مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۱۱-۲۱

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/jsfm.2017.938

بررسی تجربی و عددی پرشدگی قالب و توزیع ضخامت هیدروفرمینگ لوله‌های خمیده با شعاع انحنا و قطر غیر یکنواخت در قالب با بوش‌های متحرک

مجید محمد حسین زاده[۱]، حسین قربانی منقاری[۲،*]، عبدالحمید گرجی[۳] و مهران قاسمپور[۱]

[۱] کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

[۲] کارشناس ارشد ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۳] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹

چکیده

در شکل دهی قطعات لوله‌ای به روش هیدروفرمینگ، دستیابی به شکل‌های با گوشه‌های تیز، بسیار در عمل مشکل یا نا ممکن است؛ همچنین پر شدن کامل حفره‌های قالب و ایجاد گوشه‌های تیز، مستلزم بالا بردن فشار است که این امر، باعث نازک شدگی موضعی و پاره شدن گوشه های لوله می‌شود؛ بنابراین گوشه‌های قطعات در مقایسه با دیگر قسمت‌ها، عموما دارای ضخامت کمتری هستند. در قالب جدید که باعث تیز شدن گوشه‌های قطعه نهایی می‌شود، شکل دهی لوله شامل، دو مرحله بالج و نهایی است. در این مقاله، یک قالب جدید برای تولید لوله خمیده با شعاع انحنا و قطر غیر یکنواخت از جنس استنلس استیل با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی اجزای محدود ارائه شده است. از جمله مزایای این قالب نسبت به قالب‌های متداول هیدروفرمینگ، داشتن دو بوش متحرک درون قالب برای ایجاد پله‌های پر شده کامل است. حرکت بوش‌های متحرک باعث می‌شود که قطعه‌کار هنگام تغذیه با حرکت همزمان بوش‌ها حرکت کند که باعث از بین رفتن اصطکاک بین قالب و قطعه‌کار در محل قرارگیری بوش‌ها می‌شود.پیچیده نبودن ساختار قالب و پایین بودن فشار شکل دهی، از دیگر مزایای قالب ارائه شده است؛ همچنین، توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در قالب جدید نسبت به قطعات تولید شده در قالب متداول، یکنواخت تر بوده است.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله؛ لوله‌های خمیده با قطر غیر یکنواخت؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ چروکیدگی.

Experimental and Numerical Investigation of Die Filling and Thickness Variation at Curved Tubes With Radius of Curvature and Unequal Diameter Tube Hydroforming Die With Movable Bushes

M. Mohammad Hosseinzadeh[1], H. Ghorbani Menghari[2,*], A. Gorji[3], M. Ghasempour[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Sari Branch, Sari, Iran.

[2] Department of Mechanical Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran.

[3] Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Abstract

In forming tubular parts by hydroforming and access to forms with sharp corner is very difficult or impossible procedure. In addition, the stuffed molds cavity and created sharp corners need to increase pressure which causes thinning positional and tearing corner of tube. So, the corners of parts compared with other parts, usually has less thickness. The final pieces corner are sharpens in the new die the tube forming consists of two levels, bulge and final. In this paper, a new die capable of producing curved tubes with radius of curvature and unequal diameter specimens is presented by experimental test and finite element simulation. Compared with conventional hydroforming dies, it consists of two moving bushes to produce completely filled steps. Moving bushes can be considered as one of the advantages of the new die. When feeding, the movement of the specimen is accompanied by the movements of the bushes which results in elimination of friction. The simple die structure and low pressure forming is another advantage of the form provided. Also, the proportion of the thickness distribution in the new die to the parts manufactured in conventional die is more uniform.

Keywords: Tube Hydroforming; Curved Tubes with Unequal Diameter; Finite Element Simulation; Wrinkling.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۹۰۵۳۲۷۳

آدرس پست الکترونیک: h.ghorbanimenghari@me.iut.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ لوله، روش نسبتا جدیدی برای شکل‌دادن لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای اصلی این فرآیند، کم کردن وزن قطعات و کم کردن عملیات جوشکاری است و به همین خاطر در سال‌های اخیر، مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته است. در این فرآیند، لوله‌های پله‌ای شکل، مستقیم و یا خمیده تحت فشار سیال به اشکال مورد نظر در می‌آیند. در این فرایند پس از تزریق سیال با فشار بالا به داخل لوله و همزمان با تغذیه محوری و شعاعی، شکل‌دهی آغاز می‌شود که سبب انبساط لوله و رسیدن به اشکال مورد نظر می‌شود [۱]. از جمله عیوبی که در این فرآیند وجود دارد، می‌توان به پرنشدن کامل قالب و پارگی لوله نام برد. محققان بسیاری در زمینه هیدروفرمینگ لوله تحقیقاتی انجام داده‌اند. لوح موسوی و همکارانش [۲] در پژوهشی، یک روش جدید برای بهبود پر کردن گوشه قالب در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل به کمک کنترل چروکیدگی مفید تحت فشار نوسانی را ابداع کردند. این محققان نشان دادند که فشار نوسانی علاوه بر بهبود شکل‌پذیری لوله، باعث بهبود درصد پرشدگی گوشه قالب نیز می‌شود؛ همچنین، در این پژوهش نشان داده شد که با نوسانی شدن فشار می‌توان از چروکیدگی لوله در مرحله انبساط آزاد جلوگیری کرد. آنها در مطالعه خود از این ایده بهره جستند که با کنترل چروکیدگی‌های قابل برگشت یا چروکیدگی‌های مفید، می‌توان شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای را بهبود بخشید.

چن و همکاران [۳] تاثیر فشار شکل‌دهی را در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که فشار شکل‌دهی به جنس لوله، ضخامت لوله و کمترین شعاع گوشه شکل نهایی محدود می‌شود. کک [۴] اثر مسیر بارگذاری و فشار داخلی بر حسب تغذیه محوری را در فرآیند هیدروفرمینگ و خواص مواد را بر هندسه و ضخامت محصول با شبیه‌سازی و کار تجربی بررسی کرد. قطعات مورد بررسی آنها، لوله‌های سه راهی و لوله‌های با شکل ساده بوده است. او برای نشان دادن این مطلب، از روش اجزای محدود استفاده کرد و به این نتیجه رسید که در شرایط مورد بررسی آن‌ها، تاثیر نوع و مشخصه اعمال بار بر هندسه و ضخامت محصول، بیشتر از تاثیر نوع و جنس لوله در فرآیند است. قربانی منقاری و همکارانش [۵]، روش جدیدی را برای تولید لوله‌های دو پله‌ای با قالب چند مرحله‌ای در فرآیند هیدروفرمینگ بررسی کردند. آنها با انجام بهینه سازی و مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار اباکوس و همچنین مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی توانسته‌اند، لوله‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت تر و گوشه‌های کاملا پر شده با استفاده از قالب جدید نسبت به قالب‌های متداول تولید کنند.

موری و همکارانش [۶]، برای پی بردن به ساز وکار بهبود شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ نوسانی لوله، ضریب اصطکاک بین لوله و قالب در ناحیه تغذیه را برای فشار نوسانی و ثابت مقایسه کردند. آنها نشان دادند که فشار نوسانی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب اصطکاک این ناحیه ندارد و بهبود شکل‌پذیری بوسیله فشار نوسانی نمی‌تواند در اثر کاهش اصطکاک باشد. شیجیان و همکارانش [۷]، به تحلیل نظری، عددی و علمی رفتار چروکیدگی در هیدروفرمینگ لوله و چگونگی کنترل و استفاده از آنها پرداختند. آنها نشان دادند که برخی از این چروکیدگی‌های مفید، به عنوان پیش‌فرم برای افزایش شکل‌پذیری به حساب می‌آیند. قربانی منقاری و همکارانش [۸]، روشی برای بهبود توزیع ضخامت و پر شدگی گوشه‌های لوله‌های جعبه‌ای دو پله‌ای مسی در فرآیند هیدروفرمینگ را بررسی کردند. آنها در این مقاله با ارائه یک قالب جدید توانسته‌اند، لوله جعبه‌ای دو پله‌ای را بدون نازک شدگی و با توزیع ضخامت مناسب تولید کنند؛ همچنین میزان فشار در قالب جدید نسبت به قالب‌های متداول کاهش شدیدی یافته است.

نیکر و همکارانش [۹]، در پژوهشی فرآیند هیدروفرمینگ در قالب‌های متداول را که در پژوهش خود از آن با نام هیدروفرمینگ فشار بالا یاد کرده‌اند، با هیدروفرمینگ در قالب پیشنهادی خود که در آن از فشار داخلی کمی استفاده می‌شود، به صورت اجزای محدود مورد مقایسه قرار داده‌اند. هدف آن پژوهش، تبدیل مقطع دایره‌ای لوله، به مقطع مربعی به طول ضلع ۵۰ MM و شعاع گوشه ۱۲ MM بوده است. در هیدروفرمینگ فشار بالا، ابتدا لوله در نیمه پایینی قالب قرار داده شده، بعد از آن نیمه بالایی قالب روی آن قرار می‌گیرد. سپس با بالا بردن فشار داخلی، لوله با دیواره قالب تماس پیدا کرده و شکل قالب را به خود می‌گیرد.

Archive of SID

www.SID.ir

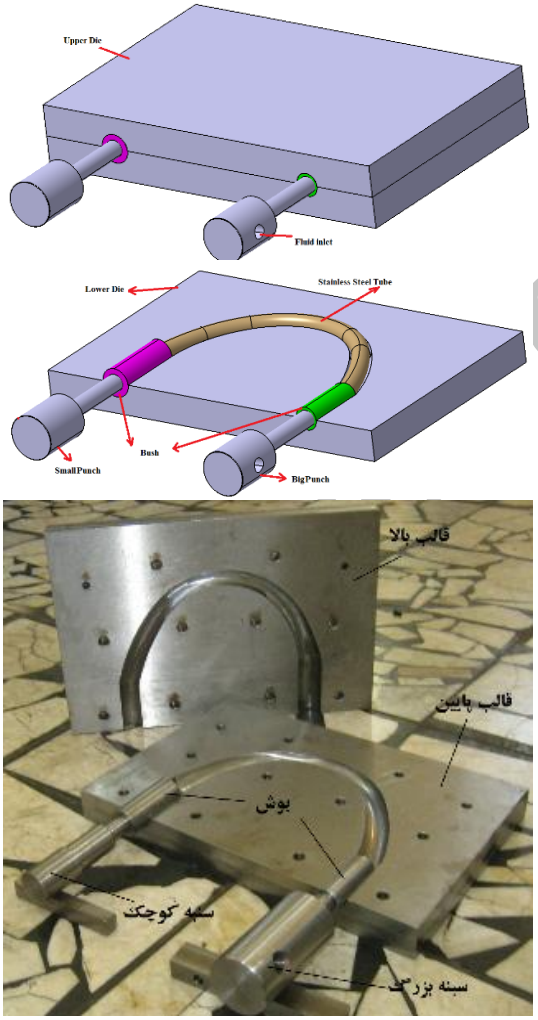
در هیدروفرمینگ فشار پایین که توسط نویسندگان آن مقاله توسعه داده شده است، لوله بین نیمه بالایی و پایینی قالب قرار داده شده و پس از آن نیمه بالایی قالب (قسمت متحرک) به سمت نیمه پایینی قالب (قسمت ثابت) حرکت کرده، سبب می‌شود که لوله‌ای که سیال تحت فشار در آن است، به فرم قالب تبدیل شود.

توزیع ضخامت در قطعات به دست آمده نیز، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که توزیع ضخامت هموارتری در محیط مقطع لوله در فرآیند هیدروفرمینگ فشار پایین دیده می‌شود. در پژوهش یاد شده اثر اصطکاک نیز، روی توزیع تنش و توزیع ضخامت در لوله در فرآیندهای فشار بالا و فشار پایین بررسی شده است. نتایج نشان داد که وجود اصطکاک سبب افزایش تنش اعمالی به لوله و همچنین افزایش میزان نازک‌شدگی و کاهش میزان یکنواختی توزیع ضخامت در لوله می‌شود؛ همچنین این نتیجه حاصل شد که میزان افزایش تنش و کاهش یکنواختی توزیع ضخامت در اثر وجود اصطکاک در فرآیند فشار بالا، بسیار بیشتر از فرآیند فشار پایین است؛ لذا فرآیند فشار بالا نسبت به اصطکاک، بسیار حساس‌تر است.

بالابردن فشار سیال حین فرایند هیدروفرمینگ لوله با هدف رسیدن به شعاع گوشه کمتر، سبب کاهش بیش از حد ضخامت در نواحی مجاور گوشه‌ها در قطعه می‌شود که در قالب‌های متداول هیدروفرمینگ بسیار دیده شده است؛ لذا در این مقاله سعی شده است از طریق ارائه یک روش جدید که در ان از ۲ بوش متحرک که همزمان با قطعه کار حرکت می‌نمایند، کنترل بالاتری در شکل‌گیری و پر شدن گوشه‌های قالب برای ساخت قطعات خمیده با قطر غیر یکنواخت را ارائه داد و از نازک شدگی و پارگی لوله در نواحی گوشه‌ها جلوگیری کرد.

۱-۱- معرفی قالب جدید

در مکانیزم قالب جدید ارائه شده که ایده آن از پژوهش الیاسی و همکاران [۱۰]، پیرامون بهبود پرشدگی گوشه‌های قالب مربوط به لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای گرفته شده است، علاوه بر دو سنبه که از سمت بالاوظیفه تغذیه محوری لوله به درون حفره قالب را برعهده دارند، دو بوش متحرک نیز در ساختمان قالب تعبیه شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این فرآیند، ابتدا لوله درون قالب قرار گرفته، توسط اورینگ‌های نصب شده در انتهای سنبه‌ها، از دو طرف آب‌بندی می‌شود. سپس روغن پرفشار از واحد هیدرولیک و از طریق سوراخ مرکزی سنبه بزرگ، به داخل لوله اعمال می‌شود. در مرحله اول تا حدودی فشار افزایش پیدا کرده، همزمان با افزایش فشار دو طرف سنبه حرکت اولیه (بالج) را انجام می‌دهد که با حرکت سنبه‌ها بوش‌ها هم حرکت می‌کند و عمل تغذیه اولیه انجام می‌شود. در مرحله دوم (نهایی)، با افزایش فشار میزان تغذیه محوری هم افزایش می‌یابد تا جایی که به میزان تعیین شده و حداکثر خود می‌رسند و در نهایت قطعه مورد نظر شکل می‌گیرد.



شکل ۱- نمای قالب جدید هیدروفرمینگ لوله خمیده

www.SID.ir

از جمله تفاوت‌های این قالب با قالب ارائه شده در مرجع [۱۰]، استفاده از ۲ سنبه متحرک و هر دو سنبه از بالا و به عنوان تغذیه کننده برای شکل‌گیری لوله خمیده با قطر غیر یکنواخت بوده است که نیاز به مکانیزیم متفاوتی برای شکل‌گیری لوله دارد؛ در حالیکه قالب ارائه شده در مرجع [۱۰] برای شکل‌گیری لوله تک پله استوانه‌ای کاربرد دارد که مکانیزم ساده‌ای برای شکل‌گیری قطعه‌کار نهایی دارد؛ به طوری که در قالب ارائه شده در مرجع [۱۰]، یک سنبه ثابت بوده، فقط دیگری متحرک بوده و عمل تغذیه را انجام می‌دهد.

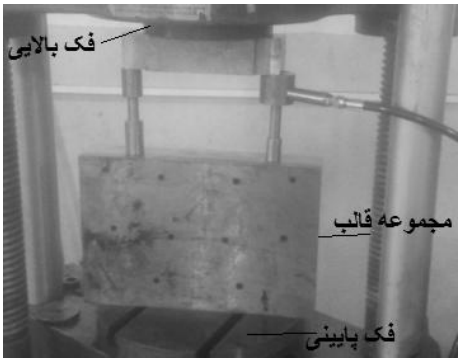
۲- مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات تجربی از یک دستگاه پرس هیدرولیکی چند منظوره با ظرفیت ۶۰۰KN در آزمایشات با قابلیت اتصال به کامپیوتر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اعمال فشار داخلی در نمونه لوله تحت آزمایش، نیاز به استفاده از یک پمپ هیدرولیک است. برای این منظور، از یک واحد فشار با ماکزیمم ظرفیت فشار ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. تنظیم فشار اعمالی توسط دستگاه به کمک تنظیم دور پمپ و با استفاده از یک پیچ تنظیم امکان‌پذیر است. برای کنترل مقدار فشار اعمالی به لوله، از یک گیج کنترل فشار در محل ورود روغن به داخل لوله استفاده شده است. شکل ۲، نشان دهنده پرس هیدرولیکی به همراه مجموعه‌ی قالب است.

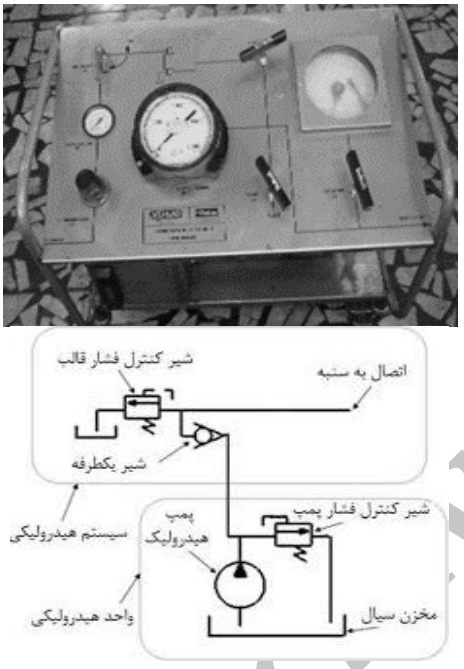
در انجام این پژوهش، از یک نوع لوله بدون درز از جنس استنلس استیل استفاده شده است. شکل ۳، نشان دهنده نمودار تنش-کرنش حقیقی لوله استنلس استیل و جدول ۱ نیز نشان دهنده خواص مکانیکی لوله استنلس استیل است.

۳- شبیه سازی اجزاء محدود

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۳ استفاده شده است. به دلیل متقارن بودن قطعه و قالب، برای کاهش زمان شبیه‌سازی نصف قالب و لوله مدل شده است. لوله بصورت یک ماده‌ی الاستیک-پلاستیک و همسانگرد در نظر گرفته شده است. برای المان‌بندی لوله از المان چهار گره‌ای S4R و انتگرال کاهش یافته استفاده شده است که دارای رفتار مناسب برای تحلیل مسائل تنش صفحه‌ای است. برای المان

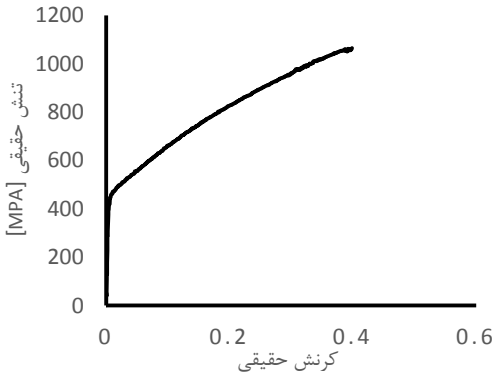


(الف)



(ب)

شکل ۲- دستگاه پرس به همراه مجموعه‌ی قالب



شکل ۳- منحنی تنش و کرنش حقیقی لوله‌ی استنلس استیل به دست آمده از آزمایش کشش لوله

Archive of SID

www.SID.ir

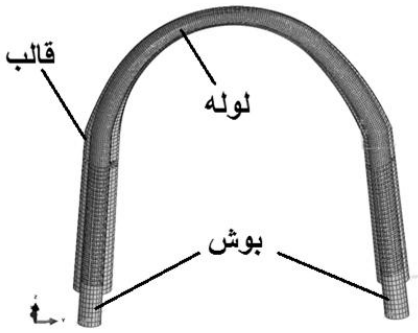
بندی قالب و سنبه‌ها، از المان صلب R3D4 استفاده شده است که یک المان سه بعدی چهار گره‌ای صلب با تابع تقریب درجه دوم است. لازم به ذکر می باشد که المان‌های استفاده شده برای لوله و قالب و بوش‌ها، به ترتیب ۶۷۶۸، ۲۶۱۰، ۳۷۰ و ۴۵۱ است. ضریب اصطکاک کلمب میان سطوح قالب و قطعه‌کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. شکل ۴، نشان دهنده مدل اجزای محدود ایجاد شده در نرم‌افزار است.

شکل ۵ مراحل شکل‌گیری لوله در قالب خمیده با قطر غیر یکنواخت را نشان می‌دهد.

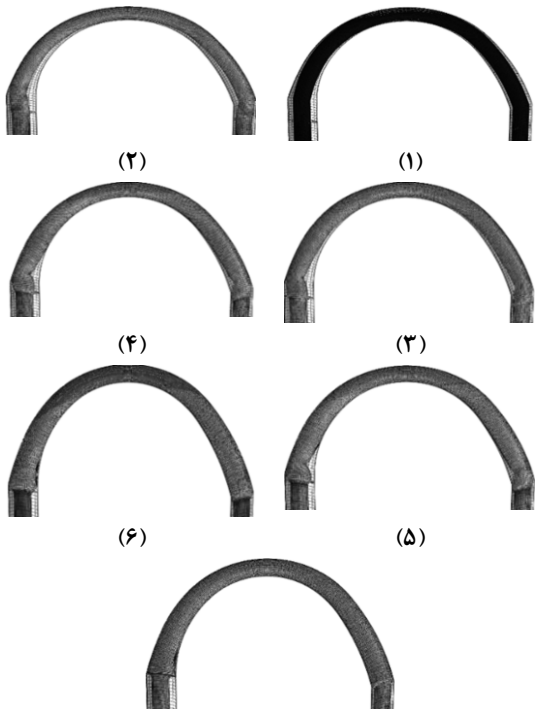
شکل ۶ و ۷ به ترتیب، مقایسه‌ای از پرشدگی گوشه قالب را برای هر دو قالب قدیم و جدید نشان می‌دهد.

جدول ۱- ابعاد و خواص مکانیکی لوله‌ی استنلس استیل مورد آزمایش

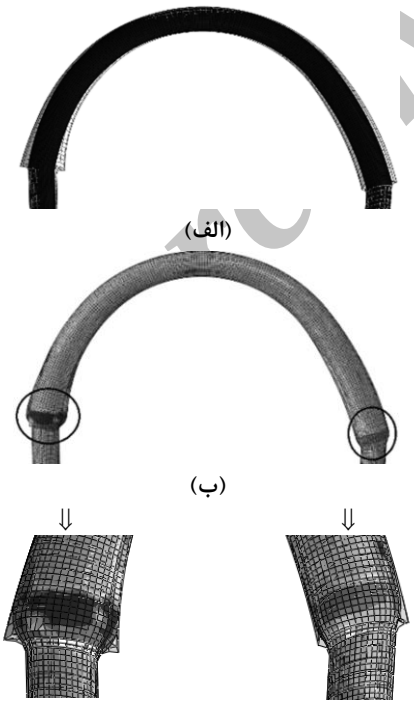
قطر لوله	۱۹/۰۵ میلیمتر
طول لوله	۷۵۰میلیمتر
ضخامت لوله	۱/۲۴ میلیمتر
تنش تسلیم لوله	۴۱۶ مگاپاسکال
ضریب مقاومت (K)	۱۲۴۴ مگاپاسکال
چگالی	۷۸۰۰ مگاپاسکال
مدول یانگ (E)	۲۱۰ گیگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۳
ضریب کرنش سختی (n)	۰/۲۵۱
ضریب اصطکاک	۰/۱



شکل ۴- مدل اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله خمیده توسط روش بوش متحرک



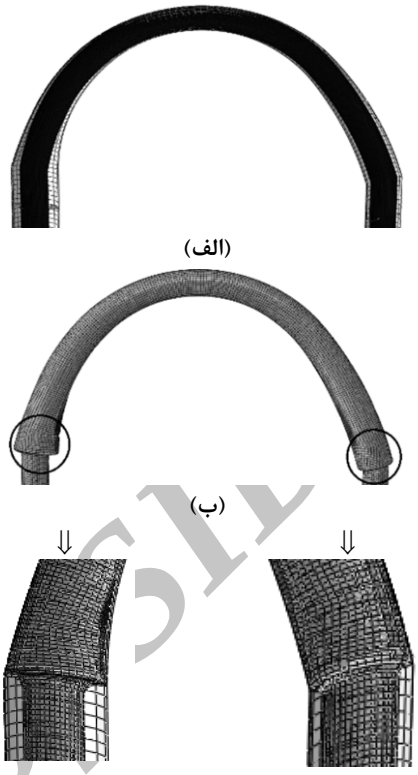
شکل ۵- مراحل شکل‌گیری لوله در قالب خمیده با قطر غیر یکنواخت جدید



شکل۶- پرشدگی گوشه قالب در قالب سنتی

Archive of SID

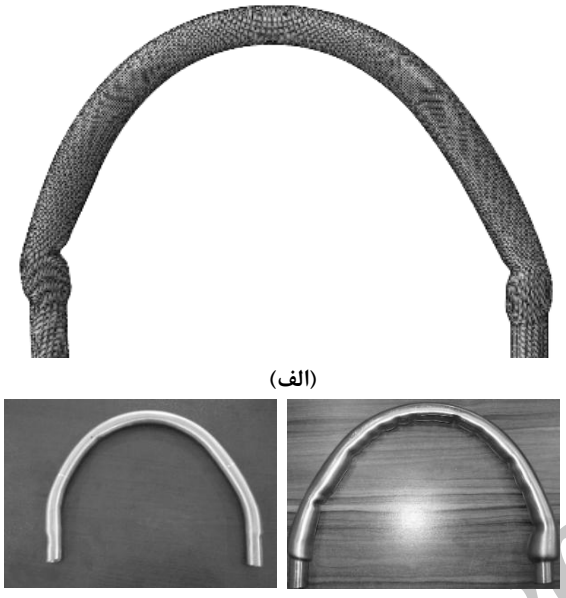
www.SID.ir



شکل ۷- پرشدگی گوشه قالب در قالب خمیده با قطر غیر یکنواخت جدید

۴- بحث و نتایج

به منظور بررسی پدیده چروکیدگی و میزان پرشدگی قالب، از نمونه لوله‌هایی با طول اولیه ۷۵۰ میلیمتر استفاده شد. سرعت پرس در تمامی آزمایشات روی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه تنظیم گردید. میزان فشار داخلی لوله MPA ۸۵ در نظر گرفته شده است؛ همچنین با افزایش فشار داخلی در همین مرحله تغذیه محوری اولیه هم اعمال می‌شود. افزایش فشار داخلی لوله بیش از این مقدار و بدون اعمال تغذیه محوری یا تغذیه محوری کم، سبب نازک شدگی بیش از حد لوله و بروز پارگی در آن می شود؛ همچنین اعمال فشار داخلی کمتر از MPA ۸۵، باعث بوجود آمدن چروک در لوله هنگام تغذیه محوری می‌شود. شکل ۸ الف و ب قطعات بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی را در فشار MPA ۸۵ با تغذیه محوری ۲۵ میلیمتر را نشان می دهد که منجر به چروک در لوله شده است. بدیهی است با افزایش فشار، قطر ناحیه بالج لوله‌های تغییر شکل یافته افزایش پیدا کرده، به علت اینکه مواد کافی در راستای محیطی ناحیه انبساط تغذیه نمی‌شود، در ناحیه انبساط نازک شدگی شدید بوجود می‌آید. شکل ۹، لوله تغییر شکل یافته در فشار اولیه MPA ۹۲ را نشان می‌دهد که در آن حداکثر کاهش ضخامت و در نتیجه عیب پارگی رخ داده است.



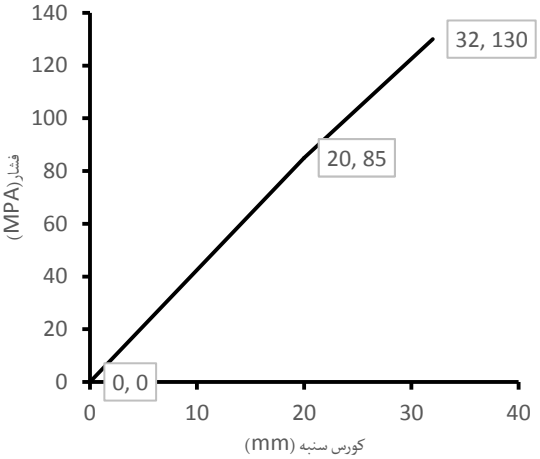
شکل ۸- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج در فشار MPA ۸۵ با تغذیه ۲۵ میلیمتر و ایجاد عیوب چروکیدگی در لوله الف) به دست آمده از شبیه سازی و ب) به دست آمده از آزمایش تجربی

شکل ۹- قطعه شکل داده شده در مرحله بالج در فشار MPA ۹۲ به دست آمده از آزمایش تجربی

Archive of SID

www.SID.ir

در گام بعد با افزایش فشار اولیه تا ۱۳۰ مگا پاسکال عمل تغذیه نیز به مقدار ۳۲ میلی‌متر برای هر یک از بوش‌ها، با حرکت سنبه‌ها با استفاده از مسیر فشار که در شکل ۱۰ نشان داده شده، انجام شده است. قطعه شکل داده شده با استفاده از مسیر فشار جدید استفاده شده در آزمایشگاه، در شکل ۱۱ و قطعه شبیه‌سازی شده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

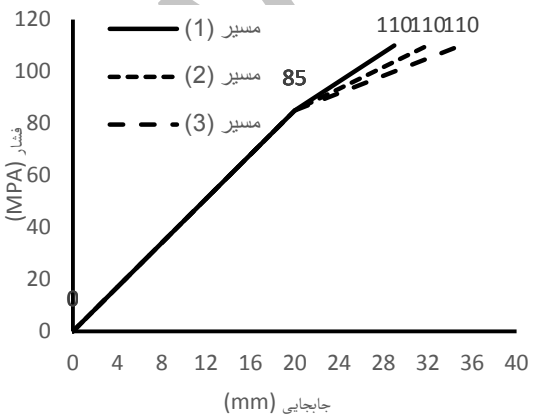


شکل ۱۰- نمونه مسیر فشار مورد استفاده در قالب هیدروفرمینگ خمیده با قطر غیر یکنواخت

شکل ۱۱- قطعه شکل داده شده بدون پارگی با استفاده از مسیر فشار استفاده شده در آزمایشگاه

در ادامه این پروژه به بررسی فشارهای مختلف با استفاده از مقدار تغذیه متفاوت خواهیم پرداخت و چگونگی ایجاد قطعه مناسب مورد نظر را با استفاده از شبیه سازی بررسی می‌کنیم. به منظور بررسی امکان پر شدن گوشه‌های لوله و حذف چروکیدگی لوله و ایجاد لوله تغییر شکل یافته با مسیرهای فشار دیگر، ۹ مسیر فشار با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود به کار گرفته شده است. در این مسیرهای فشار در مرحله اولیه، با حرکت کردن پرس و سنبه‌ها و مقدار تغذیه محوری اولیه تا ۲۰ میلی‌متر فشار تا ۸۵ MPA بالا برده شده، سپس با ثابت نگه داشتن فشار اولیه، تغذیه محوری ۲۹، ۳۲، ۳۵ میلی‌متر به کار گرفته شده است. همزمان با زیاد شدن تغذیه محوری فشار داخلی هم افزایش پیدا می‌کند. در این مرحله فشارهای ۱۱۰، ۱۳۰،۱۲۰ MPA به کار برده شده است. شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب، نمودار اعمال فشار در فشار نهایی ۱۱۰ MPA و کانتور تنش را برای مسیر دوم نشان می‌دهد.

شکل ۱۲- قطعه شکل داده شده با استفاده از مسیر فشار شکل ۱۰ به دست آمده از شبیه سازی

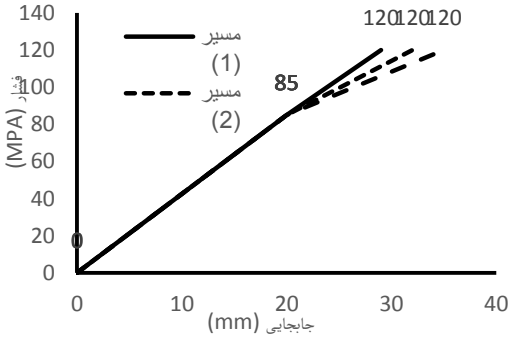


شکل ۱۳- نمودار مسیر فشارهای مختلف برای فشار نهایی ۱۱۰ MPA

www.SID.ir

شکل ۱۵ و ۱۶ نیز به ترتیب، نمودار اعمال فشار در فشار نهایی MPA ۱۲۰ و کانتور تنش را برای مسیر دوم را نشان می‌دهد. شکل ۱۷ و ۱۸ نیز به ترتیب، نمودار اعمال فشار در فشار نهایی MPA ۱۳۰ و کانتور تنش را برای مسیر دوم را نشان می‌دهد.

شکل ۱۴- شکل هندسی و کانتور توزیع ضخامت برای مسیر فشار ۲ شکل ۱۳

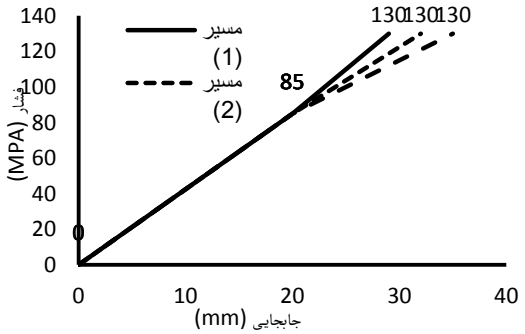


شکل ۱۵- نمودار مسیر فشارهای مختلف برای فشار MPA ۱۲۰

شکل ۱۶- شکل هندسی و کانتور توزیع ضخامت برای مسیر فشار ۲ شکل ۱۵

میزان پر شدگی گوشه‌های قالب با استفاده از فشار نهایی MPA ۱۳۰ نسبت به فشارهای ۱۱۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال بهتر شده است؛ همچنین میزان توزیع ضخامت در مسیرهای فشار سه‌گانه با فشار نهایی۱۳۰ مگاپاسکال در قطعات نسبت به قطعات شکل داده شده در فشارهای نهایی ۱۱۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال بهتر شده است که دلیل آن، بالا بردن سطح فشار داخلی لوله در مرحله نهایی است. با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده، با انتخاب فشار و تغذیه مناسب و بهینه، امکان ایجاد قطعه سالم با پرشدگی مناسب و مطلوب در گوشه‌ها فراهم می‌شود؛ همچنین با تطابق خوب میان فشار داخلی و تغذیه محوری، می‌توان قطعه‌ای با توزیع ضخامت مناسب و یکنواختی ایجاد کرد و نیز از به وجود آوردن عیوبی چون چروکیدگی و پارگی در قطعه کار جلوگیری به عمل آورد.

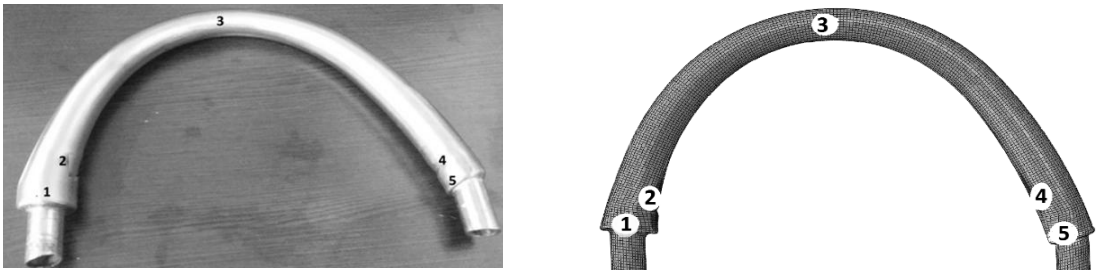
در ادامه به بررسی توزیع ضخامت در پنج مقطع لوله برای قطعه سالم خمیده با شعاع انحنا و قطر غیر یکنواخت خواهیم پرداخت که با استفاده از مسیر فشار ۲، شکل ۱۷ شکل گرفته است. مقاطع انتخاب شده به منظور بررسی توزیع ضخامت در شکل ۱۹، برای قطعه خمیده با قطر غیر یکنواخت حاصل از شبیه‌سازی و قطعه تجربی، نمایش داده شده است.



شکل ۱۷- نمودار مسیر فشارهای مختلف برای فشار MPA ۱۳۰

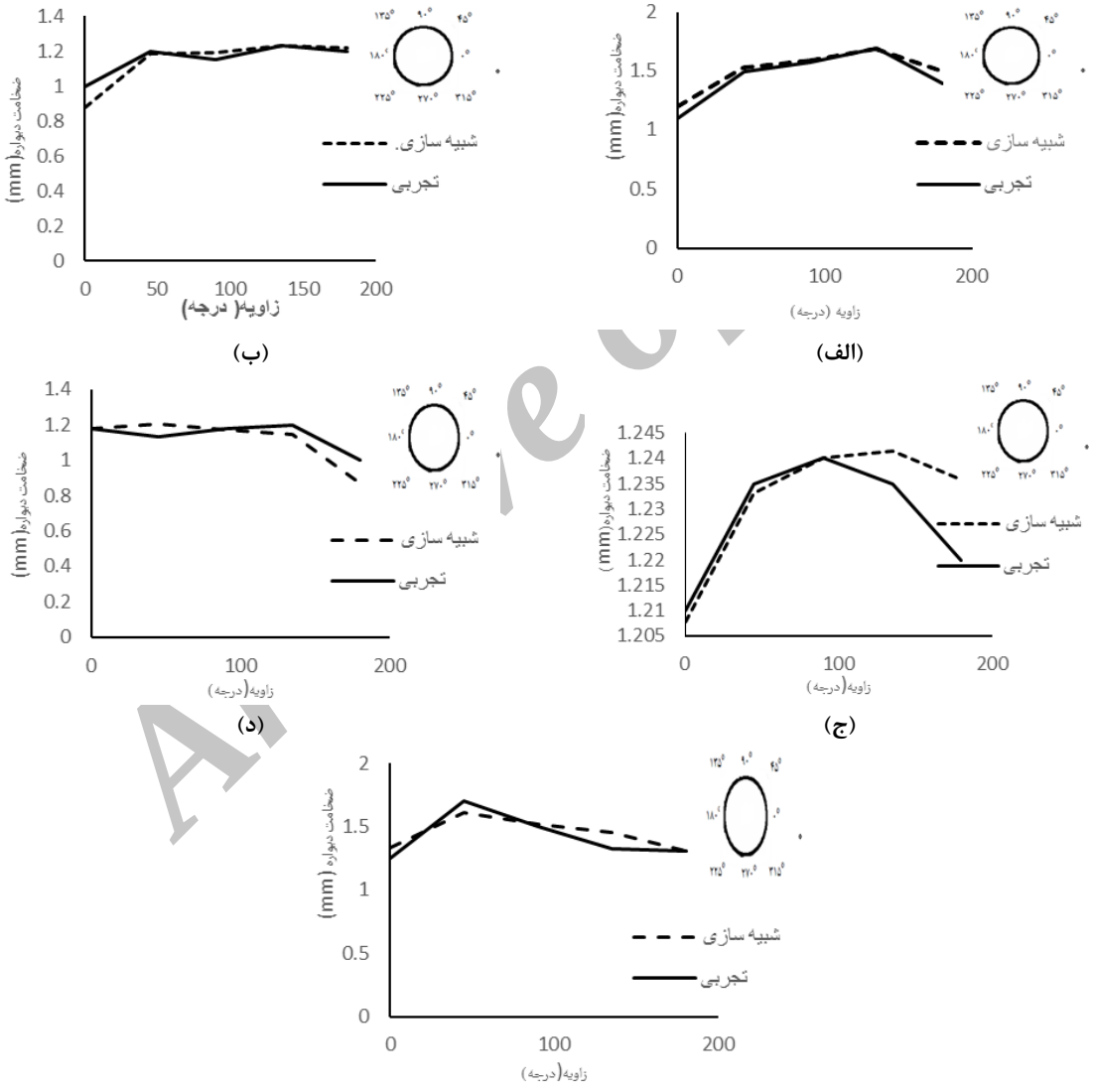
شکل ۱۸- شکل هندسی و کانتور توزیع ضخامت برای مسیر فشار ۲ شکل ۱۷

www.SID.ir



(ب) (الف)

شکل ۱۹- مقاطع انتخاب شده جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت برای قطعه خمیده با قطر غیر یکنواخت
الف) قطعه شبیه‌سازی و ب) قطعه تجربی



شکل ۲۰- نمودار توزیع ضخامت قطعه شکل داده شده در الف) مقطع ۱، ب) مقطع ۲، ج) مقطع ۳، د) مقطع ۴ و هـ) مقطع ۵

www.SID.ir

میزان ضخامت لوله در حالت تجربی در مقاطع (۱) و (۵) یعنی مقاطع نزدیک به انتهای لوله به ترتیب از ۱/۱ تا ۱/۶۹ میلی‌متر و از ۱/۲۵ تا۱/۷ میلی‌متر تغییر می‌کند. این میزان ضخامت از مقاطع (۱) و (۵) تا مقطع (۳)، یعنی از قسمت‌های انتهایی لوله تا قسمت مرکزی لوله به تدریج کاهش می‌یابد تا در مقطع (۳) به ۱/۲۱ تا۱/۲۴ میلی‌متر می‌رسد. بیشترین نازک شدگی را در مقاطع (۲) و (۴)، به دلیل اختلاف شدید قطر این ناحیه نسبت به نواحی دیگر است که میزان ضخامت به ترتیب از ۱ تا ۱/۲۳ و از ۱/۲ تا ۱ میلی‌متر است؛ همانطور که در شکل ۲۰ دیده می‌شود در تمامی مقاطع، مقدار ضخامت لوله در مرکز مقاطع، دارای بیشترین مقدار است و به تدریج از مرکز مقاطع تا مرکز گوشه‌ها، مقدار ضخامت کاهش می‌یابد تا در مرکز مقاطع، این مقدار به کمترین مقدار خود برسد. علت این نوع توزیع ضخامت را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش بیشتر فشار داخلی لوله و تغذیه محوری دوم جهت پر شدن کامل قالب، نقاط واقع در مراکز دیواره قالب که تماس پیدا می‌کند، کمترین فاصله را با محور لوله دارند. با ادامه فرایند این تماس به نقاط مجاور، نقاط مرکزی نیز گسترش می‌یابد. با توجه به اینکه در نقاطی از لوله که با قالب تماس پیدا کرده است، به دلیل وجود نیروی اصطکاک بین لوله و سطح قالب، جریان ماده در راستای محیطی لوله به سختی صورت می‌پذیرد، با ادامه فرآیند و افزایش سطح تماس بین لوله و قالب، جریان ماده رفته رفته با مشکل بیشتری مواجه می‌شود، به طوری که در مناطق گوشه‌ای، ماده لوله در اطراف گوشه‌ها تقریباً نسبت به قالب ثابت می‌شود و هیچ جریانی از نواحی اطراف گوشه‌ها به مراکز گوشه‌ها نمی‌رسد؛ لذا در مراکز گوشه‌ها، مقدار ضخامت حداقل است.

همچنین میزان اختلاف ضخامت مرکز مقاطع با مرکز گوشه ها یعنی اختلاف مقدار ضخامت در زوایای ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه و مقدار ضخامت در زوایای ۴۵، ۱۳۵ درجه که بیانگر میزان یکنواختی توزیع ضخامت در قطعه است، از مقطع (۱) و (۵) که در انتهای لوله قرار دارند تا مقطع (۳) واقع بر مرکز لوله به تدریج افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای شکل‌دهی قطعات لوله‌ای پله‌ای خمیده با شعاع انحنا و قطر غیر یکنواخت ارائه شده است که در آن پر شدن گوشه‌های قالب نسبت به قالب‌های متداول هیدروفرمینگ بهبود یافته است. بدین منظور، مجموعه قالب متداول و مجموعه قالب جدید با شبیه سازی مدل سازی و پر شدن گوشه در هر دو قالب، در شرایطی یکسان مطالعه شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که در قالب جدید، گوشه‌های قطعه به طور کامل پر شده، در حالی که در قالب متداول، گوشه‌ها به طور کامل شکل نگرفته است. به منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، مجموعه قالب جدید ساخته و آزمایش‌هایی با آن انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نیز، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید کرد. استفاده از ۲ بوش متحرک باعث می‌شود که مقدار ماده تغذیه شده به منطقه شکل‌دهی بدون اینکه روی سطح قالب بلغزد و اصطکاک باعث کاهش جریان ماده شود، مستقیما به منطقه شکل‌دهی تزریق می‌شود و در نتیجه باعث یکنواختی بهتر توزیع ضخامت قطعه می‌شود. با استفاده از این نوع قالب می‌توان با فشار و تغذیه کم قطعاتی با گوشه‌های تیز تولید کرد. خطی بودن و پایین بودن فشار شکل‌دهی و هموار بودن کاهش ضخامت و هچنین سادگی قالب، از مزایای این نوع قالب است.

۶- مراجع

[1] Loh-Mousavi M, Mori K, Bakhshi-Jooybari M, Farzin M, Hoseinipour SJ (2007) Finite element simulation of box shape hydroforming with pulse pressure. Science-Research Journal of Majlesi 2: 47-54. (In Persian)

[2] Loh-Mousavi M, Mori K, Hayashi K, Bakhshi-Jooybari M (2007) Improvement of filling of die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling. Key Eng Mat 344: 461-467.

[3] Chen FK, Wang SJ, Lin RH (2007) A study of forming pressure in the tube-hydroforming process. J Mater Process Tech 192-193: 404-409.

[4] Koc M (2003) Investigation of the effect of loading path and variation in material properties on robustness of the tube hydroforming process. J Mater Process Tech 133: 276-281.

[5] Menghari HG, Ziaei Poor H, Farzin M, de Sousa RA (2014) An approach to improve thickness distribution and corner filling of copper tubes during hydro-forming processes. Struct Eng Mech 50(4): 563-573.

[6] Mori K, Maeno T, Bakhshi-Jooybari M, Maki S (2005) Measurement of friction force in free bulging pulsating hydroforming of tubes. In:

Archive of SID
www.SID.ir

P.F.Bariani et al.(Ed) Advanced Technology of Plasticity, Edizioni Progetto Padova, Padova, CD-ROM.

[7] Yuan S, Wang X, Liu G, Wang ZR (2007) Control and use of wrinkles in tube hydroforming. J Mater Process Tech 182: 6-11.

[8] Menghari HG, Farzin M, Sadat A, Gorji A (2016) Experimental and numerical investigation of die filling and thickness variation at two step box copper tube hydroforming die with movable bushes. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 6(2): 87-96. (In Persian)

[9] Nikhare C, Weiss M, Hodgson PD (2009) FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. Comp Mater Sci 47: 146-152.

[10] Elyasi M, Bakhshi-Jooybari M, Gorji A (2010) A new hydro forming die design for improvement of die corner filling of stepped tubes. Modares Mech Eng 10(3): 87-98. (In Persian)

Archive of SID

www.SID.ir