



## مطالعه تجربی و عددی فرایند هیدروفورمینگ قطعه Y-شکل جفت با کمک روش تحلیل واریانس

سید مرتضی عابدی<sup>1</sup>، سیدمحمدحسین سیدکاشی<sup>2\*</sup>، خلیل خلیلی<sup>3</sup>، امیر اشرفی<sup>4</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175-376، seyedkashi@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

با توجه به کاربرد روزافزون قطعات لوله‌ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی و صنایع نظامی، فرایند هیدروفورمینگ لوله به علت مزایایی که نسبت به روش‌های سنتی دارد، بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. قطعه Y-شکل، یک سه‌راهی نامتقارن است که نیاز به تجهیزات گران‌قیمت برای کنترل تغذیه محوری نامتقارن دارد. در این تحقیق با طراحی قطعه بصورت جفت متقارن و اعمال نیروی محوری یکسان در دو سمت لوله، فرایند هیدروفورمینگ قطعه Y-شکل اصلاح شده است. سپس فرایند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به روش اجزاء محدود به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و شرایط بهبود شکل‌دهی قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، مدل تجربی و مدل شبیه‌سازی با هم مقایسه شدند که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در ادامه با استفاده از روش طراحی آزمایش، به بررسی تأثیرات پارامترهای طول لوله، فاصله بین دو حفره برآمدگی قالب، میزان فشار داخلی و جابجایی محوری بر روی میزان ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی قطعه Y-شکل جفت پرداخته شده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 12 بهمن 1397  
پذیرش: 15 فروردین 1398  
ارائه در سایت: آذر 1398

### کلیدواژه‌ها:

هیدروفورمینگ لوله  
قطعه Y-شکل  
شبیه‌سازی اجزاء محدود  
تحلیل واریانس

## Experimental and Numerical Study of Double Y-Shaped Hydroforming Using Analysis of Variance Method

Seyed Morteza Abedi, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi\*, Khalil Khalili, Amir Ashrafi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* P.O.B. 97175-376 Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 1 February 2019  
Accepted 4 April 2019  
Available November 2019

### Keywords:

Tube hydroforming  
Y- Shaped product  
Finite element method  
Analysis of variance

### Abstract

Due to the increasing use of tubular components in various industries such as automotive and military industries, tube hydroforming process has been widely welcomed due to its advantages over traditional methods. The Y-shaped product is an asymmetric part that requires expensive asymmetric axial feed control equipment for its production. In this paper, by designing the tube in symmetric pairs and applying the same axial force on two sides of the tube, the hydroforming process of the double of Y-shaped is improved. Then, the process is three-dimensionally simulated using the Abaqus software by finite element method and the conditions for the improvement of the shape were investigated. In order to validate the modeling, the experimental product and the simulation model were compared, which showed a good agreement. Using the design of experiment method, the effects of tube length, the distance between the two bulges, internal pressure and axial feeding are investigated on the height of the bulge and the thinning percentage.

### 1- مقدمه

خواص مطلوب را امکان‌پذیر می‌سازد. این روش در کنار برتری‌هایی که نسبت به روش‌های سنتی دارد، محدودیت‌های خاص خود را نیز داراست که این محدودیت‌ها در طراحی قطعات نامتقارن اهمیتی دوچندان پیدا می‌کند. تولید قطعات چندراهی مانند X و Y به کمک فرایند هیدروفورمینگ لوله یکی از کاربردهای مهم این روش تولیدی می‌باشد. قطعه چهار راهی X-شکل اغلب در مسیرهای انتقال آب و

در صنعت امروز، تولید قطعات با بالاترین کیفیت، کم‌ترین هزینه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن از هدف‌های اصلی تولیدکنندگان می‌باشد که سبب توسعه و پیشرفت سریع فرایندهای شکل‌دهی شده است.

هیدروفورمینگ لوله یکی از فناوری‌های شکل‌دهی فلزات است که به طور گسترده امکان تولید قطعات با اشکال پیچیده و

Please cite this article using:

S. M. Abedi, S. M. H. Seyedkashi, Kh. Khalili, A. Ashrafi, Experimental and Numerical Study of Double Y-Shaped Hydroforming Using Analysis of Variance Method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 34-41, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طول اولیه لوله در فرایند هیدروفرمینگ لوله Y-شکل پرداختند. آن‌ها ابتدا با فرض ثابت ماندن ضخامت در حین فرایند، برای هر یک از پارامترهای ذکر شده به کمک معادلات ساده، شکل‌دهی محدوددهای را پیشنهاد دادند و سپس با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، هر یک از پارامترها را بهینه‌سازی کردند و نتایج نهایی را با مدل عملی مقایسه کردند. چنگ و همکاران [7] به مطالعه عددی هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل پرداختند و پارامترهای توزیع ضخامت و فشار داخلی را در سه مرحله شکل‌دهی (ابتدای فرایند، مرحله میانی و پایان شکل‌دهی) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای کنترل میزان نازک‌شدگی و جلوگیری از ترکیدگی در شاخه برآمدگی از سنبه مخالف استفاده کردند و نتایج خود را با نمونه تجربی مقایسه کردند.

استندیک و همکاران [8] به مطالعه قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل در سه ماده مختلف با شرایط بارگذاری متفاوت پرداختند و اثرات فشار، توزیع ضخامت و ارتفاع شاخه برآمدگی را در هر کدام از مواد با شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون تجربی بررسی کردند و مسیر بارگذاری بهینه را برای هر ماده ارائه کردند. اینگارا و همکاران [9] روشی متشکل از شبیه‌سازی اجزاء محدود، روش پاسخ سطح و روش پارتو<sup>2</sup> را به منظور بهینه‌سازی فشار داخلی و نیروی سنبه مخالف در فرایند هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل ارائه کردند و کاهش میزان نازک‌شدگی، افزایش میزان پرشدگی قالب و بالا بردن دقت در انتخاب شعاع قالب را با این روش بررسی کردند.

کدخدایان و همکاران [10] به تغییر شکل و توزیع ضخامت لوله و اثر استفاده از سنبه مخالف بر روی نمونه قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل تولیدی توسط آلتان و همکاران [6] پرداختند و استفاده از سنبه مخالف را برای جلوگیری از ترکیدگی در ناحیه برآمدگی و هم‌چنین جابجایی مناسب آن را در هنگام فرایند هیدروفرمینگ جهت دستیابی به توزیع ضخامت مطلوب و کیفیت بالاتر قطعه گزارش دادند. گاو و همکاران [11] به ارزیابی هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل از فولاد مارتنزیتی به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداختند و اثر تغذیه محوری و شرایط بارگذاری مختلف (فشار و ضریب اصطکاک متفاوت) را بر ارتفاع برآمدگی و نرخ نازک‌شدگی مطالعه کردند. آن‌ها گزارش دادند که با کاهش ضریب اصطکاک، نرخ نازک‌شدگی و میزان ارتفاع شاخه برآمدگی افزایش می‌یابد.

چنگ و همکاران [12] برای فرایند هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل سنبه چند مرحله‌ای را پیشنهاد کردند. آن‌ها بدین

گاز استفاده می‌شود. ترکیدگی و چروکیدگی از مشکلات رایج در شکل‌دهی این قطعه می‌باشد. مک‌دونالد و هشمی [1] به مطالعه برآمدگی در هیدروفرمینگ قطعه X-شکل به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداختند. آن‌ها شبیه‌سازی را یک بار تنها با اعمال فشار داخلی و بار دیگر با اعمال فشار همراه با تغذیه محوری انجام دادند و اثر آن را بر روی نازک‌شدگی، حداکثر تنش و محل وقوع آن بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای رسیدن به بالاترین ارتفاع برآمدگی و توزیع یکنواخت، باید فشار و نیروی محوری با هم اعمال شوند و ضریب اصطکاک کم باشد. ری و مک‌دونالد [2] شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ قطعه X-شکل را در آزمایشگاه با شرایط مرزی و بارگذاری یکسان انجام دادند و نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی را گزارش دادند. کوکاندا و سادلوسکا [3] به بررسی هیدروفرمینگ قطعه X-شکل به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون تجربی پرداختند. آن‌ها منحنی حد شکل‌دهی بهبودیافته را برای بهبود شکل‌پذیری پیشنهاد دادند. کدخدایان و همکاران [4] به بهینه‌سازی هیدروفرمینگ قطعه X-شکل پرداختند. ایشان بعد از تعیین متغیرهای بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری)، مسیرهای بارگذاری را از روش تاگوچی مشخص کردند. ارتباط ریاضی مناسب میان متغیرهای بارگذاری و معیارهای تعیین شده برای تغییر شکل، با استفاده از تحلیل رگرسیون انجام گرفت. آن‌ها به کمک الگوریتم تبرید تدریجی<sup>1</sup> (بازپخت شبیه‌سازی شده)، مقادیر بهینه برای متغیرهای بارگذاری را تعیین و مسیرهای بهینه را به دست آوردند. مجذوبی و همکاران [5] تأثیر شرایط مرزی در انتهای برآمدگی در هیدروفرمینگ قطعه X-شکل را با شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون تجربی بررسی کردند و یک قید پلاستیکی را برای بهبود شکل‌پذیری در انتهای برآمدگی پیشنهاد دادند. بهتر بودن کیفیت، توزیع ضخامت و متقارن بودن شکل برآمدگی قطعه با روش پیشنهادی آن‌ها در مقایسه با روش معمول گزارش شد.

قطعه سه‌راهی Y-شکل یکی دیگر از قطعات چندراهی متداول است که در صنایع هسته‌ای، خودروسازی و لوله و پروفیل استفاده می‌شود. وجود دو زاویه مختلف در این قطعه سبب می‌شود که میزان تغذیه محوری در دو سمت قطعه متفاوت باشد که منجر به نیاز به تجهیزات کنترلی پیچیده و گران‌قیمت می‌باشد. تحقیقات انجام شده در مورد هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل بسیار محدود است. جیراترانات و همکاران [6] به بررسی پارامترهای مختلف از جمله توزیع فشار، تغذیه محوری و

<sup>2</sup> Pareto<sup>1</sup> Simulated Annealing Algorithm (SA)

## 2- مدل سازی عددی و صحت سنجی

ماده مورد استفاده از جنس مس خالص تجاری است که خواص مکانیکی آن با استفاده از آزمون‌های خواص مکانیکی استخراج شده است. این آزمون‌ها و خواص در مرجع [14] به تفصیل ارائه شده است. برای مدل‌سازی قالب و لوله قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت ابعاد قالب  $60 \times 148 \times 200$  میلی‌متر، قطر حفره‌های درون قالب  $28/56$  میلی‌متر و شعاع گوشه‌های حفره قالب 5 و 15 میلی‌متر انتخاب شد. لوله نیز با قطر خارجی  $28/56$  میلی‌متر، ضخامت  $1/27$  میلی‌متر و با طول 200 میلی‌متر مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس با جابه‌جایی محوری طبق منحنی بارگذاری شکل 1 استفاده شد. منحنی بارگذاری از فشار صفر شروع می‌شود و متناسب با حرکت سنبه محوری، فشار به تدریج افزایش پیدا می‌کند تا به بیش‌ترین مقدار خود برسد. در انتهای فرایند، فشار به صفر کاهش پیدا می‌کند.

برای شبیه‌سازی قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل از فرمول‌بندی اجزاء محدود دینامیکی صریح استفاده شده است که این روش برای شکل‌دهی با سطوح پیچیده با تغییر شکل زیاد مناسب است. چون قالب و سنبه‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده و تغییر شکل آن‌ها در مقایسه با تغییر شکل لوله قابل صرف نظر کردن است، این مدل‌ها تبدیل به مدل پوسته‌ای شدند و برای آن‌ها نقاط مرجع تعریف گردید. جهت کاهش زمان تحلیل، تنها قسمت‌هایی از سنبه‌ها که در تماس با لوله هستند، در نظر گرفته شده‌اند. خواص الاستیک لوله نیز شامل مدول یانگ 70 گیگاپاسکال و نسبت پواسون  $0/3$  در نظر گرفته شدند.

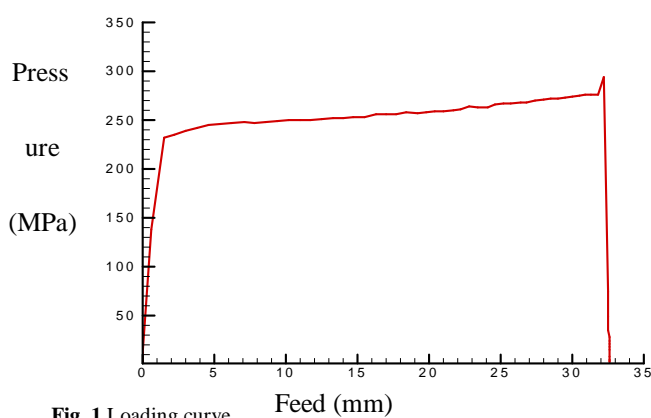


Fig. 1 Loading curve

شکل 1 منحنی بارگذاری

مدل به صورت سه‌بعدی و متقارن است؛ از این رو جهت

وسيله، توزیع فشار داخلی در منطقه هدایت را تغییر دادند و توانستند اصطکاک بین لوله و قالب را کم کنند. آن‌ها همچنین تفاوت بین سنبه پیشنهادی و معمولی را بر روی قطعه‌هایی از جنس آلومینیوم بررسی کردند و کاهش تغییر توزیع ضخامت و میزان نازک‌شدگی را با استفاده از سنبه چند مرحله‌ای، گزارش دادند. اختراعی‌طوسی و همکاران [13] بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری را با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبکه عصبی مطالعه کردند. آن‌ها بر اساس مسیرهای بارگذاری، متغیرهای لازم را انتخاب و سپس با استفاده از روش طراحی آزمایش، 36 مسیر بارگذاری طراحی و با استفاده از تحلیل اجزاء محدود به وسیله نرم‌افزار شبیه‌سازی کردند. سپس مقادیر مربوط به کم‌ترین ضخامت و بیش‌ترین ارتفاع برآمدگی را به دست آوردند. با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی چند لایه، مدل تقریبی برای کم‌ترین ضخامت و بیش‌ترین ارتفاع برآمدگی محاسبه و رفتار تغییر شکل لوله تخمین زده شد؛ سپس به کمک الگوریتم ژنتیک، به منظور حداکثر کردن ارتفاع برآمدگی و حداقل کردن ضخامت لوله، بهینه‌سازی چند هدفه را اجرا کردند.

همان‌طور که اشاره شد تاکنون پژوهش‌های صورت گرفته روی فرایند هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل، به کمک نیروی محوری متفاوت در دو سمت لوله، بسته به موقعیت قرارگیری شاخه و سنبه متقابل بوده است که این خود باعث نیاز به تجهیزات کنترلی دقیق و گران قیمت در تولید این قطعه و همچنین موجب کاهش تکرارپذیری فرایند می‌شود. بدین منظور در این پژوهش، برای رفع این مشکل، امکان تولید هم‌زمان دو قطعه Y-شکل در یک قالب مورد بررسی قرار گرفته است. با طراحی متقارن قطعه به صورت جفت و اعمال نیروی محوری یکسان در دو سمت، فرایند هیدروفرمینگ قطعه Y-شکل جفت در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و سپس تولید قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت بر روی لوله‌ی آنیل شده از آلیاژ مس C12200 انجام گرفت. در ادامه نتایج نمونه شبیه‌سازی و نمونه تجربی با یکدیگر مقایسه شد و صحت‌سنجی مدل عددی انجام گرفت. در نهایت با کمک روش طراحی آزمایش با استفاده از طرح عاملی کامل<sup>1</sup>، اثرات طول لوله، فاصله بین دو حفره برآمدگی، فشار و تغذیه محوری بر روی میزان ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی نیز بررسی شد. همچنین معادلات رگرسیونی برای پیش‌بینی مقادیر ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی ارائه گردید.

<sup>1</sup> Full Factorial Design

کاهش زمان شبیه‌سازی نصف مدل مورد تحلیل قرار گرفته است. نقاط مرجع دو قسمت قالب کاملاً مقید شده‌اند. سنبه‌های محوری برای حرکت در جهت محور لوله به صورت آزاد تعریف و در بقیه جهات طولی و چرخشی، مقید شده‌اند. تماس بین اجزا قالب و لوله به روش پنالتی و به صورت جفت سطوح تماسی تعریف شده و از روش خود تماسی<sup>1</sup> برای لوله به تنهایی استفاده شده است. با توجه به وجود روانکاری کامل، ضریب اصطکاک 0/05 برای تماس لوله و قالب در نظر گرفته شده است. برای بارگذاری نقاط مرجع سنبه‌های محوری در خلاف جهت یکدیگر در راستای محور لوله و در جهت خلاف یکدیگر به سمت مرکز قالب حرکت می‌کنند. میزان جابجایی در شرایط مختلف، متفاوت است. زمان شروع شبیه‌سازی پس از پایان مرحله آب‌بندی دو انتهای لوله در آزمایش هیدروفرمینگ و زمان پایان شبیه‌سازی پس از صفر شدن فشار است. زمان فرایند از لحظه پرشدن قالب تا توقف سنبه‌های محوری در پایان فرایند 30 ثانیه است. برای مش‌بندی لوله از المان‌های C3D8R که المانی صریح جامد از نوع مکعبی هشت گرهی خطی می‌باشد، استفاده شده است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در زمینه توزیع ضخامت و ارتفاع برآمدگی، المان‌های جامد نسبت به المان‌های پوسته‌ای در مش‌بندی لوله نتایج نزدیک‌تری را به نتایج تجربی نشان دادند. شکل 2 ارتفاع برآمدگی اندازه‌گیری شده را در قطعه Y-شکل جفت شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

برای صحت‌سنجی مدل عددی، آزمایش‌های تجربی با منحنی بارگذاری فشار شکل 1 با استفاده از سیستم هیدروفرمینگ شکل 3 بر روی دستگاه کشش 600 تن انجام پذیرفت. شکل 4 مدل شبیه‌سازی شده و نمونه تجربی تولید شده را نشان می‌دهد. بررسی میزان ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی صحت مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

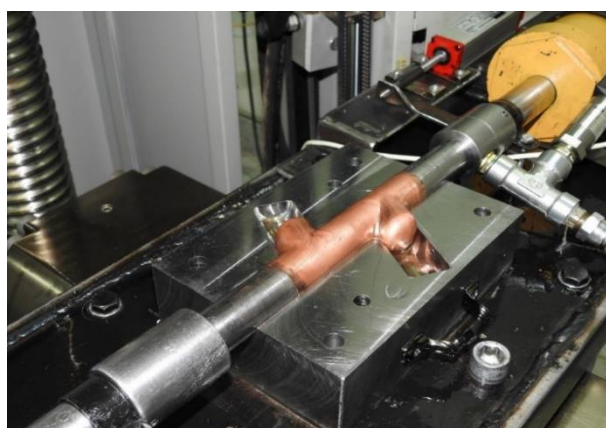


Fig. 3 Hydroforming system

شکل 3 دستگاه هیدروفرمینگ

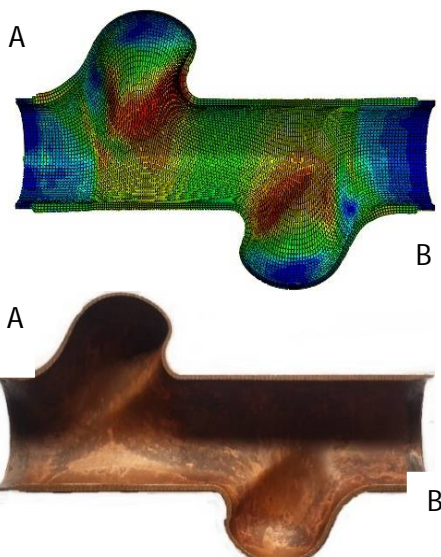


Fig. 4 Simulation model and experimental sample of double Y-shaped hydroforming

شکل 4 مدل شبیه‌سازی و مدل تجربی قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت

جدول 1 میزان برآمدگی در نمونه‌های شبیه‌سازی و تجربی

Table 1 Bulge height in simulation and experimental samples

میزان برآمدگی	نمونه تجربی	نمونه شبیه‌سازی	اختلاف (درصد)
سمت چپ	23/48	27/07	13/26
سمت راست	21/63	23/45	7/76

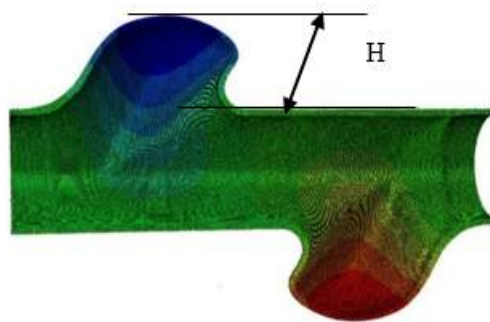


Fig. 2 Measured bulge height of double Y- shaped piece

شکل 2 ارتفاع برآمدگی اندازه‌گیری شده در قطعه Y-شکل جفت

<sup>1</sup> Self-contact

میزان اختلاف بین میزان برآمدگی در دو سمت قطعه به علت اختلاف اصطکاک در دو سمت تغذیه محوری بوده است. برای بررسی درصد نازک‌شدگی در طول لوله برای هر دو نمونه در فواصل برابر اندازه‌گیری ضخامت انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کم‌ترین ضخامت در نمونه تجربی و شبیه‌سازی به ترتیب 0/95 و 1/06 میلی‌متر است. با توجه به ضخامت اولیه لوله که برابر با 1/27 میلی‌متر است، درصد نازک‌شدگی در نمونه تجربی 25/19 درصد و در نمونه شبیه‌سازی 16/53 درصد به دست می‌آید. شکل 5 توزیع ضخامت در نمونه تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

میزان اختلاف بین میزان برآمدگی در دو سمت قطعه به علت اختلاف اصطکاک در دو سمت تغذیه محوری بوده است. برای بررسی درصد نازک‌شدگی در طول لوله برای هر دو نمونه در فواصل برابر اندازه‌گیری ضخامت انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کم‌ترین ضخامت در نمونه تجربی و شبیه‌سازی به ترتیب 0/95 و 1/06 میلی‌متر است. با توجه به ضخامت اولیه لوله که برابر با 1/27 میلی‌متر است، درصد نازک‌شدگی در نمونه تجربی 25/19 درصد و در نمونه شبیه‌سازی 16/53 درصد به دست می‌آید. شکل 5 توزیع ضخامت در نمونه تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

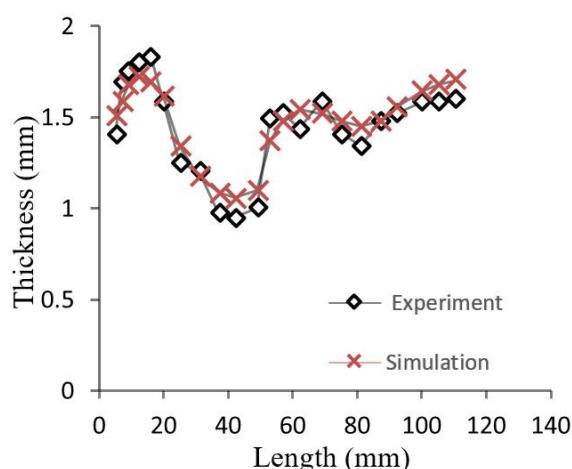


Fig. 5 Distribution of thickness in experimental and simulated samples

شکل 5 توزیع ضخامت در نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی شده

### 3- نتایج و بحث

در این مقاله، اثر پارامترهای طول لوله، فاصله بین دو حفره برآمدگی، فشار و تغذیه محوری در سه سطح بر روی میزان ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی که به عنوان متغیرهای پاسخ در قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت در نظر گرفته شده‌اند، بررسی شده است. هدف این است که میزان ارتفاع برآمدگی به حداکثر مقدار و درصد نازک‌شدگی قطعه به کمترین میزان خود برسد تا قطعه‌ای با ظاهر و کیفیتی مطلوب به دست آید. جهت دستیابی به نتایج معتبر از روش طراحی عاملی کامل استفاده شده است. در طراحی آزمایش برای قطعه هیدروفرمینگ Y-شکل جفت، چهار عامل در سه سطح تعریف شده است که در جدول 2 نشان داده شده‌اند و با طراحی عاملی کامل تعداد کل آزمایش‌ها برابر با 81 خواهد بود.

مدل‌ها بر اساس جدول طراحی آزمایش، تک‌به‌تک شبیه‌سازی شدند و نتایج برای میزان ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی به دست آمد. یک روش مفید برای مقایسه بین

جدول 2 عوامل و سطوح آن در طراحی آزمایش

عامل	سطح یک	سطح دو	سطح سه
طول لوله (mm)	165	180	195
فاصله بین دو حفره برآمدگی (mm)	7	9/7	12/4
فشار آغازین (MPa)	210	240	270
تغذیه محوری (mm)	25	27	29

جدول 3 نتایج تحلیل واریانس برای میزان برآمدگی

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	P	درصد مشارکت
طول لوله	2	53/982	0.000	28/11
فشار آغازین	2	40/117	0.000	20/89
فاصله بین دو حفره	2	1/387	0.000	0/72
تغذیه محوری	2	96/425	0.000	50/21

همان طور که مشخص است کلیه مقادیر P زیر 0/05



## 3-1- اثرات اصلی عوامل

در شکل 6 تأثیر عامل‌های ورودی بر میزان برآمدگی و در شکل 7 تأثیر عامل‌های ورودی بر درصد نازک‌شدگی نشان داده شده است. در ادامه با توجه به این دو شکل به بررسی اثر هر پارامتر بر میزان برآمدگی و درصد نازک‌شدگی پرداخته شده است.

با افزایش اندازه طول لوله میزان ارتفاع برآمدگی سیری کاملاً نزولی دارد به گونه‌ای که در طول 195 میلی‌متر اندازه برآمدگی برابر 23/30 میلی‌متر و در طول لوله 165 میلی‌متر ارتفاع برآمدگی بیش از 2 سانتی‌متر بیشتر است. با افزایش طول لوله درصد نازک‌شدگی به میزان بسیار اندکی افزایش یافته است که این خود نشان دهنده تأثیر کم طول لوله بر درصد نازک‌شدگی است. درصد مشارکت طول لوله برای میزان برآمدگی 28/11 درصد و برای درصد نازک‌شدگی 0/28 درصد است که نشان می‌دهد طول لوله اثری کاملاً متفاوت بر میزان برآمدگی و درصد نازک‌شدگی دارد.

نمودار فشار نشان می‌دهد که با افزایش فشار میزان برآمدگی به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. فشار همچنین عامل اصلی در درصد نازک‌شدگی می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش فشار درصد نازک‌شدگی به شدت افزایش می‌یابد. در فشار 210 مگاپاسکال تا فشار 270 مگاپاسکال درصد نازک‌شدگی از 18/76 به 29/82 درصد می‌رسد.

می‌باشد که نشان از معنادار بودن هر چهار فاکتور در نظر گرفته می‌باشد. بیش‌ترین تأثیر متعلق به تغذیه محوری با 50/21% می‌باشد. بعد از آن طول اولیه لوله و فشار آغازین به ترتیب با 28/11 درصد و 20/89 درصد بیش‌ترین اثر را بر روی میزان برآمدگی دارند و فاصله بین دو حفره برآمدگی تقریباً بی‌تأثیر است. مقدار ضریب همبستگی  $R^2$  که نشان دهنده دقت مدل رگرسیونی می‌باشد نیز برابر 99/93 درصد می‌باشد.

جدول 4 نتایج تحلیل واریانس برای درصد نازک‌شدگی را نشان می‌دهد. مقادیر P برای همه عوامل زیر 0/05 است که نشان از معنادار بودن آن‌ها می‌باشد اما چنان‌که مشخص است عامل اصلی میزان فشار با درصد تأثیر 99/53% می‌باشد که بیانگر این است که طول لوله، فاصله بین دو حفره برآمدگی و تغذیه محوری اثرگذاری معناداری بر روی درصد نازک‌شدگی ندارند. مقدار ضریب  $R^2$  نیز برابر 99/98% می‌باشد.

جدول 4 نتایج تحلیل واریانس برای درصد نازک‌شدگی

Table 4 Analysis of variance for thinning rate

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	P	درصد مشارکت
طول لوله	2	4/84	0.000	0/28
فشار آغازین	2	1696/29	0.000	99/53
فاصله بین دو حفره	2	0/19	0.000	0/01
تغذیه محوری	2	2/55	0.000	0/15

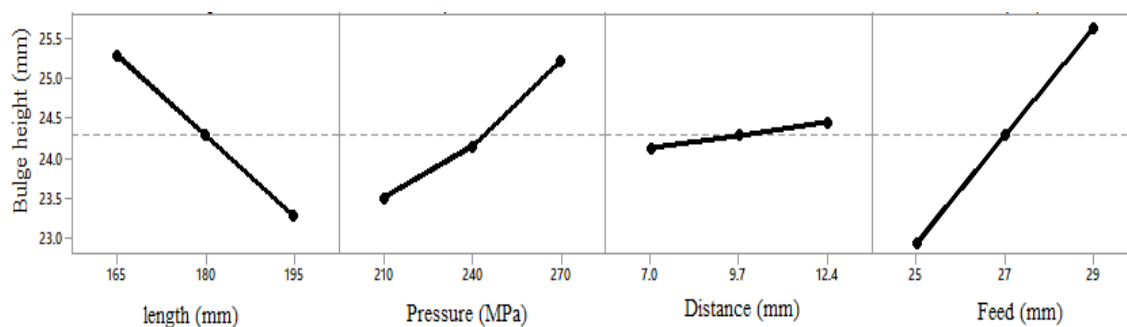


Fig. 6 Main effects of input factors on bulge height

شکل 6 اثرات اصلی عامل‌های ورودی بر ارتفاع برآمدگی

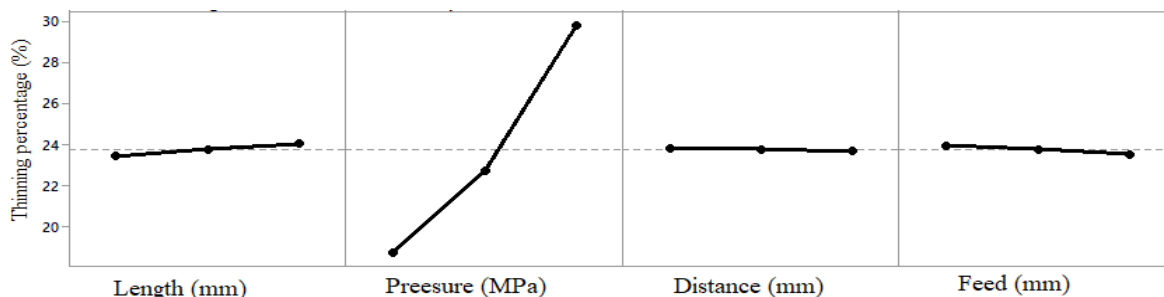


Fig. 7 Main effects of input factors on thinning percentage

شکل 7 اثرات اصلی عامل‌های ورودی بر درصد نازک‌شدگی

بیشترین اثر را دارند.

### 2-3- بهینه‌یابی پارامترها

در بخش‌های قبلی هر پاسخ خروجی به صورت جداگانه بررسی شد و پارامترهای مؤثر بر هر خروجی مشخص گردید. به دلیل وجود اثرات متقابل تغییر در یک عامل ورودی می‌تواند در راستای بهبود یک پاسخ عمل کند در حالی که اثر عکس بر روی پاسخ دیگر داشته باشد. با استفاده از بهینه‌سازی پاسخ که بر اساس روش "میزان مطلوبیت" عمل می‌کند می‌توان حالتی را یافت که در آن مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی، یک یا چند پاسخ را بهینه کنند. در واقع از بین سطوح انتخاب شده بهترین تنظیمات برای رسیدن به اهداف مطلوب تعیین می‌شوند. هدف در فرایند هیدروفورمینگ قطعه Y-شکل جفت، دستیابی به بیشترین مقدار برآمدگی و حداقل نازک‌شدگی است. بهترین تنظیم هریک از متغیرها در نمودار بهینه‌سازی ترکیبی برای مقادیر برآمدگی و نازک‌شدگی در شکل 8 نشان داده شده است. در این نمودار اثر سطوح مختلف بر ارتفاع برآمدگی و درصد نازک‌شدگی را نشان می‌دهد و میزان بهینه را برای عوامل مشخص می‌کند. لذا با انتخاب طول لوله به میزان 165 میلی‌متر، فشار 210 مگاپاسکال، فاصله بین دو حفره 12/4 میلی‌متر و تغذیه محوری 29 میلی‌متر هر دو متغیر پاسخ یعنی میزان برآمدگی و نرخ نازک‌شدگی به بهترین حالت بهینه ترکیبی خود با میزان مطلوبیت ترکیبی 86% می‌رسند. با توجه به این تنظیمات، مقدار بهینه برای میزان برآمدگی 26/01 میلی‌متر و برای درصد نازک‌شدگی 18/15 درصد به دست آمده است.

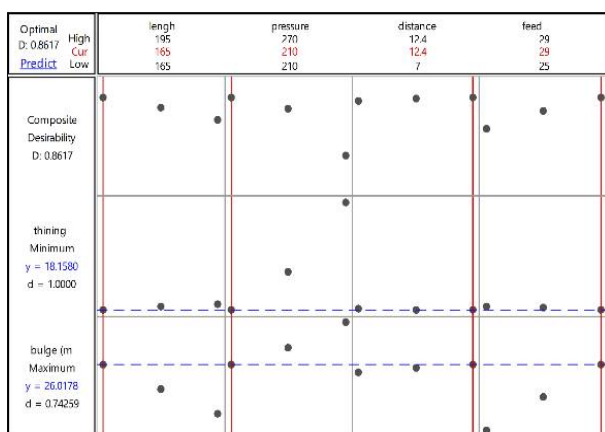


Fig. 8 Optimal plot for amount of bulge height and thinning percentage  
شکل 8 نمودار بهینه‌سازی ترکیبی برای مقادیر برآمدگی و درصد نازک‌شدگی

### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ساخت و شبیه‌سازی یک قطعه Y-شکل جفت

درصد مشارکت 99/53 درصدی فشار بر درصد نازک‌شدگی در مقایسه با مشارکت 20/89 درصدی بر میزان برآمدگی به خوبی نشان می‌دهد فشار آغازین تأثیر بیشتری بر درصد نازک‌شدگی در مقایسه با میزان برآمدگی دارد.

با تغییر فاصله بین دو حفره برآمدگی بین 7 تا 12/4 میلی‌متر میزان ارتفاع برآمدگی اندکی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که دارای مقدار حداقل و حداکثر است. درصد مشارکت فاصله بین دو حفره بر میزان برآمدگی 0/72 است که نشان می‌دهد این فاصله تأثیری بر میزان برآمدگی ندارد. درصد مشارکت 0/01 فاصله بین دو حفره برآمدگی بر درصد نازک‌شدگی نشان می‌دهد که این فاصله تأثیری بر درصد نازک‌شدگی ندارد و نمودار آن بدون تغییر در فاصله 7 تا 12/5 میلی‌متر است.

تغذیه محوری بیشترین تأثیر بر روی ارتفاع برآمدگی دارد که با افزایش تغذیه محوری از 25 تا 27 میلی‌متر میزان ارتفاع برآمدگی از 22/96 میلی‌متر به 25/64 میلی‌متر افزایش می‌یابد. درصد مشارکت تغذیه محوری بر میزان برآمدگی 50/21 درصد است. تغذیه محوری بر درصد نازک‌شدگی تأثیر بسیار کم به صورت نزولی دارد که با افزایش تغذیه محوری درصد نازک‌شدگی اندکی کاهش می‌یابد. 0/15 درصد میزان درصد مشارکت پارامتر تغذیه محوری بر درصد نازک‌شدگی است. پس تغذیه محوری بر میزان برآمدگی و درصد نازک‌شدگی دو اثر کاملاً متفاوت دارد.

در صورتی که بین متغیرها رابطه وجود داشته باشد، می‌توان آن را با الگوهای ریاضی بیان کرد. معمولاً چنین الگویی ممکن است از نوع خطی یا غیرخطی باشد که به آن معادله رگرسیون می‌گویند. در رگرسیون هدف آن است که با استفاده از معادله رگرسیون و به کمک یک نمونه تصادفی و بعضی روش‌های آماری، رفتار متغیر وابسته با آگاهی از مقادیر و مشخصات متغیرهای مستقل، پیش‌بینی شود. در رابطه (2) و رابطه (3) به ترتیب معادلات رگرسیون برای میزان برآمدگی و درصد نازک‌شدگی آمده است.

$$\text{Thinning percentage} = -20.92 + 0.01985 \times \text{length} + 0.18437 \times \text{pressure} - 0.021 \times \text{distance} - 0.1086 \times \text{feed} \quad (2)$$

$$\text{Bulge height} = 10.861 - 0.06666 \times \text{length} + 0.028445 \times \text{pressure} + 0.05936 \times \text{distance} + 0.66814 \times \text{feed} \quad (3)$$

اندازه ضرایب معادلات رگرسیون نیز به خوبی نشان می‌دهد که در میزان نازک‌شدگی پارامتر فشار با ضریب 0/18 و در میزان ارتفاع برآمدگی پارامتر تغذیه محوری با ضریب 0/66

- optimal loading paths in hydroforming of X-joints Connections, *11th National Conference on Manufacturing Engineering*, 1389. (in Persian فارسی)
- [5] G. H. Majzoubi, H. R. Farhoudi, A. Shirazi, An investigation into hydroforming of an x-shape pipe connection, *Advanced Materials Research.*, Vol. 445, pp. 15–20, 2012.
- [6] S. Jiratharanat, C. Hartl, T. Altan, Hydroforming of Y-shapes—product and process design using FEA simulation and experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 124–129, 2004.
- [7] D. Cheng, B. Teng, B. Guo, S. Yuan, Thickness distribution of a hydroformed Y-shape tube, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 499, No. 1–2, pp. 36–39, 2009.
- [8] R. Standik, J. Kazanecki, Investigation of hydroforming of the y-shape branch, *Metallurgy and Foundry Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 13–26, 2009.
- [9] G. Ingarao, R. Di Lorenzo, F. Micari, Internal pressure and counterpunch action design in Y-shaped tube hydroforming processes: A multi-objective optimisation approach, *Computers and Structures*, Vol. 87, No. 9–10, pp. 591–602, 2009.
- [10] M. kakhodayan, A. Erfanimoghadam, Investigation of the effect of the counter punch in hydroforming y-shaped tubes, *8th Conference of the Iranian Aerospace Society*, 2009. (in Persian فارسی)
- [11] X. Z. Guo, J. Tao, Z. Yuan, Q. S. Tang, Hydroforming simulation and preparation of low activation martensitic steel Y-shapes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, No. 8, pp. 2802–2806, 2011.
- [12] J. Peng, W. Zhang, G. Liu, S. Zhu, S. Yuan, Effect of internal pressure distribution on thickness uniformity of hydroforming Y-shaped tube, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 51075100, pp. s423–s428, 2011.
- [13] H. Ekhteraeitousi, A. abdollahi, Multi objective optimization of the Y-shaped tube hydroforming process loading route using neural network and genetic algorithm, *22nd International Annual Conference of Mechanical Engineering*, 2014. (in Persian فارسی)
- [14] khalili, khalili, & Ashrafi, A. (2015). Studying the stress-strain curve of C12200 Copper tube using hydraulic bulge test in T-shape die. *Modares Mechanical Engineering*, 14(13). (in Persian فارسی)
- به روش هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت. فرایند به کمک نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد و نتایج آن با آزمایش تجربی صحت سنجی شد. سپس با روش طراحی آزمایش عاملی کامل اثر پارامترهای طول لوله، فشار، تغذیه محوری و فاصله بین دو حفره برآمدگی بر روی میزان برآمدگی و درصد نازک شدگی بررسی شد. برای بررسی رابطه بین متغیرهای خروجی با پارامترهای ورودی از روش تحلیل واریانس و نرم افزار مینی تب استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل واریانس به شرح زیر است:
- پارامتر تغذیه محوری با 50/21% بیشترین اثر را بر میزان برآمدگی دارد و پس از آن طول لوله و فشار به ترتیب با 28/11% و 20/89% تأثیرگذار هستند. فاصله بین دو حفره برآمدگی با 0/72% مشارکت در ارتفاع برآمدگی تقریباً اثری ندارد.
- پارامتر فشار با درصد مشارکت 99/53% تأثیرگذارترین پارامتر بر درصد نازک شدگی است که سبب شده عوامل دیگر یعنی طول لوله با 0/28 درصد، تغذیه محوری با 0/15 درصد و فاصله بین دو حفره برآمدگی با 0/01 درصد، نقش ناچیزی بر درصد نازک شدگی داشته باشند.
- با انتخاب طول لوله به میزان 165 میلی متر، فشار 210 مگاپاسکال، فاصله بین دو حفره 12/4 میلی متر و تغذیه محوری 29 میلی متر، هر دو متغیر پاسخ یعنی میزان برآمدگی و درصد نازک شدگی به حالت بهینه خود می رسند. با توجه به این تنظیمات مقدار بهینه برای میزان برآمدگی 26/01 میلی متر و برای درصد نازک شدگی 18/15 درصد به دست آمده است.

## 5- مراجع

- [1] B. J. Mac Donald, M. S. J. Hashmi, Finite element simulation of bulge forming of a cross-joint from a tubular blank, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 3, pp. 333–342, 2000.
- [2] P. Ray, B. J. Mac Donald, Experimental study and finite element analysis of simple X- and T-branch tube hydroforming processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 1498–1518, 2005.
- [3] A. Kocanda, H. Sadlowska, An approach to process limitations in hydroforming of X-joints as based on formability evaluation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1–3, pp. 663–667, 2006.
- [4] M. kakhodayan, A new method for designing