



# مطالعه منحنی تنش - کرنش لوله مسی C12200 به کمک آزمون بالج هیدرولیکی با استفاده از قالب T شکل

امیر اشرفی<sup>1</sup>، خلیل خلیلی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\*بیرجند، صندوق پستی 615/97175، kkhaliili@birjand.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

در فرآیند هیدروفرمینگ اعمال همزمان فشار هیدرولیکی به سطح داخلی لوله و نیروی محوری به دو انتهای لوله، باعث تبدیل یک لوله به شکل قالب مورد نظر می‌شود. استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود برای پیش‌بینی ابعاد هندسی قطعات تولیدی و پیش‌گیری از عیوب احتمالی متداول است. برای شبیه‌سازی اجزاء محدود خواص مکانیکی دقیق ماده لوله مورد نیاز است. بدست آوردن خواص مکانیکی ماده لوله از آزمایش‌های مشابه با فرآیند هیدروفرمینگ مطلوب می‌باشد. در این تحقیق آزمون بالج هیدرولیکی با استفاده از قالب T شکل برای بدست آوردن منحنی تنش-کرنش ماده لوله معرفی گردیده است. برای این منظور با استفاده از یک سیستم هیدروفرمینگ، آزمایشاتی بر روی لوله‌های مشابه از جنس آلایژ مس C12200 انجام شده است. مقادیر پارامترهای هندسی مورد نیاز برای استفاده در روابط تحلیلی استخراج شده‌اند و منحنی تنش-کرنش رسم گردیده است. نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایش کشش مقایسه شده است. همچنین اثر ناهمسانگردی بر روی منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از هر دو آزمون مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی تنش-کرنش بدست آمده برای رسم منحنی حد شکل‌دهی استفاده شده است. خواص مکانیکی بدست آمده از آزمون بالج و منحنی حد شکل‌دهی، برای شبیه‌سازی ترکیب لوله و پیش‌بینی ابعاد هندسی قطعه نهایی در فرآیند هیدروفرمینگ سهرای T شکل بکار رفته است و با نتایج قطعه آزمایش هیدروفرمینگ مقایسه گشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که قطعه هیدروفرمینگ شبیه‌سازی شده به کمک منحنی تنش-کرنش بدست آمده از روش ارائه شده، با دقت مناسبی به قطعه هیدروفرمینگ واقعی منطبق بوده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 10 خرداد 1393  
پذیرش: 22 تیر 1393  
ارائه در سایت: 12 مهر 1393  
کلید واژگان:  
آزمون بالج هیدرولیکی  
آزمون کشش  
منحنی حد شکل‌دهی  
شبیه‌سازی اجزاء محدود  
هیدروفرمینگ قطعه T شکل

## Studying the stress-strain curve of C12200 Copper tube using hydraulic bulge test in T-shaped die

Amir Ashrafi<sup>1</sup>, Khalil Khalili<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\*P.O.B. 615/97175 Birjand, kkhaliili@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 31 May 2014  
Accepted 13 July 2014  
Available Online 04 October 2014

### Keywords:

Hydraulic bulge test  
Tensile test  
T-shape tube hydroforming  
Forming limit diagram  
Finite element simulation

### ABSTRACT

In hydroforming process, applying hydraulic pressure to the inner surface of tube along with axial loads to two ends of tube simultaneously causes the tube to be formed to the die shape. Application of finite element simulation is a common practice to predict the geometrical dimensions of the produced part and analysis of probable defects. For finite element simulation, precise mechanical properties of tube material are required. Obtaining these properties from a test similar to the tube hydroforming process is desirable. In this study hydraulic bulge test using T-shape die has been introduced to obtain the stress-strain curve of the tube material. Using hydroforming set-up, several experiments were carried out on C12200 copper alloy samples. Geometrical parameters required to be used in analytical solutions have been identified and the stress-strain curve has been plotted. The results of the proposed experiment have been compared to the results of the tensile test. In addition, the effects of anisotropy on the obtained stress-strain curve of both tests have been determined. The stress-strain curve obtained has been used to plot the forming limit diagram. The bulge test mechanical properties and the forming limit diagram have been applied to simulate the tube bursting and prediction of the final part of geometrical dimensions in T-shape tube hydroforming and these results have been compared to the part being experimentally produced by hydroforming. The results show that when stress-strain curve obtained by the proposed experiment is used, there is good agreement between the simulated hydroformed part and the part being produced experimentally.

قالب مورد نظر با استفاده از اعمال همزمان فشار هیدرولیکی به سطح داخلی

لوله و نیروی محوری به دو انتهای لوله است. عمده‌ترین مزایای این فرآیند

1- مقدمه

هیدروفرمینگ لوله، یک فرآیند شکل‌دهی برای تبدیل لوله اولیه به شکل



کوچک آن ( $R_\theta$ ) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_\theta = R_\phi - h_1 \quad (8)$$

با استفاده از خواص بیضی، شعاع انحناء لوله در جهت‌های طولی و محیطی در نقطه قله برآمدگی با استفاده از فرمول‌های زیر قابل محاسبه است:

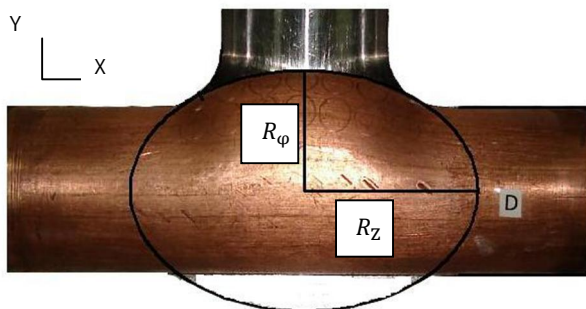
$$\rho_\theta = \frac{R_0^2}{R_\theta} \quad (9)$$

$$\rho_\phi = \frac{R_Z^2}{R_\phi} \quad (10)$$

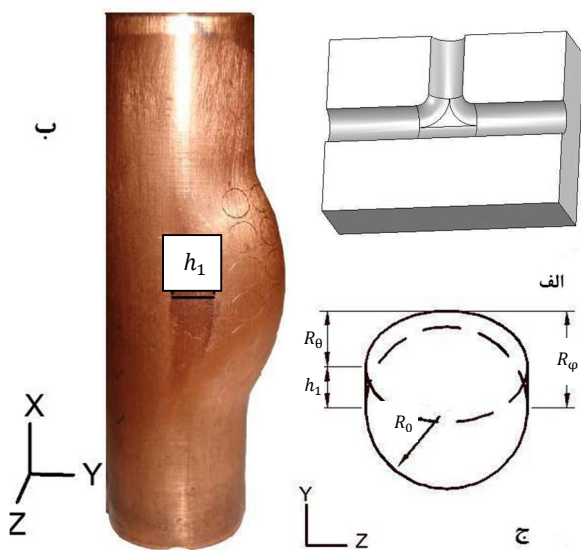
با استفاده از مقادیر شعاع‌های انحناء، از روابط 1 تا 4 برای محاسبه مؤلفه‌های تنش و کرنش در راستاهای طولی و محیطی و از روابط ون میز برای بدست آوردن تنش مؤثر و کرنش مؤثر استفاده شده است.

## 2-2- مواد و تجهیزات آزمون بالچ

در این تحقیق با استفاده از قالب با حفره T که در شکل 4 نشان داده شده است و یک سیستم هیدرولیکی که به کمک کنترلر تناسبی- تفاضلی- انتگرالی قادر به کنترل دقیق فشار می‌باشد، چندین آزمایش برای بدست آوردن رابطه تنش-کرنش ماده لوله در منطقه برآمدگی لوله مسی انجام شده است. لوله استفاده شده در آزمایشات از جنس آلیاژ مس C12200 طبق استاندارد ASTM B280 می‌باشد، که در دمای 550 درجه سانتیگراد به مدت 90 دقیقه تحت عملیات آنیلینگ نیز قرار گرفته است. قطر خارجی لوله،



شکل 2 هندسه لوله تغییر شکل یافته به صورت یک بیضی



شکل 3 پروفیل لوله تغییر شکل یافته به صورت یک بیضی

محور لوله، روابط 1 و 2 را برای محاسبه کرنش محیطی و کرنش ضخامت و روابط 3 و 4 را برای محاسبه تنش طولی و تنش محیطی در نقطه p در شکل 1 ارائه کرده‌اند [9]:

$$\epsilon_\theta = \ln\left(\frac{R_\phi - t_p/2}{R_0 - t_0/2}\right) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{t_p}{t_0}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_\phi = \frac{P_1(\rho_\theta - t_p)^2}{2t_p(\rho_\theta - t_p/2)} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_1(\rho_\theta - t_p)}{2t_p(\rho_\theta - t_p/2)} (2\rho_\phi - \rho_\theta - t_p) \quad (4)$$

با استفاده از مؤلفه‌های تنش و کرنش بدست آمده و با فرض شرایط تنش صفحه‌ای و ماده همسانگرد، تنش مؤثر و کرنش مؤثر در لوله از معیار ون میز طبق روابط زیر بدست می‌آید [9]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \sigma_\theta\sigma_\phi + \sigma_\phi^2} \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{4}{3}(\epsilon_\theta^2 + \epsilon_\theta\epsilon_t + \epsilon_t^2)} \quad (6)$$

## 2-1- آزمون بالچ هیدرولیکی در قالب T شکل

در این تحقیق شرایط تنش‌ها در قله برآمدگی قطعه، در قالب T شکل مورد بررسی قرار گرفته است. بدلیل عدم تقارن محوری قالب T شکل در مقایسه با قالب بالچ آزاد، تغییراتی در مقادیر متغیرهای مدل هواآنگ انجام گرفته است. لوله تغییر شکل یافته در قالب T شکل در دو مقطع در صفحه طولی XY و صفحه عرضی YZ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است، هندسه لوله تغییر شکل یافته در دو صفحه XY و YZ قسمت‌هایی از بیضی فرض شده است. بیضی مربوط به هندسه لوله در صفحه XY دارای دو قطر بزرگ و کوچک است، که نیم‌قطرهای مربوطه در شکل 1 نشان داده شده‌اند. چنانچه تصویر قالب و لوله به اندازه‌های واقعی کالیبره گردد، با منطبق کردن بیضی به هندسه لوله تغییر شکل یافته در منطقه سه‌راهی و اندازه‌گیری مقادیر به کمک تکنیک‌های برازش منحنی امکان بدست آوردن مشخصات این بیضی وجود خواهد داشت. همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است نیم قطر بزرگ ( $R_Z$ ) به کمک نرم‌افزار اندازه‌گیری می‌شود و نیم قطر کوچک از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$R_\phi = R_0 + h \quad (7)$$

که در این رابطه  $R_0$  شعاع خارجی لوله اولیه و  $h$  ارتفاع قله برآمدگی است.

نتایج آزمایشات لوله تغییر شکل یافته نشان می‌دهد که چنانچه لوله درون قالب T تغییر شکل پیدا کند، تماس لوله و قالب در وسط قالب افزایش می‌یابد و لوله به تدریج که در طرف شاخه سه راهی جلو می‌رود در محلی که در شکل 3- ب نشان داده شده است، سطح تختی ایجاد می‌شود. این حالت که برای قالب نشان داده شده در شکل 3- الف اتفاق می‌افتد، باعث تغییراتی در فرم منحنی مربوط به هندسه مقطع لوله تغییر شکل یافته در صفحه YZ در مقایسه با قطعه بالچ آزاد می‌گردد. هندسه برآمدگی لوله در این مقطع را همان‌طور که در شکل 3- ج نشان داده شده است، می‌توان یک بیضی در نظر گرفت، به طوری که نیم قطر بزرگ آن همان شعاع اولیه لوله ( $R_0$ ) و نیم قطر



شکل 5 لوله‌های تغییرشکل یافته در آزمایش بالچ

جدول 1 نتایج آزمایشات بالچ هیدرولیک و مقادیر نرم‌افزار اتوکد

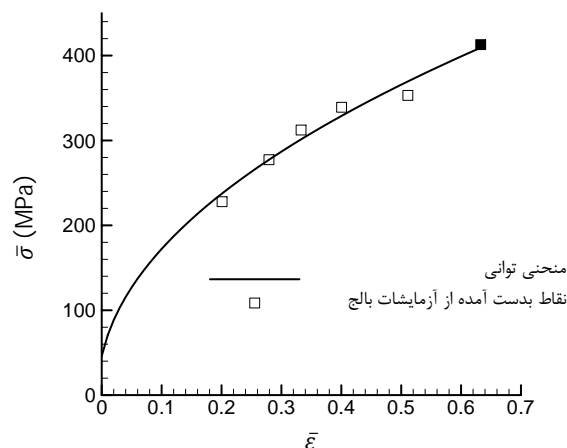
شماره قطعه	P (MPa)	h (mm)	t (mm)	R <sub>Z</sub> (mm)	R <sub>φ</sub> (mm)	R <sub>θ</sub> (mm)
۱	19/6	1/6	1/04	52/48	15/88	15/66
۲	22/5	3/2	0/98	37/28	17/48	16/53
۳	23/7	3/4	0/92	36/16	17/68	16/68
۴	25/6	4/1	0/86	31/31	18/38	17/16
۵	27/8	6/4	0/79	25/73	20/68	16/05
۶	28/7	6/5	0/68	25/50	20/78	15/56

منحنی تغییرات تنش بر حسب کرنش در منطقه پلاستیک را می‌توان توسط رابطه‌ی 11 نشان داد:

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (11)$$

که در این رابطه K ضریب استحکام،  $\epsilon_0$  پیش کرنش و n توان کارسختی نامیده می‌شود.

با استفاده از روش کمترین مربعات، یک منحنی توانی طبق رابطه 11 بر داده‌های بدست آمده از آزمون بالچ عبور داده شده است، که مشخصات این منحنی توانی در جدول 2 داده شده است.

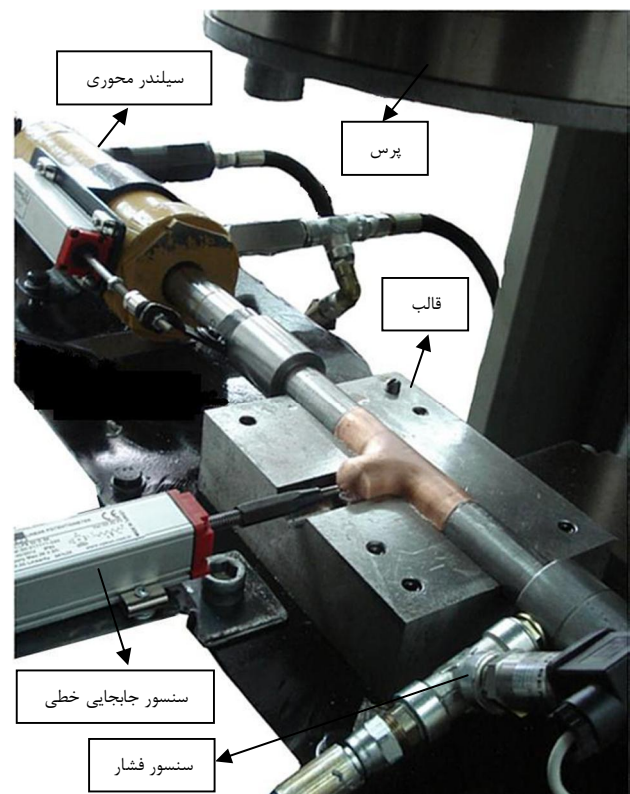


شکل 6 تنش‌ها و کرنش‌های بدست آمده از آزمایشات بالچ و منحنی توانی مربوط

جدول 2 ضرایب منحنی توانی آزمون بالچ

فرضیات	ضریب استحکام	توان کارسختی	پیش کرنش
ماده همسانگرد	K(MPa)	n	$\epsilon_0$
	508	0/484	0/007

ضخامت دیواره و طول لوله به ترتیب 28/56 میلیمتر، 1/27 میلیمتر و 100 میلیمتر انتخاب شده است. برای بررسی خواص مکانیکی ابتدا لوله مسی آنیل شده با ابعاد تعریف شده درون قالب T شکل قرار داده شده است و قسمت بالایی قالب توسط پرس بر روی قسمت پایینی قرار می‌گیرد. سپس سیستم هیدرولیکی توسط کاربر فعال شده و ابتدا سیلندرها را محوری حرکت می‌نمایند، تا آب‌بندی دو انتهای لوله انجام شود. پس از آب‌بندی روغن به درون لوله تزریق می‌شود و تا فشار مورد نظر فشرده می‌گردد. برای انجام آزمایشات بالچ، شش لوله با ابعاد مورد نظر که در شرایط یکسانی آنیل شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای هر آزمایش یک سطح فشار داخلی مشخص پیش‌بینی شده است که توسط سیستم کنترل مدار بسته هیدرولیکی قابل دستیابی بوده است و در همه آزمایشات دو انتهای لوله‌ها بدون حرکت بوده‌اند. در حین انجام آزمایشات فشار درون لوله و ارتفاع برآمدگی شاخه سهرای به ترتیب با استفاده از حسگر فشار و حسگر جابجایی خطی اندازه‌گیری شده است. برای هر آزمایش از قطعه مورد نظر درون قالب تصویربرداری شده است و سپس عملیات کالیبره کردن تصاویر، عبور دادن بیضی از لبه‌های تصویر لوله و نهایتاً اندازه‌گیری مقادیر مربوط به مشخصات بیضی درون نرم‌افزار مدل‌سازی هندسی انجام شده است. در شکل 5، شش لوله را پس از آزمایش نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به فشار داخلی لوله‌ها، ارتفاع برآمدگی شاخه سهرای، ضخامت دیواره لوله‌ها و نیم‌قطرهای بیضی‌های مربوط به پروفیل لوله در منطقه برآمدگی در جدول 1 آورده شده‌اند. با استفاده از اعداد جدول و روابط 1 تا 4 مؤلفه‌های کرنش‌ها و تنش‌ها در نقطه قله برآمدگی بدست آمده است. این مؤلفه‌های تنش و کرنش در روابط 5 و 6 قرار گرفته‌اند و مقادیر تنش مؤثر و کرنش مؤثر در نقطه‌ی قله برآمدگی در هر آزمایش محاسبه شده‌اند، که بصورت نقاطی در شکل 6 نشان داده شده‌اند.



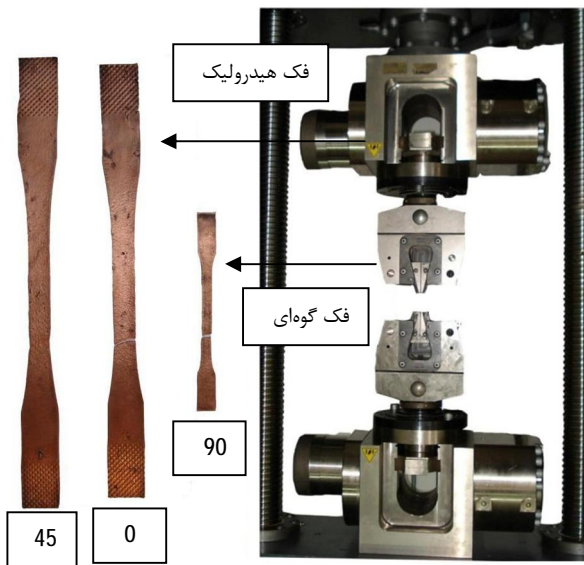
شکل 4 قالب هیدروفورمینگ و تجهیزات اندازه‌گیری فشار و جابجایی

## 2-2- آزمون کشش تک محوره

یکی از روش‌های بدست آوردن منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر ماده لوله، استفاده از آزمون کشش تک محوره بر روی نمونه‌هایی است که مطابق استاندارد از درون لوله تهیه شده‌اند. عموماً نمونه‌هایی که در جهت طولی مطابق شکل 7 از درون لوله استخراج می‌شوند، مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در این تحقیق خواص مکانیکی لوله توسط آزمون کشش بر روی نمونه‌هایی که در راستای طولی و نیز زوایای 45 و 90 درجه نسبت به راستای طولی لوله تهیه شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر روی خواص مکانیکی مقدار ضریب ناهمسانگردی عمودی  $R$  که مطابق فرمول 12 تعریف می‌شود، استفاده می‌گردد.

$$R_{\gamma} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (12)$$

که در این رابطه  $\epsilon_w$  کرنش عرضی و  $\epsilon_t$  کرنش ضخامتی نمونه‌های کشش و  $\gamma$  راستای نمونه‌ی آزمون می‌باشد. طبق این رابطه  $R_{90}$  و  $R_{45}$  به ترتیب برای نمونه‌های کشش استاندارد است که در راستای با زاویه صفر، 45 و 90 درجه نسبت به راستای محور لوله استخراج شده‌اند و تا کرنش طولی 20% توسط دستگاه کشش کشیده شده‌اند. در شکل 7 موقعیت نمونه‌های استخراج شده از درون لوله نشان داده شده‌اند. این نمونه‌ها مطابق با ابعاد استاندارد ASTM E8، توسط دستگاه وایرکات برش خورده و تحت عملیات حرارتی آنیلینگ مشابه با نمونه‌های لوله‌ای مورد استفاده در آزمون بالچ قرار گرفته‌اند. ابعاد نمونه کشش عمود بر محور لوله با توجه به قطر لوله، کوچکتر از نمونه‌های طولی و مورب است. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی توسط دستگاه کشش زوئیک<sup>1</sup> تحت کشش تک‌محوره قرار گرفته‌اند. مطابق شکل 8 برای نمونه‌های طولی و مورب از فک‌های هیدرولیکی و برای نمونه عمود بر محور لوله با توجه به محدودیت‌های ابعادی از فک‌های گوه‌ای استفاده شده است. نتایج آزمایش پس از تبدیل به تنش‌ها و کرنش‌های واقعی در شکل 9 نشان داده شده‌اند و در جدول 8 مشخصات هر آزمایش آورده شده است. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، نمونه‌های در راستای طولی بیشترین کرنش‌سختی و نمونه‌های در راستای 45 درجه کمترین کرنش‌سختی را داشته‌اند. بیشترین مقدار کرنش پلاستیک قبل از شکست مربوط به نمونه 45 درجه بوده است که بالاترین مقدار ضریب ناهمسانگردی عمودی را نیز داشته است، که به معنی مقاومت در برابر نازک‌شدگی می‌باشد. کمترین مقدار کرنش قبل از شکست نیز مربوط به نمونه 90 درجه بوده است که کمترین مقدار ضریب ناهمسانگردی عمودی را داشته است.



شکل 8 دستگاه کشش زوئیک و نمونه‌های آزمون کشش

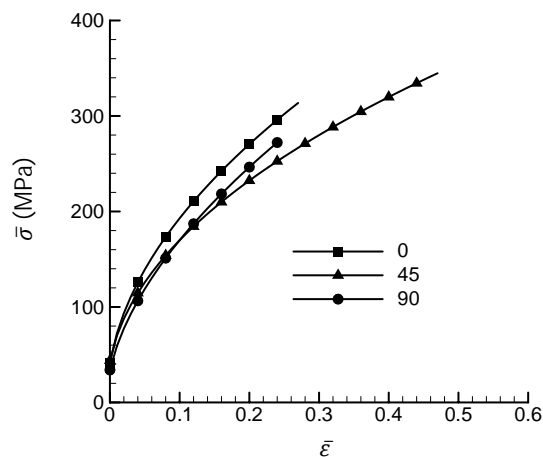
پس از انجام آزمایشات بر روی نمونه‌های کشش و بدست آوردن مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های حقیقی برای نمونه‌های در جهات سه گانه، منحنی توانی با استفاده از روش کمترین مربعات بر منحنی‌های تنش-کرنش مربوطه برازش شده است. نتایج بدست آمده برای منحنی‌های توانی و همچنین مقادیر ضریب ناهمسانگردی در جدول 3 آورده شده‌اند.

## 2-3- مقایسه نتایج آزمون بالچ و آزمون کشش

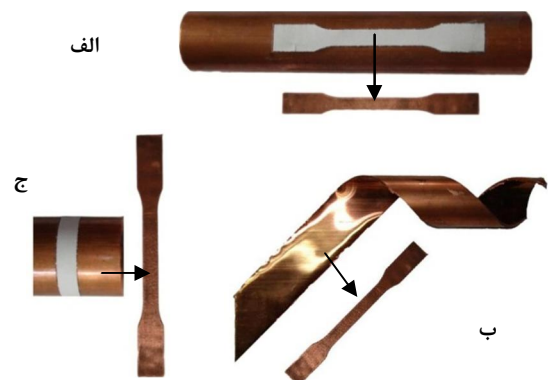
منحنی بدست آمده از آزمون بالچ و منحنی مربوط به آزمایش کشش برای نمونه‌ی در راستای طولی لوله ( $\gamma = 0$ ) در شکل 10 مقایسه شده‌اند.

جدول 3 نتایج آزمایشات کشش در جهات سه گانه

راستای نمونه آزمون کشش ( $\gamma$ )	ضریب استحکام (K(MPa)	توان کارسختی $n$	پیش کرنش $\epsilon_0$	ضریب ناهمسانگردی $R_{\gamma}$
0 درجه	602	0/505	0/005	0/648
45 درجه	489	0/471	0/005	1/391
90 درجه	597	0/560	0/006	0/628



شکل 9 منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های کشش در جهات سه گانه



شکل 7 راستای نمونه‌های آزمایش کشش (الف) 0 درجه، (ب) 45 درجه، (ج) 90 درجه

1-Zwick tensile testing machine

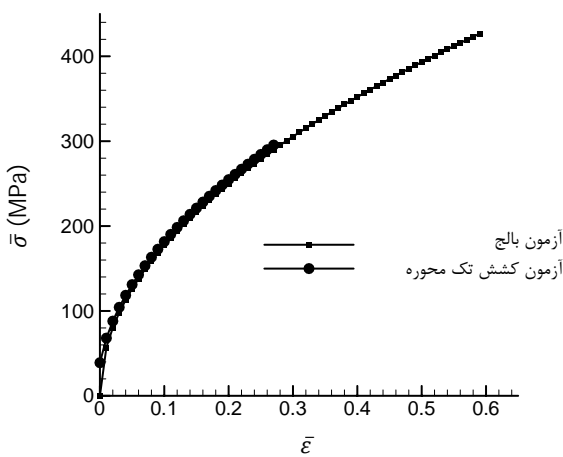
کاهش مقادیر تنش‌های نهایی از 313 به 295 مگاپاسکال شده است. در مورد کرنش‌های مؤثر، در نظر گرفتن ناهمسانگردی باعث کاهش کرنش مؤثر نهایی از 0/63 به 0/59 در آزمون بالچ و افزایش مقدار کرنش نهایی در آزمون کشش از 0/26 به 0/27 شده است. بررسی دو منحنی بالچ و کشش در شکل 11 نشان می‌دهد که می‌توان از داده‌های آزمون کشش در مواقعی که آزمون بالچ مقدور نیست با در نظر گرفتن ناهمسانگردی استفاده نمود. منحنی آزمون بالچ در مقایسه با منحنی آزمون کشش برای کرنش‌های بیشتری قبل از گلوئی اعتبار دارد. هنگام استفاده از داده‌های آزمون بالچ یا آزمون کشش در حالت تنش دو محوره شامل تنش‌های فشاری مانند فرآیند هیدروفورمینگ، باید داده‌ها برای کرنش‌های بیشتر برون‌یابی گردد. در این تحقیق برای مقایسه، تحلیل‌های اجزاء محدود به کمک هر دو منحنی انجام شده است.

مجدداً برای داده‌های آزمون‌های کشش و بالچ با در نظر گرفتن ناهمسانگردی مقادیر پارامترهای ضریب استحکام و توان کارسختی بدست آورده شده‌اند. جدول 4 مقادیر مربوط به پارامترهای منحنی‌های توانی آزمون کشش و آزمون بالچ را نشان می‌دهد.

### 3- منحنی حد شکل‌دهی کرنشی

در این تحقیق منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از خواص مکانیکی بدست آمده از آزمون بالچ بدست آمده است و به عنوان معیاری برای شکست و ترکیدگی لوله مورد استفاده قرار گرفته است. دو مدل برای مطالعه گلوئی شدن و شروع ناپایداری، مدل گلوئی محلی هیل و مدل گلوئی نفوذی سویفت است. برای بدست آوردن منحنی حد شکل‌دهی توسط مدل‌های هیل و سویفت فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود [13]:

- کرنش الاستیک نادیده گرفته شده است.
- شرایط تنش صفحه‌ای استفاده شده است.



شکل 11 نتایج آزمون بالچ و آزمون کشش با در نظر گرفتن ناهمسانگردی

جدول 4 مقادیر پارامترهای رابطه توانی با در نظر گرفتن ناهمسانگردی

نوع آزمون	ضریب استحکام	توان کارسختی	پیش کرنش
	$K(\text{MPa})$	$n$	$\epsilon_0$
کشش	567	0/505	0/005
بالچ	554	0/494	0

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود منحنی تنش و کرنش در آزمون بالچ برای کرنش‌های بیشتری در مقایسه با آزمون کشش اعتبار دارد.

در این تحقیق اثرات ناهمسانگردی ماده لوله در جهات مختلف نیز بر روی منحنی تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفته است. روابط تنش مؤثر و کرنش مؤثر برای آزمون بالچ برحسب مؤلفه‌های آن با در نظر گرفتن ضرایب ناهمسانگردی در جهات مختلف، به صورت روابط 13 و 14 تعریف شده‌اند [19].

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left[ \frac{(1 + 1/R_\phi)\sigma_\phi^2 - 2\sigma_\phi\sigma_\theta + (1 + 1/R_\theta)\sigma_\theta^2}{(1/R_\theta) + 1 + (1/R_\phi)} \right]} \quad (13)$$

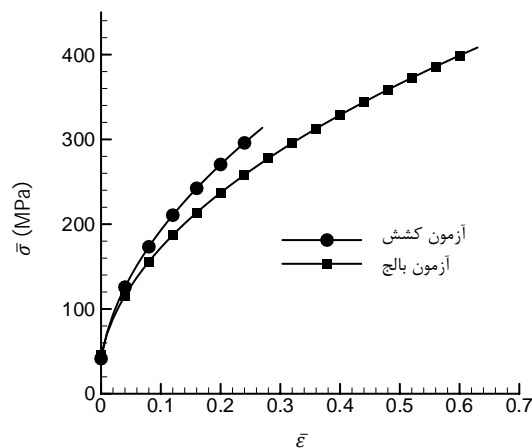
$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{4}{3} \left\{ \frac{(1/R_\theta) + (1/R_\phi) + 1}{(1/R_\theta R_\phi) + (1/R_\phi) + (1/R_\theta)} \times \left[ \left( \frac{1}{R_\theta} + \frac{1}{R_\phi} \right) \epsilon_\theta^2 + \frac{2}{R_\theta} \epsilon_\theta \epsilon_t + \left( 1 + \frac{1}{R_\theta} \right) \epsilon_t^2 \right] \right\}} \quad (14)$$

که در این روابط  $R_\theta$  و  $R_\phi$  به ترتیب معادل  $R_0$  و  $R_{90}$  می‌باشند. برای بدست آوردن رابطه تنش مؤثر و کرنش مؤثر از نتایج آزمون کشش با در نظر گرفتن ناهمسانگردی، از روابط زیر که حالت تنش تک محوره از روابط 13 و 14 هستند، استفاده گردیده است [13].

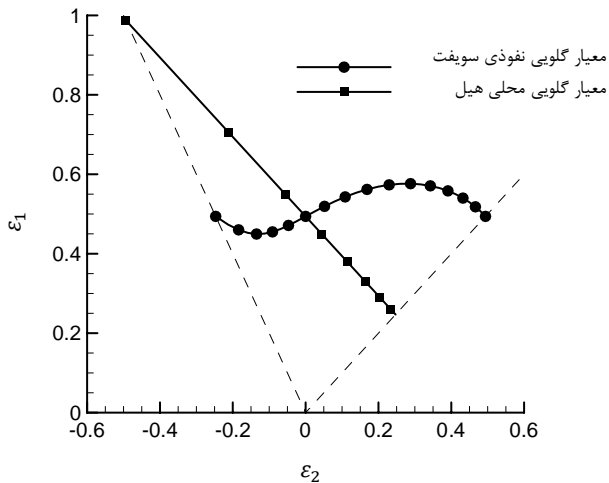
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left[ \frac{(1 + 1/R_0)}{(1/R_{90}) + 1 + (1/R_0)} \right]} \sigma_0 \quad (15)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{(1/R_{90}) + 1 + (1/R_0)}{1 + (1/R_0)} \right)} \epsilon_0 \quad (16)$$

که  $\sigma_0$  و  $\epsilon_0$  مقادیر تنش و کرنش آزمون کشش برای نمونه‌ی در راستای طولی لوله می‌باشد. شکل 11 نتایج مربوط به آزمون بالچ و آزمون کشش را با در نظر گرفتن خاصیت ناهمسانگردی در ماده لوله در جهات مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج دو آزمون با اختلاف ناچیزی در محدوده‌ی کرنش‌های مشترک به هم نزدیک هستند. از مقایسه منحنی‌های شکل‌های 10 و 11 نتیجه می‌شود که در نظر گرفتن ضرایب ناهمسانگردی از جدول 3، برای آزمون بالچ باعث افزایش مقادیر تنش‌های مؤثر نهایی از 408 به 426 مگاپاسکال گردیده است، در حالی که برای آزمون کشش باعث



شکل 10 منحنی تنش-کرنش آزمایش بالچ و آزمایش کشش در راستای طولی



شکل 13 منحنی‌های حد شکل‌دهی با استفاده از دو معیار هیل و سوپت

راست منحنی حد شکل‌دهی، از معیار گلوبی نفوذی سوپت و برای سمت چپ منحنی از معیار گلوبی محلی هیل استفاده می‌شود [13].

#### 4- شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند هیدروفرمینگ

روش اجزاء محدود بطور وسیعی برای شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات مانند هیدروفرمینگ لوله مورد استفاده قرار گرفته است. ری و مک دونالد شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ قطعات T و X شکل را بوسیله روش اجزاء محدود و با شرایط مرزی و بارگذاری مشابه با آزمایشات انجام دادند [20]. همچنین از ترکیب روش اجزاء محدود و طراحی آزمایشات برای بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ قطعه T شکل استفاده شده است [21,22]. در این تحقیق یک مدل اجزای محدود سه بعدی برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله مورد استفاده قرار گرفته است تا برای پیش‌بینی ترکیدگی و ابعاد هندسی قطعه‌ی نهایی تولید شده مورد استفاده قرار گیرد.

#### 4-1- شبیه‌سازی ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ

برای تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ، از منحنی تنش سیلان<sup>1</sup> بدست آمده از آزمون بالچ که در شکل 11 نشان داده شده است، به عنوان خواص مکانیکی لوله استفاده شده است. همچنین برای پیش‌بینی ترکیدگی در لوله از معیار منحنی حد شکل‌دهی کرنشی در شکل 16، که مقدار کرنش‌های اصلی در دو جهت محیطی و طولی در لوله را در نقطه شروع گلوبی نشان می‌دهد، استفاده شده است. طبق این معیار چنانچه مقدار کرنش‌ها در دو جهت محیطی و طولی به مقدار این منحنی برسد، شرایط ناپایداری پلاستیک اتفاق می‌افتد و ترکیدگی رخ خواهد داد. برای تحلیل اجزاء محدود از حل دینامیکی صریح در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>2</sup> استفاده شده است. از آنجایی که در حین فرآیند هیدروفرمینگ قالب و سنبه‌های محوری بدون تغییر شکل باقی می‌مانند، در مدل اجزاء محدود به عنوان اجسام پوسته‌ای و صلب در نظر گرفته شده‌اند. برای لوله از مدل پوسته‌ای با قابلیت تغییرشکل، با تعداد 38500 المان S4R که المان پوسته‌ای چهارگره‌ای است، استفاده شده است. برای تماس بین اجزای قالب و لوله ضریب اصطکاکی معادل 0/04 استفاده شده است. شرایط بارگذاری مشابه آزمایش ترکیدگی واقعی می‌باشد. به سطح

• نسبت تنش‌های صفحه‌ای  $(\alpha = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{\phi}})$  در نقطه قله برآمدگی در حین فرآیند ثابت فرض شده است.

برای بدست آوردن شرایط گلوبی با استفاده از منحنی تنش-کرنش می‌توان از پارامتر عکس تانژانت استفاده کرد که در شکل 12 نمایش داده شده است.

عکس تانژانت برای مدل‌های هیل و سوپت به ترتیب از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند [13]:

$$Z_1 = \frac{dg/d\bar{\sigma}}{(\partial g/\partial \sigma_1) + (\partial g/\partial \sigma_2)} \quad (17)$$

$$Z_d = \frac{[\sigma_1(\partial g/\partial \sigma_1) + \sigma_2(\partial g/\partial \sigma_2)] dg}{[\sigma_1(\partial g/\partial \sigma_1)^2 + \sigma_2(\partial g/\partial \sigma_2)^2] d\bar{\sigma}} \quad (18)$$

در روابط 17 و 18،  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  تنش‌های اصلی در صفحه می‌باشند و  $g$  تابع پتانسیل پلاستیک نامیده می‌شود. با استفاده از معیار درجه دو هیل تابع  $g$  بصورت زیر قابل تعریف است:

$$g = (1 + R)\bar{\sigma}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + R(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \quad (19)$$

در این رابطه  $R$  ضریب ناهمسانگردی عمودی متوسط در صفحه می‌باشد که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

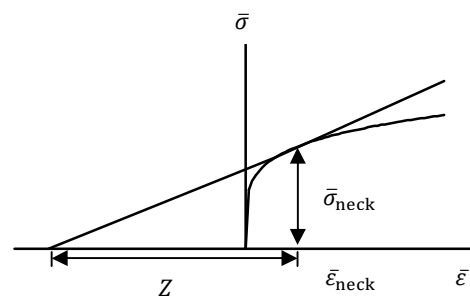
$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (20)$$

با استفاده از رابطه 20 و مقادیر جدول 3، مقدار  $R$  متوسط برابر 1/0145 بدست آمده است. در نتیجه برای ساده شدن روابط در تحقیق حاضر مقدار  $R$  برابر با یک فرض شده است تا از روابط ون‌میزز برای محاسبه حد شکل‌دهی استفاده شود. اگر رابطه 19 با فرض  $R$  برابر یک در روابط 17 و 18 قرار داده شود، مقدار عکس تانژانت برای معیارهای گلوبی محلی و نفوذی طبق روابط زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \frac{(1 + \alpha)}{2(1 - \alpha + \alpha^2)^{1/2}} \quad (21)$$

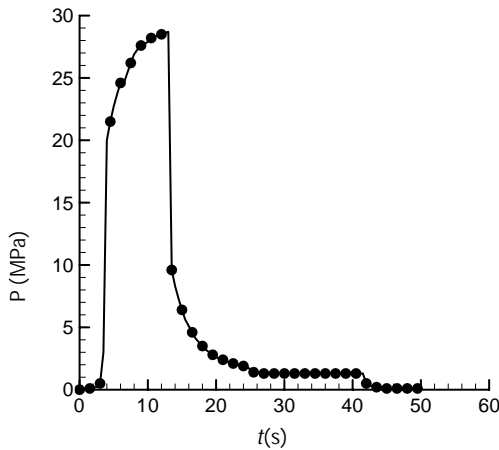
$$\frac{1}{Z_d} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \frac{\alpha(2\alpha - 1)^2 + 2(2 - \alpha)(1 + \alpha)}{4(1 - \alpha + \alpha^2)^{3/2}} \quad (22)$$

برای بدست آوردن منحنی حد شکل‌دهی از نمودار گردشی شکل 14 استفاده شده است. پارامتر عکس تانژانت مطابق روابط 19 و 20 برای مدل‌های هیل و سوپت به طور جداگانه استفاده شده است و برای هر مورد یک منحنی حد شکل‌دهی بدست آمده است. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، منحنی‌های حد شکل‌دهی بدست آمده در حالت کرنش صفحه‌ای بر روی محور عمودی همدیگر را قطع کرده‌اند. معمولاً برای سمت

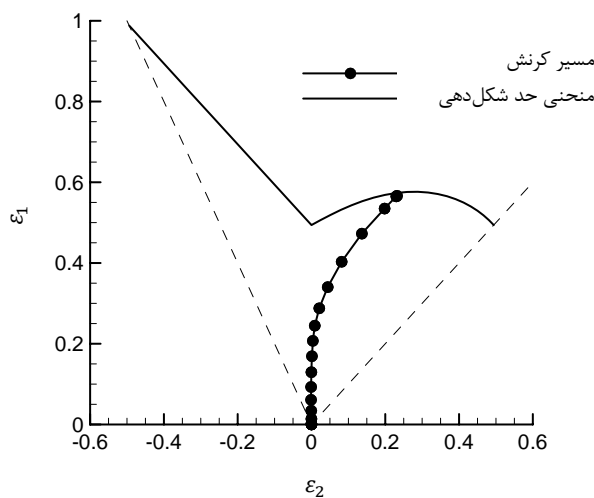


شکل 12 پارامتر عکس تانژانت برای بدست آوردن حد شکل‌دهی [13]

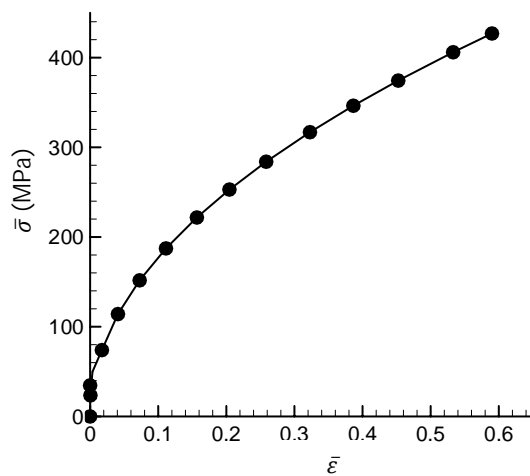
1- Flow stress curve  
2- Abaqus



شکل 15 منحنی فشار داخلی برحسب زمان در آزمایش 6



شکل 16 مسیر کرنش‌ها در نقطه قله برآمدگی

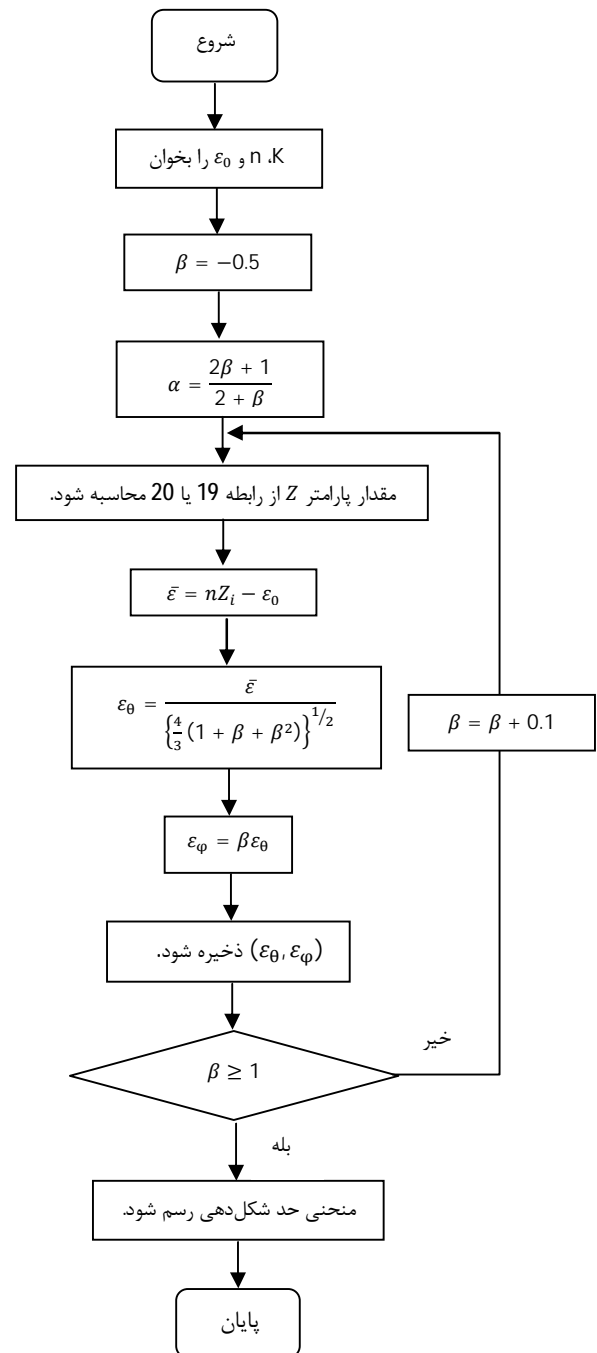


شکل 17 منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر در نقطه قله برآمدگی

#### 2-4- شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ با جابجایی محوری

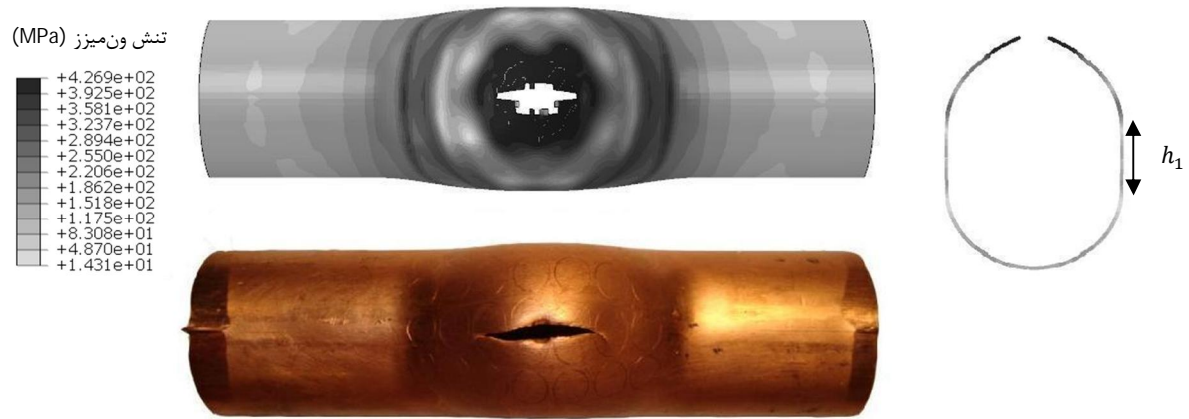
جابجایی محوری در فرآیند هیدروفورمینگ باعث حرکت ماده لوله به سمت منطقه سه‌راهی می‌شود که در نتیجه از ترکیبگی لوله جلوگیری می‌گردد. در این تحقیق از روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ

داخلی لوله فشار داخلی مطابق منحنی آزمایش 6، در شکل 15 اعمال می‌گردد. دو انتهای لوله و نقاط مرجع قالب و پانچ‌ها به طور کامل مقید شده‌اند، به طوری‌که هیچ گونه جابجایی محوری یا چرخشی نداشته باشند. نتایج شبیه‌سازی، قطعه واقعی و پارامتر  $h_1$  که در شکل 3 معرفی شده است، در شکل 18 نشان داده شده‌اند. مسیر کرنش‌ها در قله برآمدگی، در شکل 16 نشان می‌دهد که مقدار کرنش‌ها به کرنش‌های دیاگرام حد شکل‌دهی رسیده است. در نتیجه شرایط ناپایداری اتفاق افتاده است، که باعث جدایش و حذف المان‌هایی که به این مقادیر کرنش رسیده‌اند، شده است. شکل 17 منحنی تنش مؤثر-کرنش مؤثر را در نقطه قله برآمدگی نشان می‌دهد. منحنی مطابق با منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمون بالج هیدرولیکی است.

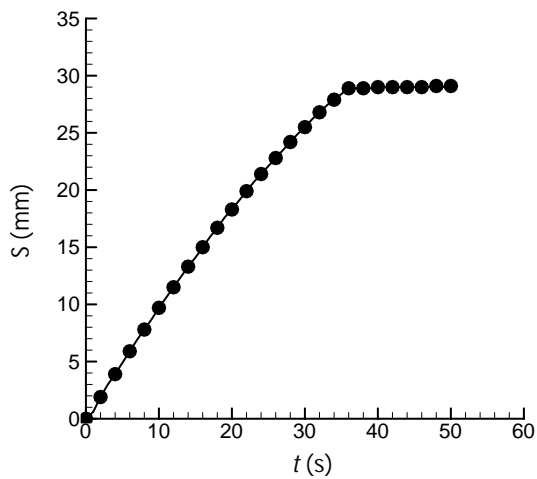


شکل 14 نمودار گردش برای بدست آوردن منحنی حد شکل‌دهی

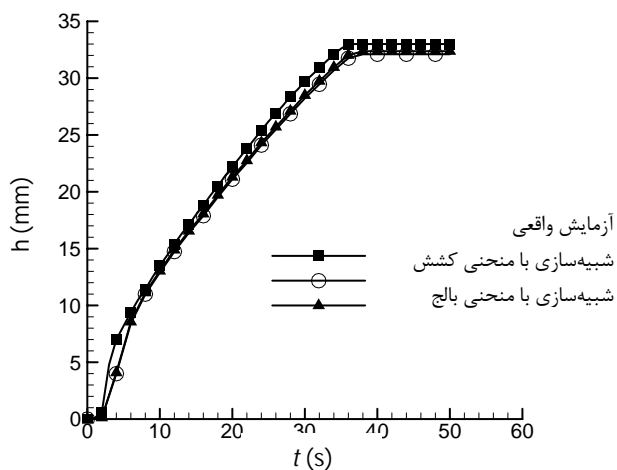




شکل 18 ترکیبگی در قطعه شبیه‌سازی شده توسط روش اجزاء محدود از دو نما و قطعه تجربی



شکل 20 منحنی جابجایی سنبه محوری بر حسب زمان

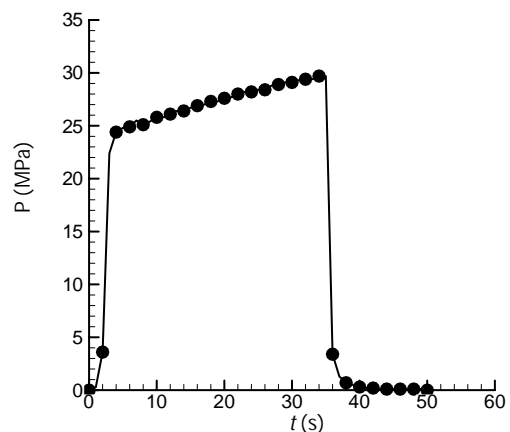


شکل 21 منحنی ارتفاع برآمدگی شاخه سه‌راهی در شبیه‌سازی و آزمایش واقعی

از مقایسه شکل‌های 18 و 22 نتیجه می‌شود که در فرآیند هیدروفرمینگ قطعه سه‌راهی T شکل با جابجایی سنبه‌ی محوری، بیشینه‌ی تنش‌ها در قله برآمدگی نیست و در منطقه‌ی تقاطع شاخه‌های سه‌راهی بیشترین تنش‌های ون‌میزز وارد می‌شود. در شکل 23 کرنش‌های معادل در قطعه شبیه‌سازی شده توسط خواص آزمون بالچ نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود

قطعه سه‌راهی T شکل با جابجایی محوری نیز استفاده شده است. شرایط حل مشابه تحلیل ترکیبگی است با این تفاوت که در این تحلیل، برای لوله مدل سه بعدی با خواص شکل‌پذیر به کار رفته است و توسط المان C3D8R که المانی شش وجهی و هشت گره‌ای است، مش‌بندی شده است. منحنی فشار داخلی و جابجایی محوری مطابق آزمایش هیدروفرمینگ در شکل‌های 19 و 20 اعمال شده است. زمان شروع فرآیند پس از پایان مرحله آب‌بندی دو انتهای لوله می‌باشد. در این تحقیق از سنبه مخالف برای کنترل شکل‌دهی در سمت شاخه‌ی سه‌راهی استفاده نشده است. در این تحقیق دو تحلیل مجزا با استفاده از خواص آزمون بالچ و آزمون کشش که در جدول 4 داده شده‌اند، انجام گرفته است. در شکل 21 ارتفاع برآمدگی لوله در طول زمان فرآیند برای قطعه واقعی هیدروفرمینگ و دو قطعه شبیه‌سازی شده با خواص آزمون بالچ و آزمون کشش ترسیم شده‌اند. در جدول 5 مقادیر ارتفاع برآمدگی بدست آمده در آزمایش واقعی و شبیه‌سازی اجزاء محدود مقایسه شده است. مقادیر جدول نشان می‌دهد که درصد خطا برای شبیه‌سازی به کمک خواص آزمون بالچ کمتر از درصد خطای شبیه‌سازی به کمک آزمون کشش بوده است.

در شکل 22 تنش‌های ون‌میزز در قطعه شبیه‌سازی شده توسط آزمون بالچ و همچنین قطعه سه‌راهی آزمایش هیدروفرمینگ واقعی نمایش داده شده است.

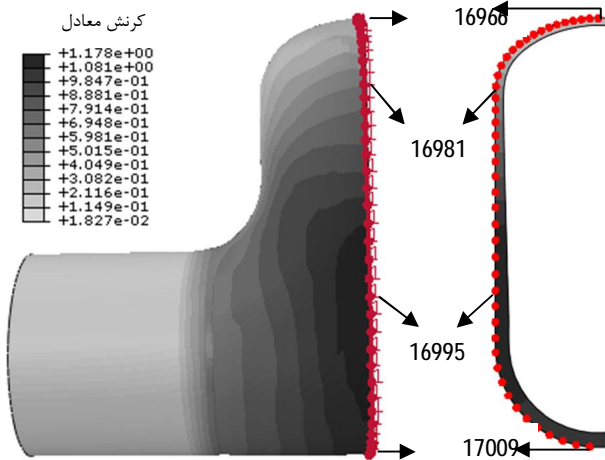


شکل 19 منحنی فشار داخلی بر حسب زمان

برای کرنش‌های بزرگتری از آنچه در شکل 11 نشان داده شده است برونیایی شوند، بوجود می‌آید.

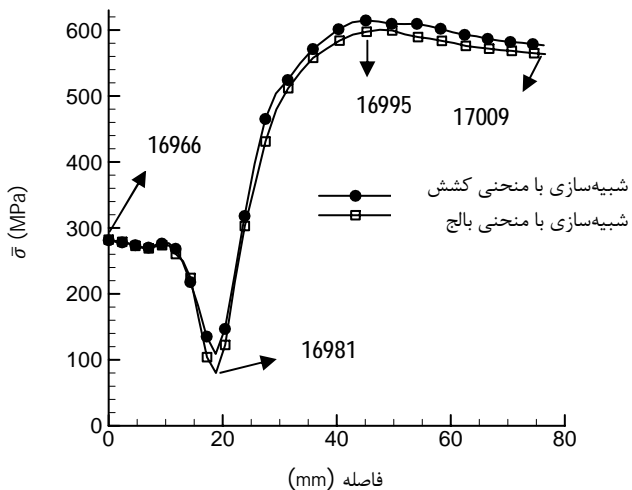
جدول 5 مقایسه مقادیر ارتفاع برآمدگی بدست آمده در آزمایش و شبیه‌سازی

نوع نتیجه	ماکزیمم ارتفاع برآمدگی (mm)	خطا %
تجربی	33	-
شبیه‌سازی با خواص بالچ	32/37	1/9
شبیه‌سازی با خواص کشش	32/1	2/7



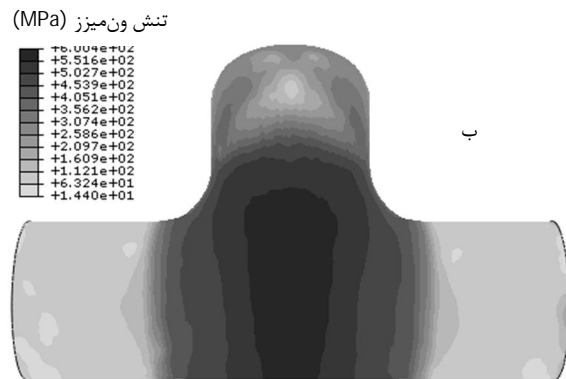
شکل 23 مقادیر کرنش معادل بدست آمده در قطعه شبیه‌سازی شده با استفاده از خواص آزمون بالچ در زمان  $t=36s$

کرنش‌های معادل نیز در منطقه تقاطع شاخه‌های سهراهی بیشترین مقدار را دارند. برای مقایسه بهتر نتایج، مسیری مطابق شکل 23 از گره شماره 16966 در بالای برآمدگی تا گره 17009 در پایین قطعه تعریف شده است و مقادیر تنش‌های ون‌میزز و کرنش‌های معادل در طول این مسیر در ثانیه 36 شبیه‌سازی که در آن مطابق شکل 20 بیشترین فشار داخلی اعمال شده است، ذخیره شده‌اند و به ترتیب در شکل‌های 24 و 25 رسم شده‌اند. همانطور که در نمودار شکل 24 مشاهده می‌شود، تنش‌های مؤثر در شبیه‌سازی توسط خواص آزمون بالچ به طور متوسط کمتر از مقادیر متناظر در شبیه‌سازی توسط خواص آزمون کشش است. در شکل 25 مقایسه مشابهی برای کرنش‌های معادل انجام شده است که مقادیر کرنش‌های مربوط به شبیه‌سازی با خواص آزمون بالچ در برخی نقاط اندکی بزرگتر از مقادیر متناظر در شبیه‌سازی با خواص آزمون کشش است.



شکل 24 تنش ون‌میزز در امتداد مسیر از گره 16966 تا 17009 در زمان  $t=36s$

با در نظر گرفتن شکل‌های 24 و 25 نتیجه می‌شود که برای مقادیر کم کرنش معادل، تنش‌های بدست آمده از دو شبیه‌سازی به هم نزدیک هستند آزمون بالچ در زمان  $t=36s$  ولی برای کرنش‌های بزرگتر از 0/7 اختلاف بین مقادیر تنش‌ها زیاد می‌شود. این اختلاف تنش‌ها به دلیل تفاوت بین منحنی‌های تنش-کرنش بدست آمده از دو آزمون بالچ و کشش وقتی که

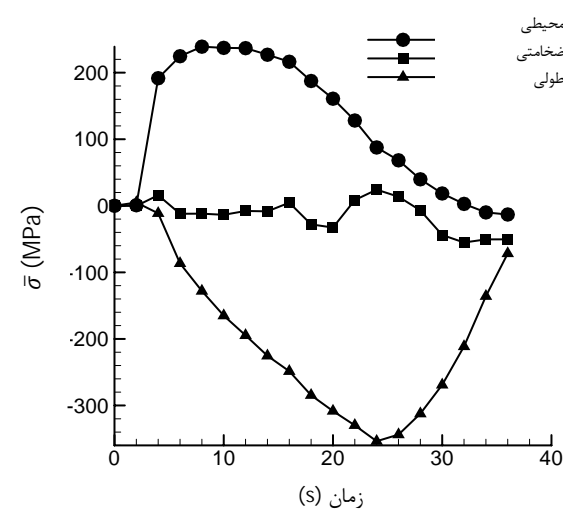


شکل 22 قطعه هیدروفرمینگ الف) واقعی، ب) شبیه‌سازی شده با استفاده از خواص

در شکل 24 در گره شماره 16981 کاهش محسوسی در مقدار تنش ون میز در ثانیه 36 فرآیند مشاهده می شود. در شکل 27 سه تنش اصلی در این گره در طی فرآیند ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار تنش ها در جهت محیطی و در جهت طولی لوله در این گره بعد از اینکه به مقدار بیشینه خود می رسند، کاهش می یابد. یکی از دلایل کاهش این تنش ها، تعادل نسبی بین تنش کششی ناشی از فشار هیدرولیکی داخلی و تنش فشاری ناشی از نیروی محوری سنبه ها در این گره است. همانطور که در شکل 27 مشاهده می شود، مقدار تنش اصلی در جهت ضخامت در طی فرآیند، تغییرات به نسبت کمتری در مقایسه با دو تنش دیگر نشان می دهد.

#### 5- نتیجه گیری

در این تحقیق متنی تنش-کرنش ماده لوله مسی C12200 برای استفاده در تحلیل اجزاء محدود فرآیند هیدروفورمینگ قطعه سه راهی T بدست آمده است. برای مشابهت بیشتر آزمون انجام شده با فرآیند هیدروفورمینگ از آزمون بالچ در قالب با حفره T شکل استفاده شده است. متغیرهای هندسی جدیدی برای هندسه لوله در منطقه برآمدگی تعریف شده اند. با استفاده از ابعاد هندسی بدست آمده از قطعات شکل داده شده در فشارهای مختلف در قالب T شکل، روابط تئوری آزمون بالچ آزاد برای محاسبه مقادیر تنش و کرنش در قله برآمدگی لوله بکار رفته است. نتایج بدست آمده با نتایج آزمایش کشش مقایسه شده است. همچنین تأثیر ضرائب ناهمسانگردی بر روی خواص مکانیکی لوله مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که استفاده از ضرائب ناهمسانگردی باعث افزایش دقت خواص بدست آمده در دو آزمون شده است. متنی تنش-کرنش آزمون بالچ در مقایسه با متنی آزمایش کشش برای کرنش های بیشتر بدست آمده است. نتایج آزمون بالچ برای بدست آوردن متنی حد شکل دهی استفاده شده است. از خواص مکانیکی بدست آمده و متنی حد شکل دهی برای تحلیل اجزاء محدود ترکیب لوله استفاده شده است. همچنین شبیه سازی اجزاء محدود فرآیند هیدروفورمینگ قطعه سه راهی T شکل با جابجایی سنبه محوری به کمک هر دو متنی تنش-کرنش آزمون بالچ و آزمون کشش انجام شده است و نتایج بدست آمده با نتایج قطعه آزمایش هیدروفورمینگ واقعی مقایسه شده اند. مقایسه نتایج شبیه سازی اجزاء محدود و قطعه واقعی هیدروفورمینگ خطای کمتری را در شبیه سازی بوسیله متنی تنش-کرنش آزمون بالچ در مقایسه با شبیه سازی بوسیله متنی تنش-کرنش آزمون کشش نشان می دهد.



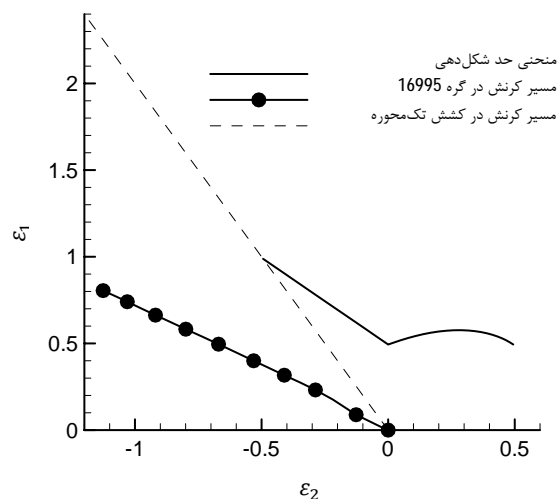
شکل 27 تنش های اصلی در گره شماره 16981

در جدول 6 مقادیر تنش ون میز و کرنش معادل در چهار گره داده شده در شکل 23، برای دو شبیه سازی انجام شده توسط خواص آزمون بالچ و آزمون کشش آورده شده است. نتایج نشان می دهد که برای شبیه سازی فرآیند هیدروفورمینگ قطعه T شکل با جابجایی سنبه محوری، با توجه به عدم تقارن محوری این قطعه و کرنش های بزرگی که در برخی نقاط بوجود می آید، متنی تنش-کرنش آزمون بالچ یا آزمون کشش برای این کرنش های بزرگ باید پرونیایی گردند که در هر دو مورد احتمال خطای شبیه سازی را در این نقاط افزایش خواهد داد. همچنین با توجه به جدول 5، در مورد شبیه سازی به کمک خواص آزمون کشش این مقادیر خطا بیشتر خواهد بود.

در شکل های 24 و 25، بیشترین تنش ون میز و کرنش معادل در گره شماره 16995 اعمال شده است. در این گره و نواحی اطراف آن در اثر جابجایی سنبه محوری، کرنش های فشاری بزرگی وارد می شود. به همین دلیل مقدار کرنش معادل در این نقاط نسبت به نقاطی که بیشتر تحت تنش کششی هستند، بزرگتر است. در شکل 26 مسیر کرنشی که از شبیه سازی اجزاء محدود با استفاده از خواص آزمون بالچ در گره 16995 بدست آمده است را نشان می دهد. این مسیر کرنش مقادیر کرنش اصلی بزرگ به کرنش اصلی کوچک در صفحه را در طی فرآیند نشان می دهد. در مناطقی از قطعه که متنی های مسیر کرنش آنها در سمت چپ متنی مسیر کرنش در کشش تک محوره قرار می گیرند، امکان رخ دادن چروکیدگی وجود دارد [23]. در شکل 26 متنی مسیر کرنش در گره شماره 16995 در سمت چپ متنی مورد نظر برای کشش تک محوره قرار گرفته است، در نتیجه می تواند بوجود آمدن چروکیدگی جزئی در قطعه آزمایش واقعی که در شکل 22 الف نشان داده شده است را توجیه نماید.

جدول 6 مقایسه مقادیر تنش ون میز و کرنش معادل در دو شبیه سازی به کمک متنی بالچ (1) و متنی کشش (2)

شماره گره	تنش ون میز (1) (MPa)	کرنش معادل (1)	تنش ون میز (2) (MPa)	کرنش معادل (2)
16966	282/136	0/269	281/319	0/255
16981	80/008	0/513	108/964	0/513
16995	600/404	1/177	614/584	1/168
17009	563/575	1/03	576/929	1/023



شکل 26 مسیر کرنش در گره 16995

## 6- فهرست علائم

## 7- مراجع

- [1] M. Koç, T. Altan, Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 1, pp. 123-138, 2002.
- [2] J. Kim, S.-J. Kang, B.-S. Kang, A prediction of bursting failure in tube hydroforming processes based on ductile fracture criterion, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, No. 5-6, pp. 357-362, 2003.
- [3] J. Kim, S.-W. Kim, W.-J. Song, B.-S. Kang, Analytical approach to bursting in tube hydroforming using diffuse plastic instability, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No. 10, pp. 1535-1547, 2004.
- [4] W.-J. Song, S.-W. Kim, J. Kim, B.-S. Kang, Analytical and numerical analysis of bursting failure prediction in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, No. 0, pp. 1618-1623, 2005.
- [5] M. Ahmetoglu, T. Altan, Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 25-33, 2000.
- [6] M. Koç, E. Billur, Ö. N. Cora, An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 272-281, 2011.
- [7] 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.
- [8] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, Analysis and finite element simulation of the tube bulge hydroforming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, No. 0, pp. 821-825, 2002.
- [9] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, T. Altan, Evaluation of tubular materials by a hydraulic bulge test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 343-351, 2007.
- [10] Y. Lianfa, G. Cheng, Determination of stress-strain relationship of tubular material with hydraulic bulge test, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 2, pp. 147-154, 2008.
- [11] J. Kim, S.-W. Kim, W.-J. Song, B.-S. Kang, Analytical and numerical approach to prediction of forming limit in tube hydroforming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 7, pp. 1023-1037, 2005.
- [12] W.-J. Song, S.-C. Heo, T.-W. Ku, J. Kim, B.-S. Kang, Evaluation of effect of flow stress characteristics of tubular material on forming limit in tube hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 9, pp. 753-764, 2010.
- [13] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, H.-C. Chuang, Forming limit diagrams of tubular materials by bulge tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 11, pp. 5024-5034, 2009.
- [14] H. Moslemi Naeini, S. J. Hashemi, G. H. Liaghat, M. Mohammadi, H. Deilami Azodi, Analytical prediction of limit strains and limit stresses in hydroforming of anisotropic aluminum tubes, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 133-140, 2014. (In Persian)
- [15] R. Hashemi, A. Assempour, E. M. K. Abad, Implementation of the forming limit stress diagram to obtain suitable load path in tube hydroforming considering M-K model, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 9, pp. 3545-3553, 2009.
- [16] R. Hashemi, K. Abrinia, A. Assempour, The strain gradient approach to predict necking in tube hydroforming, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 15, No. 1, pp. 51-55, 2013.
- [17] A. Assempour, R. Hashemi, K. Abrinia, M. Ganjiani, E. Masoumi, A methodology for prediction of forming limit stress diagrams considering the strain path effect, *Computational Materials Science*, Vol. 45, No. 2, pp. 195-204, 2009.
- [18] S. J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, G. H. Liaghat, H. Deilami Azodi, A. Nemati Faghir, Prediction of forming limit curve using ductile fracture criteria in hydroforming of aluminum tubes, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-17, 2014. (In Persian)
- [19] Y.-M. Hwang, Y.-K. Lin, Analysis of tube bulge forming in an open die considering anisotropic effects of the tubular material, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 15, pp. 1921-1928, 2006.
- [20] P. Ray, B. J. Mac Donald, Experimental study and finite element analysis of simple X- and T-branch tube hydroforming processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1498-1518, 2005.
- [21] S. Y. Ahmadi Brooghani, K. Khalili, S. E. Eftekhari Shahri, B. S. Kang, Loading path optimization of a hydroformed part using multilevel response surface method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1523-1531, 2014.
- [22] M. Koç, T. Allen, S. Jiratheranat, T. Altan, The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 15, pp. 2249-2266, 2000.
- [23] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, New York: Cambridge University Press, 4th edition, 2011.

$t_0$	ضخامت اولیه لوله (mm)
$t_p$	ضخامت لوله در قله برآمدگی (mm)
$R_0$	شعاع اولیه لوله (mm)
$R_d$	شعاع گوشه قالب
$e$	نقطه تماس لوله با شعاع گوشه قالب
$p$	نقطه قله برآمدگی قطعه
$R_z$	نیم قطر بزرگ بیضی در صفحه طولی
$R_\varphi$	نیم قطر کوچک بیضی در صفحه طولی
$R_\theta$	نیم قطر کوچک بیضی در صفحه عرضی
$R$	ضریب ناهمسانگردی
$K$	ضریب استحکام (MPa)
$n$	توان کارسختی
$g$	تابع پتانسیل پلاستیک
$Z$	پارامتر عکس تناژات
$L$	طول لوله
$T$	شکل حفره قالب
$P$	فشار داخلی لوله (MPa)
$S$	جابجایی سنبه محوری (mm)
$h$	ارتفاع برآمدگی قطعه (mm)
$t$	زمان (s)

## علائم یونانی

$\rho$	شعاع انحناء لوله در قله برآمدگی (mm)
$\epsilon_\theta$	کرنش محیطی لوله
$\epsilon_t$	کرنش ضخامتی لوله
$\sigma_\varphi$	تنش طولی در لوله (MPa)
$\sigma_\theta$	تنش محیطی در لوله (MPa)
$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر ون میزز (MPa)
$\bar{\epsilon}$	کرنش مؤثر ون میزز (MPa)
$\epsilon_0$	پیش کرنش
$\epsilon_w$	کرنش عرضی در نمونه‌های کشش
$\epsilon_1$	کرنش اصلی بزرگ در صفحه
$\epsilon_2$	کرنش اصلی کوچک در صفحه
$\sigma_1$	تنش اصلی بزرگ در صفحه (MPa)
$\sigma_2$	تنش اصلی کوچک در صفحه (MPa)
$\alpha$	نسبت تنش‌های اصلی در صفحه
$\beta$	نسبت کرنش‌های اصلی در صفحه

## زیرنویس‌ها

$\varphi$	راستای طولی لوله
$\theta$	راستای محیطی لوله
$t$	راستای ضخامت
$w$	راستای عرضی نمونه آزمون کشش
$\gamma$	زاویه‌ی نمونه‌ی آزمون کشش درون لوله
$l$	معیار گلوبی محلی هیل
$d$	معیار گلوبی نفوذی سویتف