

Design and Manufacture of Low-Pressure Hydroforming Machine for Aluminum Tubes and Production of Rectangular Cross Section

Seyed Jalal Hashemi ^{a*}, Alireza Bahadory ^b, Sadegh Mirzamohammadi ^c

^a Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

^c Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Hashemi S H, Bahadory A, Mirzamohammadi S. Design and Manufacture of Low-Pressure Hydroforming Machine for Aluminum Tubes and Production of Rectangular Cross Section. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2(2): 156-171.

 <https://10.52547/masm.2.2.156>.

KEYWORDS

Tube forming,
Hydroforming,
Thickness distribution,
Corner radius.

ABSTRACT

In tube hydroforming, internal pressure is used to deform tube cross section. Internal pressure causes plastic deformation and conforming external surface of tube to die cavity. Low-pressure tube hydroforming is one category of this process. The method of performing low-pressure hydroforming of the tube is like to compressing a solid object, in which, unlike high-pressure hydroforming, the upper mold is not fixed during the process and moves and presses the tube at the same time as internal pressure is applied to the tube. In this paper, firstly a low-pressure tube hydroforming machine have been designed and fabricated and then, the low-pressure hydroforming process of aluminum tube is performed and the round section of the tube is transformed into a rectangular cross section by the hydroforming process. Also, the thickness distribution and the values of the radius of the formed corner are investigated under three different loading paths. The results show that by increasing the internal pressure, a smaller corner radius can be achieved but the thinning increases. Also, the maximum flat surface of the upper part is obtained when the upper mold is displaced after the internal pressure reaches its maximum value.

Extended Abstract

1. Introduction

Tube hydroforming process is used for forming complicated parts in many industries including automotive industry, aerospace, military industry and home appliance industry. Although this process has been noticed in the industry since recent decades, its experimental and theoretical developments date back to 1940. Gray et al. [1] published a paper about producing T-shape copper tubular parts using internal pressure and axial feed in 1940. The use of hydrostatic pressure in metal forming processes for tubular parts was first presented by Fuchs [2]. In 1999, Asnafi [3] analyzed the tube hydroforming process analytically and obtained relations for the material deformation behavior during the process based on the material properties, die shape and loading curve. Usually, high internal pressure is used in the hydroforming process to shape the pipe and ensure the formation of the corners of the part. In high pressure tube hydroforming (HPTH), two halves of the die is closed and forming is done by applying high pressure [4]. But in HPTH, there are problems such as the need for a high pressure supply system and high force to keep the two halves of the die closed. In order to eliminate HPTH problems, a new process called low pressure pipe hydroforming (LPTH) has been considered. In general, in this process, the internal pressure used for forming of the tube is defined by the Tube and Pipe Fabricators Association as less than 83 MPa [5]. In LPTH, the tube is filled by low pressure fluid while the upper die is movable and the dies are closed during the process [6]. Hashemi et al. [7] conducted a research on the prediction of bursting in pipe hydroforming.

* Corresponding author. Tel.: 02166319882

E-mail address: j_hashemi@tvu.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.2.156>.

Received: April 7, 2022; Received in revised form: July 8, 2022; Accepted: August 16, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



2. Procedure

In this experimental study, circular cross section of an aluminum tube has been changed to rectangular form by applying three different loading paths. One of the innovations of this experiment is to achieve the optimal loading path for changing the tubular form of AA6063 aluminum alloy. One of the objectives of this experimental study is to investigate the outer and middle profile, surface flatness, upper and lower corner radius, and appropriate thickness distribution of the formed part by applying three different loading paths and finally achieving the optimal loading path.

The scheme of how to perform LPTH in this research is shown in two-dimensional form in Figure 1. In this process, the lower die is fixed and the tube is placed inside it. The upper die is movable and by moving downwards, it changes the shape of the tube. In order to prevent indentation in the upper wall of the tube and also to create corners with a smaller radius, internal pressure is used. The ratio of changes in the internal pressure of the tube to the displacement of the upper die during process will greatly affect the shape and quality of the final product.

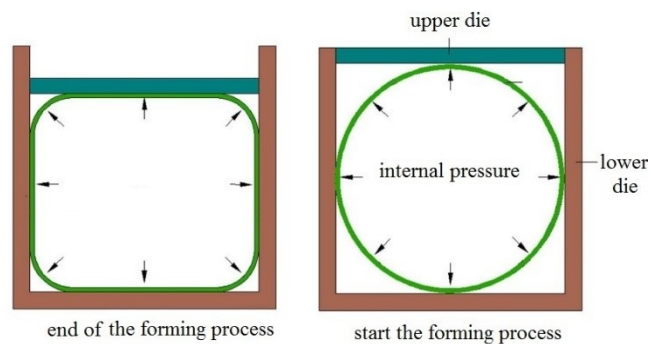


Figure 1. The scheme of how to perform LPTH

Figure 2 shows all the components used in the die and Figure 3 shows the final view of the experimental setup.

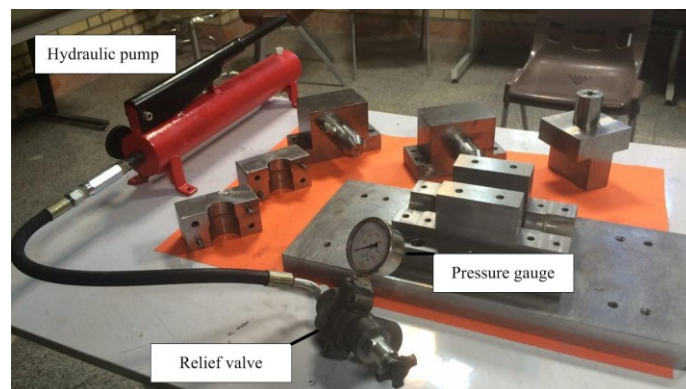


Figure 2. components of experimental LPTH setup

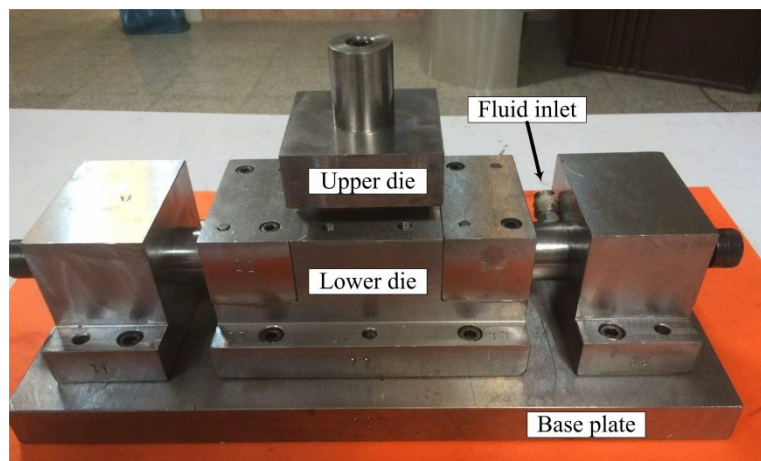


Figure 3. final setup

Three methods of applying load are considered for the forming of the part, which are mentioned below:

- 1- Apply pressing force and move the upper die by 10 mm without applying internal pressure
- 2- Applying internal pressure of 100 bar after applying pressing force and moving the upper die by 10 mm.
- 3- Touching the upper die with the tube and providing tangential force, then applying 100 bar internal pressure, applying pressing force and moving the upper die by 10 mm.

The parts produced by all three loading curves are shown in Figure 4.

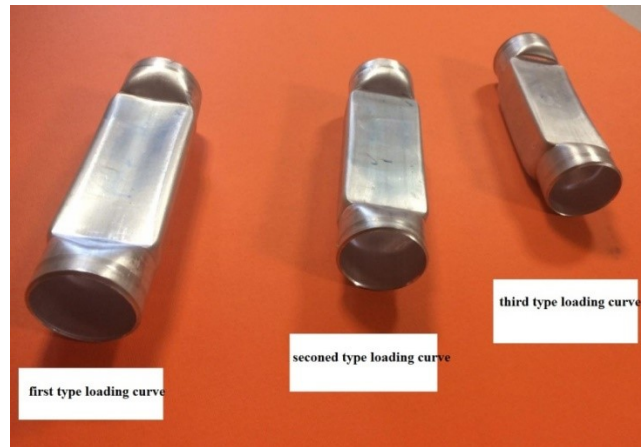


Figure 4. Formed parts using different loading curves

3. Conclusios

The upper and lower corners of the part are important parameters in the production of the part. Also the optimal corners are the corners with a smaller and sharper radius. As a result, the third type path of loading curve means applying the initial internal pressure and then moving the upper die with an upper is suggested. One of the important parameters of the part production is the profile of the uniform cross-section without dents. According to the profiles obtained in the experimental method and comparing these three profiles, the internal pressure of 100 bar is the optimal pressure loading curve and the uniform cross-sectional area profile is obtained.



طراحی و ساخت دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی و تولید مقطع مستطیلی

سید جلال هاشمی^{الف*}، علیرضا بهادری^ب، صادق میرزامحمدی^ج

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای کشور، تهران، ایران، j_hashemi@tvu.ac.ir

^ب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، a-bahadory@email.kntu.ac.ir

^ج استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای کشور، تهران، ایران، S-Mirzamohammadi@tvu.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
در فرآیند هیدروفرمینگ لوله برای تغییر شکل سطح مقطع، از فشار داخلی یک سیال استفاده می‌شود. فشار داخلی باعث تغییر شکل پلاستیک و منطبق شدن سطح خارجی لوله با شکل حفره قالب می‌شود. یکی از دسته‌های این فرآیند، هیدروفرمینگ فشار پایین می‌باشد. روش انجام هیدروفرمینگ فشار پایین لوله، شبیه فشردن جسم جامد است و در آن برخلاف هیدروفرمینگ فشار بالا، قالب بالایی در طول فرایند ثابت نبوده و هم‌زمان با اعمال فشار داخلی به لوله، حرکت کرده و لوله را تحت فشار قرار می‌دهد. در این مقاله، ابتدا یک دستگاه هیدروفرمینگ فشار پایین طراحی و ساخته شده است و سپس فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین لوله‌های آلومینیومی انجام شده و مقطع دایروی لوله به وسیله فرایند هیدروفرمینگ به مقطع مستطیلی تغییر شکل داده است. همچنین توزیع ضخامت و مقادیر شعاع گوشه شکل داده شده، تحت سه مسیر بارگذاری متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فشار داخلی می‌توان به شعاع گوشه کمتری دست پیدا کرد اما نازک‌شدگی افزایش پیدا می‌کند. همچنین بیشترین تختی سطح بالایی قطعه، زمانی حاصل می‌شود که جابجایی قالب بالایی بعد از رسیدن فشار داخلی به مقدار ماکزیمم خود انجام شود.	شکل‌دهی لوله، هیدروفرمینگ، توزیع ضخامت، شعاع گوشه.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

۱- مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله، در بسیاری از صنایع از جمله صنایع خودروسازی، هوافضا، لوازم خانگی و صنایع نظامی برای شکل‌دهی قطعات پیچیده به کار می‌رود. اگر چه این فرایند از دهه‌های اخیر در صنعت مورد توجه قرار گرفته است ولی پیشرفت‌های تجربی و نظری آن به سال ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد. گری و همکاران [۱] در سال ۱۹۴۰ مقاله‌ای در مورد تولید قطعات T-شکل مسی به وسیله فشار داخلی و تغذیه محوری منتشر کردند. استفاده از فشار هیدرواستاتیک در فرایندهای شکل‌دهی فلزات برای قطعات لوله‌ای شکل، اولین بار توسط فوخرس [۲] ارائه شد. اسنافی [۳] در سال ۱۹۹۹ فرایند هیدروفرمینگ لوله را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داد و روابطی برای رفتار تغییر شکل ماده حین فرایند براساس خواص ماده، شکل قالب و منحنی بارگذاری به دست آورد. معمولاً در فرایند هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی لوله و اطمینان از شکل‌گیری گوشه‌های قطعه از فشار بالای داخلی استفاده می‌شود. در هیدروفرمینگ لوله فشار بالا^۱ دو نیمه قالب بسته شده و با اعمال فشار زیاد، شکل‌دهی انجام

^۱ HPTH

می‌شود [۴]. اما در HPTH مشکلاتی مانند نیاز به یک سیستم تأمین‌کننده فشار بالا و نیروی زیاد برای بسته نگه‌داشتن دو نیمه قالب وجود دارد. در راستای حذف مشکلات HPTH، فرایند جدیدی به نام هیدروفرمینگ لوله فشار پایین^۱ مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی در این فرایند فشار داخلی مورد استفاده برای شکل‌دهی لوله توسط انجمن سازندگان لوله^۲، کمتر از ۸۳ مگاپاسکال تعریف شده است [۵]. در LPTH، لوله به‌وسیله سیال با فشار پایین پر می‌شود در حالی که قالب بالایی متحرک بوده و در طول انجام فرایند قالب‌ها بسته می‌شوند [۶]. هاشمی و همکاران [۷]، تحقیق بر روی پیش‌بینی ترکیب در هیدروفرمینگ لوله انجام دادند. بر اساس نتایج آن‌ها معیار آبدای اصلاح‌شده بهترین پیش‌بینی را برای مقاطع مربعی در فرایند هیدروفرمینگ دارد. برخلاف HPTH، تحقیقات زیادی بر روی LPTH انجام نشده است. هوانگ و آلتان [۸] تبدیل مقطع گرد لوله را به مثلث با استفاده از LPTH مورد بررسی قرار دادند. همچنین این دو در مطالعه دیگری [۹] تولید مقطع مستطیلی را به‌وسیله LPTH مطالعه کرده‌اند. نیخاره و همکاران [۱۰] نیز یک مدل تحلیلی برای تعیین نیروی بستن قالب در LPTH توسعه دادند. ژانگ و همکاران [۱۱، ۱۲] به‌صورت تحلیلی روی گشتار خمشی ایجادشده ناشی از حرکت قالب بالایی در فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین کار کردند و نشان دادند که با حرکت هم‌زمان دو قالب بالا و پایین می‌توان به توزیع ضخامت و شعاع گوشه بهتری دست یافت. نیخاره و همکاران [۱۳] مدلی برای پیش‌بینی کمناش سطح بالایی لوله در زمان پایین آمدن قالب بالایی در هیدروفرمینگ فشار پایین پیشنهاد دادند. این مدل نشان داد که حداقل فشار لازم، بیشترین وابستگی را به تنش تسلیم جنس لوله دارد. چو و همکاران [۱۴] بر روی به دست آوردن فشار بحرانی در جهت کاهش برگشت فنری در هیدروفرمینگ لوله فشار پایین کار کردند. نتایج نشان داد که یک مقدار بحرانی برای فشار داخلی وجود دارد که بر اثر آن کمترین برگشت فنری رخ خواهد داد و در فشارهای بالاتر و کمتر از مقدار بحرانی، برگشت فنری افزایش می‌یابد. تروت و نیخاره [۱۵] با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی برای به دست آوردن پیش‌فرم مناسب جهت استفاده در هیدروفرمینگ فشار پایین تحقیق کردند که نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش فشار داخلی می‌تواند کمناش سطح بالایی لوله و مشکل ضخیم شدن دیواره را کمتر کند. نیخاره و همکارانش [۱۶] نشان دادند که سرعت حرکت قالب بالایی به‌شدت می‌تواند روی نازک‌شدگی، پرشدگی گوشه قالب و کمناش لوله تأثیرگذار باشد. این مطالعه بر روی تغییر شکل مقطع گرد لوله در حالت مربعی انجام شد. نیخاره در تحقیق دیگری [۱۷] روش هیدروفرمینگ فشار پایین را بر روی لوله با ابعاد میکرو آزمایش کرد. در این تحقیق بالچ آزاد لوله‌های با قطر خارجی اولیه ۲ میلی‌متری به‌طوری انجام شد که قالب انتهایی متحرک باشد و ارتفاع بالچ با فشار کمتر داخلی، تا نسبت‌های بالچ بالا افزایش یابد.

۲- بیان مسئله، نوآوری و اهداف

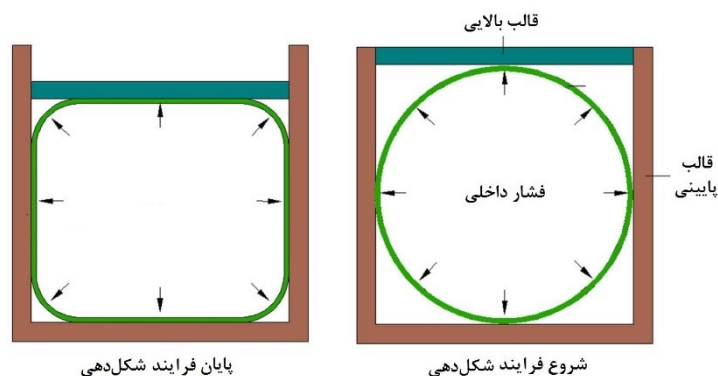
در این آزمایش تجربی با اعمال سه مسیر بارگذاری متفاوت بر روی لوله‌ای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۳۷ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول ناحیه پرس کاری ۱۰۰ میلی‌متر برای تغییر شکل مقطع از دایره به مستطیل در داخل حفره قالب مستطیلی با گوشه‌های تیز، انجام شده است. از نوآوری این آزمایش دستیابی به مسیر بارگذاری بهینه برای تغییر فرم لوله‌ای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 می‌باشد. از اهداف این آزمایش تجربی نیز بررسی پروفیل بیرونی و میانی، تختی سطح، شعاع گوشه بالایی و پایینی و توزیع ضخامت مناسب قطعه تغییر فرم داده‌شده با اعمال سه مسیر بارگذاری متفاوت و در نهایت دستیابی به مسیر بارگذاری بهینه می‌باشد.

۳- روش تحقیق

طرح‌واره نحوه انجام LPTH در این پژوهش به‌صورت دوبعدی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این فرایند، قالب پایین ثابت می‌باشد و لوله درون آن قرار می‌گیرد. قالب بالا متحرک بوده و با حرکت به سمت پایین باعث تغییر شکل لوله می‌شود. به‌منظور جلوگیری از فرورفتگی در قسمت بالای لوله و همچنین ایجاد گوشه‌های با شعاع کمتر، فشار داخلی درون لوله ایجاد می‌شود. نسبت تغییرات فشار داخلی لوله به جابجایی قالب بالایی در زمان بسته شدن تأثیر زیادی بر شکل و کیفیت محصول نهایی خواهد داشت.

^۱ LPTH

^۲ Tube and Pipe Fabricators Association



شکل ۱ طرح‌واره نحوه انجام LPTH

در این آزمایش تجربی از یک قالب هیدروفرمینگ با یک ماتریس و دو عدد اینسرت^۱ استفاده شده است. ماتریس بر روی کفشک پایینی مونتاژ شده و اینسرت‌ها نیز به وسیله پیچ و پین بر روی ماتریس نصب می‌شوند. هنگام جایگذاری لوله داخل قالب، این اینسرت‌ها باز می‌شود و بعد از جایگذاری لوله بسته می‌شود. در پایان عملیات هیدروفرمینگ لوله، با باز کردن اینسرت‌ها، لوله از داخل قالب خارج می‌شود. در این قالب برای تأمین نیروی تغییر فرم، از یک سنبه که به وسیله توپی به گلویی دستگاه پرس هیدرولیک وصل شده، استفاده شده است. همچنین از دو عدد سنبه محوری جهت تأمین نیروی محوری، آب‌بندی و اعمال فشار داخلی به همراه دو عدد سنبه‌گیر هم‌جهت نگهداری سنبه‌ها استفاده می‌شود. سنبه‌گیرها باید نیروی عکس‌العمل سنبه‌ها را تحمل کنند. نیروی محوری و نیروی مورد نیاز جهت آب‌بندی نیز به وسیله دو عدد پیچ M20 که بر روی سنبه‌گیر مونتاژ شده تأمین می‌گردد. در نهایت، یک پمپ هیدرولیک دستی با ظرفیت ۴۰۰ بار جهت پمپ روغن به داخل لوله و یک پرس هیدرولیکی ۶۰ تنی نیز جهت عملیات پرسینگ در این فرآیند به کار گرفته شده است.

۴- شبیه‌سازی اجزاء محدود

به منظور بررسی بیشتر تغییر شکل لوله طی فرایند هیدروفرمینگ فشار پایین از شبیه‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس^۲ استفاده شده است. در شکل ۲، مدل سه‌بعدی به صورت برش خورده نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی، قالب بالایی و قالب پایینی به صورت صلب گسسته و لوله به عنوان یک سطح شکل‌پذیر مدل شده‌اند. به منظور مش‌بندی لوله از المان S4R با اندازه المان ۲ میلی‌متر استفاده شده است. در زمان انجام شکل‌دهی، قالب پایین در مکان خود ثابت بوده و قالب بالایی مطابق با منحنی بارگذاری از پیش تعریف شده باعث تغییر شکل مقطع لوله می‌شود. منحنی تنش-کرنش حقیقی ساده حاصل از نتایج کشش تک‌محوری در دمای محیط، در بخش خواص پلاستیک نرم‌افزار وارد شده است. برای شرایط تماسی سطح خارجی لوله و قالب در این تحقیق، مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک مطابق با مدل اصطکاک کولمب^۳ با مقدار ۰/۳ استفاده شده است. در هنگام شکل‌دهی لوله تحت تمام منحنی‌های بارگذاری، دو انتهای لوله مقید بوده و تغذیه محوری اعمال نشده است. فشار سیال هیدروفرمینگ نیز با فشار یکنواخت سطحی شبیه‌سازی شده است.

۵- آزمایش‌های تجربی

۵-۱- قطعه مورد بررسی

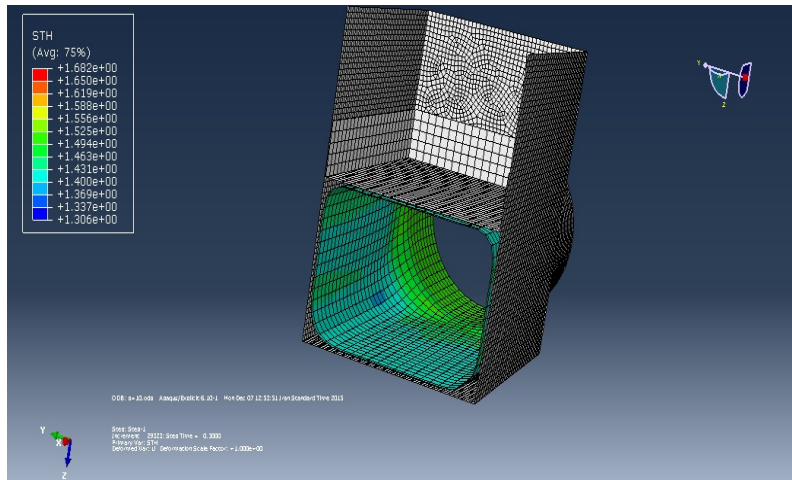
قطعه مورد استفاده برای شکل‌دهی، لوله‌ای از آلیاژ آلومینیوم AA6063 با قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و طول ۱۴۰ میلی‌متر می‌باشد. قطعه پس از شکل‌دهی به یک مقطع مستطیل شکل مطابق شکل ۳ تبدیل می‌شود. در این شکل

¹ Insert

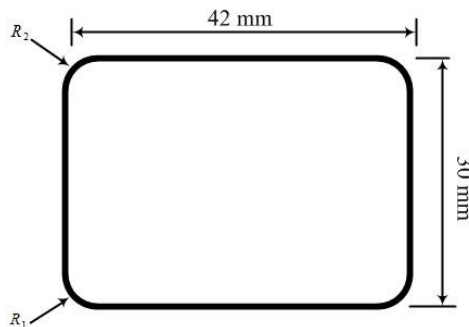
² Abaqus

³ Coulomb friction model

شعاع گوشه بالایی مقطع با R_2 و شعاع گوشه پایینی مقطع با R_1 نشان داده شده است. نمونه‌ای از قطعه شکل‌دهی شده به وسیله این فرایند در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲ مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی



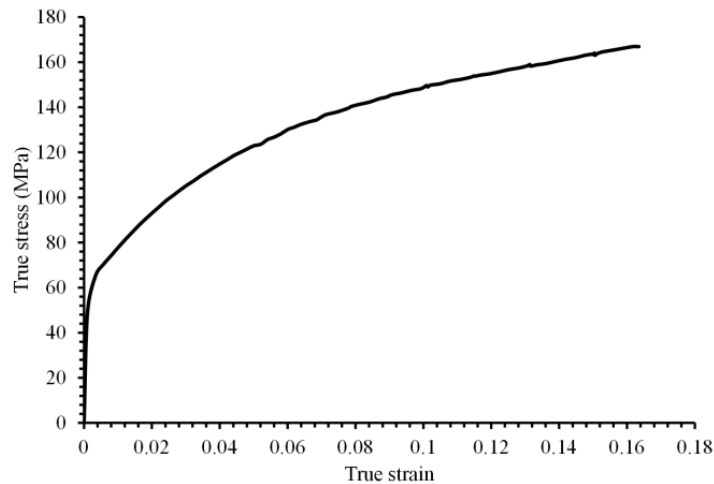
شکل ۳ سطح مقطع قطعه پس از شکل‌دهی



شکل ۴ فرم نهایی قطعه شکل‌دهی شده

۵-۲- خواص لوله

به‌طور معمول، برای تشخیص رفتار تغییر شکل ماده مورد استفاده برای ساخت لوله از آزمون کشش تک‌محوری استفاده می‌شود. بدین منظور، این آزمون مطابق با استاندارد ASTM-E8M، در آزمایشگاه شکل‌دهی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. نمودار تنش- کرنش حقیقی حاصل از این آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است و در جدول ۱ مشخصات و خواص لوله آورده شده است.



شکل ۵ نمودار تنش- کرنش لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم AA6063

جدول ۱ خواص و مشخصات لوله جدول ۱ خواص و مشخصات لوله

پارامتر (واحد)	مقدار
ضریب استحکام (MPa)	۴۷۴/۳
ضریب کارسختی	۰/۳۳۹۱
تنش تسلیم (MPa)	۶۵
استحکام نهایی (MPa)	۱۶۳

۵-۳- طراحی اجزاء مکانیکی

در طراحی و ساخت ابزار و قالب هیدروفرمینگ لوله، پارامترهای فراوانی دخیل بوده که در زیر مهم‌ترین آن‌ها ذکر شده است:

- استحکام اجزاء در برابر نیروها و تنش‌های موجود در فرایند
- پرداخت سطوح درگیر با قطعه جهت کاهش اصطکاک و کمک به جریان مواد در قالب
- به‌کارگیری تolerانس‌های دقیق ابعادی و هندسی
- آب‌بندی مناسب
- طراحی سیستم و نیروی پرسینگ قالب
- طراحی سیستم اعمال نیروی محوری در دو طرف لوله‌ها و اعمال فشار داخلی

قالب مدنظر در نرم‌افزار کتیا^۱ V5R20 طراحی شده که طرح‌واره آن در شکل ۶ نشان داده شده است. در این قالب از شش عدد پیچ M۱۰، دو عدد پیچ M۸ و مجموعاً ده عدد پین که دو عدد جهت بستن قسمت پایینی ماتریس به کفشک، دو عدد جهت مونتاژ هرکدام از اینسرت‌ها به ماتریس و دو عدد پین برای هرکدام از سنبه‌گیرها جهت بستن به ماتریس استفاده شده است تا قطعات بتوانند تنش‌های وارده در عملیات هیدروفرمینگ لوله را تحمل کنند. در شکل ۷ تمام اجزای به‌کاررفته در قالب و در شکل ۸ نمای نهایی قالب نشان داده شده است.

در این قالب مقدار طول ناحیه پرس کاری ۱۰۰ میلی‌متر و نشیمنگاه لوله از هر طرف ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین از یک مقطع مخروطی جهت آب‌بندی سنبه‌ها و سوراخ محوری ماتریس در هنگام اعمال فشار داخلی به لوله استفاده شده است. لازم به ذکر است که یکی از قسمت‌های مهم در ساخت این قالب، هم‌محوری دقیق بین نشیمنگاه چپ و راست قالب و سنبه‌های محوری می‌باشد.

^۱ Catia

۴-۵- محاسبه نیروی پرس قطعه

در ابتدا به منظور اینکه فشار داخلی به تنهایی دچار تغییر شکل پلاستیک لوله نشود و محیط لوله بر اثر فشار داخلی تغییری نداشته باشد، فشار داخل لوله آلومینیومی AA6063، ۱۰۰ بار فرض شده است. سپس با در نظر گرفتن این فرض، برای غلبه بر نیروی عکس العمل ناشی از تغییر فرم باید از پرس استفاده کنیم که می توان نیروی پرس را از رابطه ۱ محاسبه کنیم که در این رابطه، F نیروی مورد نیاز بر حسب نیوتون، P فشار داخلی بر حسب بار و A مساحت سطح مقطع ناحیه پرس کاری بر حسب میلی متر مربع می باشد.

$$F = P \times A \quad (1)$$

با جایگذاری مقادیر P و A که به ترتیب برابر ۱۰۰ بار و ۴۰۰۰ میلی متر مربع می باشد در رابطه ۱، مقدار F ، ۴ تن به دست می آید. در نتیجه پرس ۴ تن به بالا مورد نیاز می باشد. در این آزمایش تجربی از پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰ تن استفاده شده است.

۵-۵- محاسبه نیروی محوری وارده به سنبه ها، پیچ ها و آب بندی

برای تأمین نیروی آب بندی محوری، از دو پیچ M۲۰ خشکه فولادی با درجه استحکام ۸،۸ استفاده شده است. مقدار استحکام کششی آن ها ۸۰۰ مگاپاسکال می باشد. مقدار نیرویی وارده از طرف این پیچ ها به سنبه ها از دو طرف راست و چپ محور، باید از نیروی وارده از طرف سنبه ها به پیچ ها در هنگام اعمال فشار داخلی و عملیات پرسینگ، بیشتر باشد. مقدار نیرو از رابطه زیر به دست می آید.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

که در این رابطه، A سطح مقطع سنبه محوری بر حسب میلی متر مربع، F نیروی وارده به سنبه بر حسب نیوتن و σ تنش وارده به سنبه محوری بر حسب مگاپاسکال می باشد. از آنجایی که شعاع سنبه برابر ۲۲/۵ میلی متر بوده و تنش وارده بر سنبه محوری برابر ۱۰۰ بار می باشد، مطابق رابطه ۲ مقدار F ، ۱۵۸۹۶/۲۵ نیوتون به دست می آید.

اکنون برای محاسبه تنش وارده بر پیچ M۲۰ محوری، نیاز به قطر ریشه پیچ داریم که برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$d_1 = D - 1.082P \quad (3)$$

که در این رابطه، P گام پیچ، D قطر بزرگ پیچ و d_1 قطر ریشه پیچ بوده و هر سه بر حسب میلی متر می باشند. با قرار دادن مقادیر مربوطه در رابطه ۳، d_1 برابر ۱۷/۳ میلی متر می شود. اکنون با داشتن قطر ریشه پیچ، نیروی وارد بر پیچ و استفاده از رابطه ۲ مقدار تنش وارد بر پیچ برابر ۶۷/۶۰ مگاپاسکال به دست می آید. پس با توجه به استحکام تسلیم پیچ های استفاده شده و مقدار تنش ایجاد شده روی این پیچ ها، تغییر شکل پلاستیک در پیچ به وجود نخواهد آمد.

۵-۶- محاسبه نیروی برشی وارد بر پیچ M۲۰ محوری

مقدار تنش برشی پیچ مطابق رابطه ۴ محاسبه می شود که در این رابطه F نیروی وارد بر پیچ بر حسب نیوتون، d_1 قطر ریشه پیچ بر حسب میلی متر، h ارتفاع مهره (طول درگیری پیچ با مهره) بر حسب میلی متر و τ تنش برشی بر حسب مگاپاسکال می باشد.

$$\tau = \frac{2F}{\pi \times d_1 \times h} \quad (4)$$

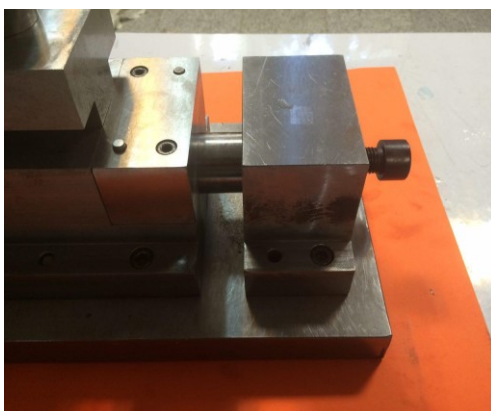
با جایگذاری مقادیر در رابطه بالا، تنش برشی که به هر کدام از پیچ های M۲۰ چپ و راست محوری وارد می شود، برابر ۲۹/۲۶ مگاپاسکال به دست می آید.

۵-۷- جنس ابزار و قالب

در طراحی و ساخت قالب در این آزمایش، کفشک پایین، سنبه‌گیر چپ و راست و توپی سنبه قالب از جنس فولاد ساده ساختمانی ST37 در نظر گرفته شده است. این اجزاء مجموعه شکل‌دهی در تماس با لوله نبوده و دچار ساییدگی نمی‌شوند به همین دلیل از جنس با سختی بالا برای آن‌ها استفاده نشده است. سنبه، اینسرت‌های چپ و راست و قسمت پایینی قالب (ماتریس) از جنس فولاد سخت VCN150 ساخته شده است تا دقت ابعادی آن‌ها در سایش از بین نرود. همچنین تمامی پیچ‌های بکار رفته در دستگاه از نوع خشکه فولادی ۸،۸ هستند.

۵-۸- تعیین نوع آب‌بندی

کوچک‌ترین نشتی در دو انتهای لوله سبب افت فشار داخلی و عدم موفقیت در فرایند هیدروفرمینگ می‌گردد. به این دلیل از یک مقطع مخروطی در آب‌بندی بین سنبه محوری و سوراخ (حفره) ماتریس استفاده شده است و از دو پیچ M20 هم‌جهت تأمین نیروی محوری آب‌بندی استفاده شده است (شکل ۹).



شکل ۹ محل قرارگیری پیچ M20 جهت تأمین نیروی محوری آب‌بندی

۵-۹- سیستم هیدرولیک تغذیه محوری و آب‌بندی

برای سیستم اعمال فشار به داخل لوله از یک پمپ هیدرولیک دستی ۴۰۰ بار استفاده شده است. در خروجی این پمپ یک شیر یک‌طرفه جهت اعمال فشار به داخل لوله به‌کار رفته است. شیر یک‌طرفه توسط شلنگ به شیر فشارشکن که مجهز به گیج اندازه‌گیری فشار می‌باشد متصل می‌گردد. سپس مطابق شکل ۱۰، شیر فشارشکن توسط شلنگی به سنبه محوری سمت راست که دارای سوراخ محوری به قطر ۳ میلی‌متر است، جهت اعمال فشار سیال ورودی به داخل لوله پیچ شده است. در شکل ۱۱ نیز نحوه کار سیستم هیدرولیک در حین انجام فرایند هیدروفرمینگ را نشان داده شده است.



شکل ۱۰ اتصال شلنگ پمپ دستی به سنبه محوری



شکل ۱۱ نمایشی از پرس و قالب در آزمایش تجربی

۵-۱۰- منحنی بارگذاری در آزمایش تجربی

سه روش برای اعمال بار برای ساخت قطعه در نظر گرفته شده که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

- ۱- اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلی‌متر بدون اعمال فشار داخلی
- ۲- اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار پس از اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلی‌متر بعد از مماس شدن با لوله
- ۳- مماس کردن سنبه با لوله و تأمین نیروی مماس سپس اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار، اعمال نیروی پرسینگ و جابجایی سنبه به مقدار ۱۰ میلی‌متر

قطعات تولیدشده به وسیله هر سه روش بارگذاری در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

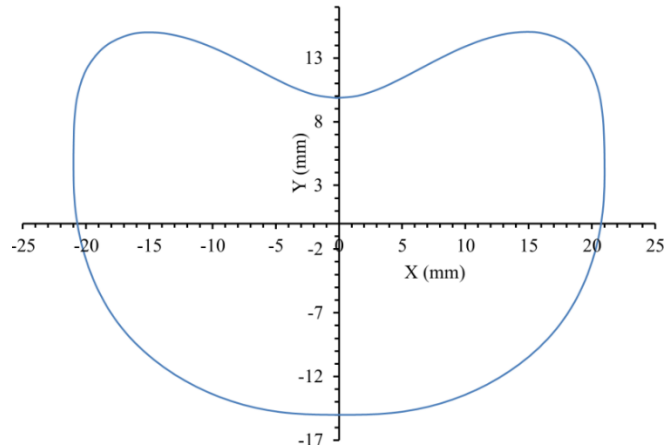


شکل ۱۲ قطعات تولید شده به وسیله هر سه روش بارگذاری

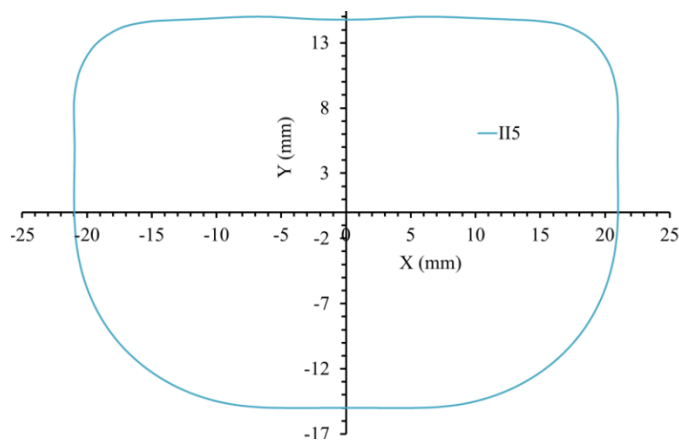
۵-۱۱- پروفیل محیط بیرونی قطعات تولید شده با مسیر بارگذاری متفاوت در فرایند تجربی

با توجه به سه منحنی بارگذاری ۱، ۲ و ۳ در آزمایش تجربی، پروفیل سطح مقطع بیرونی قطعات در شکل ۱۳، ۱۴ و ۱۵

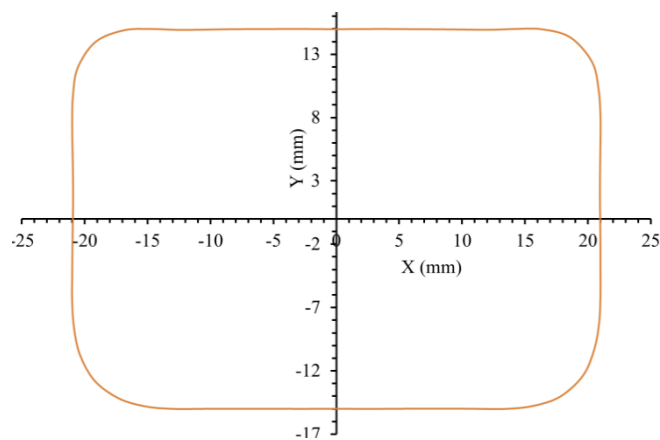
نشان داده شده است. برای به دست آوردن پروفیل‌های محیط بیرونی از دستگاه اندازه‌گیری CMM ونزل^۱ در مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو استفاده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده، هنگام استفاده از منحنی بارگذاری ۱، به دلیل اینکه فشار داخلی صفر می‌باشد قرشدگی در بالای قطعه اتفاق افتاده ولی هنگام استفاده از منحنی بارگذاری ۲ و ۳ به دلیل وجود فشار داخلی و تنش در داخل لوله، پروفیل محیط بیرونی قطعه، صاف‌تر به دست آمده است.



شکل ۱۳ پروفیل محیط بیرونی به دست آمده از منحنی بارگذاری ۱



شکل ۱۴ پروفیل محیط بیرونی به دست آمده از منحنی بارگذاری ۲



شکل ۱۵ پروفیل محیط بیرونی به دست آمده از منحنی بارگذاری ۳

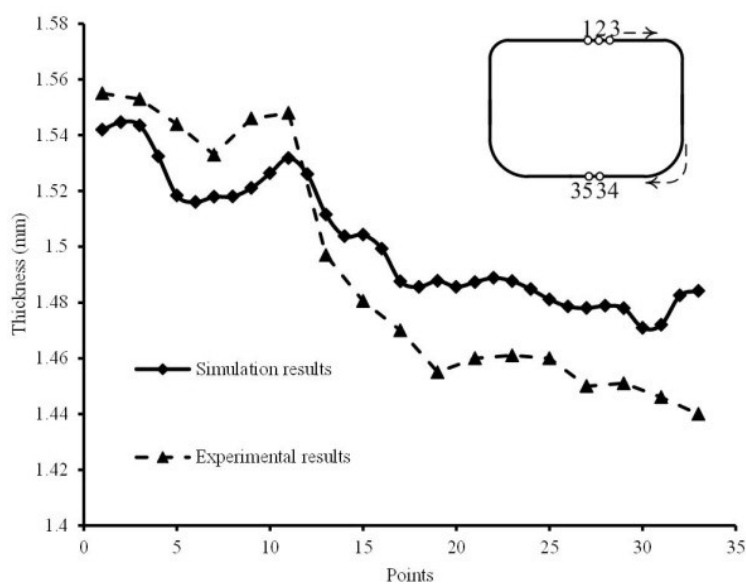
¹ Wenzel

۵-۱۲- بررسی توزیع ضخامت در روش تجربی

به منظور بررسی نتایج تجربی، قطعه شکل داده شده به وسیله منحنی بارگذاری ۲، مطابق شکل ۱۶ از مقطع میانی با استفاده از دستگاه وایرکات^۱ بریده شده و توزیع ضخامت و پروفیل سطح بیرونی آن بررسی شده است. شکل ۱۷ توزیع ضخامت به دست آمده را نشان می دهد. در این نمودار مقادیر ضخامت برای ۳۵ نقطه با فاصله برابر از نقطه میانی سطح بالایی مقطع تا نقطه میانی سطح پایینی نشان داده شده است که به علت تقارن توزیع ضخامت فقط در یک نیمه مقطع نشان داده شده است.



شکل ۱۶ سطح مقطع میانی قطعه شکل داده شده



شکل ۱۷ توزیع ضخامت در مقطع میانی برای منحنی سوم با فشار حداکثر ۱۰۰ بار

با بررسی توزیع ضخامت در آزمایش تجربی در صفر بار، بیشترین ضخامت ۱/۵۵ میلی متر و کمترین ضخامت ۱/۴۸ میلی متر و اختلاف این دو نقطه ۰/۰۷ میلی متر می باشد. همچنین لازم به زور است که ضخامت بیشتر نقاط ۱/۴۸ میلی متر می باشد. در روش تجربی با فشار داخلی ۱۰۰ بار، بالاترین ضخامت ۱/۵۶ میلی متر و کمترین ضخامت ۱/۴۵ میلی متر است و اختلاف این دو نقطه ۰/۱۱ میلی متر می باشد. با توجه به اینکه در فشار ۱۰۰ بار کمترین اختلاف بیشینه و کمینه نقاط (شکم) در طول و عرض قطعه تولیدی به دست آمده است و از آنجایی که در فشار داخلی ۱۰ بار بیشینه شعاع گوشه بالایی و پایینی کمتر بوده است از این رو فشار داخلی ۱۰۰ بار، هم در شبیه سازی عددی و هم روش تجربی تولید قطعه مستطیل شکل، بهینه می باشد.

¹ Wirecut

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی روش تجربی انجام‌شده در این تحقیق نتایج زیر حاصل شده‌اند:

- ۱- با توجه به اینکه گوشه‌های بالایی و پایینی قطعه از پارامترهای مهم در تولید قطعه می‌باشد همچنین گوشه‌های بهینه، گوشه‌های با شعاع کمتر و تیزتر بوده، در نتیجه مسیر منحنی بارگذاری نوع سوم یعنی اعمال فشار داخلی ابتدایی و سپس جابجایی قالب با شعاع گوشه بالایی ۵ میلی‌متر و شعاع گوشه پایینی ۶ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود.
- ۲- اختلاف بیشینه و کمینه نقاط (شکم)، روی عرض و طول قطعه باید حداقل باشد. هرچه این اختلاف کمتر باشد در نتیجه پروفیل یکنواخت با محیط سطح مقطع مناسب تولید خواهد شد و در روش تجربی اول اعمال فشار داخلی ۱۰۰ بار سپس جابجایی قالب پیشنهاد می‌شود. در این روش اختلاف شکم عرضی ۰/۰۴ میلی‌متر و اختلاف طول شکم ۱۰ میلی‌متر به دست می‌آید.
- ۳- با توجه به اینکه توزیع ضخامت در روش تجربی پارامتر مهمی می‌باشد. در روش اول اعمال فشار داخلی و بعد جابجایی قالب، روش بهینه می‌باشد.
- ۴- یکی از پارامترهای مهم تولید قطعه، پروفیل سطح مقطع یکنواخت بدون قرشدگی و فرورفتگی می‌باشد. با توجه به پروفیل‌های به‌دست‌آمده در روش تجربی و مقایسه این سه پروفیل، فشار داخلی ۱۰۰ بار منحنی بارگذاری فشار بهینه می‌باشد و پروفیل سطح مقطع یکنواخت به‌دست‌آمده می‌آید.

۷- مراجع

- [1] Gray J E, Devereaux A P, Parker W M. Apparatus for making wrought metal T's. Google Patents; 1940.
- [2] Fuchs F. Hydrostatic pressure--its role in metal forming. Mech Eng. 1966;88:34-40.
- [3] Asnafi N. Analytical modelling of tube hydroforming. Thin-walled structures. 1999;34:295-330.
- [4] Zafar N. Optimization of tube hydroforming process. Michigan State University. 2002.
- [5] Singh H. Fundamentals of hydroforming. Society of Manufacturing Engineers. 2003.
- [6] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel. Computational Materials Science. 2009;47:146-152.
- [7] Hashemi S J, Naeni H M, Liaghat G, Karami J S, Roohi A H. Prediction of Bursting in Warm Tube Hydroforming using Modified Ductile Fracture Criteria. Modares Mechanical Engineering. 2015;14.
- [8] Hwang Y-M, Altan T. FE simulations of the crushing of circular tubes into triangular cross-sections. Journal of materials processing technology. 2002;125:833-838.
- [9] Hwang Y-M, Altan T. Finite element analysis of tube hydroforming processes in a rectangular die. Finite Elements in Analysis and Design. 2003;39:1071-1082.
- [10] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. Die closing force in low pressure tube hydroforming. Journal of materials processing technology. 2010;210:2238-2244.
- [11] Zhang X, Chu G, He J, Yuan S. Research on a hydro-pressing process of tubular parts in an open die. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;104:2795-2803.

- [12] Zhang X, He J, Chu G, Yuan S. Experimental research on deformation and dimensional accuracy of rectangular-section tubular part during open die hydro-pressing process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021;235:705-714.
- [13] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. Buckling in low pressure tube hydroforming. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;28:1-10.
- [14] Chu G-n, Lin C-y, Li W, Lin Y-l. Effect of internal pressure on springback during low pressure tube hydroforming. *International Journal of Material Forming*. 2018;11:855-866.
- [15] Trott A, Nikhare C P. Effect of preform during low pressure tube hydroforming. 52019;V002T002A023.
- [16] Nikhare C P, Buddi T, Kotkunde N, Singh S K. Effect of Die Velocity on Tube Deformation Mechanics During Low Pressure Tube Hydroforming Process Sequence Variation. 85550;V02AT02A051.
- [17] Nikhare C P. A numerical analysis on microtube hydroforming. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2021:1-22.