



پیش بینی تحلیلی کرنش ها و تنش های حدی در هیدروفورمینگ لوله های آلومینیومی ناهمسانگرد

حسن مسلمی نائینی^{۱*}، سیدجلال هاشمی^۲، غلامحسین لیاقت^۳، مهرا ن محمدی^۴، حامد دیلمی عضدی^۵

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۵- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

*تهران، صندوق پستی: ۳۳۳-۱۴۱۱۵، moslemi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

هیدروفورمینگ لوله

لوله آلومینیومی

ناپایداری پلاستیک

ناهمسانگردی

حد شکل دهی

منحنی حد شکل دهی نشان دهنده مقدار شکل پذیری ورق های فلزی در حالت های مختلف بارگذاری قبل از رسیدن به نقطه گلوبی شدن است. در این مقاله، کاربرد معیارهای ناپایداری پلاستیک برای پیش بینی گلوبی شدن و همچنین منحنی حد شکل دهی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای ناپایداری پلاستیک مختلف همراه با معیار تسلیم ناهمسانگرد درجه ۲ پارلات به کار گرفته شده و در نسبت کرنش متفاوت، کرنش های حدی محاسبه و در مرحله بعد کرنش های حدی به تنش های حدی تبدیل شده اند. برای بررسی صحت نتایج تحلیلی، یک دستگاه بالچ آزاد با قابلیت اعمال تغذیه محوری ساخته شده است. لوله ها تحت مسیرهای بارگذاری مختلفی قرار گرفتند و شرایط کرنشی متفاوت برای به دست آوردن منحنی حد شکل دهی ایجاد شد. منحنی های حد شکل دهی به دست آمده به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که معیار ناپایداری سويفت برای لوله ها بهترین پیش بینی را برای منحنی حد شکل دهی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله دارد.

Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes

Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Seyed Jalal Hashemi², Gholamhossein Liaghat³, Mehran Mohammadi⁴, Hamed Deilami Azodi⁵

1- Prof., Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2- PhD Student, Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

3- Prof., Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

4- MSc. Student, Faculty of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

5- Assis.Prof., Department of Mechanical Engineering, Industrial Univ.of Arak, Arak, Iran.

*P.O.B. 14115-333, Iran, Tehran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 July 2013

Accepted 03 November 2013

Available Online 23 April 2014

Keywords:

Tube hydroforming

Aluminum tube

Plastic Instability

Anisotropy

Forming Limit

ABSTRACT

Forming limit diagram (FLD) shows the formability of metal sheets under different loading conditions before that necking is taken place. In this paper, the application of plastic instability criterion for prediction of necking and also FLD have been investigated. Using Balart's anisotropic yield function and plastic instability criterion in different strain ratios, limit strains have been calculated, and then the limit strains have been converted to limit stresses. To verify the analytical results, a free bulge setup with the ability of applying the axial feeding has been fabricated. Tubes have been undergone different loading paths and different plane strain conditions have been induced to obtain FLD. FLDs which have been obtained using plastic instability criterion have been compared with experimental results. The results show that swift instability criterion for tubes have the best prediction of FLD in tube hydroforming process.

۱- مقدمه

ساده مستقیم یا با خم است. 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 می گیرد. شکل ۱ نحوه انجام فرآیند را نمایش

فرآیند هیدروفورمینگ، قطعات یکپارچه لوله ای شکل را در یک مرحله و با نسبت استحکام به وزن بالا تولید می کند. در این فرآیند، قطعه اولیه یک لوله

Please cite this article using:

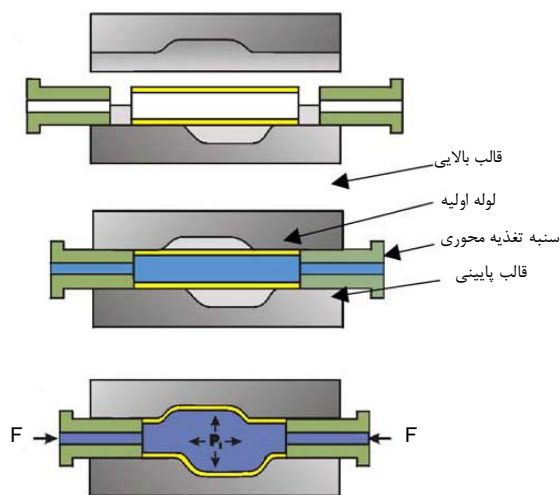
H. Moslemi Naeini, S.J. Hashemi, Gh.H. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 133-140, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

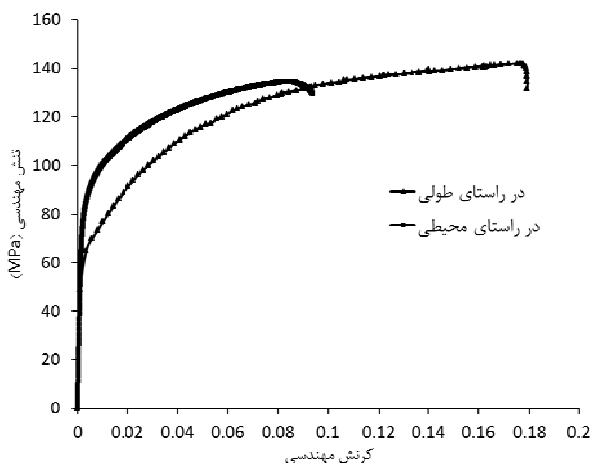
آلومینیومی نسبت به معیار هیل کارایی بالاتری دارد، برای پیش‌بینی حد شکل‌دهی در کنار معیارهای گلوبی شدن و مماسی به کار گرفته نشده است. هدف این مقاله به دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله به کمک معیارهای ناپایداری پلاستیک است. ناهمسانگردی لوله‌ها در نظر گرفته شده و از معیار تسلیم درجه ۲ بارلات استفاده شده است. خواص مکانیکی لوله در راستای طولی و محیطی به کار گرفته شده تا بهترین انطباق با نتایج تجربی ایجاد شود. کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده توسط معیارهای ناپایداری به تنش‌های حدی تبدیل شده و با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. در نهایت تأثیر خواص مکانیکی بر روی کرنش‌های حدی بررسی شده است.

۲- خواص مکانیکی لوله

لوله‌های آلومینیومی مورد استفاده در این مطالعه از آلیاژ AA6063 بوده‌اند. قطر خارجی لوله ۴۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱/۵ میلی‌متر است. لوله‌های آلومینیومی بدون درز بوده و به وسیله فرآیند اکستروژن تهیه شده‌اند. بعد از تولید هیچ عملیات حرارتی بر روی لوله‌ها انجام نشده است. برای به دست آوردن خواص مکانیکی لوله در دو راستای طولی و محیطی، نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM-E8M به وسیله برش کاری سیمی تهیه شده‌اند. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی به دست آمده در شکل ۲ نمایش داده شده است. یک نمونه کشش به وسیله برش سیمی تهیه شده قبل و بعد از کشش در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱ فرآیند هیدروفورمینگ لوله



شکل ۲ منحنی‌های تنش - کرنش مهندسی

می‌دهد. اعمال فشار داخلی بیش از حد باعث ترکیدگی لوله شده و از طرف دیگر اعمال نیروی محوری زیاد همراه با فشار داخلی کم باعث به وجود آمدن چروکیدگی در سطح لوله خواهد شد. بالچ آزاد لوله فرآیندی است که برای تعیین مقدار هیدروفورم‌پذیری لوله‌ها انجام می‌شود.

مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی زیادی بر روی شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفورمینگ صورت گرفته است. احمد و هشمی [۱] یک روش تحلیلی برای برآورد پارامترهایی 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 [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 [۳] ارائه شد. آن‌ها در این مدل سطح لوله را به صورت 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 [۴] مسیر تغییر شکل بهینه را برای لوله‌های همسانگرد و ناهمسانگرد 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 [۵] شبیه‌سازی سه بعدی 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 و همکاران [۶] برای پیش‌بینی ترکیدگی در بالچ آزاد، این فرآیند را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به این منظور از معیار شکست نرم اوپانه بر اساس تابع پتانسیل درجه دوم هیل استفاده کردند. در این مطالعه تأثیر خواص ماده در ناحیه جوش نیز در نظر گرفته شد.

سانگ و همکاران [۷] برای پیش‌بینی شروع گلوبی شدن در فرآیند بالچ از معیار سويفت و معیار شکست نرم کوکرافت و لاتهام استفاده کردند. پوشیدا و کوآبارا [۸] وابستگی منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های فولادی را به مسیر کرنش برای مسیرهای تنشی خطی و ترکیبی به وسیله یک دستگاه کشش-فشار مورد بررسی قرار دادند. جانسون و همکاران [۹] 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. افتخاری و همکارانش [۱۰] 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. م. الیاسی و همکارانش [۱۱] یک قالب جدید را برای تولید قطعه پله‌ای با گوشه تیز و از جنس فولاد زنگ‌نزن با استفاده فرآیند هیدروفورمینگ لوله طراحی کردند. با استفاده از قالب جدید یک قطعه با توزیع ضخامت یکنواخت تولید شد.

با وجود کارهای انجام شده، تحقیقات کمی بر روی منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی در فرآیند هیدروفورمینگ با در نظر گرفتن ناهمسانگردی انجام شده است. چو و ژو [۱۲] منحنی حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی را با استفاده از معیار مماسی و معیار تسلیم هیل ۴۸ به دست آوردند. هوانگ و همکارانش [۱۳] نیز با معیار مماسی و با استفاده از معیار تسلیم هیل ۷۹، حد شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی AA60661 را محاسبه کردند. با توجه به پژوهش‌های پیشین تا به حال معیار تسلیم بارلات، که برای ورق‌های

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{2\sigma} (2\sigma_1 - c\sigma_2) \quad (7)$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{2\sigma} (2\sigma_2 - c\sigma_1) \quad (8)$$

نمو کرنش $d\bar{\varepsilon}$ از معادله (۹) به دست می‌آید.

$$d\bar{\varepsilon} = 2 \left[\frac{1}{4-c^2} (d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + cd\varepsilon_1 d\varepsilon_2) \right]^{1/2} \quad (9)$$

تنش در دو راستای محیطی و محوری به ترتیب از معادلات (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند که در آن‌ها r و t شعاع و ضخامت لوله هستند. $F_{sealing}$ ، $F_{friction}$ نیروهای آب‌بندی و نیروی اصطکاک لوله و قالب هستند.

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{\pi pr^2 - F_{axial} - F_{sealing} + F_{friction}}{2\pi t} \quad (11)$$

نسبت کرنش‌ها (β) و نسبت تنش‌ها (α) که با معادلات (۱۲) تعریف می‌شوند.

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (12)$$

۳-۱- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلوبی‌شدگی موضعی (هیل)
بر اساس معیار گلوبی‌شدگی موضعی هیل [۱۵]، ناپایداری پلاستیک زمانی رخ می‌دهد که شرایط زیر برقرار باشد:

$$d\sigma_1 = \sigma_1 (d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2) \quad (13)$$

با فرض اینکه نسبت تنش‌ها در محل گلوبی‌شدگی ثابت می‌ماند، معادله بالا به حالت زیر تبدیل می‌شود:

$$d\sigma_2 = \sigma_2 (d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2) \quad (14)$$

با استفاده از معادله (۷) و (۸) و همچنین معادلات (۱۳) و (۱۴)، تغییرات تنش‌های اصلی در ناحیه گلوبی‌شدگی مطابق معادلات (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید.

$$d\sigma_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\sigma} \left(\frac{2-c}{2} (1+\alpha) \right) \sigma_1^2 \quad (15)$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\sigma} \left(\frac{\alpha(2-c)}{2} (1+\alpha) \right) \sigma_1^2 \quad (16)$$

بر اساس معادله (۳) و معادلات (۱۵) و (۱۶) تغییرات تنش مؤثر بر طبق معادله (۱۷) حاصل می‌شود.

$$d\bar{\sigma} = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} \left[\frac{(2-c)(1+\alpha)}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)^{0.5}} \right] \quad (17)$$

در آزمایش کشش تک‌محوری، گلوبی شدن زمانی رخ می‌دهد که معادله (۱۸) برقرار باشد.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \bar{\sigma} \quad (18)$$

با استفاده از معیار مماسی (Z)، می‌توان معادله (۱۸) را می‌توان برای شکل‌دهی ورق به کار برد. این معیار بر طبق معادله (۱۹) به دست می‌آید.

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\sigma}}{Z} \quad (19)$$

معنای فیزیکی این معیار در شکل ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است. در واقع با افزایش مقدار Z ، کرنش گلوبی نیز بیشتر می‌شود. $\bar{\sigma}_{Neck}$ تنش گلوبی و $\bar{\varepsilon}_{Neck}$ کرنش گلوبی هستند.

معیار مماسی بر اساس گلوبی شدن هیل (Z_L) با توجه به معادله (۲۰) محاسبه می‌شود.



شکل ۳ نمونه آزمایش کشش تک‌محوری

جدول ۱ خواص مکانیکی لوله

خاصیت مکانیکی (یکا)	ضریب استحکام (MPa) K	ضریب کارسختی n	ضریب ناهمسانگردی R
مقدار	۲۵۷/۸	۰/۲۳۳۴	۰/۴

خواص مکانیکی لوله مورد آزمایش بر اساس مدل توانی نشان داده شده در معادله (۱) که از میانگین گرفتن بین دو راستای طولی و محیطی به دست آمده، در جدول ۱ نشان داده شده است. K ضریب استحکام و n ضریب کارسختی است. ضریب ناهمسانگردی ماده بر طبق معادله (۲) به دست می‌آید که ε_{II} و ε_t کرنش در راستاهای عرضی و ضخامتی نمونه کشش هستند.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n \quad (1)$$

$$R = \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_t} \quad (2)$$

۳-۲- محاسبه تحلیلی منحنی حد شکل‌دهی در فرآیند هیدرو-فرمینگ لوله

در محاسبه تحلیلی، یک لوله جدار نازک تحت فرآیند بالج آزاد در نظر گرفته می‌شود. لوله تحت فشار داخلی p و نیروی محوری F_{axial} قرار دارد که در دو انتها بسته شده است. با توجه به ضخامت پایین لوله نسبت به ابعاد دیگر آن، از تنش در راستای ضخامت صرف نظر شده و حالت تنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود. معیار تسلیم غیر درجه ۲ ناهمسانگرد بارلات و لاین [۱۴] بر حسب مولفه‌های اصلی تنش به صورت معادله (۳) بیان می‌شود.

$$|\sigma_1|^a + |u\sigma_2|^a + \frac{c}{2-c} |\sigma_1 - u\sigma_2|^a = \frac{2}{2-c} \bar{\sigma}^a \quad (3)$$

که در آن σ_1 تنش در راستای محیطی و σ_2 تنش در راستای محوری و $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر هستند. a توان معیار تسلیم است که به شکل سطح تسلیم بستگی دارد. c و u به ترتیب با معادلات (۴) و (۵) تعریف می‌شود.

$$c = 2 \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \quad (4)$$

$$u = \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (5)$$

R ضریب ناهمسانگردی در هر راستا است. قانون جریان وابسته مطابق معادله (۶) تعریف می‌شود که در آن $d\lambda$ ضریب پلاستیک و f پتانسیل پلاستیک است که با استفاده از معیار تسلیم تعریف می‌شود.

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

ε_1 ، ε_2 و ε_3 بترتیب کرنش در راستای محیطی، کرنش در راستای محوری و کرنش در راستای ضخامتی می‌باشند. در اینجا با استفاده از قانون جریان و معیار تسلیم بارلات معادلات (۷) و (۸) حاصل می‌شوند. برای به دست آوردن معادلات (۷) و (۸) تغییر شکل ورق در حالت ناهمسانگردی صفحه‌ای ($R_0 = R_{90}$) فرض شده و توان سطح تسلیم (a) برابر با دو در نظر گرفته شده است.

مطابق معادله (۳۱) به دست می‌آید.

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \leq \frac{1}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (4\alpha^3 c^2 - 4\alpha^2 c^3 + 4\alpha^2 - 12\alpha^3 c + 14\alpha^2 c^2 - 2\alpha c^3 - 16\alpha^2 c + 16\alpha c^2 + 12\alpha^2 - 32\alpha c + 3c^2 + 16\alpha - 16c + 20)^{0.5} \quad (31)$$

۳-۳- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلوبی‌شدگی برای ورق‌ها (سوئفت برای ورق‌ها)

بر اساس معیار گلوبی‌شدگی برای ورق‌ها، وقتی نیرو در جهت‌های اصلی به بیشینه برسد، ناپایداری پلاستیک رخ می‌دهد [۱۶]. این شرایط در معادلات (۳۲) و (۳۳) نشان داده شده است.

$$dF_1 = 0 \quad (32)$$

$$dF_2 = 0 \quad (33)$$

برای یک لوله در فرآیند هیدروفورمینگ نیروهای اصلی محیطی و طولی به ترتیب با معادلات (۳۴) و (۳۵) به دست می‌آید که در آن l طول لوله است.

$$F_1 = \pi r^2 p - F_{axial} + F_{sealing} + F_{friction} \quad (34)$$

$$F_2 = prl \quad (35)$$

از طرف دیگر نیروهای F_1 و F_2 با استفاده از معادلات (۳۶) و (۳۷) به دست می‌آیند که A_1 و A_2 سطح مقطع در راستاهای طولی و محیطی لوله هستند.

$$dF_1 = d(\sigma_1 A_1) = d\sigma_1 A_1 + \sigma_1 dA_1 = 0 \quad (36)$$

$$dF_2 = d(\sigma_2 A_2) = d\sigma_2 A_2 + \sigma_2 dA_2 = 0 \quad (37)$$

با توجه به ثابت بودن حجم ماده معادله (۳۸) برقرار است.

$$-\left(\frac{dA}{A}\right) = \left(\frac{dl}{l}\right) = d\varepsilon_1 \quad (38)$$

با استفاده از معادلات بالا دو شرط لازم مطابق معادلات (۳۹) و (۴۰) حاصل می‌شود.

$$d\sigma_1 = \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (39)$$

$$d\sigma_2 = \sigma_2 d\varepsilon_2 \quad (40)$$

همانند معیارهای بالا و با استفاده از معادلات (۷) و (۸)، تغییرات تنش‌های اصلی مطابق معادلات (۴۱) و (۴۲) و تنش مؤثر از معادله (۴۳) به دست می‌آید.

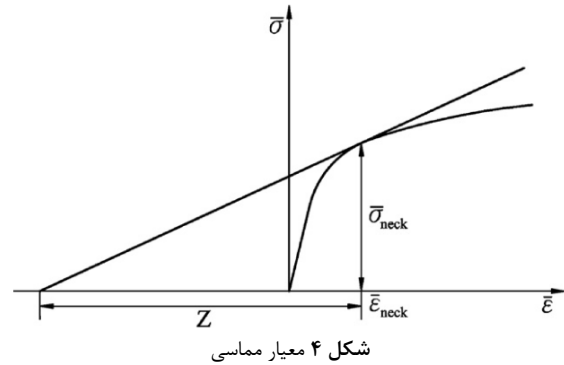
$$d\sigma_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left(\frac{2-c\alpha}{2}\right) \sigma_1^2 \quad (41)$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left(\frac{\alpha(\alpha-c)}{2}\right) \sigma_1^2 \quad (42)$$

$$d\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} \times (\alpha^3 c^2 - \alpha^2 c^3 + \alpha^4 - 2\alpha^3 c + 2\alpha^2 c^2 - 2\alpha^2 c + 2\alpha c^2 - 4\alpha c + 4)^{0.5} \quad (43)$$

معیار مماسی بر اساس ناپایداری پلاستیک برای ورق‌ها (Z_S) از معادله (۴۴) به دست می‌آید.

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \leq \frac{1}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (\alpha^3 c^2 - \alpha^2 c^3 + \alpha^4 - 2\alpha^3 c + 2\alpha^2 c^2 - 2\alpha^2 c + 2\alpha c^2 - 4\alpha c + 4)^{0.5} \quad (44)$$



$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \leq \frac{(2-c)(1+\alpha)}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)^{0.5}} \quad (20)$$

۳-۲- ناپایداری پلاستیک بر اساس معیار گلوبی‌شدگی برای لوله‌ها (سوئفت برای لوله‌ها)

بر اساس این معیار [۱۶]، ناپایداری پلاستیک زمانی رخ می‌دهد که شرایط معادلات (۲۱) و (۲۲) به طور همزمان رخ دهد.

$$dp = 0 \quad (21)$$

$$dF_{axial} = 0 \quad (22)$$

در واقع بر اساس این معیار هنگامی که مقدار فشار داخلی و نیروی محوری بیشینه شوند، گلوبی رخ می‌دهد.

مقدار فشار داخلی p از معادله (۱۰) به دست می‌آید. با قرار دادن p در معادله (۲۱) و مشتق‌گیری جزئی معادله (۲۳) به دست می‌آید که در نهایت با تبدیل تغییر شکل‌ها به کرنش، معادله (۲۴) به دست خواهد آمد.

$$dp = d\sigma_1 \frac{t}{r} + \sigma_1 \frac{dt}{r} - \sigma_1 \frac{tdr}{r^2} \quad (23)$$

$$d\sigma_1 = \sigma_1 (2d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2) \quad (24)$$

مقدار F_{axial} از معادله ۱۱ به دست می‌آید که با قرار دادن آن در معادله (۲۲) و فرض صفر بودن نیروی آب بندی و نیروی اصطکاک و استفاده از معادله (۲۱) و مشتق‌گیری جزئی، معادله (۲۷) به دست می‌آید:

$$-2\sigma_2 t dr - 2r\sigma_2 dt - 2rtd\sigma_2 + 2rdrp + r^2 dp = 0 \quad (25)$$

$$d\sigma_2 = \frac{-2drtd\sigma_2 - 2r\sigma_2 dt + 2rpd r}{2rt} \quad (26)$$

$$d\sigma_2 = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 \quad (27)$$

با استفاده از معادلات (۷) و (۸) تغییرات تنش‌های اصلی با معادلات (۲۸) و (۲۹) به دست می‌آیند.

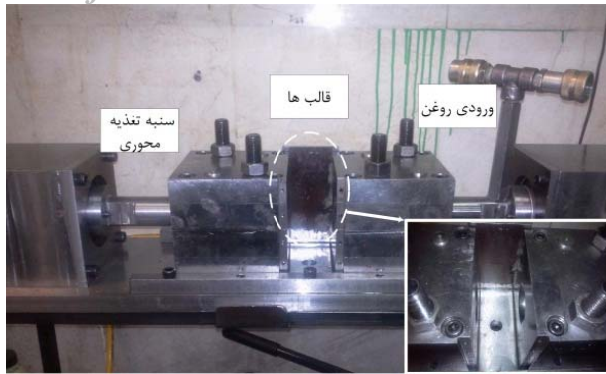
$$d\sigma_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left(\frac{4-2c\alpha+2\alpha-c}{2}\right) \sigma_1^2 \quad (28)$$

$$d\sigma_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \left(\frac{2-2c\alpha+2\alpha^2}{2}\right) \sigma_1^2 \quad (29)$$

حال با توجه به معادله (۳) تغییرات تنش مؤثر از معادله (۳۰) به دست خواهد آمد.

$$d\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}}{2(1+\alpha^2 - c\alpha)} (4\alpha^3 c^2 - 4\alpha^2 c^3 + \alpha^4 - 12\alpha^3 c + 14\alpha^2 c^2 - 2\alpha c^3 - 16\alpha^2 c + 16\alpha c^2 + 12\alpha^2 - 32\alpha c + 3c^2 + 16\alpha - 16c + 20)^{0.5} \quad (30)$$

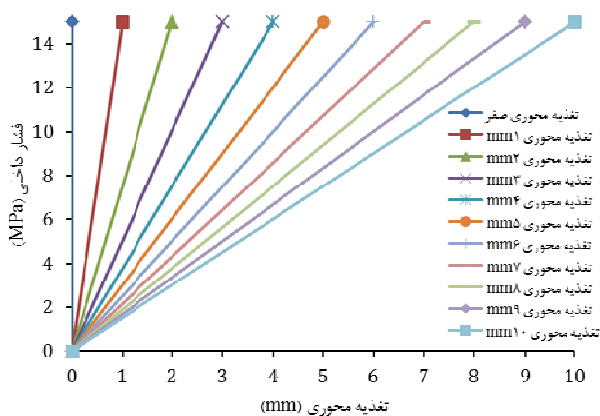
در نهایت معیار مماسی بر اساس گلوبی شدن سوئفت برای لوله‌ها (Z_T)



شکل ۵ شکل دستگاه بالج آزاد لوله



شکل ۶ ابزارهای اندازه‌گیری فشار و تغذیه محوری LVDT فشارسنج دیجیتال



شکل ۷ منحنی‌های بارگذاری

۴- بخش تجربی

به منظور انجام بالج آزاد لوله‌های آلومینیومی تحت منحنی‌های بارگذاری مختلف و به دست آوردن حداکثر ارتفاع بالج و منحنی حد شکل‌دهی و پارگی، یک دستگاه با قابلیت کنترل فشار داخلی و تغذیه محوری در دانشگاه تربیت مدرس ساخته شد. دستگاه مورد نظر در شکل ۵ نشان داده شده است. فشار داخلی به وسیله فشارسنج و تغذیه محوری به وسیله یک LVDT اندازه‌گیری می‌شود. دو قطعه مذکور در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. تغذیه محوری توسط جک‌های هیدرولیکی در دو طرف انجام می‌شود. برای اعمال فشار داخلی و تغذیه محوری از دو پمپ هیدرولیکی استفاده شده است. برای به دست آوردن نقاط منحنی حد شکل‌دهی باید حالت‌های مختلف بارگذاری ترکیبی از فشار داخلی و تغذیه محوری روی لوله اعمال شود. به این منظور از منحنی بارگذاری فشار و تغذیه محوری خطی استفاده شده است. هشت منحنی بارگذاری به کار گرفته شده، در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند. بارگذاری به صورت پله‌ای اعمال شده است. یعنی ابتدا فشار داخلی افزایش یافته و سپس تغذیه محوری اعمال شده است، تا ترکیب در لوله ایجاد شود. در این مورد پله‌های افزایش فشار داخلی ۰/۵ مگاپاسکال و پله افزایش تغذیه محوری

۳-۴- به دست آوردن کرنش‌های حدی

برای به دست آوردن کرنش‌های حدی (ε_1^c و ε_2^c) در فرآیند هیدرو-فرمینگ لوله، از معیارهای ناپایداری پلاستیکی بالا استفاده شد. با استفاده از مدل کارسختی توانی ($\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$) هر کدام از معادلات (۲۰)، (۳۱) و (۴۴) را می‌توان به صورت معادله (۴۵) نوشت.

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{n}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\xi_i}{\phi_i} \quad (45)$$

که در آن ξ_i و ϕ_i توابعی بر حسب نسبت تنش‌ها (α) و ضریب ناهمسانگردی صفحه‌ای (R) هستند. با فرض خطی بودن نسبت کرنش‌ها، کرنش مؤثر از معادله (۴۶) به دست می‌آید.

$$d\bar{\varepsilon} = 2 \left[\frac{1}{4c^2} (d\varepsilon_1^2 + d\varepsilon_2^2 + cd\varepsilon_1 d\varepsilon_2) \right]^{1/2} = \Psi \varepsilon_1 \quad (46)$$

$$\Psi = 2 \left[\frac{1}{4-c^2} (1 + \beta^2 + c\beta) \right]^{1/2} \quad (47)$$

$$\alpha = \frac{2\beta + c}{2 + 2c\beta} \quad (48)$$

با توجه به معادلات (۴۵)، (۴۶) و (۴۸)، کرنش‌های حدی طبق معادلات (۴۹) و (۵۰) به دست می‌آیند.

$$\varepsilon_1^c = \frac{\phi_1 n}{\xi_1 \Psi} \quad (49)$$

$$\varepsilon_2^c = \beta \varepsilon_1^c \quad (50)$$

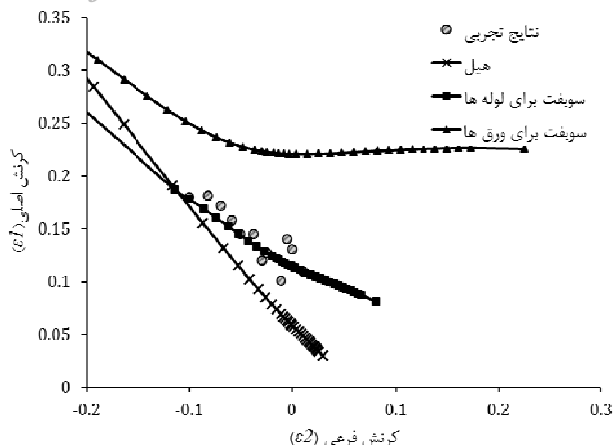
برای به دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی بر اساس هر معیار ناپایداری مقادیر n و R از آزمایش کشش به دست می‌آیند و یک مقدار اولیه برای β در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از معادله (۴۸) مقدار α به دست می‌آید. با داشتن α ، مقدار ξ_i و ϕ_i برای هر معیار با استفاده از معادلات (۲۰)، (۳۱) و (۴۴) به دست خواهند آمد. سپس با قرار دادن این مقادیر در معادله (۴۹) و همچنین به دست آوردن Ψ از معادله (۴۷)، مقدار کرنش حدی ε_1^c محاسبه می‌شود. با استفاده از این مقدار ε_1^c ، مقدار کرنش حدی ε_2^c از معادله (۵۰) محاسبه شده و در نتیجه یک نقطه از منحنی حد شکل‌دهی به دست می‌آید. حال با تغییر مقدار β ، دیگر نقاط منحنی نیز محاسبه خواهند شد.

۳-۵- به دست آوردن تنش‌های حدی

به دلیل اینکه برای به دست آوردن کرنش‌های حدی، فرض می‌شود که نسبت کرنش مقدار ثابتی است، منحنی حد شکل‌دهی وابسته به مسیر تغییر شکل است. اگر نقاط منحنی حد شکل‌دهی که بر حسب کرنش‌های حدی هستند به تنش‌های معادل آن بر طبق سطح تسلیم تبدیل شود، منحنی جدید تنش‌های حدی (σ_1^c و σ_2^c) را معرفی می‌کند. این منحنی دیگر به مسیر تغییر شکل وابسته نیست و می‌تواند برای هر حالت به کار رود. در اینجا با در نظر گرفتن ناهمسانگردی و سطح تسلیم بارلات و با استفاده از معیارهای ناپایداری معرفی شده، تنش‌های حدی با استفاده از معادلات (۵۱) و (۵۲) به دست می‌آیند.

$$\sigma_1^c = \frac{2}{4c^2} \{K(\Psi \varepsilon_1^c)^{n1}\} [c\varepsilon_2^c + 2\varepsilon_1^c] \quad (51)$$

$$\sigma_2^c = \frac{2}{4c^2} \{K(\Psi \varepsilon_1^c)^{n1}\} [c\varepsilon_1^c + 2\varepsilon_2^c] \quad (52)$$



شکل ۱۱ منحنی‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک



شکل ۱۲ تغییر قطر دایره‌ای حک شده بر روی لوله

۵- نتایج

۵-۱- کرنش‌ها و تنش‌های حدی برای لوله‌های آلومینیومی

با استفاده معیارهای ناپایداری معرفی شده در بخش ۳، منحنی‌های حد شکل‌دهی کرنشی و تنشی به دست آمدند. منحنی‌های حد شکل‌دهی بر اساس خواص مکانیکی، که در جدول ۱ آمده است، محاسبه شده‌اند.

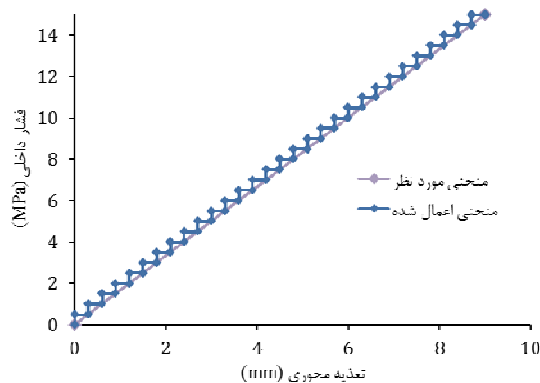
منحنی‌های حد شکل‌دهی کرنشی بر اساس سه معیار ناپایداری در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشخص است معیار ناپایداری سویفت برای لوله‌ها بهترین تطابق را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. در مقادیر منفی کرنش فرعی، نتایج دو معیار هیل و سویفت برای لوله‌ها خیلی نزدیک به هم است. اما پیش‌بینی معیار ناپایداری سویفت برای ورق‌ها خیلی بالاتر از نتایج تجربی است و اختلاف زیادی را نشان می‌دهد. دو معیار گلوبی سویفت برای ورق‌ها و هیل برای پیش‌بینی ناپایداری در ورقی که ابتدا شکل صفحه‌ای را دارد، توسعه داده شده‌اند؛ در نتیجه پیش‌بینی آن‌ها برای ترکیدگی لوله که در ابتدا حالت خمیده دارد، اختلاف بیشتری با نتایج تجربی خواهد داشت.

بر اساس نوع منحنی‌های بارگذاری اعمال شده، نباید کرنش فرعی مثبت و بزرگی در لوله ایجاد شود؛ زیرا لوله در بیشتر موارد، به غیر از تغذیه محوری صفر، در راستای محوری تحت فشار قرار دارد. ولی معیار سویفت برای ورق‌ها، کرنش‌های مثبت فرعی بزرگی را پیش‌بینی کرده که غیر واقعی می‌نماید. سه نمونه از لوله‌هایی که تحت منحنی‌های بارگذاری نشان داده شده در شکل ۷

۰/۳ میلی‌متر بوده است. نمونه‌ای از منحنی‌های بارگذاری اعمال شده بر روی لوله با منحنی مورد نظر در شکل ۸ مقایسه شده است.

برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در کار تجربی نیز یک طرح شبکه‌ای دایره‌ای منظم با قطر دو میلی‌متر بر روی نمونه‌ها حک شد. برای حک این دایره‌ها از دستگاه حک الکتروشیمیایی، که در شکل ۹ نشان داده شده، استفاده شده است.

پس از انجام آزمایش بالچ، تغییر شکل با اندازه‌گیری قطر دایره‌ها در راستای طولی و محیطی لوله کرنش‌ها به دست آمدند. دایره‌های حک شده بر روی لوله‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای به دست آوردن کرنش‌های حدی ابتدا لوله‌ها حکاکی شده و سپس تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. بارگذاری زمانی متوقف می‌شود که ترکیدگی در لوله رخ داده باشد. پس از ترکیدگی اندازه دایره‌های حکاکی شده بر روی لوله در محل نزدیک به ترکیدگی اندازه‌گیری می‌شود و با توجه تغییر قطر دایره‌ها در دو راستای محیطی و طولی لوله، کرنش‌های حدی محاسبه می‌شوند. اندازه‌گیری قطرها با استفاده از خط‌کش میلر انجام شده که دقت اندازه‌گیری با آن در حدود ۰/۰۲ میلی‌متر است. خط‌کش میلر طلق شفاف است که خطوط تیره‌رنگ با اندازه‌های مختلف روی آن چاپ شده است.



شکل ۸ مقایسه منحنی بارگذاری مورد نظر و منحنی اعمالی به لوله



شکل ۹ دستگاه حک الکتروشیمیایی

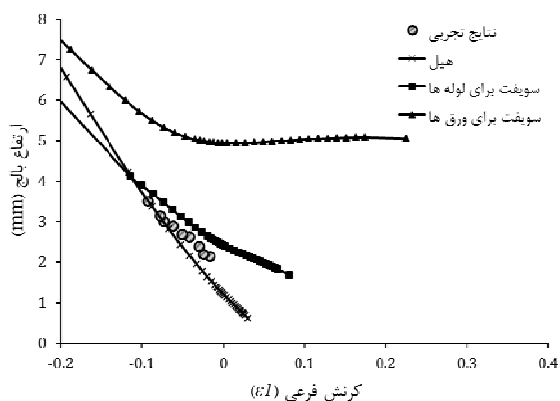


شکل ۱۰ دایره‌های حک شده بر روی لوله

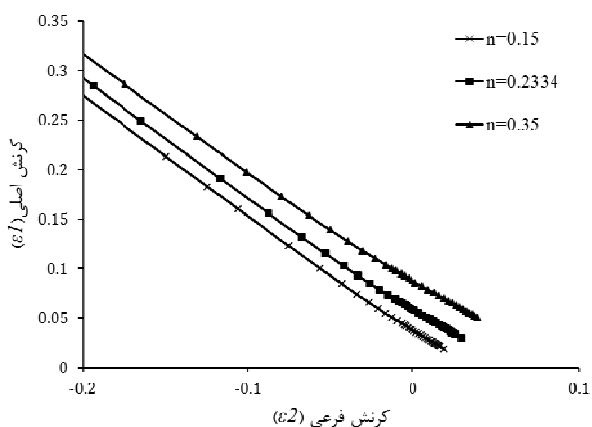
ارتفاع بالچ پیش‌بینی شده توسط سه معیار ناپایداری در شکل ۱۵ با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، معیار ناپایداری سویفت برای ورق‌ها، پیش‌بینی خیلی بالایی برای ارتفاع بالچ دارد. اما نتایج دو معیار هیل و سویفت برای لوله‌ها به نتایج تجربی نزدیک‌تر است که هر چقدر مقدار کرنش فرعی منفی‌تر می‌شود، معیار هیل پیش‌بینی بهتری دارد.

۵-۳- تأثیر ضریب کارسختی بر کرنش‌های حدی

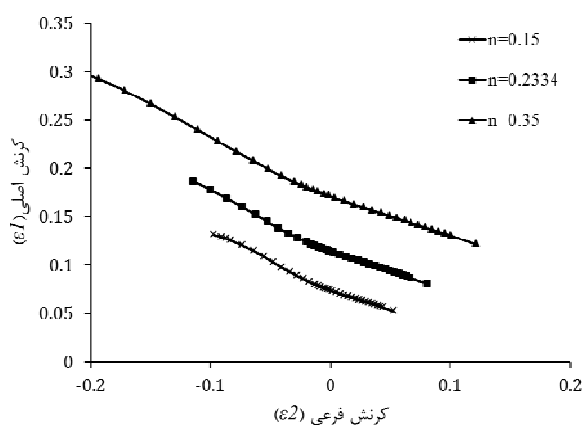
در این بخش به منظور بررسی تأثیر ضریب کارسختی (n) ماده بر روی کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای مختلف، سه مقدار ۰/۱۵، ۰/۲۳۳۴ و ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۵ مقایسه ارتفاع بالچ پیش‌بینی شده توسط معیارهای ناپایداری با نتایج تجربی



شکل ۱۶ تأثیر ضریب کارسختی بر روی کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیار هیل



شکل ۱۷ تأثیر ضریب کارسختی بر روی کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیار سویفت برای لوله‌ها

قرار گرفته و دچار ترکیبگی شده‌اند، در شکل ۱۲ دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش تغذیه محوری شکل‌پذیری بیشتر شده و ارتفاع بالچ افزایش می‌یابد.

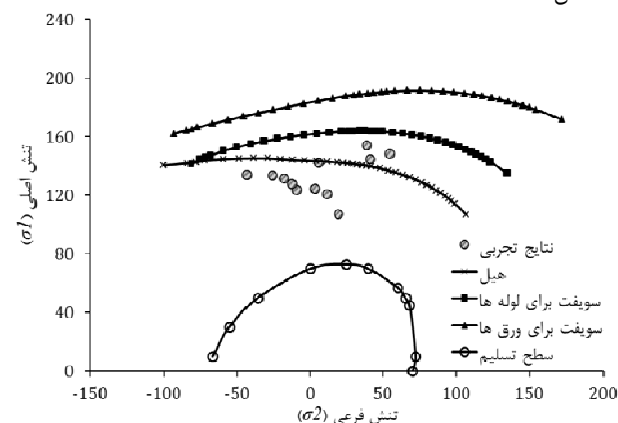
تنش‌های حدی به دست آمده به وسیله پیش‌بینی سه معیار ناپایداری در شکل ۱۳ با نتایج تجربی، همراه با سطح تسلیم ماده، مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌بینی همه معیارهای ناپایداری تقریباً بالاتر از نتایج تجربی است. فقط در تنش‌های فرعی مثبت زیادتر، کمی انطباق بین نتایج پیش‌بینی دو معیار سویفت برای لوله‌ها و هیل با نتایج تجربی وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نقاط تنش تجربی پراکنده هستند و نظم خاص ندارند. این اختلاف، بیشتر بین نقاط قرار گرفته در سمت چپ و راست محور تنش فرعی صفر وجود دارد. در سمت چپ این محور تنش فرعی از نوع فشاری است و ممکن است رفتار ماده بر اساس مدل کارسختی همسانگرد نباشد و این موضوع باعث اختلاف در نتایج شود. همچنین برای محاسبه خواص مکانیکی ماده، از آزمایش کشش تک‌محوری استفاده شده است؛ در حالی که ماهیت فرآیند صفحه‌ای است و بهتر است برای محاسبه خواص از کشش دو محوره استفاده شود.

۵-۲- پیش‌بینی ارتفاع بالچ

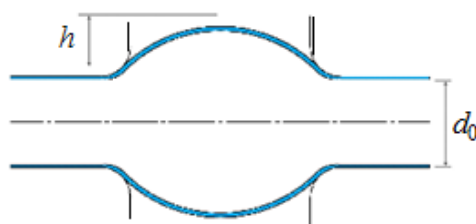
با استفاده از کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده در راستای محیطی توسط سه معیار ناپایداری، ارتفاع بالچ لوله‌ها در زمان ترکیبگی محاسبه شد و با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. کرنش اصلی در بالچ آزاد، کرنش در راستای محیطی لوله است که به وسیله معادله (۴۲) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{d-d_0}{d_0}\right) = \ln\left(\frac{h}{r_0}\right) \quad (53)$$

در این معادله r_0 و d_0 به ترتیب شعاع و قطر اولیه لوله هستند. h ارتفاع بالچ لوله در لحظه ترکیبگی و d قطر لوله در آن لحظه است. با قرار دادن کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده در معادله ۵۳، ارتفاع بالچ در حالت‌های مختلف بارگذاری به دست می‌آید. نحوه اندازه‌گیری ارتفاع بالچ (h) در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



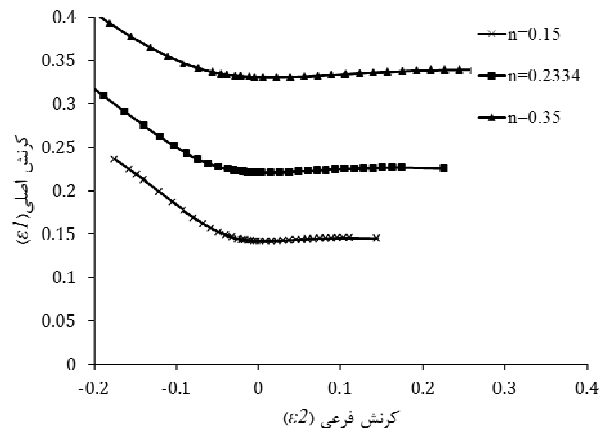
شکل ۱۳ تنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک



شکل ۱۴ اندازه‌گیری ارتفاع بالچ

علائم یونانی

نسبت کرنش‌ها (-)	β
نسبت تنش‌ها (-)	α
تنش مؤثر (MPa)	$\bar{\sigma}$
کرنش مؤثر (-)	$\bar{\epsilon}$
تنش در راستای محیطی (MPa)	σ_1
تنش در راستای محوری (MPa)	σ_2
ضریب پلاستیک	λ
تابع پتانسیل پلاستیک	f
کرنش در راستای محیطی (-)	ϵ_1
کرنش در راستای محوری (-)	ϵ_2
کرنش در راستای ضخامت (-)	ϵ_3



شکل ۱۸ تأثیر ضریب کارسختی بر روی کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیار سوئیفت برای ورق‌ها

۸- مراجع

- [1] M. Ahmed, M.S.J. Hashmi, Estimation of machine parameters for hydraulic bulge forming of tubular components, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 64, No. 1, pp. 9-23, 1997.
- [2] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 34-40, 2000.
- [3] Y. Hwang, Y. Lin, Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, No. 1, pp. 821-825, 2002.
- [4] H. L. Xing, A. Makinouchi, Numerical analysis and design for tubular hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No. 4, pp. 1009-1026, 2001.
- [5] B. J. Mac Donald, M. S. J. Hashmi, 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] J. Kim, Y. Kim, B. Kang, S. Hwang, 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] W. Song, S. Kim, J. Kim, B. Kang, Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1618-1623, 2005.
- [8] K. Yoshida, T. Kuwabara, Effect of strain hardening behavior on forming limit stresses of steel tube subjected to nonproportional loading paths, *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, No. 7, pp. 1260-1284, 2007.
- [9] M. Jansson, L. Nilsson, K. Simonsson, On strain localisation in tube hydroforming of aluminium extrusions, *Journal of materials processing technology*, Vol. 195, No. 1, pp. 3-14, 2008.
- [10] S. E., Eftekhari Shahri, S. Y. Ahmadi Brooghani, K. Khalili, B. S. Kang, Ultrasonic tube hydroforming a numerical and analytical study, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 46-59, 2013 (in Persian).
- [11] M. Elyasi, Z. P. oghipour, M. Bakhshi, A. H. Gorji, Analysis of Geometry and Thickness Distribution in a New Hydroforming Die for Cylindrical Stepped Tubes, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 2, pp. 47-57, 2010 (in Persian).
- [12] Chu, E., and Yu Xu, Influences of generalized loading parameters on FLD predictions for aluminum tube hydroforming, *Journal of materials processing technology*, Vol. 196, No. 1 pp. 1-9, 2008.
- [13] Hwang, Yeong-Maw, Yi-Kai Lin, and Han-Chieh Chuang. Forming limit diagrams of tubular materials by bulge tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 11, pp. 5024-5034, 2009.
- [14] F. Barlat, J. Lian, Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I. A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions, *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-66, 1989.
- [15] R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, New York, Oxford University Press, 1983.
- [16] H. W. Swift, Plastic instability under plane stress, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-18, 1952.

منحنی‌های حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده با سه ضریب کارسختی مختلف در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. ضریب ناهمسانگردی در همه حالت‌ها برابر ۰/۴ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب کارسختی کرنش‌های حدی افزایش یافته و منحنی حد شکل‌دهی بالاتر می‌رود. هر چقدر ضریب کارسختی زیادتر شود، مقدار افزایش طول یکنواخت و در نتیجه بیشینه افزایش طول بالاتر رفته و در نتیجه مقدار کرنش حدی اصلی بالاتر می‌رود. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که افزایش ضریب استحکام، بیشترین تأثیر را بر روی پیش‌بینی معیار سوئیفت برای ورق‌ها داشته و منحنی حد شکل‌دهی مربوط به این معیار خیلی بالاتر رفته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پیش‌بینی کرنش‌ها و تنش‌های حدی در هیدروفورمینگ به وسیله معیارهای ناپایداری پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- معیار ناپایداری سوئیفت برای لوله‌ها بهترین پیش‌بینی را برای کرنش‌های حدی دارد. پیش‌بینی معیار سوئیفت برای ورق‌ها اختلاف زیادی با نتایج تجربی را دارا است.
 - ۲- تنش‌های حدی پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای ناپایداری، با نتایج تجربی اختلاف دارد و فقط در بعضی حالت‌ها، معیار هیل پیش‌بینی نزدیک‌تری به نتایج تجربی را دارد.
 - ۳- مقدار ارتفاع بالج لوله با تبدیل کرنش حدی اصلی به دست می‌آید و معیار هیل بهترین پیش‌بینی را برای ارتفاع بالج لوله دارد.
- با افزایش ضریب کارسختی ماده، کرنش حدی بیشتر شده و منحنی حد شکل‌دهی بالاتر می‌رود.

۷- فهرست علائم

توان معیار تسلیم (-)	a
نیروی محوری (N)	F_{axial}
ضریب استحکام (MPa)	K
ضریب کارسختی (-)	n
فشار داخلی (MPa)	p
ضریب ناهمسانگردی (-)	R
شعاع لوله (mm)	r
ضخامت لوله (mm)	t