



بررسی تجربی و اجزای محدود فرآیند شکل دهی با ضربه مایع برای لوله های آلومینیومی جدار نازک AA6063

جواد شهبازی کرمی¹، غلامحسن پایگانه^{2*}، سید داود نوربخش³، کیان تفضلی اقوامی⁴

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16785، g.payganeh@srttu.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 خرداد 1395
پذیرش: 27 مرداد 1395
ارائه در سایت: 03 مهر 1395

کلید واژگان:

هیدروفورمینگ لوله
شکل دهی با ضربه مایع
شبیه سازی اجزای محدود

چکیده

امروزه یکی از مهم ترین عوامل در صنعت، تولید در کوتاه ترین زمان ممکن با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت می باشد. در این راستا، محققان رو به سوی ابداع روش ها و تکنولوژی های جدید برای برآوردن این نیازهای صنعت آورده اند. یکی از این روش ها، شکل دهی با ضربه مایع است که به طور فزاینده ای در حال گسترش در صنعت به خصوص صنایع خودروسازی و هوافضا می باشد. در این روش که از فرآیندهای هیدروفورمینگ لوله ای محسوب می شود، شکل گیری با استفاده از فشار مایع صورت می گیرد. در این پژوهش، فرآیند شکل دهی با ضربه مایع برای یک لوله جدار نازک از جنس آلومینیم به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی، به منظور تغییر شکل سطح مقطع لوله آلومینیومی به یک چندضلعی، قالبی طراحی و ساخته شد که در انتهای فرآیند شکل هندسی استوانه لوله را به یک پروفیل با سطح مقطعی تقریباً مشابه با دوزنقه تبدیل نمود. آزمایش ها نشان داد که قالب از نوع سنجه ماتریس در این فرآیند برای هندسه مورد نظر مناسب نیست، درحالی که با استفاده از قالب دیگری که شامل سه قسمت بود شکل دهی به خوبی انجام گرفت. در ادامه، شبیه سازی این فرآیند با استفاده از روش اجزای محدود انجام گرفت و نتایج مربوط به توزیع تنش فون مایز، تغییر مکان ها، انرژی کرنشی، انرژی داخلی، تغییر ضخامت و نیروی لازم برای انجام فرآیند به دست آمد. توزیع تغییر مکان لوله در نواحی مختلف نشان داد که هیچ چروکیدگی در نمونه ایجاد نگردد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و کار تجربی مطابقت خوبی نشان داد.

Experimental and Finite Element Investigation of Liquid Impact Forming for Thin-walled Aluminium AA6063 Tubes

Javad Shabbazi Karami¹, Gholamhasan Payganeh^{1*}, Seyed Davoud Nourbakhsh², Kian Tafazzoli Aghvami²

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

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, g.payganeh@srttu.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 May 2016
Accepted 17 August 2016
Available Online 24 September 2016

Keywords:

Tubular hydroforming
Liquid impact forming
Finite element simulation

ABSTRACT

Manufacturing in as short a time as possible, with highest quality and at minimal cost, is one of the key factors in industry. As a result, researchers are seeking new methods and technologies to meet such requirements. Liquid impact forming is one such method which has received wide currency especially in automotive and aerospace industries. In this method, which is considered one of the tubular hydroforming processes, forming is achieved by using liquid pressure. In this paper, liquid impact forming process was investigated experimentally and numerically for a thin-walled aluminium tube. In experimental part, a die was designed and manufactured to transform the cross section of the aluminium tube into a polygon which at the end of the process changes the cylindrical shape of the tube to a profile almost similar to a trapezoid. Results showed that a die in the form of matrix molding is not suitable for this type of geometry in such a process, while using another die which consisted of three parts resulted in a satisfactory forming. Simulation of this process was further implemented using finite element method and results relating to Von Mises stress distribution, displacement, strain energy, internal energy, thickness variation and the force required to implement the process were obtained. Displacement distribution in different regions indicated that no wrinkling occurred in the sample. Comparison between simulation and experimental results indicated that they were in good agreement.

1- مقدمه

هیدروفورمینگ یا شکل دهی هیدرولیکی یکی از فرآیندهای شکل دهی فلزات می باشد که به کارگیری آن به پیش از جنگ جهانی دوم بازمی گردد. در آن زمان، کاربردهای این فرآیند محدود به قطعات خاص در صنعت هواپیماسازی

Please cite this article using:

J. Shabbazi Karami, Gh. Payganeh, S. D. Nourbakhsh, K. Tafazzoli Aghvami, Experimental and Finite Element Investigation of Liquid Impact Forming for Thin-walled Aluminium AA6063 Tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 329-338, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: SID.ir

فک قالب، حجم لوله شروع به کم شدن می‌کند و در نتیجه آن فشار سیال افزایش می‌یابد و شکل‌دهی صورت می‌گیرد [7].

شکل 2 قالب شکل‌دهی با ضربه مایع را در حالت نهایی نشان می‌دهد. پس از پایان یافتن شکل‌دهی، قالب را باز نموده و فرم نهایی قطعه کار را خارج می‌کنند.

اگر فرآیند در فشار مناسبی صورت گرفته باشد، قطعه کار حالت قالب را به خود می‌گیرد [7].

از مزایای استفاده از فرآیند شکل‌دهی بر اثر ضربه مایع می‌توان به قابلیت تولید تعداد بالایی از قطعات، نیاز به یک دستگاه پرس و عدم نیاز به وسایل افزایش فشار برای شکل‌دهی در این فرآیند اشاره کرد. همچنین، انتخاب سیال مناسب یکی از مهم‌ترین بخش‌های این فرآیند است که در صنعت معمولاً از آب استفاده می‌شود [8].

تحقیقات بر روی فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع بسیار مورد توجه صنعتگران بوده است. در سال 1997، اش [9] اولین قالبی را که توسط فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع کار می‌کرد طراحی و ثبت اختراع نمود. او برای تغییر شکل یک لوله به قطعه کار با سطح مقطع مستطیلی، قالب سنبه ماتریس را در نظر گرفت. در سال 2002، شرکت ابزار و قالب‌سازی گرین ویل نوعی قالب طراحی نمود که توسط فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع علاوه بر تغییر شکل لوله (تغییر سطح مقطع) باعث ایجاد ناحیه‌های محدب در لوله می‌شد. همچنین، به منظور این که نیازی به اطمینان از پر شدن لوله با سیال نباشد، این قالب کاملاً در زیر آب قرار داده شد [10]. نیکاره و همکاران [11] برای تغییر شکل لوله به قطعه کار با سطح مقطع مستطیلی از فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع استفاده کردند. هوآنگ و همکاران [12] قالبی را برای تغییر شکل لوله به قطعه کار با سطح مقطع مثلثی طراحی کردند. در این نوع قالب، علاوه بر تغییر شکل در سطح مقطع، ایجاد ناحیه‌های محدب در یکی از سطح‌های قطعه مثلثی شکل مورد توجه آن‌ها قرار گرفت. نتیجه مهمی که آن‌ها به

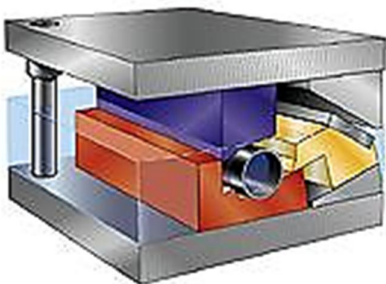


Fig. 1 Liquid impact forming die [7]

شکل 1 قالب شکل‌دهی با ضربه مایع [7]

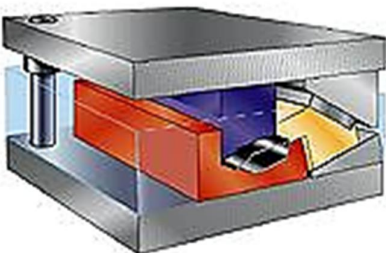


Fig. 2 Final form of liquid impact forming die [7]

شکل 2 حالت نهایی قالب شکل‌دهی با ضربه مایع [7]

بود، ولی از حدود دهه 90 میلادی از این روش به طور فزاینده‌ای در بسیاری از صنایع به ویژه خودروسازی استفاده شد [1]. طی 20 سال گذشته، هیدروفرمینگ قطعات، فرآیند توسعه‌ای را طی کرده است و به جریانی قابل‌قبول در ساخت قطعات مختلف رسیده است. امروزه تولیدات صنایع هوایی و خودروسازی از مجموعه قطعات هیدروفرم شده تشکیل شده‌اند که دلیل آن ویژگی‌های سودمند و ارزشمند فرآیند هیدروفرمینگ است [2].

مهم‌ترین مزایای این روش شامل قابلیت تکرار بالا در تولید، هزینه پایین نسبت به روش‌های مشابه [3]، دستیابی به نسبت بالای استحکام در برابر وزن، کاهش عملیات تکمیلی مونتاژ مانند لحیم‌کاری، جوشکاری [4]، ساخت قطعات با هندسه خارجی یا داخلی بسیار پیچیده، کیفیت بالاتر و افزایش قابل‌ملاحظه بازدهی محصول، برگشت فزونی و تنش پسماند کمتر و افزایش چشمگیر دقت و دستیابی به خطای مطلوب می‌باشد و از جمله مهم‌ترین معایب این فرآیند می‌توان به نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا، عدم وجود اطلاعات اولیه کافی در مورد مکانیزم فرآیند و نیاز به داشتن پرس سنگین برای غلبه بر فشار هیدرواستاتیکی معکوس در خلاف جهت سنبه اشاره کرد [5].

هیدروفرمینگ لوله، فرآیند شکل‌دهی فازی است که در آن از سیالات پرفشاری مانند آب استفاده می‌شود تا اشکال مختلفی از لوله‌ها با مواد و هزینه کمتر ساخته شود. فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌ای، شامل چهار روش هیدروفرمینگ با فشار کم، هیدروفرمینگ با فشار زیاد، شکل‌دهی داغ و شکل‌دهی با ضربه مایع می‌باشد [6].

در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع، لوله غوطه‌ور شده، دو سر آن پوشانده می‌شوند و سپس لوله در منطقه‌ای خاص کوبیده می‌شود. آب به منظور تغییر شکل، برآمده کردن و یا پشتیبانی از لوله در این محل استفاده می‌شود. در هر نقطه‌ای از ضربه پرس، فشار داخلی را می‌توان آزاد کرد و قطعه شکل‌دهی شده را خارج نمود. از آن جایی که لوله توسط آب کاملاً پر و حمایت می‌شود، احتمال سوراخ شدن آن در زیر ضربه پرس وجود دارد. لازم به ذکر است که در این فرآیند به منظور ایجاد زاویه‌های تیز در شکل نهایی، محدودیت‌هایی در انتخاب ضخامت و جنس لوله وجود دارد و به این ترتیب هندسه شکل نهایی تعیین‌کننده جنس و ضخامت لوله می‌باشد. همچنین، در این فرآیند میزان تغییر شکل لوله به وسیله مقدار سیال خروجی از لوله کنترل می‌شود. دلیل این امر آن است که سیال مورد استفاده تراکم ناپذیر بوده و سبب می‌شود تا خروج سیال اجازه تغییر شکل را به لوله بدهد.

فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع ویژگی‌های زیادی را که مربوط به هیدروفرمینگ است دارا می‌باشد، با این تفاوت که در آن از پرس استامپینگ به جای پرس هیدرولیکی که در هیدروفرمینگ معمول است استفاده می‌شود. همچنین، سیکل‌های سریع‌تر (8 تا 15 ثانیه) در ارزان‌تر شدن آن نسبت به هیدروفرمینگ موثر است. بر خلاف هیدروفرمینگ معمولی، در این نوع فرآیند نیازی به تزریق آب و فشردن طول لوله نمی‌باشد. تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع به میزان کشش، جنس ماده و ضخامت لوله استفاده‌شده بستگی دارد.

شکل 1 نمونه‌ای از قالب شکل‌دهی با ضربه مایع را نشان می‌دهد. طراحی قالب با توجه به شکل نهایی قطعه کار مورد نظر انجام می‌شود. در این نوع فرآیند، ابتدا لوله از سیال مشخصی پر شده و سپس دو سر آن آب‌بندی می‌گردد و در زیر قالب قرار می‌گیرد. در هنگام شروع فرآیند شکل‌گیری، فک متحرک قالب توسط پرس به سمت پایین حرکت داده می‌شود. با پایین آمدن

2- طراحی و ساخت قالب

در این مطالعه، فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع جهت تغییر فرم لوله دایروی شکل به یک چندضلعی، در نظر گرفته شد. برای انجام این تغییر فرم، ابتدا محدودیت‌ها، مواد و ابزارهای مورد نیاز شناسایی شدند. در مرحله بعدی با توجه به بررسی فرآیند شکل‌دهی بر اثر ضربه مایع، اجزای فرآیند شکل‌دهی طراحی و ساخته شد.

قطعه‌ای که در فرآیند شکل‌دهی نقش اصلی را ایفاء می‌کند و تغییر شکل باید بر روی آن صورت گیرد، لوله‌ای از جنس آلومینیوم می‌باشد. با داشتن ابعاد هندسی لوله آلومینیومی، می‌توان اجزای دیگر سیستم شکل‌دهی را طراحی نمود. لوله آلومینیومی مورد نظر از نوع 6063 انتخاب شد. مشخصات مربوط به جنس و هندسه لوله آلومینیومی مورد استفاده برای فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع در جدول (1) و نمودار تنش کرنش آلومینیوم 6063 در شکل 3 آورده شده است.

اجزای قالب از طریق کفشک به پرس متصل می‌شوند. با توجه به جداول انتخاب کفشک، کفشکی با ابعاد 25×20 سانتی‌متر با طول میله راهنمای 12.5 سانتی‌متر استفاده شد [17]. در این فرآیند، از پرس هیدرولیکی استفاده شد. پرس مورد استفاده، توانایی اعمال نیرو تا میزان 60 تن را دارا است و کاملاً به صورت خودکار می‌باشد. برای انجام تغییر فرم در لوله آلومینیومی، دو قالب فلزی طراحی شد. قالب اول از نوع سنبه ماتریس و دارای یک قطعه ثابت و یک قطعه متحرک بود. قالب دوم نیز از نوع سنبه ماتریس بود اما از لحاظ هندسه و مکانیزم با قالب اول تفاوت داشت. این قالب از سه قطعه ساخته شد به گونه‌ای که علاوه بر قطعه‌های ثابت و متحرک، از قطعه لغزنده نیز در آن استفاده گردید.

2-1- قالب فلزی با دو قطعه

قالب سنبه ماتریس از دو قسمت ثابت و متحرک ساخته می‌شود. ماتریس همان قسمت ثابت می‌باشد که به کفشک پایین متصل می‌شود و قسمت متحرک سنبه نامیده می‌شود. سطح مقطع قطعه کار در شکل 4 نشان داده شده است (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند). با توجه به شکل 4، طرح ماشین‌کاری این نوع قالب به این صورت در نظر گرفته شد که قسمت بالای خط چین در قطعه مربوط به سنبه و قسمت پایین آن مربوط به ماتریس بود.

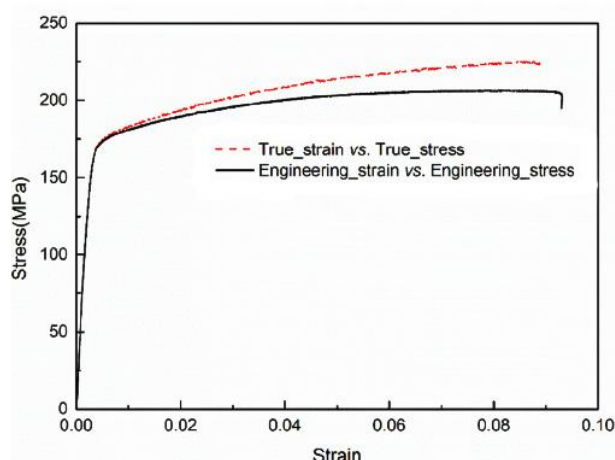


Fig. 3 The stress-strain curve of aluminum 6063

شکل 3 نمودار تنش کرنش مربوط به آلومینیوم 6063

دست آوردند این بود که فشار داخل لوله و نیرویی که پرس بر قالب وارد می‌کند، دو پارامتر مهم در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع می‌باشند. حسین-زاده و همکاران [13] یک روش جدید برای هیدروفورمینگ ورق با ترکیبی از فرآیندهای هیدروفورمینگ استاندارد و هیدرومکانیکی ورق ارائه دادند که دامنه کاربرد وسیع‌تری را برای این فرآیند ایجاد نموده و موجب رفع محدودیت‌های روش‌های قدیمی‌تر می‌شد. آن‌ها با این روش موفق به شکل‌دهی یک قطعه استوانه‌ای شکل و همچنین قطعه‌ای پیچیده‌تر با اعمال مسیر فشار مناسب در یک مرحله شدند. عبدالوند و همکاران [14] لوله‌های با دانه-بندی فوق ریز مس-روی را با استفاده از فرآیند پرس کاری زاویه‌ای مجراهای لوله‌ای چند گذر موازی¹ مورد بررسی قرار دادند و خواص مکانیکی و ساختاری ریز را در جهات محوری و محیطی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها این کار را با استفاده از تست تنش تک محوره در هر دو راستای محوری و محیطی انجام دادند و به منظور اندازه‌گیری فشار ترکیبگی این لوله‌ها از تست هیدروبالجینگ استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که این لوله‌ها با استفاده از این روش قابلیت تحمل فشاری بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. معصومی و همکاران [15] یک دیاکرام توسعه داده‌شده بر پایه تنش برای حدود شکل‌دهی² به منظور پیش‌بینی گلوبی شدن³ ارائه دادند و آن را در هیدروفورمینگ لوله به کار بردند و همچنین شبیه‌سازی این فرآیند را با استفاده از روش اجزای محدود انجام دادند و هماهنگی خوبی با نتایج تجربی مشاهده نمودند. حاجی علیزاده و مشهدی [16] به بررسی و تحلیل عددی فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع برای لوله آلومینیومی T6-6061 پرداختند. آن‌ها روش اجزای محدود را با استفاده از یک روش صریح برای فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع بر روی ورق و لوله انجام دادند و اندرکنش بین سیال و اجزای پوسته‌ای مشخص‌کننده قطعه کار را با استفاده از اندرکنش صوتی-ساختاری بر پایه سطح⁴ تقریب زدند. آن‌ها همچنین نتایج خود را با نتایج تجربی دیگر محققان مقایسه کردند و هماهنگی خوبی بین آن‌ها مشاهده نمودند.

در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع، هر قطعه کاری نیاز به طراحی قالب مخصوص به خود دارد. همچنین، برای بهره‌گیری از این تکنولوژی، به انجام مطالعات اولیه و آزمایش‌های مختلفی نیاز است. در این پژوهش، فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع برای یک لوله جدار نازک از جنس آلومینیوم 6063 به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تجربی، هدف اصلی، طراحی و ساخت قالبی جهت تغییر شکل لوله به یک قطعه کار با سطح مقطع چندضلعی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع می‌باشد. در این راستا، بررسی فرآیند با استفاده از قالب سنبه ماتریس آغاز شده و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده، منجر به طراحی و ساخت قالب جدیدی گردید تا شکل نهایی مورد نظر برای قطعه کار فرم دهی شود. بخش تجربی علاوه بر طراحی قالب، شامل طراحی سیستمی برای آب‌بند نمودن لوله و نیز رفع ترک‌های ایجادشده در قطعه کار با استفاده از روان‌کار مناسب می‌باشد. در بخش عددی، این فرآیند شکل‌دهی با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج مربوط به توزیع تنش فون مایز، تغییر مکان‌ها، انرژی کرنشی، انرژی داخلی، تغییر ضخامت و نیروی لازم برای انجام فرآیند به دست آمد.

¹ Multi-pass parallel tubular channel angular pressing process

² Extended stress-based forming limit diagram

³ Necking

⁴ Surface based acoustic-structural interaction

نفوذ لوله آلومینیومی وجود ندارد. قالب فلزی ساخته‌شده با سه قطعه در شکل 6 نشان داده شده است. قطعه لغزنده به دلیل قرار گرفتن بر روی سطح شیب‌دار با سرعت کمتری نسبت به فک بالایی قالب حرکت می‌کند و این اختلاف سرعت باعث می‌شود که بدنه لوله به سمت قطعه لغزنده حرکت کند و در انتهای فرآیند شکل‌دهی قطعه لغزنده حجمی از لوله را که به سمت آن آمده است، به آرامی در داخل قالب فشار می‌دهد و گوشه‌های قالب پر می‌شوند و شکل‌دهی باکیفیت‌تری انجام می‌گیرد. سطح شیب‌داری که قطعه لغزنده بر روی آن قرار دارد، دارای زاویه 20 درجه نسبت به افق می‌باشد و توسط نیرویی اعمالی از سمت قطعه بالایی قالب حرکت می‌کند.

2-3- ساخت مجموعه قطعات آب‌بندی

در هیدروفورمینگ به روش ضربه مایع، شکل‌پذیری در اثر فشار داخل لوله و هدایت قالب رخ می‌دهد. زمانی که دو سر باز لوله مسدود و آب‌بندی گردد، با کاهش حجم لوله، فشار سیال داخل لوله افزایش می‌یابد. با توجه به این که سیال مورد استفاده تراکم‌ناپذیر می‌باشد برای جلوگیری از افزایش بیش از حد فشار داخل لوله باید به صورت کنترل شده سیال داخل لوله را به بیرون هدایت نمود. به این منظور سیستم آب بند قابل‌کنترلی طراحی شد. این سیستم شامل قطعات مخروطی، قطعات پشت بند، پوشش تغلونی، محور اصلی، فشارسنج و شیر کنترل فشار می‌باشد. شکل 7 مجموعه قطعات آب بند را نشان می‌دهد. استفاده از قطعات مخروطی شکل باعث می‌شود که تغییر شکل لوله به یک چندضلعی در راستای ارتفاع مخروط به صورت پیوسته انجام شود و از تغییر شکل‌های ناگهانی که ممکن است باعث شکست در قطعه شود جلوگیری نماید. وظیفه قطعات پشت بند این است که پوشش تغلونی را در پشت قطعه مخروطی قرار دهد و مانع نفوذ آب به بیرون شود. شکل 8 مشخصات محور اصلی را نشان می‌دهد. برای اینکه بتوان قطعات پشت بند را تحت فشار بالا در دو انتهای لوله قرار داد از محوری استفاده شد که دو قطعه پشت بند را توسط دو مهره به یکدیگر اتصال می‌دهد. به دلیل استفاده از قطعات پشت بند و پوشش تغلونی محفظه داخل لوله کاملاً آب بند شده است و برای ورود یا خروج سیال به داخل محفظه نیاز به دریچه می‌باشد. برای این منظور محور اصلی از نوع لوله انتخاب شد و قطر داخلی و خارجی لوله به ترتیب 6 و 10 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود برای ارتباط محور اصلی با فضای داخل لوله روی محور سوراخی به قطر 6 میلی‌متر در دو طرف آن ایجاد گردید. با توجه به اینکه محور اصلی از دو انتهای خود به محفظه داخل لوله راه دارد، در یک طرف محور اصلی فشارسنج و در طرف دیگر شیر کنترل فشار نصب شد. به دلیل اینکه شیر کنترل فشار دو طرفه می‌باشد برای پر و تخلیه نمودن محفظه استفاده می‌گردد.



Fig. 6 The three-piece liquid impact forming die
شکل 6 قالب شکل‌دهی با ضربه مایع متشکل از سه قطعه

جدول 1 مشخصات جنس و ابعاد هندسی لوله مورد استفاده

Table 1 Material specifications and geometric dimensions of the tube used

جنس	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	طول (mm)
آلومینیوم AA6063	47	50	400

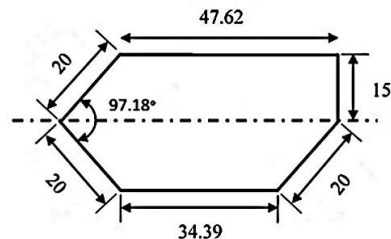


Fig. 4 The workpiece cross section

شکل 4 سطح مقطع قطعه کار

عملیات ماشین‌کاری توسط دستگاه تراش با کیفیت سطح مناسب انجام شد و بعد از اتصال قطعات ماشین‌کاری شده به کفشک، قالب سنبه ماتریس آماده انجام آزمایش شد. قالب فلزی ساخته‌شده با دو قطعه در شکل 5 نشان داده شده است.

2-2- قالب فلزی با سه قطعه

قالب سنبه ماتریس دو قطعه‌ای برای فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع مناسب نمی‌باشد. در هنگام فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع، به میزانی که پرس هیدرولیکی به سمت پایین حرکت می‌کند حجم لوله کم می‌شود. با کم شدن حجم لوله، فشار سیال داخل لوله افزایش می‌یابد. هر چه فشار داخلی زیادتر شود، آلومینیوم شکل‌پذیری بیشتری پیدا می‌کند. در انتهای فرآیند شکل‌دهی، بدنه لوله آلومینیومی بیشینه فشار را تجربه می‌کند و این امر باعث می‌شود که لوله به دلیل خالی بودن فضا در بین فک‌های بالا و پایین قالب سنبه ماتریس در این نواحی نفوذ کند و این فضای خالی را پوشش دهد. در نتیجه فک بالایی قالب نمی‌تواند با فک پایین تماس پیدا کند. از سوی دیگر، نفوذ بدنه لوله در بین دو فک باعث کشیدگی لوله شده و فرآیند شکل‌دهی را با مشکل روبرو می‌کند و باعث می‌شود که لوله اجازه پر کردن فضای داخل قالب را نداشته باشد. بنابراین باید قالب جدیدی طراحی شود که این ایرادها را اصلاح نماید. بر اساس اصول طراحی قالب‌های سنبه ماتریس فلزی، قالبی طراحی شد که از سه قسمت ثابت، متحرک و یک قطعه لغزنده تشکیل شده است. دلیل سه قطعه بودن این قالب اصلاح ایرادهای مشاهده شده در قالب سنبه ماتریس می‌باشد. در این حالت فضای خالی برای

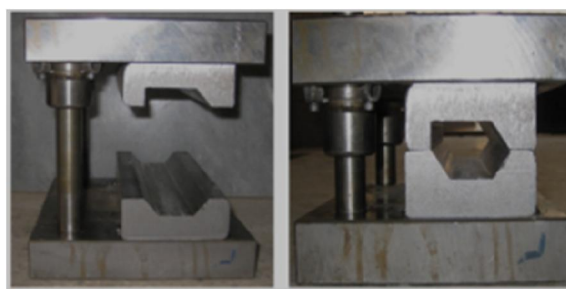


Fig. 5 The two-piece liquid impact forming die
شکل 5 قالب شکل‌دهی با ضربه مایع متشکل از دو قطعه

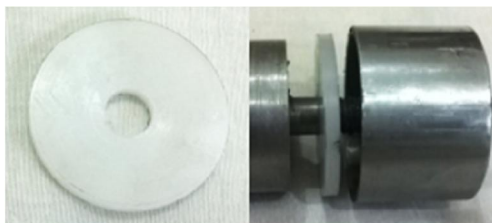


Fig. 12 Teflon coating for improved sealing

شکل 12 تفلون در نظر گرفته‌شده برای آب بندی بهتر

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

یک روش مهم در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، روش عددی است و روش اجزای محدود از جمله بهترین روش‌ها در بررسی این فرآیندها می‌باشد. با استفاده از روش اجزای محدود می‌توان همه شرایط مسئله را بسیار نزدیک به واقعیت در نظر گرفت و جواب‌های قابل‌قبولی به دست آورد. در این پژوهش، با توجه به قابلیت‌های بسیار گسترده نرم‌افزار آباکوس، این نرم‌افزار جهت انجام شبیه‌سازی اجزای محدود در نظر گرفته شد. با توجه به مشابه بودن فرایند در کل لوله یک قطعه از لوله و قالب برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. هندسه مربوط به مجموعه قالب و لوله آلومینیوم در نظر گرفته‌شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل 13 دیده می‌شود. فرض بر این است که در المان‌های پوسته‌ای آباکوس، مقاطع صفحه‌ای عمود بر صفحه پوسته به صورت صفحه باقی می‌مانند. با توجه به این که ضخامت لوله در مقابل دیگر ابعاد آن کوچک است از مدل‌سازی لایه‌ای¹ استفاده شد. قالب مورد تحلیل دارای سه قسمت متحرک، ثابت و لغزنده است و برای انجام شبیه‌سازی نیاز به مدل‌سازی هر سه قسمت می‌باشد. برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، قطعات قالب از نوع صلب² در نظر گرفته شد. این نوع سطح صلب در نرم‌افزار آباکوس نیازی به المان بندی ندارد و در نتیجه سرعت انجام شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. شرط مرزی برای قطعه متحرک، شرط جابجایی لحاظ شد. همچنین، قطعه پایینی ثابت در نظر گرفته شد و به قطعه لغزنده اجازه حرکت در اثر تماس با قالب بالایی یا لوله داده شد. با توجه به مشابه بودن فرایند در انتهای دیگر لوله شرط تقارن قرار داده شد. در فرایند شکل‌دهی بر اثر ضربه مایع، فشاری که سیال داخل لوله به بدنه وارد می‌کند یکی از عوامل مهم در شکل‌دهی با این فرآیند می‌باشد بنابراین لازم است که در شبیه‌سازی، توزیع فشار بر روی بدنه لوله در نظر گرفته شود. فشار سیال داخل لوله آلومینیومی وابسته به زمان می‌باشد و با گذشت زمان، فشار داخل لوله زیاد می‌شود. شکل 14 توزیع فشار مورد استفاده در شبیه‌سازی که مربوط به آزمایش با فشار 8 مگاپاسکال می‌باشد را نشان می‌دهد.

قطعات مربوط به قالب از نوع صلب می‌باشند. بنابراین در این شبیه‌سازی فقط لوله دچار تغییر شکل می‌شود. به دلیل استفاده از نوار تفلون ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی برابر 0.1 و تماس سطح‌ها از نوع صفحه به صفحه³ در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه سرعت حرکت پرس 2.5 میلی متر بر ثانیه می‌باشد، در شبیه‌سازی نیز سرعت قطعه بالایی همین مقدار در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه 8 ثانیه طول می‌کشد تا فرایند شکل‌دهی انجام شود، زمان حل 8 ثانیه در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی لوله آلومینیومی، المان چهار گوش پوسته‌ای⁴ در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی لوله آلومینیومی در شکل 15 نشان داده شده است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی، تعداد

¹ shell

² Analytical Rigid

³ Surface to surface

⁴ Quad-Shell-S4R



Fig. 7 Set of sealing elements

شکل 7 مجموعه قطعات آب‌بندی



Fig. 8 Main axle

شکل 8 محور اصلی

برای بررسی مقدار فشار لحظه‌ای سیال از فشارسنج استفاده شد. شکل 9 نحوه اتصال فشارسنج به محور اصلی را نمایش می‌دهد. فشارسنج استفاده شده توانایی اندازه‌گیری فشار تا میزان 100 بار را دارد و دقت آن 1 بار می‌باشد. با کاهش حجم لوله در اثر تغییر شکل فشار داخل لوله بالا می‌رود بنابراین باید حجم اضافی سیال از درون محفظه لوله به بیرون منتقل شود تا از شکاف خوردن لوله جلوگیری شود. برای اصلاح این مشکل از شیر کنترلی استفاده گردید. شکل 10 نحوه اتصال شیر کنترل را به محور اصلی نمایش می‌دهد. برای داشتن آب بندی مطمئن، در جلوی قطعه مخروطی شکل، جای یک اورینگ تعبیه شده است. هنگامی که محور دو قطعه مخروطی را به یکدیگر اتصال می‌دهد اورینگ مابین قطعه مخروطی و محور قرار گرفته و مانع نشت آب به بیرون می‌شود (شکل 11). با وجود تعبیه اورینگ در جلوی قطعه مخروطی از نشت آب به بیرون جلوگیری می‌شود. به منظور حصول اطمینان بیشتر از انجام آب‌بندی از پوشش تفلونی به ضخامت 3 میلی‌متر بین قطعه پشت بند و مخروطی استفاده گردید (شکل 12).



Fig. 9 Pressure gauge connection to the main axle

شکل 9 نحوه اتصال فشارسنج به محور اصلی



Fig. 10 Control valve connection to the main axle

شکل 10 نحوه اتصال شیر کنترل به محور اصلی



Fig. 11 Arrangement of O-ring on the conical piece

شکل 11 نحوه قرارگیری اورینگ در قطعه مخروطی

1-4-1- نتایج آزمایش قالب دو قطعه‌ای

در ابتدا برای بررسی عملکرد قالب سنبه ماتریس (دو قطعه‌ای) در فرآیند شکل‌دهی توسط ضربه مایع قالب طراحی‌شده در دو آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: آزمایش بدون پر کردن لوله از سیال و آزمایش با سیال آب.

1-4-1-1- آزمایش بدون پر کردن لوله از سیال

همان‌گونه که از نام فرآیند مشخص است، وجود سیال تحت فشار در داخل لوله الزامی می‌باشد؛ اما برای این‌که بتوان مکانیزم فرآیند شکل‌دهی را از داخل لوله مشاهده نمود این آزمایش انجام شد. نتیجه‌ای که از این آزمایش به دست آمد تا حدودی به شکل نهایی قطعه کار نزدیک بود اما به دلیل این‌که لوله در بین فک‌های قالب گیر افتاد، توسط فک‌ها کشیده شد و شکل نهایی ایجاد نگردید. نتیجه این آزمایش در شکل 16 نشان داده شده است.

1-4-2-1- آزمایش با سیال آب

آزمایش بعدی، با پر نمودن لوله از آب انجام شد. در این آزمایش نیز مشکل حالت قبل یعنی گازگرفتگی لوله مشاهده شد؛ اما تفاوت این حالت با حالت قبل در این بود که سیال تحت فشار باعث شده بود زاویه‌های دقیق‌تری ایجاد شوند و لوله تنها از یک طرف دچار گازگرفتگی شود (شکل 17).

2-4-1- نتایج آزمایش قالب سه قطعه‌ای

در قالب دو قطعه‌ای هنگامی که فک بالایی قالب به سمت پایین می‌آید لوله انحنای پیدا کرده و در فضای بین دو فک قرار می‌گیرد و باعث گازگرفتگی می‌شود. برای رفع این مشکل، فک‌های بالا و پایین طوری در نظر گرفته شدند که این دو فک مانند قبل بر روی هم سوار نشوند. در واقع مکانیزم قالب دوم به گونه‌ای می‌باشد که در انتهای فرآیند شکل‌دهی، فضای خالی بین فک‌ها وجود نداشته باشد. در انتهای این فرآیند، فشار سیال درون لوله زیاد می‌باشد و اگر فضای خالی بین فک‌های قالب وجود داشته باشد بدنه لوله در این فضای خالی نفوذ می‌کند و فرآیند را با مشکل مواجه می‌کند. قطعه سوم به گونه‌ای طراحی شده است که در هنگام فرآیند شکل‌دهی فضای خالی کوچکی را ایجاد می‌کند تا بدنه لوله وارد این ناحیه شود و در انتهای فرآیند این قطعه به آرامی حرکت نموده و بدنه لوله را به داخل فضای قالب هدایت می‌کند. این فشردگی در انتهای قالب باعث می‌شود که گوشه‌ها به خوبی شکل بگیرند.



Fig. 16 The test result for aluminium tube without filling it with liquid
شکل 16 آزمایش مربوط به لوله آلومینیومی بدون پر کردن لوله از سیال



Fig. 17 The test result for aluminium tube filled with water
شکل 17 شکل حاصل از آزمایش مربوط به لوله آلومینیومی با آب

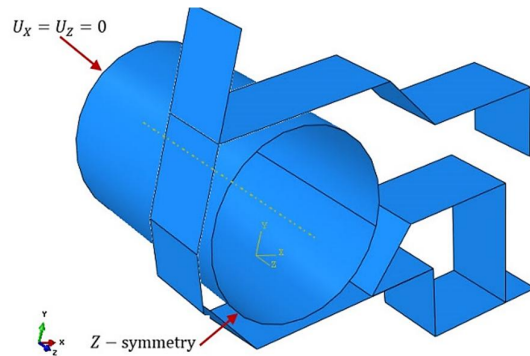


Fig. 13 Geometry of the die and aluminium tube in ABAQUS software
شکل 13 هندسه مربوط به مجموعه قالب و لوله آلومینیومی در نرم‌افزار آباکوس

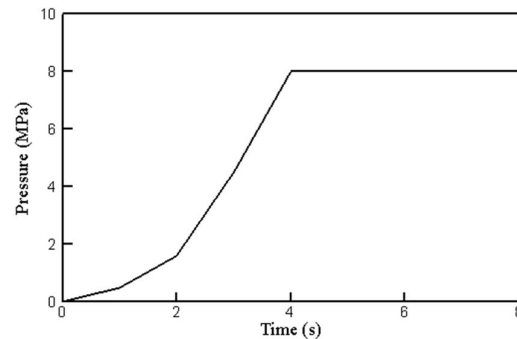


Fig. 14 Pressure variation with time

شکل 14 تغییرات فشار با زمان

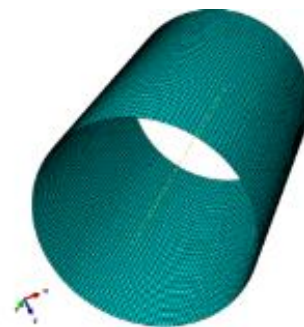


Fig. 15 Meshing of aluminium tube in ABAQUS software

شکل 15 شبکه‌بندی لوله آلومینیومی در نرم‌افزار آباکوس

المان‌ها از 750 تا 15000 افزایش داده شد. از نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش تعداد المان‌ها، مقادیر نیروی وارد بر قالب با آهنگ رشد بسیار کمی افزایش یافت به گونه‌ای که این روند در تعداد المان‌های 10000 به بالا تقریباً ثابت شد و در نهایت 10640 المان برای لوله در نظر گرفته شد. همچنین، خواص لوله آلومینیومی در دمای 20 درجه سلسیوس، با توجه به دمای محل انجام آزمایش، برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

4- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج خروجی از آزمایش‌های مربوط به فرآیند شکل‌دهی بررسی شده و با یکدیگر مقایسه می‌گردند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، از دو قالب برای فرآیند شکل‌دهی استفاده گردید. در ادامه نیز نتایج مربوط به شبیه‌سازی اجزای محدود این فرآیند ارائه شده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.



Fig. 19 The test result for tube filled with water at pressure equal to 6 bars using the three-piece die

شکل 19 آزمایش با آب در فشار 6 مگاپاسکال با استفاده از قالب سه قطعه‌ای



Fig. 20 The test result for tube filled with water at pressure equal to 7 bars in the three-piece die

شکل 20 آزمایش با آب در فشار 7 مگاپاسکال با استفاده از قالب سه قطعه‌ای



Fig. 21 The test result for tube filled with water at pressure equal to 8 bars using the three-piece die

شکل 21 آزمایش با آب در فشار 8 مگاپاسکال با استفاده از قالب سه قطعه‌ای

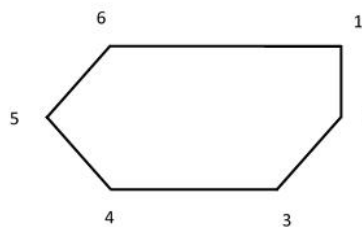


Fig. 22 Numbering the corners of the workpiece

شکل 22 شماره‌گذاری گوشه‌های قطعه کار

جدول 2 مقایسه زوایای مربوط به حالت واقعی و پیش‌فرض در حالت استفاده از آب

Table 2 Comparison between angles of the actual and default case when using water

گوشه	زاویه قطعه کار (درجه)	زاویه فرض (درجه)	اختلاف (درجه)
1	87.5	90	2.5
2	141	138.59	2.41
3	132.5	131.41	1.09
4	133	131.41	1.59
5	98	97.18	0.82
6	136.5	141.41	4.91

3-2-4- آزمایش با روغن هیدرولیک

آزمایش مرحله بعد با روغن هیدرولیک انجام شد. روغن هیدرولیک به دلیل داشتن چگالی بالاتری نسبت به سیال آب در هنگام فرآیند شکل‌دهی فشار بیشتری را به بدنه لوله وارد می‌کند. بنابراین در آزمایش بعدی از روغن هیدرولیک استفاده شد. فشار روغن مورد استفاده، برابر با 8 مگاپاسکال تنظیم

4-2-1- آزمایش با لوله خالی

همان‌گونه که در شکل 18 مشاهده می‌شود، در آزمایش با لوله خالی در حالت استفاده از قالب سه قطعه‌ای، شکل خروجی لوله یک چندضلعی نامنظم همراه با خمیدگی در اضلاع صاف بود که به دلیل عدم وجود فشار سیال ایجاد شد. همچنین تو رفتگی به وجود آمده در قسمت بالا به خاطر قطعه سوم است که در این قالب استفاده شد.

4-2-2- آزمایش با آب

در این مرحله آزمایش‌های مختلفی با توجه به فشار داخلی سیال انجام شد. برای کنترل فشار سیال داخل لوله، از شیر کنترل فشار استفاده شد. فشارهای در نظر گرفته‌شده برابر با 6 و 7 و 8 مگاپاسکال بود. نتیجه آزمایش با فشار 6 مگاپاسکال در شکل 19 مشاهده می‌شود. نتیجه آزمایش با فشار 6 مگاپاسکال تا حدودی پاسخ‌گوی فرآیند شکل‌دهی می‌باشد اما به دلیل پایین بودن فشار سیال داخل لوله، زاویه‌ها به خوبی شکل نگرفته‌اند بنابراین باید فشار داخل لوله افزایش یابد. از طرف دیگر اضلاع بالا و پایین قطعه کار به سمت داخل لوله انحنا پیدا کرده‌اند. میزان تو رفتگی و شکل‌گیری زاویه‌های قطعه کار با یکدیگر رابطه دارند؛ به میزانی که فشار داخل لوله افزایش پیدا کند، تو رفتگی از بین می‌رود و زاویه‌های قطعه کار به حالت نهایی خود نزدیک می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش فشار، فرآیند شکل‌دهی به هدف خود نزدیک‌تر شود. نتیجه آزمایش با فشار 7 مگاپاسکال در شکل 20 مشاهده می‌شود. اضلاع بالا و پایین قطعه کار با افزایش فشار دچار انحنا نشدند و در نتیجه، افزایش فشار بهبود فرآیند شکل‌دهی را به همراه داشته است. البته زوایای مربوط به قطعه کار به صورت دقیق شکل‌دهی نشده‌اند. به همین دلیل نیاز است تا فشار افزایش پیدا کند. آزمایش بعدی به منظور بهبود شکل‌دهی در زاویه‌های قطعه کار انجام شد. در این آزمایش، فشار سیال داخل لوله برابر با 8 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. نتیجه‌ی آزمایش در شکل 21 آورده شده است. با توجه به شکل 21 مشاهده می‌شود که زاویه‌ها تا حد زیادی بهبود یافته‌اند و نتیجه نهایی حاصل شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فشار، فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع با دقت بیشتری انجام می‌شود. در مورد لوله با جنس آلومینیوم، فشاری که برای شکل‌دهی در قالب طراحی شده نیاز است، 8 مگاپاسکال می‌باشد. افزایش فشار سیال داخل لوله به مقدار بیشتر از 8 مگاپاسکال تأثیری در شکل نهایی قطعه کار ندارد. البته می‌بایست توجه داشت که اگر فشار داخل لوله کنترل نشود، ممکن است موجب پاره شدن لوله آلومینیومی شود. فشار داخل لوله، به این دلیل که آلومینیوم، فلزی نرم محسوب می‌شود، باید کنترل شود.

زوایای مربوط به قطعه کار به صورتی که در شکل 22 مشاهده می‌شود، جهت مقایسه با حالت پیش‌فرض، نام‌گذاری شده‌اند. زاویه‌های مربوط به قطعه کار و حالت پیش‌فرض در جدول 2 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گوشه شماره 6 بیش‌ترین اختلاف را دارد. در مرحله بعد عملکرد روغن هیدرولیک در این فرآیند بررسی می‌شود.



Fig. 18 The test result for empty tube using the three-piece die

شکل 18 آزمایش در حالت خالی بودن لوله با استفاده از قالب سه قطعه‌ای

بعد از اتمام فرآیند شکل‌دهی، قطعه کار، به صورتی که در شکل 26 مشاهده می‌شود، از قالب خارج شد. استفاده از نوار تفلون به عنوان روان کار به دلیل ایجاد ضریب اصطکاک ثابت بین بدنه لوله و قالب باعث از بین رفتن ترک‌ها در قطعه کار شد. از دیگر مزیت‌های نوار تفلون کیفیت سطح بهتر نسبت به حالت قبل می‌باشد (شکل 27).

3-4- نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

پس از انجام آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت و نتایج مربوط به توزیع تنش فون مایز، تغییر مکان‌ها، انرژی کرنشی، انرژی داخلی، تغییر ضخامت و نیروی لازم برای انجام فرآیند شکل‌دهی استخراج گردید. توزیع تنش فون مایز در شکل 29 مشاهده می‌شود. با توجه به شکل 28، در زوایای قالب که بیش‌ترین تغییر شکل را تجربه می‌کنند، مقادیر تنش بیش از نقاط دیگر به دست آمده است. توزیع کرنش پلاستیک نیز در شکل 29 آورده شده است. به علت این‌که در گوشه‌های قالب بیش‌ترین تغییر شکل ایجاد شده است، این ناحیه دارای بیش‌ترین کرنش پلاستیک معادل می‌باشد و انتظار می‌رود در این ناحیه‌ها تنش پسماند بیش‌ترین مقدار را داشته باشد. تغییر مکان‌های لوله در نواحی مختلف نیز در شکل 30 مشاهده می‌شود. با توجه به این‌که در ناحیه‌های مختلف گرادیان تغییر مکان وجود ندارد، شرایط انجام آزمایش بهینه بوده و هیچ چروکیدگی در نمونه ایجاد نشده است. بر اثر فشار سیال داخلی، ضخامت لوله مورد آزمایش در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع تغییر می‌کند. این تغییر ضخامت در لوله ثابت نمی‌باشد و دارای توزیع پیوسته است (شکل 31). همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضخامت در گوشه‌های قطعه کار افزایش یافته است.



Fig. 25 The test result for tube filled with hydraulic oil using the three-piece die and teflon tape
شکل 25 نتیجه آزمایش با روغن هیدرولیک با استفاده از قالب سه قطعه‌ای و نوار تفلون



Fig. 26 Final form of the tube after being removed from the die
شکل 26 شکل نهایی لوله بعد از خارج نمودن از قالب



Fig. 27 Final form of the tube without cracks
شکل 27 شکل نهایی لوله بدون ترک

شد. نتیجه این آزمایش در شکل 23 مشاهده می‌شود. مقایسه بین نتیجه آزمایش با روغن هیدرولیک و حالت پیش‌فرض در جدول 3 آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف در تمام موارد کمتر از یک درجه می‌باشد. به این ترتیب نتیجه مورد نظر در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع به دست آمد. مسئله‌ای که استفاده از این سیال را در فرآیند شکل‌دهی دچار محدودیت می‌کند هزینه بالای این سیال می‌باشد.

4-2-4- رفع اشکال آزمایش در فشارهای بالا

هنگامی که فشار سیال داخل لوله افزایش می‌یابد، فرآیند شکل‌دهی به شکل بهتری انجام می‌گیرد اما افزایش فشار محدودیت‌هایی را ایجاد می‌کند. در فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع اگر فشار از مقدار خاصی (7 مگاپاسکال) بیشتر شود، در گوشه‌های قطعه کار که زاویه تیزتری دارد ترک‌های ریزی به وجود می‌آید که دلیل آن اصطکاک میان لوله و فک‌های قالب می‌باشد (شکل 24). در آزمایش‌های بعدی از روان کارهایی مانند روغن صنعتی و گریس برای از بین بردن اصطکاک بین بدنه و قطعات قالب استفاده شد. نتایج مربوط به این آزمایش نشان داد که استفاده از روان کارهای مایع، برای این فرآیند مناسب نمی‌باشد. دلیل در این است که در حین شکل‌دهی، مقدار این روان کارها بین قالب و قطعه کاهش می‌یابد و به سمت حالت بدون روان کار پیش می‌رود. بنابراین می‌بایست از روان کارهای دیگری استفاده نمود. در آزمایش بعدی از نوار تفلون به عنوان روان کار استفاده شد. در این آزمایش نوار تفلون به بدنه لوله آلومینیومی پیچیده شد و در قالب شکل‌دهی قرار داده شد (شکل 25).



Fig. 23 The test result with hydraulic oil as the fluid using the three-piece die

شکل 23 نتیجه آزمایش با روغن هیدرولیک با استفاده از قالب سه قطعه‌ای

جدول 3 مقایسه زوایای مربوط به حالت واقعی و پیش‌فرض در حالت استفاده از روغن هیدرولیک

Table 3 Comparison between angles of the real and default case when using hydraulic oil

گوشه	زاویه قطعه کار (درجه)	زاویه فرض (درجه)	اختلاف (درجه)
1	90	90	0
2	139	138.59	0.41
3	132	131.41	0.59
4	131	131.41	0.41
5	98	97.18	0.82
6	141	141.41	0.41



Fig. 24 Cracks appearing from sharp points in the final form
شکل 24 ترک خوردن از محل نوک‌تیز در شکل نهایی

توزیع ضخامت ایجادشده در راستای محیط لوله حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل 32 نشان داده شده است. نقطه صفر با توجه به شکل 22 گوشه شماره یک در نظر گرفته شد و توزیع ضخامت به صورت پادساعتگرد در نظر گرفته شد. در شکل 33 تغییرات انرژی برای لوله نشان داده شده است. با توجه به اینکه در حین فرایند تغییر شکل‌ها مداوم زیاد می‌شوند انرژی لوله نیز افزایش یافته است. در شکل 34 نمودار نیرو-زمان اعمالی به فک بالایی قالب نشان داده شده است. با گذشت زمان به میزانی که فشار سیال داخل لوله افزایش می‌یابد نیروی وارد بر قالب نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با گذشت زمان سطح مشترک بین قالب و بدنه لوله بیشتر شده و این امر خود باعث افزایش نیرو بر فک بالایی قالب می‌شود.

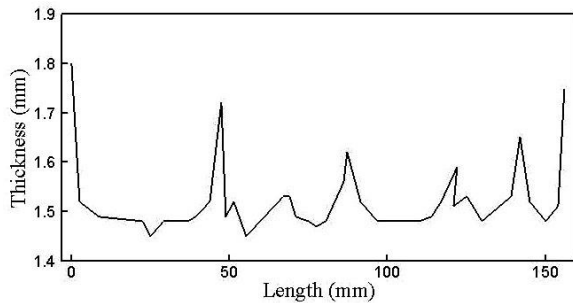


Fig. 32 Distribution of thickness along the perimeter of the tube
شکل 32 توزیع ضخامت در طول محیط لوله

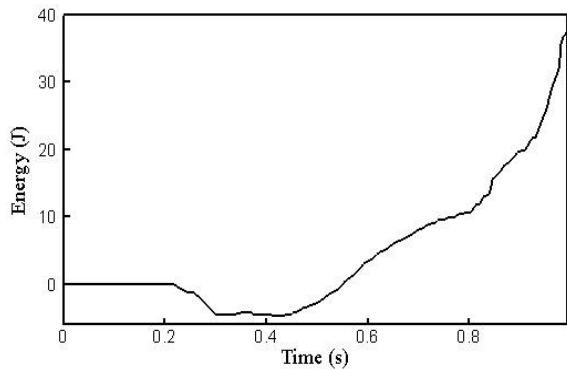


Fig. 33 Variation of energy in the tube with time
شکل 33 تغییرات انرژی در لوله با زمان

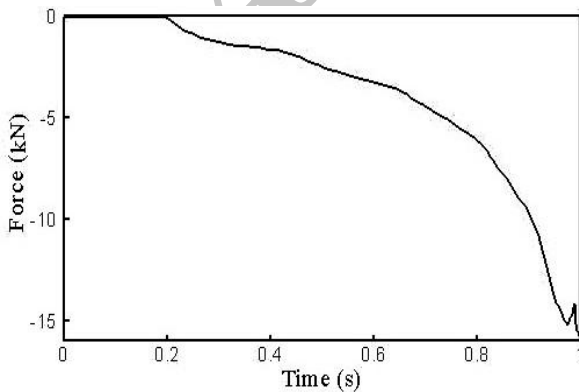


Fig. 34 Variation of force exerted on the upper die section with time
شکل 34 تغییرات نیروی اعمال شده به فک بالایی قالب با زمان

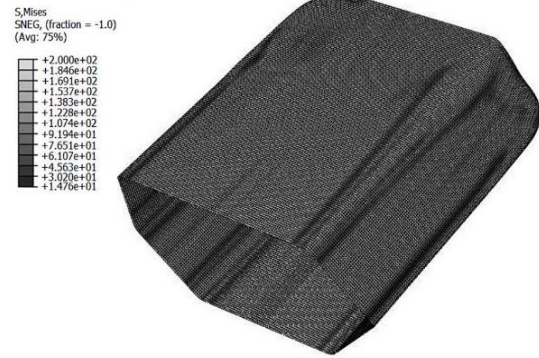


Fig. 28 Distribution of Von Mises stress (MPa)
شکل 28 توزیع تنش فون مایز (مگاپاسکال)

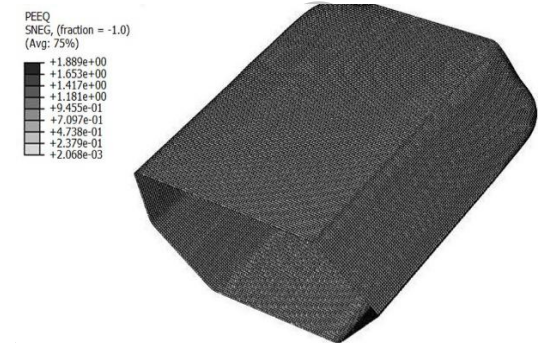


Fig. 29 Distribution of plastic strain
شکل 29 توزیع کرنش پلاستیک

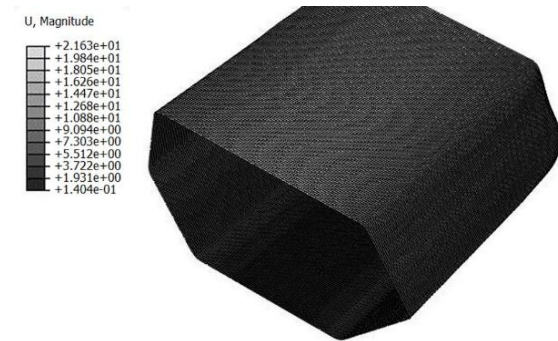


Fig. 30 Distribution of displacement
شکل 30 توزیع تغییر مکان

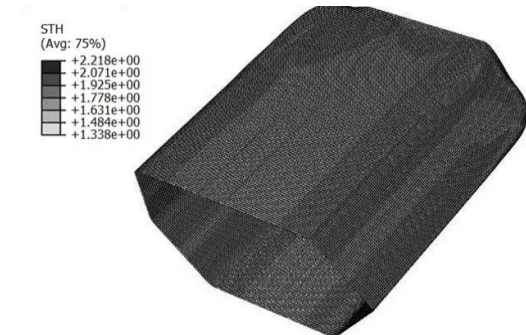


Fig. 31 Distribution of thickness in the tube
شکل 31 توزیع ضخامت در لوله

قالب می‌باشد، از نوار تفلون به عنوان روان کار استفاده شد و باعث رفع ترک‌ها و کیفیت سطح بالاتری گردید
 5- زوایای قالب بیش‌ترین تغییر شکل را تجربه می‌کنند و مقادیر تنش در این نقاط بیشینه است و به همین دلیل، این ناحیه دارای بیش‌ترین کرنش پلاستیک معادل می‌باشد.

6- مراجع

- [1] S.H. Zang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.91, No.1, pp. 236-244, 1999.
- [2] F. Mohammadi, M. M. Mashadi, Determination of the loading path for tube hydroforming process of a copper joint using a fuzzy controller, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.43, No.1, pp. 1-10, 2009
- [3] L. Lang, Z. Wang, D. Kang, S.Yuan, S.-H. Zhang, J. Danckert, et al, Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming, *Journal of Material Processing Technology*, Vol.151, No.1, pp. 165-177, 2004
- [4] M. Ahmetoglu, K. Sutter, X. j. Li, T. Altan, Tube hydroforming: Current research, applications and need for training, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No.1, pp. 224-231, 2000.
- [5] Yingyot Aue-U-Lan, Gracious Ngaile, Taylan altan, optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.146, No.1, pp.137-143, 2004
- [6] M.Koc, *Hydroforming for Advanced Manufacturing*, pp. 267-287, New York: Woodhead Publishing, 2008
- [7] M.Koc, *Hydroforming for Advanced Manufacturing*, pp. 52-74, New York: Woodhead Publishing, 2008
- [8] *liquid_impact_forming_dies*, Accessed on 29 May 2016; <http://www.gtd.com>
- [9] Ash, Stanley P, *Liquid impact tool forming mold*, US Patent, No. 5630334, 1997
- [10] *The HOW, WHAT, and WHY of liquid impact forming*, Accessed on 31 August 2016; <http://www.thefabricator.com>
- [11] C. Nihare, M. Weiss, P. D. Hodgson, Die closing force in low pressure tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No.15, pp. 2238-2244, 2010
- [12] Chengming Huang, Jianwei, Yinzong Zhong, Minjian, kaiming wang1 and rongqin zhou, exploring liquid impact forming technology of the thin-walled tubes, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 633-634, pp 841-844, 2014.
- [13] M. Hosseinzade, H. Mostajeran, M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji, S. Nourouzi1, S. J. Hosseini-pour, Novel combined standard hydromechanical sheet hydroforming process, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 3, pp. 447-457, March 1, 2010 .
- [14] H. Abdolvand, G. Faraji, M.K.B Givi, R. Hashemi, M. Riazat, Evaluation of the microstructure and mechanical properties of the ultrafine grained thin-walled tubes processed by severe plastic deformation, *Metals and Materials International*, Vol. 21, No. 6, pp. 1068-1073, 2015.
- [15] E. Masoumi, A. Ghazanfari, R. Hashemi, Loading Path Determination for Tube Hydroforming Process of Automotive Component Using APDL, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 555-563, 2013.
- [16] F. Hajjalizadeh, M. M. Mashhadi, Investigation and numerical analysis of impulsive hydroforming of aluminum 6061-T6 tube, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, No.1, pp. 257-273, 2015.
- [17] *Company catalog Zanjan Aras*, Accessed on 29 May 2016; <http://www.araszanjan.com/fa/araszanjandownloads/downloads.html>.

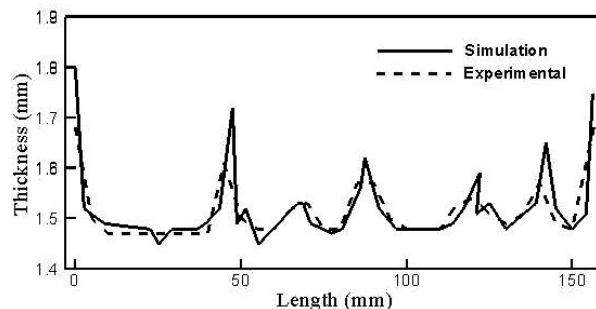


Fig. 35 Comparison between the thicknesses obtained from experiment and simulation

شکل 35 مقایسه ضخامت ایجاد شده حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی

4-3-1- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی، ابتدا قطعه کار توسط وایرکات برش داده شد و سپس ضخامت‌های ایجاد شده با کولیس دیجیتال اندازه گرفته شد. قطعه کار مربوط به آزمایش با فشار 8 مگاپاسکال در حالت استفاده از روغن هیدرولیک بوده است. در شکل 35 نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به ضخامت ایجاد شده مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی با دقت مناسبی به نتایج حاصل از کار تجربی نزدیک می‌باشند. با توجه به شکل 22 بیش‌ترین تغییر ضخامت مربوط به گوشه شماره یک می‌باشد. در این گوشه 12 درصد افزایش ضخامت نسبت به حالت اولیه وجود داشته است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع برای یک لوله جدار نازک از جنس آلومینیوم به روش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی، دو نوع قالب جهت تغییر شکل لوله به یک قطعه کار با سطح مقطع چندضلعی طراحی و ساخته شد. در شبیه‌سازی عددی، نتایج مربوط به توزیع تنش فون مایز، تغییر مکان‌ها، انرژی کرنشی، انرژی داخلی، تغییر ضخامت و نیروی لازم برای انجام فرآیند استخراج گردید. نتایج به دست آمده از کار تجربی و شبیه‌سازی عددی به شرح زیر می‌باشد:

- 1- قالب سنبه ماتریس دو قطعه‌ای برای فرآیند شکل‌دهی با ضربه مایع به دلیل نفوذ بدنه لوله در بین دو فک و کشیده شدن لوله، فرآیند شکل‌دهی را با مشکل مواجه می‌سازد.
- 2- استفاده از روغن هیدرولیک به دلیل تراکم ناپذیری بالایی که دارد باعث شکل‌دهی بسیار مناسب‌تری نسبت به آب می‌شود اما مسئله‌ای که استفاده از این سیال را در فرآیند شکل‌دهی دچار محدودیت می‌کند هزینه بالای این سیال می‌باشد.
- 3- افزایش فشار از یک مقدار مشخص به بعد، دیگر تأثیری بر فرآیند شکل‌دهی ندارد. این مقدار متناسب با جنس لوله و هندسه قالب می‌باشد.
- 4- به منظور رفع ترک‌های ریز به وجود آمده در گوشه‌های قطعه کار که ناشی از تغییرات ناگهانی حاصل از نیروهای اصطکاک، فشار سیال و