

## پیش بینی منحنی حد شکل دهی به کمک معیارهای شکست نرم در فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های آلومینیومی\*

سیدجلال هاشمی<sup>(۱)</sup> حسن مسلمی نائینی<sup>(۲)</sup> غلامحسین لیاقت<sup>(۳)</sup> حامد دیلمی عضدی<sup>(۴)</sup> امیر نعمتی فقیر<sup>(۵)</sup>

**چکیده** منحنی حد شکل دهی از ابزارهای مهم در برآورد شکل پذیری ورق‌های فلزی تحت بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. در این مقاله، بالچ آزاد لوله‌های آلومینیومی با آلیاژ AA6065 برای به دست آوردن منحنی حد شکل دهی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. یک دستگاه بالچ آزاد با طول بالچ ثابت و قابلیت اعمال تغذیه‌ی محوری نیز برای بررسی صحت نتایج عددی ساخته شده است. در این مطالعه هفت معیار شکست نرم برای پیش‌بینی زمان و محل وقوع ترکیب‌گی لوله در فرآیند هیدروفورمینگ استفاده شده است. ابتدا آزمایش کشش تک محوری در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد تا ثابت‌های معیارهای شکست به دست آیند. برای به دست آوردن نقاط مختلف کرنشی منحنی حد شکل دهی مسیرهای بارگذاری تغییر فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری متفاوتی بر روی لوله اعمال شده است. با به کارگیری مسیرهای بارگذاری و معیارهای شکست منحنی حد شکل دهی به دست آمده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. منحنی به دست آمده به وسیله‌ی معیار شکست نرم آیدا به‌ترین تطابق را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی هم‌هی معیارهای شکست در حالت کرنشی که مشابه با آزمایش کشش تک محوری است، با همدیگر برابر می‌باشد. با توجه به نتایج، معیارهایی که در آنها تأثیر تنش میانگین در شکست در نظر گرفته شده‌اند، برای پیش‌بینی ترکیب‌گی در هیدروفورمینگ مناسب‌تر می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی** هیدروفورمینگ لوله، معیار شکست نرم، منحنی حد شکل دهی.

### Prediction of Forming Limit Curve Using Ductile Fracture Criteria in Hydroforming of Aluminum Tubes

S.J. Hashemi H. MoslemiNaeni G.H. Liaghat H. DeilamiAzodi A. NematiFaghri

**Abstract** Forming limit curve (FLC) is an important tool for evaluation of formability of sheet metals subjected to different loading. Free bulge of aluminum tubes has been investigated numerically to obtain FLC. To verify the numerical results one experimental setup has been manufactured which has the ability of controlling the internal pressure and axial feed. In this study, time and zone of bursting in tube hydroforming is predicted using seven ductile fracture criteria. For calibration of these criteria, the uniaxial tension is simulated in Abaqus/Explicit. Different loading curves are applied on tube to obtain the different points of FLC. Predicted FLCs by ductile fracture criteria have been compared with experimental results. The FLC which is predicted by Ayada's criterion has best match to experimental one. Results show that Prediction of all criteria are the same in strain position which is similar to uniaxial tension. Based on the results, criteria which apply the effect of average stress in prediction of ductile fracture are more appropriate for tube hydroforming process.

**Key Words** Tube hydroforming, Ductile fracture criterion, Forming limit curve.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۵/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۵/۲۹ می‌باشد.

- (۱) دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- (۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- (۳) استاد، گروه طراحی کاربردی، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- (۴) استادیار، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک.
- (۵) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

## مقدمه

داخلی یک واسطه سخت مورد بررسی قرار دادند و تأثیر تغییر ضریب اصطکاک بین واسطه و لوله را بر روی فرآیند آزمایش کردند. کیم و همکاران [6] برای پیش‌بینی ترکیب 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 ناحیه‌ی جوش نیز در نظر گرفته شد.

سانگ و همکاران [7] برای پیش‌بینی شروع گلوبی شدن در فرآیند بالچ از معیار سويفت و معیار شکست نرم کوکرافت و لاتهام استفاده کردند. هوانگ و همکاران [8] با اندازه‌گیری هم‌زمان فشار داخلی و ارتفاع بالچ در بالاترین نقطه، یک مدل تحلیلی جدید برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی لوله ارائه دادند. یوشیدا و کوابارا [9] وابستگی منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های فولادی را به مسیر کرنش برای مسیرهای تنش‌ی خطی و ترکیبی به وسیله‌ی یک دستگاه کشش-فشار مورد بررسی قرار دادند. جانسون و همکاران [10] در مقاله‌ای همه‌ی روش‌های عددی و تحلیلی به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی را مورد مطالعه قرار دادند و برای یک قالب مخروطی به کار گرفتند.

در این مقاله ابتدا به معیارهای شکست مورد استفاده برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی اشاره شده و سپس با انجام آزمایش کشش تک‌محوری و شبیه‌سازی آن ثابت‌های مربوط به این معیارها استخراج شده است. در مرحله بعد آزمایش بالچ لوله‌های آلومینیومی آلیاژ AA6065 در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است و مسیرهای بارگذاری فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی روی لوله اعمال شده‌اند. سپس با استفاده از معیارهای شکست نرم منحنی حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است.

هیدروفورمینگ لوله به دلیل نیاز به تولید قطعات سبک و استحکام بالا در صنایع هوافضا، خودروسازی، هواپیماسازی و کشتی‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. از بین آلیاژهای موجود، آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم با نسبت استحکام به وزن بالا برای رسیدن به نیاز ذکر شده مناسب‌تر می‌باشند. در فرآیند هیدروفورمینگ، یک لوله با شکل ساده و یا با یک پیش‌فرم به کمک اعمال فشار داخلی به سطح داخلی لوله و تغذیه‌ی محوری به دو انتهای لوله شکل حفره‌ی داخلی قالب را به‌خود می‌گیرد. بالچ آزاد لوله فرآیندی است که برای تعیین مقدار هیدروفورم‌پذیری لوله‌ها انجام می‌شود. مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی زیادی در مورد شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفورمینگ صورت گرفته است. احمد و همکارانش [1] یک روش تحلیلی برای برآورد پارامترهای مانند فشار، نیروی محوری و نیروی بستن قالب در فرآیند بالچ ارائه دادند. آن‌ها هم‌چنین اصولی را برای طراحی قالب‌ها و ابزار مطرح کردند. سوکولوسکی و همکاران [2] روشی تحلیلی-تجربی برای به‌دست 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 [3] ارائه شد. آن‌ها در این مدل سطح لوله را به‌صورت بیضی‌گون فرض کردند و اثر نازک‌شدگی غیر یکنواخت در محل بالچ و اصطکاک بین لوله و قالب را نیز در نظر گرفتند. زینگ و ماکینوچی [4] مسیر تغییر شکل بهینه را برای لوله‌های همسانگرد و غیر همسانگرد تحت فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری به‌دست آوردند. در مطالعه‌ی آن‌ها تأثیر مسیر تغییر شکل، خواص ماده و نسبت طول به قطر فعال بر نحوه‌ی شروع و توسعه‌ی چروکیدگی مورد بررسی قرار گرفت. دونالد و همکارانش [5] شبیه‌سازی سه‌بعدی بالچ آزاد لوله را تحت تأثیر فشار

### معیارهای شکست نرم

به منظور انتخاب به ترین معیار شکست نرم برای پیش بینی ترکیدگی در فرآیند بالچ آزاد شش معیار مورد بررسی قرار گرفته است. این معیارها براساس متغیرهای گوناگونی مانند کرنش پلاستیک، تنش هیدرواستاتیک، ماکزیمم تنش اصلی و از این قبیل شکست را پیش بینی می کنند.

**معیار کرنش پلاستیک معادل.** در این معیار فرض می شود وقتی که مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه ای به مقدار بحرانی  $C_1$  رسید، شکست رخ خواهد داد.

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

مقدار کرنش پلاستیک معادل برای یک ماده تراکم ناپذیر با رابطه ی (۲) تعریف می شود.

$$\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} = \sqrt{\frac{2}{9} ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2)} \quad (2)$$

در رابطه ی (۲)،  $\varepsilon_{ij}^p$  مؤلفه های تانسور کرنش پلاستیک و  $\varepsilon_1$ ،  $\varepsilon_2$  و  $\varepsilon_3$  کرنش های پلاستیک اصلی می باشند [11]. در حالت کشش تک محوری  $C_1$  برابر کرنش در لحظه ی شکست می باشد.

**معیار فرودنتال.** فرودنتال [12] پیشنهاد کرد که آغاز و انتشار شکست در ماده به سطح انرژی کرنشی، که نمی تواند پیش از آزاد شدن در اثر ایجاد جدایش در ماده، به صورت گرما تلف گردد، بستگی دارد. در واقع شکست راهکار جایگزینی است که انرژی کرنشی برای آزاد شدن برمی گزیند. بنابراین معیار شکست می تواند تنها یک معیار انرژی باشد که مقداری بحرانی برای انرژی واپیچشی ذخیره شده در جسم تا لحظه ی

شکست تعریف نماید. در نتیجه معیار شکست برای مواد همسانگرد می تواند بر حسب پارامترهای نامتغیر تنش یا کرنش بیان گردد. معیار انرژی یا کار پلاستیک کلی به صورت زیر می باشد.

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

که  $\bar{\sigma}$  تنش مؤثر،  $d\bar{\varepsilon}$  جزء کرنش مؤثر،  $\bar{\varepsilon}_f$  کرنش مؤثر در لحظه ی شکست و  $C_2$  مقدار بحرانی معیار شکست می باشد. در حالت ساده آزمایش کشش تک محوری مقدار  $C_2$  برای معیار انرژی برابر با سطح زیر منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش حقیقی خواهد بود. در این معیار شکل گلوبی تأثیری بر کرنش شکست ندارد.

**معیار کوکرافت و لانتهم.** کوکرافت و لانتهم [13] معیار شکستی بر مبنای نرمی حقیقی یا کرنش طبیعی در زمان شکست پیشنهاد کردند. مطابق این معیار، شکست در مواد نرم زمانی رخ می دهد که سطح زیر منحنی تنش اصلی ماکزیمم ( $\sigma^*$ ) بر حسب کرنش مؤثر به مقدار ثابت  $C_3$  برسد.

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

**معیار آه.** شکل بدون بعد شده ی این معیار توسط آه، چن و کوبایاشی [14] به صورت زیر ارائه شده است. در این معیار تأثیر هر دو متغیر  $\bar{\sigma}$  و  $\bar{\sigma}^*$  در نظر گرفته شده است.

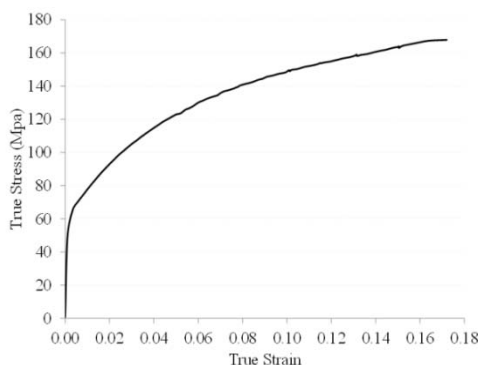
$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} = C_5 \quad (5)$$

**معیار آیادا.** آیادا [15] معیاری را توسعه داد که در آن تأثیر تنش هیدرواستاتیک یا تنش میانگین ( $\sigma_m$ ) نیز در شروع شکست در نظر گرفته شده است. در واقع این

شده است. منحنی تنش- کرنش حقیقی به دست آمده در شکل (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی لوله (%)

Al	Mg	Si	Fe	Zn	Cu
Base	0.47	0.44	0.30	0.08	0.06
Mn	Pb	Ti	Sn	Ni	Ga
0.03	0.03	0.03	0.017	0.02	0.01



شکل ۱ منحنی تنش- کرنش حقیقی ماده

برای به دست آوردن دقیق ثابت‌های معیارهای شکست، آزمایش کشش تک محوری شبیه‌سازی شده است. کشش نمونه در شبیه‌سازی تا زمانی ادامه می‌یابد تا کرنش اصلی ماکزیمم در یک المان به مقدار کرنش شکست در حالت تجربی برسد [18]. ماکزیمم کرنش اصلی حقیقی اندازه‌گیری شده با آزمایش کشش برابر ۰/۱۷۲ می‌باشد. شبیه‌سازی آزمایش کشش تک‌محوری در نرم‌افزار آباکوس و با ابعاد منطبق بر نمونه‌ی 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 نمونه‌ی تجربی و شبیه‌سازی، با استفاده از مقادیر تنش و کرنش در المانی که به کرنش شکست رسیده، مقادیر

معیار با جایگزینی  $\sigma_m$  به جای  $\sigma^*$  در معیار آه به دست آمده است.

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

معیار پروزو. وابستگی کرنش شکست به هر دو پارامتر بزرگ‌ترین تنش اصلی کششی و تنش هیدرواستاتیکی با بهبود تجربی معیار کوکرافت توسط پروزو، دلوکا و رندینا [16] مطرح گردید.

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

معیار رایس و تریسی. رایس و تریسی [17] با مطالعه‌ی رشد حفره‌های کروی در ماده‌ی 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.

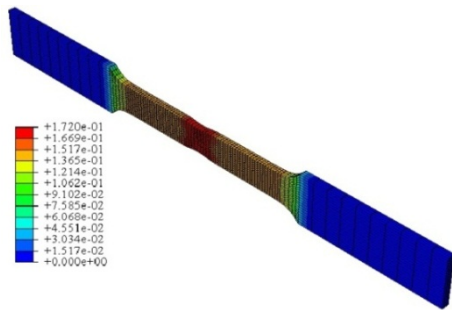
$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \exp\left(\frac{a\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon} = C_7 \quad (8)$$

بر اساس تئوری  $a=1.5$  خواهد بود.

### تعیین خواص ماده

در این مقاله 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 اولیه‌ی ۱/۵ میلی‌متر می‌باشند.

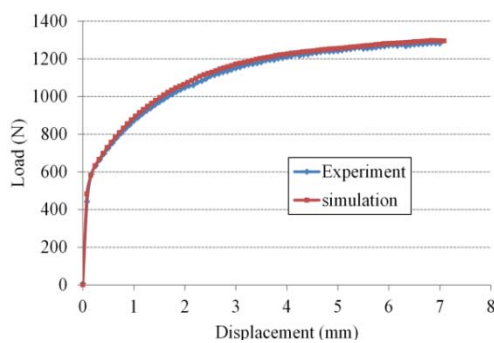
نمونه‌ی کشش در راستای طولی لوله بر طبق استاندارد ASTM-E8M تهیه شده و آزمایش کشش تک‌محوری بر روی آن به وسیله‌ی دستگاه کشش انجام



شکل ۲ نمونه‌ی کشش

ثابت‌های معیارهای شکست به دست می‌آیند. ثابت‌های معیارهای شکست معرفی شده در جدول (۲) آمده است. شکل (۲) نمونه‌ی کشش را شبیه‌سازی نمایش می‌دهد.

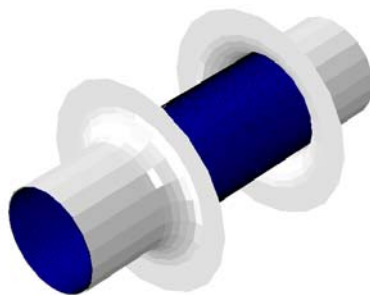
مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمایش کشش در شبیه‌سازی و حالت تجربی در شکل (۳) نشان داده شده است که تطابق خوبی دارند.



شکل ۳ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی و تجربی

### شبیه‌سازی بالچ آزاد لوله

شبیه‌سازی فرآیند بالچ آزاد لوله در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به منظور به دست آوردن حداکثر مقدار بالچ و مقادیر کرنش در هنگام ترکیدگی به کمک معیارهای شکست انجام شده است. قالب‌ها به صورت سطوح صلب مدل شده و ضریب اصطکاک بین قالب و لوله ۰/۰۵ در نظر گرفته شده و برای مدل کردن لوله از المان نوع S4R استفاده شده است. فاصله‌ی آزاد بالچ بین قالب‌ها ۶۰ میلی‌متر و شعاع گوشه‌ی قالب‌ها ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. مدل شبیه‌سازی بالچ آزاد در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ مدل شبیه‌سازی بالچ آزاد لوله

حساسیت نتایج به اندازه‌ی المان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور اندازه‌ی المان‌ها تغییر کرده و مقدار کرنش محیطی برای یک بارگذاری با فشار داخلی نهایی ۱۲ مگاپاسکال و بدون تغذیه‌ی محوری به دست آمده است (شکل ۵). براساس نتایج به دست آمده و کاهش زمان شبیه‌سازی المان با اندازه‌ی یک میلی‌متر برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است.

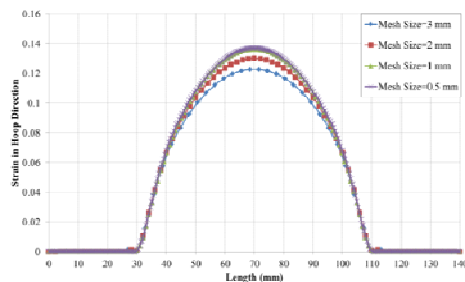
جدول ۲ ثابت‌های معیارهای شکست

معیار شکست نرم	کرنش پلاستیک	فرودنتال	کوکرافت و لاتهام	اه	آیادا	بروزو	رایس و تریسی
ثابت	$C_1 = 0.1724$	$C_2 = 23.185$	$C_3 = 23.167$	$C_4 = 0.1715$	$C_5 = 0.05707$	$C_6 = 0.1715$	$C_7 = 0.2835$

است.

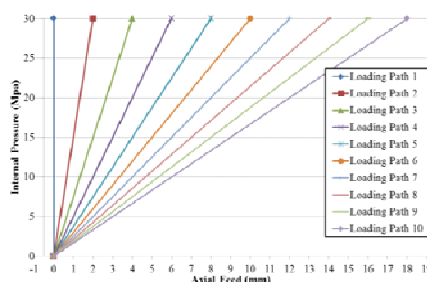


شکل ۷ دستگاه بالچ آزاد لوله



شکل ۵ مطالعه اثر اندازه المان

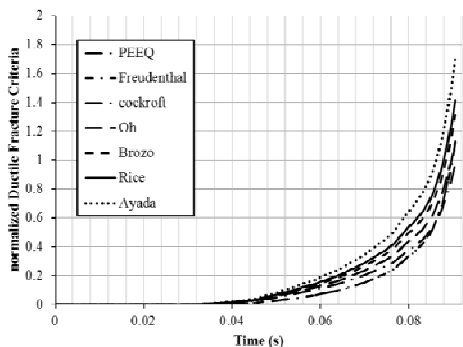
برای به دست آوردن نقاط منحنی حد شکل دهی باید حالت‌های مختلف بارگذاری ترکیبی از فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری روی لوله اعمال شود. به این منظور از منحنی بارگذاری فشار و تغذیه‌ی محوری خطی استفاده شده است. هشت منحنی بارگذاری به کار گرفته شده در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۶ منحنی‌های بارگذاری

### نتایج و بحث

با انجام شبیه‌سازی بالچ آزاد لوله تحت منحنی‌های بارگذاری در نظر گرفته شده، زمان ترکیدگی توسط معیارهای مختلف شکست نرم معرفی شده پیش‌بینی می‌شود. به این منظور مقادیر توابع معیارهای شکست نرم در نقطه‌ی حداکثر بالچ لوله که بیش‌ترین احتمال ترکیدگی را دارد، به دست می‌آید و با مقدار ثابت مربوط به آن معیار مقایسه می‌گردد. به این ترتیب اگر نسبت دو مقدار معیار شکست و ثابت آن بالاتر از یک شود، شکست پیش‌بینی خواهد شد. شکل (۸) نمونه‌ای از پیش‌بینی معیارها را نمایش می‌دهد که معیار کرنش شکست زودتر از بقیه معیارها ترکیدگی را پیش‌بینی کرده و معیار آیدا دیرتر از بقیه معیارها وقوع شکست را پیش‌بینی کرده است.

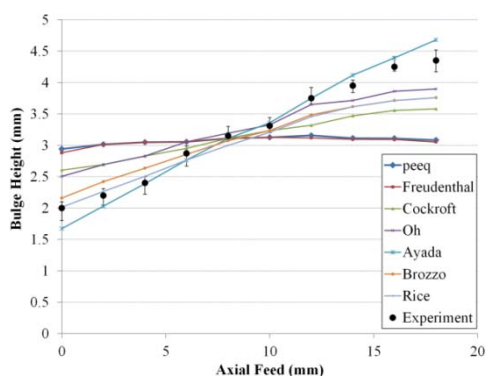


شکل ۸ پیش‌بینی زمان وقوع ترکیدگی لوله توسط معیارهای شکست نرم

### دستگاه بالچ آزاد لوله

یک دستگاه با قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری طراحی و ساخته شد. از این دستگاه به منظور انجام بالچ آزاد لوله‌های آلومینیومی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف استفاده شد و حداکثر ارتفاع بالچ منحنی حد شکل دهی و پارگی به دست آمدند. دستگاه بالچ آزاد در شکل (۷) نشان داده شده است. فشار داخلی به وسیله‌ی فشارسنج و تغذیه‌ی محوری به وسیله‌ی یک LVDT که به رایانه متصل شده کنترل می‌شود. تغذیه‌ی محوری توسط جک‌های هیدرولیکی در دو طرف انجام می‌شود. برای اعمال فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری از دو پمپ هیدرولیکی استفاده شده

افزایش تغذیه‌ی محوری، بیش‌تر شدن ارتفاع بالج را به‌دنبال خواهد داشت. پیش‌بینی همه‌ی معیارها در تغذیه‌ی محوری ۱۰ میلی‌متر تقریباً برابر می‌باشد. در تغذیه‌های محوری کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر پیش‌بینی دو معیار رایس و آیادا نزدیک به نتایج تجربی می‌باشد اما در تغذیه‌های محوری بالای ۱۰ میلی‌متر ارتفاع بالج تجربی بالاتر از پیش‌بینی همه‌ی معیارها به‌جز معیار آیادا است. با توجه به فاصله‌ی کم نتایج تجربی و پیش‌بینی همه‌ی معیارها می‌توان گفت به‌ترین پیش‌بینی را برای حداکثر ارتفاع بالج معیار آیادا داشته است.



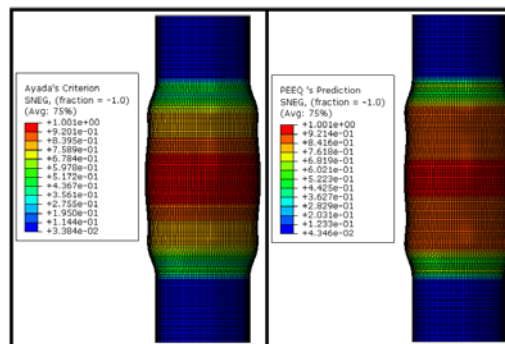
شکل ۱۰ پیش‌بینی حداکثر ارتفاع بالج توسط معیارهای شکست

برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی طبق پیش‌بینی معیارهای شکست نرم، مقدار کرنش‌های محیطی و طولی در المانی که دچار شکست محاسبه می‌شوند. به این منظور از روابط (۱۲-۱۰) استفاده شده است.  $t$  و  $t_0$  به ترتیب ضخامت لوله در زمان ترکیدگی و ضخامت اولیه‌ی لوله می‌باشند.  $\epsilon_t$  و  $\epsilon_0$  نیز به ترتیب برابر با کرنش در راستای ضخامت لوله، کرنش محیطی و کرنش طولی در زمان ترکیدگی می‌باشند.

$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (10)$$

$$\epsilon_0 = \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad (11)$$

پیش‌بینی دو معیار کرنش شکست و آیادا برای منحنی بارگذاری ۱۰ در شکل (۹) مورد مقایسه قرار گرفته است. توزیع پیش‌بینی دو معیار مذکور به‌صورت کانتور روی قطعه نشان داده شده است. در هر دو مورد وسط لوله که دارای ارتفاع بیش‌تری است، سریع‌تر به معیار شکست رسیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ارتفاع بالج در زمانی که معیار کرنش شکست ترکیدگی لوله را پیش‌بینی کرده است خیلی کم‌تر از مقدار ارتفاع مربوط به معیار آیادا می‌باشد.



شکل ۹ کانتور پیش‌بینی دو معیار کرنش شکست و آیادا

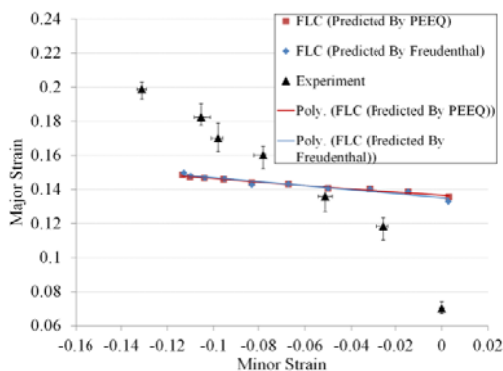
شکل (۱۰) حداکثر ارتفاع بالج را که توسط معیارهای مختلف پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار می‌دهد. حداکثر ارتفاع بالج از رابطه‌ی (۹) به‌دست می‌آید. در این رابطه  $D$  و  $D_0$  به ترتیب قطر اولیه‌ی لوله و قطر لوله در لحظه‌ی ترکیدگی می‌باشند.

$$\text{Bulge Height (mm)} = \frac{D - D_0}{2} \quad (9)$$

با افزایش تغذیه‌ی محوری ماده راحت‌تر به ناحیه‌ی بالج لوله رسیده و نازک‌شدگی و درنهایت ترکیدگی دیرتر اتفاق می‌افتد، در نتیجه ارتفاع بالج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، دو معیار فرودنتال و کرنش پلاستیک برای همه‌ی مقادیر تغذیه‌ی محوری تقریباً یک ارتفاع بالج را پیش‌بینی کرده‌اند. در حالی که همان‌طور که گفته شد



شکل (۱۳) با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌بینی دو معیار ذکر شده اختلاف خیلی زیادی با نتایج تجربی دارد. این دو معیار مقادیر کرنش منحنی حد شکل دهی را بسیار نزدیک به هم پیش‌بینی کرده‌اند. دلیل این شباهت نتایج را می‌توان مرتبط به افزایشی بودن کرنش و استفاده از سطح تسلیم فون میسر دانست. در هنگام شبیه‌سازی آزمایش کشش برای به‌دست آوردن ثابت‌های معیارهای شکست از معیار فون میسر استفاده شده است. در واقع ثابت معیار شکست فرودنتال، سطح زیر منحنی تنش-کرنش حقیقی ماده می‌باشد. در فرآیند بالج آزاد، هنگامی که لوله تغییر شکل می‌دهد و کرنش پلاستیک ماده افزایش پیدا می‌کند، تنش در المانی که بیش‌ترین تغییر شکل را دارد، نیز مطابق با آن کرنش از روی منحنی تنش-کرنش بالا می‌رود. در نتیجه منحنی تنش-کرنش المانی که به کرنش شکست رسیده تقریباً مشابه با منحنی تنش-کرنش ماده می‌باشد و سطح زیر آن برابر با ثابت معیار فرودنتال خواهد شد.



شکل ۱۳ منحنی حد شکل دهی پیش‌بینی شده با معیارهای کرنش پلاستیک معادل و فرودنتال

با این‌که باید در سمت راست منحنی حد شکل دهی، نسبت بالج زیادتر شود و در واقع با منفی‌تر شدن کرنش طولی در المانی که بیش‌ترین تغییر شکل را داشته و در وسط لوله قرار دارد، مقدار کرنش

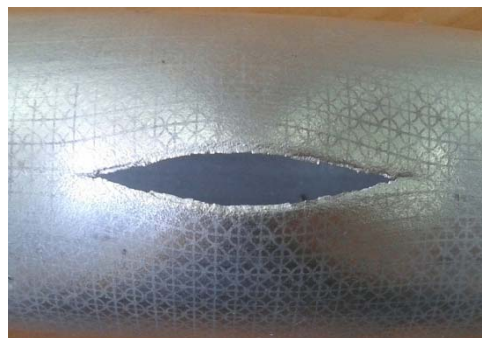
$$\epsilon_1 = -(\epsilon_0 + \epsilon_t) \quad (12)$$

برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در کار تجربی نیز یک طرح شبکه‌ای دایره‌ای منظم با قطر دو میلی‌متر بر روی نمونه‌ها حک شد. پس از انجام آزمایش بالج، تغییر شکل با اندازه‌گیری قطر دایره‌ها در راستای طولی و محیطی لوله‌ی کرنش‌ها به‌دست آمدند. نمونه‌های تجربی و طرح شبکه‌ای اندازه‌گیری کرنش در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ نمونه‌های تجربی

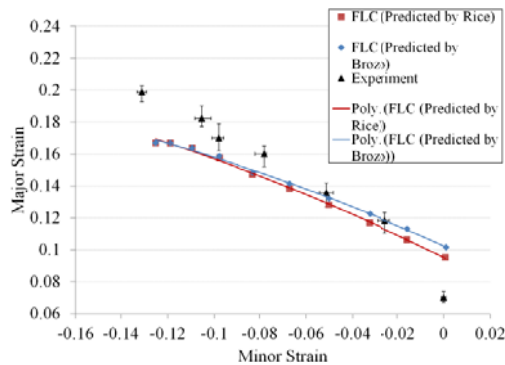
تغییر قطر دایره‌های حک شده بر لوله در یکی از نمونه‌های تجربی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ تغییر قطر دایره‌ای حک شده بر روی لوله

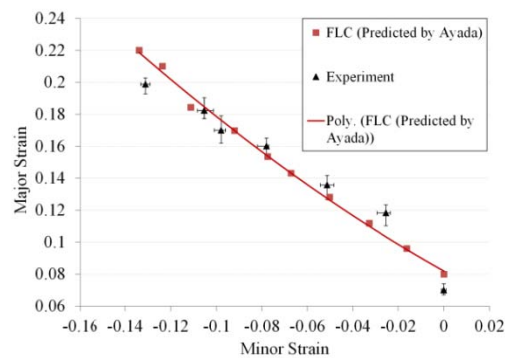
نمودار حد شکل دهی پیش‌بینی شده توسط دو معیار شکست کرنش پلاستیک معادل و فرودنتال در





شکل ۱۵ منحنی حد شکل دهی پیش بینی شده با معیارهای رایس و بروز

از بین معیارهای شکست استفاده شده به ترین پیش بینی برای منحنی حد شکل دهی را معیار آیادا داشته است. منحنی حد شکل دهی پیش بینی شده با این معیار در شکل (۱۶) نشان داده شده است. در قسمت های میانی منحنی حد شکل دهی پیش بینی معیار آیادا با نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد.

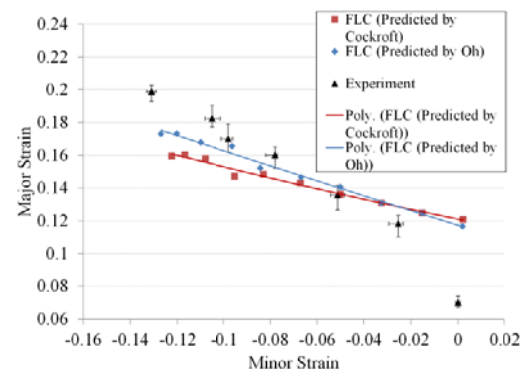


شکل ۱۶ منحنی حد شکل دهی پیش بینی شده با معیارهای رایس و بروز

### نتیجه گیری

منحنی حد شکل دهی لوله های آلومینیومی با آیاز AA6063 به کمک معیارهای شکست پیش بینی شد. ثابت های معیارهای شکست از شبیه سازی آزمایش کشش تک محوری به دست آمدند. فرآیند بالچ آزاد لوله

محیطی افزایش یابد، دو معیار کرنش پلاستیک معادل و فرودنتال پیش بینی مناسبی ندارند. پیش بینی معیارهای کوکرافت و اُه در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، همه ی معیارها در محدوده ی کرنشی طولی ۰/۰۷- پیش بینی برابری دارند. در این حالت کرنشی، در المانی که دچار شکست می شود و در وسط لوله قرار دارد، تنش ها در صفحه حالت تک محوری پیدا می کند یعنی یکی از تنش ها در صفحه نزدیک به صفر است. در نتیجه چون این حالت تنشی شبیه آزمایش کشش تک محوری می باشد و ثابت های معیارهای شکست از نتیجه ی آزمایش کشش به دست آمده، پیش بینی همه ی معیارها تقریباً برابر است. پیش بینی معیارهای کوکرافت و اُه نیز با نتایج تجربی اختلاف زیادی دارند. ولی پیش بینی معیار اُه به نتایج تجربی نزدیک تر شده است.



شکل ۱۴ منحنی حد شکل دهی پیش بینی شده با معیارهای کوکرافت و اُه

پیش بینی معیارهای شکست نرم رایس و بروز در شکل (۱۵) نشان داده است. در این دو معیار تأثیر تنش میانگین در پیش بینی شکست در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می شود، با کاربرد تنش میانگین، نتایج پیش بینی معیارهای شکست به نتایج تجربی نزدیک تر شده است.

شکست، معیار آیادا به‌ترین پیش‌بینی را داشته است. معیارهایی که در آن‌ها تأثیر تنش میانگین در پیش‌بینی شکست در نظر گرفته شده است، منحنی حد شکل دهی نزدیک‌تری به نتایج تجربی داشته‌اند. هم‌چنین نتایج نشان دادند که می‌توان با استفاده از معیار آیادا ارتفاع بالج را به‌خوبی پیش‌بینی کرد.

شبیه‌سازی شده و کرنش‌های حادی به‌دست آمدند. یک دستگاه بالج آزاد ساخته شده و نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. پیش‌بینی هم‌ی معیارها در حالت تنش‌ی که در صفحه حالت تک‌محوری داشته باشد، با هم برابر است. از بین منحنی‌های پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی معیارهای

## مراجع

1. Ahmed, M. and Hashmi, M.S.J., "Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 64, 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", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 98, pp. 33-40, (2000).
3. Hwang, Y.M. and Lin, Y.K., "Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 125–126, pp. 821–825, (2002).
4. Xing, H.L. and Makinouchi, A., "Numerical analysis and design for tubular hydroforming", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, 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, pp. 107-116, (2001).
6. Kim, J., Kim, Y.W., Kang, B.S. and Hwang, S.M., "Finite element analysis for bursting failure prediction in bulge forming of a seamed tube", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 953–966, (2004).
7. Song, W.J., Kim, S.W., Kim, J. and Kang, B.S., "Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 164–165, pp. 1618–1623, (2005).
8. Hwang, Y. M., Yi-Kai Lin and Altan, T., "Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, 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", *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, pp. 1260–1284, (2007).
10. Jansson, M., Nilsson, L. and Simonsson, K., "On strain localisation in tube hydroforming of aluminium extrusions", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 195, pp. 3–14, (2008).
11. Ridha, H. and Marian, R., "Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1349–1361, (2002).
12. Freudenthal, A. M., "The inelastic behavior of engineering materials and structures", John Wiley & Sons, (1950).

13. Cockroft, M.G. and Latham, D.J., "Ductility and workability of metals", *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 96, pp. 33-39, (1968).
14. Oh, S.I., Chen, C.C. and Kobayashi, S., "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 101, pp. 36-44, (1979).
15. Ayada, M., Higashino, T. and Mori, K., "Central bursting in extrusion of in homogeneous materials", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 553-558, (1987).
16. Brozzo, P., de Luca, B. and Rendina, R., "A new method for the prediction of formability in metal sheets", *Proceedings of the 7th Biannual Conference of the International Deep Drawing Research Group*, (1972).
17. Rice, J.R. and Tracey, D.M., "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, pp. 201-217, (1969).
18. 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 Science*, Vol. 47, pp. 353-365, (2009).