



## مطالعه تجربی و عددی فرایند هیدروفورمینگ لوله دو لایه مس-آلومینیوم

حسین افشاری<sup>۱</sup>، امیر اشرفی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: amirashrafi@birjand.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ آبان ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۳ آذر ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

هیدروفورمینگ T شکل

لوله دو لایه

شبیه‌سازی اجزای محدود

روش سطح پاسخ

هیدروفورمینگ لوله یکی از فرایندهای شکل‌دهی می‌باشد که در آن از فشار هیدرولیکی برای تغییر شکل در ماده استفاده می‌شود. در این تحقیق شکل‌پذیری لوله دو لایه مس-آلومینیوم در فرایند هیدروفورمینگ به روش تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا لوله‌ی دو لایه با لایه بیرونی آلومینیوم و لایه داخلی مس تحت آزمایش هیدروفورمینگ قرار گرفته است که به دلیل شکل‌پذیری کم لوله آلومینیوم، دچار پارگی شده است. سپس لوله دو لایه با لایه بیرونی مس و لایه داخلی آلومینیوم بررسی شده است که لوله‌ی آلومینیوم داخلی دچار چروکیدگی گردیده است و نهایتاً منجر به خرابی دو لایه شده است. برای جلوگیری از چروکیدگی لایه‌ی آلومینیوم داخلی، از یک قید مکانیکی داخلی از جنس مس استفاده شده است که آزمایش تجربی در این حالت منجر به شکل‌دهی بدون ترک‌زدگی و چروکیدگی لوله دو لایه شده است. برای مطالعه‌ی تأثیر پارامترها بر فرایند از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ استفاده گردیده است. پارامترهای مورد بررسی شامل جابجایی سنبه محوری، فشار اول، فشار نهایی، ضخامت لوله آلومینیوم و وجود یا عدم وجود سنبه مخالف بوده است. توابع هدف نیز نازک‌شدگی لایه‌ی مس، نازک‌شدگی لایه‌ی آلومینیوم و ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که جابه‌جایی محوری بیشترین تأثیر را بر ارتفاع برآمدگی دو لایه و ضخامت لایه‌ی داخلی آلومینیوم بیشترین تأثیر را بر نازک‌شدگی لایه‌ها داشته است. به منظور دست‌یابی به بیشترین ارتفاع برآمدگی دو لایه و کمترین میزان نازک‌شدگی برای لایه‌های مس و آلومینیوم، پارامترهای بهینه در دو حالت وجود و عدم وجود سنبه‌ی مخالف استخراج شده‌اند و نتایج آن با خروجی مدل‌های شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه شده‌اند.

## Experimental and numerical study of the hydroforming process of copper-aluminum double layered tube

Hossein Afshari<sup>1</sup>, Amir Ashrafi<sup>2\*</sup>

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\* Corresponding Author's Email: amirashrafi@birjand.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 8 November 2023

Accepted: 4 December 2023

## Keywords:

T-shape Hydroforming

Double-layered Tube

Finite element Simulation

Response Surface Method

## Abstract

Tube hydroforming is a forming process in which the hydraulic pressure is used to change the shape of material. In this research, the formability of copper-aluminum double-layered tube in the hydroforming process has been investigated by experimental and simulation methods. First, the double-layered tube with the outer layer of aluminum has been examined, which was burst due to the low plasticity of the aluminum tube. Then, a two-layered tube with the outer layer of copper has been examined, and the inner aluminum tube was wrinkled. To prevent the inner aluminum layer from wrinkling, an internal mechanical restraint made of copper has been used, and the experiment in this case has led to the formation of the double-layered tube without bursting and wrinkling. Response surface method has been used to study the effect of parameters. These parameters included axial punch displacement, first pressure, final pressure, aluminum tube thickness and the counterpunch. The objective functions were the thinning of copper layer, the thinning of aluminum layer and the height of the protrusion. The results showed that the axial displacement has the greatest effect on the height of the protrusion and the thickness of the inner aluminum layer has the greatest effect on the thinning of the layers. In order to achieve the maximum height of the protrusion and the minimum thinning for both layers, the optimal parameters have been extracted in the two cases of the presence and absence of the counterpunch, and the results were compared with the finite element simulation.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Afshari H, Ashrafi A. Experimental and numerical study of the hydroforming process of copper-aluminum double layered tube. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):18-33. doi: 10.22034/IJME.2023.424349.1873 [In Persian]

## ۱- مقدمه

امروزه با توجه به گسترش روز افزون تکنولوژی نیاز به تولید قطعات با سرعت بالاتر، دقت ابعادی و کیفیت مطلوب از جمله اهداف اصلی تولیدکنندگان می‌باشد. به همین منظور روش‌های متعددی در تولید قطعات وجود دارد. فرایند هیدروفرمینگ یکی از روش‌های جدید شکل‌دهی فلزات است. در این فرایند از فشار سیال برای شکل‌دهی و تغییر شکل پلاستیک قطعات در قالب‌های خاص استفاده می‌شود. در حین این فرایند، فشار بالای سیال سبب حرکت جداره‌ی نازک قطعات در فضاهای خالی قالب می‌شود [۱، ۲]. برای ساخت قطعات با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ لوله، ابتدا لوله اولیه درون قالب مورد نظر قرار می‌گیرد. بعد از بسته شدن قالب، درون لوله با استفاده از یک سیال پر می‌شود. سنبه‌های محوری وظیفه آب بندی در دو طرفه لوله را بر عهده دارند. در این مرحله با افزایش فشار داخلی سیال و به کمک نیروی محوری اعمالی توسط سنبه‌ها، مواد به درون فضای خالی قالب هدایت شده و لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد. از این روش برای ساخت چند راهی‌ها استفاده می‌شود [۳، ۴]. به کمک این فرایند می‌توان قطعاتی با اشکال پیچیده را به صورت کاملاً یکپارچه و با استحکام ساختاری بالا تولید نمود. این فرایند به دلیل داشتن مزایای مختلفی نظیر استحکام ساختاری بالا، کمک به ساخت قطعات سبک‌تر، کاهش هزینه‌ها و کاهش عملیات تولیدی، نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی صنعتی از قبیل آهنگری، ریخته‌گری و... کاربردهای وسیع‌تری در صنایع مختلف نظیر صنعت خودروسازی، کشتی‌سازی، هوافضا و صنایع شیمیایی پیدا کرده‌است [۵-۷]. در فرایند هیدروفرمینگ لوله، فشار بالای سیال می‌تواند موجب ترکیدگی لوله در حین فرایند شود. همچنین نیروی محوری سنبه‌ها، نیز می‌تواند باعث ایجاد عیوبی نظیر کماتش و چروکیدگی لوله شود. برای جلوگیری و کاهش این عیوب در حین فرایند، بایستی یک تناسب منطقی بین فشار داخلی سیال و نیروی محوری سنبه‌ها برقرار باشد [۸، ۹]. لوله‌های چند لایه فلزی به دلیل داشتن خواص متعددی نظیر مقاومت در برابر خوردگی، انتقال حرارت و استحکام مطلوب کاربردهای مختلفی در صنایع متعددی از قبیل صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی، هوافضا، کشتی‌سازی، خطوط تغذیه‌ی هوای فشرده، سیستم‌های تهویه، اتصالات رادیاتورها و کمپرسورها، صنایع الکتریکی و یخچال‌سازی دارند. برای ساخت لوله‌های یک لایه و چند لایه می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر ماشین‌کاری، اکستروژن و هیدروفرمینگ استفاده نمود [۱۰، ۱۱].

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی پیرامون فرایند هیدروفرمینگ لوله انجام شده است. اولابی<sup>۱</sup> و آلاسود<sup>۲</sup> [۱۲] به مطالعه‌ی فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود و آزمایشات تجربی پرداختند. در این تحقیق قابلیت شکل‌پذیری و حالت‌های مختلف شکست در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی دو لایه مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ارتفاع برآمدگی و ضخامت نازک‌شدگی آزمایشات تجربی مطابقت خوبی با مدل‌های شبیه‌سازی شده دارند. همچنین می‌توان با اعمال فشار داخلی قبل از نیروی محوری به بهترین میزان شکل‌پذیری برای فرایند دست‌یافت. سیدکاشی و همکاران [۱۰] به مطالعه‌ی فرایند هیدروفرمینگ بالچ برای لوله‌ی دو لایه‌ی مس-آلومینیوم با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشات تجربی پرداختند. آن‌ها ضمن بررسی تأثیرات اصطکاک در شکل‌دهی لوله‌ی دو لایه به این نتیجه رسیدند که اصطکاک بالا برای لوله‌ی خارجی و اصطکاک پایین برای لوله‌ی داخلی نمی‌تواند عامل موفقیت آمیزی در شکل‌دهی آن‌ها محسوب شود. گو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] با استفاده از روش المان محدود و آزمایشات تجربی فرایند هیدروفرمینگ T شکل لوله‌ی دو لایه‌ی تیتانیوم-آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود به بهینه‌سازی پارامترهای فرایند از قبیل فشار داخلی، جابه‌جایی محوری و ضریب اصطکاک پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که می‌توان با فشار داخلی ۱۱۰ مگاپاسکال و جابه‌جایی محوری ۲۵ میلی‌متر و ضریب اصطکاک ۰/۱ به سه‌راهی T شکل دو لایه‌ی تیتانیوم-آلومینیوم با یکنواختی ضخامت و ارتفاع برآمدگی ۲۵/۵ میلی‌متر دست یافت. کرمی و همکاران [۱۴] به مطالعه‌ی عددی و تجربی فرایند هیدروفرمینگ بالچ<sup>۴</sup> لوله‌های تک‌لایه و دولایه پرداختند. در این تحقیق برای از بین بردن فشار داخلی در ناحیه‌ی تغذیه از یک روش آب بندی جدید استفاده شده است. این روش موجب حذف اصطکاک بین لوله و قالب در ناحیه‌ی تغذیه شده و جریان مواد به سمت ناحیه‌ی تغییرشکل را بهبود می‌بخشد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که اولاً استفاده از روش آب‌بندی جدید، شکل‌پذیری لوله‌ی آلومینیوم را ۱۹٪ در مقایسه با روش آب‌بندی معمولی

<sup>1</sup> A.G. Olabi

<sup>2</sup> A. Alaswad

<sup>3</sup> Xunzhong Guo

<sup>4</sup> Bulge

افزایش می‌دهد. ثانیاً افزایش ضریب اصطکاک باعث افزایش شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیوم در روش جدید می‌شود. چن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> به مطالعه‌ی مسیر بارگذاری هیدروفرمینگ لوله پرداختند. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی، مسیر بارگذاری بهینه به دست آمد. در تحقیق دیگری چن و همکاران [۱۶] به بررسی ابعاد هندسی لوله در فرایند هیدروفرمینگ سهرای T شکل پرداختند. در این تحقیق تأثیرات ضخامت لوله، زاویه و طول لوله بر روی نسبت نازک‌شدگی و ارتفاع برآمدگی سهرای ایجاد شده با استفاده از طراحی آزمایش و شبیه‌سازی المان محدود بررسی شد. در ادامه برای دستیابی به بیشترین ارتفاع برآمدگی و کمترین میزان نازک‌شدگی، پارامترهای هندسی لوله بهینه شدند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که مقادیر بهینه‌شده به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایشات تطابق خوبی با یکدیگر دارند. فنگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۷] در تحقیقی با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ به مطالعه‌ی تأثیرات پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی دو لایه X شکل بر نسبت نازک‌شدگی لوله‌های داخلی و خارجی، حداکثر فاصله‌ی بین دو لایه و محدوده‌ی شعاع گوشه‌ی لوله‌ها پرداختند. ژو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۸] طراحی جدیدی از لوله‌ی آگزوز دو لایه با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ را پیشنهاد دادند. در این تحقیق امکان‌سنجی فرایند با شبیه‌سازی عددی مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه پارامترهای فرایند با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه شدند. متعاقباً، قالب مورد نظر برای ساخت لوله طراحی و لوله آگزوز دو لایه با موفقیت ساخته شده است. فرجی و همکاران [۱۹] در تحقیقی به بررسی تأثیرات استفاده از قید مکانیکی داخلی بر عیب چروکیدگی در فرایند هیدروفرمینگ لوله پرداختند. قید مکانیکی داخلی استفاده شده در این تحقیق، یک قطعه از همان لوله اصلی است که در ناحیه برآمدگی حفره قالب درون لوله اصلی جا زده می‌شود. در این تحقیق ابتدا با استفاده از مطالعات تجربی محدوده چروکیدگی بر روی لوله‌های مس آنیل شده تعیین شده است و سپس در ادامه با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایشات تجربی تأثیرات استفاده از قید مکانیکی بر چروکیدگی و نحوه رشد آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از قید مکانیکی داخلی می‌تواند از چروکیدگی لوله جلوگیری کرده و در تغییر شکل با جابه‌جایی محوری زیاد، چروکیدگی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

در این مقاله فرایند هیدروفرمینگ T شکل دو لایه‌ی مس-آلومینیوم به کمک قید مکانیکی داخلی با استفاده از آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- روش تحقیق

در این تحقیق از شبیه‌سازی اجزای محدود و طراحی آزمایش به همراه آزمایشات تجربی برای مطالعه‌ی تأثیرات پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ استفاده شد. آزمایشات بر روی لوله دو لایه مس-آلومینیوم آنیل شده، انجام گرفته است. لوله‌های مورد استفاده از جنس آلیاژ آلومینیوم با نام Al7075 و آلیاژ مس با نام C12200 می‌باشند. جدول ۱ و ۲ به ترتیب ترکیب شیمیایی مس و آلیاژ آلومینیوم را نشان می‌دهند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) مس C12200 [۲۰]

مس	فسفر
۹۹.۹	۰/۰۴۰-۰/۰۱۵

جدول ۲ ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) آلومینیوم ۷۰۷۵ [۲۱]

آلیاژ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	سایر مواد	آلومینیوم
آلومینیوم ۷۰۷۵	۰-۰/۴۰	۰/۵۰	۱/۲-۲/۰	۰/۳۰	۲/۱-۲/۹	۰/۱۸-۰/۲۸	۵/۱-۶/۱	۰/۲۰	۰/۱۵	باقیمانده

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> Response Surface Method

<sup>3</sup> Feng

<sup>4</sup> Zhu

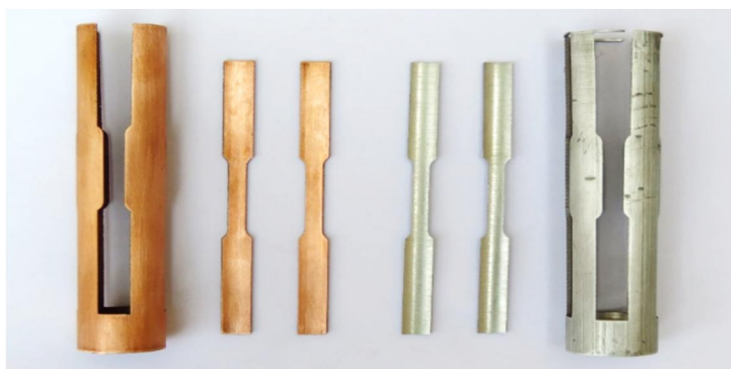
برای ساخت لوله آلومینیوم با ابعاد هندسی مشخص، به ترتیب عملیات‌های ماشینکاری شامل کف‌تراشی، مته‌کاری، داخل‌تراشی و روتراشی با استفاده از دستگاه تراش دستی بر روی میلگردهای آلومینیومی انجام شد. در ادامه لوله ساخته شده آلومینیومی با اعمال فشار درون لوله آماده‌ی مسی قرار گرفته‌است و بدین ترتیب لوله دو لایه مس-آلومینیوم ساخته می‌شود. شکل ۱ لوله‌ی دو لایه مس-آلومینیوم ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱ لوله دو لایه مس-آلومینیوم آنیل شده

با توجه به این‌که قابلیت شکل‌پذیری لوله مس در فرایندهای شکل‌دهی نظیر هیدروفرمینگ بسیار بالا می‌باشد، اما لوله‌ی آلومینیوم قابلیت شکل‌دهی پایینی دارد و در فرایند هیدروفرمینگ به سرعت دچار ترکیدگی می‌شود، لذا به منظور بهبود قابلیت شکل‌پذیری لوله دو لایه مس-آلومینیوم، فرایند آنیلینگ در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۹۰ دقیقه بر روی آن‌ها انجام گرفت.

برای انجام شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، نیاز به خواص مکانیکی لوله مس و آلومینیوم ساخته شده می‌باشد. بدین منظور نمونه‌های تست کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 از درون لوله‌ها تهیه شد و سپس این نمونه‌ها آنیل شدند. شکل ۲ نمونه‌های تست کشش را نشان می‌دهد.

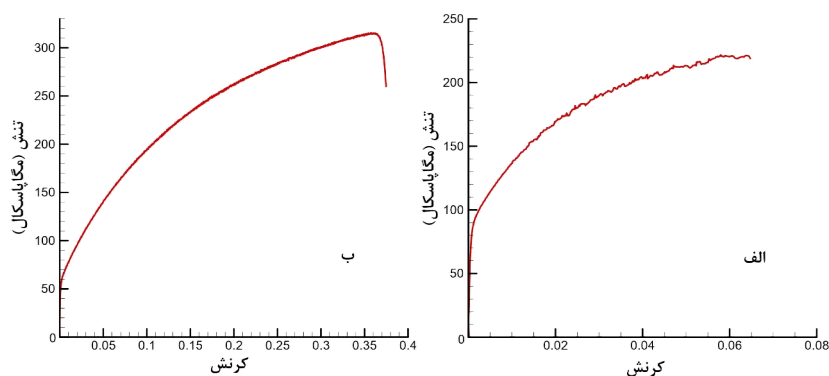


شکل ۲ نمونه‌های کششی تهیه شده از لوله‌های مس و آلومینیوم مطابق با استاندارد ASTM E8

شکل ۳ و جدول ۳ به ترتیب منحنی تنش-کرنش حقیقی و خواص مکانیکی استخراج شده از آزمایش کشش نمونه‌های تهیه شده از لوله‌های مس و آلومینیوم را نشان می‌دهد. از منحنی‌های شکل ۳ مشخص می‌شود که کرنش شکست نمونه‌ی آلومینیوم بسیار کمتر از نمونه‌ی مس می‌باشد.

جدول ۳ خواص مکانیکی لوله‌های مس و آلومینیوم آنیل شده

نمونه	تنش حد نهایی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	توان کار سختی	ضریب استحکام (MPa)
آلومینیوم	۲۲۱/۶۴	۱۳۶	۰/۲۱۹	۴۱۰
مس	۳۱۵/۵۳	۵۸/۵	۰/۳۹۸	۴۹۰



شکل ۳ منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله‌های آنیل شده: الف) آلومینیوم، ب) مس

با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود می‌توان آزمایش‌های تجربی را به حداقل رساند. این شبیه‌سازی اجزای محدود می‌تواند به کمک نرم‌افزارهای تحلیلی نظیر آباکوس، انسیس و دیفرم انجام شود. در پژوهش حاضر از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۶،۱۴ به منظور شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی دو لایه استفاده شد. برای انجام شبیه‌سازی، قالب و سنبه‌های مورد نظر صلب و لوله‌ها به صورت مدل‌های شکل‌پذیر با تعریف خصوصیات مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش در نظر گرفته شده‌اند. ضریب اصطکاک بین سطوح لوله‌ی خارجی و قالب در تمام نواحی یکسان و برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. برای کنترل مقدار حرکت سنبه مخالف، نیروی فنر با ضریب سختی ۲۲۵ نیوتن بر میلی‌متر به کار رفته است. برای انجام شبیه‌سازی نیز از حل دینامیکی صریح استفاده شده است. برای مش‌بندی قالب و سنبه محوری از المان‌های R3D4 که یک المان صلب چهار گرهی سه بعدی است، استفاده شده است. همچنین برای مش‌بندی لوله‌ها نیز از المان C3D8R استفاده شده است. این نوع مش یک المان سه بعدی ۸ گره‌ای با انتگرال کاهش یافته است. در مدل اجزای محدود تعداد المان‌ها با توجه به همگرایی جواب‌ها و زمان حل انتخاب می‌شود.

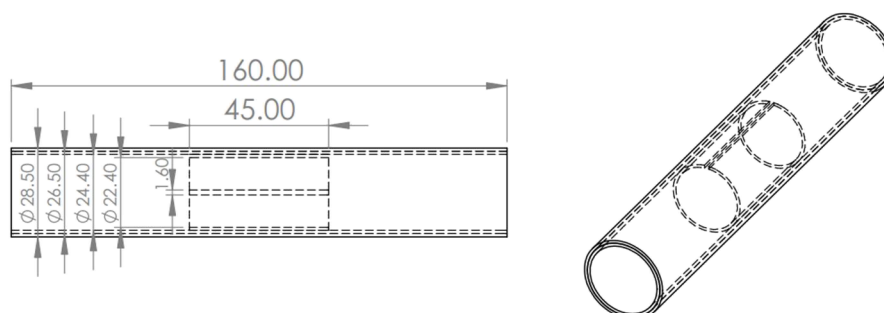
برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه هیدروفرمینگ با قابلیت کنترل فشار و همچنین از قالب هیدروفرمینگ T شکل ساخته شده توسط ماشین فرز CNC استفاده می‌شود. این قالب از جنس فولاد VCNM0150 و ابعاد هندسی هر نیمه‌ی آن به ترتیب برای طول، عرض و ارتفاع آن برابر با ۲۰۰ و ۱۴۸/۵۴، ۶۰ میلی‌متر می‌باشد.

بعد از نصب قالب درون دستگاه آزمایش‌هایی برای ساخت سهرای T شکل انجام شده است. آزمایشات تجربی ابتدا بر روی لوله‌ی دو لایه‌ی آلومینیوم-مس آنیل شده با لایه‌ی خارجی آلومینیوم و بدون استفاده از قید مکانیکی انجام شد. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به دلیل تردی بالا دچار شکست شده و برای شکل‌دهی در فرایند هیدروفرمینگ T شکل مناسب نیست. شکل ۴ نمونه لوله‌های دو لایه‌ی آلومینیوم-مس هیدروفرم شده معیوب را نشان می‌دهد.

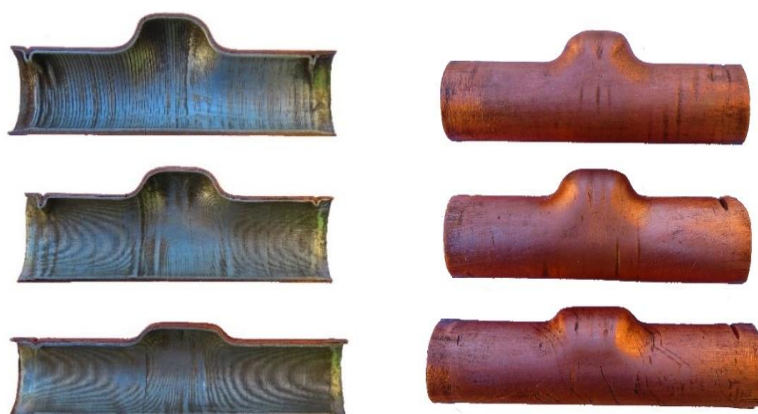


شکل ۴ نمونه لوله‌های دو لایه‌ی آلومینیوم-مس هیدروفرم شده معیوب

سپس آزمایشات تجربی بر روی لوله‌ی دو لایه‌ی مس-آلومینیوم آنیل شده با لایه‌ی خارجی مس و بدون استفاده از قید مکانیکی انجام شد. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که به دلیل ترکیب‌گی و یا چروکیدگی لوله‌ی داخلی آلومینیوم، لوله‌ی خارجی مس نیز دچار ترکیب‌گی و یا چروکیدگی می‌شود. در ادامه برای جلوگیری از چروکیدگی و ترکیب‌گی لوله‌ی داخلی آلومینیوم از قید مکانیکی با هندسه‌ی حلقه‌ای (لوله‌ی درزدار) و از جنس مس (C12200) آنیل نشده و به طول ۴۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای این منظور قید مکانیکی در محدوده‌ی شکل‌دهی در تماس کامل با جداره‌ی داخلی لوله‌ی آلومینیومی قرار می‌گیرد. عدم برقراری تماس کامل قید مکانیکی با جداره‌ی داخلی لوله‌ی دو لایه و یا قرارگیری نامناسب موضعی آن در طول لوله نیز می‌تواند موجب چروکیدگی و ترکیب‌گی لوله‌ی دو لایه در فرایند شود. در ادامه با قرارگیری مناسب قید مکانیکی درون لوله آلومینیومی، سهرای T شکل مس-آلومینیوم با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ ساخته شده است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ابعاد لوله و موقعیت قید مکانیکی داخلی و نمونه لوله‌های دو لایه‌ی مس-آلومینیوم هیدروفرم شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ابعاد لوله دو لایه و موقعیت قید مکانیکی داخلی

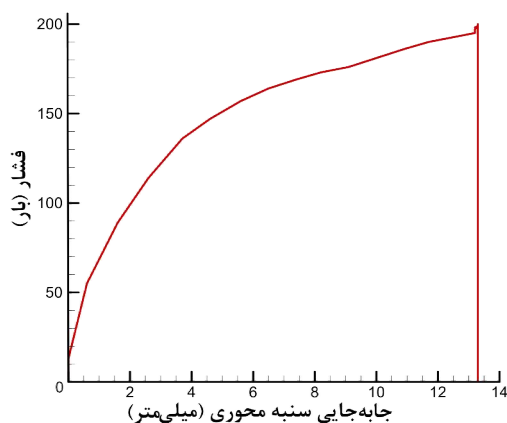


شکل ۶ نمونه لوله‌های دو لایه‌ی مس-آلومینیوم هیدروفرم شده

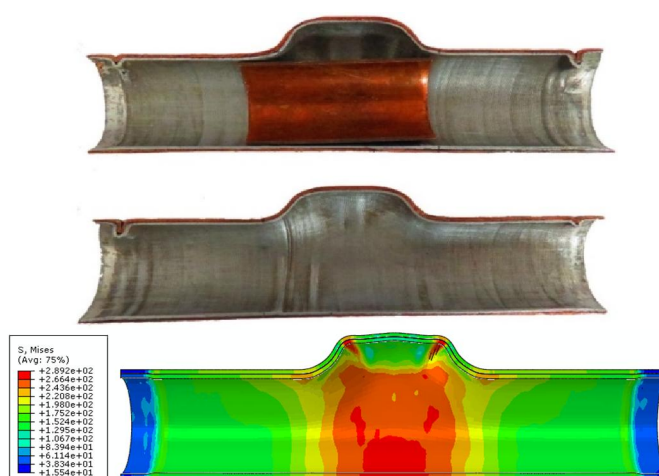
برای مدل‌سازی فرایند، فشار داخلی و جابه‌جایی سنبه‌ی محوری از منحنی بارگذاری آزمایشات تجربی به نرم‌افزار آباکوس انتقال داده شد. در ادامه ارتفاع برآمدگی، کمترین ضخامت و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شدند. درصد نازک‌شدگی طبق رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$\text{درصد نازک‌شدگی} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه  $T_1$  ضخامت اولیه لوله و  $T_2$  ضخامت قطعه‌ی هیدروفرم شده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب منحنی بارگذاری و قطعه تجربی و شبیه‌سازی شده منطبق بر این منحنی بارگذاری را نشان می‌دهد. در شکل ۸ قید مکانیکی برداشته شده تا سطح داخلی لوله قابل مشاهده باشد.



شکل ۷ منحنی بارگذاری آزمایش تجربی



شکل ۸ قطعه تجربی و شبیه‌سازی شده

جدول ۴ ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و جدول ۵ کمترین ضخامت و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده فوق را نشان می‌دهد. فشار مستقیم سیال و خاصیت تردی آلومینیوم موجب شده تا نازک‌شدگی لوله آلومینیوم نسبت به لوله مس بیشتر باشد.

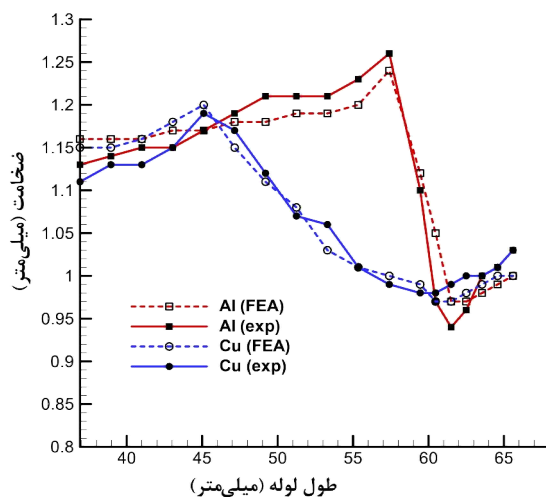
جدول ۴ ارتفاع برآمدگی نمونه‌ی تجربی و مدل شبیه‌سازی شده

ارتفاع برآمدگی (mm)	نمونه
۱۰/۲۲	مدل تجربی
۱۰/۸۹	مدل شبیه‌سازی شده

جدول ۵ کمترین ضخامت و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم

لوله	نمونه	کمترین ضخامت (mm)	درصد نازک‌شدگی
مس	مدل تجربی	۰/۹۸	۲
	مدل شبیه‌سازی شده	۰/۹۷	۳
آلومینیوم	مدل تجربی	۰/۹۴	۱۱
	مدل شبیه‌سازی شده	۰/۹۷	۸

میزان ضخامت لوله‌های مس و آلومینیوم برای یک نیم لوله‌ی هیدروفرم شده به صورت جداگانه و در فواصل برابر در هر دو مدل تجربی و شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری شده است. شکل ۹ توزیع ضخامت لوله‌های مس و آلومینیوم آزمایش و مدل شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹ توزیع ضخامت لوله‌ی مس و آلومینیوم در قطعه‌ی تجربی و شبیه‌سازی شده

نتایج نشان می‌دهد که کمترین ضخامت در نمونه‌ی تجربی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برای لوله‌ی آلومینیوم برابر با ۰/۹۴ و ۰/۹۷ میلی‌متر و برای لوله‌ی مس برابر با ۰/۹۸ و ۰/۹۷ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به ضخامت اولیه لوله‌ها که برای آلومینیوم و مس به ترتیب برابر با ۱/۰۶ و ۱ میلی‌متر است، درصد نازک‌شدگی در نمونه‌ی لوله آلومینیوم و مس به ترتیب ۱۱ و ۲ درصد به دست می‌آید.

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به صحت‌سنجی انجام شده بین آزمایش تجربی و مدل شبیه‌سازی شده، به منظور بررسی تأثیرات جابه‌جایی محوری، نقاط فشار، ضخامت لوله‌ی آلومینیوم و وجود یا عدم وجود سنبه‌ی مخالف بر ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم، از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ کامپوزیت مرکزی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این تحقیق پنج پارامتر پیوسته و یک پارامتر گسسته به عنوان عامل‌های ورودی تعریف شده‌اند. جدول ۶ سطوح این پارامترها را نشان می‌دهد. ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم نیز به عنوان پاسخ‌های خروجی معرفی می‌شوند. طراحی آزمایش به کمک نرم‌افزار مینی‌تب انجام شده است. تعداد آزمایشات در این روش برابر با ۶۰ آزمایش می‌باشد.

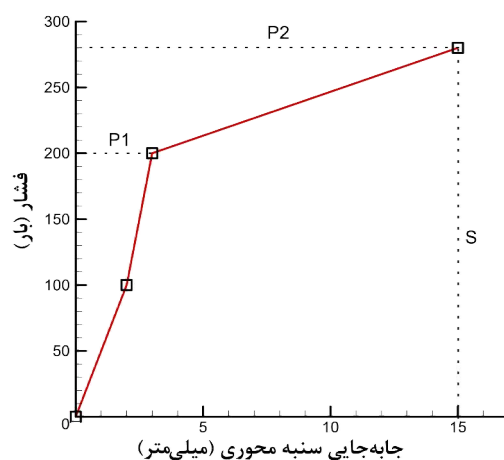
جدول ۶ سطوح پارامترهای طراحی آزمایش

پارامتر	علامت	نوع	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
جابه‌جایی محوری	S	پیوسته	۱۲mm	۱۵mm	۱۸mm
نقطه اول فشار	P1	پیوسته	۲۰۰ bar	۲۲۰ bar	۲۴۰ bar
نقطه دوم فشار	P2	پیوسته	۲۴۰ bar	۲۶۰ bar	۲۸۰ bar
ضخامت لوله Al	t	پیوسته	۰/۵mm	۰/۷۵mm	۱ mm
سنبه مخالف	C	گسسته	۰	۱	-

<sup>۱</sup> Central Composite Designs (CCD)

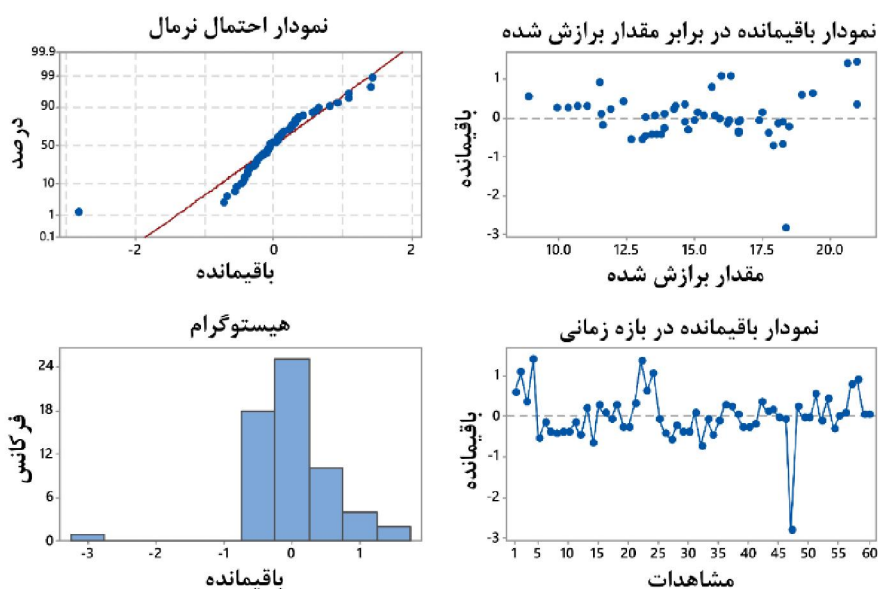


ضخامت لوله‌ی خارجی مس در تمامی آزمایشات ثابت و برابر با ۱ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱۰ محدوده نقاط فشار بر حسب جابه‌جایی محوری را نشان می‌دهد.

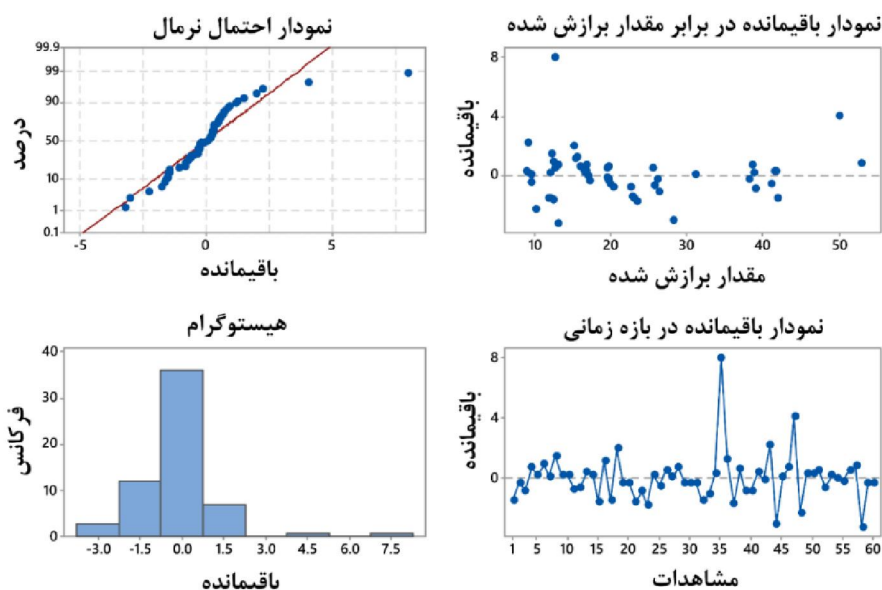


شکل ۱۰ محدوده نقاط فشار بر حسب جابه‌جایی محوری

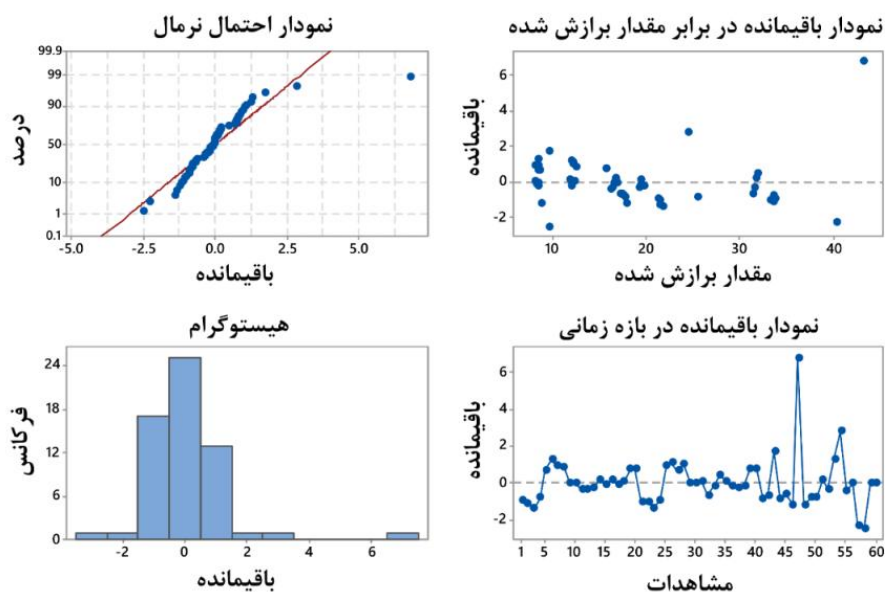
مدل‌ها بر اساس جدول طراحی آزمایش، تک به تک شبیه‌سازی شدند و نتایج برای میزان ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم به دست آمد. به منظور بررسی اعتبار مدل و آزمایشات انجام شده از نمودارهای چهارگانه احتمال نرمال، پراکندگی باقی‌مانده‌ها، هیستوگرام و پراکندگی باقی‌مانده‌ها نسبت به بازه‌ی زمانی استفاده شده است. برابری و همگنی واریانس‌ها با توجه به نداشتن الگوی مشخص و شکلی معین در نمودار پراکندگی باقی‌مانده‌ها قابل اثبات است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب نمودارهای چهارگانه باقی‌مانده را برای ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم مدل‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند.



شکل ۱۱ نمودار باقی‌مانده ارتفاع برآمدگی لوله دولایه



شکل ۱۲ نمودار باقی مانده درصد نازک‌شدگی لوله مس



شکل ۱۳ نمودار باقی مانده درصد نازک‌شدگی لوله آلومینیوم

برای بررسی مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخهای خروجی در فرایند، از آنالیز واریانس<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این روش برای تخمین یک معادله رگرسیون برای پاسخهای مورد مطالعه از آزمونهای ریاضی و آماری متعددی استفاده می‌شود. جداول ۷ تا ۹ به ترتیب نشان دهنده میزان تأثیرات پارامترهای مستقل ورودی بر ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌باشند. میزان تأثیرات یک پارامتر در خروجی فرایند زمانی معنادار است که میزان احتمال خطا نمودار کمتر از ۰/۰۵ باشد.

<sup>۱</sup> ANOVA

جدول ۷ جدول آنالیز واریانس برای ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت	P
مدل	۸	۴۵۰/۷۶۸	۹۵/۴۷٪	۰/۰۰۰
بلوک‌ها	۲	۱/۳۸۳	۰/۲۹٪	۰/۲۰۲
خطی	۵	۴۴۷/۴۸۵	۹۴/۷۸٪	۰/۰۰۰
S	۱	۲۶۴/۵۲۶	۵۶/۰۳٪	۰/۰۰۰
P1	۱	۱۷/۰۶۹	۳/۶۲٪	۰/۰۰۰
P2	۱	۱/۵۸۶	۰/۳۴٪	۰/۰۵۷
t	۱	۵۱/۳۸۶	۱۰/۸۸٪	۰/۰۰۰
C	۱	۱۱۲/۹۱۸	۲۳/۹۲٪	۰/۰۰۰
تعامل دو تایی	۱	۱/۹۰۰	۰/۴۰٪	۰/۰۳۸
P1*t	۱	۱/۹۰۰	۰/۴۰٪	۰/۰۳۸
خطا	۵۱	۲۱/۳۶۸	۴/۵۳٪	
عدم برازش	۴۵	۲۱/۳۶۸	۴/۵۳٪	*
مجموع	۵۹	۴۷۲/۱۳۶	۱۰۰/۰۰٪	

جدول ۸ جدول آنالیز واریانس برای درصد نازک‌شدگی لوله مس

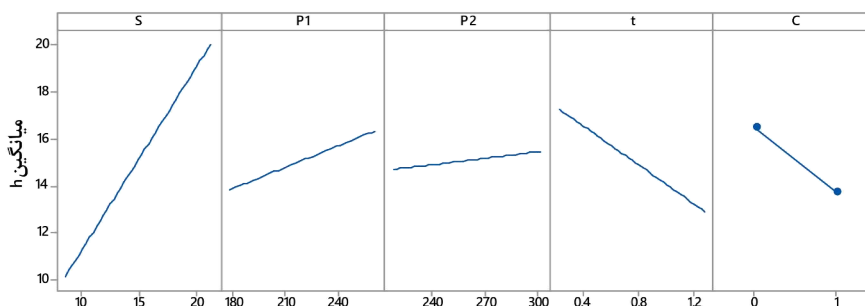
منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت	P
مدل	۱۰	۶۹۴۵/۴۹	۹۷/۹۳٪	۰/۰۰۰
بلوک‌ها	۲	۴/۰۰	۰/۰۶٪	۰/۵۱۹
خطی	۵	۵۹۹۳/۸۷	۸۴/۵۰٪	۰/۰۰۰
S	۱	۰/۷۸	۰/۰۱٪	۰/۶۱۴
P1	۱	۱۰۷۸/۲۶	۱۵/۲۰٪	۰/۰۰۰
P2	۱	۰/۰۶	۰/۰۰٪	۰/۸۸۸
t	۱	۴۷۸۶/۰۱	۶۷/۴۸٪	۰/۰۰۰
C	۱	۱۲۸/۷۷	۱/۸۲٪	۰/۰۰۰
درجه دو	۲	۶۴۱/۹۶	۹/۰۵٪	۰/۰۰۰
P1*P1	۱	۰/۶۹	۰/۰۱٪	۰/۰۴۱
t*t	۱	۶۴۱/۲۷	۹/۰۴٪	۰/۰۰۰
تعامل دو تایی	۱	۳۰۵/۶۶	۴/۳۱٪	۰/۰۰۰
P1*t	۱	۳۰۵/۶۶	۴/۳۱٪	۰/۰۰۰
خطا	۴۹	۱۴۷/۵۰	۲/۰۸٪	
عدم برازش	۴۳	۱۴۷/۵۰	۲/۰۸٪	*
مجموع	۵۹	۷۰۹۲/۹۹	۱۰۰/۰۰٪	

جدول ۹ جدول آنالیز واریانس برای درصد نازک‌شدگی لوله آلومینیوم

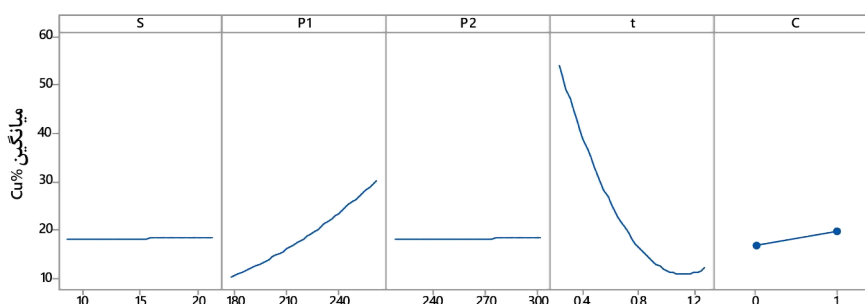
منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت	P
مدل	۱۰	۴۳۸۸/۹۲	۹۷/۸۳٪	۰/۰۰۰
بلوک‌ها	۲	۷/۹۳	۰/۱۸٪	۰/۱۴۷
خطی	۵	۳۹۶۷/۲۲	۸۸/۴۳٪	۰/۰۰۰
S	۱	۰/۵۲	۰/۰۱٪	۰/۶۱۱
P1	۱	۷۶۳/۲۱	۱۷/۰۱٪	۰/۰۰۰
P2	۱	۰/۹۳	۰/۰۲٪	۰/۴۹۹
t	۱	۳۱۸۶/۳۲	۷۱/۰۲٪	۰/۰۰۰
C	۱	۱۶/۲۴	۰/۳۶٪	۰/۰۰۶
درجه دو	۱	۲۶۱/۳۱	۵/۸۲٪	۰/۰۰۰
t*t	۱	۲۶۱/۳۱	۵/۸۲٪	۰/۰۰۰
تعامل دو تایی	۲	۱۵۲/۴۵	۳/۴۰٪	۰/۰۰۰
P1*t	۱	۱۴۱/۹۶	۳/۱۶٪	۰/۰۰۰
t*C	۱	۱۰/۴۹	۰/۲۳٪	۰/۰۲۶
خطا	۴۹	۹۷/۵۸	۲/۱۷٪	
عدم برازش	۴۳	۹۷/۵۸	۲/۱۷٪	۰/۰۰۰
مجموع	۵۹	۴۴۸۶/۴۹	۱۰۰/۰۰٪	

شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ به ترتیب تأثیرات پارامترهای مستقل ورودی بر ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه و درصد نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم مدل‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. جابه‌جایی محوری بیشترین تأثیر را بر ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه دارد. به گونه‌ای که با افزایش جابه‌جایی محوری از ۹ به ۲۱ میلی‌متر، ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه از ۹/۳۴ به ۲۲/۳۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد. افزایش فشار نقطه‌ی اول نیز موجب افزایش ارتفاع برآمدگی شده، اما با تغییرات فشار نقطه‌ی دوم، تغییر چندانی در ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه مشاهده نمی‌شود. کاهش ضخامت لوله‌ی داخلی آلومینیوم نیز موجب کاهش ارتفاع برآمدگی می‌شود. ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه بدون استفاده از سنبه‌ی مخالف در فرایند از ارتفاع برآمدگی آن با استفاده از سنبه‌ی مخالف بیشتر است. ضخامت لوله‌ی داخلی آلومینیوم بیشترین تأثیر را بر درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس دارد. به گونه‌ای که با کاهش ضخامت لوله‌ی داخلی آلومینیوم از ۱ میلی‌متر تا ۰/۲۵ میلی‌متر، درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس افزایش می‌یابد. افزایش فشار نقطه‌ی اول نیز موجب افزایش درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس می‌شود؛ اما با تغییرات نقطه‌ی فشار دوم، جابه‌جایی محوری و همچنین استفاده از سنبه‌ی مخالف، تغییر چندانی بر درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس مشاهده نمی‌شود.

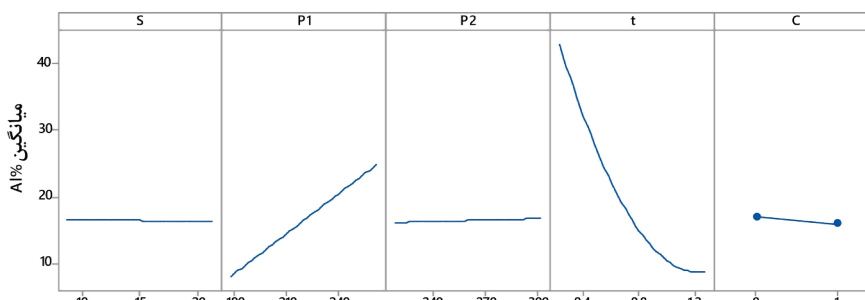
ضخامت لوله‌ی داخلی آلومینیوم بیشترین تأثیر را بر درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم دارد. به گونه‌ای که با کاهش ضخامت لوله‌ی داخلی آلومینیوم از ۱ میلی‌متر تا ۰/۲۵ میلی‌متر، درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم افزایش می‌یابد. افزایش فشار نقطه‌ی اول نیز موجب افزایش درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم می‌شود؛ اما با تغییرات نقطه‌ی فشار دوم، جابه‌جایی محوری و همچنین استفاده از سنبه‌ی مخالف، تغییر چندانی بر درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۴ تأثیر پارامترهای ورودی را بر ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه



شکل ۱۵ تأثیر پارامترهای ورودی را بر نازک‌شدگی لوله‌ی مس



شکل ۱۶ تأثیر پارامترهای ورودی را بر نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم

یکی از مهمترین روش‌های آماری برای تحلیل داده‌ها، روش رگرسیون خطی یا چندگانه می‌باشد. در این روش می‌توان پاسخ‌های خروجی مسئله را با کمک یک رابطه منطقی به پارامترهای مستقل ورودی مرتبط ساخت. جداول ۱۰ تا ۱۲ معادلات رگرسیون میزان ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه، درصد نازک‌شدگی لوله مس و درصد نازک‌شدگی لوله آلومینیوم و برای دو حالت وجود یا عدم وجود سنبه‌ی مخالف در فرایند را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ معادلات رگرسیون ارتفاع برآمدگی لوله‌ی دو لایه مدل شبیه‌سازی شده

C	متغیر هدف	تابع	R <sup>2</sup>
0	h(mm)	= -9.14 + 0.7825 S + 0.0664 P1 + 0.00909 P2 + 6.58 t - 0.0487 P1*t	95.47%
1	h(mm)	= -11.88 + 0.7825 S + 0.0664 P1 + 0.00909 P2 + 6.58 t - 0.0487 P1*t	

جدول ۱۱ معادلات رگرسیون درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس مدل شبیه‌سازی شده

R <sup>2</sup>	تابع	متغیر هدف	C
97.92%	$-19.9 + 0.0424 S + 0.170 P1 + 0.0018 P2 + 15.5 t + 0.001206 P1 * P1 + 53.72 t * t - 0.6181 P1 * t$	Cu%	0
	$-17.0 + 0.0424 S + 0.170 P1 + 0.0018 P2 + 15.5 t + 0.001206 P1 * P1 + 53.72 t * t - 0.6181 P1 * t$	Cu%	1

جدول ۱۲ معادلات رگرسیون درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم مدل شبیه‌سازی شده

R <sup>2</sup>	تابع	متغیر هدف	C
97.83%	$-52.69 - 0.0347 S + 0.5153 P1 + 0.0069 P2 + 7.1 t + 34.08 t * t - 0.4212 P1 * t$	Al%	0
	$-56.54 - 0.0347 S + 0.5153 P1 + 0.0069 P2 + 10.8 t + 34.08 t * t - 0.4212 P1 * t$	Al%	1

برای دستیابی به بیشترین میزان ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه و کمترین درصد نازک‌شدگی برای لوله‌های مس و آلومینیوم، پارامترهای مستقل ورودی در دو حالت وجود یا عدم وجود سنبه مخالف با استفاده از روش مطلوبیت و توسط نرم‌افزار مینی‌تب بهینه می‌شوند. هدف تابع مطلوبیت، بیشینه سازی متغیرهای پاسخ است. بنابراین، مطلوبیت به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، پارامترهای L و T به ترتیب، حدود پایینی و بالایی مقدار پاسخ y هستند. علاوه بر این، مقدار r وزن یک پاسخ را نشان می‌دهد که در این پژوهش برابر با یک انتخاب می‌شود. در نتیجه، تابع مطلوبیت در مود خطی تعریف خواهد شد [۲۲]. جداول ۱۳ و ۱۴ نتایج حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مدل بهینه را به ترتیب برای دو حالت وجود یا عدم وجود سنبه‌ی مخالف نشان می‌دهد.

جدول ۱۳ نتایج حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مدل بهینه با وجود سنبه‌ی مخالف

پارامترهای خروجی	مقادیر بهینه از Minitab	نتایج شبیه‌سازی مدل بهینه
ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه (mm)	۱۸/۲۲	۱۷/۳۰
درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس	۱۰/۰۱	۱۰/۲
درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم	۶/۱۴	۸/۱۳

جدول ۱۴ نتایج حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مدل بهینه بدون وجود سنبه‌ی مخالف

پارامترهای خروجی	مقادیر بهینه از Minitab	نتایج شبیه‌سازی مدل بهینه
ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه (mm)	۲۰/۸۰	۲۰/۳۰
درصد نازک‌شدگی لوله‌ی مس	۷/۵۲	۹/۹۰
درصد نازک‌شدگی لوله‌ی آلومینیوم	۷/۳۷	۹/۴۵

مطابق با جدول‌های ۱۳ و ۱۴ با وجود سنبه‌ی مخالف، بیشترین میزان ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه ۱۸/۲۲ میلی‌متر و کمترین میزان نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم به ترتیب برابر با ۱۰/۰۱ و ۶/۱۴ درصد می‌باشد. همچنین در صورت عدم وجود سنبه‌ی مخالف، بیشترین میزان ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه ۲۰/۸۰ میلی‌متر و کمترین میزان نازک‌شدگی لوله‌های مس و آلومینیوم به ترتیب برابر با ۷/۵۲ و ۷/۳۷ درصد است. این مقادیر بهینه در شرایطی به دست آمده‌است که جابه‌جایی محوری در فرایند برابر با ۲۱ میلی‌متر و نقاط اول و دوم فشار به ترتیب برابر با ۱۸۰ و ۳۰۰ بار و همچنین ضخامت لوله آلومینیوم برابر با ۰/۸۴ میلی‌متر باشد.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ساخت سهرای T شکل دو لایه مس-آلومینیوم با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت. آلیاژ آلومینیوم استفاده شده در این تحقیق بسیار ترد بوده و قابلیت شکل دهی ضعیفی دارد؛ بنابراین در صورت انتخاب لایه بیرونی از جنس آلومینیوم، احتمال ترکیدگی لوله دو لایه زیاد است. همچنین استفاده از آلومینیوم به عنوان لایه داخلی، به دلیل تخریب سریع آن، موجب چروکیدگی و ترکیدگی لوله دو لایه می شود. در ادامه برای جلوگیری از عیوبی نظیر ترکیدگی و چروکیدگی، از قید مکانیکی داخلی استفاده شد. سپس شبیه سازی فرایند با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که ارتفاع برآمدگی لوله دو لایه و کمترین ضخامت و درصد نازک شدگی لوله های مس و آلومینیوم در آزمایش تجربی مطابقت خوبی با مدل شبیه سازی شده دارند.

در طراحی آزمایش ۶۰ مدل شبیه سازی بر روی سهرای دو لایه T شکل با استفاده از قید مکانیکی داخلی انجام شد و ارتفاع برآمدگی لوله ی دو لایه و درصد نازک شدگی لوله های مس و آلومینیوم به عنوان پاسخ های خروجی در نظر گرفته شدند. جابه جایی محوری بیشترین تأثیر را بر ارتفاع برآمدگی لوله ی دو لایه دارد. به گونه ای که بیشترین ارتفاع برآمدگی لوله ی دو لایه در جدول طراحی آزمایش برابر با ۲۲/۳۸۷ میلی متر بوده که در جابه جایی ۱۸ میلی متر رخ می دهد. ضخامت لوله ی داخلی آلومینیوم بیشترین تأثیر را بر درصد نازک شدگی لوله های مس و آلومینیوم دارد. به گونه ای که کمترین درصد نازک شدگی لوله های مس و آلومینیوم در جدول طراحی آزمایش به ترتیب برابر با ۷/۷۰ و ۷/۰۴ درصد بوده که در ضخامت ۱/۲۵ میلی متر برای لوله ی داخلی آلومینیوم رخ می دهد.

## References

- [1] Khalfallah A, Oliveira MC, Alves JL, Menezes LF. Constitutive parameter identification of CB2001 yield function and its experimental verification using tube hydroforming tests. *International Journal of Mechanical Sciences*: 2020; 185:1058-68. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105868
- [2] Ahmadi B S, Khalili Kh, Eftekhari S, Kang B. Loading path optimization of a hydroformed part using multilevel response surface method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2014; 70:1523-31. doi: 10.1007/s00170-013-5359-1
- [3] Ashrafi A, Khalili K. Studying the stress-strain curve of C12200 copper tube using hydraulic bulge test in T-shaped die. *Modares Mechanical Engineering Journal*: 2015; 14:95-106. [In Persian]
- [4] Abedi S, Seyedkashi S, Khalili K, Ashrafi A. Experimental and numerical study of double Y-shaped hydroforming using analysis of variance method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*: 2019; 6(7):34-41. [In Persian]
- [5] Kim S, Joo B, Shin S, Van C, Moon Y. Discrete layer hydroforming of three-layered tubes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2013; 68:56-62. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.002
- [6] Saboori M, Champlaud H, Gholipour J, Gakwaya A, Savoie J, Wanjara P. Evaluating the flow stress of aerospace alloys for tube hydroforming process by free expansion testing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2014; 72:1275-86. doi: 10.1007/s00170-014-5670-5
- [7] Colpani A, Fiorentino A, Ceretti E. Characterization and optimization of the hydroforming process of AISI 316L steel hydraulic tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2020; 107:293-309. doi: 10.1007/s00170-020-05067-6
- [8] Eftekhari S, Ahmadi S, Khalili K, Mohammadi A. Improve the formability in tube hydroforming process using ultrasonic vibrations. *Modares Mechanical Engineering*: 2014;14(5):63-72. [In Persian]
- [9] Koc M, Altan T. Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*: 2002;42(1):123-38. doi: 10.1016/S0890-6955(01)00048-7
- [10] Seyedkashi S, Liaghat G, Naeini H, Mahdavian S, Hoseinpour M. Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process. *Advanced Materials Research*: 2011; 264:102-7. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.102
- [11] Fatemeh B, Elyasi M, Mohammad J, Rohollah J. The effect of surface shape on the production of aluminum-copper two-layer tubes using forward extrusion process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*: 2020;6(8):1-9. [In Persian]
- [12] Olabi A, Alaswad A. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming. *Advances in Engineering software*: 2011;42(10):815-20. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.102

- [13] Guo X, Liu Z, Wang H, Wang L, Ma F, Sun X, et al. Hydroforming simulation and experiment of clad T-shapes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2016; 83:381-7. doi: [10.1007/s00170-015-7558-4](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7558-4)
- [14] Karami J, Sheikhi M, Payganeh G, Fard K. Experimental and numerical investigation of single and bi-layered tube hydroforming using a new sealing technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2017; 92:4169-82. doi: [10.1007/s00170-017-0406-y](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0406-y)
- [15] Chen M, Xiao X, Tong J, Guo H, Wen J. Optimization of loading path in hydroforming of parallel double branched tube through response surface methodology. *Advances in Engineering Software*: 2018; 115:429-38. doi: [10.1016/j.advengsoft.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.11.003)
- [16] Chen M, Xiao X, Tong J, Guo H, Zhou F, Zhou F, editors. Dimensional optimization of variable thickness tube in T-shaped tube hydroforming using response surface methodology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2022. doi: [10.1088/1757-899X/1270/1/012073](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1270/1/012073)
- [17] Feng Y, Liu Z, Luo Z, Wu Q. Application of RSM in optimization of bi-layered X-type tube hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 2022;118(9):3059-77. doi: [10.1007/s00170-021-08140-w](https://doi.org/10.1007/s00170-021-08140-w)
- [18] Zhu H-L, Xu Y, Chen W-J, Zhang S-H, Banabic D, Lăzărescu L, et al. Research on hydroforming through combination of internal and external pressures for manufacturing the structure of double-layer tube with gap. *International Journal of Material Forming*: 2022;15(4):55. doi: [10.1007/s12289-022-01699-z](https://doi.org/10.1007/s12289-022-01699-z)
- [19] Faraji H, Khalili K, Ashrafi A. The Use of Internal Mechanical Insert to Prevent Wrinkling Defects in T-joint Hydroforming Process. *Modares Mechanical Engineering*: 2019;19(8):1989-2000. [In Persian]
- [20] ASTM A. B88-16, Standard specification for seamless copper water tube, ASTM International, West Conshohocken, PA Std; 2016.
- [21] ASTM B211M – 12e1, Standard specification for aluminum and aluminum-alloy rolled or cold-finished bar, Rod, and Wire (Metric), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States; 2012.
- [22] Afshari M, Bakhshi S, Samadi MR, Afshari H. Optimizing the mechanical properties of TiO<sub>2</sub>/PA12 nano-composites fabricated by SLS 3D printing. *Polymer Engineering & Science*: 2023;63(1):267-80. doi: [10.1002/pen.26203](https://doi.org/10.1002/pen.26203)