

بررسی تجربی و عددی شکل دهی قطعات لوله ای فلزی با یک قالب هیدروفرمینگ انعطاف پذیر جدید بر مبنای شکل دهی چند نقطه ای

جواد شهبازی کرمی^۱, سید مهدی علویزاده^۲, محمد مراد شیخی^{۳*}

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

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

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

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

چکیده

هیدروفرمینگ چند نقطه ای لوله یک فناوری شکل دهی جدید انعطاف پذیر برای تولید انواع مقاطع لوله ای است. در این فرآیند لوله می تواند به واسطه فشار سیال با استفاده از تنها یک قالب به اشکال دلخواهی تبدیل شود. در فرآیند هیدروفرمینگ مرسوم برای تولید هر مقاطع لوله ای شکل، نیاز به ساخت یک قالب است که خود افزایش زمان و هزینه را در پی دارد. در پژوهش حاضر فرآیند هیدروفرمینگ چند نقطه ای به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این فرآیند یک قالب جدید بر مبنای شکل دهی چند نقطه ای طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این قالب و با توجه به قابلیت بالای شکل پذیری برجن 70/30، یک مقطع لوله ای متورم شده و یک لوله با مقطع مربع شکل با ضخامت اولیه 2mm از جنس برجن 70/30 تولید شده است. تفاوت عمدی قالب های شکل دهی چند نقطه ای با قالب های سنتی در جایگزینی سطح صلب با مجموعه ای از پین ها با ارتفاع قابل تنظیم است. با تنظیم ارتفاع این پین ها، مقاطع لوله ای مختلفی را می توان تولید کرد. این فرآیند ابتدا شبیه سازی شده و اعتبار سنجی تابع خاله با آزمایش بررسی شده و عیوب به وجود آمده نیز پیش بینی شده است. برای کاهش این عیوب از یک لایه الاستیک از جنس پلی اورتان استفاده شده است. برای نمونه متورم شده و نمونه با مقطع مربعی حداقل مقدار کاهش ضخامت از شبیه سازی به ترتیب حدود 11% و 17% است که این مقادیر در تطابق با آزمایش است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۲ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۸ اذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ لوله

شکل دهی چند نقطه ای

قالب گستته

قالب انعطاف پذیر

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

Javad Shahbazi Karami¹, Seyed Mehdi Alavizadeh², Mohammad Morad Sheikhi^{1*}

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

۲- 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.

حرکت محوری آب بندها در حین فرآیند هیدروفرمینگ منجر به افزایش

شکل پذیری لوله می شود اگرچه این فرآیند می تواند در غیاب حرکت محوری

نیز انجام شود. می توان به جای سیال از فلزات نرم و یا لاستیک هایی نظیر

پلی اورتان استفاده کرد [۱]. قالب های مرسوم هیدروفرمینگ معمولاً با

ماشین کاری ساخته می شوند. طراحی و ساخت این گونه از قالب ها بسیار

هیدروفرمینگ لوله^۱ یکی از روش های شکل دهی برای تولید مقاطع توخالی

است. در هیدروفرمینگ لوله دو انتهای لوله آب بندی شده و لوله به واسطه

فشار داخلی ایجاد شده به وسیله سیال تزریق شده به داخل آن شکل می گیرد.

^۱ 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:

مؤثر در شکل دهنده قطعات سالم بحث شده است.

2- طراحی قالب و شبیه سازی المان محدود

6.13.4 در شبیه سازی هیدروفرمینگ چند نقطه ای از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. به علت تغییر شکل های شدید، مواد غیرهمگن و اصطکاک، فرآیند هیدروفرمینگ یک فرآیند غیر خطی² است بنابراین برای مدل کردن این فرآیند و نشان دادن بهتر عیوب ایجاد شده از قبیل گودافتادگی، از تحلیل دینامیکی صریح³ استفاده شده است. برای مقایسه حل شبیه سازی با نتایج تجربی، شبیه سازی اندازه اجزا، خواص مواد و شرایط مرزی در تطبیق 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 عمومی⁴ مدل شده است.

با توجه به این که در آزمایش، پانچه های محوری تنها نقش آبیندی دارند و نیروی محوری به دو انتهای لوله اعمال نمی شود، در شبیه سازی نیز تنها نیروی شکل دهنده، 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 دهنده در شبیه سازی 1 ثانیه در نظر گرفته شده و رسیدن فشار تا مقدار 0.7 فشار ماکریم در مدت 0.2 ثانیه رخ می دهد و بیشتر زمان شکل دهنده 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 دهنده کاهش یافته است.

به علت تقارن تنها نیمی از مجموعه مدل شده است. در شبیه سازی، 4 قسمت مجازاً مدل شده اند. قالب، لوله برنجی، میله های فولادی و لایه پلی اورتان که هر کدام مورد بحث قرار گرفته اند.

2-1- قالب

به علت ارتباط نرم افزاری قوی بین آباکوس و کتیا، قالب در نرم افزار کتیا طراحی شده و برای تحلیل به نرم افزار 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 سوراخ ها محل قرار گیری پین ها هستند. این قالب در نرم افزار آباکوس با تعداد 8207 المان C3D10M تقریب زده شده است.

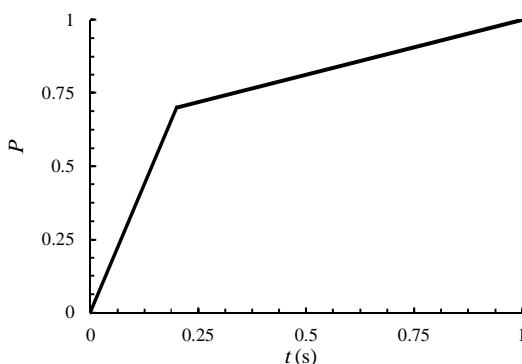


Fig. 1 Applied pressure function to the tube

شکل 1 تابع فشار اعمالی به لوله

زمان برو پرهزینه است بنابراین ارائه یک قالب انعطاف پذیر که با آن بتوان انواع مقاطع توخالی را تولید کرد بسیار مفروضه صرفه است. یک راهکار استفاده از قالب های شکل دهنده چند نقطه ای¹ است. ایده اصلی این روش، جایگزینی سطح صلب با مجموعه ای از پین ها با ارتفاع قابل تنظیم است. با حرکت این پین ها در راستای محور شان، 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 بذیری لوله پرداختند [2]. بررسی عددی دو بعدی هیدروفرمینگ بدون تغذیه محوری به وسیله راما و همکاران انجام شد [3]. ایالیس به ارائه مجموعه ای از قالب های جدید هیدروفرمینگ برای بهبود پرشدگی گوشش های قالب برای تولید قطعات لوله ای پله ای شکل پرداخت [4]. بهینه سازی منحنی فشار جابه جایی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از روش رویه پاسخ چند مرحله ای توسط افتخاری و همکاران بررسی شد [5]. مطالعه عددی و تجربی اثر نسبت انبساط شعاع گوشه و نرخ کرنش در هیدروفرمینگ گرم لوله های آلومینیومی توسط سید کاشی و همکاران انجام شد [6].

در سال های اخیر نوآوری های زیادی برای افزایش اعطا ف پذیری فرآیندهای شکل دهنده انجام شده است که توسعه شکل دهنده چند نقطه ای یکی از این نوآوری ها است. اصول فرآیند شکل دهنده چند نقطه ای، بر مبنای تقسیم سطوح صلب قالب های متداول به مجموعه ای از المان های گسسته کنار هم است. ارتفاع این المان های گسسته از هم یا پین ها به آسانی قابل تنظیم است، به طوری که با کنترل ارتفاع پین ها می توان قطعات مختلف لوله ای شکل را تولید کرد. اولین بار مفهوم قالب انعطاف پذیر به وسیله هارت ارائه شد [7] او یک قالب گسسته برای شکل دهنده ورق طراحی کرد. والریک و همکاران به منظور کاهش زمان و هزینه یک قالب گسسته با امکان موقعیت دهی هیدرولیکی پین ها با استفاده از کامپیوترا، برای شکل دهنده ورق ابداع کرددند [8]. زانگ به بررسی شکل دهنده چند نقطه ای ساندویچی ورق پرداخت [10,9]. در این روش تنها نیمی از قالب با مجموعه پین ها جایگزین شده و نیمه دیگر با یک لایه لاستیک ضخیم تعویض می شود. آن ها نشان دادند که استفاده از لایه لاستیکی بر شکل دهنده تأثیرگذار است و فرورفتگی های قطعه را کاهش می دهد. لی و همکاران تأثیر عواملی نظیر تغییر شکل پلاستیک، خواص مکانیکی و ضخامت ورق را در شکل دهنده چند نقطه ای مورد مطالعه قرار دادند [11]. پایانی یک قالب انعطاف پذیر برای شکل دهنده چند نقطه ای ورق ارائه کرد که تمامی پین های آن به صورت کامپیوترا و با استفاده از سرو موتور حرکت می کرد [12]. یانگ به بررسی برگشت فری در ورق های تولید شده به روش چند نقطه ای پرداخت و میزان پیمایش پرس برای تولید خصیع مطلوب را با استفاده از شبیه سازی بدست آورد [13].

تمامی پژوهش های قبلی انجام شده در زمینه شکل دهنده چند نقطه ای، 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 دهنده چند نقطه ای 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 آن ها 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 راهکار های

² Nonlinear

³ Dynamic explicit

⁴ General contact

¹ Multi-point forming dies

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 پوسته ای 4 نقطه ای S4R برای مش بندی آن استفاده شده است. به علت شکل پذیری مناسب برج 70/30 عملیات حرارتی شده، در این پژوهش از این آلیاژ استفاده شده است. ضریب پواسون، مدول یانگ و چگالی این آلیاژ به ترتیب 0.345، 76GPa و 5830kg/m³ در نظر گرفته شده است. در تحلیل عددی برای لوله برنجی از خواص ماده الاستوپلاستیک استفاده شده است. نمودار تشکیل مرنجی برای 70/30 عملیات حرارتی شده، مطابق با شکل 3 است. تنها شرط مهندسی برج 70/30 آن اعمال شده است که این دو انتهای در تمامی جهات بسته شده است و تنها در راستای محوری امکان حرکت دارند.

2-4- لایه پلی اورتان

در حین فرآیند هیدروفرمینگ چند نقطه ای، پین ها نیروی متراکم کری را به لوله وارد می کنند، بنابراین در نواحی تماس بین لوله و پین ها تغییر شکل موضعی شدید رخ می دهد. برای جلوگیری از این پذیری و تولید نمونه با کیفیت بالا استفاده از یک لایه لاستیکی بین پین ها 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 سختی A 80 Shore 80 استفاده شده است. منحنی تنش - کرنش پلی اورتان بدست آمده از تست فشار در شکل 4 نشان داده شده است. در صورت عدم استفاده از لایه پلی اورتان احتمال گودافتادگی جای پین ها روی لوله وجود دارد. این لایه به صورت هایپرالاستیک و با تعداد 6432 المان C3D8R مدل شده است. دو انتهای لایه پلی اورتان در تمامی جهات به غیر از جهت محوری بسته شده اند. مدل مارلو² به منظور توصیف خصوصیات ماده الاستیک در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از لایه پلی اورتان با ضخامت بالا منجر به کاهش دقت ابعادی نمونه نهایی تولید شده می شود. همچنین کاهش ضخامت این لایه ممکن است منجر به پیدايش عیوبی نظیر گودافتادگی و تولید نمونه با کیفیت سطحی پایین شود. بنابراین یک ضخامت بهینه برای لایه پلی اورتان وجود دارد. این ضخامت بهینه مطابق با مرجع [16] در نظر گرفته شده است.

2-5- میله های فولادی

میله های فولادی به منظور دمپ کردن نیروی متراکم پین ها استفاده شده اند. این میله ها بین پین ها و لایه پلی اورتان موقعیت دهی شده اند. هندسه و

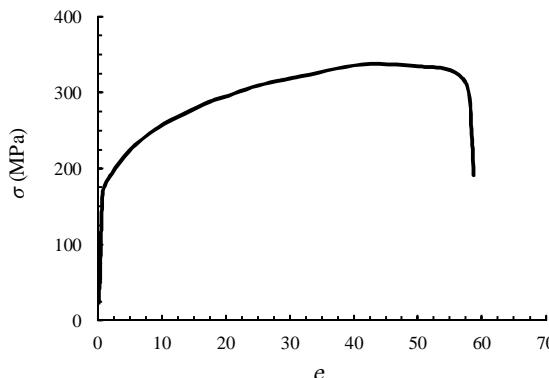


Fig. 3 Engineering Stress-strain curve of brass 70/30-O [15]

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

² Marlow

به علت کم بودن تغییر شکل های قالب در مقایسه با سایر اجزا، قالب به صورت صلب گسترش¹ در نظر گرفته شده است و حرکت آن در تمامی جهات مقید شده است.

2-2- طراحی پین ها

در طراحی این قالب جدید، سطح صلب قالب های هیدروفرمینگ مرسوم با مجموعه ای از پین ها جایگزین شده است. این پین ها که عملاً مهم ترین قسمت قالب هستند، مستقل از هم بوده و ارتفاع آن ها به آسانی قابل تنظیم است. برای پیدا کردن ارتفاعی که هر کدام از پین ها برای تولید یک نمونه با سطح مقطع مشخص باید در آن ارتفاع قرار بگیرد، از مدل سازی نرم افزاری استفاده می شود. بدین صورت که سطح مقطعی که لوله قرار است تحت فشار داخلی به آن تبدیل شود ابتدا در نرم افزار مدل سازی سپس پین ها تا حدی جایه جا می شوند که به این مدل تهیه شده از نمونه نهایی برخورد کنند و در همان ارتفاع ثابت می شوند.

این ارتفاع ثبت شده و در حالت تجربی برای موقعیت دهی پین ها استفاده می شود. به عنوان مثال شکل 2 چگونگی تنظیم ارتفاع پین ها برای تولید نمونه مربعی نشان می دهد.

مجموعه پین ها باید فشرده بوده و استحکام مناسبی داشته باشند تا بتوانند در برابر نیروهای شکل دهی مقاومت کنند. انتهای پین ها که در تماس با لوله است باید هیچ گونه لبه تیزی داشته باشد، زیرا ممکن است به داخل لوله نفوذ کند. بهترین هندسه، پین های سر کروی است. قطر سر پین ها در مدل سازی 10mm در نظر گرفته شده است. مجموعه پین ها و قالب به صورت یکپارچه به آباکوس وارد شده اند به گونه ای که در آباکوس پین ها نسبت به قالب امکان حرکت ندارند.

تخمین سطح اشکال پیچیده نیازمند استفاده از پین های باریک تر و فشرده تر است. به عبارت دیگر با استفاده از پین های با قطر کمتر از 10mm امکان تعییه تعداد بیشتری از پین ها در بدنه قالب وجود دارد و سطح نمونه نهایی با دقت ابعادی بهتری حاصل می شود اما از طرفی کاهش قطر پین ها افزایش هزینه ساخت را به دنبال دارد.

2-3- لوله

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

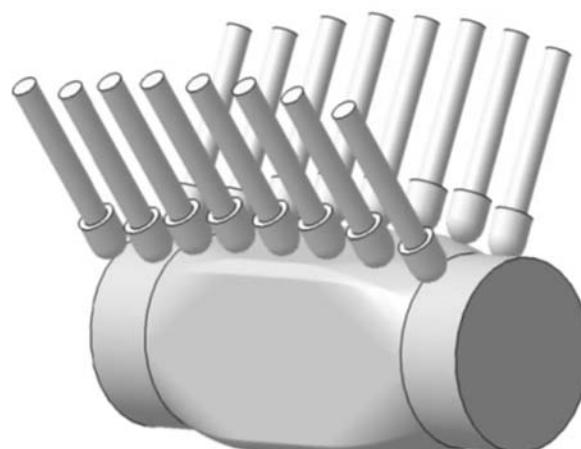


Fig. 2 Pins height alignment for rectangular sample

شکل 2 تنظیم ارتفاع پین ها برای نمونه مربعی

¹ Discrete rigid

جدول 1 ویژگی های میله های فولادی

Table 1 Properties of steel bars

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

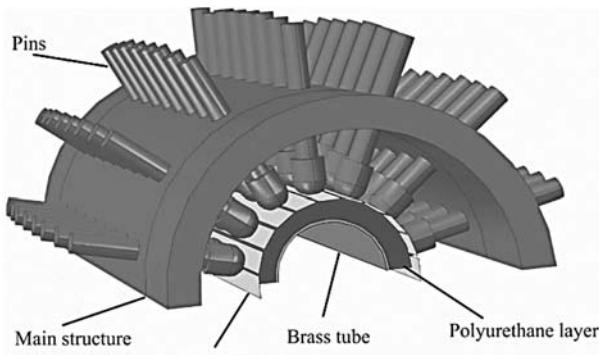
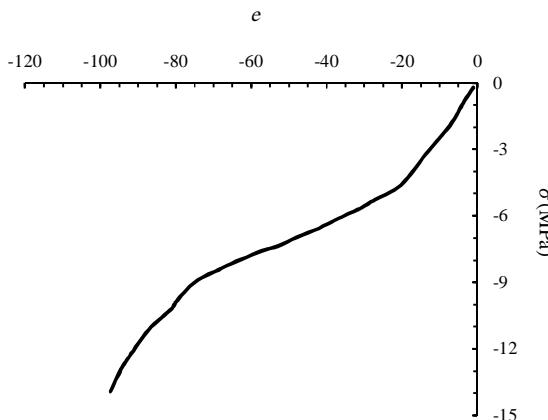


Fig. 5 Reconfigurable designed die

شکل 5 قالب انعطاف پذیر طراحی شده

تخليه می کند.

برای آب بندی 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 بواسطه سوراخی سرتاسری که در یکی از تفلون ها برای اتصال به شیلنگ رزووه زده شده است، انجام می شود. یک انتهای این تفلون ها برای اتصال به شیلنگ رزووه زده شده و انتهای دیگر آن برای آب بندی بهتر به صورت پرسی در داخل یک حلقه پلی اورتان جا زده شده است. برای جاگیری بهتر لایه پلی اورتان در داخل لوله سر حلقه های پلی اورتان به صورت مخروطی تراش خورده و به صورت پرسی به داخل لوله جا زده شده اند. شکل 7 تفلون و پلی اورتان مورد استفاده برای آب بندی را نشان می دهد. برای محکم نگهداشت آب بندها به دو انتهای لوله از یک فیکسچر استفاده شده است. این فیکسچر مانند گیره های کارگاهی ساخته شده است. عملکرد آن بدین صورت است که ابتدا آب بندها به صورت پرسی به داخل لوله برخی جا زده می شوند، سپس مجموعه قالب و لوله و آب بندها بین فیکسچر قرار می گیرد. با سفت کردن پیچ فیکسچر، آب بندها به داخل لوله محکم می شوند. این فیکسچر در شکل 8 نشان داده شده است.



شکل 4 منحنی تنش-کرنش پلی اورتان

خواص مکانیکی این میله ها در جدول 1 نشان داده شده است. هر کدام از این

میله ها با 25 المان پوسته ای 4 نقطه S4R مش بندی شده اند. هیچ گونه شرط مرزی به میله های فولادی 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 آزمایش های تجربی

قالب و فیکسچر ساخته شده در شکل 6 نشان داده شده است. بدنی 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، به عنوان پین استفاده شده است. هر کدام از این پیچ ها با استفاده از دو عدد مهره واشردار به بدنی قالب محکم شده اند. ارتفاعی که هر کدام از این پین ها در آن باید محکم شوند از نرم افزار 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 بواسطه سوراخ های تعیین شده در آب بندها، به داخل لوله تزریق می شود. تزریق روغن به داخل لوله مطابق باتابع نشان داده شده در شکل 1، تا فشار 170bar برای لوله متورم شده و فشار 200bar برای لوله با مقطع مربعی ادامه می یابد. شیر اطمینان پمپ به گونه ای تنظیم شده است که با رسیدن فشار به مقدار نهایی عمل کرده و روغن را به داخل مخزن

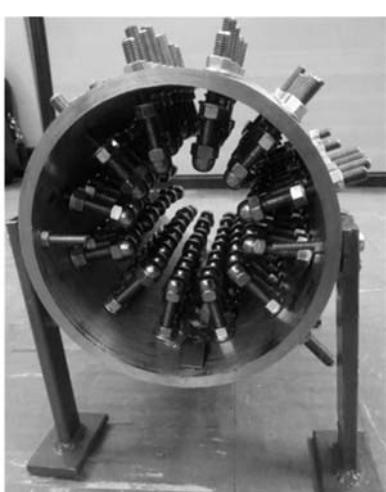
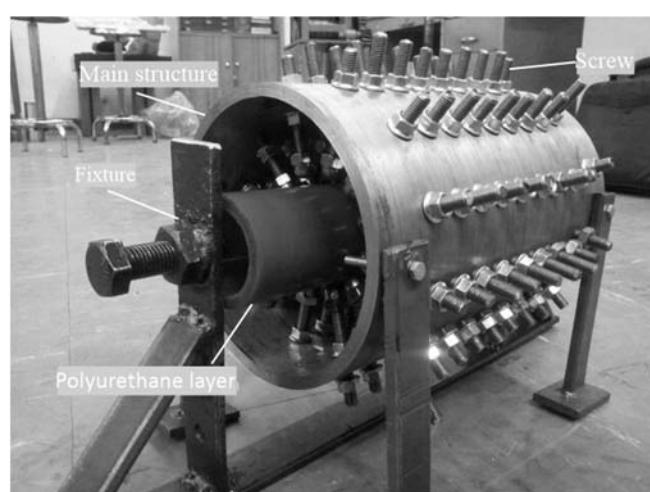


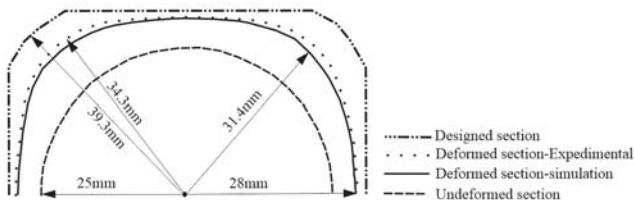
Fig. 6 Manufactured reconfigurable die



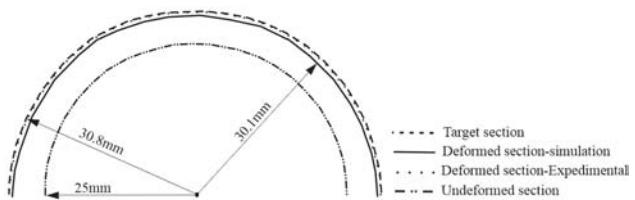
شکل 6 قالب انعطاف پذیر ساخته شده



شکل ۹ لوله متورم شده و لوله با سطح مقطع مربعی تولید شده به وسیله قالب انعطاف پذیر



شکل ۱۰ مقایسه پروفیل نهایی با پروفیل های حاصل از شبیه سازی و آزمایش برای نمونه مربعی



شکل ۱۱ مقایسه پروفیل نهایی با پروفیل های حاصل از شبیه سازی و آزمایش برای نمونه متورم شده

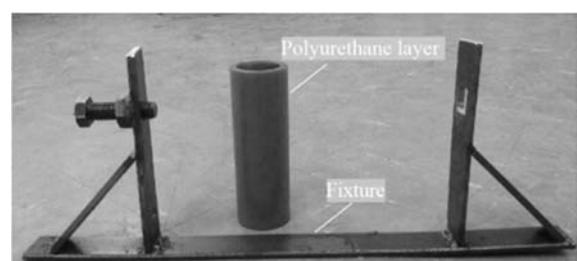
گوشه ها با دقت بیشتری حاصل می شود که البته این خود افزایش هزینه ساخت قالب را در پی دارد.

۴-۲- 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 ۱۲ نشان داده شده است. همچنین تغییرات ضخامت در تحلیل عددی و تجربی در راستای مسیر a1 که همان جهت طولی نمونه است، در شکل ۱۳ 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 0.02mm است. برای این نمونه ضخامت



شکل ۷ تفلون و پلی اورتان استفاده شده برای آب بندی



شکل ۸ فیکسچر ساخته شده

برای افزایش شکل پذیری، لوله های برنجی به مدت یک ساعت در دمای 650°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 مقاطع مختلف که به وسیله این قالب تولید شده اند در شکل ۹ نشان داده شده است. در نمونه سمت چپ لوله متورم شده و در نمونه سمت راست مقطع لوله به مریع تغییر شکل پیدا کرده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز ابعادی مقطع نهایی

سطح مقطع نهایی برای نمونه مربعی و نمونه متورم شده در مقاطعی که بیشترین قطر را دارند، به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در هر دو نمونه قطر شعاع اولیه لوله 25mm است. برای نمونه با مقطع نهایی مربعی فاصله اضلاع تا محور لوله در هر دو حالت شبیه سازی و تجربی تقریباً 28mm است. فاصله گوشه ها تا محور لوله در حالت تجربی 34.3mm و در حالت شبیه سازی 31.4mm بدمت آمده است. برای نمونه متورم شده قطر نهایی در حالت شبیه سازی 30.1mm و در حالت تجربی 30.8mm بدمت آمده است.

برای نمونه مریعی 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 دهنده 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

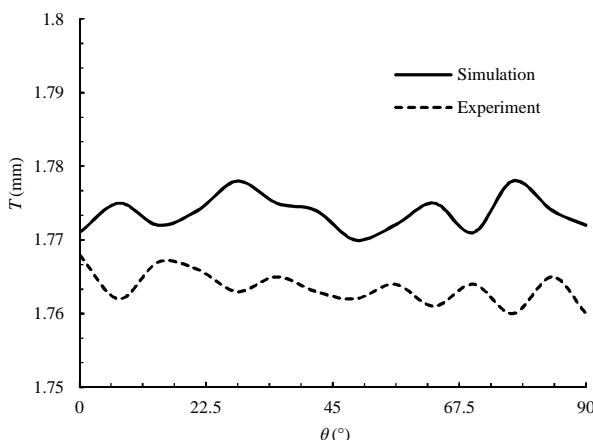


Fig. 14 Thickness of bulged sample along path (a2)

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

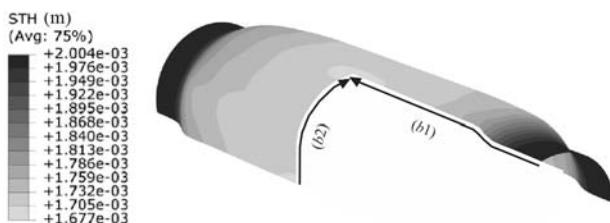


Fig. 15 Thickness distribution and final shape of the rectangular cross section sample

شکل 15 توزیع ضخامت و شکل نهایی نمونه با مقطع مربعی

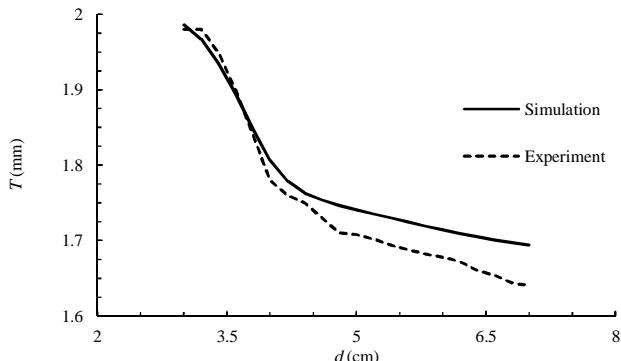


Fig. 16 Thickness of rectangular cross section sample along path (b1)

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

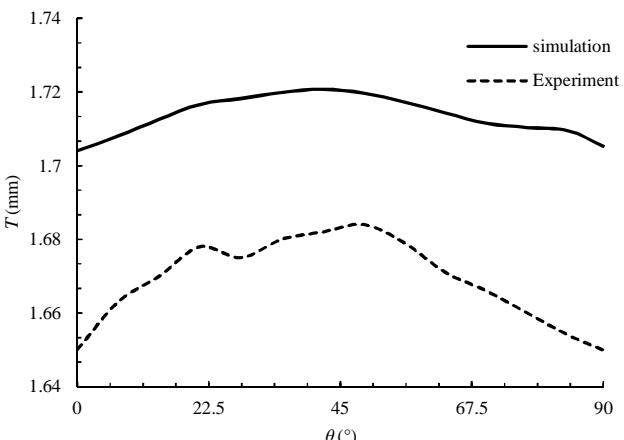


Fig. 17 Thickness of rectangular cross section sample along path (b2)

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 پلی اورتان 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 دهد. 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 میابد. 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 پلی اورتان به علت کاهش نیروهای متumerکز پینها، منجر به کاهش ضخامت به صورت یکنواخت از ابتدا تا وسط لوله شده است.

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

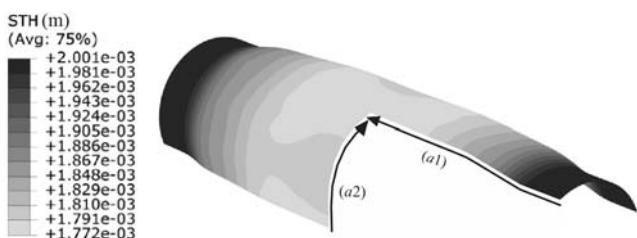


Fig. 12 Thickness distribution and final shape of bulged sample

شکل 12 توزیع ضخامت و شکل نهایی متورم شده

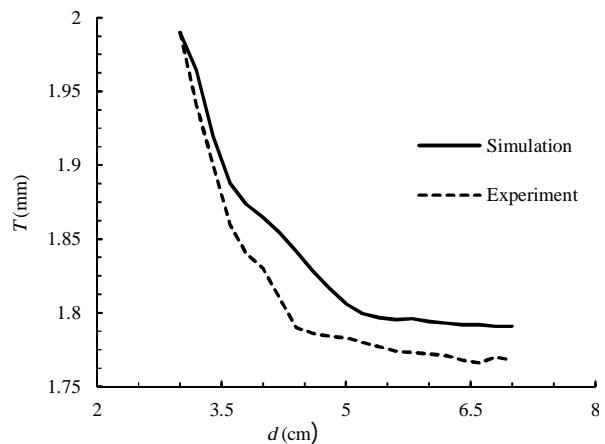


Fig. 13 Thickness of bulged sample along path (a1)

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

همچنین شبیه سازی نمونه ها زیاد است و با نزدیک شدن به مرکز لوله ها 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 شکل های 18c و 18d نشان داده شده است.

برای نمونه مربعی کاهش ضخامت در نواحی میانی سطوح جانبی بیشتر بوده و نشان دهنده این است که این نواحی بیشتر فشرده می شوند. بنابراین تنش میزز نیز در این نواحی بیشتر است. بیشترین تنش میزز برای نمونه مربعی برابر 263MPa است و در وسط سطوح جانبی رخ می دهد. 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.

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

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 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 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 می آید، در حالت تجربی و عددی برای نمونه مربعی و متورم شده در راستای مسیرهای (b) و (a) به ترتیب در شکل های 18e و 18f نشان داده شده است. مقادیر منفی کرنش در راستای ضخامت نشان دهنده 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.

4-4- عیوب گودافتادگی

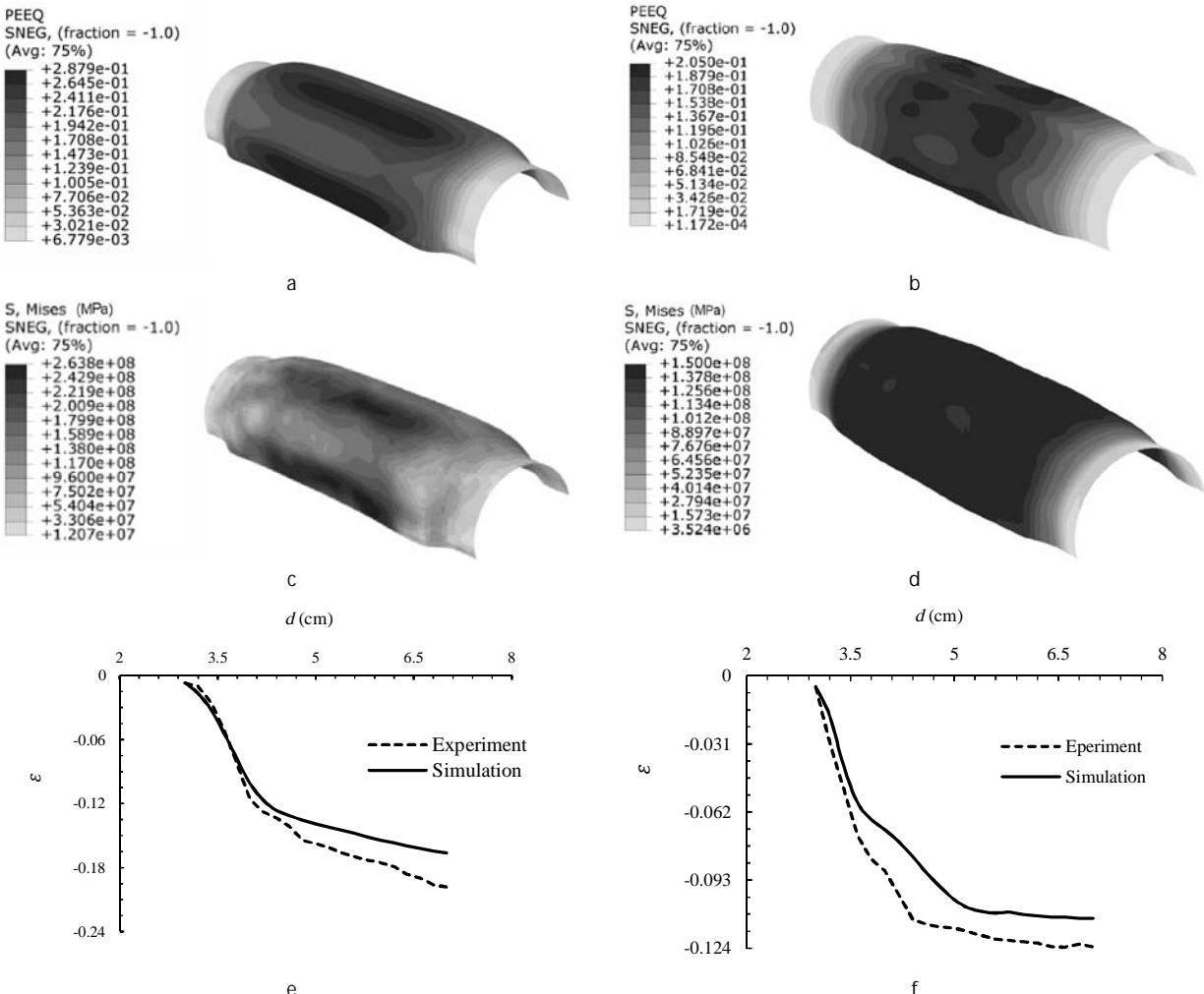


Fig. 18 (a) کرنش پلاستیک معادل برای نمونه مربعی، (b) کرنش پلاستیک معادل برای نمونه متورم شده، (c) توزیع تنش میزز برای نمونه مربعی، (d) توزیع تنش میزز برای نمونه متورم شده، (e) کرنش ضخامتی برای نمونه مربعی در راستای مسیر b، (f) کرنش ضخامتی برای نمونه متورم شده در راستای مسیر a

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

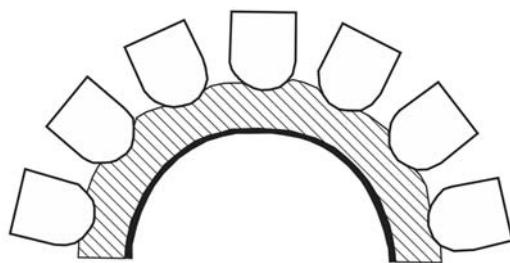


Fig. 21 Die filling of bulged sample

شکل 21 میزان پرشدنی قالب برای نمونه متورم شده

متعدد برای شکل دهنده قطعات مختلف از مهمترین ویژگی های این قالب انعطاف پذیر است. در این متد سطح صلب قالب های هیدروفرمینگ مرسوم با مجموعه ای از پین ها جایگزین شده است، به طوری که با تنظیم ارتفاع مجموعه این پین ها مقاطع لوله ای شکل مختلفی را می توان تولید کرد. نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایش به شرح زیر است:

1- در این پژوهش یک مقطع لوله ای 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 و 1.76mm است و در وسط نمونه ها رخ می دهد. اختلاف ضخامت محاسبه شده در شبیه سازی 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- 0.11- است و در جاهایی که بیشترین کاهش ضخامت را داریم رخ داده است. علامت منفی نشان دهنده کاهش ضخامت در دیواره ها است. مقدار بیشترین کرنش معادل نیز در این نقاط بوده و به ترتیب 0.28 و 0.2 است.

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

4- گودافتادگی از مرسوم ترین عیوب ایجاد شده در این فرآیند است که به علت اعمال نیروهای متمرکز از جانب پین ها رخ می دهد. با استفاده از یک لایه پلی اورتان می توان این عیوب را به حداقل ممکن رساند. یکی دیگر از ضعف های این روش عدم امکان تخمین دقیق نمونه مطلوب نهایی خصوصاً در شاعر گوشده ها است. به علت استفاده از پین، امکان رسیدن به شاعر های کم در گوش ها میسر نیست و برای داشتن شاعر های کم باید از پین های با قطر کمتر استفاده کرد که این خود افزایش هزینه ساخت را در پی دارد. همچنان در نقاط تماس لایه پلی اورتان با پین ها، 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 پین ها نیز یکی از عوامل عدم دستیابی به نمونه دقیق نهایی است.

5- برای نمونه مربعی میزان پرشدنی قالب در نواحی میانی و جهات بیشترین مقدار بوده و در گوش ها، پین ها تماسی با لایه پلی اورتان ندارند. این در حالی است که برای نمونه متورم شده، میزان پرشدنی قالب در تمامی نقاط تماس لایه پلی اورتان با پین ها یکسان است.

6- فهرست عالم

d	فاصله از ابتدای لوله
e	درصد کرنش مهندسی

از جمله معایب مختص روش شکل دهنده ای چند نقطه ای، عیوب گودافتادگی است. این عیوب ناشی از تغییر شکل های موضعی شدید ورق است که به علت اعمال مستقیم نیروی متمرکز پین ها به سطح ورق اتفاق می افتد. شکل 19 عیوب تورفتگی را در شبیه سازی نمونه متورم شده، بدون استفاده از لایه پلی اورتان و تحت فشار 170bar نشان می دهد. ضخامت در نقاط تماس لوله با پین ها 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 عیوب است. همان طور که ذکر شد برای جلوگیری از بروز این عیوب از یک لایه پلی اورتان با سختی A 80 shore استفاده شده است. این لایه باعث می شود نیروی پین ها به صورت یکنواخت به سطح لوله اعمال شود و از ایجاد تغییر شکل های موضعی شدید جلوگیری شود.

4- بررسی میزان پرشدنی قالب

میزان پرشدنی قالب، بدست آمده از شبیه سازی، برای نمونه های مربعی و متورم شده، در شکل های 20 و 21 نشان داده شده است. این اشکال، نشان گر سطح مقطع برش خورده در قسمت میانی قالب هستند. قسمت تبره رنگ نشان گر سطح مقطع لوله و قسمت هاشور خورده نشان گر لایه پلی اورتان است که به وسیله پین های قالب احاطه شده است.

برای نمونه مربعی، بیشترین تغییر شکل لایه پلی اورتان در وسط وجهه های مربعی است و در همین نقاط فاصله بین لوله و پین ها به کمترین مقدار ممکن می رسد. گوش های نمونه نیز با پین ها هیچ گونه تماسی ندارند. برای نمونه متورم شده، با توجه به تغییر شکل متقاضی و یکنواخت لوله، لایه پلی اورتان در تمامی نواحی تماس با پین ها به طور یکنواخت فشرده شده و فاصله لوله با پین ها در نقاط مختلف تقریباً یکسان است.

5- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار در دنیا یک قالب انعطاف پذیر برای هیدروفرمینگ قطعات لوله ای شکل طراحی و ساخته شده و این فرآیند به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. کاهش زمان و هزینه برای ساخت قالب های

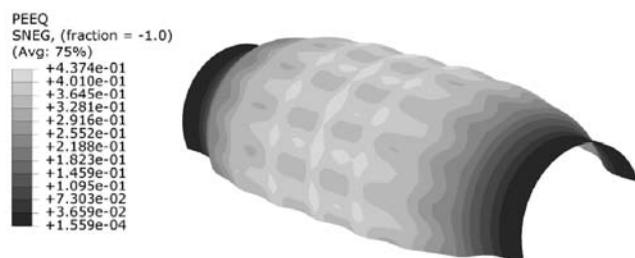


Fig. 19 Dimpling defect

شکل 19 عیوب گودافتادگی

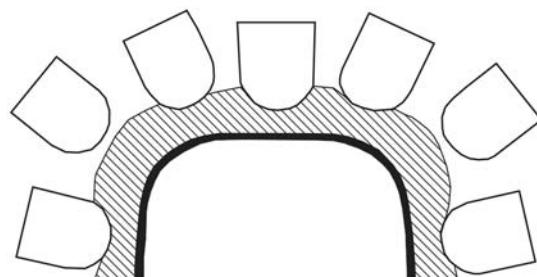


Fig. 20 Die filling of rectangular sample

شکل 20 میزان پرشدنی 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. Lakshminathan, 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
علامه یونانی	
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 procces 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*