



## یک روش جدید برای خم کاری فشاری لوله جدار نازک در خم کاری هیدرولیکی

سحرناز منتظری<sup>۱</sup>، عبدالحمید گرجی<sup>۲\*</sup>، محمد بخشی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۲- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۳- استاد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

\*بابل، صندوق پستی ۴۷۱۴۸-۷۱۱۶۷ hamidgorji@nit.ac.ir

### چکیده

خم کاری لوله کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع هواپضا، خودروسازی و سایر صنایع دارد. چروکیدگی لوله‌های جدار نازک، تغییر شکل سطح مقطع و تغییرات ضخامت در حین خم کاری لوله، از مشکل‌های اصلی این فرایند شمار می‌آید. بیرونی فشاری و فشار داخلی می‌تواند به منظور کنترل بهتر فرایند خم کاری مورد استفاده قرار گیرد. چنانچه نسبت شعاع خم به قطر لوله ( $R/D$ ) در فرایند خم کاری بین ۱/۵ تا ۱ باشد، خم کاری با روش‌های معمول قبل انجام نیست. ارائه روش جدیدی که بتواند سبب برطرف کردن چروک در لوله و کمترین تغییرات ضخامت در دیواره آن شود، حائز اهمیت است. در این پژوهش، لوله‌ها به صورت انتها بسته تولید شده است. از آنجا که تهیه لوله جدار نازک با انتهای بسته مشکل است، در این پژوهش ابتدا لوله‌های انتها بسته بدون درز به وسیله فرایندهای کشش عمیق و انوکاری تولید شده و پس از ساخت این لوله‌ها، فرایند خم کاری لوله با نسبت ( $R/D$ ) برابر یک توسط فرایند جدید خم هیدرولیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از بررسی سیسیر فشار، سیسیر فشاری که در آن لوله بدون چروکیدگی به طور کامل شکل قالب را به خود می‌گیرد بدست آمد. همچنین اثر تغیرات فشار بر توزیع ضخامت لوله در شعاع داخلی و شعاع خارجی ناحیه خم لوله مورد بررسی قرار گرفت.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۱۶ فوریه ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۲ مهر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

خم کاری لوله

خم کاری هیدرولیکی

شبیه‌سازی اجزای محدود

## A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending

Saharnaz Montazeri<sup>1</sup>, Abdolhamid Gorji<sup>2\*</sup>, Mohammad Bakhshi<sup>3</sup>

Department of mechanical engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
\*P.O.B. 47148-71167, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 April 2014

Accepted 18 May 2014

Available Online 04 October 2014

**Keywords:**  
Tube bending  
Hydrobending  
Finite Element Method

### ABSTRACT

Tube bending is used extensively in aerospace, automotive and other industries. Wrinkles in thin-walled tubes, changes in cross section and thickness changes during tube bending are the main problems in this process. Compressive force and internal pressure can be used to better control the bending process. If the bend radius to tube diameter ratio ( $R/D$ ) in the bending process could be between 1 and 1.5, the bending is not done with conventional methods. Providing a new method that results in preventing both wrinkles and minimum tube wall thickness changes is important. In this paper, tubes producing with closed end. Since tube producing with closed end is difficult, in this study, initially closed end seamless tubes are produced by deep-drawing and ironing processes, thereafter tube bending process with ratio ( $R/D$ ) equal to one was analyzed using experiments and simulations by hydrobending the new method. The pressure in which the tube takes the shape of the die completely without wrinkles, was obtained after investigating pressure changes. The effects of pressure changes on the thickness distribution of the tube inner radius and outer radius of the bent tube was also examined.

### فشاری<sup>۲</sup> و خم کاری هیدرولیکی<sup>۳</sup> کاربرد گسترده‌تری دارد.

در این زمینه، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. به منظور کاهش چروک و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله، تأثیر پارامترهای هندسی ابزار خم کاری، قالب و سایر پارامترهای موتور بر خم کاری، با این روش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۶-۷].

یانگ و همکاران [۷] یک مدل تحلیلی بر اساس معیار انرژی برای پیش‌بینی چروکیدگی ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از این معیار، به روش کنترل عددي، حد چروکیدگی را در فرایند خم کاری برای لوله‌های جدار نازک با قطر

### ۱- مقدمه

امروزه لوله‌های خمیده با شعاع خم کم، کاربرد بسیاری در صنایع خودروسازی، هواپسا و کشتی‌سازی دارند. در خم کاری لوله‌ها، هرچه میزان شعاع خم کوچکتر و ضخامت دیواره لوله کمتر باشد، احتمال ایجاد عیوبی نظیر چروک و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله بیشتر می‌شود [۱]. چگونگی برطرف کردن این عیوب، یکی از مسائل مهمی است که سبب گسترش پژوهش‌ها در این زمینه شده است.

خم کاری لوله به روش‌های مختلف انجام می‌شود. در بین روش‌های مختلف خم کاری لوله، خم کاری چرخشی به روش کنترل عددي<sup>۱</sup>، خم کاری

2- Pure Bending  
3- hydrobending

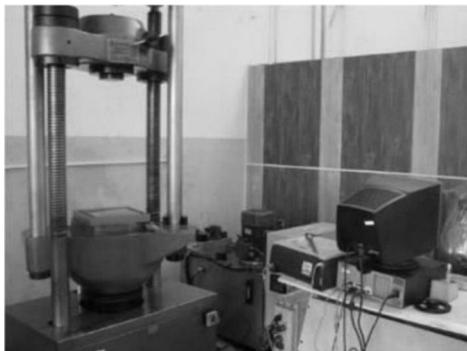
1- NC Rotary Draw Bending

Please cite this article using:

S. Montazeri, A.H. Gorji, M. Bakhshi, A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 190-198, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Montazeri, A.H. Gorji, M. Bakhshi, A novel technique for Push bending of thin walled tubes in hydrobending, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 190-198,



شکل ۱ دستگاه استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

جدول ۱ خواص مکانیکی ورق مسی [13]

مدول الاستیسیته (GPa)	تنشی تسلیم (MPa)	ضریب پوآسون چگالی	
8940	0/23	123	.117

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

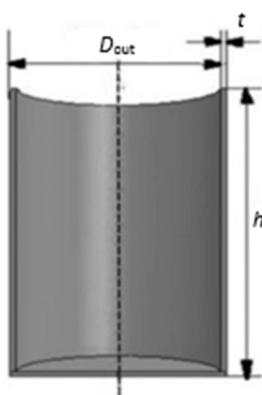
به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه آزمایش اونیورسال DMG<sup>1</sup> با ظرفیت 600kN که در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده شد. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده و سرعت آن تا  $200\text{mm}.\text{min}^{-1}$  قابل تغییر می‌باشد. آزمایش‌ها در سرعت  $50\text{mm}.\text{min}^{-1}$  انجام شده است. برای تولید لوله جدار نازک از ورق مسی با ضخامت اولیه  $2\text{mm}$  و قطر اولیه  $40\text{mm}$  استفاده شد. جدول ۱ خواص مکانیکی را نشان می‌دهد.

لوله جدار نازک مورد استفاده در فرایند خم کاری، از طریق دو مرحله کشش عمیق و چهار مرحله اتوکشی تولید شد. شکل ۲-الف و ب به ترتیب مجموعه قالب‌های کشش عمیق مرحله اول و دوم را نشان می‌دهد. پس از اتمام فرایند کشش عمیق، با انجام چهار مرحله اتوکشی، از ضخامت نمونه کاسته شده و به طول آن افزوده شد. شکل ۲-ج مجموعه قالب‌های فرایند اتوکشی را نشان می‌دهد. به منظور کاهش کار سختی در نمونه، قبل از هر مرحله اتوکشی، عملیات آنیل صورت گرفته است. شکل ۳ (مرحله ۱۷ تا ۷۷) نمونه‌های حاصل از چهار مرحله اتوکشی را به ترتیب نشان می‌دهد. پارامترهای هندسی لوله انتها بسته شکل داده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بعد از این مرحله، نسبت کشش ( $\beta$ ) در دو مرحله کشش عمیق و درصد نازک‌شدنی ( $\alpha$ ) در مراحل اتوکشی متناظر با قطعات شکل داده شده شکل ۳، در جدول ۲ آورده شده است. در رابطه‌های بکار برده شده برای محاسبه نسبت کشش و درصد نازک‌شدنی جدول ۲، قطر گرد  $D$ ، قطر خارجی لوله در هر مرحله،  $d$ ، قطر لوله در اولین و دومین مرحله در کشش عمیق است. همچنین  $t_1$ ، ضخامت اولیه و  $t_2$  ضخامت ثانویه قطعه استوانه‌ای شکل داده شده در فرایند اتوکشی هست.

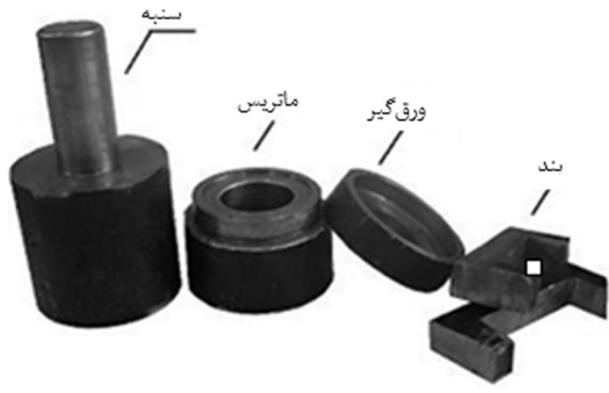
شکل ۵-الف شماتیک مجموعه قالب طراحی شده برای عملیات خم کاری فشاری هیدرولیکی را نشان می‌دهد. مجموعه قالب ساخته شده در شکل ۵-ب نشان داده شده است. لوله تولید شده با استفاده از فرایند کشش عمیق و اتوکاری به عنوان ماده اولیه برای فرایند خم کاری مورد استفاده قرار گرفت. در انجام آزمایش‌ها، ابتدا لوله میان دو کفه قالب قرار داده می‌شود، سنبه بر روی لوله قرار می‌گیرد و برای ایجاد آب بندی از اورینگ روی سنبه استفاده شده است. پس از هواگیری محفظه داخلی لوله، سیال از طریق سوراخی که در سنبه ایجاد گردید، وارد محفظه لوله می‌شود.

زیاد به دست آوردن. زنگ و لی [8] خم کاری فشاری لوله‌ها و پارامترهای مؤثر بر آن را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. زنگ و ردیکاپ [9] خم کاری لوله به روش فشاری را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند و تعدادی از پارامترهای مؤثر بر شکل پذیری، شامل شعاع خم کاری، فشار داخلی و ضریب اصطکاک را مورد تحلیل قراردادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش شعاع خم، سبب افزایش تغییرات ضخامت می‌شود و افزایش فشار داخلی میزان چروک را کاهش می‌دهد. آن‌ها دریافتند که تأثیر ضریب اصطکاک نسبت به سایر پارامترها کمتر بوده و افزایش آن باعث پیدایش چروک در نمونه می‌شود. کسی و همکاران [10] فرایند خم کاری فشاری لوله جدار نازک با مقطع مستطیلی را بصورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها تغییرات طول لوله را بر شعاع‌های داخلی، خارجی خم و تغییرات ضخامت لوله در پنج زاویه مختلف خم به صورت شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه کردند. آن محققان دریافتند که با افزایش زاویه خم، مقدار کرنش طولی افزایش می‌یابد. همچنین میزان ضخامت بهترین، در شعاع داخلی خم افزایش، اما در شعاع خارجی خم کاهش می‌یابد و نازک‌شدنی رخ می‌دهد. زنگ و همکاران [11] فرایند خم کاری هیدروفرمینگ را برای ساخت قطعات خودرو به صورت شبیه‌سازی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافته که میزان لقی بین لوله و قالب، بر میزان چروک‌گی لوله تأثیرگذار است. همچنین هر چه شعاع خم کمتر باشد، غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع و نازک‌شدنی بیشتر می‌شود. وانگ و آگاروال [12] غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامتی دیواره لوله را در فرایند خم کاری هیدروفرمینگ لوله، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها دریافتند که با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع و چروک‌گی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه خم کاری لوله انجام گرفته است. محققان توانستند با روش‌های مختلف خم کاری، میزان چروک احتمالی را در فرایند خم کاری کاهش داده و در مواردی چروک را از بین ببرند و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله را در حین فرایند خم کاری به حداقل برسانند. هنگامی که نسبت شعاع خم به قطر لوله ( $R/D$ ) کوچک می‌شود، نمی‌توان با روش‌های معمول در فرایند خم کاری که در بالا به آن اشاره شد، خم کاری لوله را بدون عیوب انجام داد. یکی از راههای کاهش عیوب در خم کاری لوله، استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله است که دارای مزایای بسیار زیادی نسبت به روش‌های قدیمی است. از مزایای این روش می‌توان به بهبود کیفیت سطحی، کاهش تغییرات ضخامت، افزایش استحکام و کاهش هزینه، بخصوص در مورد قطعات پیچیده اشاره کرد.

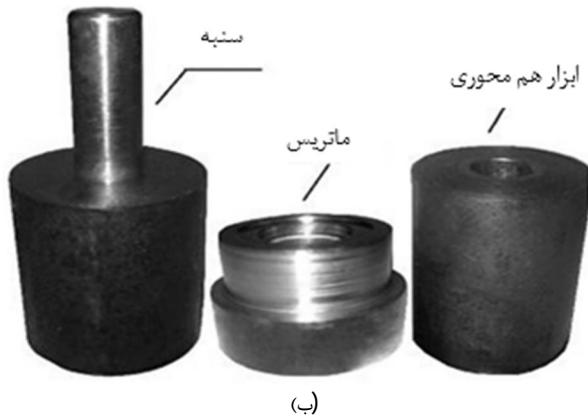
تاکنون محققان توانستند به حداقل نسبت شعاع خم به قطر لوله ( $R/D$ )، ۱/۵ دست یابند. بررسی‌ها نشان داد که خم کاری بدون عیوب لوله‌ای با نسبت ( $R/D$ ) کمتر از ۱/۵ با روش‌های قبلی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، در پژوهش حاضر روشی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان لوله‌ای با نسبت شعاع خم به قطر یک را بدون عیوب تولید کرد. در این روش، لوله‌ها به صورت انتها بسته تولید شده و سپس در قالب خم قرار گرفته تا با استفاده از فشار سیالی که به جدارهای و انتهای بسته لوله اعمال می‌شود، پدیده چروک در لوله حذف شده و غیر دایره‌ای شدن سطح مقطع لوله به حداقل برسد. همچنین با توجه به اینکه تهیه لوله جدار نازک با انتهای بسته مشکل است، در ابتدا لوله‌های انتها بسته بدون درز، به وسیله فرایندهای کشش عمیق و اتوکشی تولید شده و پس از ساخت لوله‌ها، فرایند خم کاری فشاری این لوله‌ها تحت زاویه خم ۹۰ درجه با روش جدید، مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفت.



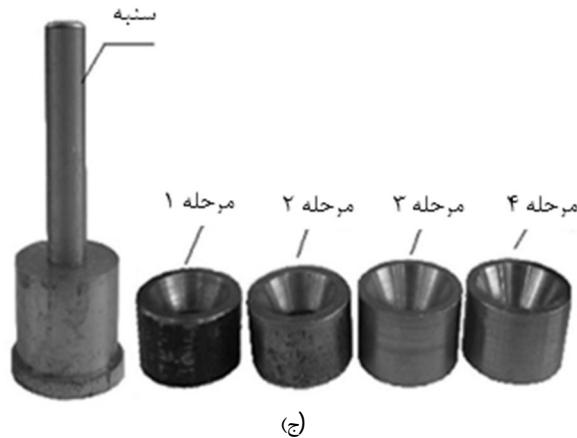
شکل ۴ پارامترهای هندسی لوله



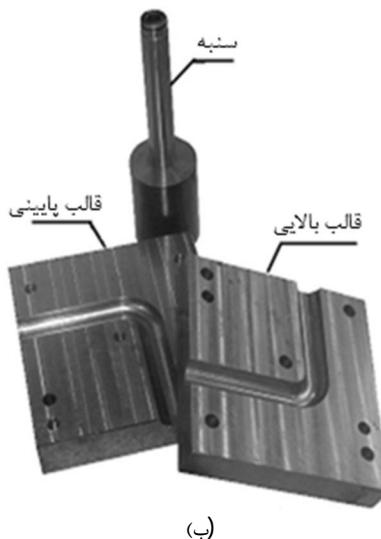
(الف)



(ب)



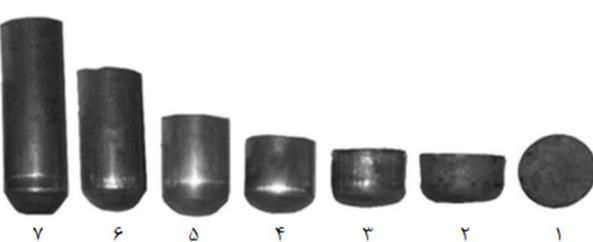
(ج)

شکل ۲ (الف) قالب کشش عمیق مرحله اول، (ب) قالب کشش عمیق مرحله دوم (ج)  
مجموعه قالب‌های مرحله اول تا چهارم اتوکشی

(ب)

شکل ۵ (الف) شماتیک قرارگیری نمونه در قالب جدید (خم هیدرولیکی لوله)،  
(ب) قالب جدید خم هیدرولیکی لوله

برای تأمین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است که قابلیت اعمال فشار تا حداقل ۳۰ MPa را دارد و دبی آن توسط یک پیچ تنظیم، قابل تغییر است. برای تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار هیدرولیکی از یک شیر کنترل فشار برای تنظیم فشار نهایی، یک فشارسنج جهت نشان دادن مقدار فشار داخل لوله، یک شیر یک طرفه، سه راهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. شکل ۶ مدار هیدرولیکی استفاده شده را نشان می‌دهد. تجهیزات سیستم هیدرولیکی مربوط به این مدار در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۳ مراحل شکل دهی لوله در مرحله ۱ (ورق اولیه)، ۲) کشش عمیق مرحله اول،  
(۳) کشش عمیق مرحله دوم، (۴) اتوکشی مرحله اول، (۵) اتوکشی مرحله دوم،  
(۶) اتوکشی مرحله سوم، (۷) اتوکشی مرحله چهارم

در ادامه، با افزایش فشار در لوله و با استفاده از حرکت سنمه، لوله به سمت جلو حرکت کرده و شعاع خم قالب در لوله ایجاد می‌شود. فشار سیال موجود در محفظه قالب از ایجاد چروک در قطعه جلوگیری می‌کند.

شده‌اند. خصوصیات مکانیکی لوله مطابق جدول 1 اعمال شده است. از آنجا که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. لوله مسی استفاده شده در شبیه‌سازی، همسانگرد فرض شده است. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح<sup>6</sup> و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی<sup>7</sup> تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب<sup>8</sup> و شرایط تماسی پنالتی<sup>9</sup> برای سطوح استفاده شده است. براساس مرجع [12] ضریب اصطکاک 0/1 و سرعت سنبه ثابت و با توجه به آزمون تجربی 50mm/min اعمال شد. در قسمت بارگذاری، فشار سیال با استفاده از قید فشار به محفظه داخلی لوله وارد گردید. قالب و سنبه با المان R3D4 و لوله با المان C3D8R با اندازه المان 0/0015 شبکه‌بندی شدند. همچنین تعداد سه المان در راستای ضخامت لوله در نظر گرفته شد. یکی از مهم‌ترین موارد در شبیه‌سازی‌ها، پیش‌بینی پارگی است. در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک‌شدنی برای بررسی پارگی لوله استفاده شده است [14]. این کمیت با معادله (1) مشخص می‌شود.

$$\frac{t_0 - t_f}{t_0} = \text{درصد نازک‌شدنی} \quad (1)$$

در معادله (1)،  $t_0$  ضخامت اولیه ورق و  $t_f$  ضخامت نهایی است که از معادله (2) بدست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی ( $\varepsilon_t$ ) در شرایط کرنش صفحه‌ای از معادله (3) تخمین زده می‌شود:

$$e_r = \left( 23.3 + \frac{360}{25.4} t_0 \right) \left( \frac{n}{0.21} \right) \quad (3)$$

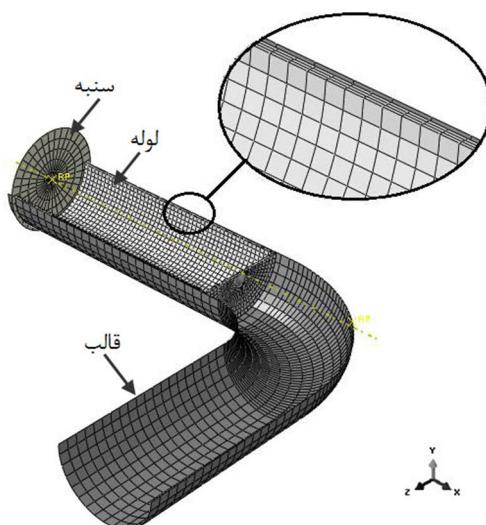
که در آن،  $n$  نمای کرنش سختی و  $t_0$  ضخامت اولیه لوله بر حسب میلی‌متر است. با توجه به برقراری معادله‌های (4) و (5) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی  $\varepsilon_r$  و کرنش ضخامتی  $\varepsilon_t$  تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_r = \ln(1 + e_r / 100) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_r \quad (5)$$

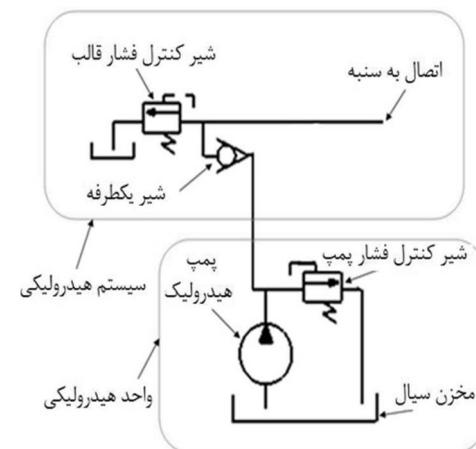
با استفاده از معادله‌های (4) و (5) و محاسبه  $\varepsilon_t$  و  $\varepsilon_r$  و با جایگذاری  $\varepsilon_t$  در

معادله (2) مقدار  $t_f$  بدست می‌آید و آنگاه طبق معادله (1) مقدار حداکثر نازک‌شدنی محاسبه می‌شود.



شکل 8 مدل مونتاژ شده و نحوه مش‌بندی اجزا در شبیه‌سازی فرایند خم کاری

- 6- Surface to Surface
- 7- Kinematic Contact Method
- 8- Colomb
- 9- penalty



شکل 6 مدار هیدرولیک اعمال و کنترل فشار



شکل 7 تجهیزات سیستم هیدرولیکی کنترل فشار

جدول 2 ابعاد لوله شکل داده شده در مراحل مختلف

فرایند	مرحله	$D_{out}$ (mm)	$t$ (mm)	$D/d$	$\alpha^2 = ((t_0 - t_f)/t) * 100$
-	-	40	2	-	-
-	I/56	25/6	2	1/56	1
-	I/11	23	2	1/11	II
25	-	22	1/13	-	III
25	-	21/26	0/78	-	IV
31	-	20/56	8	-	V
36	-	20	0/5	-	VI
-	-	20	0/5	-	VII

1- نسبت کشش 2- درصد نازک شدنی

### 3- مراحل شبیه‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس نسخه 6.10.1 برای شبیه‌سازی فرایند خم کاری استفاده شده است. به دلیل تقارن لوله، فقط نیمی از هندسه لوله در نرم‌افزار مدل شده است. در شکل 8 مدل شبیه‌سازی شده فرایند خم هیدرولیکی لوله به روش جدید نشان داده شده است. در شبیه‌سازی المان محدود این فرایند، لوله به صورت سه بعدی توپر<sup>2</sup> و شکل‌پذیر<sup>3</sup> و اجزای قالب به صورت پوسته‌ای<sup>4</sup> صلب و گسیته<sup>5</sup> در نرم‌افزار مدل‌سازی

1- ABAQUS 6.10.1

2- 3D Solid

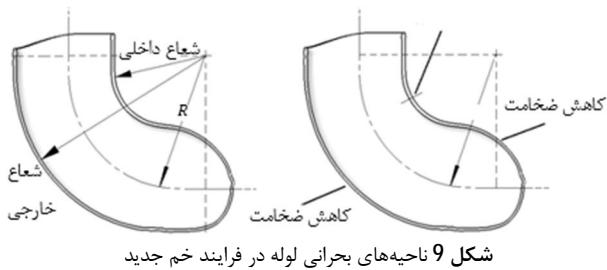
3- Deformable

4- Shell

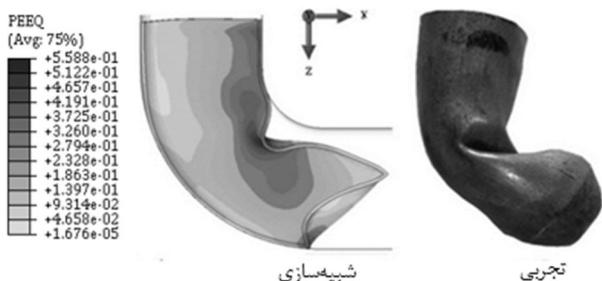
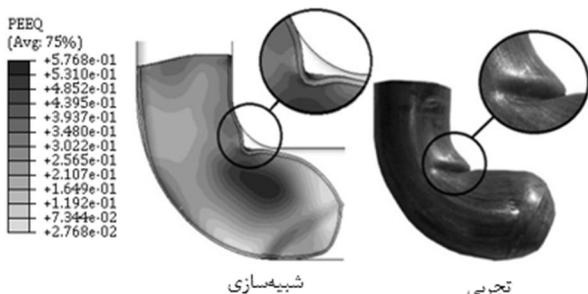
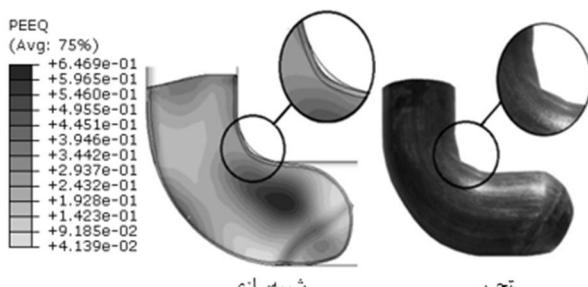
5- 3D Discrete Rigid

چروکیدگی در شکل 11 نشان داده شده است. شکل 12 لوله شکل داده شده در فشار  $15 \text{ MPa}$  را نشان می‌دهد. در این فشار لوله به طور کامل شکل قالب را به خود نگرفته اما چروکیدگی به میزان زیادی نسبت به فشار  $10 \text{ MPa}$  کاهش یافته ولی به طور کامل از بین نمی‌رود و مقداری چروک در شعاع داخلی مشاهده می‌شود. ناحیه چروک شده در شکل 12 نشان داده شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، انتظار می‌رفت که در فشار  $20 \text{ MPa}$ ، لوله به طور کامل سطح قالب را پر کند و چروک در لوله به طور کامل برطرف شود. بنابراین، شکل دهی لوله در این فشار به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. شکل 13 قطعه شکل داده شده در این فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، چروک در لوله شکل داده شده در فشار  $20 \text{ MPa}$  به طور کامل برطرف شد و دیواره لوله به طور کامل شکل قالب را به خود گرفته است.



شکل 9 ناحیه‌های بحرانی لوله در فرایند خم جدید

شکل 10 لوله شکل داده شده بدون فشار سیال با شعاع خم  $20\text{mm}$  و قطر لوله  $20\text{mm}$ شکل 11 لوله شکل داده شده در فشار  $10 \text{ MPa}$  با شعاع خم  $20\text{mm}$  و قطر لوله  $20\text{mm}$ شکل 12 لوله شکل داده شده در فشار  $15 \text{ MPa}$  با شعاع خم  $20\text{mm}$  و قطر لوله  $20\text{mm}$ 

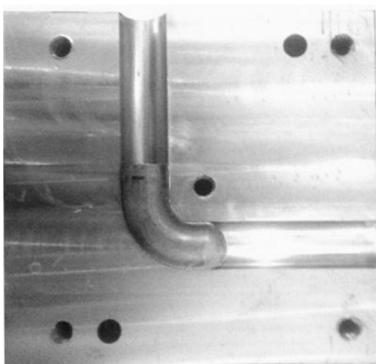
حداکثر نازکشیدگی برای لوله مسی استفاده شده در آزمایش‌ها  $39\%$  بدست آمده است.

#### 4- نتایج و بحث

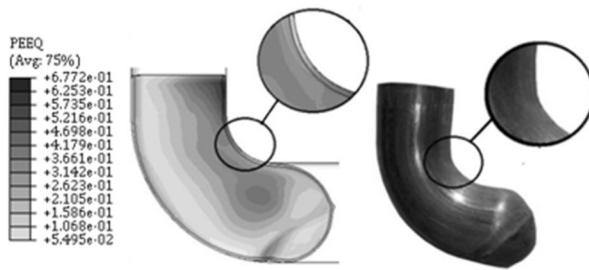
در فرایند خم کاری، ضخامت لوله در ناحیه دیواره داخلی به دلیل وجود کرنش‌های افزایش می‌پابد و بنابراین احتمال ایجاد چروک در این ناحیه وجود دارد. در دیواره خارجی نیز به دلیل وجود کرنش‌های کشنشی، کاهش ضخامت رخ می‌دهد. همچنین، در ناحیه خم، عموماً قطعه به دلیل کاهش قطر که به‌سبب کشش در دیواره داخلی اتفاق می‌افتد، قالب را پر نمی‌کند. در فرایند جدید ارائه شده، در ابتدای دیواره داخلی لوله به دلیل اعمال فشار سیال در قسمت انتهای اوله حین خم کاری علاوه بر کرنش‌های فشاری، کرنش‌های کشنشی نیز ایجاد می‌شود. مقدار کرنش کشنشی به فشار سیال بستگی دارد که ممکن است در فشارهای بالا در این ناحیه کرنش‌های کشنشی از کرنش‌های فشاری بزرگ‌تر شده که باعث ایجاد نازک شدن گردید در این ناحیه می‌شود. در شکل 9 ناحیه‌های بحرانی لوله در فرایند خم کاری فشاری هیدرولیکی نشان داده شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه‌هایی است که در اثر کاهش ضخامت در لوله پارگی رخ می‌دهد، یا در اثر افزایش ضخامت چروک در آن ایجاد می‌شود. پژوهش‌های بسیاری برای کاهش میزان چروکیدگی در ناحیه بحرانی لوله انجام شده اما پژوهشگران تاکنون نتوانسته‌اند چروک احتمالی در این ناحیه را به طور کامل حذف کنند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، چنانچه نسبت شعاع خم به قطر لوله بین  $1/5$  ۱/۵ باشد، خم کاری با روش‌های معمول قابل انجام نیست. در این پژوهش، قطر لوله ( $D$ )  $20\text{mm}$ , شعاع خم ( $R$ )  $20\text{mm}$  و نسبت  $R/D$  ۱ است، بنابراین خم کاری لوله با این نسبت به سادگی صورت نمی‌گیرد. همچنین ضخامت کم لوله ( $0/5$  میلی‌متر)، شکل دهی را مشکل‌تر می‌کند و امکان پارگی و چروک را در لوله افزایش می‌دهد. یکی دیگر از پارامترهایی که باید در حین خم کاری به آن توجه نمود، تغییرات ضخامت دیواره لوله است. در روش جدید ارائه شده در این پژوهش، با انتها بسته کردن لوله، با وجود دشوار بودن شرایط شکل دهی، چروک در شعاع داخلی لوله بطور کامل بر طرف شده و تغییرات ضخامت نیز تا حدود زیادی کاهش می‌پابد.

در فرایند خم کاری فشاری جدید ارائه شده به روش هیدرولیکی، ابتدا فشار در سطح داخلی لوله اعمال می‌شود. سپس، با جابجایی سنبه و اعمال همزمان فشار سیال در سطح داخلی لوله، عملیات خم کاری صورت می‌گیرد. با توجه به نوع فرایند، فشار شکل دهی یکی از پارامترهای اصلی در فرایند خم کاری بشمار می‌آید. از این رو، شکل‌گیری کامل لوله در قالب با فشارهای مختلف به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به منظور مشاهده نحوه شکل‌گیری نمونه در خم ایجاد شده، نمونه بدون فشار سیال فقط با جابجایی سنبه در قالب شکل داده شد. همان‌طور نمونه در حالت بدون فشار سیال در شکل 10 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل نبودن فشار سیال، با جابجایی سنبه، نمونه چروک شد و شکل قالب را به خود نگرفت.

همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده شد، بدون اعمال فشار سیال در سطح داخلی لوله، نمونه در ناحیه شعاع داخلی و خارج چروک می‌شود. بنابراین به منظور رفع پدیده چروکیدگی، فشار  $10 \text{ MPa}$  به سطح داخلی لوله اعمال شد. با اعمال فشار سیال به سطح داخلی لوله و با جابجایی سنبه، نمونه شروع به شکل‌گیری کرده و تا حدودی شکل قالب را به خود می‌گیرد اما در این فشار هنوز چروک در ناحیه دیواره داخلی لوله مشاهده می‌شود. این

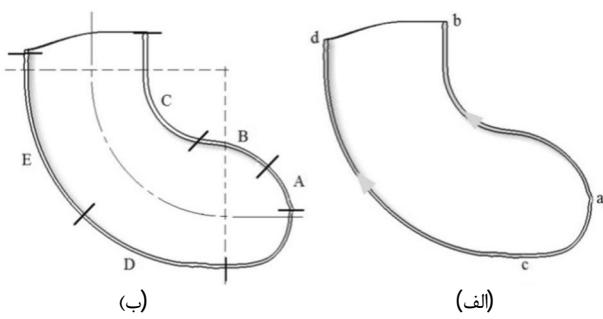


شکل 15 شکل گیری لوله سالم و بدون عیب در قالب در فشار 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm



شبیه‌سازی تجربی

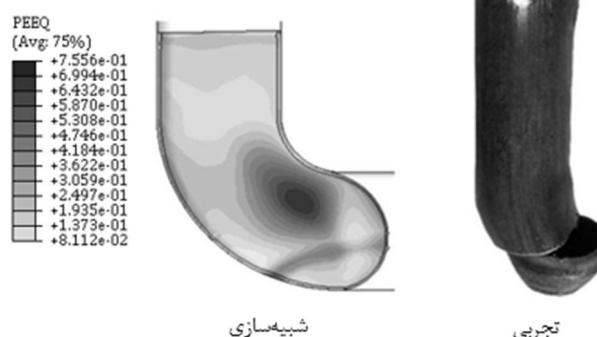
شکل 13 لوله شکل داده شده در فشار 20MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm



شکل 16 (الف) مسیر اندازه گیری ضخامت قطعه کار، (ب) نواحی بررسی شده

در شکل های 17 و 18، منحنی های توزیع ضخامت قطعه کار در فشارهای 10، 15 و 20 مگاپاسکال نشان داده شده است. همان طور که از شکل ها مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مطابقت قابل قبول دارد و حداقل اختلاف بین منحنی های توزیع ضخامت تجربی و شبیه سازی در دو دیواره داخلی و خارجی، به ترتیب 8 و 10 درصد است.

شکل 17 منحنی توزیع ضخامت لوله در ناحیه شعاع داخلی، در سه فشار 10، 15 و 20 مگاپاسکال را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در ته لوله (a)، ضخامت لوله خم شده با ضخامت اولیه لوله برابر است. در ناحیه A، با افزایش فاصله از نقطه a، نازک شدگی در قطعه نیز افزایش می یابد. بیشترین نازک شدگی در لوله، در فاصله ای در حدود 5mm از نقطه a اتفاق می افتد. از این نقطه به بعد، نازک شدگی با افزایش فاصله از ته لوله کم می شود و در سر لوله مشاهده می شود که ضخامت لوله خم شده از ضخامت لوله اولیه بیشتر می شود. همچنین از شکل می توان ملاحظه کرد که با افزایش فشار شکل دهی، کاهش ضخامت در نقطه a و ناحیه B بیشتر می شود. در شعاع داخلی در ته لوله در ناحیه A، به دلیل اعمال فشار سیال، کرنش های کشنی بوجود می آید که موجب نازک شدگی در این ناحیه می گردد. در سر لوله (ناحیه C) که فشار توسط سنبه اعمال می شود، کرنش های فشاری وجود دارد که موجب افزایش ضخامت قطعه در این ناحیه می شود. بیشترین کرنش کشنی در فاصله 5 میلی متری از انتهای لوله ایجاد می گردد و از آن پس کرنش های فشاری افزایش بیشتر می شود. همان گونه که در شکل 17 ج مشاهده می شود میزان ضخامت با افزایش فاصله از نقطه a به دلیل افزایش کرنش های کشنی کاهش یافته. ضخامت دیواره در فاصله 5mm از نقطه a در فشار 20MPa برابر با



شبیه‌سازی تجربی

شکل 14 لوله شکل داده شده در فشار 27MPa با شعاع خم 20mm و قطر لوله 20mm

شکل 14 قطعه شکل داده شده در فشار 27MPa را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، به علت بالا بودن میزان فشار سیال، در ناحیه انتهایی قطعه، کرنش های کشنی زیادی ایجاد شده و لوله در این ناحیه دچار پارگی شده است.

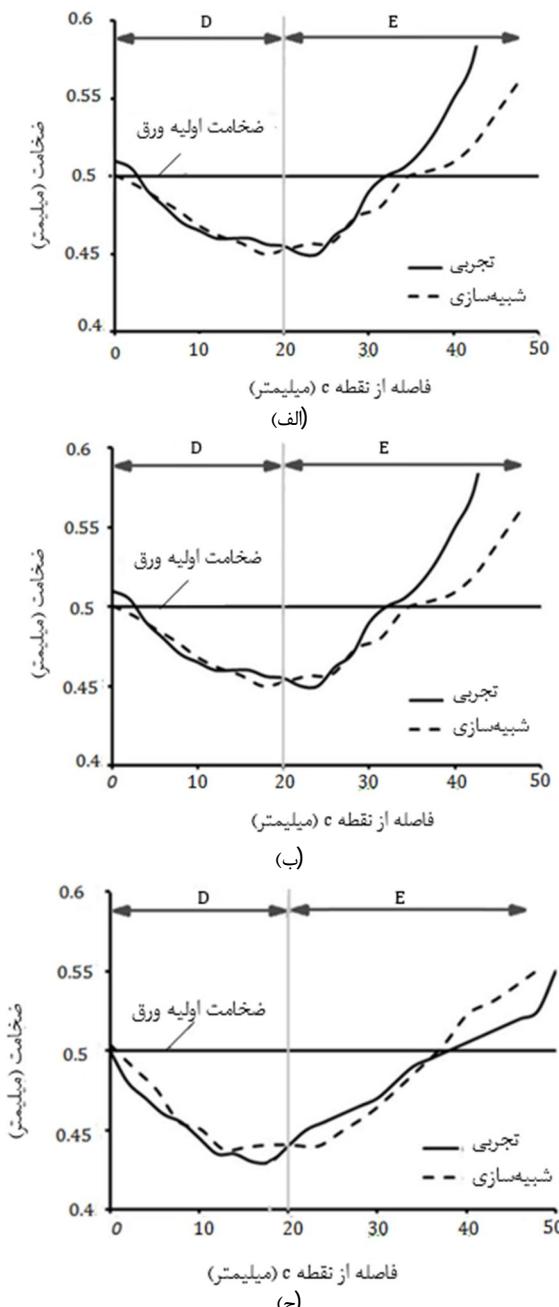
همان طور که در شکل های 10 تا 14 مشاهده شد در روش ارایه شده خم کاری لوله، بدون اعمال فشار هیدرولیک، لوله چروک شده است. با ایجاد فشار هیدرولیک، قطعه شکل قالب را به خود گرفت، اما در شعاع داخلی لوله چروک ایجاد شد. با افزایش فشار، چروک ایجاد شده کاهش یافته و در فشار 20MPa قطعه سالم تولید شد. اما افزایش فشار، باعث افزایش نیروی عمودی و در نتیجه افزایش اصطکاک بین لوله و جداره قالب و سخت تر شدن حریان لوله در قالب می شود. از طرفی، افزایش فشار باعث افزایش کرنش کشنی در انتهای لوله نیز می گردد. همچنین بررسی ها نشان داد که در فشار 27MPa پارگی در ناحیه انتهایی شعاع داخلی خم قطعه ایجاد می شود.

شکل 15 قطعه ای را در داخل قالب خم نشان می دهد که به طور سالم و بدون چروک در آزمایش تجربی شکل گرفت. همان طور که از شکل مشاهده می شود، قطعه به طور کامل و بدون چروک شعاع خم را پر کرده و شکل قالب را به خود گرفته است. در این پژوهش، در فشار شکل دهی مناسب، پدیده چروک در ناحیه شعاع داخلی قطعه از بین رفته است. علاوه بر این، با وجود بحرانی بودن نسبت شعاع خم به قطر لوله، قطعه توانسته است قالب را به طور کامل پر کند. همچنین، در این روش کاهش قطر لوله در ناحیه خم وجود ندارد.

به منظور بررسی دقیق تر، منحنی های توزیع ضخامت تجربی و شبیه سازی لوله در ناحیه های شعاع داخلی و خارجی مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور بررسی ضخامت در دیواره قطعه کار، برای شعاع داخلی مسیر ab و برای شعاع خارجی مسیر cd انتخاب شده است. شکل های 16-الف و ب به ترتیب مسیرهای انتخاب شده برای اندازه گیری ضخامت در ناحیه های شعاع داخلی و خارجی و نیز نواحی بررسی شده در نمونه ها را نشان می دهد.

با توجه به نمودار شکل 18-ج مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از نقطه c در ناحیه C میزان ضخامت به تدریج کاهش یافته، بگونه‌ای که در فاصله 18mm از نقطه c مقدار ضخامت به 0/43mm رسید و در ناحیه D میزان ضخامت افزایش یافته و در فاصله 32mm از نقطه c ضخامت دیواره لوله با کرنش افزایش یافته و در آن میزان ضخامت به 0/58mm رسید. روند این نمودار در ساعت خارجی در سایر فشارها نیز مشابه بوده اما میزان کاهش ضخامت در فشارهای مختلف متفاوت است.

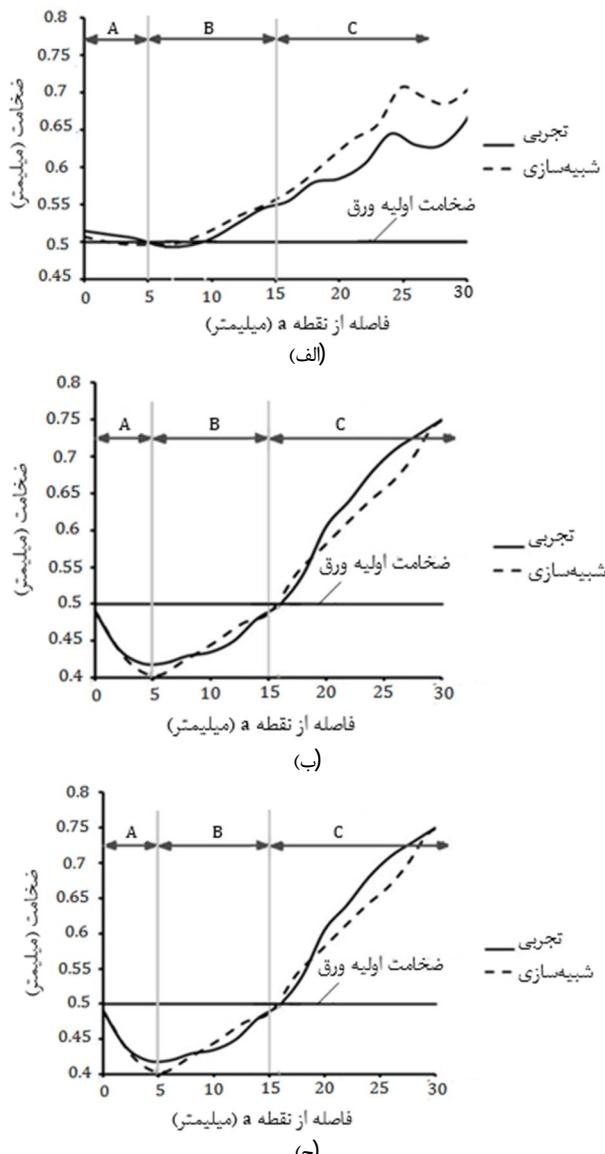
برای بررسی دقیق‌تر، منحنی توزیع ضخامت لوله در حالت شبیه‌سازی، در فشارهای مختلف برای ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی لوله در شکل 20 نشان داده شده است.



شکل 18 منحنی توزیع ضخامت لوله در فشارهای (الف) 10MPa، (ب) 15MPa، (ج) 20MPa با شعاع 20mm و قطر لوله 20mm

0/42mm بوده است. در ادامه، با افزایش زاویه خم، در ناحیه B میزان کاهش ضخامت کم شده به گونه‌ای که در فاصله 16mm از نقطه a ضخامت دیواره لوله با ضخامت اولیه ورق برابر شده است. از آن پس با غلبه کرنش فشاری بر کرنش کشنی میزان ضخامت در ناحیه c تا مقدار 0/75mm افزایش می‌یابد. روند نمودارها در سایر فشارها مشابه بوده و تنها تفاوت موجود در میزان افزایش یا کاهش ضخامت، جایگایی محل بیشترین نازک شدگی و همچنین محل برابر شدن ضخامت اولیه لوله خم شده با ضخامت اولیه لوله می‌باشد.

شکل 18 منحنی‌های توزیع ضخامت لوله در ناحیه شعاع خارجی را در سه فشار 10، 15 و 20 مگاپاسکال نشان می‌دهد. روند تغییرات ضخامت همانند شکل 17 می‌باشد و تنها تفاوت موجود در این است که کرنش‌های کشنی ناشی از شعاع خارجی نیز به کرنش‌های اعمال شده اضافه شده و منطقه کاهش ضخامت یافته در قطعه افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش ضخامت تقریباً در فاصله 20mm از انتهای لوله اتفاق افتاده است. در ابتدای لوله نیز به دلیل کرنش فشاری ناشی از فشار سنبه، کرنش فشاری بر کرنش غلیه کرده و ضخامت لوله خم شده در این قسمت از ضخامت لوله اولیه بیشتر می‌شود.



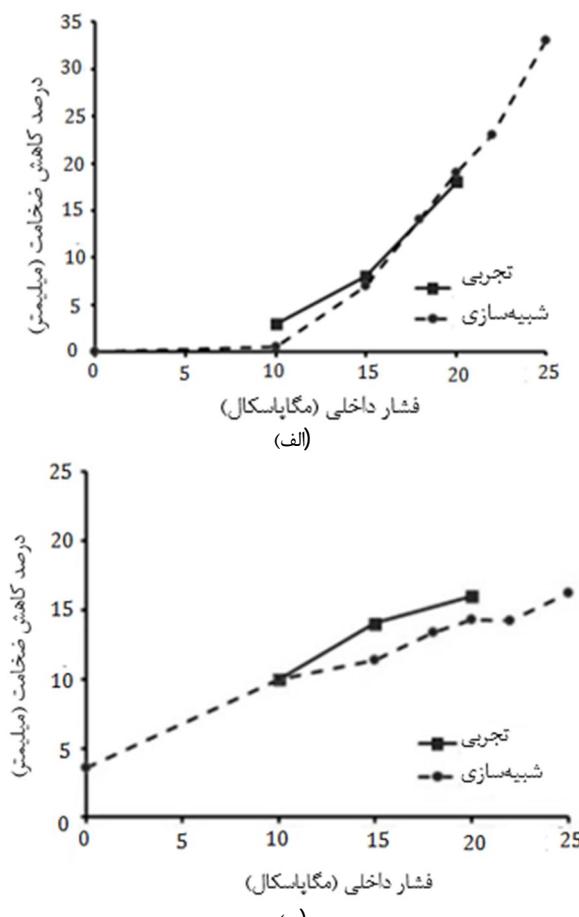
شکل 17 منحنی توزیع ضخامت لوله در فشارهای (الف) 10MPa، (ب) 15MPa، (ج) 20MPa با شعاع 20mm و قطر لوله 20mm

شکل 20، درصد کاهش ضخامت را در ناحیه‌های بحرانی شعاع داخلی و شعاع خارجی لوله در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل 20-الف مشاهده می‌شود در فشار صفر تا 10 مگاپاسکال درصد کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی مقدار بسیار جزئی و نزدیک به صفر می‌باشد. با افزایش فشار از 10 مگاپاسکال درصد کاهش ضخامت با افزایش فشار با آهنگ تقریباً ثابت زیاد می‌شود. شکل 20-ب تغییرات درصد کاهش ضخامت برای نقطه با ثابت زیاد می‌شود. با افزایش فشار داخلی لوله، میزان درصد کاهش بیشترین کاهش ضخامت در شعاع خارجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فشار داخلی لوله، میزان درصد کاهش ضخامت تا فشار 10 مگاپاسکال با شبیه‌تی تغییر می‌کند و از آن به بعد شبیه منحنی کمتر می‌شود. در شعاع خارجی مشاهده می‌شود که درصد کاهش ضخامت مقدار کمی می‌باشد و پارگی در این ناحیه ایجاد نمی‌شود.

### 5- نتیجه گیری

در این پژوهش روش جدیدی برای خم کاری فشاری لوله جدار نازک در فرایند خم کاری هیدرولیکی لوله، باهدف از بین بردن چروک در شعاع داخلی و دستیابی به کمترین تغییرات ضخامت در دیواره لوله ارائه شده است. همچنین اثر تغییرات فشار سیال بر توزیع ضخامت لوله در ناحیه‌های شعاع داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش در زیر آورده شده است:

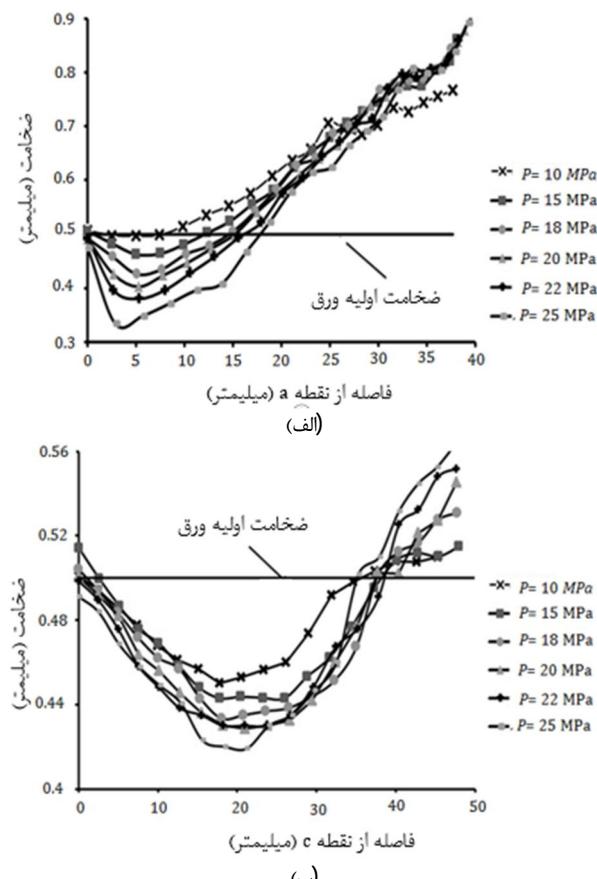
1. با استفاده از قالب جدید امکان شکل دهی لوله جدار نازک با نسبت  $R/D$  یک امکان پذیر است.



شکل 20 درصد کاهش ضخامت در قطعه در فشارهای مختلف (الف) شعاع داخلی، (ب) شعاع خارجی

همان‌گونه که اشاره شد و در شکل 19-الف مشاهده می‌شود، در شعاع داخلی با افزایش فاصله از نقطه  $a$ ، نازک شدگی در قطعه افزایش یافته و بیشترین کاهش ضخامت در فاصله 20mm از انتهای لوله اتفاق می‌افتد و در ادامه میزان کاهش ضخامت کم می‌شود. با افزایش فشار شکل دهی، این ناحیه به سمت انتهای لوله حرکت می‌کند. بیشترین کاهش ضخامت در فاصله 5 میلی‌متری از ته لوله اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که با افزایش فشار شکل دهی، مقدار کاهش ضخامت در این نقطه افزایش می‌یابد و در فشار 27 مگاپاسکال پارگی در این ناحیه بوجود می‌آید. کمترین میزان ضخامت در فشارهای 10MPa، 0.049mm، 22MPa، 20MPa، 18MPa، 15MPa، 0.049mm، 25MPa، 0.038mm، 0.042mm، 0.045mm، 0.047mm است، همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان ضخامت دیواره با افزایش میزان فشار کاهش می‌یابد.

در ناحیه شعاع خارجی که منحنی‌های توزیع ضخامت آن در فشارهای مختلف در شکل 19-ب نشان داده شده است، با افزایش فاصله از نقطه  $c$ ، مانند حالت قبل میزان نازک شدگی ابتدا افزایش و در فاصله تقریباً 20 میلی‌متری بیشترین کاهش ضخامت اتفاق می‌افتد. سپس کاهش ضخامت کم می‌شود. همچنین با افزایش فشار سیال در سطح داخلی قطعه کار، میزان نازک شدگی در دیواره خارجی لوله افزایش می‌یابد. اما مقدار کاهش ضخامت نسبت به ناحیه بحرانی شعاع داخلی کمتر است و پارگی در این ناحیه بوجود نمی‌آید. میزان کمترین ضخامت دیواره در فشار 10MPa برابر 0.046mm و این مقدار در فشار 25MPa به مقدار 0.042mm میرسد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان فشار، میزان تغییرات کاهش ضخامت ناچیز بوده است.



شکل 19 منحنی‌های توزیع ضخامت (الف) دیواره داخلی و (ب) دیواره خارجی در فشارهای مختلف، حاصل از شبیه‌سازی

- [3] L. Heng, Y. He, Zh. Mei, S. Zhichao, G. Ruijie, Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1164–1175, 2007.
- [4] H. Li, H. Yang, M. Zhan, R.J. Gu, The interactive effects of wrinkling and other defects in thin-walled tube NC bending process, *Journal of Materials Processing Technology*, VOL. 187-188, pp. 502–507, 2007.
- [5] L. Heng, Y. He, A Study on Multi-defect Constrained Bendability of Thin-walled Tube NC Bending Under Different Clearance, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pp. 102–112, 2011.
- [6] J. Zhiqiang, Zh. Mei, Y. He, X. Xudongb, L. Guangjun, Deformation Behavior of Medium-strength TA18 High-pressure Tubes During NC Bending with Different Bending Radii, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pp. 657–664, 2011.
- [7] H. Li, H. Yang, M. Zhan, R.J. Gu, A new method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 192–196, 2006.
- [8] Y.S. Zeng, Z.Q. Li, Experimental research on the tube push bending process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 237–240, 2002.
- [9] Y. Zhang, D. Redekop, Shell element simulation of the push method of tube bending, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17, pp. 301–304, 2006.
- [10] A. Kami, B.Molaei, F. Biglari, Finite element simulation of the push bending of rectangular tubes, *The Ninth Conference on Manufacturing*, March 3, 2009. (In Persian)
- [11] J.b. Yang, B.h. Joen, S.I. Oh, the bending technology of a hydroforming process for an automotive part, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 175–181, 2001.
- [12] J. Wang, R.Agarwal, Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 598–605, 2006.
- [13] A. Gorji, Experimental and Finite element simulation method for forming a sharp conical parts, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, noshirvani uni University, 2012. (In Persian)
- [14] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 137–143, 2004.

2. در قالب جدید علاوه بر شکل دهی قطعه، عیوب چروکیدگی، نازک شدگی و عدم پر شدن قطعه در مقطع خم برطرف شده است.

3. فشار شکل دهی پارامتر بسیار مهمی در شکل دهی و رفع عیوب است. در این پژوهش برای خمکاری لوله مورد نظر مشاهده شد در فشارهای کم (کمتر از 10MPa) در قطعه در ناحیه خم چروک با عمق زیاد ایجاد می شود. با افزایش فشار میزان چروک کم می شود و در فشار 15MPa چروک به مقدار کم بوجود می آید و قطعه حفره قالب را به طور کامل پر نمی کند. در فشار 20MPa عیوب در نمونه حذف شده و نمونه کامل شکل قالب را به خود گرفته است. در فشارهای بالاتر از 20MPa میزان تغییرات ضخامت افزایش می یابد.

4. تغییرات میزان ضخامت در شعاع داخلی و خارجی لوله با افزایش فشار از 10MPa تا 25MPa، افزایش می یابد. در شعاع داخلی میزان درصد کاهش ضخامت در شعاع داخلی و خارجی به ترتیب در فشار 20MPa که نمونه شکل قالب را بخود می گیرد برابر 18% و 16% می باشد.

5. با افزایش فشار داخلی تا فشار 20MPa، چروکیدگی در شعاع داخلی کمتر می شود اما با افزایش این فشار از 20MPa، احتمال پارگی لوله بیشتر می شود به گونه ای که در فشار 27MPa نمونه پاره می شود.

## 6- مراجع

- [1] H. Yang, Y. Lin, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, *Journal of Materials Processing Technology*, VOL. 152, pp. 363–369, 2004.
- [2] J. Fang, S. Lu, K. Wang, J. Xu, X. Xu, Zh.Yao, Effect of Mandrel on Cross-Section Quality in Numerical Control Bending Process of Stainless Steel 2169 Small Diameter Tube, *Advances in Materials Science and Engineering* 2013, 9Pages, 2013.