



بررسی تجربی و عددی پرشدگی قالب و توزیع ضخامت هیدروفرمینگ لوله‌های دو پله‌ای مسی با مقطع مربعی در قالب با بوش‌های متحرک

حسین قربانی منقاری^{۱*}، محمود فرزین^۲، علی سادات^۳ و عبدالحمید گرجی^۴

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۳ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

^۴ استاد یار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۶/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹

چکیده

شکل‌دهی لوله به روش هیدروفرمینگ، در سال‌های اخیر توسعه بسیار زیادی داشته است. یکی از مسائل مهم در شکل‌دهی به روش هیدروفرمینگ، پیش‌بینی و جلوگیری از عیوب احتمالی از جمله چروکیدگی و پارگی است. این عیوب مستقیماً به فشار اولیه، فشار نهایی و همچنین تغذیه محوری در طول فرآیند بستگی دارد؛ لذا انتخاب یک مسیر اعمال فشار مناسب و متناسب با تغذیه محوری، دارای اهمیت بالایی است. در این مقاله، یک قالب جدید برای تولید قطعات دو پله‌ای جعبه‌ای شکل از جنس مس با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه شده است. از جمله مزایای این قالب نسبت به قالب‌های متداول هیدروفرمینگ، داشتن چهار 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. همچنین فاصله حرکتی بین قطعه‌کار و قالب صفر می‌شود و در نهایت قطعه‌کار تولید شده، دارای گوشه‌های کناری پر شده و کامل است. از دیگر مزایای این قالب، داشتن فشار شکل‌دهی پایین، ساختار ساده قالب و کاهش هزینه ماشین‌کاری، نسبت به قالب‌های متداول هیدروفرمینگ لوله است.

کلمات کلیدی: هیدروفرمینگ لوله؛ لوله‌های جعبه‌ای شکل؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ چروکیدگی.

Experimental and Numerical Investigation of Die Filling and Thickness Variation at Two Step Box Copper Tube Hydroforming Die with Movable Bushes

H. Ghorbani Menghari^{1,*}, M. Farzin², A. Sadat³, A. Gorji⁴

¹ Department of Mechanical Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran.

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

³ Department of Mechanical Engineering, khaje nasir toosi university of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Recently, tube hydroforming had been developed in many industry. Prediction and prevention of possible defects such as wrinkling and failure are the major issues when it comes to hydroforming technique. These flaws are directly dependent on the initial and ultimate pressures and axial feed in this method. Thus, selecting an appropriate pressure path in a proper correlation with axial feed is crucial. In this paper, a new die capable of producing two-step box shaped pure copper specimens is presented by experimental test and finite element simulation. Compared with conventional hydroforming dies, it consists of four 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. Also, sliding between the die and the specimen decreases to zero, so the produced specimen has filled and complete corners. Besides low forming pressure, simple die structure and cheaper machining costs as compared with conventional hydroforming dies can be considered as other advantages of the proposed die.

Keywords: Tube Hydroforming; Box Shape Tubes; Finite Element Simulation; Wrinkling.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۹۰۵۳۲۷۳

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

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ لوله، روش نسبتاً 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 فرآیند 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 پرنشیدن 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.

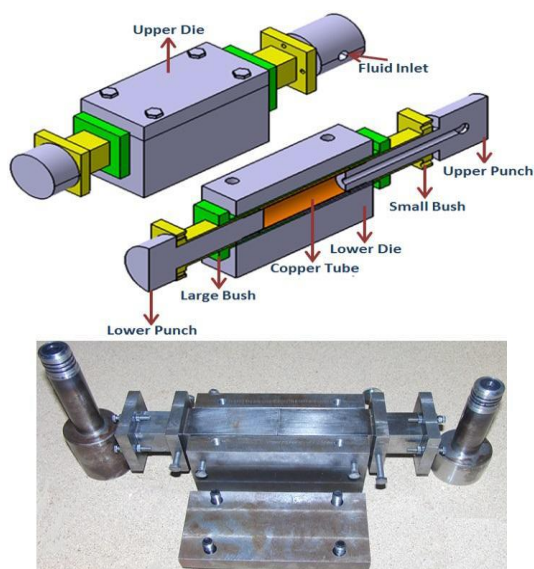
نیکر و همکارانش [۳]، در پژوهشی فرآیند هیدروفرمینگ در قالب‌های متداول را که در پژوهش خود از آن با نام هیدروفرمینگ فشار بالا یاد کرده‌اند، با هیدروفرمینگ در قالب پیشنهادی خود که در آن از فشار داخلی کمی استفاده می‌شود، به صورت اجزای محدود مورد مقایسه قرار داده‌اند. هدف آن پژوهش، تبدیل مقطع دایره‌ای لوله به مقطع مربعی به طول ضلع ۵۰mm و شعاع گوشه ۱۲mm 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، شکل قالب را به خود می‌گیرد. در هیدروفرمینگ فشار پایین که توسط نویسندگان آن مقاله

توسعه داده شده است، لوله بین نیمه بالایی و پایینی قالب قرار داده شده، 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. سو و همکاران [۴]، در پژوهشی اثر ضریب اصطکاک، نمای کرنش سختی و ضریب ناهمسانگردی را بر توزیع ضخامت در یک قطعه دارای مقطع مربعی پس از انجام فرآیند هیدروفرمینگ، به صورت تحلیلی، شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصله نشان داد که در گوشه قطعه دارای مقطع مربعی، در قسمت دیواره جانبی، ضخامت به تدریج از نقاط میانی وجوه به نقاط مماسی کاهش می‌یابد، در صورتی که در مورد دیواره‌های غیر پشتیبانی شده به وسیله جداره قالب، تغییرات ضخامت به صورت برعکس صورت می‌پذیرد. نازکترین جزء نیز، معمولاً در نقاط مماسی روی می‌دهد. همچنین افزایش ضریب اصطکاک، سبب کاهش یکنواختی ضخامت دیواره می‌شود. افزایش پارامترهای نمای کرنش سختی و ضریب ناهمسانگردی، هر دو سبب بهبود یکنواختی ضخامت در دیواره لوله می‌شوند؛ بنابراین توصیه می‌شود، به منظور شکل‌دهی مناسب، از لوله‌هایی با مواد دارای نمای کرنش سختی و ضریب ناهمسانگردی بالا استفاده گردد. هاما و همکارانش [۵]، اثر مسیرهای فشار مختلف را بر قابلیت شکل‌پذیری قطعات لوله‌ای با مقطع مربعی شکل، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نتیجه‌گیری کردند که در مسیرهای

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 بالا و پایین وظیفه تغذیه محوری لوله به درون حفره قالب را برعهده دارند، چهار 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 بالایی، به داخل لوله اعمال می‌شود. پس از افزایش فشار و بشکاف شدن لوله، سنبه بالایی توسط دستگاه پرس به سنبه پایینی نزدیک می‌شود. در اثر این حرکت، دو بوش بالایی و پایینی کوچک (مرکزی) نیز، به طور همزمان به یکدیگر نزدیک شده، پله اول شکل گرفته می‌شود. در مرحله بعد، فشار را تا مقدار صفر کاهش داده، دو بوش جعبه‌ای بزرگ را به اندازه تغذیه نهایی به سمت بیرون حرکت داده، بعد از این مرحله فشار سیستم تا مقدار نهایی بالا برده، همزمان با حرکت سنبه بالایی به سمت سنبه پایینی، چهار بوش در نظر گرفته به سمت هم حرکت می‌کند و پله دوم شکل می‌گیرد.

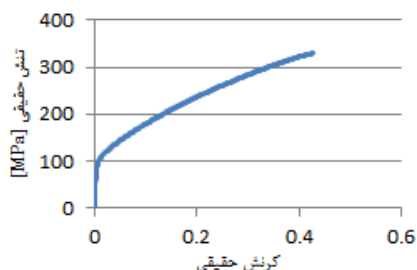


شکل ۱- نمای قالب جدید هیدروفرمینگ لوله

خاصی از فشار، چروکیدگی یا پارگی در قطعه رخ می‌دهد و با اعمال مسیر فشار مناسب، می‌توان از بروز این عیوب در قطعات لوله‌ای با مقطع مربعی شکل جلوگیری کرد.

چن و همکاران [۶] 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 [۷] 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 کردند. 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. موری و همکارانش [۸]، برای پی بردن به ساز و کار 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 [۹] 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.

بالا بردن فشار سیال هنگام 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 آن از ۴ بوش متحرک که همزمان با قطعه کار حرکت می‌نمایند، کنترل بالاتری در شکل‌گیری و پر شدن گوشه‌های قالب برای ساخت قطعات دو پله را ارائه داد و از نازک شدن و پارگی لوله در نواحی گوشه‌ها جلوگیری کرد.



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

جدول ۱- ابعاد و خواص مکانیکی لوله‌ی مسی مورد آزمایش

۳۵ میلی‌متر	قطر لوله
۱۸۰ میلی‌متر	طول لوله
۱/۳۵ میلی‌متر	ضخامت لوله
۱۰۹ مگاپاسکال	تنش تسلیم لوله
۳۶۷ مگاپاسکال	ضریب مقاومت (K)
۸۹۰۰ مگاپاسکال	چگالی
۱۱۰ گیگاپاسکال	مدول یانگ (E)
۰/۳۴۳	ضریب پواسون
۰/۳۱	ضریب کرنش سختی (n)
۰/۰۶	ضریب اصطکاک

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۰ 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 که دارای رفتار مناسب برای تحلیل مسائل تنش صفحه‌ای می‌باشد، استفاده شده است. برای المان بندی قالب و سنبه‌ها از المان صلب R3D4 که یک المان سه بعدی چهار گره‌ای صلب با تابع تقریب درجه دوم می‌باشد استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که المان‌های استفاده شده برای لوله و قالب و بوشها به ترتیب ۹۵۴۰، ۹۸، ۲۷۹۸ و ۴۲۵۰ می‌باشد. ضریب اصطکاک کلمب میان سطوح قالب و قطعه‌کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۰۶ در نظر گرفته شده است. شکل ۴، نشان دهنده‌ی مدل اجزای محدود ایجاد شده در نرم‌افزار می‌باشد.

شکل ۵، مراحل شکل‌گیری لوله در قالب دویله‌ای جعبه‌ای شکل را نشان می‌دهد.

از جمله تفاوت‌های این قالب با قالب ارائه شده در مرجع [۱۰]، استفاده از ۴ بوش متحرک برای شکل‌گیری لوله جعبه‌ای شکل دو پله 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 مکانیزیم ساده‌ای برای شکل‌گیری قطعه‌کار نهایی دارد.

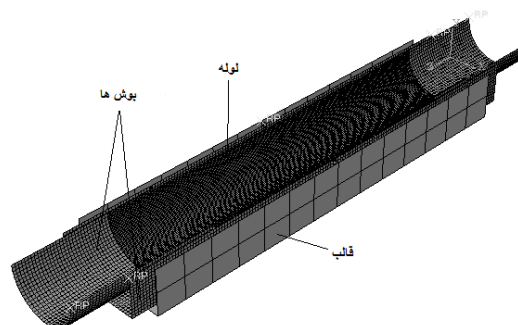
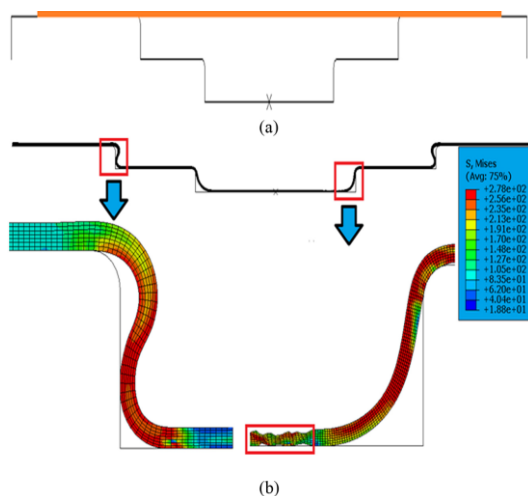
۲- مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات تجربی از یک دستگاه پرس هیدرولیکی چند منظوره با ظرفیت ۶۰۰ KN 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 ۴۵ 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، نشان‌دهنده پرس هیدرولیکی به همراه مجموعه قالب است.



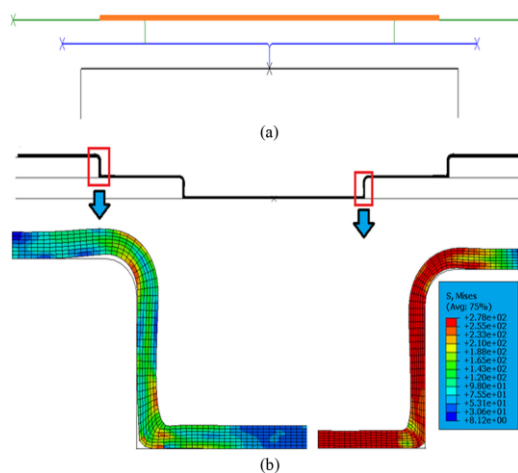
شکل ۲- دستگاه پرس به همراه مجموعه‌ی قالب

در انجام این پژوهش، از یک نوع لوله بدون درز از جنس مس خالص (درجه خلوص ۹۹ درصد) استفاده شده است. شکل ۳، نشان دهنده نمودار تنش-کرنش حقیقی لوله مسی و جدول ۱ نیز، نشان دهنده خواص مکانیکی لوله مسی است.

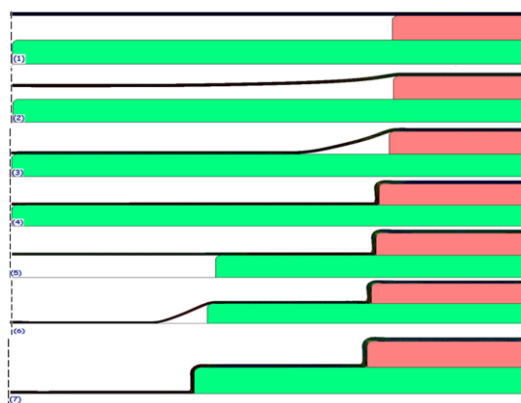


شکل ۴- مدل اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله دو پله‌ای توسط روش بوش متحرک

شکل ۶- پرشدگی گوشه قالب در قالب سنتی



شکل ۷- پرشدگی گوشه قالب در قالب دوپله‌ای جدید



شکل ۵- مراحل شکل‌گیری لوله در قالب دو پله‌ای جدید

سبب نازک شدن گوشه‌ها، بیش از حد لوله و بروز پارگی در آن می‌شود و همچنین اعمال فشار داخلی کمتر از ۱۵ MPa، 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 مرحله اولیه قبل از حرکت سنبه‌ها و بوش‌ها، در فشار ۱۵ MPa را نشان می‌دهد. 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 نمی‌گردد، در ناحیه انبساط نازک شدن شدید بوجود می‌آید. شکل ۹، لوله تغییر شکل یافته در فشار اولیه ۱۷ MPa را نشان می‌دهد که در آن حداکثر کاهش ضخامت و در نتیجه عیب پارگی رخ داده است.

شکل ۶ و ۷ به ترتیب، مقایسه‌ای از پرشدگی گوشه قالب را برای هر دو قالب قدیم و جدید نشان می‌دهد. شرایط شبیه‌سازی برای هر دو قالب سنتی و جدید در تمامی مراحل شبیه‌سازی کاملاً یکسان بوده است؛ اما همانطور که مشاهده می‌کنید، گوشه قالب در نوع سنتی نه تنها پر نشده است، بلکه دچار چروک نیز شد؛ اما در قالب جدید با توجه به مکانیزم حرکت بوش‌ها، گوشه قالب بدون کمترین چروک و عیبی به طور کامل پر شده است.

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی پدیده میزان پرشدگی قالب، از نمونه لوله‌هایی با طول اولیه ۱۸۰ میلی‌متر استفاده شد. سرعت پرس در تمامی آزمایشات روی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. میزان فشار داخلی لوله نیز، پیش از شروع حرکت سنبه‌ها ۱۵ MPa در نظر گرفته شده است. افزایش فشار داخلی لوله بیش از این مقدار و بدون اعمال تغذیه محوری،

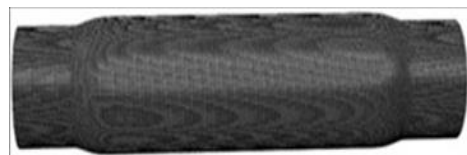


شکل ۱۱ - قطعه شکل داده شده بدون پارگی در پله اول با استفاده از مسیر فشار استفاده شده در آزمایشگاه



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

با توجه به نتایج توزیع ضخامت در شکل ۱۳، میزان اختلاف ضخامت مراکز وجوه با مراکز گوشه‌ها، 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 که در انتهای لوله قرار دارد تا مقطع ۳ واقع بر مرکز لوله به تدریج افزایش می‌یابد. علت این امر، این است که در مقاطع نزدیک به دو سر لوله، تغذیه محوری بوش‌ها سبب ایجاد جریان ماده در راستای محوری می‌شود. این جریان محوری ماده تا حدی کاهش جریان محیطی لوله در اثر پیشرفت فرآیند و افزایش نیروی اصطکاک بین لوله و قالب را جبران می‌کند؛ اما با توجه به این که با پیشرفت فرآیند، نیروی اصطکاک افزایش می‌یابد، میزان جریان محوری ایجاد شده توسط بوش‌ها از انتهای لوله به سمت مرکز لوله رفته رفته کاهش می‌یابد و لذا میزان ماده کمتری به قسمت‌های میانی قطعه جریان می‌یابد. این امر سبب می‌شود تا هرچه از دو سر لوله به مرکز لوله پیش می‌رویم، اختلاف ضخامت در مقاطع بیشتر شده، در نتیجه یکنواختی توزیع ضخامت کمتر می‌شود.



(الف)



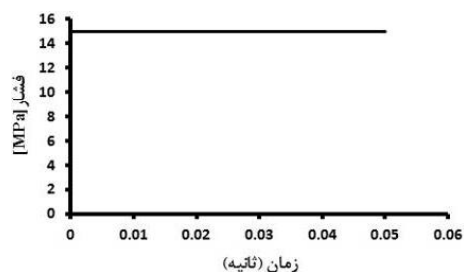
(ب)

شکل ۸ - قطعه شکل داده شده در مرحله بالج در فشار ۱۵MPa (الف) شبیه سازی، (ب) تجربی



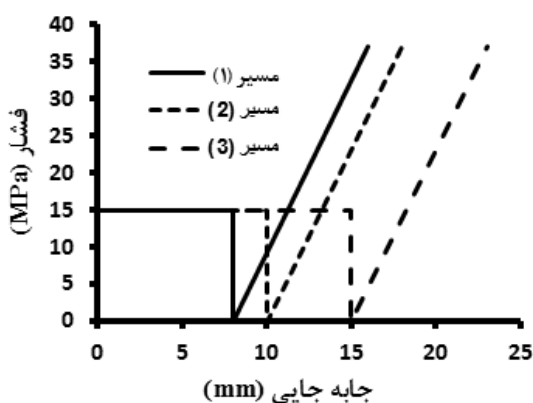
شکل ۹ - قطعه شکل داده شده در مرحله بالج در فشار ۱۷MPa به دست آمده از آزمایش تجربی

در گام بعد با ثابت نگه داشتن فشار اولیه عمل تغذیه به مقدار ۸ 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. به منظور مقایسه نتایج کار تجربی و نتایج شبیه‌سازی سه مقطع عمود بر محور لوله، مطابق شکل ۱۲ انتخاب شد و به بررسی توزیع ضخامت در آن‌ها پرداخته شد. شکل ۱۳، نمودار توزیع ضخامت در سه مقطع ۱ و ۲ و ۳ برای قطعه شبیه‌سازی شده و تجربی نشان می‌دهد.

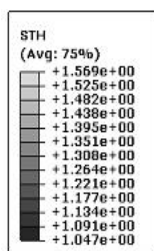


شکل ۱۰ - نمونه مسیر فشار مورد استفاده در قالب هیدروفرمینگ دو پله‌ای جعبه‌ای شکل

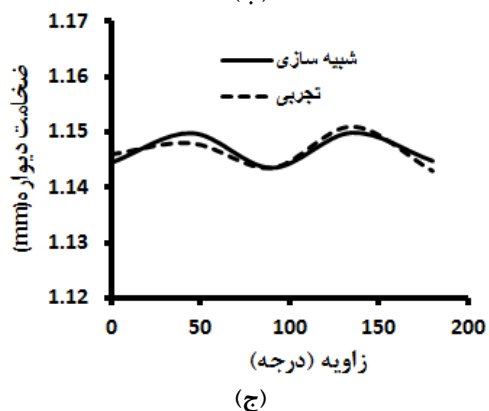
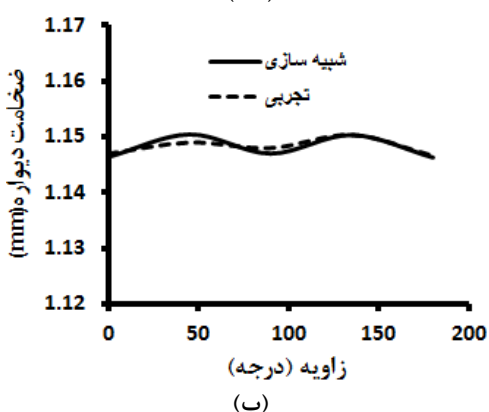
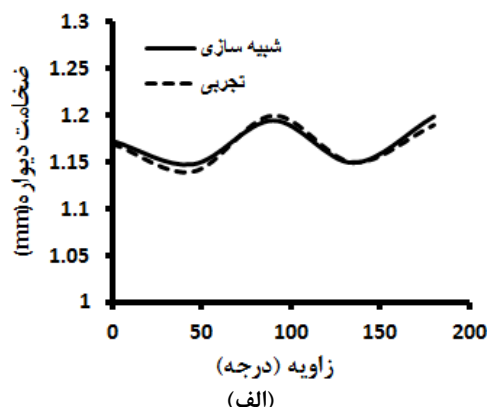
شبیه‌سازی اجزای محدود به کار گرفته شده است. در این مسیرهای فشار در مرحله اولیه، ابتدا با ثابت بودن پرس و سنبه‌ها و مقدار تغذیه محوری صفر، فشار تا ۱۵ MPa بالا برده شده، سپس با ثابت نگه داشتن فشار اولیه، تغذیه محوری ۸،۱۰،۱۵ میلی‌متر به کار گرفته شده است. سپس فشار را تا مقدار صفر کاهش داده، بوش بزرگتر به اندازه ۳۳ میلی‌متر به سمت عقب کشیده می‌شود و در نهایت با ثابت نگه داشتن مقدار تغذیه به مقدار ۸ میلی‌متر در این مرحله، فشارهای ۳۷،۵۰،۷۰ MPa به کار برده شده است. شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب، نمودار اعمال فشار در فشار نهایی ۳۷ MPa و کانتور تنش را برای مسیر ۱ نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- نمودار مسیر فشارهای مختلف برای فشار نهایی ۳۷ MPa



شکل ۱۵- شکل هندسی و کانتور توزیع ضخامت برای مسیر فشار ۱ شکل ۱۴



شکل ۱۳- نمودار توزیع ضخامت الف- مقطع ۱، ب- مقطع ۲، ج- مقطع

در ادامه این مقاله، به بررسی فشارهای مختلف با استفاده از مقدار تغذیه و فشار متفاوت خواهیم پرداخت و چگونگی ایجاد پله دوم در قطعه‌کار را با استفاده از شبیه‌سازی بررسی می‌کنیم. به منظور بررسی امکان پر شدن گوشه‌های لوله و حذف چروکیدگی لوله و ایجاد پله دوم لوله تغییر شکل یافته با مسیرهای فشار دیگر، ۹ مسیر فشار با استفاده از

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 سه مقطع عمود بر محور لوله برای قطعه سالم دو پله‌ای جعبه‌ای شکل خواهیم پرداخت که با استفاده از مسیر فشار ۳، شکل ۱۴ شکل گرفته است. مقاطع انتخاب شده به منظور بررسی توزیع ضخامت در شکل ۱۸ برای قطعه دو پله‌ای جعبه‌ای شکل حاصل از شبیه‌سازی و قطعه تجربی، نمایش داده شده است.



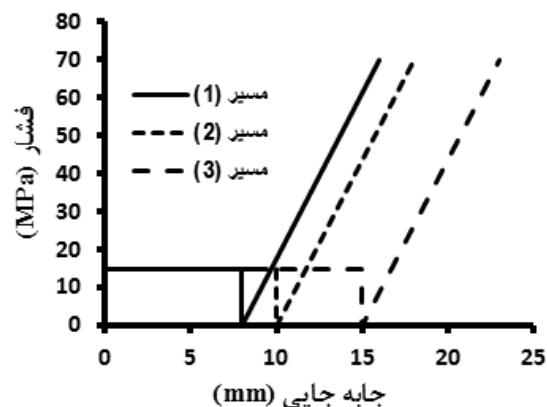
الف



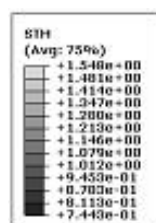
ب

شکل ۱۸- مقاطع انتخاب شده جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت برای قطعه دوپله‌ای جعبه‌ای شکل الف-قطعه شبیه‌سازی ب- قطعه تجربی

شکل ۱۶ و ۱۷ نیز به ترتیب، نمودار اعمال فشار در فشار نهایی ۷۰ MPa و کانتور تنش برای سه مسیر تغذیه متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- نمودار مسیر فشارهای مختلف برای فشار ۷۰ MPa



شکل ۱۷- شکل هندسی و کانتور توزیع ضخامت برای مسیر فشار ۱ شکل ۱۶

میزان پرشدگی گوشه‌های قالب با استفاده از فشار نهایی ۷۰ MPa نسبت به فشارهای ۳۷ و ۵۰ مگاپاسکال بهتر شده است، همچنین میزان کاهش ضخامت در مسیرهای فشار سه‌گانه با فشار نهایی ۷۰ مگاپاسکال در قطعات نسبت به قطعات شکل داده شده در فشارهای نهایی ۳۷ و ۵۰ مگاپاسکال بیشتر است که دلیل آن، بالا بردن سطح فشار داخلی لوله در مرحله نهایی است.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، با انتخاب فشار و تغذیه مناسب و بهینه، امکان ایجاد قطعه سالم با پرشدگی

ضخامت را می‌توان این گونه بیان کرد که با افزایش بیشتر فشار داخلی لوله و تغذیه محوری دوم جهت تشکیل پله دوم، نقاط واقع در مراکز وجوه قالب که کمترین فاصله را با محور لوله دارند، تماس پیدا می‌کند. 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 و لذا در مراکز گوشه‌ها، مقدار ضخامت حداقل است.

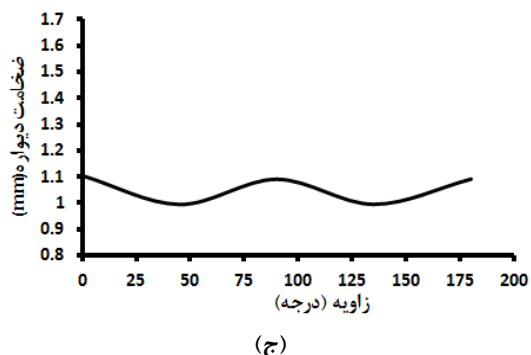
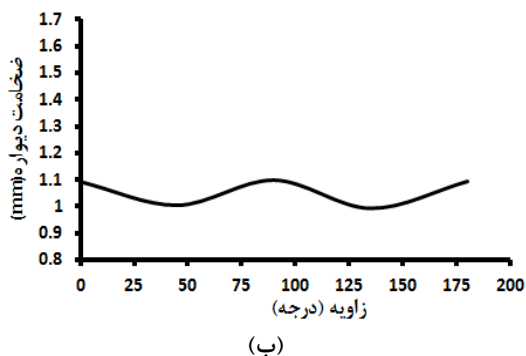
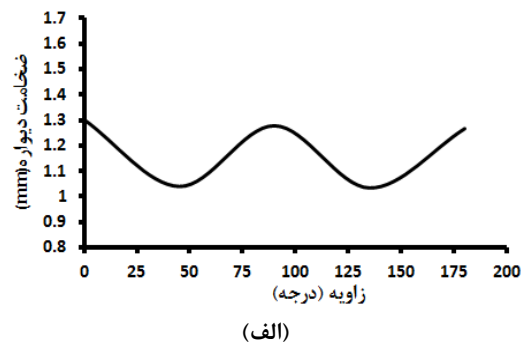
همچنین میزان اختلاف ضخامت مراکز وجوه با مراکز گوشه‌ها، یعنی اختلاف مقدار ضخامت در زوایای ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه و مقدار ضخامت در زوایای ۴۵، ۱۳۵ درجه که بیانگر میزان یکنواختی توزیع ضخامت در قطعه است، همانند تشکیل پله اول تغییر شکل یافته، از مقطع ۱ که در انتهای لوله قرار دارد تا مقطع ۳ واقع بر مرکز لوله به تدریج افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای شکل‌دهی قطعات لوله‌ای دو پله‌ای جعبه‌ای شکل ارائه شده است. استفاده از ۴ 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، مستقیماً به منطقه شکل‌دهی تزریق می‌شود؛ 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 همچنین سادگی قالب، از مزایای این نوع قالب است.

۶- تشکر و قدردانی

در انتها جا دارد، از زحمات اساتید محترم دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، آقای دکتر بخشی و آقای دکتر گرجی تشکر



شکل ۱۹- نمودار توزیع ضخامت قطعه دو پله‌ای جعبه‌ای
شکل: الف مقطع ۱، ب مقطع ۲، ج مقطع ۳

میزان ضخامت لوله در حالت تجربی در مقطع ۱ یعنی، مقطع نزدیک به انتهای لوله از ۱/۰۳ تا ۱/۳۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. این میزان ضخامت از مقطع ۱ تا مقطع ۳ یعنی، از قسمت انتهایی لوله تا قسمت مرکزی لوله به تدریج کاهش می‌یابد تا در مقطع ۳ به ۰/۹۹۵ تا ۱/۱۰۴ میلی‌متر می‌رسد. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود در تمامی مقاطع، مقدار ضخامت لوله در مراکز وجوه مقطع، دارای بیشترین مقدار است و به تدریج از مراکز وجوه تا مراکز گوشه‌ها، مقدار ضخامت کاهش می‌یابد تا در مراکز وجوه، این مقدار به کمترین مقدار خود برسد. علت این نوع توزیع

- [5] Hama T, Ohkubo T, Kurisu K, Fujimoto H, Takuda H (2006) Formability of tube hydroforming under various loading paths. *J Mater Process Tech* 177: 676-679.
- [6] 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.
- [7] 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(3): 276-281.
- [8] Mori K, Maeno T, Bakhshi-Jooybari M, Maki S (2005) Measurement of friction force in free bulging pulsating hydroforming of tubes. In: P.F. Bariani et al. (Ed) *Advanced Technology of Plasticity*, Edizioni Progetto Padova, Padova, CD-ROM.
- [9] S. Yuan, X. Wang, G. Liu, Z. R. Wang (2007) Control and use of wrinkles in tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 6-11.
- [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 Mechanical Engineering* 10(3): 87-98. (In Persian)

کنم که نهایت همکاری را با در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاه شکل‌دهی فلزات برای انجام تست‌های تجربی این پژوهش انجام داده‌اند.

۷- 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] 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.
- [4] Xu X, Li S, Zhanga W, Lin Z (2009) Analysis of thickness distribution of square-sectional hydroformed parts. *J Mater Process Tech* 209: 158-164.