



Journal Home Page: [www.jmatpro.ir](http://www.jmatpro.ir)

## Thickness Distribution Investigation of Metallic Bellows Produced by Hydro-Forming Process From Thin Wall Tube of Austenitic Stainless Steel Grade 316L Material

Mehdi Arabbeigi<sup>1\*</sup>, Mehran Moradi<sup>2</sup>, Bozarjomehr Ghasemi<sup>1</sup>, Mohsen Khalilian<sup>3</sup>

1- Department of Engineering, Islamic Azad University, Najaf Abad Branch, Isfahan, Iran

2- Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khomeini Shahr Branch, Isfahan, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 7 Jun. 2010

Accepted: 19 Jul. 2010

#### Keywords:

Bellows  
Thin wall tube  
Hydro-forming  
Internal pressure  
Thickness distribution

### ABSTRACT

One of the bellows producing methods is hydro forming process. Some factors of hydro forming process such as internal pressure and velocity of die close, can affect final characteristic of produced bellows such as thickness distribution. One of the most important parameters of control in bellows is wall thickness distribution. In this paper, the thickness distribution of produced bellows and the effect of hydro forming process parameters was investigated using analytical and experimental methods together with finite element simulation using ABAQUS/Explicit FEM software. The results which are obtained from analytical, experimental and finite element methods showed good agreement with each other. Prediction of thickness distribution of bellows using applied FEM method in this research could be used as a basis of designing a new type of the metal bellows.

\*Corresponding author: Mahdi Arabbeigi, [maarabbeigi@yahoo.com](mailto:maarabbeigi@yahoo.com)



## بررسی تغییر ضخامت بیلوزهای فلزی تولید شده به روش هیدروفرمینگ از لوله‌های جدار نازک فولاد زنگ نزن 316L

مهدی عرب بیگی<sup>۱\*</sup>، مهران مرادی<sup>۲</sup>، بوذرجمهر قاسمی<sup>۱</sup>، محسن خلیلیان<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۱۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۴/۲۸</p> <p>واژگان کلیدی:</p> <p>بیلوز</p> <p>لوله جدار نازک</p> <p>هیدروفرمینگ</p> <p>فشار داخلی</p> <p>تغییر ضخامت</p>	<p>یکی از روشهای تولید بیلوز، فرایند هیدروفرمینگ است. برخی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ نظیر فشار داخلی و سرعت جمع شدن قالب می‌تواند روی خواص نهایی بیلوزهای تولیدی مانند تغییر ضخامت دیواره تاثیر گذارد. یکی از اصلی‌ترین راههای بررسی کیفی بیلوزهای تولیدی، به دست آوردن تغییر ضخامت دیواره می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تغییر ضخامت بیلوزهای تولیدی به روشهای تحلیلی، آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit پرداخته، و اثر پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ در این مشخصه تحلیل می‌گردد. در این مقاله نتایج به دست آمده از روشهای تحلیلی، اجزاء محدود و تجربی، مطابقت خوبی با هم نشان دادند. نتایج این تحقیق می‌تواند جهت تخمین تغییر ضخامت بیلوز، در طراحی یک بیلوز جدید مورد استفاده قرار گیرد.</p>

## ۱- مقدمه

یک روانکار مناسب منجر به توزیع یکنواخت ضخامت می‌گردد. همچنین او اثرات شکل رینگ فرم‌دهی قالب بیلوز را در تغییرات ضخامت بیلوز مورد تحلیل قرار داد [۱].

موسوی مشهدی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به مطالعه بر روی ساخت بیلوزها پرداختند. آنها اشاره کردند با افزایش مقدار پیشروی قالب و افزایش فشار داخلی تغییرات ضخامت افزایش می‌یابد [۴].

در پژوهش‌های پیشین، کمتر به تحلیل تغییر ضخامت بیلوز پرداخته شده است. در این پژوهش و برای اولین بار، شبیه سازی و تحلیل‌های مربوط به تغییر ضخامت بیلوز انجام شده و همزمان مقایسه نتایج شبیه سازی و تحلیل‌های انجام شده با تجربه های عملی بررسی می‌گردد. از آنجایی که تقریباً ثابت نگه داشتن ضخامت دیواره با وجود تنش‌های اصطکاکی بین قالب و لوله و نیز تغییرات جریان مواد در تمام مناطق تحت تغییر شکل، غیر ممکن است، رسیدن به مینیمم تغییر ضخامت یکی از اهداف کیفی در تولید بیلوز می‌باشد.

## ۲- نحوه تولید بیلوزها

جهت هیدروفرمینگ بیلوز ابتدا لوله بر روی نازل و فیکسچر دستگاه قرار گرفته و سپس دو نیمه قالب بسته شده و بعد از قفل شدن مناسب نیمه‌های قالبها در یکدیگر، سیال به داخل لوله تزریق می‌شود. اثر همزمان دو عامل که در شکل ۱ نشان داده شده، یکی جمع شدن پره‌های پوسته‌ای حلزونی لغزنده قالب و دیگری فشار سیال داخل لوله سبب تولید بیلوز می‌شود.

بیلوز یک قطعه انعطاف پذیر با خاصیت فنری است، که از آن برای آب‌بندی قسمتهای متحرک مکانیکی استفاده شده، و در صنایع نفت، خلاء، پتروشیمی، صنایع نظامی و سیستمهای صنعتی کاربرد دارد.

از جمله روشهای کنونی تولید بیلوز به رول فرمینگ و جوشکاری دیسک می‌توان اشاره نمود که هر کدام محدودیتهای خاص خود را دارند. در این پژوهش روش جدید تولید بیلوزهای فلزی با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ و به طور خاص تیوب هیدروفرمینگ که نیازمند کنترل همزمان فشار داخلی و سرعت بارگذاری محوری است [۱]، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هیدروفرمینگ در تولید قطعات در سال‌های اخیر کاربرد زیادی پیدا کرده که از جمله می‌توان به ساخت قطعات در صنایع خودروسازی، خانگی و صنایع هوافضا اشاره نمود. فرایند تیوب هیدروفرمینگ، شکل‌دهی لوله (مستقیم یا پیش خمش) به اشکال پیچیده حفره قالب، با استفاده همزمان فشار داخلی و نیروی فشاری محوری از دو یا یک طرف است. مزایای این فرایند شامل بهبود خواص مکانیکی، کاهش وزن، فرم‌دهی قطعات پیچیده، نرخ تولید بالا، هزینه کم محصول و دقت ابعادی بهتر در مقایسه با سایر فرایندها می‌باشد [۲].

لی مطالعات پارامتریک روی عوامل فرایند شکل‌دهی بیلوزها با استفاده از روش اجزاء محدود انجام داد. به بیان او بیلوزهای فلزی در چهار مرحله Deep drawing، Ironing، Tube bulging و Folding ساخته می‌شوند [۳].

کانگ تحقیقاتی در مورد فرایند شکل‌دهی بیلوزهای لوله‌ای به اشکال مختلف و با استفاده از یک مرحله فرایند تیوب هیدروفرمینگ انجام داده است. او اشاره کرد استفاده از

حرکت فیکسچر نگهدارنده لوله نیز کمک به شکل دهی و جمع شدن بیلوز در طی فرایند شکل دهی می کند. فاصله هر پره قالب در ابتدا ۷/۵ میلیمتر می باشد و کل فضای خالی بین کفشکها ۴۵۰ میلیمتر است. لوله بیلوز از جنس فولاد زنگ نزن 316L می باشد که ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ابعاد آن به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ذکر شده اند:

جدول ۱- ترکیب شیمیایی لوله 316L

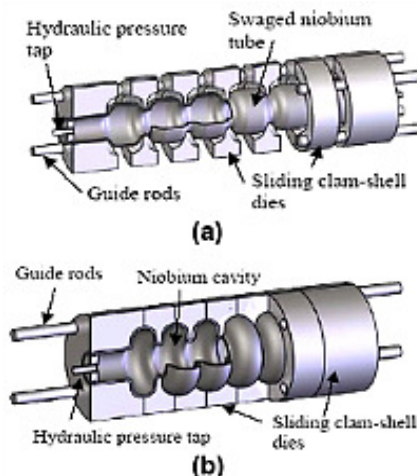
Table 1. Chemical composition of tube 316L

C	<0.035%	Si	<1.00%
Mn	<2.00%	Cr	16-18%
P	<0.045%	Ni	10-14%
S	<0.03%	Mo	2-3%

جدول ۲- خواص مکانیکی (بر اساس آزمایش کشش)، ابعاد و ضریب اصطکاک لوله 316L

Table 2. Material properties dimension of and friction coefficient of tube 316L

Material constant	Symbol	Value
strain hardening exponent	n	0.456
stress intensity factor	k	1277 MPa
Ultimate tensile strength	UTS	885 MPa
Yield strength	YS	232 MPa
Young's modulus	E	200 GPa
Poisson's ratio	$\nu$	0.33
density	$\rho$	8000 Kg/m <sup>3</sup>
initial radius of the tube	r	6.1 mm
thickness of the tube	t	0.12 mm
initial distance between the die disks	D <sub>c</sub>	7.5 mm
thickness of the die disks	t <sub>d</sub>	1 mm
length of the tube	L <sub>0</sub>	100 mm
coefficient of friction	$\mu$	0.05



شکل ۱- نمای شماتیک قالب تولید بیلوز با استفاده از فرایند تیوب هیدروفرمینگ [۵]

(a) قبل از جمع شدن پره های پوسته ای حلزونی لغزنده قالب (b) بعد از جمع شدن پره های پوسته ای حلزونی لغزنده قالب  
**Fig. 1.** Schematic diagram of bellows production die using tube hydro forming process (a) before closing of die disk, (b) after closing of die disk

در مرحله اول در حالی که قالبها بسته اند و لوله درون آن قرار دارد، فشار داخلی حدود ۴۰bar بار در مدت زمان ۰/۴ ثانیه به طور خطی به داخل لوله اعمال می شود. در این حالت دو سر لوله ثابت است.

در مرحله دوم، فشار داخلی بین ۹۵-۱۰۰bar به صورت خطی در ۵ ثانیه به طور ناپیوسته همزمان با جمع شدن پره های پوسته ای حلزونی لغزنده قالب به لوله اعمال می شود. تحقیقات ثابت کرده فشار نوسانی جهت توسعه قابلیت شکل دهی، به دلیل انبساط یکنواخت و جلوگیری از لاغری موضعی بسیار مناسب است [۶]. سرعت حرکت سمبه برای جمع شدن قالب حدود ۹ میلیمتر بر ثانیه بوده و عمل جمع شدن قالب در حدود پنج ثانیه صورت می گیرد. در این حالت علاوه بر فشار داخلی،

$$\sigma_{\theta} = \frac{pr}{t} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -p \quad (3)$$

$$t_1 = t_0 \left[ \left( \sqrt{\frac{r_0}{r_1}} - 1 \right) \alpha + \sqrt{\frac{r_0}{r_1}} \right] \quad (4)$$

درصد لاغری از رابطه زیر بدست می آید:

$$\% \text{thinning} = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \quad (5)$$

در روابط بالا:

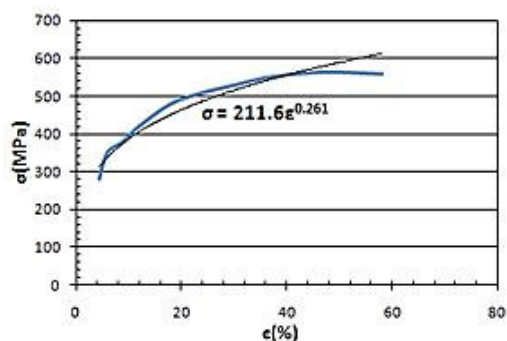
$t_0$	Initial tube wall thickness (mm)
$t_1$	Final thickness tube wall (mm)
$r_0$	Tube initial radius (mm)
$= 9.9$	Tube final radius (mm)
$\epsilon = \frac{\sigma_z}{\sigma_{\theta}}$	Stress factor
$\sigma_z$	Axial stress (Mpa)
$\sigma_{\theta}$	Circumferential stress (Mpa)
$\sigma_r$	Radial stress (Mpa)
P	Internal pressure (Mpa)
t	Thickness (mm)
r	Radius (mm)

با توجه به روابط بالا ضخامت نهایی ۰/۰۸۱ و لاغری ۳۲/۵٪ بدست می آید.

شکل ۲ نمودار تنش، کرنش فولاد زنگ نزن 316L را نشان می دهد.

### ۳- بررسی تغییر ضخامت بیلوز به روش تحلیلی

پیش بینی لاغری یا ضخامت نهایی در قطعات هیدروفرم شده از موارد بسیار مهم است. لاغری در طول قطعه و حین فرم دهی یکنواخت نیست. ضخامت نقطه به نقطه و براساس اصطکاک ناحیه ای، وضعیت قطعه، فاصله از انتها و سایر موارد متغیر خواهد بود.



شکل ۲- نمودار تنش کرنش (تنش سیلان) لوله 316L

Fig. 2. Strain-stress curve of tube 316L

کلفتی در نواحی لبه ای بواسطه نیروی محوری و پیشروی اتفاق می افتد. خواص ماده شامل نرمی یا ازدیاد طول نسبی اثر زیادی روی لاغری دارد [۴]. جهت محاسبه تغییر ضخامت بیلوز تولیدی از روابط زیر استفاده می شود [۷]:  
برای محاسبه تنشها و ضخامت نهایی از فرمول های ۱ تا ۵ استفاده شد:

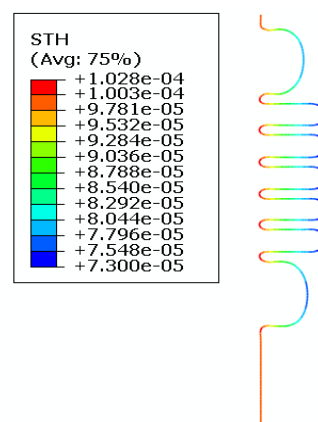
$$\sigma_z = \frac{pr}{2t} \quad (1)$$

محل‌هایی که لوله با قالب در تماس می‌باشد، اصطکاک مانع جریان یافتن ماده می‌گردد؛ در حالیکه در نواحی آزاد قطر خارجی بیلوز این مانع وجود ندارد. بنابراین کار سختی در نواحی آزاد بیش از مناطق در تماس با قالب بوده، در نتیجه لوله در مکانهایی که در حال جدا شدن از قالب است بر اثر فشار داخلی، افزایش طول بیشتری می‌یابد و نازک‌تر می‌شود. به بیان دیگر ناحیه قطر خارجی بیلوز تحت تنش کششی فشار سیال بوده، در حالیکه قطر داخلی بیلوز تحت تنش فشاری می‌باشد. به همین سبب ناحیه قطر خارجی بیلوز نازک‌تر از قطر داخلی آن می‌شود.

یکی از راه‌های بدست آوردن تحلیل‌های مورد نیاز در نرم‌افزار ABAQUS، بررسی تغییرات مورد نیاز در یک PATH مشخص می‌باشد. جهت این منظور یک مسیر فرضی شامل یک نقطه (Node146) بر روی قطر خارجی بیلوز تا یک نقطه (Node170) بر روی قطر داخلی بیلوز انتخاب گردیده، و پس از آن خروجی‌های مورد نیاز بر روی این PATH گرفته می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد مقدار ضخامت به تدریج از یک نقطه بر روی قطر خارجی بیلوز (Node 146) به طرف قطر داخلی (Node 170) افزایش می‌یابد.

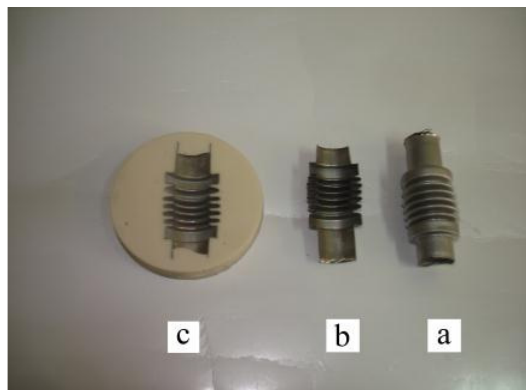
این نمودار بیان می‌کند که ضخامت Node 170 در ابتدای فرآیند تقریباً مقدار واقعی ضخامت لوله مورد آزمایش ( $t=0.12$ ) را دارد که به تدریج و در طول فرآیند فرم‌دهی و در Node 146 به مقدار حدوداً  $t=0.07$  در انتهای زمان فرم‌دهی می‌رسد.

۴- بررسی تغییر ضخامت بیلوز به روش المان محدود  
 شکل ۳ شبیه‌سازی المان محدود بیلوز مدل سازی شده را نشان می‌دهد. کلیه اجزاء قالب به صورت Axis symmetric discrete rigid، و لوله مورد نظر به صورت Wire در نرم‌افزار ABAQUS تعریف می‌گردد. روش حل برای این مسئله Dynamic Explicit می‌باشد. تماس بین سطوح به صورت Surface to Surface بوده و ضریب اصطکاک بین سطوح به صورت Penalty و  $0.05$  تعریف می‌گردد، در این مسئله نیرو به صورت Pressure و شرایط مرزی با Velocity/Angular velocity مشخص می‌گردد. در طول شبیه‌سازی، قالب و پره‌ها صلب و لوله شکل‌پذیر فرض شده‌اند. مش تیوب با توجه به Wire بودن به صورت SAXI<sup>1</sup> تعریف می‌گردد. شکل ۳ حداکثر تغییر ضخامت بیلوز را  $3.9\%$  و ضخامت نهایی را  $0.073$  نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییر ضخامت بیلوز در شبیه‌سازی المان محدود  
**Fig. 3.** Thickness distribution of bellows based on FEM

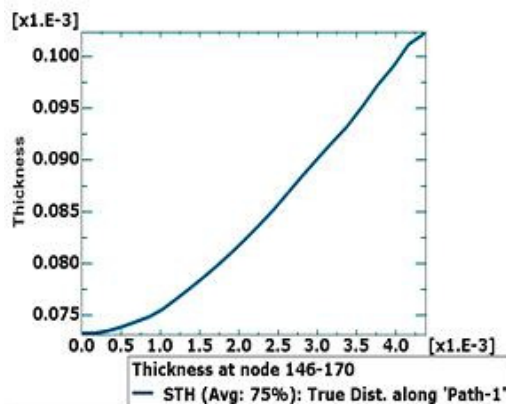
شکل ۳ نشان می‌دهد که ضخامت در ناحیه قطر خارجی بیلوز به دلیل اثر اصطکاک و کار سختی کم می‌شود. در



شکل ۵- (a) بیلوز تولید شده، (b) بیلوز برش خورده و (c) بیلوزمانت شده

Fig. 5. a) Produced bellows, b) bellows cutting, c) bellows mounting

شکل ۷ نمودار توزیع ضخامت بیلوز در مسیر قطر داخلی تا قطر خارجی را نشان می‌دهد. مقدار تغییر ضخامت با استفاده از این آزمایش ۳۳/۳۵٪ بدست می‌آید. مقدار پیشروی در ۳۰٪ کورس قالب و فشار داخلی در 95 bar تنظیم گردیده است.



شکل ۴- روند تغییر ضخامت بیلوز در شبیه‌سازی المان محدود

Fig. 4. Thickness distribution trend of bellows based on FEM

#### ۵- بررسی تغییر ضخامت بیلوز به روش تجربی

برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت قطعه به خاطر هندسه پیچیده و کم بودن ضخامت، روش‌های اندازه‌گیری معمول قابل استفاده نمی‌باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری توزیع ضخامت مانند شکل ۵ ابتدا قطعه نهایی با استفاده از دستگاه وایرکات در جهت قطری به دو قسمت بریده می‌شود سپس مقطع قطعه برای از بین بردن پلیسه‌های حاصل از برش و افزایش دقت، پولیش‌زنی و سپس مانت می‌شود. شکل ۶ اندازه‌گیری تغییر ضخامت بیلوز مانت شده با استفاده از میکروسکوپ نوری وبه صورت اندازه‌گیری در چند موقعیت مختلف قطر داخلی و خارجی بیلوز را نشان می‌دهد.

در جدول ۳ تغییر ضخامت بیلوز که از روشهای تحلیلی، المان محدود و تجربی بدست آمده، با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد مابین نتایج المان محدود، تحلیل و آزمایشات تجربی توافق خوبی وجود دارد.

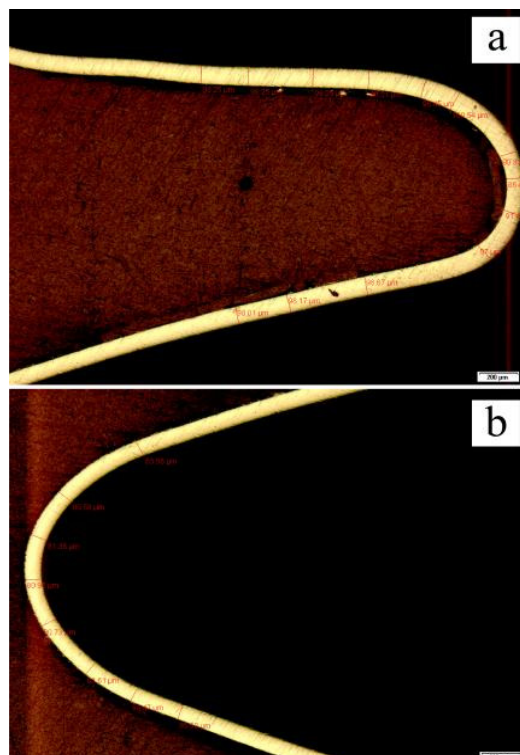
جدول ۳- مقایسه تغییر ضخامتهای بدست آمده از سه روش

**Table 3.** Comparison of thicknesses distribution in three applied methods

Analytical	Experiments	Finite element	Method
32.5%	33.35%	39%	Thickness distribution

### ۵-۱- اثر پیشروی (سرعت جمع شدن قالب) بر روی توزیع ضخامت بیلوز تولیدی

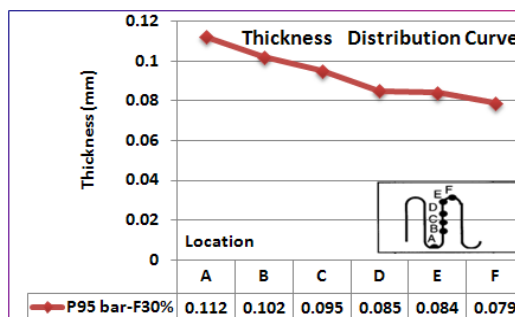
انجام آزمایشات بر روی بیلوزهای تولیدی جهت بررسی تاثیر تغییرات پیشروی روی توزیع ضخامت، نشان می دهد با افزایش مقدار پیشروی مقدار کاهش ضخامت افزایش می یابد که در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است. تاثیر پیشروی روی نازک شدگی در ناحیه بیرونی بیشتر از ناحیه داخلی است. تقریباً در ناحیه داخلی هیچگونه نازک شدگی اضافی با افزایش پیشروی مشاهده نمی شود. مقادیر پیشروی ۱۰٪ و ۳۰٪ کورس قالب می باشند، همچنین فشار داخلی در 95 bar و کورس قالب ثابت نگه داشته شده اند.



شکل ۶- اندازه گیری ضخامت توسط میکروسکوپ نوری (a)

قطر داخلی بیلوز و (b) قطر خارجی بیلوز

**Fig. 6.** Measuring of thickness by optical microscope, a) internal diameter and b) external diameter



شکل ۷- توزیع ضخامت از قسمت قطر داخلی بیلوز تا قطر

خارجی (مسیر A تا F)

**Fig. 7.** Thickness distribution from internal to external diameter



### ۶- بحث و نتیجه گیری

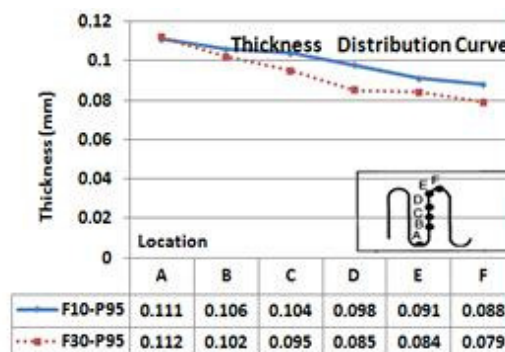
(۱) پیش‌بینی لاغری یا ضخامت نهایی در قطعات هیدروفرم شده از موارد بسیار مهم است. لاغری در طول قطعه و حین فرم دهی یکنواخت نیست. ضخامت نقطه به نقطه و براساس اصطکاک ناحیه‌ای، وضعیت قطعه، فاصله از انتها و سایر موارد متغیر خواهد بود. از آنجایی که تقریباً ثابت نگه داشتن ضخامت دیواره با وجود تنشهای اصطکاکی بین قالب و لوله و نیز تغییرات جریان مواد در تمام مناطق تحت تغییر شکل، غیرممکن است، رسیدن به مینیمم تغییر ضخامت یکی از اهداف کیفی در تولید بیلوز می‌باشد.

(۲) همانطور که اشاره شد یکی از اصلی‌ترین راههای بررسی کیفیت نهایی بیلوز تولیدی، به دست آوردن تغییر ضخامت دیواره می‌باشد. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد افزایش سرعت جمع شدن قالب و نیز افزایش فشار سیال منجر به ازدیاد میزان تغییر ضخامت (کاهش ضخامت) بیلوز گردیده، که در این رابطه اثر سرعت جمع شدن قالب بیشتر می‌باشد. ضخامت بیلوز تولید شده از قطر داخلی به سمت قطر خارجی کاهش یافته و نقاط موجود در قطر خارجی بیلوز دارای کمترین ضخامت می‌باشند. شبیه‌سازی با نرم افزار ABAQUS نیز تطابق خوبی با آزمایشات تجربی نشان می‌دهد.

(۳) با بررسی تاثیر پیشروی مشاهده شد که با افزایش مقدار پیشروی، نازک‌شدگی بیشتری در ناحیه خارجی رخ می‌دهد، اما تاثیری قابل توجه در ناحیه داخلی بیلوز ندارد.

(۴) افزایش فشار، منجر به لاغری سریع بخصوص در نقطه انحناء خارجی بید بیلوز و حتی پارگی می‌گردد.

(۵) سرعت جمع شدن قالب بیشتر از بارگذاری، روی ضخامت تاثیر دارد.

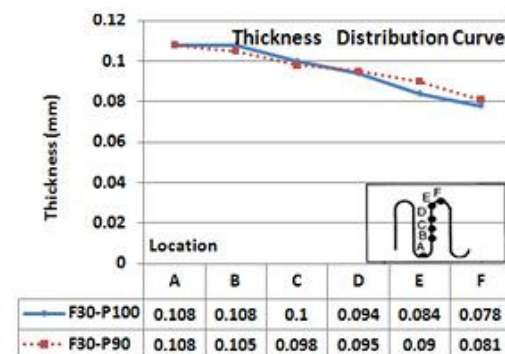


شکل ۸- توزیع ضخامت بیلوز در پیشروی‌های مختلف

Fig. 8. Bellows thickness distribution at various feedings

### ۵-۲- اثر فشار سیال بر روی توزیع ضخامت بیلوز تولیدی

شکل ۹ تاثیر فشار داخلی بر روی توزیع ضخامت بیلوزهای تولید شده را نشان می‌دهد. افزایش فشار داخلی باعث کاهش ضخامت خصوصاً در ناحیه قطر خارجی بیلوز می‌شود. مقادیر فشار به ترتیب 90bar و 100bar انتخاب شده‌اند، همچنین پیشروی در ۳۰٪ و کورس قالب ثابت نگه داشته شده‌اند.



شکل ۹- توزیع ضخامت بیلوز در فشارهای مختلف

Fig. 9. Bellows thickness distribution at various pressures

[3] S.W. Lee, "Study on the forming parameters of the metal bellows", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, 2002, pp. 47-53.

[4] GH. Faraji, M. Mosavi Mashhadi, V. Nourouzifard, Evaluation of effective parameters in metal bellows forming process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 3431-3437.

[5] [http://www.hep.uiuc.edu/LCRD/LCRD\\_UCLC\\_proposal\\_FY06/2\\_69\\_York\\_2006\\_ILC\\_weld-free\\_compton\\_final2.pdf](http://www.hep.uiuc.edu/LCRD/LCRD_UCLC_proposal_FY06/2_69_York_2006_ILC_weld-free_compton_final2.pdf).

[6] K. Mori, T. Maeno, S. Maki, "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydro forming of tubes", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, 2007, pp. 978-984.

[7] M. Koc, T. Altan, "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydro forming process", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, 2002, pp. 123-138.

### تشکر و قدردانی

در پایان از مدیریت محترم شرکت شاخص بهبود صنعت به سبب حمایت از انجام این پروژه تحقیقاتی و نیز در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی و همچنین پرسنل این شرکت به جهت همکاری در انجام کارهای آزمایشگاهی تشکر به عمل می‌آید.

### پی نوشت

1- A2-node linear axis symmetric thin or thick shell

### مراجع

[1] B.H. Kang, M.Y. Lee, S. Shon, Y. Moon, "Forming various shapes of tubular bellows using a single-step hydro forming process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 194, 2007, pp. 1-6.

[2] M. Koc, Hydro forming for advanced manufacturing, first published the institute of Materials & Mining, Boca Raton Boston New York Washington DC, 2008.