ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

 $^{*}$ جواد شهبازی کرمی $^{1}$ ، سید مهدی علویزاده $^{2}$ ، محمد مراد شیخی  $^{*}$ 

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 پستى 163-1678، m.sheikhi@srttu.edu

چکیدہ	اطلاعات مقاله
هیدروفرمینگ چندنقطهای لوله یک فناوری شکلدهی جدید انعطافپذیر برای تولید انواع مقاطع لولهای است. در این فرآیند لوله میتواند بهواسطه فشار سیال با 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 بهصورت	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 12 شهریور 1395 پذیرش: 12 آبان 1395 ارائه در سایت: 28 آذر 1395
عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرایند یک قالب جدید بر مبنای شکل دهی چندنقطهای طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این قالب و با توجه به قابلیت بالای شکل پذیری 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 شکل دهی 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 شده سازی شده ه اعتبار سنجی نتایج حاصله با آذمانش بردسی شده و عبوب به وجود آمده نین بش بینی شده است. برای کاهش این عموب	<i>کلید واژگان:</i> هیدروفرمینگ لوله شکل دهی چندنقطهای قالب انعطاف پذیر
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

Please cite this article using:

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 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

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

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

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)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Tube hydroforming

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

زمانبر و پرهزینه است بنابراین ارائه یک قالب انعطاف پذیر که با آن بتوان انواع مقاطع توخالی را تولید کرد بسیار مقرون به صرفه است. یک راهکار استفاده از قالبهای شکل دهی چندنقطه ای<sup>1</sup> است. ایده اصلی این روش، جایگزینی سطح صلب با مجموعه ای از پینها با ارتفاع قابل تنظیم است. با حرکت این پینها در راستای محورشان، سطوح مختلفی برای قالب به وجود می آید.

مطالعات زیادی در گذشته در زمینه هیدروفرمینگ انجام شده است. سوکولفسکی و همکاران به صورت عددی و تجربی به بررسی شکل پذیری لوله پرداختند [2]. بررسی عددی دوبعدی هیدروفرمینگ بدون تغذیه محوری بهوسیله راما و همکاران انجام شد [3]. الیاسی به ارائه مجموعهای از قالبهای جدید هیدروفرمینگ برای بهبود پرشدگی گوشههای قالب برای تولید قطعات لولهای پلهای شکل پرداخت [4]. بهینهسازی منحنی فشار جابهجایی در فرآیند هیدروفرمینگ 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 هیدروفرمینگ گرم لولههای آلومینیومی توسط سیدکاشی و همکاران انجام شد [6].

در سالهای اخیر نوآوریهای زیادی برای افزایش انعطاف پذیری فرآیندهای شکلدهی انجام شده است که توسعه شکلدهی چندنقطهای یکی از این نوآوریها است. اصول فرآیند شکل دهی چندنقطهای، بر مبنای تقسیم سطوح صلب قالبهای متداول به مجموعهای از المانهای گسسته کنار هـم اسـت. ارتفاع این المانهای گسسـته از هـم یا پینها بـه آسـانی قابل تنظيم است، بهطورى كه با كنترل ارتفاع پينها مىتوان قطعات مختلف لولهای شکل را تولید کرد. اولین بار مفهوم قالب انعطاف پذیر به وسیله هارت ارائه شد [7]. او یک قالب گسسته برای شکلدهی ورق طراحی کرد. والزیک 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 چندنقطهای 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 می شود. آن ها نشان دادند که استفاده از لایه لاستیکی بر شکل دهی تأثیر گذار است و فرورفتگیهای قطعه را کاهش میدهد. لی و همکاران تأثیر عواملی نظیر تغییر شکل پلاستیک، خواص مکانیکی و ضخامت ورق را در شکل دهی چندنقطه ای مورد مطالعه قرار دادند [11]. پاپازیان یک قالب انعطاف پذیر برای شکل دهی چندنقطهای ورق ارائه کرد که تمامی پینهای آن به صورت کامپیوتری و با استفاده از سرو موتور حرکت می کرد [12]. یانگ به بررسی برگشت فنری در ورقهای تولیدشده به روش چندنقطهای پرداخت و میزان پیمایش پرس برای تولید قطعه مطلوب را با استفاده از شبیه سازی بدست آورد [13].

تمامی پژوهش های قبلی انجام شده در زمینه شکل دهی چندنقطهای، بر روی ورق های فلزی انجام شده است و تاکنون تحقیقی در زمینه هیدروفرمینگ لوله با استفاده از قالب انعطاف پذیر انجام نشده است. در مقاله حاضر یک قالب هیدروفرمینگ بر مبنای شکل دهی چندنقطهای 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

مـؤثر در شکلدهی قطعات سالم بحث شـده اسـت.

#### 2- طراحي قالب و شبيهسازي المان محدود

در شبیهسازی هیدروفرمینگ چندنقطهای از نرمافزار آباکوس 6.13.4 استفاده شده است. به علت تغییر شکلهای شدید، مواد غیرهمگن و اصطکاک، فرآیند هیدروفرمینگ 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 این که در آزمایش، پانچهای محوری تنها نقش آببندی دارند و نیروی محوری به دو انتهای لوله اعمال نمیشود، در شبیه سازی نیز تنها نیروی شکل دهی، 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 شکل دهی در شبیه سازی 1 ثانیه در نظر گرفته شده و رسیدن فشار تا مقدار 0.7 فشار ماکزیمم در مدت 0.2 ثانیه رخ می دهد و بیشتر زمان شکل دهی صرف افزایش فشار از مقدار 0.7 فشار بیشینه تا فشار بیشینه شده است. بدین ترتیب اثرات دینامیکی ناشی از افزایش فشار در محدوده شکل دهی 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 قرارگرفتهاند.

#### 1-2- 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 **۶ × 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.



**شکل 1** تابع فشار اعمالی به لوله

<sup>2</sup> Nonlinear

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.56.1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Multi-point forming dies

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Dynamic explicit <sup>4</sup> General contact

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 پینھا

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 می شود. بدین صورت که سطح مقطعی که لوله قرار است تحت فشار داخلی به آن تبدیل شود ابتدا در نرمافزار مدلسازی سپس پینها تا حدی جابه می می موند که به این مدل تهیه شده از نمونه نهایی برخورد کنند و در همان ارتفاع تثبیت می شوند.

این ارتفاع ثبت شده و در حالت تجربی برای موقعیت دهی پینها استفاده میشود. به عنوان مثال شکل 2 چگونگی تنظیم ارتفاع پینها را برای تولید نمونه مربعی نشان میدهد.

مجموعه پینها باید فشرده بوده و استحکام مناسبی داشته باشند تا بتوانند در برابر نیروهای شکل دهی 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 به گونهای 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.

#### 2-3- 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 پینھا برای نمونه مربعی

1 Discrete rigid

50mm و 1mm مدل شده است. با توجه به این که ضخامت لوله می تواند در مقایسه با سایر ابعاد نادیده گرفته شود، از تعداد 2560 المان پوستهای 4 مقایسه با سایر ابعاد نادیده گرفته شود، از تعداد 2560 المان پوستهای 4 مناصب برنج 50% مملیات حرارتی شده، در این پژوهش از این آلیاژ استفاده شده است. به علت شکل پذیری 6.34 مناصب برنج 70/30 عملیات حرارتی شده، در این پژوهش از این آلیاژ استفاده، شده است. مزیب والی 6.34 مناصب برنجی 50% مملیات حرارتی شده، در این پژوهش از این آلیاژ استفاده شده است. به علت شکل پذیری 70/30 عملیات حرارتی شده، در این پژوهش از این آلیاژ استفاده، منده است. فریب 2006 و شده است. در تحلیل عددی برای لوله برنجی از خواص ماده الاستوپلاستیک استفاده شده است. نمودار تنش کرنش مهندسی برنج 70/30 عملیات حرارتی شده، مطابق با شکل 3 است. تنها شرط برتی لوله به دو انتهای آن اعمال شده است که این دو انتها در تمامی جهات مرزی لوله به دو انتهای آن اعمال شده است که این دو انتها در تمامی جهات مرزی لوله به دو انتهای آن اعمال شده است که این دو انتها در تمامی جهات مرزی لوله به دو انتهای آن اعمال شده است که این دو انتها در تمامی در مان

#### 2-4- لايه پلىاورتان

در حین فرآیند هیدروفرمینگ چندنقطهای، پینها نیروی متمرکزی را به لوله وارد می کنند، 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 می کند. به علت مقاومت بالای پلی اورتان، برای این کار از یک لایه پلی اورتان با سختى A Shore A استفاده شده است. منحنى تنش-كرنش پلى اورتان بدست آمده از تست فشار در شکل 4 نشان داده شده است. در صورت عدم استفاده از لايه پلى اورتان احتمال گودافتادگى جاى پين ها روى لوله وجود دارد. این لایه به صورت هایپرالاستیک 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 توصيف خصوصيات ماده الاستيک در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از لایه پلی اورتان با ضخامت بالا منجر به كاهش دقت ابعادى نمونه نهايي توليد شده مي شود. همچنين 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 10mm [16] در نظر گرفته شده است.

#### 2-5- میلههای فولادی

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





<sup>2</sup> Marlow



Fig. 4 Stress-strain curve of polyurethane

شكل 4 منحنى تنش-كرنش پلىاورتان

خواص مکانیکی این میلهها در جدول 1 نشان داده شده است. هر کدام 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 شبیه سازی در شکل 5 نشان داده شده است.

#### 3- ساخت قالب و آزمایشهای تجربی

قالب و فیکسچر ساخته شده در شکل 6 نشان داده شده است. بدنه اصلی قالب یک لوله فولادی از جنس ST37 و با ابعاد مشخص شده 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 تزريق مىشود. تزريق 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 به گونهای تنظیم شده است که با رسیدن فشار به مقدار نهایی عمل کرده و روغن را به داخل مخزن

جدول 1 ویژگیهای میلههای فولادی

Table 1 Properties of steel bars					
ضخامت(mm)	عرض(mm)	طول(mm)	مدول يانگ(Gpa)	تنش تسليم(MPa)	
1	1	30	206	150	



شكل 5 قالب انعطاف پذير طراحى شده

#### تخليه مي كند.

برای آببندی مجموعه از دو عدد تفلون که به صورت پرسی در داخل یک لایه پلی اورتان جا زده شده اند، استفاده شده است. تغذیه روغن به داخل لوله بهواسطه سوراخی سرتاسری که در یکی از تفلونها زده شده است، انجام می شود. یک انتهای این تفلون ها 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 پلی اور تان 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. عملكرد آن بدينصورت است كه ابتدا آببندها به صورت پرسی به داخل لوله برنجی جا زده می شوند، سپس مجموعه قالب و لوله و آببندها بین فیکسچر قرار می گیرد. با سفت کردن پیچ فیکسچر، آببندها به داخل لوله محکم می شوند. این فیکسچر در شکل 8 نشان داده شده است.



Fig. 6 Manufactured reconfigurable die

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-18



Fig. 7 Used Teflon and polyurethane for sealing شکل 7 تفلون و پلی اور تان استفاده شده برای آببندی



Fig. 8 Manufactured fixture

شکل 8 فیکسچر ساخته شده

برای افزایش شکل پذیری، لوله های برنجی به مدت یک ساعت در دمای 650°C تحت عمليات حرارتي بودهاند.

همان طور که ذکر شد مهم ترین ویژگی قالبهای انعطاف پذیر تولید مقاطع مختلف تنها با تنظيم ارتفاع پين ها است. دو مقطع مختلف كه بهوسيله این قالب تولید شدهاند 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 کردہ است.

## 4- نتايج و بحث

## 1-4- آناليز ابعادي مقطع نهايي

سطح مقطع نهایی برای نمونه مربعی و نمونه متورم شده در مقطعی که بیشترین قطر را دارند، به ترتیب در شکلهای 10 و 11 نشان داده شده است. در هر دو نمونه قطر شعاع اوليه لوله 25mm است. برای نمونه با مقطع نهايی مربعی فاصله اضلاع تا محور لوله در هر دو حالت شبیهسازی و تجربی تقریباً 28mm است. فاصله گوشهها تا محور لوله در حالت تجربی 34.3mm و در حالت شبیهسازی 31.4mm بدست آمده است. برای نمونه متورم شده قطر نهایی در حالت شبیه سازی 30.1mm و در حالت تجربی 30.8mm بدست آمده است.

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



Fig. 9 produced bulged and rectangular sample by reconfigurable die شکل 9 لوله متورم شده و لوله با سطح مقطع مربعی تولیدشده بهوسیله قالب انعطاف يذير



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

شکل 10 مقایسه پروفیل نهایی با پروفیلهای حاصل از شبیهسازی و آزمایش برای نمونه مربعى



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

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

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

## 2-4- تغييرات ضخامت

از مهمترین 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. همچنین تغییرات ضخامت در تحلیل عددی و تجربی در راستای مسیر a1 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 كاهش ضخامت بیشتر می شود. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در وسط نمونه اتفاق میافتد و حدود 0.02mm است. برای این نمونه ضخامت

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 22 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 بهواسطه لایه پلیاورتان با پینها تماس دارد. بیشترین اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و تجربی حدود 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 200ba رخ میدهد. این مقدار کاهش ضخامت معادل 18 درصد ضخامت ورق اولیه است. ضخامت نمونه در راستای مسیر طولی 16 در تحلیل عددی و آزمایش مطابق با شکل 16 است. مطابق با این شکل با دور شدن از سر لوله ضخامت کاهش میابد. در این حالت بیشترین اختلاف ضخامت بین نتایج عددی و تجربی میابد. در این حالت بیشترین اختلاف ضخامت است که استفاده از لایه 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

برای این نمونه توزیع ضخامت در راستای مسیر محیطی 2d 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 متورم شده



**Fig. 13** Thickness of bulged sample along path (a1) (a1) شکل 13 ضخامت نمونه متورم شده در راستای مسیر



Fig. 14 Thickness of bulged sample along path (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

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



Fig. 16 Inickness of rectangular cross section sample along path (61) شکل 16 ضخامت نمونه با سطح مقطع مربعی در راستای مسیر (b1)





DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.56.1

410

#### 4-3- بررسی تنش و کرنش

برای نمونه با مقطع مربعی و نمونه متورم شده پراکندگی مقدار کرنش معادل در سطح نمونه نهایی در شکل 18*a* 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 میابد. 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 می دهد. 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 (d) و (a) به ترتیب در شکلهای ع81 و ا18 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 میابد.

همچنین شیب کرنش در نواحی ابتدایی نمونهها زیاد است و با نزدیک شدن به مرکز لولهها کاهش می یابد 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 18k 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 می افتد.

$$\varepsilon = \ln \frac{t}{t_0} \tag{1}$$

4-4- عيب گودافتادگي



**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 b، (f) کرنش ضخامتی برای نمونه متورم شده در راستای مسیر a

ازجمله معایب مختص روش شکل دهی چندنقطهای، عیب گودافتادگی است. این عیب ناشی از تغییر شکل های موضعی شدید ورق است که به علت اعمال مستقیم نیروی متمرکز پینها به سطح ورق اتفاق میافتد. شکل 19 عیب تورفتگی را در شبیه سازی نمونه متورم شده، بدون استفاده از لایه پلی اورتان و تحت فشار 170ba نشان می دهد. ضخامت در نقاط تماس لوله با پینها بیشتر کاهش یافته و تنش در این نقاط به مقدار بحرانی می رسد. میزان کرنش معادل نیز در این حالت افزایش یافته و به مقدار 0.43 می رسد که تقریباً دو برابر حالت بدون عیب است. همان طور که ذکر شد برای جلوگیری از بروز این عیب از یک لایه پلی اورتان با سختی 80 shore می استفاده شده است. این لایه باعث می شود نیروی پینها به صورت یکنواخت به سطح لوله اعمال شود و از ایجاد تغییر شکل های 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، نشان گر سطح مقطع برش خورده در قسمت میانی قالب هستند. قسمت تیرهرنگ نشان گر سطح مقطع لوله و قسمت هاشور خورده نشان گر لایه پلیاورتان است که بهوسیله 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- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار در دنیا یک قالب انعطاف پذیر 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 1**9 عیب گودافتادگی



Fig. 20 Die filling of rectangular sample شکل 20 میزان پرشدگی قالب برای نمونه مربعی



Fig. 21 Die filling of bulged sample

**شکل 21** میزان پرشدگی قالب برای نمونه متورم شده

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

1- در این پژوهش یک مقطع لولهای شکل مربعی و یک مقطع متورم شده از جنس آلیاژ 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 1.76mm است و در وسط نمونهها رخ میدهد. اختلاف ضخامت محاسبهشده 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، همان طور که در شکل 14 نشان داده شده است، تغییرات ضخامت بیشتر بوده که این خود یک توزیع ضخامت ناهمگن ایجاد می کند 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

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

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

#### 7- مراجع

- 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 process 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 hudroforming of aluminum tubes, *Modares Mechanical*