

طراحی، ساخت و به کارگیری یک قالب جدید گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای شکل‌دهی قطعات لوله‌ای

محمد امینی^۱ و محمد بخشی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۹/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۵/۳۰)

چکیده

در طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد قالب‌های گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای تولید ورق‌های فلزی انجام شده است. این قالب‌ها به دلیل قابلیت تغییر سریع، مورد توجه سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر قرار گرفته‌اند. با این وجود، تحقیقات به عمل آمده از سوی محققان تنها شامل ورق‌های تخت فلزی بوده و هیچ پژوهشی در زمینه کاربرد این قالب‌ها برای قطعات لوله‌ای گزارش نشده است. در این مقاله، برای نخستین بار یک مجموعه قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای شکل‌دهی چرخشی قطعات توخالی دوار طراحی و ساخته شده است. نتایج حاصل نشان داده است که امکان تولید این قطعات با استفاده از قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد وجود دارد و این تکنیک منجر به تولید قطعات لوله‌ای شکل با دقت و کیفیت مطلوب می‌شود. نمودارهای توزیع کرنش‌ها در نمونه‌های شکل داده شده نشان داده است که طول نمونه‌ها پس از شکل‌دهی، کاهش می‌یابد و ضخامت دیواره آنها افزایش پیدا می‌کند. افزایش ضخامت دیواره در قسمت وسط لوله بیشتر از طرفین آن و کاهش طول لوله در طرفین بیشتر از قسمت وسط آن است. تغییر شکل پیچشی لوله با افزایش میزان فرورفتگی در لوله افزایش می‌یابد و کیفیت سطح لوله پس از شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی لوله، قالب گسسته، قالب با قابلیت پیکره‌بندی مجدد، شکل‌دهی چند نقطه‌ای، شکل‌دهی چرخشی

Design, Manufacture and USE of a New Reconfigurable Discrete Die for Forming Tubular Parts

M. Amini and M. Bakhshi

Mech. Eng. Dep't.

Babol Noshirvani Univ. of Tech.

(Received: 18 December, 2010; Accepted: 20 August, 2012)

ABSTRACT

In recent years, several research works have been performed on the application of reconfigurable discrete dies for forming sheet metals. Due to the rapid changing of these dies, they attracted the attention of flexible manufacturing systems. Meanwhile, only flat sheet metals were examined and no research work has been reported on the application of the mentioned dies for tubular parts. In this paper, a new reconfigurable discrete die for spinning of tubular parts were designed and manufactured. The results obtained in this research illustrated that hollow axisymmetric parts could be produced using this type of die, and that this technique leads to the production of tubular parts with desired accuracy and quality. The strain distribution diagrams of formed samples showed that the length of samples decreases and the wall-thickness of them increases after forming. Increasing of wall-thickness in the middle of tube is more than sides and decreasing of length in the sides is more than the middle. The twisting deformation of tube increases with the increment of intended amount. The surface quality of tube increases after forming.

Keywords: Tube Forming, Discrete Dies, Reconfigurable Die, Multi-point Forming, Spinning

۱- مری (نویسنده پاسخگو): amini.muhammad@gmail.com

۲- استاد: bakhshi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

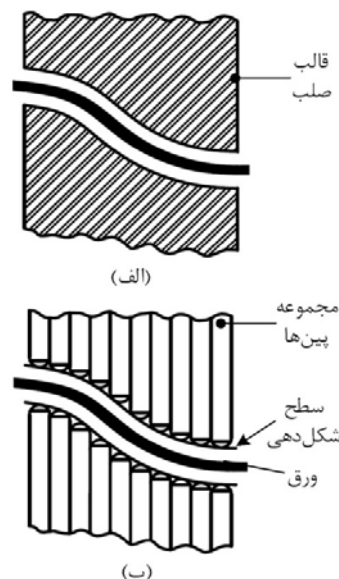
والکزیک^۱ و همکارانش یک قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد را برای ورق‌های فلزی طراحی و ساخته‌اند. آنها در پژوهش‌های خود یک روش کلی را برای طراحی قالب‌های گسسته ارائه کردند [۲ و ۱]. آنان همچنین این نوع قالب را با سایر روش‌های تولید سریع مقایسه کردند و مزیت‌های روش مورد نظر خود را نسبت به سایر روش‌ها نشان دادند [۳]. اولسن^۲ [۴] و هارت^۳ و همکاران [۵] نیز با بررسی ویژگی‌های شکل‌دهی به‌وسیله یک قالب گسسته، امکان شکل‌دهی ورق را با این روش نشان دادند. پاپازین^۴ و همکارانش [۶] تکنیک قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد را در شکل‌دهی کششی ورق به‌کار گرفتند. قالب ساخته شده توسط آنها شامل ۲۶۸۸ پین بود که هر کدام توسط یک سروموتور حرکت می‌کرد و کل قالب توسط کامپیوتر کنترل می‌شد. آودانی^۵ [۷] نشان داد که می‌توان به‌وسیله یک قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد، یک قطعه را در اندازه‌های مختلف و دلخواه شکل داد.

تمام پژوهش‌های انجام شده، تاکنون بر روی ورق‌های فلزی تخت انجام شده است و هیچ تحقیقی در زمینه به‌کارگیری از قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای قطعات دوار که در آنها بلانک اولیه به‌صورت لوله باشد، انجام نشده است.

در فرآیند شکل‌دهی چرخشی، گستره وسیعی از قطعات با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تولید می‌شوند. این فرآیند نیازمند قالب‌های فراوان و با شکل‌های گوناگون می‌باشد که برای تولید با تیراژ کم مقرون به صرفه نیست. در این پژوهش، روش قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای اولین بار برای شکل‌دهی چرخشی قطعات توخالی دوار مورد استفاده قرار گرفته است که کاری نو و بدیع می‌باشد.

موراتا^۶ و همکاران [۸-۱۱] دستگاهی برای شکل‌دهی چرخشی لوله ساخته‌اند که در این دستگاه، دو غلتک چرخان به‌طور قرینه در اطراف لوله با حرکات کنترل عددی حرکت کرده و لوله را شکل می‌دهند. نمونه‌های تولید شده به‌وسیله

شکل ۱ شماتیک فرآیند شکل‌دهی ورق در قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد و فرآیند شکل‌دهی ورق در قالب سنتی را نشان می‌دهد. در فرآیند شکل‌دهی در قالب گسسته یک (یا دو) ماتریس متشکل از تعدادی پین‌های جدا از هم ساخته می‌شوند. این پین‌ها پس از موقعیت‌دهی به‌شکل مورد نظر، درون بدنه قالب به‌صورت به‌هم فشرده گیره‌بندی می‌شوند. موقعیت‌دهی پین‌ها ممکن است به‌طور دستی (به‌وسیله قطعات الگو) و یا اتوماتیک (با کنترل کامپیوتری) انجام گیرد. پس از تنظیم پین‌ها و گیره‌بندی آنها قالب به یک قالب صلب برای شکل‌دهی ورق تبدیل می‌شود. در واقع، در این فرآیند یک قالب انعطاف‌پذیر با قابلیت تنظیم، جایگزین قالب‌های متعدد صلب می‌شود. عمده‌ترین مزیت قالب‌های گسسته نسبت به قالب‌های سنتی، کاهش در زمان و هزینه تمام شده ساخت قالب‌های متعدد است. با استفاده از این روش، یک قالب گسسته در دستگاه شکل‌دهی نصب می‌شود و نیاز به تعویض و ساخت قالب‌های متعدد را مرتفع می‌نماید. با وجود مزایای متعدد قالب‌های گسسته، این قالب‌ها به‌دلیل نبود دانش طراحی، تاکنون در صنعت کاربرد محدودی داشته‌اند [۱].



شکل (۱): (الف) شکل‌دهی ورقی در قالب سنتی، (ب)

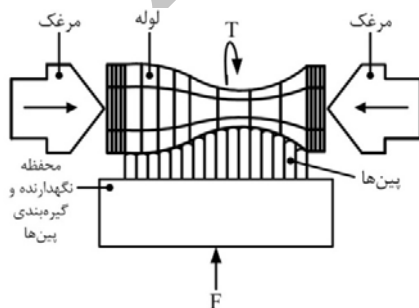
شکل‌دهی ورق در قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد.

- 1- Walczyk
- 2- Olsen
- 3- Hardt
- 4- Papazian
- 5- Owodunni
- 6- Murata

پین‌ها می‌نشینند و سطحی هموار و پیوسته به‌وجود می‌آورد. شکل ۴ قالب ساخته شده را به همراه نوار فولاد فنری نشان می‌دهد. این نوار بین صفحه گیره‌بندی و صفحه کف محفظه قرار می‌گیرد. عرض این نوار کمتر از ارتفاع دو ردیف پین‌ها در نظر گرفته شده است تا مانع گیره‌بندی پین‌ها نشود. دو ورق لاستیک یکی زیر صفحه کف محفظه (زیر نوار فنری) و دیگری روی صفحه کف محفظه (زیر نوار فنری) قرار می‌گیرد به‌نحوی که با وارد آمدن نیروی گیره‌بندی و فشرده شدن پین‌ها این ورق نیز با فشار کافی در جای خود نگه داشته می‌شود. البته این فشار آنقدر زیاد نیست و ورق می‌تواند در صورت لزوم برای نشستن کامل بر روی سر همه پین‌ها، در حین شکل‌دهی از بین صفحه گیره‌بندی و صفحه کف محفظه به اندازه لازم بیرون بیاید.

۲-۳- نحوه موقعیت‌دهی پین‌ها و تنظیم قالب

پین‌ها قبل از گیره‌بندی باید مطابق با شکل مورد نظر موقعیت‌دهی شوند. برای موقعیت‌دهی پین‌ها در این پژوهش از دو روش دستی و نیمه اتوماتیک استفاده شد. در روش دستی مطابق شکل ۵ یک الگوی چوبی به‌شکل منحنی مورد نظر ساخته شده است. با فشار آوردن الگو به پین‌ها (از جلو یا پشت پین‌ها) می‌توان آنها را موقعیت‌دهی کرد. در روش نیمه اتوماتیک، با داشتن مختصات موقعیت هر پین می‌توان آنها را با استفاده از یک دستگاه فرز CNC و به‌وسیله یک میله به‌عنوان ابزار طبق شکل ۶ موقعیت‌دهی کرد. با داشتن موقعیت پین‌ها برنامه‌ای برای مسیر ابزار نوشته می‌شود و ابزار از یک نقطه به‌عنوان نقطه مرجع نسبت به همه پین‌ها حرکت و آنها را موقعیت‌دهی می‌کند.



شکل (۲): شماتیک فرآیند جدید شکل‌دهی چرخشی لوله در قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد.

این دستگاه با نمونه‌های تولید شده در این پژوهش در انتهای مقاله مقایسه شده است.

۲- طراحی و ساخت قالب

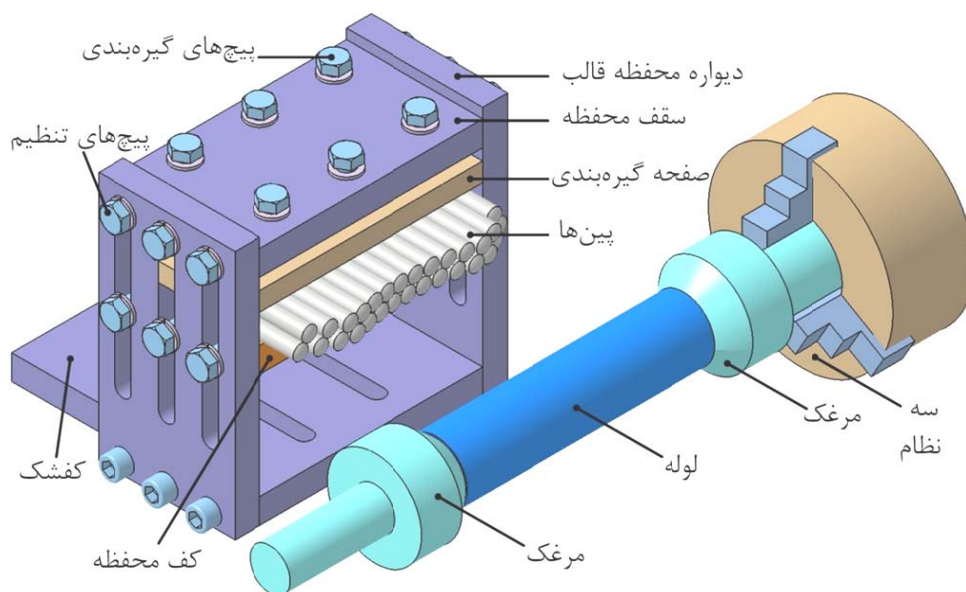
همان‌گونه که در مقدمه بیان شد، برای اولین بار تکنیک قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد در این پژوهش برای قطعات توخالی دوار توسعه یافته است. شکل ۲ شماتیک فرآیند ارائه شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، در این فرآیند قطعه‌کار که به‌صورت یک لوله توخالی است، بین دو مرغک قرار می‌گیرد. مرغک سمت چپ توسط یک سه‌نظام به چرخش در می‌آید و مرغک سمت راست به‌صورت هرزگرد بوده و همراه لوله دوران می‌کند. هم‌زمان با چرخش لوله، نیروی جانبی (F) توسط قالب به قطعه اعمال می‌شود و آن را به شکل مورد نظر در می‌آورد.

۲-۱- طراحی قالب

مطابق شکل ۲، طراحی قالب‌های گسسته شامل طراحی پین‌ها و طراحی محفظه نگهدارنده و گیره‌بندی پین‌ها است. همچنین، نحوه موقعیت‌دهی پین‌ها در طراحی پین‌ها و قالب مهم است که در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳ قالب طراحی شده را همراه با اجزای آن نشان می‌دهد.

۲-۲- ساخت قالب

اصلی‌ترین عیب شکل‌دهی در استفاده از قالب گسسته، پدید آمدن فرورفتگی‌هایی است که به‌علت پیوسته نبودن سطح قالب و فرو رفتن و اثر گذاشتن سر پین‌ها در ورق ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد این عیب از یک ورق انعطاف‌پذیر از جنس نرم مثل مواد پلیمری، لاستیک یا پلی‌اورتان استفاده می‌کنند و آن را بین سطح پین‌ها و قطعه‌کار قرار می‌دهند تا در حین شکل‌دهی، سطح قالب پیوسته باشد و فضاهای خالی بین پین‌ها توسط این جنس نرم پر شود [۱]. در قطعه مورد بررسی در این پژوهش، به‌خاطر چرخش قطعه نمی‌توان از این مواد استفاده کرد. به‌جای آن از یک نوار ورقی از جنس فولاد فنری برای پوشاندن سطح پین‌ها استفاده شد. نوار فولاد فنری به‌خاطر خاصیت ارتجاعی (فنری) خوبی که دارد، روی سر کروی



شکل (۳): مجموعه قالب طراحی شده به همراه شماتیک نحوه قرارگیری لوله اولیه نسبت به قالب.



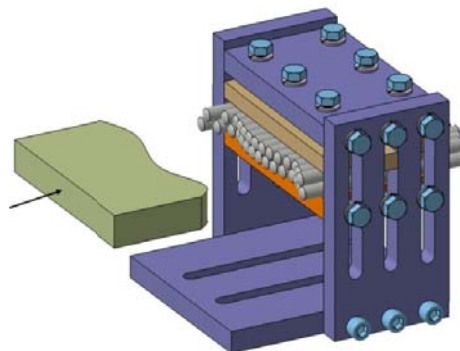
شکل (۶): روش نیمه اتوماتیک موقعیت‌دهی پین‌ها توسط یک دستگاه فرز CNC.



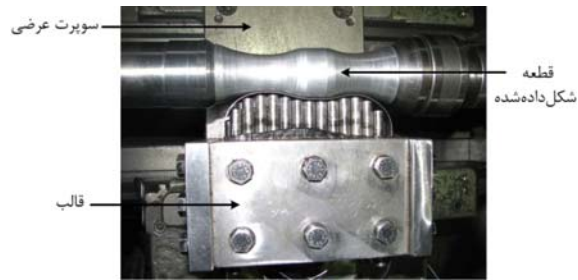
شکل (۴): قالب ساخته شده به همراه نوار فولاد فنی. ورق لاستیک نوار فولاد فنی

۳- مراحل آزمایشگاهی

هندسه قطعات شکل داده شده در این پژوهش در حقیقت دوران ۳۶۰ درجه‌ای یک منحنی دوبعدی است. بنابراین برای تولید قطعات نیاز است که لوله در حال چرخش شکل داده شود. یک دستگاه تراش معمولی می‌تواند این چرخش را فراهم کند. برای گرفتن لوله در حال چرخش از دو مرغک (یکی مرغک دستگاه تراش و دیگری مرغکی که ساخته شده و درون سه نظام بسته می‌شود) استفاده شده است. قالب ساخته شده باید بر روی دستگاه تراش نصب و عملیات شکل‌دهی در آن انجام شود. پس از موقعیت‌دهی و گیربندی



شکل (۵): روش دستی موقعیت‌دهی پین‌ها به وسیله الگو.



شکل (۸): نحوه شکل دهی قطعات در قالب.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی کیفی نمونه‌های تولید شده آزمایش‌های متعددی انجام گرفت و سپس نتایج تجربی این آزمایش‌ها تدوین گردید.

۴-۱- نتایج حاصل از تولید نمونه‌ها

مهم‌ترین نتایج کیفی حاصل از تولید نمونه‌ها در سه مجموعه خلاصه شدند که در شکل‌های ۱۱-۹ ارائه می‌شوند.

۴-۱-۱- مجموعه اول

شکل ۹ اولین مجموعه از نمونه‌های تولید شده را از جنس مس نشان می‌دهد. تغییر شکل در نمونه شکل ۹-الف به صورت یکنواخت نیست و روی سطح آن فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی مشاهده می‌شود که علت آن ناپیوسته بودن سطح حاصل از آرایش پین‌هاست. علت فرورفتگی‌ها اثرات ناشی از فشار سر پین‌ها و علت برآمدگی‌ها نفوذ فلز به داخل فضاهای خالی بین پین‌ها می‌باشد. این اثرات به صورت منقطع و تکرار شونده دور تا دور لوله را احاطه کرده‌اند که در نهایت با ادامه روند شکل‌دهی باعث چروکیدگی ورق در بین فواصل خالی بین پین‌ها و پارگی آن در همان منطقه می‌شود. با وارد آوردن نیرو از طرف قالب به لوله، لوله مانند یک فنر، فشرده می‌شود و با برداشتن نیرو به حالت اولیه بر می‌گردد. برای جلوگیری از این حالت، درون نمونه بعدی که در شکل ۹-ب نشان داده شده است، با یک ماده تراکم‌پذیر یعنی قیر مخلوط شده با مقداری گچ پر شد و با همان شرایط نمونه قبل شکل داده شد. این بار برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها به صورت پیوسته دور تا دور لوله مشاهده می‌شوند. ماده تراکم‌پذیر از بروز عیوب به صورت منقطع جلوگیری می‌کند و مانع از

پین‌ها به شکل مورد نظر، سوپرت فوقانی دستگاه تراش باز شده و قالب به جای آن بسته می‌شود (شکل ۷).

پس از آماده‌سازی قالب، قطعه‌کار شروع به چرخش می‌کند و با حرکت سوپرت عرضی به سمت جلو، قالب به قطعه‌کار نزدیک می‌شود و نوار فنری پس از تماس با قطعه بر روی سر پین‌ها می‌نشیند و شکل‌دهی آغاز می‌شود (شکل ۸). نمونه‌های اولیه در ابعاد و ضخامت‌های مختلف طبق جدول ۱ از جنس‌های مس و آلومینیوم انتخاب شدند. همچنین پارامترهای مختلف فرآیند نظیر سرعت چرخشی، نرخ پیشروی و شرایط روان‌کاری جهت به دست آوردن بهترین شرایط کار در جدول ۱ آورده شده‌اند [۱۲].

جدول (۱): مشخصات لوله‌های اولیه و پارامترهای ماشین‌کاری [۱۲].

جنس	مس (خلوص ۹۹/۹٪)، آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل شده
طول لوله‌های اولیه L_o (mm)	مختلف از ۱۰۰ تا ۲۰۰
قطر خارجی لوله‌های اولیه D_o (mm)	۵۰
ضخامت دیواره لوله‌های اولیه t_o (mm)	۱/۵
نرخ پیشروی قالب p (mm.rev ⁻¹)	۰/۳۲، ۰/۱۶ و ۰/۰۸
سرعت چرخشی لوله n (rpm)	۲۵۰، ۳۵۵، ۵۰۰ و ۷۱۰
حالت اصطکاکی	خشک، با روغن



شکل (۷): نحوه قرارگیری قالب در دستگاه تراش.

آلومینیوم (نسبت به مس) در ایجاد عیوب، از آلومینیوم برای جنس لوله‌ها استفاده شد. مخلوط قیر با اینکه در جلوگیری از پدید آمدن عیوب مفید است، اما ذوب کردن و خارج کردن آن مشکل است و قطعه را نیز خراب می‌کند. بنابراین در نمونه‌های بعدی، ماسه مرطوب جایگزین آن شد که بعد از کار به راحتی از لوله خارج می‌شود. به علت نبود درک صحیح از رفتار و جریان فلز و چگونگی فرم یافتن قطعه در قالب و با توجه به اینکه اولین نمونه تولید شده دارای عیوب متعددی به علت تو خالی بودن لوله بود، نیاز به پرکردن لوله با یک ماده تراکم‌پذیر بسیار محسوس بود. پس از دست‌یابی به نحوه شکل‌دهی و مراحل آن برای تولید موفقیت‌آمیز نمونه‌ها، ماده پرکننده که غالباً ماسه بود، حذف شد و از آن به بعد نمونه‌ها به صورت تو خالی تولید شدند.

در شکل ۱۰-الف همان‌طور که مشاهده می‌شود، لوله در سمت راست در هم پیچیده است و دچار چروکیدگی و پارگی شدیدی شده است. سمت چپ لوله نزدیک سه نظام و سمت راست آن نزدیک مرگک دستگاه است. حین شکل‌دهی، جریان فلز تمایل به دور شدن از سه نظام دارد. در واقع جریان فلز به سمت مرگک دستگاه تراش است که طرف آزادتر لوله می‌باشد. چون لوله در طرف مرگک نیز مهار شده است و به‌طور کامل آزاد نمی‌باشد، پس به ناچار ماده جریان یافته از فلز در جایی بعد از منطقه تغییر شکل و قبل از انتهای سمت راست لوله هر جا که ضخامت دیواره نازک‌تر و سست‌تر باشد، جمع و باعث چروک خوردگی در آن ناحیه می‌شود. نیروی محوری وارد به لوله از طرف مرگک دستگاه (مرگک دستگاه، متحرک است و برای گرفتن لوله به آن فشار می‌آورد)، بی‌تأثیر بر این پدیده (انباشتگی مواد و چین‌خوردگی لوله در ناحیه سست‌تر) نیست. اگر مرگک دستگاه زیاد سفت شده باشد و فشار محوری وارده بیش از حد زیاد باشد، انباشتگی مواد و چین‌خوردگی سریع‌تر و بیشتر اتفاق می‌افتد. با ادامه روند شکل‌دهی مواد انباشته شده در هم می‌پیچد.

۴-۱-۳- مجموعه سوم

کنترل صحیح مرگک دستگاه کار دشواری است که به‌سادگی قابل انجام نبود و عدم کنترل آن منجر به تولید قطعاتی معیوب شد. در نمونه‌های مجموعه اول و دوم، شروع

چروکیدگی ورق می‌شود، اما هنوز عیب عمده‌ای به‌صورت برآمدگی دور تا دور سطح لوله وجود دارد. برای جلوگیری از نفوذ فلز به درون فواصل خالی بین پین‌ها یک نوار از جنس فولاد فنر در بین صفحه گیره‌بندی و کف محفظه قالب طوری قرار داده شد که سطح کروی پین‌ها را بپوشاند. نوار فولاد فنری با داشتن خاصیت ارتجاعی مناسب، به‌خوبی روی سر پین‌ها نشسته و سطحی صاف و پیوسته به‌وجود می‌آورد. نمونه بعدی که در شکل ۹-ج مشاهده می‌شود، با استفاده از نوار فولادی شکل داده شد. عیوب برآمدگی در این نمونه رخ نداده و وسط لوله مطابق با شکل قالب فرم یافته است.



شکل (۹): اولین مجموعه نمونه‌های تولید شده.

$n = 250 \text{ rpm}$, $p = 0.32 \text{ mm.rev}^{-1}$ جنس لوله از مس، حالت اصطکاکی خشک، شروع شکل‌دهی از طرف سه نظام.

۴-۱-۲- مجموعه دوم

در آزمایشات بعدی به‌خاطر حساسیت و تمایل کمتر

مرحله سوم، اگر لازم باشد، برای ایجاد شکل نهایی قطعه به‌عنوان مرحله پرداخت انجام می‌گیرد. با این روش، عیوب قبلی از بین رفت و نمونه‌ها سالم تولید شدند.

بهترین شرایط شکل‌دهی موفقیت‌آمیز نمونه‌ها که پس از تولید نمونه‌های مجموعه اول تا سوم به‌دست آمد، عبارت است از:

۱- پارامترهای شکل‌دهی شامل سرعت چرخشی ۷۱۰ rpm و

کمترین نرخ پیشروی قالب برابر با $p = 0.08 \text{ mm.rev}^{-1}$

۲- روان‌کاری مناسب قطعه کار با روغن و

۳- در مرحله اول، طرفی از لوله که دور از منبع چرخش است، شکل داده می‌شود. آنگاه در مرحله دوم، طرف دیگر شکل داده می‌شود. مرحله سوم اگر لازم باشد، برای ایجاد شکل نهایی قطعه به‌عنوان مرحله پرداخت انجام می‌گیرد.

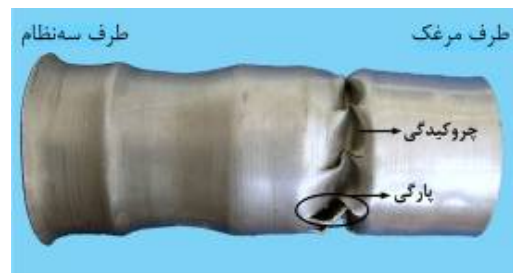
۲-۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری کرنش‌ها

برای بررسی نتایج کمی حاصل از نمونه‌ها، کرنش‌های به‌وجود آمده (کرنش‌های محوری و ضخامتی) در نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید که در قالب نمودار در ادامه آورده شده‌اند.

۱-۲-۴- کرنش محوری

به‌منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها نمونه‌هایی مانند شکل ۱۲-الف آماده شد. بر روی نمونه‌ها سوراخ‌هایی با قطر ۳ mm به فواصل مساوی در جهت محور x به اندازه $\Delta l_0 = 10 \text{ mm}$ ایجاد شد و سپس نمونه مطابق با شرایط بهینه به‌دست آمده شکل داده شد. شکل ۱۲-ب لوله تغییر شکل یافته را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، منطقه تغییر شکل یافته لوله یعنی نواحی بین ۵ سوراخ میانی لوله مورد بررسی قرار گرفت. $x = 0$ نقطه شروع منطقه تغییر شکل یافته در نمونه (نقطه شروع پیکان) است. بعد از شکل‌دهی طول هر کدام از چهار ناحیه a، b، c و d نشان داده شده در شکل در اثر تغییر شکل محوری به Δl تبدیل می‌شود. کرنش محوری هر ناحیه تحت عنوان کرنش محوری ناحیه‌ای تعریف می‌شود و به‌وسیله رابطه $\epsilon_{\Delta l} = \ln(\Delta l / \Delta l_0)$ به‌دست می‌آید. شکل ۱۳ توزیع کرنش‌های محوری ناحیه‌ای را در نواحی a، b، c و d نشان می‌دهد.

شکل‌دهی از طرف نزدیک به سه نظام صورت گرفت و جریان فلز به‌سمت دور شدن از منبع چرخش بود. در ادامه کار، منطقه شروع شکل‌دهی از طرف نزدیک به سه نظام به‌طرف نزدیک به مرگک تغییر داده شد و نمونه‌های مجموعه سوم تولید شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها سالم و بدون عیب هستند و در دو مرحله یا سه مرحله شکل داده شده‌اند.



الف- مرگک زیاد سفت شده و فشار وارده از طرف آن به لوله زیاد است.



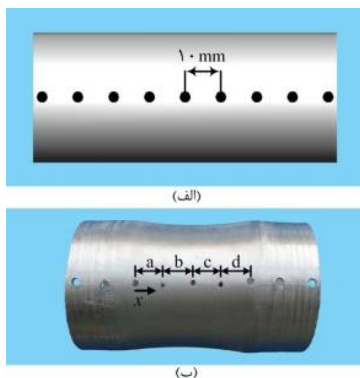
ب- فشار وارده از طرف مرگک به لوله کمتر بوده است.

شکل (۱۰): دومین مجموعه نمونه‌های تولید شده.

$n = 355 \text{ rpm}$, $p = 0.116 \text{ mm.rev}^{-1}$ جنس لوله‌ها از

آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل شده، لوله پر شده از ماسه، با استفاده از نوار فولادی، حالت اصطکاکی خشک، شروع شکل‌دهی از طرف سه نظام.

بنابراین برای جلوگیری از انباشتگی مواد و چین‌خوردگی لوله، در ابتدای شکل‌دهی (در مرحله اول) باید طرفی از لوله که دور از منبع چرخش است، شکل داده شود (یعنی در مرحله اول طرف مرگک شکل داده می‌شود). سپس لوله از بین دو مرگک باز شده، برگردانده می‌شود و در مرحله دوم، طرف دیگر شکل داده شود (یعنی طرف دوم هم در طرف مرگک شکل داده می‌شود). البته مشاهده شد که اگر طرف دوم در طرف سه‌نظام شکل داده شود، مشکلی به‌وجود نمی‌آید.



(الف)

(ب)

شکل (۱۲): نمونه استفاده شده برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، (الف) لوله تغییر شکل نیافته، (ب) لوله تغییر شکل یافته به صورت یک تورفتگی ساده.

در راستای محوری کمتر است. کاهش طول در طرفین لوله (طرف مرغک و سه‌نظام) به خاطر فشار محوری وارد به لوله از طرف دو مرغک، بیشتر است. پله‌هایی که در منحنی کرنش محوری مشاهده می‌شود، به خاطر این است که کرنش‌های محوری در فاصله بین سوراخ‌های ایجاد شده روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است، نه در هر نقطه. مقدار کرنش محوری محاسبه شده برای همه نقاط بین هر دو سوراخ ثابت فرض شده است.

۴-۲-۲- کرنش ضخامتی

شکل ۱۴ توزیع کرنش‌های ضخامتی ($\epsilon_r = \ln(t/t_0)$) را در نمونه نشان می‌دهد. مقادیر کرنش‌های ضخامتی مثبت است که نشان‌دهنده افزایش ضخامت دیواره در قطعه نهایی است. کاهش طول به ترتیب از b به a، c و d بیشتر می‌شود. برای طول‌های محوری هم‌اندازه، صلبیت محوری نمونه با افزایش ضخامت دیواره افزایش می‌یابد. یعنی هر چه ضخامت بیشتر شود، مقاومت در برابر تغییر شکل بیشتر می‌شود. بنابراین هر جا کرنش ضخامتی بیشتر باشد، کرنش محوری کمتر است [۹]. قسمت وسط منطقه تغییر شکل یافته که در گذرهای اولیه فرآیند شکل می‌یابد، دارای ضخامت کمی بیشتر از طرفین منطقه تغییر شکل یافته است. این ازدیاد ضخامت طی گذرهای بعدی باعث صلبیت بیشتر در وسط لوله و در نتیجه کرنش محوری کمتر می‌شود. شکل ۱۵ افزایش ضخامت دیواره لوله را نسبت به ضخامت اولیه آن نشان می‌دهد.



الف- لوله اولیه؛ $t_0 = 1/5 \text{ mm}$ ، $L_0 = 200 \text{ mm}$ ، $D_0 = 50 \text{ mm}$



ب- شکل‌دهی در دو مرحله



ج- شکل‌دهی در دو مرحله



د- شکل‌دهی در سه مرحله

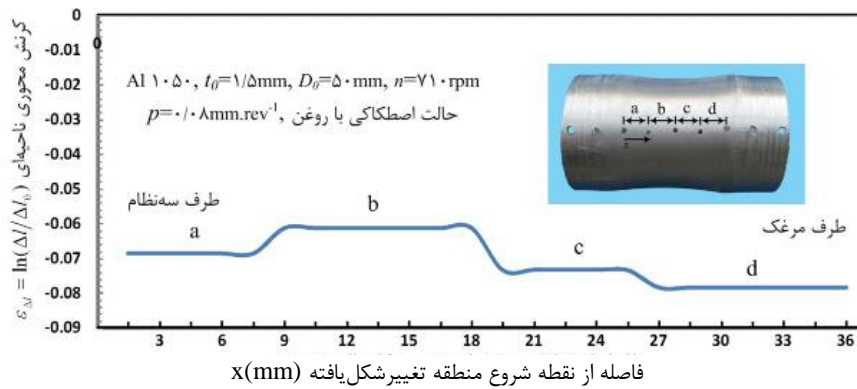


ه- شکل‌دهی در سه مرحله

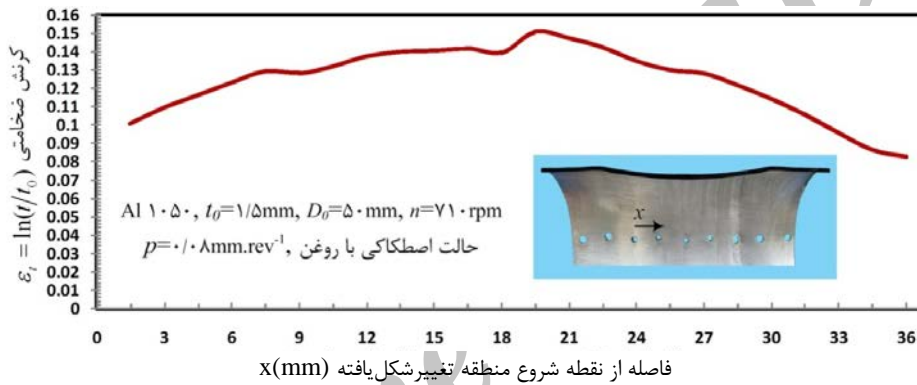
شکل (۱۱): سومین مجموعه نمونه‌های تولیدشده.

آلومینیوم ۱۰۵۰ آنیل‌شده، لوله‌ها توخالی، با استفاده از نوار فولادی، حالت اصطکاکی با روغن، شروع شکل‌دهی از طرف مرغک.

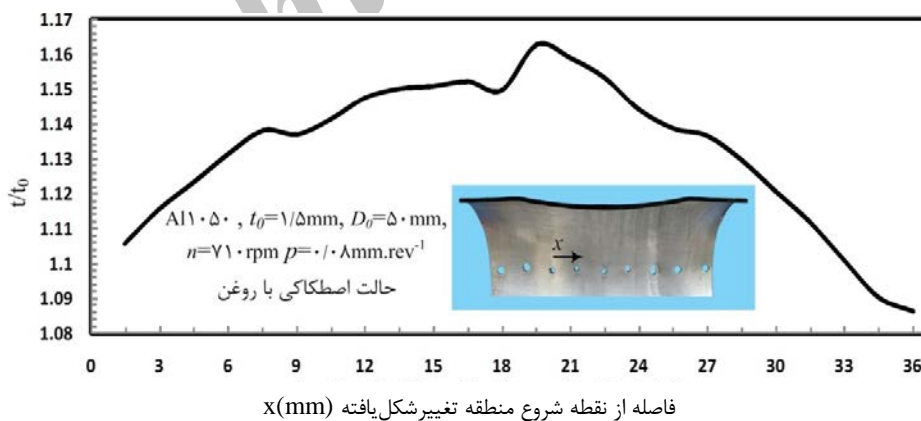
مقادیر کرنش‌های محوری منفی است که نشان‌دهنده کاهش طول نمونه است. در هر قسمت از نمونه که کاهش قطر و در نتیجه کرنش محیطی ($\epsilon_\theta = \ln(D/D_0)$) بیشتر است، کاهش طول و در نتیجه کرنش محوری ناحیه‌ای کمتر است. در واقع هر جا که جریان مواد در راستای شعاعی بیشتر باشد،



شکل (۱۳): توزیع کرنش‌های محوری ناحیه‌ای در طول نمونه.



شکل (۱۴): توزیع کرنش‌های ضحامت در طول نمونه.



شکل (۱۵): افزایش ضخامت دیواره لوله بعد از شکل دهی.

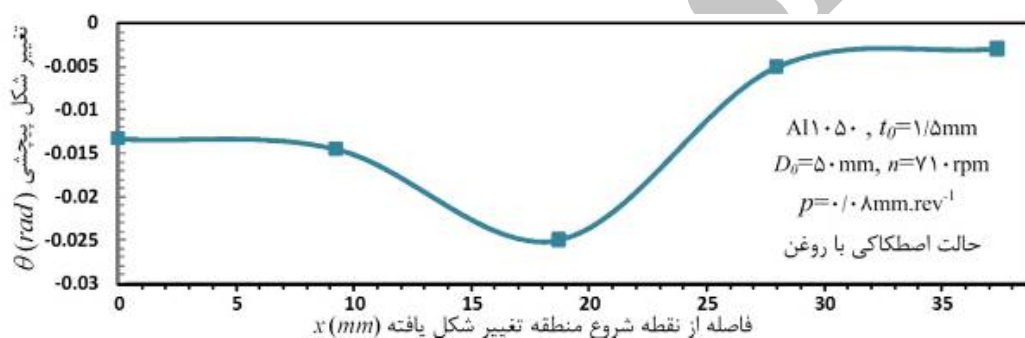
سطح قالب تولید می‌شود، قرار می‌گیرد که باعث تغییر شکل پیچشی ماده در جهت محیطی می‌شود [۹ و ۸]. مقدار این تغییر شکل بر مبنای میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سوراخ‌های

۳-۲-۴- تغییر شکل پیچشی

به‌خاطر درگیری سطح قالب با سطح نمونه، منطقه تغییر شکل تحت یک گشتاور پیچشی که توسط نیروی مماسی ناشی از

تفاوت‌هایی بین دو روش وجود دارد. روش شکل‌دهی در این سه مرجع مطابق شکل ۱۷ این‌گونه است که لوله در حال گردش بین دو غلتک چرخان شکل داده می‌شود. حرکت غلتک‌ها طبق مسیر نشان داده شده در شکل به‌صورت CNC کنترل می‌شود. جنس لوله‌ها از آلومینیوم ۱۰۵۰ است.

برای مقایسه نمونه شکل داده شده در این پژوهش (شکل ۱۲-ب) با نمونه‌های تولید شده در مراجع [۸-۱۰] ابتدا منطقه تغییر شکل یافته در نمونه‌ها را به‌صورت شکل ۱۸ به دو قسمت موازی و مخروطی تقسیم می‌کنیم. جدول ۲ مقایسه تغییر شکل در این دو قسمت در نمونه‌های مراجع [۸-۱۰] و نمونه شکل داده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): تغییر شکل پیچشی نمونه.

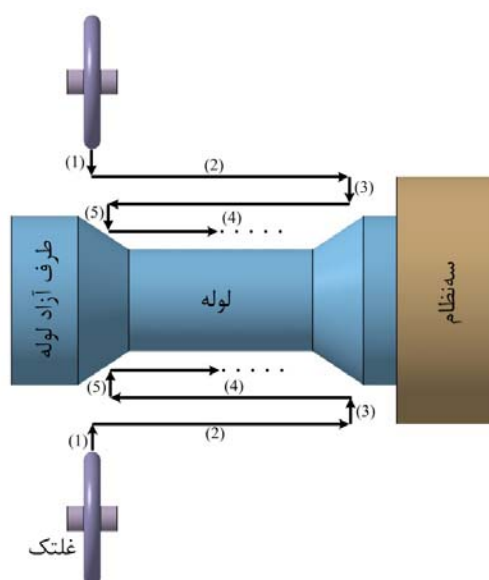
مطابق نمودار توزیع کرنش‌های ضخامتی در مراجع [۹ و ۸]، ضخامت دیواره قسمت موازی در نمونه بعد از شکل‌دهی افزایش می‌یابد و طول این قسمت کاهش می‌یابد. بنابراین وجه تشابه نمونه با لوله شکل داده شده در این مراجع شباهت در توزیع کرنش‌های محوری و ضخامتی در قسمت موازی است.

در دو قسمت مخروطی نمونه تولید شده در مراجع [۸-۱۰]، به‌خاطر نوع حرکت غلتک‌ها، طول افزایش و ضخامت دیواره کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه رأس مخروط به بالاتر از ۵۵°، در اثر کاهش بیش از حد ضخامت دیواره، لوله دچار پارگی می‌شود و قسمت موازی لوله از قسمت مخروطی آن جدا می‌شود. این مشاهده به‌عنوان حد شکل‌دهی لوله‌ها در مرجع [۱۰] بررسی شده است. مطابق نمودارهای توزیع کرنش‌های محوری و ضخامتی نمونه این پژوهش (شکل ۱۳ و ۱۴)، در دو

ایجاد شده روی نمونه‌ها نسبت به محور مرکزی لوله، بعد از شکل‌دهی اندازه‌گیری شده است. نمودار مربوط به تغییر شکل پیچشی بعد از شکل‌دهی در شکل ۱۶ آمده است. تغییر شکل پیچشی در جهت حرکت عقربه‌های ساعت، منفی در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۶ هر جا فرو رفتگی در نمونه بیشتر است، میزان تغییر شکل پیچشی در آنجا بیشتر است.

۵- مقایسه نتایج با نتایج کار انجام شده در مراجع دیگر

در مراجع [۸-۱۰] روشی برای متراکم‌سازی لوله‌های آلومینیومی به‌وسیله شکل‌دهی چرخشی معرفی شده است که اساساً با روش پژوهش حاضر فرق دارد، اما از نظر شکل نهایی لوله‌ها بعد از شکل‌دهی و توزیع کرنش‌ها شباهت‌ها و



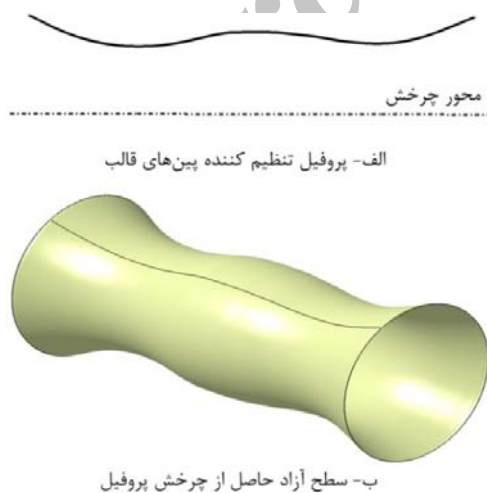
شکل (۱۷): مسیر حرکت و نحوه شکل‌دهی لوله در مراجع

[۸-۱۰].

۶- آنالیز دقت ابعادی قطعات شکل داده شده

به منظور ارزیابی دقت ابعادی نمونه های تولید شده به وسیله روش پژوهش حاضر، یک آنالیز ابعادی بر روی یکی از نمونه ها به وسیله نرم افزار CATIA انجام گرفت. نمونه نشان داده شده در شکل ۱۱- ۵ یک قطعه شیپوره ای (یا یک نازل) می باشد که با تنظیم پین های قالب به وسیله پروفیل نشان داده شده در شکل ۱۹- الف شکل داده شده است. شکل ۱۹- ب سطح آزاد این شیپوره را به عنوان یک قطعه مطلوب برای تولید نشان می دهد. شیپوره های همگرا - واگرا (مانند شیپوره گذر صوتی بخار) کاربرد فراوان در صنعت دارند و توزیع مایخ و در نتیجه تلفات ترمودینامیکی و آیرودینامیکی آنها وابسته به شکل شیپوره می باشد [۱۳]. با پیش بینی این تلفات، می توان شکلی بهینه برای این شیپوره ها طراحی کرد و به وسیله روش ارائه شده در پژوهش حاضر آن را دقیقاً مطابق قطعه طراحی شده ساخت. بدیهی است با وجود تغییرات در شکل این شیپوره ها، تولید اشکال مختلف آنها با روش حاضر و با یک قالب انعطاف پذیر، سریع و مقرون به صرفه خواهد بود.

به عنوان نمونه شیپوره طراحی شده در شکل ۱۹ پس از شکل دهی، به وسیله یک دستگاه دیجیتایزر Renishaw اسکن سه بعدی شد و ابر نقاط آن برای مقایسه با مدل طراحی شده تهیه گردید. شکل ۲۰ نحوه اسکن سه بعدی قطعه در دستگاه مذکور و شکل ۲۱ ابر نقاط مش خورده (توپر) تهیه شده از نصف قطعه را نشان می دهند.



شکل (۱۹): شکل پروفیل و هندسه قطعه مطلوب برای تولید.

قسمت مخروطی نمونه، ضخامت دیواره افزایش و طول کاهش می یابد. افزایش ضخامت دیواره با ادامه روند شکل دهی بیشتر می شود و پارگی در قطعات در اثر نازک شدن رخ نمی دهد. این پدیده مزیت روش ارائه شده در پژوهش حاضر نسبت به روش مراجع [۸-۱۰] می باشد.



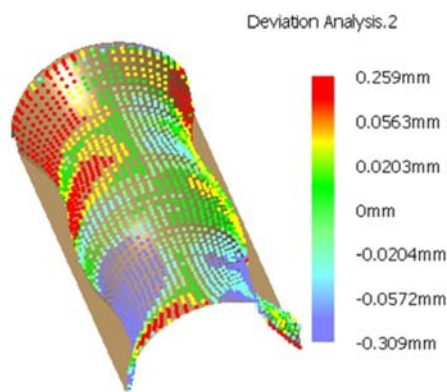
شکل (۱۸): تقسیم بندی منطقه تغییر شکل یافته در نمونه ها.

جدول (۲): مقایسه نمونه تولید شده در مراجع [۸-۱۰] و پژوهش حاضر

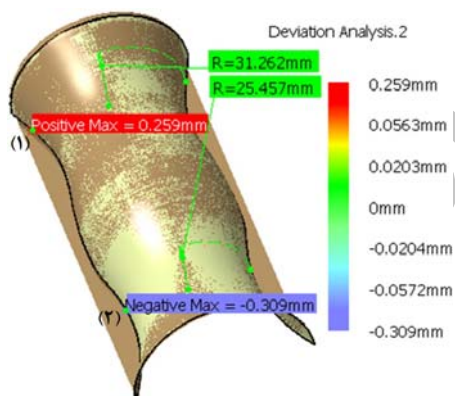
تغییر شکل	قسمت مخروطی		قسمت موازی		نمونه های مراجع [۸-۱۰]
	ضخامت دیواره	طول	ضخامت دیواره	طول	
پیشگی نمونه	کاهش	افزایش	افزایش	کاهش	نمونه های مراجع [۸-۱۰]
پیشگی نمونه	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	نمونه این پژوهش

به خاطر اینکه غلتکها برای شکل دهی لوله طبق مسیر نشان داده شده در شکل ۱۷ به صورت رفت و برگشتی در جهت محوری حرکت می کنند، جهت گشتاور پیشگی وارد به لوله از طرف غلتکها به صورت متناوب از ساعت گرد به پادساعت گرد تغییر می کند. در نتیجه تغییر شکل پیشگی لوله به طور متناوب از منفی به مثبت تغییر می کند. گرایش منظمی از تغییر شکل پیشگی در نمونه های مراجع [۸-۱۰] مشاهده نمی شود [۸]. اما در نمونه این پژوهش، همان طور که در نمودار تغییر شکل پیشگی (شکل ۱۶) نشان داده شد، گرایش تغییر شکل پیشگی به یک جهت محیطی (جهت منفی - ساعت گرد) و به صورت منظم می باشد.

واقعی است. با اندازه‌گیری قطر مقطع در این نقاط بر روی سطح آزاد طراحی شده، حداکثر میزان عدم گردی قطعه مابین ۰/۸۲٪ به طرف بیرون و ۱/۲۱٪ به طرف داخل به دست می‌آید که با توجه به خطاهای احتمالی گفته شده، این مقادیر برای روش ارائه شده قابل قبول است.



شکل (۲۲): نتایج حاصل از مقایسه ابعادی قطعه طراحی شده با قطعه شکل داده شده.



شکل (۲۳): حداکثر اختلاف قطعه شکل داده شده نسبت به مدل طراحی شده و میزان عدم گردی آن.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای اولین بار یک قالب گسسته با قابلیت پیکره‌بندی مجدد برای شکل‌دهی قطعات مختلف متقارن محوری با اشکال گوناگون در فرآیند شکل‌دهی چرخشی طراحی و ساخته شده است. نتایج حاصل از نمونه‌های تولید شده توسط این قالب نشان داده است که امکان تولید و شکل‌دهی قطعات دوار توسط تکنیک قالب با قابلیت

در این مرحله کافی است سطح آزاد طراحی شده در شکل ۱۹-ب را با ابر نقاط به دست آمده در شکل ۲۱ هم‌پوشانی کنیم و اختلافات را بررسی کنیم. برای این کار نصف سطح آزاد طراحی شده با ابر نقاط هم‌پوشانی می‌شود و دقت ابعادی قطعه شکل داده شده نسبت به مدل طراحی شده در محیط ابر نقاط نرم‌افزار CATIA مورد آنالیز قرار می‌گیرد.



شکل (۲۰): نحوه برداشت ابر نقاط قطعه شکل داده شده.

شکل ۲۲ نتایج این آنالیز را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج به دست آمده در شکل مشاهده می‌شود که اختلاف ابعادی روش شکل‌دهی ارائه شده در پژوهش حاضر برای تولید قطعات دوار در حدود $0/3$ تا $+0/3$ میلی‌متر است. این اختلاف با توجه به برگشت فنری قطعه پس از شکل‌دهی و همچنین خطای موجود در دستگاه تراش و سایر موارد مثل خطای نرم‌افزار مقدار قابل قبولی می‌باشد.



شکل (۲۱): ابر نقاط قطعه شکل داده شده.

نقاط ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل ۲۳ به ترتیب بیشترین اختلاف قطعه شکل داده شده نسبت به قطعه طراحی شده را به سمت خارج و داخل نشان می‌دهند. در حقیقت قطعه شکل داده شده در نقطه ۱ به اندازه ۰/۲۵۹ میلی‌متر و در نقطه ۲ به اندازه ۰/۳۰۹ میلی‌متر به ترتیب بیرون‌تر و داخل‌تر از اندازه

- Metal Forming”, J. Manufacturing Sys., Vol. 17, No. 6, pp. 436-454, 1998.
2. Walczyk, D.F., Lakshmikanthan, J., and Kirk, D. “Development of a Reconfigurable Tool for Forming Aircraft Body Panels”, J. Manufacturing Sys., Vol. 17, No. 4, pp. 287-296, 1998.
 3. Walczyk, D.F. and Hardt, D.E. “A Comparison of Rapid Fabrication Methods for Sheet Metal Forming Dies”, J. Manufacturing Sci. and Eng., Vol. 121, No. 1, pp. 214-224, 1999.
 4. Olsen, B.A. “Die Forming of Sheet Metal Using Discrete Surface”, M.S Thesis, MIT, Cambridge, 1980.
 5. Hardt, D.E., Olsen B.A., Allison B.T., and Pasch, K. “Sheet Metal Forming with Discrete Die Surfaces”, Proceedings of Ninth North American Manufacturing Research Conf., pp. 140-144, 1981.
 6. Papazian, J.M., Anagnostou, E.L., Christ, J.R., Hoitsma, D., Ogilvie, P., and Schwarz, R. “Tooling for Rapid Sheet Metal Parts Production”, 6th Joint FAA/DoD/NASA Conf. on Aging Aircraft, San Francisco, CA, USA, September 16-19, 2002.
 7. Owodunni, O., Diaz-Rozo, J., and Hinduja, S. “Development and Evaluation of a Low-Cost Computer Controlled Reconfigurable Rapid Tool”, Computer-aided Design and Applications, Vol. 1, No's. 1-4, pp. 101-108, 2004.
 8. Yao, J. and Murata, M. “Effects of Indented Feed of Roller Tool on Parallel Spinning of Circular Aluminum Tube”, J. Materials Processing Tech., Vol. 128, No's. 1-3, pp. 274-279, 2002.
 9. Yao, J. and Murata, M. “An Experimental Study on Paraxial Spinning of One Tube End”, J. Materials Proc. Tech., Vol. 128, No's. 1-3, pp. 324-329, 2002.
 10. Yao, J. and Murata, M. “An Experimental Study on Spinning of Taper Shape on Tube End”, J. Materials Proc. Tech., Vol. 166, No. 3, pp. 405-410, 2005.
 11. Murata, M., Kuboki, T., and Murai, T. “Compression Spinning of Circular Magnesium Tube Using Heated Roller Tool”, J. Materials Proc. Tech., Vol's. 162-163, (SPEC. No.), pp. 540-545, 2005.
 12. Amini, M., Bakhshi, M., and Hosseinipour, S.J., “Development of Reconfigurable Tooling for Metal Spinning”, Proceedings of 2-nd Tehran Int. Conf. of Manufacturing Eng. (TICME), Tehran, 2007.
 13. Teymourash, A.R., Mahpeykar, M.R., and Lakzian, E., “Controlling the Intensity and Location of Spontaneous Condensation in a 2-D Laval Nozzle by Spraying Water Droplets at the Throat”, Aerospace Mechanics Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 35-49, 2011 (In Persian).

پیکره‌بندی مجدد با دقت مطلوب وجود دارد. سادگی در طراحی و ساخت و عدم نیاز به قالب‌های جداگانه و متعدد، هزینه‌ها و زمان مربوط به طراحی و ساخت قالب (قالب‌ها) در فرآیند شکل‌دهی چرخشی را نیز کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از تولید نمونه‌ها عبارت است از:

۱- استفاده از نوار فولادی برای کاهش ناپیوستگی سطح تشکیل شده از آرایش بین‌ها باعث هموار شدن سطح قالب و جلوگیری از نفوذ فلز درون فواصل خالی بین پین‌ها می‌شود و از ایجاد عیوب برآمدگی بر روی سطح لوله پیشگیری می‌کند.

۲- جریان فلز در حین شکل‌دهی لوله به‌طرف دور شدن از منبع چرخش (سه نظام) است. بنابراین در ابتدای شکل‌دهی در مرحله اول باید طرفی از لوله که دور از منبع چرخش است، شکل داده شود و در مرحله دوم طرف دیگر شکل داده شود. مرحله سوم برای ایجاد شکل نهایی قطعه انجام می‌گیرد.

۳- بهترین شرایط ماشین‌کاری برای شکل‌دهی لوله با قالب گسسته در این پژوهش در سرعت چرخشی 710 rpm و کمترین نرخ پیشروی قالب برابر 0.08 mm.rev^{-1} به‌دست آمد. برای کاهش اصطکاک بین سطح قالب و قطعه روان‌کاری خوب با روغن نیاز است.

۴- بیشترین کاهش قطر در لوله‌ها (D/D_0) به اندازه $\frac{1}{2}$ می‌باشد.

۵- مقادیر کرنش‌های محوری، منفی و مقادیر کرنش‌های ضخامتی مثبت هستند که نشان‌دهنده کاهش طول و افزایش ضخامت دیواره لوله پس از شکل‌دهی است. افزایش ضخامت دیواره در قسمت وسط لوله بیشتر از طرفین آن می‌باشد. به‌خاطر فشار محوری وارد از طرف مرگ‌ها کاهش طول لوله در طرفین بیشتر از قسمت وسط آن است.

۶- هر جا که فرورفتگی در لوله بیشتر باشد، تغییر شکل پیچشی در آنجا بیشتر است و

۷- میزان خطای ابعادی قطعات دوار شکل‌داده‌شده با روش ارائه شده بین 0.3% تا $0.3\% +$ و حداکثر میزان عدم گردی آنها $1/21\%$ است که با توجه به خطاهای احتمالی، این مقادیر قابل قبول می‌باشند.

مراجع

1. Walczyk, D.F. and Hardt, D.E. “Design and Analysis of Reconfigurable Discrete Dies for Sheet