



## بررسی تجربی و عددی شکل‌دهی قطعات لوله‌ای فلزی با یک قالب هیدروفرمینگ انعطاف‌پذیر جدید بر مبنای شکل‌دهی چندنقطه‌ای

جواد شهبازی کرمی<sup>1</sup>، سید مهدی علویزاده<sup>2</sup>، محمد مراد شیخی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 163-16785، m.sheikhi@srttu.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 شهریور 1395

پذیرش: 12 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلیدواژگان:

هیدروفرمینگ لوله

شکل‌دهی چندنقطه‌ای

قالب گسسته

قالب انعطاف‌پذیر

### چکیده

هیدروفرمینگ چندنقطه‌ای لوله یک فناوری شکل‌دهی جدید انعطاف‌پذیر برای تولید انواع مقاطع لوله‌ای است. در این فرآیند لوله می‌تواند به واسطه فشار سیال یا استفاده از تنها یک قالب به اشکال دلخواهی تبدیل شود. در فرآیند هیدروفرمینگ مرسوم برای تولید هر مقطع لوله‌ای شکل، نیاز به ساخت یک قالب است که خود افزایش زمان و هزینه را در پی دارد. در پژوهش حاضر فرآیند هیدروفرمینگ چندنقطه‌ای به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرآیند یک قالب جدید بر مبنای شکل‌دهی چندنقطه‌ای طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این قالب و با توجه به قابلیت بالای شکل‌پذیری برنج 70/30، یک مقطع لوله‌ای متورم شده و یک لوله با مقطع مربع شکل با ضخامت اولیه 2mm از جنس برنج 70/30 تولید شده است. تفاوت عمده قالب‌های شکل‌دهی چندنقطه‌ای با قالب‌های سنتی در جایگزینی سطح صلب با مجموعه‌ای از پین‌ها با ارتفاع قابل تنظیم است. با تنظیم ارتفاع این پین‌ها، مقاطع لوله‌ای مختلفی را می‌توان تولید کرد. این فرآیند ابتدا شبیه‌سازی شده و اعتبار سنجی نتایج حاصله با آزمایش بررسی شده و عیوب به وجود آمده نیز پیش‌بینی شده است. برای کاهش این عیوب از یک لایه الاستیک از جنس پلی‌اورتان استفاده شده است. برای نمونه متورم شده و نمونه با مقطع مربعی حداکثر مقدار کاهش ضخامت از شبیه‌سازی به ترتیب حدود 11% و 17% است که این مقادیر در تطابق با آزمایش است.

## Experimental and Finite Element Investigation of Metal Tubes Forming with a Novel Reconfigurable Hydroforming Die based on Multi Point Forming (MPF)

Javad Shahbazi Karami<sup>1</sup>, Seyed Mehdi Alavizadeh<sup>2</sup>, Mohammad Morad Sheikhi<sup>1\*</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, m.sheikhi@srttu.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 02 September 2016

Accepted 02 November 2016

Available Online 18 December 2016

### Keywords:

Tube hydroforming

Multi point forming

Discrete die

Reconfigurable die

### ABSTRACT

Tube multi-point hydroforming is a new flexible forming technology for manufacturing of various tubular parts. In this process, tube may deform to different shapes via high pressure fluid only by one die. In conventional hydroforming, in order to produce any tubular part, it is necessary to manufacture a die which increasing time and cost. In present study tube multi-point hydroforming is studied using FE simulation and experiments. In this process a new die based on multi point forming was designed and manufactured. By using this die and due to good formability of brass 70/30, a bulged tube and a rectangular tabular cross section of brass 70-30 with initial thickness of 2mm are produced. The main difference of this die compared with conventional dies is the rigid surface is substituted by wide spaced pins. By adjusting the pins height, different tubular cross sections could be produced. This process is simulated and verified experimentally and defects are predicted. In order to decrease these defects an elastic layer of polyurethane is used. For the bulged and rectangular cross section samples maximum decrease in thickness is 11% and 17% respectively and these results are matched with the experiment.

### 1- مقدمه

هیدروفرمینگ لوله<sup>1</sup> یکی از روش‌های شکل‌دهی برای تولید مقاطع توخالی است. در هیدروفرمینگ لوله دو انتهای لوله آب‌بندی شده و لوله به واسطه فشار داخلی ایجادشده به وسیله سیال تزریق‌شده به داخل آن شکل می‌گیرد.

حرکت محوری آب‌بندها در حین فرآیند هیدروفرمینگ منجر به افزایش شکل‌پذیری لوله می‌شود اگرچه این فرآیند می‌تواند در غیاب حرکت محوری نیز انجام شود. می‌توان به جای سیال از فلزات نرم و یا لاستیک‌هایی نظیر پلی‌اورتان استفاده کرد [1]. قالب‌های مرسوم هیدروفرمینگ معمولاً با ماشین‌کاری ساخته می‌شوند. طراحی و ساخت این‌گونه از قالب‌ها بسیار

<sup>1</sup> Tube hydroforming

Please cite this article using:

J. Shahbazi Karami, S. M. Alavizadeh, M. M. Sheikhi, Experimental and Finite Element Investigation of Metal Tubes Forming with a Novel Reconfigurable Hydroforming Die based on Multi Point Forming (MPF), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 9-99, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

J. Shahbazi Karami, S. M. Alavizadeh, M. M. Sheikhi, Experimental and Finite Element Investigation of Metal Tubes Forming with a Novel Reconfigurable Hydroforming Die based on Multi Point Forming (MPF), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 9-99, 2016 (in Persian)

مؤثر در شکل‌دهی قطعات سالم بحث شده است.

## 2- طراحی قالب و شبیه‌سازی المان محدود

در شبیه‌سازی هیدروفورمینگ چندقطه‌ای از نرم‌افزار آباکوس 6.13.4 استفاده شده است. به علت تغییر شکل‌های شدید، مواد غیرهمگن و اصطکاک، فرآیند هیدروفورمینگ یک فرآیند غیرخطی<sup>2</sup> است بنابراین برای مدل کردن این فرآیند و نشان دادن بهتر عیوب ایجادشده از قبیل گودافتادگی، از تحلیل دینامیکی صریح<sup>3</sup> استفاده شده است. برای مقایسه حل شبیه‌سازی با نتایج تجربی، شبیه‌سازی اندازه اجزا، خواص مواد و شرایط مرزی در تطابق کامل با شرایط تجربی است.

اصطکاک بین تمامی سطوح تماسی به صورت مدل اصطکاک کولمبی و با ضریب اصطکاک 0.1 در نظر گرفته شده است [14]. نوع تماس بین اجزا نیز به صورت اصطکاک عمومی<sup>4</sup> مدل شده است.

با توجه به این‌که در آزمایش، پانچ‌های محوری تنها نقش آبندی دارند و نیروی محوری به دو انتهای لوله اعمال نمی‌شود، در شبیه‌سازی نیز تنها نیروی شکل‌دهی، فشار داخلی ناشی از سیال است و از اعمال نیروی محوری صرف نظر شده است. فشار سیال مطابق با نمودار شکل 1 به لوله اعمال شده است. کل زمان شکل‌دهی در شبیه‌سازی 1 ثانیه در نظر گرفته شده و رسیدن فشار تا مقدار 0.7 فشار ماکزیمم در مدت 0.2 ثانیه رخ می‌دهد و بیشتر زمان شکل‌دهی صرف افزایش فشار از مقدار 0.7 فشار بیشینه تا فشار بیشینه شده است. بدین ترتیب اثرات دینامیکی ناشی از افزایش فشار در محدوده شکل‌دهی کاهش یافته است.

به علت تقارن تنها نیمی از مجموعه مدل شده است. در شبیه‌سازی، 4 قسمت مجزا مدل شده‌اند. قالب، لوله برنجی، میله‌های فولادی و لایه پلی‌اورتان که هرکدام مورد بحث قرار گرفته‌اند.

## 2-1- قالب

به علت ارتباط نرم‌افزاری قوی بین آباکوس و کتیا، قالب در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و برای تحلیل به نرم‌افزار آباکوس وارد شده است. بدنه اصلی قالب یک استوانه با قطر خارجی 30cm و ضخامت 1cm است. تعداد 9 × 12 سوراخ به ترتیب در محیط و طول قالب زده شده است. این سوراخ‌ها محل قرارگیری پین‌ها هستند. این قالب در نرم‌افزار آباکوس با تعداد 8207 المان C3D10M تقریب زده شده است.

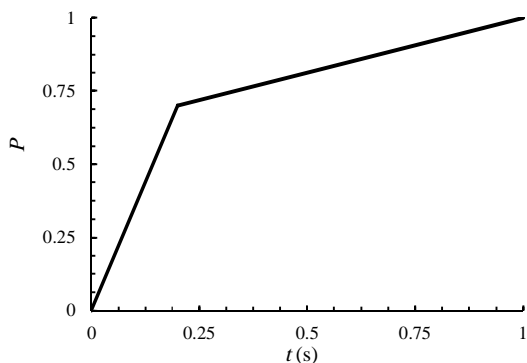


Fig. 1 Applied pressure function to the tube

شکل 1 تابع فشار اعمالی به لوله

زمان‌بر و پرهزینه است بنابراین ارائه یک قالب انعطاف‌پذیر که با آن بتوان انواع مقاطع توخالی را تولید کرد بسیار مقرون‌به‌صرفه است. یک راهکار استفاده از قالب‌های شکل‌دهی چندقطه‌ای<sup>1</sup> است. ایده اصلی این روش، جایگزینی سطح صلب با مجموعه‌ای از پین‌ها با ارتفاع قابل تنظیم است. با حرکت این پین‌ها در راستای محورشان، سطوح مختلفی برای قالب به وجود می‌آید.

مطالعات زیادی در گذشته در زمینه هیدروفورمینگ انجام شده است. سوکولفسکی و همکاران به صورت عددی و تجربی به بررسی شکل‌پذیری لوله پرداختند [2]. بررسی عددی دوبعدی هیدروفورمینگ بدون تغذیه محوری به‌وسیله راما و همکاران انجام شد [3]. ایبسی به ارائه مجموعه‌ای از قالب‌های جدید هیدروفورمینگ برای بهبود پرشدگی گوشه‌های قالب برای تولید قطعات لوله‌ای پله‌ای شکل پرداخت [4]. بهینه‌سازی منحنی فشار جابه‌جایی در فرآیند هیدروفورمینگ لوله با استفاده از روش رویه پاسخ چندمرحله‌ای توسط افتخاری و همکاران بررسی شد [5]. مطالعه عددی و تجربی اثر نسبت انبساط شعاع گوشه و نرخ کرنش در هیدروفورمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی توسط سیدکاشی و همکاران انجام شد [6].

در سال‌های اخیر نوآوری‌های زیادی برای افزایش انعطاف‌پذیری فرآیندهای شکل‌دهی انجام شده است که توسعه شکل‌دهی چندقطه‌ای یکی از این نوآوری‌ها است. اصول فرآیند شکل‌دهی چندقطه‌ای، بر مبنای تقسیم سطوح صلب قالب‌های متداول به مجموعه‌ای از المان‌های گسسته کنار هم است. ارتفاع این المان‌های گسسته از هم یا پین‌ها به آسانی قابل تنظیم است، به طوری که با کنترل ارتفاع پین‌ها می‌توان قطعات مختلف لوله‌ای شکل را تولید کرد. اولین بار مفهوم قالب انعطاف‌پذیر به‌وسیله هارت ارائه شد [7]. او یک قالب گسسته برای شکل‌دهی ورق طراحی کرد. والزیب و همکاران به منظور کاهش زمان و هزینه یک قالب گسسته با امکان موقعیت دهی هیدرولیکی پین‌ها با استفاده از کامپیوتر، برای شکل‌دهی ورق ابداع کردند [8]. زانگ به بررسی شکل‌دهی چندقطه‌ای ساندویچی ورق پرداخت [10,9]. در این روش تنها نیمی از قالب با مجموعه پین‌ها جایگزین شده و نیمه دیگر با یک لایه لاستیک ضخیم تعویض می‌شود. آن‌ها نشان دادند که استفاده از لایه لاستیکی بر شکل‌دهی تأثیرگذار است و فرورفتگی‌های قطعه را کاهش می‌دهد. لی و همکاران تأثیر عواملی نظیر تغییر شکل پلاستیک، خواص مکانیکی و ضخامت ورق را در شکل‌دهی چندقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند [11]. پاپازیان یک قالب انعطاف‌پذیر برای شکل‌دهی چندقطه‌ای ورق ارائه کرد که تمامی پین‌های آن به صورت کامپیوتری و با استفاده از سرو موتور حرکت می‌کرد [12]. یانگ به بررسی برگشت فنری در ورق‌های تولیدشده به روش چندقطه‌ای پرداخت و میزان پیمایش پرس برای تولید قطعه مطلوب را با استفاده از شبیه‌سازی بدست آورد [13].

تمامی پژوهش‌های قبلی انجام شده در زمینه شکل‌دهی چندقطه‌ای، بر روی ورق‌های فلزی انجام شده است و تاکنون تحقیقی در زمینه هیدروفورمینگ لوله با استفاده از قالب انعطاف‌پذیر انجام نشده است. در مقاله حاضر یک قالب هیدروفورمینگ بر مبنای شکل‌دهی چندقطه‌ای معرفی شده است. این فرآیند به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته و دو مقطع برنجی مختلف تولید شده است. در یکی از آن‌ها مقطع لوله متورم شده است و در دیگری سطح مقطع دایروی لوله به مربع تبدیل شده است. همچنین عیوب به وجود آمده در این فرآیند بررسی شده و راهکارهای

<sup>2</sup> Nonlinear  
<sup>3</sup> Dynamic explicit  
<sup>4</sup> General contact

<sup>1</sup> Multi-point forming dies

به علت کم بودن تغییر شکل‌های قالب در مقایسه با سایر اجزا، قالب به صورت صلب گسسته<sup>1</sup> در نظر گرفته شده است و حرکت آن در تمامی جهات مقید شده است.

**2-2- طراحی پین‌ها**

در طراحی این قالب جدید، سطح صلب قالب‌های هیدروفرمینگ مرسوم با مجموعه‌ای از پین‌ها جایگزین شده است. این پین‌ها که عملاً مهم‌ترین قسمت قالب هستند، مستقل از هم بوده و ارتفاع آن‌ها به آسانی قابل تنظیم است. برای پیدا کردن ارتفاعی که هرکدام از پین‌ها برای تولید یک نمونه با سطح مقطع مشخص باید در آن ارتفاع قرار بگیرد، از مدل‌سازی نرم‌افزاری استفاده می‌شود. بدین‌صورت که سطح مقطعی که لوله قرار است تحت فشار داخلی به آن تبدیل شود ابتدا در نرم‌افزار مدل‌سازی سپس پین‌ها تا حدی جابه‌جا می‌شوند که به این مدل تهیه شده از نمونه نهایی برخورد کنند و در همان ارتفاع تثبیت می‌شوند.

**4-2- لایه پلی‌اورتان**

در حین فرآیند هیدروفرمینگ چندنقطه‌ای، پین‌ها نیروی متمرکزی را به لوله وارد می‌کنند، بنابراین در نواحی تماس بین لوله و پین‌ها تغییر شکل موضعی شدید رخ می‌دهد. برای جلوگیری از این پدیده و تولید نمونه با کیفیت بالا استفاده از یک لایه لاستیکی بین پین‌ها و لوله ضروری است. این لایه باعث پیوستگی بیشتر سطح قالب شده و یک توزیع فشار یکنواخت به لوله اعمال می‌کند. به علت مقاومت بالای پلی‌اورتان، برای این کار از یک لایه پلی‌اورتان با سختی 80 Shore A استفاده شده است. منحنی تنش-کرنش پلی‌اورتان بدست آمده از تست فشار در شکل 4 نشان داده شده است. در صورت عدم استفاده از لایه پلی‌اورتان احتمال گودافتادگی جای پین‌ها روی لوله وجود دارد. این لایه به صورت هایپرلاستیک و با تعداد 6432 المان C3D8R مدل شده است. دو انتهای لایه پلی‌اورتان در تمامی جهات به غیر از جهت محوری بسته شده‌اند. مدل مارلو<sup>2</sup> به منظور توصیف خصوصیات ماده الاستیک در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از لایه پلی‌اورتان با ضخامت بالا منجر به کاهش دقت ابعادی نمونه نهایی تولید شده می‌شود. همچنین کاهش ضخامت این لایه ممکن است منجر به پیدایش عیوبی نظیر گودافتادگی و تولید نمونه با کیفیت سطحی پایین شود. بنابراین یک ضخامت بهینه برای لایه پلی‌اورتان وجود دارد. این ضخامت بهینه مطابق با مرجع [16] 10mm در نظر گرفته شده است.

**5-2- میله‌های فولادی**

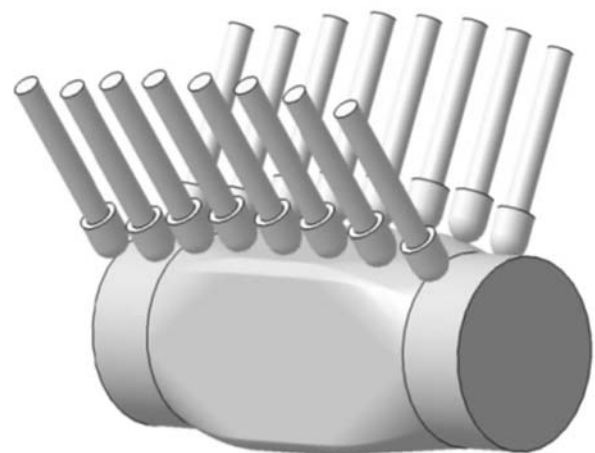
میله‌های فولادی به منظور دمپ کردن نیروی متمرکز پین‌ها استفاده شده‌اند. این میله‌ها بین پین‌ها و لایه پلی‌اورتان موقعیت‌دهی شده‌اند. هندسه و

مجموعه پین‌ها باید فشرده بوده و استحکام مناسبی داشته باشند تا بتوانند در برابر نیروهای شکل‌دهی مقاومت کنند. انتهای پین‌ها که در تماس با لوله است نباید هیچ گونه لبه تیزی داشته باشد، زیرا ممکن است به داخل لوله نفوذ کند. بهترین هندسه، پین‌های سر کروی است. قطر سر پین‌ها در مدل‌سازی 10mm در نظر گرفته شده است. مجموعه پین‌ها و قالب به صورت یکپارچه به آباکوس وارد شده‌اند به‌گونه‌ای که در آباکوس پین‌ها نسبت به قالب امکان حرکت ندارند.

تخمین سطح اشکال پیچیده نیازمند استفاده از پین‌های باریک‌تر و فشرده‌تر است. به‌عبارت‌دیگر با استفاده از پین‌های با قطر کمتر از 10mm امکان تعبیه تعداد بیشتری از پین‌ها در بدنه قالب وجود دارد و سطح نمونه نهایی با دقت ابعادی بهتری حاصل می‌شود اما از طرفی کاهش قطر پین‌ها افزایش هزینه ساخت را به دنبال دارد.

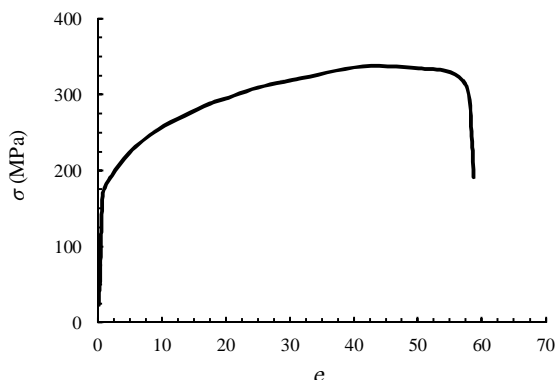
**3-2- لوله**

لوله به صورت یک استوانه توخالی با طول، قطر و ضخامت به ترتیب 300mm،



**Fig. 2** Pins height alignment for rectangular sample

شکل 2 تنظیم ارتفاع پین‌ها برای نمونه مربعی



**Fig. 3** Engineering Stress-strain curve of brass 70/30-O [15]

شکل 3 منحنی تنش کرنش مهندسی برنج 70/30 عملیات حرارتی شده [15]

<sup>2</sup> Marlow

<sup>1</sup> Discrete rigid

جدول 1 ویژگی‌های میله‌های فولادی

تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (Gpa)	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
150	206	30	1	1

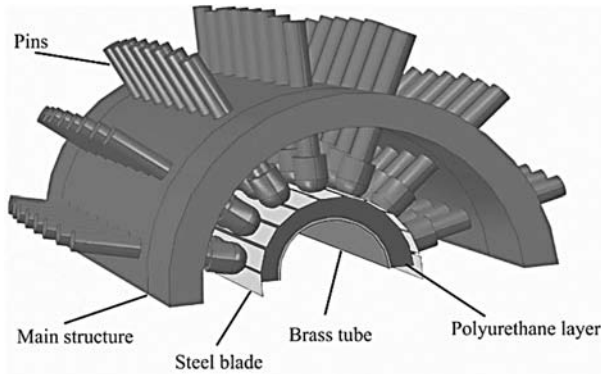


Fig. 5 Reconfigurable designed die

شکل 5 قالب انعطاف‌پذیر طراحی شده

تخلیه می‌کند.

برای آب‌بندی مجموعه از دو عدد تفلون که به صورت پرسی در داخل یک لایه پلی‌اورتان جا زده شده‌اند، استفاده شده است. تغذیه روغن به داخل لوله به‌واسطه سوراخی سرتاسری که در یکی از تفلون‌ها زده شده است، انجام می‌شود. یک انتهای این تفلون‌ها برای اتصال به شیلنگ رزوه زده شده و انتهای دیگر آن برای آب‌بندی بهتر به صورت پرسی در داخل یک حلقه پلی‌اورتان جا زده شده است. برای جاگیری بهتر لایه پلی‌اورتان در داخل لوله سر حلقه‌های پلی‌اورتان به صورت مخروطی تراش خورده و به صورت پرسی به داخل لوله جا زده شده‌اند. شکل 7 تفلون و پلی‌اورتان مورد استفاده برای آب‌بندی را نشان می‌دهد. برای محکم نگه‌داشتن آب‌بندها به دو انتهای لوله از یک فیکسچر استفاده شده است. این فیکسچر مانند گیره‌های کارگاهی ساخته شده است. عملکرد آن بدین‌صورت است که ابتدا آب‌بندها به صورت پرسی به داخل لوله برنجی جا زده می‌شوند، سپس مجموعه قالب و لوله و آب‌بندها بین فیکسچر قرار می‌گیرد. با سفت کردن پیچ فیکسچر، آب‌بندها به داخل لوله محکم می‌شوند. این فیکسچر در شکل 8 نشان داده شده است.

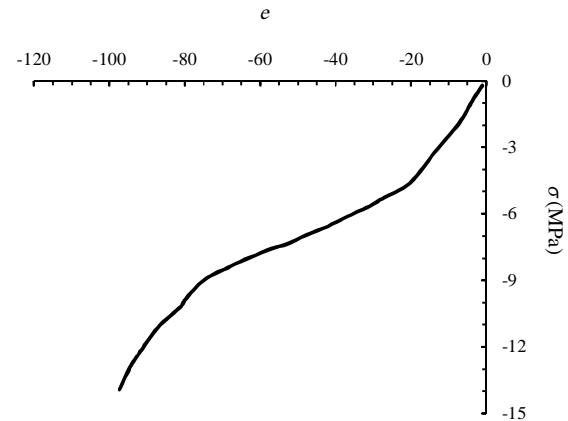


Fig. 4 Stress-strain curve of polyurethane

شکل 4 منحنی تنش-کرنش پلی‌اورتان

خواص مکانیکی این میله‌ها در جدول 1 نشان داده شده است. هرکدام از این میله‌ها با 25 المان پوسته‌ای 4 نقطه S4R مش بندی شده‌اند. هیچ گونه شرط مرزی به میله‌های فولادی اعمال نشده است.

مجموعه قالب و سایر اجزای مدل شده در شبیه‌سازی در شکل 5 نشان داده شده است.

### 3- ساخت قالب و آزمایش‌های تجربی

قالب و فیکسچر ساخته‌شده در شکل 6 نشان داده شده است. بدنه اصلی قالب یک لوله فولادی از جنس ST37 و با ابعاد مشخص‌شده در طراحی است. از پیچ M10 با گرید 10.9 و تنش تسلیم 900MPa به همراه مهره سرگرد، به‌عنوان پین استفاده شده است. هرکدام از این پیچ‌ها با استفاده از دو عدد مهره واشردار به بدنه قالب محکم شده‌اند. ارتفاعی که هرکدام از این پین‌ها در آن باید محکم شوند از نرم‌افزار استخراج شده است. برای انجام آزمایش از یک پمپ با ظرفیت 500 bar استفاده شده است. مراحل کار به این صورت است که با روشن شدن پمپ، روغن به‌واسطه سوراخ‌های تعبیه‌شده در آب‌بندها، به داخل لوله تزریق می‌شود. تزریق روغن به داخل لوله مطابق با تابع نشان داده شده در شکل 1، تا فشار 170bar برای لوله متورم شده و فشار 200bar برای لوله با مقطع مربعی ادامه می‌یابد. شیر اطمینان پمپ به‌گونه‌ای تنظیم شده است که با رسیدن فشار به مقدار نهایی عمل کرده و روغن را به داخل مخزن

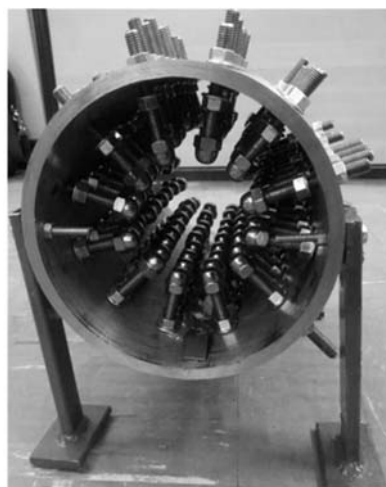
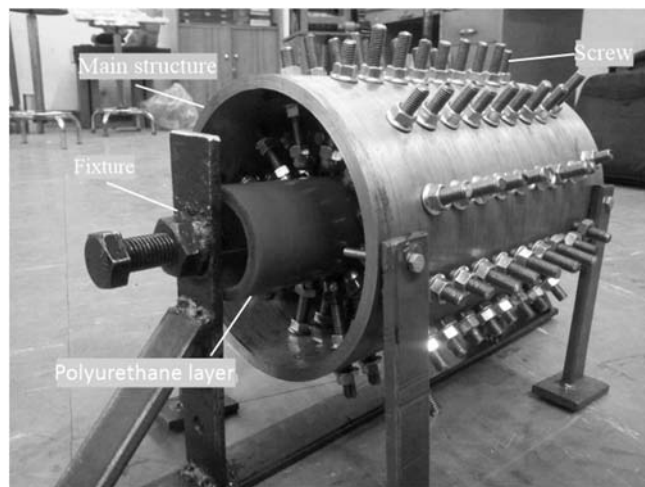


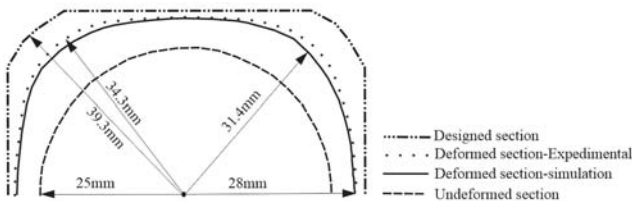
Fig. 6 Manufactured reconfigurable die



شکل 6 قالب انعطاف‌پذیر ساخته‌شده



**Fig. 9** produced bulged and rectangular sample by reconfigurable die  
 شکل 9 لوله متورم شده و لوله با سطح مقطع مربعی تولید شده به وسیله قالب انعطاف پذیر



**Fig. 10** Comparison of target profile with simulation and experimental profile for rectangular sample

شکل 10 مقایسه پروفیل نهایی با پروفیل های حاصل از شبیه سازی و آزمایش برای نمونه مربعی



**Fig. 11** Comparison of target profile with simulation and experimental profile for bulged sample

شکل 11 مقایسه پروفیل نهایی با پروفیل های حاصل از شبیه سازی و آزمایش برای نمونه متورم شده

گوشه ها با دقت بیشتری حاصل می شود که البته این خود افزایش هزینه ساخت قالب را در پی دارد.

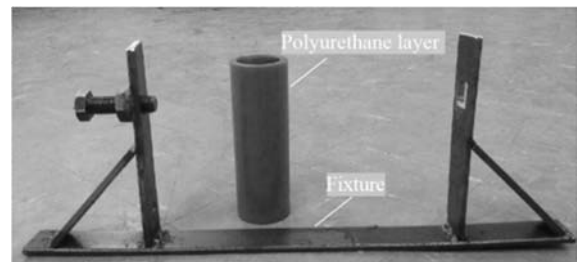
#### 2-4- تغییرات ضخامت

از مهم ترین پارامترهای مورد بررسی در قطعات شکل یافته به روش هیدروفرمینگ توزیع ضخامت نمونه نهایی است. توزیع ضخامت در نمونه متورم شده در شکل 12 نشان داده شده است. هم چنین تغییرات ضخامت در تحلیل عددی و تجربی در راستای مسیر  $a_1$  که همان جهت طولی نمونه است، در شکل 13 مقایسه شده است. به علت تقارن، تغییر ضخامت تا نیمه لوله محاسبه شده است. نتایج حل عددی در تطابق مناسبی با نتایج حاصل از آزمایش است. طبق این نمودار مشخص است که با نزدیک شدن به مرکز لوله کاهش ضخامت بیشتر می شود. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در وسط نمونه اتفاق می افتد و حدود  $0.02\text{mm}$  است. برای این نمونه ضخامت



**Fig. 7** Used Teflon and polyurethane for sealing

شکل 7 تفلون و پلی اورتان استفاده شده برای آب بندی



**Fig. 8** Manufactured fixture

شکل 8 فیکسچر ساخته شده

برای افزایش شکل پذیری، لوله های برنجی به مدت یک ساعت در دمای  $650^\circ\text{C}$  تحت عملیات حرارتی بوده اند.

همان طور که ذکر شد مهم ترین ویژگی قالب های انعطاف پذیر تولید مقاطع مختلف تنها با تنظیم ارتفاع پین ها است. دو مقطع مختلف که به وسیله این قالب تولید شده اند در شکل 9 نشان داده شده است. در نمونه سمت چپ لوله متورم شده و در نمونه سمت راست مقطع لوله به مربع تغییر شکل پیدا کرده است.

#### 4- نتایج و بحث

##### 1-4- آنالیز ابعادی مقطع نهایی

سطح مقطع نهایی برای نمونه مربعی و نمونه متورم شده در مقطعی که بیشترین قطر را دارند، به ترتیب در شکل های 10 و 11 نشان داده شده است. در هر دو نمونه قطر شعاع اولیه لوله  $25\text{mm}$  است. برای نمونه با مقطع نهایی مربعی فاصله اضلاع تا محور لوله در هر دو حالت شبیه سازی و تجربی تقریباً  $28\text{mm}$  است. فاصله گوشه ها تا محور لوله در حالت تجربی  $34.3\text{mm}$  و در حالت شبیه سازی  $31.4\text{mm}$  بدست آمده است. برای نمونه متورم شده قطر نهایی در حالت شبیه سازی  $30.1\text{mm}$  و در حالت تجربی  $30.8\text{mm}$  بدست آمده است.

برای نمونه مربعی در گوشه ها اختلاف نسبتاً زیادی بین سطح مقطع هدف و سطح مقطع شبیه سازی شده وجود دارد که علت آن، عدم توانایی قالب شکل دهی انعطاف پذیر در تخمین دقیق شعاع گوشه ها است. برخلاف قالب های مرسوم هیدروفرمینگ که با استفاده از ماشین کاری ساخته می شوند و در آن ها می توان هر مقدار شعاع دلخواه را برای گوشه ها اتخاذ کرد، در قالب های انعطاف پذیر چون سطح مقطع نمونه نهایی با مجموعه ای از پین ها تقریب زده می شود، نمی توان برای شعاع گوشه ها هر مقدار دلخواه را در نظر گرفت و این یکی از معایب قالب های انعطاف پذیر در مقابل قالب های مرسوم است. البته با افزایش تعداد پین ها و فشرده شدن مجموعه آن ها، شعاع

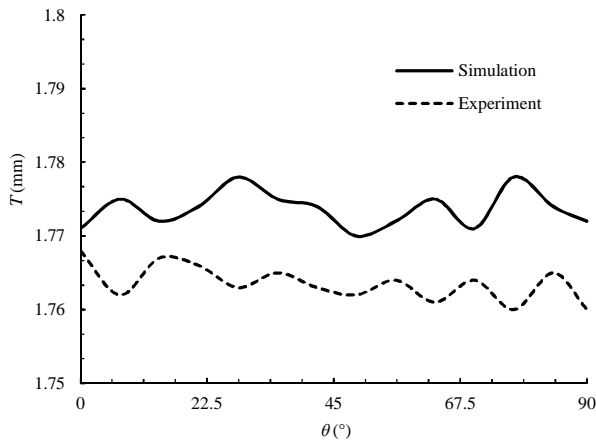


Fig. 14 Thickness of bulged sample along path (a2)

شکل 14 ضخامت نمونه متورم شده در راستای مسیر (a2)

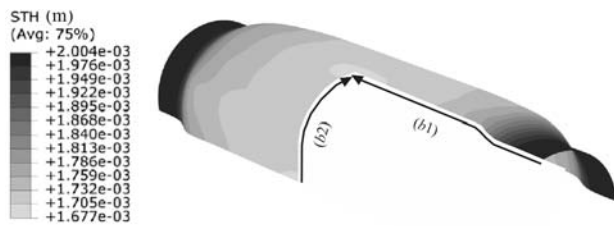


Fig. 15 Thickness distribution and final shape of the rectangular cross section sample

شکل 15 توزیع ضخامت و شکل نهایی نمونه با مقطع مربعی

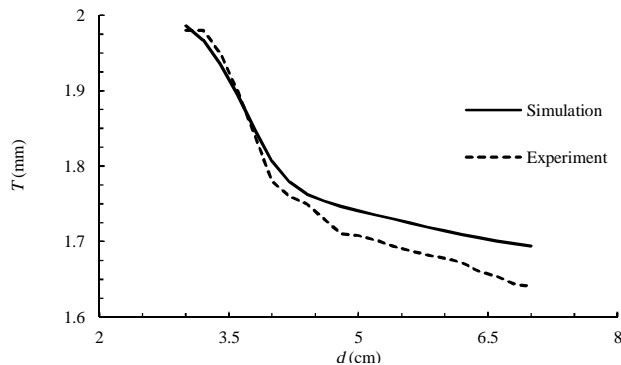


Fig. 16 Thickness of rectangular cross section sample along path (b1)

شکل 16 ضخامت نمونه با سطح مقطع مربعی در راستای مسیر (b1)

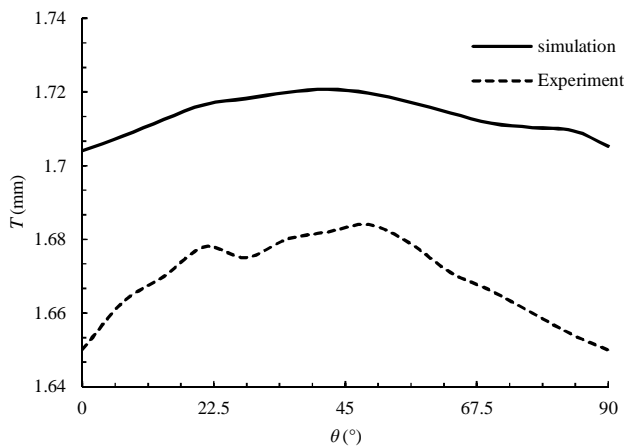


Fig. 17 Thickness of rectangular cross section sample along path (b2)

شکل 17 ضخامت نمونه با سطح مقطع مربعی در راستای مسیر (b2)

اولیه 2mm و بیشترین کاهش ضخامت بدست آمده از آزمایش در آن حدود 0.22mm و تقریباً معادل 11% ضخامت اولیه بوده و تحت فشار نهایی 170bar رخ داده است.

برای این نمونه توزیع ضخامت در جهت محیطی در راستای مسیر a2 که مقطع میانی نمونه است، بر حسب زاویه کمان، در شکل 14 نشان داده شده است. نقاط فرو رفته که ضخامت کمتری دارند، نشان دهنده نقاطی است که لوله در آن‌ها به واسطه لایه پلی‌اورتان با پین‌ها تماس دارد. بیشترین اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و تجربی حدود 0.1mm است.

توزیع ضخامت در تحلیل عددی برای نمونه با سطح مقطع مربعی، در شکل 15 نشان داده شده است. ضخامت اولیه لوله 2mm بوده و بیشترین مقدار کاهش ضخامت در آن 0.36mm است که تحت فشار داخلی 200bar رخ می‌دهد. این مقدار کاهش ضخامت معادل 18 درصد ضخامت ورق اولیه است. ضخامت نمونه در راستای مسیر طولی b1 در تحلیل عددی و آزمایش مطابق با شکل 16 است. مطابق با این شکل با دور شدن از سر لوله ضخامت کاهش می‌آید. در این حالت بیشترین اختلاف ضخامت بین نتایج عددی و تجربی حدود 2.5 درصد ضخامت اولیه لوله است. مشخص است که استفاده از لایه پلی‌اورتان به علت کاهش نیروهای متمرکز پین‌ها، منجر به کاهش ضخامت به صورت یکنواخت از ابتدا تا وسط لوله شده است.

برای این نمونه توزیع ضخامت در راستای مسیر محیطی b2 که در وسط نمونه قرار دارد، بر حسب زاویه کمان، در شکل 17 نشان داده شده است. مطابق با این نمودار در گوشه‌های قالب که میزان پرشدگی قالب کمتر است، ضخامت بیشتر بوده و در میانه‌های وجوه مربع بیشترین تغییرات ضخامت وجود دارد. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در این حالت حدود 0.06mm است.

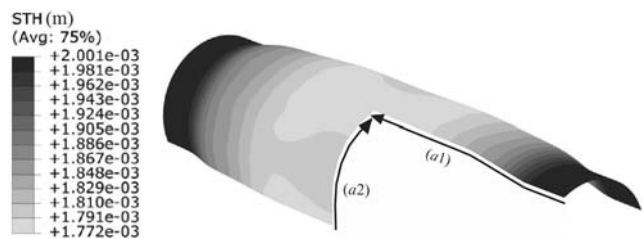


Fig. 12 Thickness distribution and final shape of bulged sample

شکل 12 توزیع ضخامت و شکل نهایی نمونه متورم شده

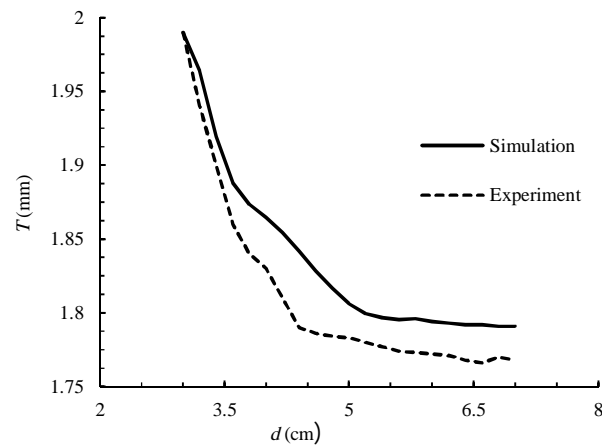


Fig. 13 Thickness of bulged sample along path (a1)

شکل 13 ضخامت نمونه متورم شده در راستای مسیر (a1)

3-4- بررسی تنش و کرنش

برای نمونه با مقطع مربعی و نمونه متورم شده پراکندگی مقدار کرنش معادل در سطح نمونه نهایی در شکل 18a و 18b نشان داده شده است. مطابق با این شکل با دور شدن از انتهای لوله به علت افزایش تغییرات ضخامت، مقدار کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل برای نمونه مربعی 0.28 است که در وسط سطوح مربعی رخ داده است. برای نمونه متورم شده بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل حدود 0.2 است و در بیشترین فاصله از انتهای لوله رخ می‌دهد. به علت بیشتر بودن تغییرات سطح مقطع در نمونه مربعی، کرنش پلاستیک حاصله در این نمونه بیشتر از نمونه متورم شده است. کرنش ضخامتی که از رابطه 1 بدست می‌آید، در حالت تجربی و عددی برای نمونه مربعی و متورم شده در راستای مسیرهای (a) و (b) به ترتیب در شکل‌های 18f و 18e نشان داده شده است. مقادیر منفی کرنش در راستای ضخامت نشان‌دهنده کاهش ضخامت در نمونه نهایی است. به علت بیشتر بودن تغییر ضخامت در نواحی میانی، در هر دو نمونه با دور شدن از ابتدای لوله مقدار کرنش در راستای ضخامت افزایش می‌یابد.

همچنین شیب کرنش در نواحی ابتدایی نمونه‌ها زیاد است و با نزدیک شدن به مرکز لوله‌ها کاهش می‌یابد که این مورد به علت کاهش نرخ تغییرات ضخامت نسبت به مکان در نواحی میانی است. توزیع تنش میزز به وجود آمده در نمونه مربعی و متورم شده نیز به ترتیب در شکل‌های 18c و 18d نشان داده شده است.

برای نمونه مربعی کاهش ضخامت در نواحی میانی سطوح جانبی بیشتر بوده و نشان‌دهنده این است که این نواحی بیشتر فشرده می‌شوند. بنابراین تنش میزز نیز در این نواحی بیشتر است. بیشترین تنش میزز برای نمونه مربعی برابر 263MPa است و در وسط سطوح جانبی رخ می‌دهد. با توجه به تغییر شکل کمتر نمونه متورم شده نسبت به نمونه مربعی، تنش میزز آن نیز نسبت به نمونه مربعی کمتر است. بیشترین مقدار تنش میزز برای نمونه متورم شده حدود 150MPa است و در وسط نمونه اتفاق می‌افتد.

$$\epsilon = \ln \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

4-4- عیب گودافتادگی

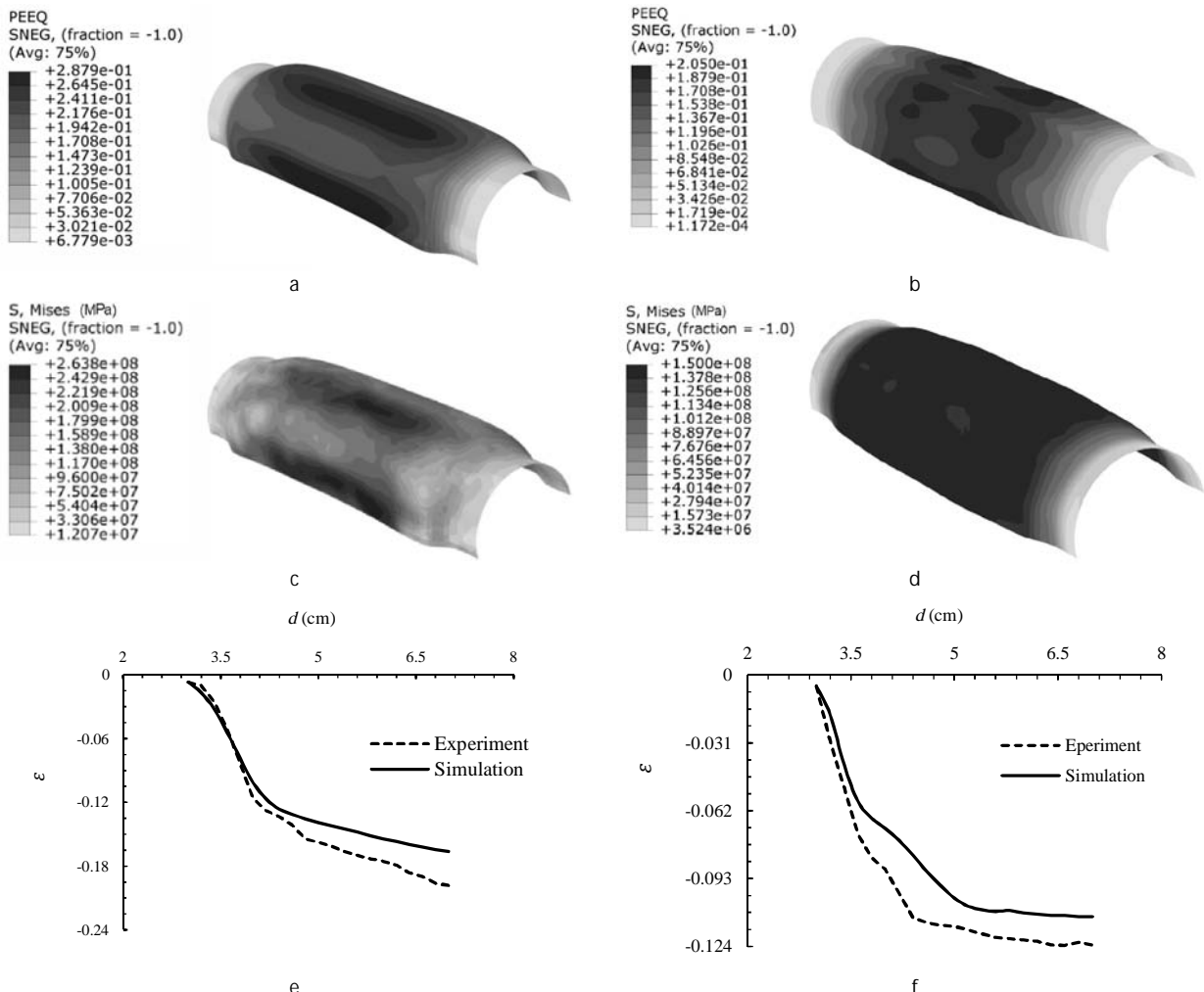


Fig. 18 (a) Equivalent plastic strain for rectangular sample, (b) Equivalent plastic strain for bulged sample, (c) Mises stress distribution for rectangular sample, (d) Mises stress distribution for bulged sample, (e) Thickness strain for rectangular sample along path b, (f) Thickness strain for bulged sample along path a

شکل 18 (a) کرنش پلاستیک معادل برای نمونه مربعی، (b) کرنش پلاستیک معادل برای نمونه متورم شده، (c) توزیع تنش میزز برای نمونه مربعی، (d) توزیع تنش میزز برای نمونه متورم شده، (e) کرنش ضخامتی برای نمونه مربعی در راستای مسیر a، (f) کرنش ضخامتی برای نمونه متورم شده در راستای مسیر b.

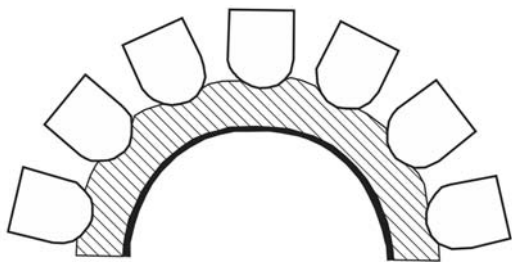


Fig. 21 Die filling of bulged sample

شکل 21 میزان پرشدگی قالب برای نمونه متورم شده

متعدد برای شکل‌دهی قطعات مختلف از مهم‌ترین ویژگی‌های این قالب انعطاف‌پذیر است. در این متد سطح صلب قالب‌های هیدروفرمینگ مرسوم با مجموعه‌ای از پین‌ها جایگزین شده است، به طوری که با تنظیم ارتفاع مجموعه این پین‌ها مقاطع لوله‌ای شکل مختلفی را می‌توان تولید کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش به شرح زیر است:

1- در این پژوهش یک مقطع لوله‌ای شکل مربعی و یک مقطع متورم شده از جنس آلایژ برنج 70/30 با ضخامت اولیه 2mm تولید شد. کمترین ضخامت نمونه مربعی و نمونه متورم شده بدست آمده از آزمایش به ترتیب 1.64mm و 1.76mm است و در وسط نمونه‌ها رخ می‌دهد. اختلاف ضخامت محاسبه شده در شبیه‌سازی و آزمایش برای این دو نمونه به ترتیب حدود 2.5 و 1.5 درصد است.

2- مقدار کرنش در راستای ضخامت برای نمونه مربعی و متورم شده به ترتیب 0.17 و 0.11- است و در جاهایی که بیشترین کاهش ضخامت را داریم رخ داده است. علامت منفی نشان‌دهنده کاهش ضخامت در دیواره‌ها است. مقدار بیشترین کرنش معادل نیز در این نقاط بوده و به ترتیب 0.28 و 0.2 است.

3- بیشترین مقدار تنش میزز برای نمونه مربعی و متورم شده به ترتیب 263Mpa و 150Mpa است و در جاهایی که بیشترین کاهش ضخامت را داریم رخ داده است.

4- گودافتادگی از مرسوم‌ترین عیوب ایجادشده در این فرآیند است که به علت اعمال نیروهای متمرکز از جانب پین‌ها رخ می‌دهد. با استفاده از یک لایه پلی‌اورتان می‌توان این عیب را به حداقل ممکن رساند. یکی دیگر از ضعف‌های این روش عدم امکان تخمین دقیق نمونه مطلوب نهایی خصوصاً در شعاع گوشه‌ها است. به علت استفاده از پین، امکان رسیدن به شعاع‌های کم در گوشه‌ها میسر نیست و برای داشتن شعاع‌های کم باید از پین‌های با قطر کمتر استفاده کرد که این خود افزایش هزینه ساخت را در پی دارد. همچنین در نقاط تماس لایه پلی‌اورتان با پین‌ها، همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، تغییرات ضخامت بیشتر بوده که این خود یک توزیع ضخامت ناهمگن ایجاد می‌کند و از دیگر معایب این روش است. تنظیم دستی ارتفاع پین‌ها نیز یکی از عوامل عدم دستیابی به نمونه دقیق نهایی است.

5- برای نمونه مربعی میزان پرشدگی قالب در نواحی میانی وجه‌ها بیشترین مقدار بوده و در گوشه‌ها، پین‌ها تماسی با لایه پلی‌اورتان ندارند. این در حالی است که برای نمونه متورم شده، میزان پرشدگی قالب در تمامی نقاط تماس لایه پلی‌اورتان با پین‌ها یکسان است.

#### 6- فهرست علائم

- $d$  فاصله از ابتدای لوله
- $e$  درصد کرنش مهندسی

از جمله معایب مختص روش شکل‌دهی چند نقطه‌ای، عیب گودافتادگی است. این عیب ناشی از تغییر شکل‌های موضعی شدید ورق است که به علت اعمال مستقیم نیروی متمرکز پین‌ها به سطح ورق اتفاق می‌افتد. شکل 19 عیب تورفتگی را در شبیه‌سازی نمونه متورم شده، بدون استفاده از لایه پلی‌اورتان و تحت فشار 170bar نشان می‌دهد. ضخامت در نقاط تماس لوله با پین‌ها بیشتر کاهش یافته و تنش در این نقاط به مقدار بحرانی می‌رسد. میزان کرنش معادل نیز در این حالت افزایش یافته و به مقدار 0.43 می‌رسد که تقریباً دو برابر حالت بدون عیب است. همان‌طور که ذکر شد برای جلوگیری از بروز این عیب از یک لایه پلی‌اورتان با سختی 80 shore A استفاده شده است. این لایه باعث می‌شود نیروی پین‌ها به صورت یکنواخت به سطح لوله اعمال شود و از ایجاد تغییر شکل‌های موضعی شدید جلوگیری شود.

#### 4-5- بررسی میزان پرشدگی قالب

میزان پرشدگی قالب، بدست آمده از شبیه‌سازی، برای نمونه‌های مربعی و متورم شده، در شکل‌های 20 و 21 نشان داده شده است. این اشکال، نشان‌گر سطح مقطع برش خورده در قسمت میانی قالب هستند. قسمت تیره‌رنگ نشان‌گر سطح مقطع لوله و قسمت هاشور خورده نشان‌گر لایه پلی‌اورتان است که به وسیله پین‌های قالب احاطه شده است.

برای نمونه مربعی، بیشترین تغییر شکل لایه پلی‌اورتان در وسط وجه‌های مربعی است و در همین نقاط فاصله بین لوله و پین‌ها به کمترین مقدار ممکن می‌رسد. گوشه‌های نمونه نیز با پین‌ها هیچ گونه تماسی ندارند. برای نمونه متورم شده، با توجه به تغییر شکل متقارن و یکنواخت لوله، لایه پلی‌اورتان در تمامی نواحی تماس با پین‌ها به طور یکنواخت فشرده شده و فاصله لوله با پین‌ها در نقاط مختلف تقریباً یکسان است.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار در دنیا یک قالب انعطاف‌پذیر برای هیدروفرمینگ قطعات لوله‌ای شکل طراحی و ساخته شده و این فرآیند به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. کاهش زمان و هزینه برای ساخت قالب‌های

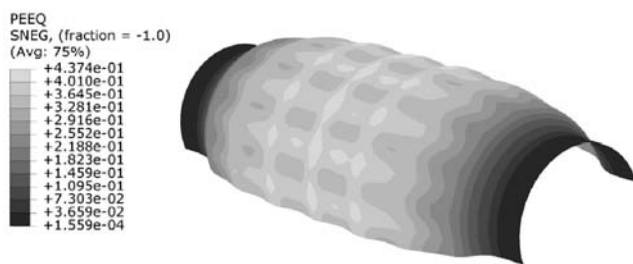


Fig. 19 Dimpling defect

شکل 19 عیب گودافتادگی

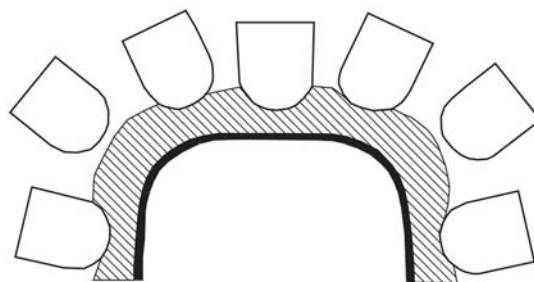


Fig. 20 Die filling of rectangular sample

شکل 20 میزان پرشدگی قالب برای نمونه مربعی



*Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, 2012.

[7] D. E. Hardt, R. D. Webb, N. Suh, Sheet metal die forming using closed-loop shape control, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 165-169, 1982 .

[8] D. F. Walczyk, J. Lakshmikanthan, D. R. Kirk, Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 287, 1998 .

[9] Q. Zhang, T. Dean, Z. Wang, Numerical simulation of deformation in multi-point sandwich forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 7, pp. 699-707, 2006 .

[10] Q. Zhang, Z. Wang, T. Dean, Multi-point sandwich forming of a spherical sector with tool-shape compensation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1, pp. 74-80, 2007 .

[11] L. Li, Y.-H. Seo, S.-C. Heo, B.-S. Kang, J. Kim, Numerical simulations on reducing the unloading springback with multi-step multi-point forming technology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 1-4, pp. 45-61, 2010 .

[12] J. M. Papazian, E. L. Anagnostou, R. Christ, D. Hoitsma Jr, P. Ogilvie, R. C. Schwarz, Tooling for rapid sheet metal parts production, *6th Joint FAA/DoD/NASA conference on Aging Aircraft*, San Francisco, CA, USA, September, 2002.

[13] S. Y. Hwang, J. H. Lee, Y. S. Yang, M. J. Yoo, Springback adjustment for multi-point forming of thick plates in shipbuilding, *Computer-Aided Design*, Vol. 42, No. 11, pp. 1001-1012, 2010.

[14] S. Wang, Z. Cai, M. Li, Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 5-8, pp. 475-483, 2010 .

[15] N. Xu, R. Ueji, H. Fujii, Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 610, pp. 132-138, 2014.

[16] B. Zareh, A. Vafaei-Sefat, V. Rikhtegar-Nezami, Experimental and numerical investigation of sheet metal forming using multi-point forming process, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 75-87, 2013.

نسبت فشار سیال به فشار بیشینه سیال در طول فرایند	P
کرنش معادل	PEEQ
زمان	t
ضخامت	T
<b>علائم یونانی</b>	
کرنش در راستای ضخامت	ε
زاویه محیطی لوله در سطح مقطع	θ
تنش مهندسی	σ

**7- مراجع**

[1] F. Dohmann, C. Hartl, Tube hydroforming research and practical application, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, No. 1, pp. 174-186, 1997.

[2] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, T. Altan, Evaluation of tube formability and material characteristics: Hydraulic bulge testing of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, pp. 34-40, 2000 .

[3] S. Rama, K. Ma, L. Smith, J. Zhang, A two-dimensional approach for simulation of hydroforming expansion of tubular cross-sections without axial feed, *Journal of materials processing technology*, Vol. 141, No. 3, pp. 420-430, 2003 .

[4] M. Elyasi, M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji, A new hydro forming die design for improvement of die corner filling of stepped tubes *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 87-98, 2009.

[5] S. E. Eftekhari-Shari, K. Khalili, S. Y. Ahmadi-brooghani, Optimization of loading curve in tube hydroformig proces using multilevel response surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 13, pp. 176-187, 2014.

[6] H. M.-N. S. M. H. Seyedkashi, G. H. Liaghat, M. Mousavi-Mashhadi, Y. H. Moon, Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hdroforming of aluminum tubes, *Modares Mechanical*