

## بررسی فرآیند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ و شکل دهی چرخشی

مهدی قیصری<sup>1</sup>، فرامرز جوانرودی<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران  
2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران

\*تهران، صندوق پستی 163-16765

javanroodi@iust.ac.ir

**چکیده** - دبل بالچ هیدروفرمینگ یکی از شاخه های فرآیند هیدروفرمینگ لوله می باشد که در آن به جای استفاده از لوله به عنوان قطعه خام، از قطعه کشش عمیق استفاده شده و پس از پر شدن محفظه از سیال تحت فشار به شکل قالب شکل داده می شود. در این مقاله نتایج حاصل از شکلدهی قطعاتی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با فشارهای مختلف به روش دبل بالچ هیدروفرمینگ بیان شده است. پس از اندازه گیری بیشینه تغییر ارتفاع (قطر خارجی حداکثر) در منحنی های شکل داده شده توسط ماشین اندازه گیری مختصات، ضخامت در طول پروفیل توسط آزمایش ضخامت سنجی آلتراسونیک اندازه گیری شده است. نتایج نشان دهنده تاثیر مستقیم فشار بر حداکثر تغییر ارتفاع و تغییرات ضخامت می باشند، همچنین می توان مشاهده کرد که تغییرات ضخامت در این روش نسبت به روشهای دیگر جهت شکلدهی قطعات مشابه (همانند اسپینینگ سنتی) بسیار اندک می باشد. در بخش دیگر، فرآیند به کمک نرم افزار جامع ABAQUS 6/4 شبیه سازی شده و اثرات پارامترهای موثر در شکلدهی همچون ضریب اصطکاک و پارامترهای مرتبط با خواص ماده همانند مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و ضریب کرنش سختی مورد بحث قرار گرفته اند. نتایج بیانگر این می باشد که همانند دیگر شاخه های فرآیند هیدروفرمینگ لوله، با افزایش ضریب اصطکاک بیشینه تغییر ارتفاع کاهش یافته و تغییرات ضخامت افزایش خواهد یافت.

**کلید واژگان** : هیدروفرمینگ لوله ، شکل دهی چرخشی ، کرنش سختی، ضریب کرنش سختی ، ضریب اصطکاک

# Experimental and numerical investigation of double bulge tube hydroforming

M. Ghasary<sup>1</sup>, F.Djavanroodi<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. Student, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Professor, Iran University of Science and Technology

\*P.O. Box:1676 5 -163, Tehran, Iran

javanroodi@iust.ac.ir

## Abstract.

This paper aims to establish a basic understanding of double bulge tube hydroforming process of stainless steel deep drawn cups. The method is briefly reviewed by carrying out experimental tests and Finite element analysis. After measuring bulge height in both formed curves by CMM and thickness variation of formed tube by ultrasonic thickness measurement unit, it's found out that thickness variation in this process is less than other traditional methods such as traditional spinning and rubber pad forming. A finite element model is constructed to simulate the double bulge tube hydroforming process and assess the influence of friction coefficient and tube material properties. It is found that material hardening coefficient had the most significant influence on formability characteristics during double bulge tube hydroforming. As similar as other tube hydroforming processes, increasing friction decrease bulge height and thickness.

**Keywords:** Double bulge tube hydroforming, spinning, Strength coefficient, Strain hardening exponent, Friction coefficient

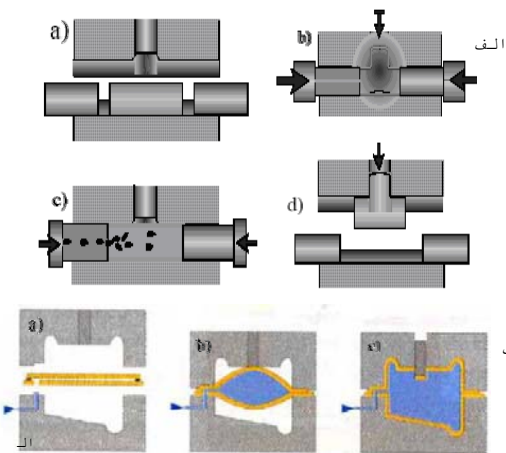
وزن و... این فرآیند در کانون توجه خودروسازان و صنایع هوایی قرار گرفت [1]. هیدروفرمینگ لوله<sup>1</sup> یکی از روشهای شکلدهی به کمک فشار سیال می باشد. از این فرآیند به طور گسترده ای در صنایع خودروسازی استفاده شده و روز به روز بر دامنه استفاده از این فرآیند افزوده می شود. از مزایای این روش می

## 1- مقدمه

روش شکلدهی به کمک فشار سیال (هیدروفرمینگ) یکی از روشهای نسبتاً نوین شکلدهی می باشد که از اواخر دهه 1940 در کانون توجه صاحبان صنعت قرار گرفته است [1]. در این روش امکان ایجاد تغییر شکلهای بزرگتر، کیفیت بهتر سطح و تغییرات یکنواخت تر ضخامت نسبت به انواع دیگر روشهای شکلدهی وجود داشت. با توجه به افزایش بازدهی، کاهش مصرف سوخت، کاهش

<sup>1</sup> Tube hydroforming

صنایع مختلف و تحقیقات گسترده انجام شده جهت گسترش مرزهای دانش فرآیند هیدروفرمینگ می باشند.



**شکل 1- الف:** توالی عملیات در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ب: فرآیند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ [3]

برونی [5] به بررسی بازگشت فنری و تنشهای پسماند در فرآیند شکلدهی ورق فلزی توسط فرآیند هیدروفرمینگ پرداخته است. آنچه در این مقاله آمده است بیان کننده این مهم است که با افزایش فشار داخلی، کاهش شعاع قالب و افزایش ضریب اصطکاک، کرنش پلاستیک افزایش یافته و بازگشت فنری در نمونه کاهش خواهد یافت.

نادر اصنافی [6] با استفاده از روش تحلیلی و مقایسه نتایج با داده های حاصل از شبیه سازی و یافته های تجربی مسیر بهینه اعمال نیرو در روش هیدروفرمینگ لوله (شکلدهی آزاد) را با استفاده از روش کنترل جایجایی پیشنهاد داده است. نتایج این بررسی بیان کننده این مهم می باشد که فشار ناپایداری و شعاع شکل در آن لحظه (شروع لحظه ناپایداری) که از روش حل عددی فرآیند فرمدهی لوله محاسبه می شود، می تواند به عنوان معیار شکست مناسبی مورد استفاده قرار گیرد.

توان به موارد زیر اشاره داشت:

- 1- قابلیت تکرار بالا در تولید
- 2- هزینه ابزار اندک نسبت به روشهای مشابه
- 3- دستیابی به نسبت بالای استحکام در برابر وزن
- 4- کاهش عملیات تکمیلی مونتاژ همچون لحیم کاری، جوشکاری و...
- 5- افزایش چشمگیر دقت در قطعات تولیدی و دستیابی به تolerانسهای مطلوب.

با این وجود این فرآیند علاوه بر مزایای بی شمار دارای معایبی همچون سیکل تولید طولانی نسبت به روشهای مشابه، سرمایه گذاری اولیه بالا، کمبود دانش فنی لازم جهت مدیریت و طراحی ابزار می باشد [2].

فرآیند دبل بالنک تیوب هیدروفرمینگ جهت شکلدهی بدنه های توخالی می باشد (محفظه میان ورقهایی که از دو انتها به یکدیگر متصل شده اند). در این روش سیال به محفظه پمپ می شود و این فشار باعث شکلدهی قطعه خام به داخل محفظه قالب می شود [3]. فرآیند دبل بالج تیوب هیدروفرمینگ از بسیاری از جهات مشابه فرآیند فوق می باشد، با این تفاوت که بجای دو ورق متصل شده به یکدیگر، از قطعه کشش عمیق به عنوان قطعه خام استفاده شده است [4].

لندکوئیست [1] سیکل بهینه اعمال فشار داخلی و نیروی محوری و مسیر بهینه اعمال نیروها (مرزها در فرآیند هیدروفرمینگ لوله) را با استفاده از حل عددی صریح پیشنهاد داده است.

نیلسن [2]، هارل [3] و سیگرت [4] انواع روشهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله، مزایا، معایب و تجهیزات مورد استفاده در این روش را مورد بحث قرار داده اند. نتایج این بررسیها بیان کننده افزایش روزافزون استفاده از این فرآیند در

حلقه بریده شده از قطعه پیش شکل داده شده به دست آمده است).

تغییرات ضخامت اولیه ناشی از انجام فرآیند کشش عمیق به منظور تولید قطعات پیش شکل داده شده در شکل 2 نشان داده شده اند. با توجه به پراکندگی اندک ضخامت، می توان پس از فرآیند کشش عمیق ضخامت قطعات پیشفرم را یکسان و برابر 0/68 میلیمتر در نظر گرفت. به منظور حذف اثرات کار انجام شده بر خواص مواد، عملیات حرارتی تنش زدایی<sup>5</sup> (حرارت به 400 درجه به مدت 2 ساعت و خنک کردن در هوا) بر روی قطعات انجام شده است [8].

به منظور انجام آزمایشات از قطعات کشش عمیق با قطر خارجی 176/8 میلیمتر، ضخامت 0/68 میلیمتر و طول 160 میلیمتر از جنس فولاد زنگ نزن 304 استفاده شده است. ابعاد شکل نهایی پس از انجام فرآیند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 2- تغییرات ضخامت در طول فنجان کشش عمیق اولیه

اصنافی [7] همچنین به بررسی پدیده بازگشت فنری در فرآیند شکلدهی ورق فلزی دابل خم پرداخته است. در نتایج تحقیقات عنوان شده است که با افزایش نیروی اتصال، افزایش شعاع قوس و ضخامت ورق و همچنین کاهش تنش تسلیم بازگشت فنری کاهش خواهد یافت.

در این مقاله پس از استخراج خواص مواد با استفاده از آزمایش کشش ساده<sup>1</sup>، آزمایشات مربوط به شکلدهی قطعه نمونه برای فولاد زنگ نزن گرید 304<sup>2</sup> انجام شده و پس از اندازه گیری ماکزیمم قطر خارجی (با استفاده از ماشین اندازه گیری مختصات<sup>3</sup>) و تغییرات ضخامت قطعات با استفاده از روش کنترل ضخامت آلتراسونیک، فرآیند توسط نرم افزار ABAQUS 6/4 شبیه سازی شده است. پس از اعتبار سنجی نتایج حل عددی صریح<sup>4</sup>، با استفاده از داده های حاصل از شبیه سازی، اثر پارامترهایی همانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و تنش تسلیم بررسی شده و تاثیر بازگشت فنری بر میزان خطای محاسبات عددی بررسی شده و ضریب اصلاحی مناسب پیشنهاد داده شده است. در انتها نیز با استفاده از محاسبات حاصل از تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله و حل عددی، فشار شکست و موقعیت تقریبی شکست محاسبه شده است.

## 2- تجهیزات و مواد مورد استفاده

آزمایشای برای ورق از جنس فولاد زنگ نزن 304 به ضخامت 0/7 میلیمتر و مشخصات مکانیکی جدول 1 انجام شده است (خواص مکانیکی از آزمایش کشش ساده

<sup>1</sup> Standard: ASTM E8M-2001

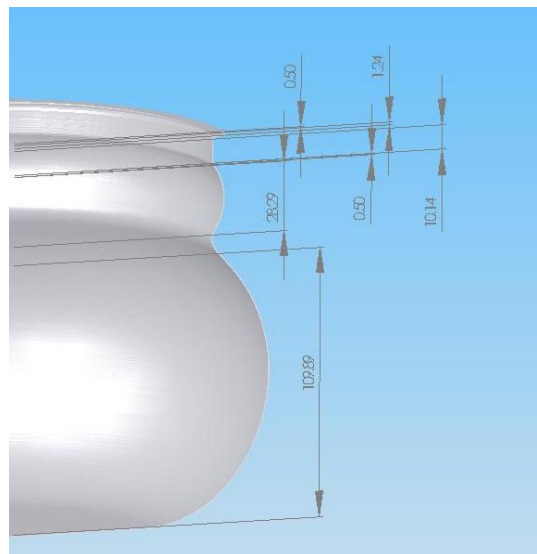
<sup>2</sup> Stainless steel 304

<sup>3</sup> CMM

<sup>4</sup> Explicit FEM

<sup>5</sup> Stress relieving

**شکل 3-** ابعاد نهایی قطعه پس از انجام آزمایشا



باج تیوب هیدروفرمینگ، قطعات دیگری نیز با روش اسپینینگ سنتی شکل داده شده و نتایج بررسی تغییرات ضخامت این قطعات در شکل 6 نشان داده شده است. در این فرآیند تولید از قطعات خام با ابعاد ذکر شده استفاده شده است. در این فرآیند پس از حرارت دادن قطعه خام، با فشار دست اپراتور قطعه بر روی قالب شکلدهی می شود. همانگونه که در شکل 6 مشاهده می شود پراکندگی ضخامت بسیار زیاد می باشد. عدم یکنواختی حرارت، فشار دست اپراتور و همچنین لنگی قطعه کار در چرخش حول محور (هرچند ناچیز)، از جمله عوامل بروز این تغییرات زیاد در ضخامت، کاهش دقت و تکرارپذیری تولید با این فرآیند می باشد.

به منظور بررسی تاثیر فشار خارجی بر شکلهی قطعات پیش شکل داده شده، چند قطعه با فشارهای مختلف شکل داده شده (شکل 4) و سپس بیشینه قطر خارجی و ضخامت قطعات اندازه گیری شده. نتایج اندازه گیری در جدول 2 و شکل 5 نشان داده شده اند.

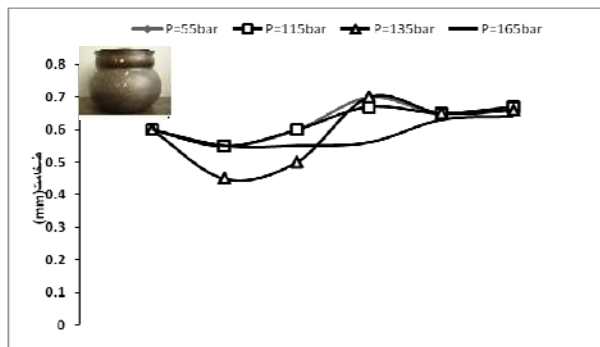


**شکل 4-** قطعات تولید شده در آزمایشات با فشارهای الف: 55 بار ب: 115 بار ج: 135 بار د: 155 بار

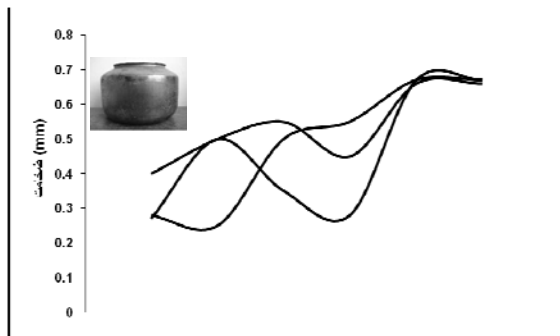
**جدول 2-** بیشینه تغییرات قطر خارجی در قطعات

| محدوده فشار | منحنی اول (میلیمتر) | منحنی دوم (میلیمتر) |
|-------------|---------------------|---------------------|
| 55 بار (1)  | 1/28                | 7/65                |
| 115 بار (2) | 2/15                | 16/4                |
| 135 بار (3) | 4/65                | 23/98               |

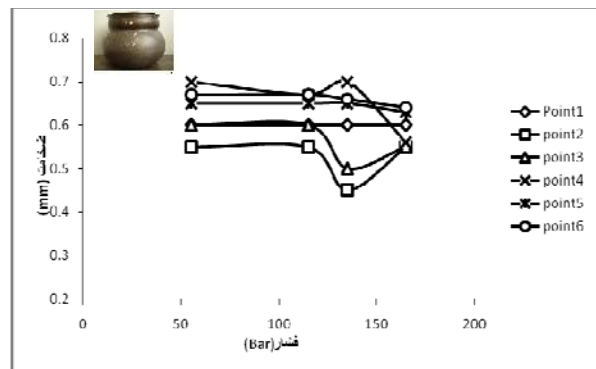
به منظور مقایسه تغییرات ضخامت در فرآیندهای دیگری همانند اسپینینگ سنتی با فرآیند دبل



<sup>1</sup> Traditional spinning



شکل 6- روند تغییرات ضخامت در قطعات تولیدی به روش اسپینینگ سنتی (خمکاری)

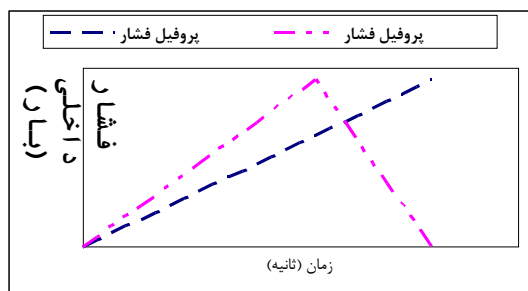


شکل 5- روند تغییرات ضخامت در قطعات هیدروفرمینگ

جدول 1- خواص مکانیکی ورقهای فلزی [9]

| خواص مکانیکی               | فولاد ضد زنگ 304 | فولاد ضد زنگ 201 | فولاد کم کربن 1015 |
|----------------------------|------------------|------------------|--------------------|
| سختی (راکول B)             | 82               | 85               | 71                 |
| استحکام نهایی (مگا پاسکال) | 691/7            | 963/7            | 348/8              |
| استحکام تسلیم (مگا پاسکال) | 299/1            | 491/9            | 200/8              |
| ازدیاد طول در شکست         | 70%              | 58/6%            | 39%                |
| مدول الاستیسیت             | 207              | 207              | 200                |
| K(MPa)                     | 818/48           | 1005/3           | 484/72             |
| n                          | 0/2656           | 0/1414           | 0/262              |

کلیه مراحل برابر 0/05 [1] و شرایط مرزی به گونه ای تعریف شده اند که همانند آزمایشات انجام شده، دو انتهای لوله ثابت باشند. جهت شبیه سازی در مرحله اول از پروفیل افزایش فشار به صورت خطی و در مرحله دوم (جهت بررسی اثرات بازگشت فنری) پروفیل فشار با شیب منفی (پروفیل واقعی فشار) به کارگرفته شده است. دیاگرام پروفیلهای فشار در شکل 7 نشان داده شده اند.



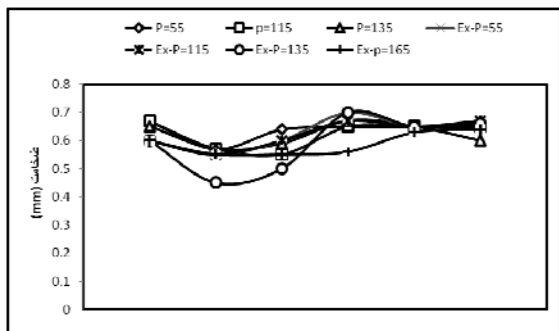
شکل 7- پروفیلهای اعمال فشار

### 3- شبیه سازی

روش حل عددی که در این مقاله به منظور شبیه سازی فرآیند دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ مورد استفاده قرار گرفته است، روش صریح می باشد. در حل عددی صریح از المان C3D8R استفاده شده است. جهت بررسی و مقایسه اثرات پارامترهای دیگری همانند ضریب سختی و تنش تسلیم، خواص مکانیکی ورقهایی از جنس فولاد زنگ نزن 201<sup>1</sup> و آهن 1015<sup>2</sup> نیز با استفاده از آزمایش کشش استخراج شده و در حل عددی مورد استفاده قرار گرفته اند (جدول 1). ضریب اصطکاک در

<sup>1</sup> Stainless steel 201

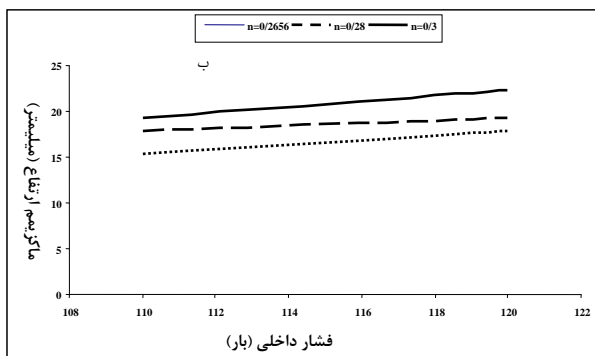
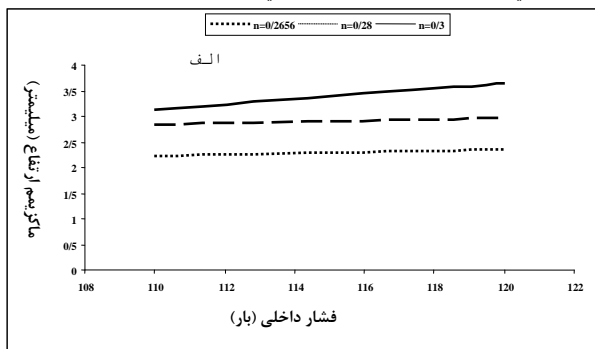
<sup>2</sup> Low carbon Steel 1015



شکل 10- تغييرات ضخامت ناشي از تغيير شکل در آزمايشات و شبیه سازي

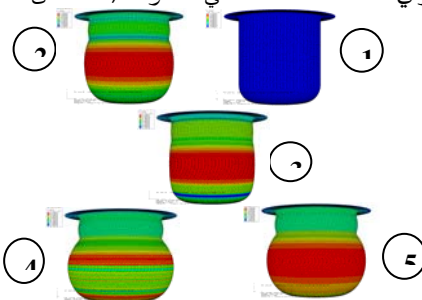
### 1-3- ضريب کرنش سختي

قابليت شکلدهي در مواد مختلف با تغيير پارامترهاي همچون ضريب کرنش سختي، استحکام تسلیم، مدول الاستيسیته، ماکزیم استحکام کششي و... تغيير مي کند. شکل 11 تغييرات بیشینه قطر خارجي نسبت به ضريب کرنش سختي را براي مقادير مختلف  $n$  نشان مي دهد. مشاهده مي شود با افزايش ضريب کرنش سختي، فشار داخلي مورد نیاز براي شکلدهي قطر خارجي معين، کاهش مي يابد.



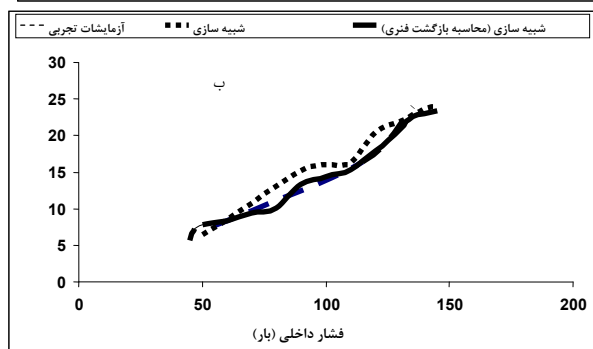
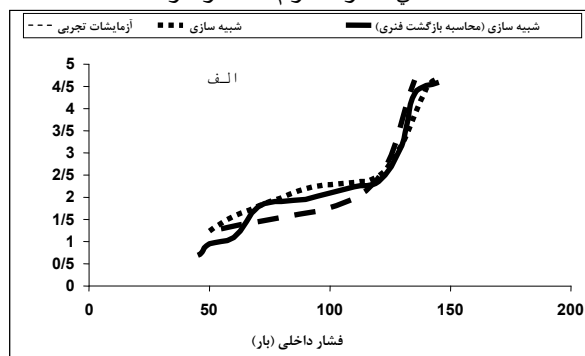
با مقایسه قطر خارجي در مرکز قوس اول و دوم با یافته هاي تجربی، مشاهده مي شود درصد خطا زمانی که از پروفیل واقعي فشار در شبیه سازي استفاده مي شود، به میزان قابل توجهي کاهش مي يابد (شکل 9).

همچنين با مقایسه منحنیهاي حاصل از بررسی تغييرات ضخامت حاصل از حل عددي و داده هاي حاصل از آزمايشات، تطابق قابل قبولي مشاهده مي شود (شکل 10).



شکل 8- مراحل

شکلدهي در نرم افزار



شکل 9- یافته هاي تجربی و شبیه سازي الف: ماکزیم تغيير قطر خارجي ( منحنی اول) ب: ماکزیم تغيير قطر خارجي (منحنی دوم)

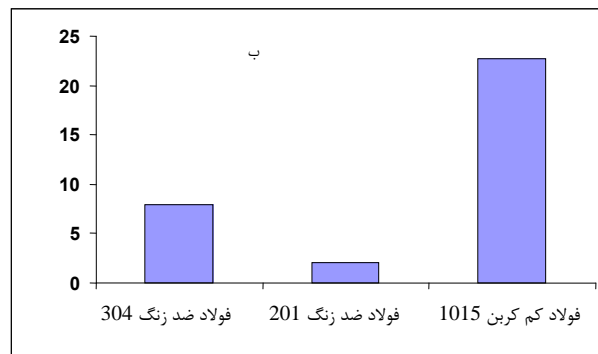
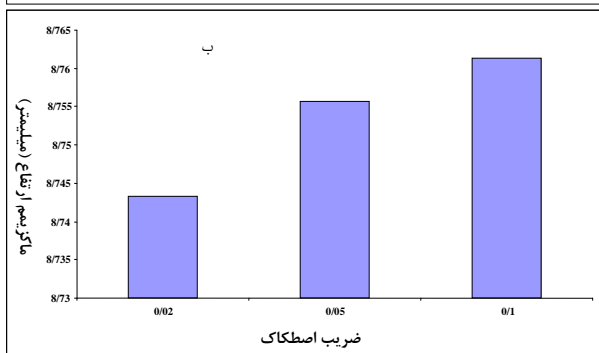
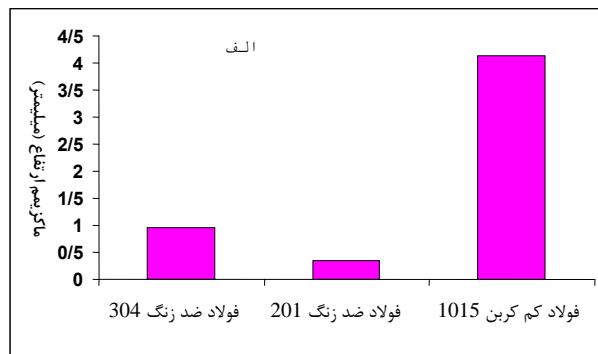
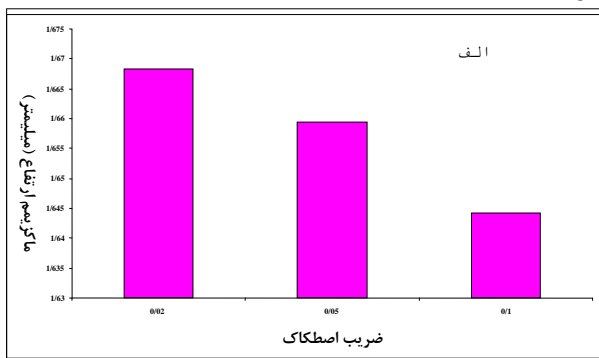
**شكل 11-** تغييرات قطر خارجي با  
تغيير ضريب كرنش سختي الف: منحنى  
اول ب: منحنى دوم

**2-3- ضريب اصطكاك**

ضريب اصطكاك در فرآيند شكلدهي دبل باج هيدروفرمينگ، بيان كننده اثرات پارامترهاي تاثيرگذاري همانند صافي سطح ديواره قالب، كيفيت سطح قطعه پيشفرم و ويسكوزيته سيال واسطه شكلدهي مي باشد.

با تغييرات ضريب اصطكاك در شكل 13 مشاهده مي شود قطر خارجي منحنى اول با افزايش ضريب اصطكاك کاهش يافته اما در منحنى دوم روندى صعودي مشاهده مي شود. بيشينه سطح تماس در نقطه ماكزيم پروفيل فشار، در منحنى اول مشاهده مي شود و همين افزايش سطح تماس سبب تاثير مستقيم ضريب اصطكاك بر شكلدهي منحنى اول خواهد شد. بديهي است كه با افزايش نيروهاي مقاوم در برابر شكلدهي در منحنى اول، تغيير شكل در منحنى دوم با سهولت بيشترى انجام خواهد شد.

به منظور مشاهده عيني اثرات خواص مكانيكي مواد بر قابليت شكلدهي، پس از استخراج خواص مكانيكي فولاد زنگ نزن 201 و آهن كم كربن 1015 با استفاده از آزمون كوش ساده، شبیه سازی برای قطعات پيشفرم با خواص فوق نیز انجام شده است. شكل 11 نشان دهنده شكلدهي فنجان توليد شده از ورق آهن 1015 با فشار پايين تر از فشار لازم برای شكلدهي فنجان از جنس 304 و لزوم استفاده از فشار داخلي بالاتر به منظور شكلدهي فنجان از جنس 201 نسبت به جنسهاي ذكر شده مي باشد. ضريب اصطكاك و شرايط مرزي همانند مراحل قبل و از پروفيل واقعي فشار با نقطه ماكزيم 55 بار به منظور شبیه سازی استفاده شده است.



**شكل 12-** تغييرات قطر خارجي در  
شكلدهي قطعات پيشفرم با جنسهاي  
مختلف الف: منحنى اول ب: منحنى دوم



**شکل 13-** تغییرات قطر خارجی با تغییر ضریب اصطکاک

الف: منحنی اول ب: منحنی دوم

2 - مانند سایر فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله، در این فرآیند نیز با افزایش ضریب اصطکاک، فشار داخلی لازم برای شکلهی افزایش میابد. بنابراین هرچه سطح قالب صیقلی تر بوده و از ورقهایی با سطح صیقلی و یا روکش دار استفاده شود، کیفیت قطعه نهایی بهتر خواهد بود.

3 - با افزایش ضریب کرنش سختی فشار لازم برای شکلهی به شدت کاهش می یابد.

**مراجع:**

[8] H. Chandler, Heat Treater's Guide, practices and procedures for Irons and Steels, Second Printing, 1998, pp733-735

[9] مهدی قیصری "شبییه سازی فرایند شکلهی دبل بلنک تیوب هیدروفرمینگ" پایان نامه کارشناسی ارشد 1358.

[10] M. Imaninejad, "Experimental and Numerical investigation of free-bulge formation during hydroforming of aluminum extrusion", Journal of Material Processing Technology, Vol.147, (2004), pp.247-254

[11] M. Imaninejad, "Influence of end-conditions during tube hydro forming of aluminum extrusion", International Journal of Mechanical Science, Vol 46, (2004), pp.1195-1212

[12] M. Imaninejad, "Loading path optimization of tube hydroforming process", Journal of Machine tools and manufacture, Vol 45, (2005), pp. 1504-1514.

[13] Mummer Koc, "Investigation of the effect of loading path and variation in material properties on robustness of tube hydroforming process", J.Mat.Proc.Tec, (2003)

1- در این مقاله، دقت فرآیندهای تولیدی سنتی مانند شکلهی چرخشی در مقایسه با روش نوین دبل بالچ تیوب هیدروفرمینگ نشان داده شده. در مقایسه با روش دبل بالچ تیوب هیدروفرم، روشهای سنتی از دقت پایین، خطای ابعادی بالا و تکرارپذیری پایینی دارند.

**4 - نتیجه گیری**

[1] J. Lundkovist, Numerical Simulation of Tube hydro forming, MSC Thesis, (2004)

[2] K.B. Nielsen, Hydro forming Highlights: sheet hydro forming and tube hydro forming, Journal of Material Processing Technology, Vol.151, (2004), pp165-177

[3] Ch. Hartl, Research and advances in fundamentals and industrial application of hydro forming, Journal of Material Processing Technology, Vol.167, (2005), pp383-392

[4] K. Sigeret, recent Development in HydroForming Technology, Journal of Material Processing Technology, Vol .48, (2000), pp251- 258

[5] C. Bruni, a study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming, International journal of advanced manufacturing Technology, DOI 10.1007/s0017-006-0539, (2006)

[6] N. Asnafi, Theoretical and Experimental analysis of Stroke-controlled tube hydro forming, Journal of Material Science and engineering, Vol A279, (2000), pp 95-10

[7] N. Asnafi, on spring back of double-curved autobody panels, International journal of mechanical science, Vol 43, (2001), pp 5-37