Ductile Crack Formation Criteria”, *J. Eng. Materials and Tech.* 126, No. 3, pp. 314-324, 2004.
 24. Marciniak, Z. and Kuczynski, K. “Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal”, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 9, No. 9, pp. 609–612, 1967.
- معیارهای شکست از شبیه‌سازی آزمایش کشش تک‌محوری به‌دست آمدند. فرآیند بالج آزاد لوله شبیه‌سازی شده و منحنی‌های باگذاری برای ایجاد نسبت کرنش ثابت بر روی لوله طراحی شد. یک دستگاه بالج آزاد ساخته شده و نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. پیش‌بینی همه معیارها در حالت تنشی که در صفحه حالت تک‌محوری داشته باشد، با هم برابر است. معیارهای شکستی که در آنها تأثیر سهم‌محوره بودن تنش در نظر گرفته شده شامل معیار آيادا و معیار رایس بهترین پیش‌بینی را داشتند.

۸- مراجع

1. Ahmed, M. and Hashmi, M.S.J. “Estimation of Machine Parameters for Hydraulic Bulge Forming of Tubular Components”, *J. Materials Proc. Tech.* Vol. 64, No. 1, pp. 9–23, 1997.
2. Sokolowski, T., Gerke, K., Ahmetoglu, M., and Altan, T., “Evaluation of Tube Formability and Material Characteristics: Hydraulic Bulge Testing of Tubes”, *J. Materials Proc. Tech.*, Vol., No. 1, pp. 34-40, 2000.
3. Hwang, Y. and Lin, Y. “Analysis and Finite Element Simulation of the Tube Bulge Hydroforming Process”, *J. Materials Proc. Tech.* Vol. 125–126, No. 1, pp. 821–825, 2002.
4. Xing, H.L. and Makinouchi, A. “Numerical Analysis and Design for Tubular Hydroforming”, *Int. J. Mechanical Sci.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009-1026, 2001.
5. Mac Donald, B.J. and Hashmi, M.S.J. “Three-Dimensional Finite Element Simulation of Bulge Forming Using a Solid Bulging Medium”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, No. 2, pp. 107-116, 2001.
6. Kim, J., Kim, Y., Kang, B., and Hwang, S. “Finite Element Analysis for Bursting Failure Prediction in Bulge Forming of a Seamed Tube”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 9, pp. 953–966, 2004.
7. Song, W., Kim, S., Kim, J., and Kang, B. “Analytical and Numerical Analysis of Bursting Failure Prediction in Tube Hydroforming”, *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 164–165, No. 1, pp. 1618–1623, 2005.
8. Hwang, Y., Lin, Y., and Altan, T. “Evaluation of Tubular Materials by a Hydraulic Bulge Test”, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 343–351, 2007.
9. Yoshida, K. and Kuwabara, T. “Effect of Strain Hardening Behavior on Forming Limit Stresses of Steel Tube Subjected to Nonproportional Loading Paths”, *Int. J. Plasticity*, Vol. 23, No. 7, pp. 1260–1284, 2007.
10. Jansson, M., Nilsson, L., and Simonsson, K. “On Strain Localisation in Tube Hydroforming of

27. Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., and Shima, S. "Criteria for Ductile Fracture and Their Applications", J. Mechanical Work and Tech., Vol. 4, No. 1, pp. 65-81, 1980.
25. Hancock, J.W. and Mackenzie, A.C. "On the Mechanisms of Ductile failure in High-Strength Steels subjected to Multi-Axial stress-States", J. the Mech. and Physics of Solids, Vol. 24, No. 2, pp. 147-160, 1976.
26. Norris, D. M., Reaugh, J. E., Moran, B., & Quinones, D. F. "A Plastic Strain, Mean Stress Criterion for Ductile Fracture", J. Eng. Material and Tech., Vol. 100, No. 3, pp. 279-286, 1978.