جلد 7، شماره 1، بهار 99، ص‌ص 661- 674

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی تجربی و یکپارچه‌سازی تحلیل المان‌محدود و روش پاسخ‌سطح برای بهینه‌سازی چندمتغیره پارامترهای هندسی در هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه مس- آلومینیوم

جواد شهبازی کرمی[1]، محمد مراد شیخی[2]، غلامحسن پایگانه[3*]، کرامت ملک زاده فرد[4]

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

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

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

4- استاد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

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

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/07/25

پذیرش: 96/09/08

کلیدواژگان:

هیدروفرمینگ لوله

تحلیل المان محدود

روش پاسخ سطح

بهینه سازی چند متغیره

چکیده

فرآیند هیدروفرمینگ، یک روش پیشرفته برای شکل‌دهی قطعات لوله‌ای به شکل موردنظر قالب، با اعمال فشار بالا و تغذیه محوری می‌باشد. لوله‌های دو لایه متشکل از دو لوله فلزی مختلف (مانند آلومینیوم و مس) می‌باشند که برای استفاده در محیط‌های ترکیبی که لوله‌های تک لایه عملکرد مناسبی ندارند، توصیه می‌شوند. استفاده از این لوله‌ها در انتقال سیالات خورنده با دمای بالا، هوافضا و صنایع هوایی، تولید نفت و نیروگاه‌های اتمی پیشنهاد می‌گردد. در این مقاله، کاهش ضخامت و ارتفاع چروکیدگی لوله‌های دولایه از نظر پارامترهای هندسی (طول، قطر و ضخامت لوله‌های داخلی و خارجی، طول و ارتفاع بالج، طول پخ) با استفاده از روش المان محدود و طراحی آزمایشات به روش پاسخ سطح مدل‌سازی شده است. همچنین مدل المان محدود ساخته شده با نتایج تجربی صحه‌گذاری گردیده است. اثر پارامترهای هندسی و برهمکنش آن‌ها بر پاسخ‌ها، تعیین شده و مورد بحث قرار گرفته است. پارامترهای هندسی بهینه با در نظر گرفتن حداقل کاهش ضخامت و ارتفاع چروکیدگی، با استفاده از بهینه‌سازی چند متغیره به دست آمده است. نتایج بهینه‌سازی دارای تطابق خیلی خوبی با آزمایشات تجربی می‌باشد.

Experimental investigation and integration of finite element analysis and response surface method to multi-objective optimization of geometrical factors in bi-layered Al-Cu tubes hydroforming

Javad Shahbazi Karami[1], Mohamad Morad Sheikhi[1], Gholamhasan Payganeh[1*], Keramat Malekzadeh Fard[2]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2- Department of Aerospace Engineering, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, g.payganeh@srttu.edu

Keywords

Tube hydroforming
Finite element analysis
Response surface method
Multi-objective optimization

Abstract

Tube hydroforming process is an unconventional method to deform tubular components to the desired shape of die cavity by applying high pressure and axial feed displacement. Bi-layered tubing which consists of two different metallic layers (such as aluminum and copper) is recommended to use in complex working environments as it offers combined properties that single layer structure does not have. Using of this tubes are suggested in transferring high-temperature corrosive fluids, aerospace and aviation industries, oil production and nuclear power plants. In this paper, thickness reduction and wrinkle height of the bi-layered hydroformed tube are modeled in terms of geometrical factors (lengths, diameter and thickness of inner and outer tubes, lengths and heights of bulge, Chamfer lengths) using finite element method and design of experiments (DOE) with surface response method (RSM). As well, finite element model was built and experimentally validated. The geometrical factors effects and their interactions on the responses were determined and discussed. Optimum geometrical factors are obtained by minimizing thickness reduction and wrinkle height using multi-objective optimization. The optimization results are in good agreement with the experimental test.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Shahbazi Karami, J. Sheikhi, M.M. Payganeh, GH. and Malekzadeh Fard, K, "Experimental Investigation and Integration of Finite Element Analysis and Response Surface Method to Multi-objective Optimization of Geometrical Factors in Bi-layered Al-Cu Tubes Hydroforming", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 661-674, 2020.

1- مقدمه

هیدروفرمینگ لوله یکی از فرآیندهای پیشرفته شکل‌دهی فلزات می‌باشد که در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته و تحقیقات بسیاری در سراسر دنیا بر روی آن انجام شده است. در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری در صنعت و کاربرد قطعاتی با استحکام بالا و مقاوم به خوردگی، شکل‌دهی لوله‌های دولایه فلزی موردتوجه محققان قرارگرفته است. از طرفی در برخی از کاربردهای خاص، لازم به استفاده از یک اجزای لوله‌ای چندلایه می‌باشد، به‌طوری که فرآیند شکل‌دهی مورداستفاده و نحوه تولید آن نقش عمده‌ای در بهبود و کیفیت محصول تولیدشده ایجاد می‌نماید [1، 2]. تکنولوژی شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله با استفاده از فشار پایین، فشار بالا و الگوی فشار متوالی از دو دهه اخیر تاکنون مورد استفاده، ارزیابی و مقایسه در حالت‌های مختلف شکل‌دهی قرارگرفته است [3]. به‌طوری که مطالعات مختلف شکل‌دهی لوله توسط فرآیند هیدروفرمینگ با الگوهای مختلف فشار شکل‌دهی، به بررسی مقایسه‌ای میزان شکل‌پذیری حالت‌های تک لایه و دولایه در قالب‌های مختلف شکل‌دهی گردیده است [4]. بررسی‌های انجام‌شده در فرآیند هیدروفرمینگ لوله، علاوه بر در نظر گرفتن فشار بهینه شکل‌دهی، اعمال تغذیه محوری مناسب و کنترل آن در راستای بهبود و کنترل توزیع ضخامت لوله‌شکل داده‌شده در پروفیل قالب نقش مهمی ایجاد می‌نماید [5]. به‌طوری که عامل استفاده از تغذیه محوری در شکل‌دهی لوله‌های دولایه، سبب بهبود میزان شکل‌پذیری و عدم استفاده از فشار شکل‌دهی بالاتر از حد متعارف در فرآیند هیدروفرمینگ لوله شده است [6]. مراحل انجام هیدروفرمینگ لوله در شکل 1 نشان داده شده است.

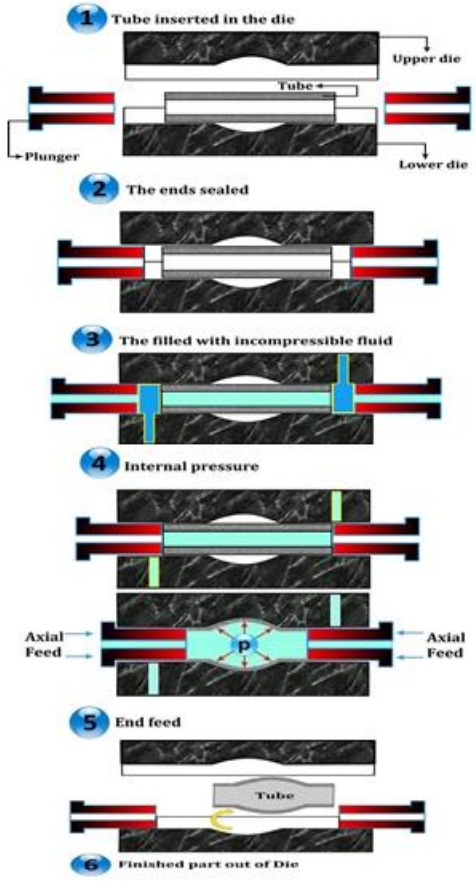


Fig. 1 Six steps for tube hydroforming process

شکل 1 شش مرحله انجام فرآیند هیدروفرمینگ لوله

پرتو دزفولی و همکاران [7]، با بررسی شکل‌پذیری هیدروفرمینگ دولایه لوله با تغذیه محوری به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قراردادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که شکل‌دهی تحت‌فشار40 مگاپاسکال با مقدار تغذیه محوری 8 میلی‌متر حالت مناسبی از شکل‌پذیری را به همراه دارد. لوح موسوی و همکاران [8]، با استفاده از اعمال فشار نوسانی در شکل‌دهی هیدروفرمینگ دولایه، مدل اصلاح‌شده‌ای ارائه دادند. آن‌ها دریافتند که فشار نوع نوسانی حالت بهتری از توزیع ضخامت با ماکزیمم فشار یکنواخت ایجاد می‌کند. همچنین آن‌ها علاوه بر نتایج مذکور دریافتند که عامل نوسانی فشار سبب کیفیت سطح در قطعه شکل‌گرفته می‌شود. سیدکاشی و همکاران [9]، به شکل‌دهی لوله‌های دولایه با استفاده از تغذیه محوری به روش هیدروفرمینگ پرداختند. آن‌ها دریافتند که بهترین نمونه شکل داده‌شده در شکل‌دهی لوله دولایه مس-آلومینیوم در فشار 61 مگاپاسکال ایجاد می‌شود. اسلام و همکاران [10]، شکل‌دهی لوله‌های چندلایه به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی در قالب X شکل توسط روش هیدروفرمینگ‌موردمطالعه قراردادند. ماکزیمم فشار داخلی به‌منظور شکل‌دهی تا 37.5 مگاپاسکال اعمال گردید. اسلام و همکاران [11]، در پژوهشی دیگر با استفاده از روش شبیه‌سازی اجزای محدود، به بررسی میزان تنش‌ها در شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله چندلایه در قالب T شکل پرداختند. آن‌ها دریافتند با افزایش فشار داخلی میزان ارتفاع برآمدگی افزایش خواهد یافت و بیشترین تمرکز تنش در ناحیه مرکزی برآمدگی تحت تأثیر فشار داخلی ایجادشده است. پایگانه و همکاران [12]، با استفاده از روش المان محدود، به مقایسه فرآیند هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه پرداختند. آن‌ها الگوی مسیرهای بارگذاری را در شکل‌دهی هریک از لوله‌ها مورد بررسی قراردادند و دریافتند که استفاده از مسیر بارگذاری مناسب با اعمال فشار داخلی قبل از تغذیه محوری، علاوه بر بهبود شکل‌پذیری سیستم سه‌لایه، حداکثر میزان بالج در نمونه ایجادشده است. شهبازی کرمی و همکاران [13]، به مطالعه پارامترهای هندسی در ایجاد یک لوله ساندویچی سه‌لایه جدید با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. فوم آلومینیومی به‌عنوان لایه میانی مابین لایه مس (داخل) و برنج (خارج) استفاده‌شده است. آن‌ها دریافتند که شکل‌گیری لوله در قالب X شکل، حداقل میزان توزیع ضخامت و حداکثر تنش در منطقه میانی لوله ایجادشده است. سیدکاشی و همکاران به بررسی هیدروفرمینگ لوله‌های سه‌لایه پرداختند. در این مقاله محدوده فشار شکل‌دهی بصورت تحلیلی بررسی گردیده و با نتایج تجربی صحه‌گذاری شده است. برای این منظور لوله‌های سه‌لایه مورد تست بالج آزاد قرار گرفته و با نتایج تحلیلی مقایسه گردیده است [14].

محققان در دهه‌های اخیر به این نتیجه رسیده‌اند که طراحی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از آزمایشات تجربی و سعی و خطا بسیار زمانبر و هزینه بر می‌باشد. تحلیل المان محدود به مهندسین کمک کرد که بسیاری از هزینه‌ها و محدودیت‌ها را در این فرآیند کاهش داده و با تغییر پارامترهای گوناگون در محیط نرم‌افزارهایی نظیر آباکوس، یک محیط آزمایش ارزان قیمت در اختیار داشته باشند. از سوی دیگر، طراحی آزمایشات نقش کلیدی در برنامه‌ریزی آزمایشات تجربی و تحلیل‌های المان محدود بازی می‌کند. این مسأله بسیار حائز اهمیت است که تشخیص داده شود کدام پارامترها دارای اثر بسیار مهم، کدام دارای اثر متوسط و تغییر کدام پارامترها

در فرآیند بی‌اثر و قابل چشم‌پوشی است. بنابراین هدف طراحی آزمایشات تعیین اثر متقابل چندین پارامتر بصورت همزمان بر روی خروجی فرآیند می‌باشد. در اکثر فرآیندها چندین پارامتر مختلف و به‌طور همزمان بر روی پاسخ و یا محصول خروجی مؤثرند. بنابراین باید از روش‌های آماری که تأثیر چندین متغیر به‌طور همزمان در نظر گرفته می‌شود، استفاده کرد. روش‌های موسوم به طراحی آزمایش[1] (DOE) جایگزین خوبی برای روش‌های پیشین هستند. در این روش‌ها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها طراحی می‌شوند که در آن‌ها متغیرهای ورودی به طور برنامه‌ریزی شده تغییر داده می‌شوند و تأثیر آن‌ها روی خروجی یا پاسخ تعیین می‌گردد. بدین ترتیب پارامترهای مؤثر در خروجی تعیین می‌گردند و مشخص می‌شود که کدام یک از پارمترها به تنهایی در پاسخ مؤثرند و کدام یک در ترکیب باهم روی خروجی اثر می‌گذارند.

این روش نخستین بار توسط فیشر در سال 1920 ابداع شد. این روش هم اکنون کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی، بیولوژی و غیره دارد. یکی از بهترین روش‌های طراحی آزمایش، روش‌های مبتنی بر پاسخ سطح[2] هستند که در سال 1950 توسط باکس و ویلسون ابداع شد. در این پژوهش با توجه به تعدد پارامترها و حالت‌های پیشنهادی توسط طراحی آزمایشات و هزینه بالای آزمایشات تجربی، پس از صحه‌گذاری شبیه سازی انجام شده، موارد پیشنهادی طراحی آزمایشات توسط شبیه‌سازی المان محدود تحلیل شده و نتایج گرفته شده از FEM در نرم افزار طراحی آزمایش قرار داده شده و نهایتاً حالت های بهینه پیشنهاد شده توسط نرم افزار طراحی آزمایش، مورد تست تجربی قرار گرفته است که این روش مورد توافق سایر محققین خارجی نیز می باشد. روش پاسخ سطح (RSM) یک روش آماری و ریاضی است که در آن پاسخ‌های مورد نظر توسط تابعی از متغیرهای ورودی بیان می‌شود. اگر تمامی متغیرهای مستقل قابل اندازه‌گیری باشند و توانایی تکرار داشته باشند، پاسخ سطح به صورت رابطه‌ی (1) بیان می‌شود.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \tag{1}$$

که x_1 تا x_k متغیرهای مستقل ورودی هستند. در روش RSM معمولاً از یک چند جمله‌ای درجه 2 برای ارتباط پاسخ سطح با متغیرهای مستقل بکار می‌رود.

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_{ii} + \varepsilon \tag{2}$$

در این مقاله، کاهش ضخامت و ارتفاع چروکیدگی لوله‌های دولایه از نظر پارامترهای هندسی (طول، قطر و ضخامت لوله‌های داخلی و خارجی، طول و ارتفاع بالج، طول پخ) با استفاده از روش المان محدود و طراحی آزمایشات به روش پاسخ سطح مدل‌سازی شده است. همچنین مدل المان محدود ساخته شده با نتایج تجربی صحه‌گذاری گردیده است. اثر پارامترهای هندسی و برهمکنش آن‌ها بر پاسخ‌ها، تعیین شده و مورد بحث قرار گرفته است. پارامترهای هندسی بهینه با در نظر گرفتن حداقل کاهش ضخامت و ارتفاع چروکیدگی، با استفاده از بهینه‌سازی چند متغیره به دست آمده است.

2- تجهیزات آزمایشات تجربی

دستگاه هیدروفرمینگ لوله مطابق شکل 2 با سیستم کنترل و قابلیت اعمال منحنی‌های بارگذاری متفاوت، طراحی و ساخته شد. کوچک‌ترین نشتی در دو انتهای لوله‌ها سبب افت فشار داخلی و عدم موفقیت در فرآیند می‌گردد، آب‌بندی دو سر لوله توسط حلقه‌هایی از جنس پلی‌اورتان صورت می‌گیرد. فشار داخلی توسط پمپ‌دستی 2800 بار اعمال می‌گردد که به‌وسیله فشارسنج نصب‌شده بر روی پمپ نمایش داده می‌شود.

همچنین یک پاورپک با پمپ برقی 250 بار برای تأمین فشار لازم برای جک‌های تغذیه محوری استفاده می‌گردد. میزان تغذیه محوری و پیشروی همزمان سنبه‌ها توسط مدار هیدرولیک شکل 3 کنترل می‌شود. خط‌کش‌های اهمی نصب‌شده بر روی هرکدام از سنبه‌ها مقدار جابجایی آن‌ها را تشخیص داده و این مقدار توسط برد الکترونیک مجهز به نرم‌افزار LabVIEW با یکدیگر مقایسه می‌گردند تا جک‌ها همزمان به پیشروی ادامه دهند. با تحریک شیرهای سلونوئیدی 1 و 2 مدار مربوط به سنبه‌ای که پیشروی بیشتری دارد قطع گردیده و فشار پشت جک‌ها توسط شیرهای یک‌طرفه 5 حفظ می‌شود.

توسط شیرهای کنترل جریان 3 و 4 می‌توان سرعت اعمال تغذیه محوری هرکدام از سنبه‌ها را به‌صورت دستی تنظیم کرد. در پایان شکل‌دهی، شیرهای ربع گرد 6 و 7 مسیر روغن به تخلیه را باز می‌کنند و بدین ترتیب سنبه‌ها به موقعیت اولیه خود بازمی‌گردند. انتخاب جنس اجزاء ماشین بستگی به استحکامی دارد که از آن‌ها انتظار می‌رود. محفظه نگهداری سیلندرها، صفحه زیرین قالب و درپوش محفظه از جنس فولاد معمولی st32 انتخاب شدند. میل بوش راهنمای قالب از جنس فولاد عملیات حرارتی شده معروف به CK45 است.

Fig. 2 Tube Hydroforming machine

شکل 2 ماشین هیدروفرمینگ لوله

[1] Design of Experiment
[2] Response Surface Method (RSM)

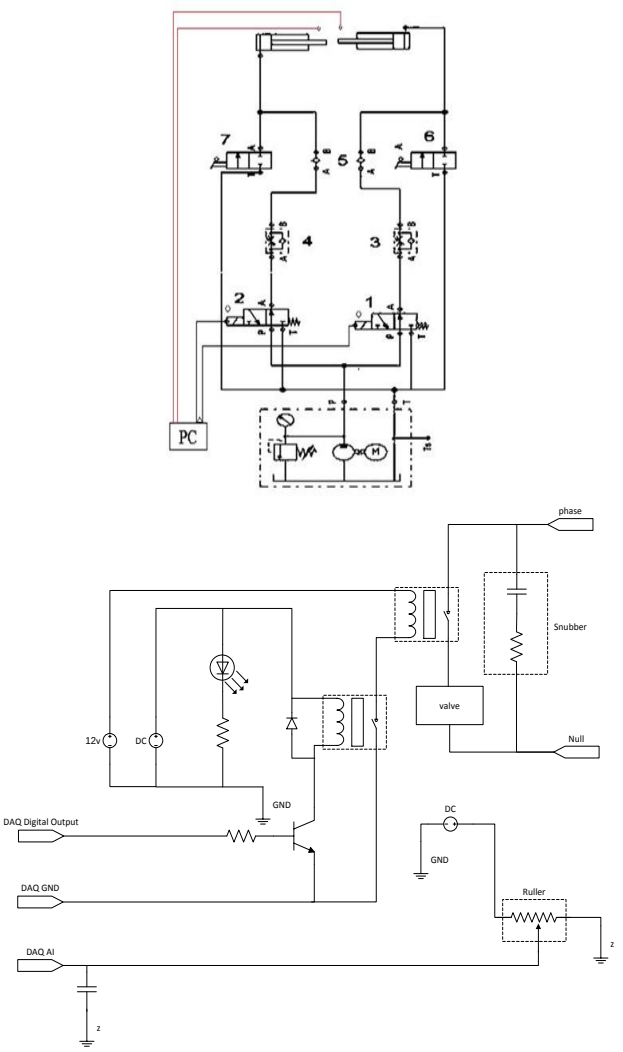


Fig. 3. Hydraulic and Electronic circuit Control System

شکل 3 مدار هیدرولیک و الکترونیک کنترل سیستم

از دو میل بوش راهنما با انطباق H7/n6 جهت هم‌راستایی دونیمه قالب استفاده‌شده است. هم‌راستایی سنبه‌های تغذیه محوری با توجه به حرکت جک‌ها از موارد مهم و کلیدی ساخت قالب هست که با موقعیت‌دهی دقیق پیچ‌های محفظه نگه‌دارنده سیلندرها و صفحه زیرین قالب بروی صفحه اصلی ماشین تأمین می‌شود. همچنین فاصله طولی هرکدام از سیلندرها از مرکز قالب که تعیین‌کننده طول فاصله آب‌بندی در فرآیند است نیز با دقت بالا به‌طور یکسان تنظیم می‌گردد.

3- مدل سازی المان محدود

یک مدل المان محدود برای لوله دو لایه از جنس لایه خارجی آلومینیوم و لایه داخلی مس توسط نرم‌افزار ABAQUS\Explicit 6.13 ساخته شد. به‌منظور دستیابی به یک منحنی بارگذاری مناسب برای تغییر شکل‌دادن لوله دولایه لازم است تغییرشکل لوله در زمان اعمال نیروهای شکل‌دهی بررسی شود. با بررسی تغییر شکل ایجادشده روی لوله منحنی‌های بارگذاری طوری تغییر داده می‌شوند تا یک قطعه سالم و بدون عیب تولید گردد. با توجه به این‌که دستیابی به این هدف به‌صورت تحلیلی مشکل است از روش اجزای محدود استفاده‌شده است. ابعاد محصول نهایی در شکل 4 دیده می‌شود. برای تعیین طول اولیه لوله از تئوری حجم ثابت استفاده می‌گردد. در این تئوری فرض بر این است که ضخامت لوله در کل فرآیند ثابت می‌ماند، درنتیجه با محاسبه حجم قطعه نهایی در نرم‌افزار کتیا که تقریباً برابر با $3294\ \mathrm{mm}^3$ است، از معادله‌ی (3) تخمینی از طول اولیه لوله بدست‌می‌آید.

$$V_2 = V_1 = \pi(D_0 t_0 - t_0^2)L_0$$

$$\rightarrow L_0 = \frac{3293.7}{\pi(24 \times 1.8 - 3.24)} \cong 105\ \mathrm{mm} \qquad (3)$$

شکل 5 مدل شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد که در ابتدای فرآیند شکل‌دهی قرار دارد. قالب به‌صورت صلب و لوله‌ها به‌صورت تغییرشکل‌پذیر مدل شده‌اند. هیدروفرمینگ لوله در زمره شکل‌دهی ورق‌های فلزی طبقه‌بندی می‌شود. در راهنمای نرم‌افزار آباکوس پیشنهادشده است که اگر نسبت ضخامت به یک شاخص بعد از کل سازه کم‌تر از 0.1 باشد، می‌توان جسم را به‌صورت پوسته مدل‌سازی کرد.

ازآنجاکه المان‌های چندمنظوره برای مدل‌سازی کرنش‌های غشایی بزرگ در پوسته مناسب هستند، المان S4R که یکی از المان‌های چندمنظوره است برای مدل‌سازی ورق انتخاب شد. این المان دارای چهار گره است و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده می‌کند. 8640 المان چهار گرهی نوع S4R با یک نقطه انتگرال‌گیری روی سطح لوله خارجی و 7920 المان از همین نوع روی لوله داخلی ایجاد شد. و از فشار یکنواخت سطحی به‌جای فشار روغن استفاده گردید. منحنی تنش- کرنش حقیقی لوله‌ها مطابق شکل 6 بر طبق نتایج آزمایش‌های کشش و جدول 1 در دمای محیط، در نرم‌افزار وارد گردید. با توجه به اینکه قالب‌ها با استفاده از مدل صلب تحلیلی مدل شده‌اند، برای تعریف تماس آن‌ها با لوله از الگوریتم زوج تماسی و گزینه سطح به سطح استفاده‌شده است. قالب در همه جهات مقید شده است و برای اعمال تغذیه محوری قید جابجایی بر روی دو لبه انتهایی لوله‌ها استفاده‌شده است.

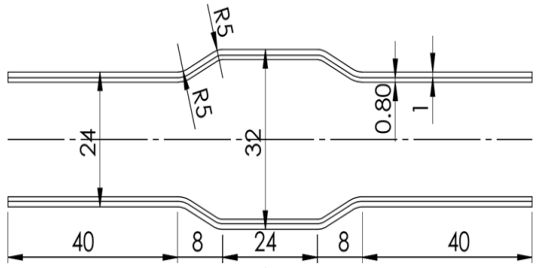


Fig. 4 Geometric characteristics final model (Dimensions in mm)

شکل 4 مشخصات هندسی نمونه نهایی (اندازه‌ها بر حسب میلیمتر)

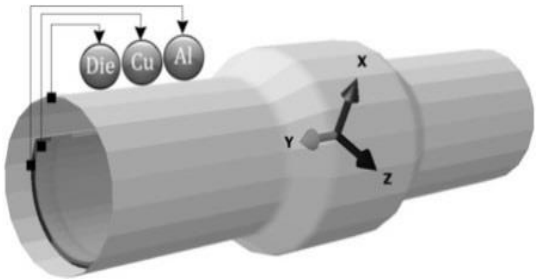


Fig. 5 Simulation model of bi-layer tubes and die

شکل 5 مدل شبیه‌سازی قالب و لوله دولایه

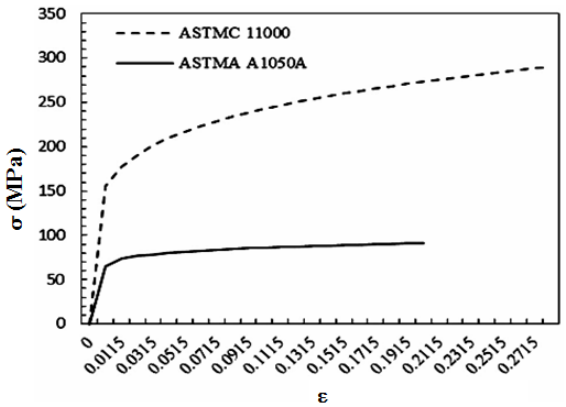


Fig. 6 The Stress-Strain diagram of alominum and copper

شکل 6 نمودار تنش - کرنش آلومینیوم و مس

جدول 1 خواص مکانیکی لوله مس-آلومینیوم

Table 1 Mechanical properties of copper- aluminum Tubes

پارامتر	نماد	C11000	AA1050
چگالی	ρ (kg/cm^3)	8900	2700
ضریب استحکام	k (MPa)	365	105
توان کار سختی	n	0.185	0.09
مدول الاستیسیته	E(Gpa)	85	70
ضریب پواسون	υ	0.32	0.3
ماکزیمم تنش	$\sigma_{\max}$(MPa)	290	99
تنش تسلیم	σ_y(MPa)	130	65

4- طراحی آزمایشات

طراحی مدل توسط روش RSM صورت می‌پذیرد تا وابستگی پاسخ‌ها بر حسب پارامترهای هندسی مشخص گردد. این کار با استفاده از نرم افزار Design Expert صورت می‌پذیرد.

پارامترهای هندسی شامل طول استوانه، قطر استوانه خارجی، طول ناحیه برآمده، ارتفاع ناحیه برآمده، طول پخ و ضخامت دو لایه درونی و بیرونی مطابق شکل 7 است. محدوده و مقادیر این پارامترها در جدول 2 خلاصه شده است.

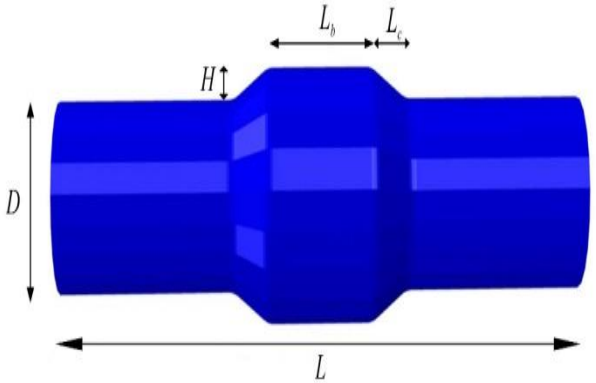


Fig. 7 Geometrical parameters on DOE

شکل 7 پارامترهای هندسی در طراحی آزمایش

جدول 2 پارامترهای هندسی مؤثر و محدوده مقادیر آن

Table 2 Effective geometrical parameters and range of values

پارامتر	نماد	-1	0	+1
طول استوانه (mm)	L	80	120	160
طول پخ (mm)	L_C	4	8	12
قطر استوانه (mm)	D	20	24	28
طول ناحیه برآمده (mm)	L_b	20	24	28
ارتفاع ناحیه برآمده (mm)	H	2	4	6
ضخامت لایه بیرونی (mm)	t_1	0.6	0.9	1.2
ضخامت لایه درونی (mm)	t_2	0.6	0.9	1.2

در مدل‌سازی پارامترهای هندسی با توجه به محدوده تغییرات پارامترها شکل کلی قطعه نهایی باید مطلوب و منطقی باشد. طول قسمت برآمده بعلاوه طول پخ قالب باید همواره کوچکتر از طول کل لوله باشد و با توجه به اینکه تغذیه محوری نیز به کار برده می‌شود، قید زیر را برای محدوده تغییرات پارامترها در مدل‌سازی اعمال می‌کنیم:

$$L - L_b - 2L_c >= 50 \text{ mm} \quad (4)$$

به دلیل وجود قید در مسأله و نیز تعداد زیاد پارامترها استفاده از روش باکس‌بنکن امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل از روش طراحی بهینه[1] برای مدل‌سازی پارامترهای هندسی استفاده می‌کنیم.

در این مدل دو پاسخ برای فرآیند هیدروفرمینگ استوانه در نظر گرفته می‌شود. این پاسخ‌ها شامل ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) هستند. طراحی مدل توسط روش RSM با طراحی بهینه (D-optimal) صورت می‌پذیرد تا وابستگی پاسخ‌ها بر حسب پارامترهای هندسی مشخص گردد. این کار با استفاده از نرم افزار Design Expert صورت می‌پذیرد. با توجه به مقادیر پارامترهای هندسی در جدول 2 که در سه سطح با کدهای 1-، 0 و 1+ مشخص شده‌اند و دو پاسخ ذکر شده، نرم‌افزار Design Expert ماتریس طراحی را مشخص می‌کند. با توجه به ماتریس طراحی، برای یافتن نحوه ارتباط پاسخ‌ها به پارامترها نیاز به 46 اجرای مختلف از داده‌های المان محدود است. در واقع با داشتن سه پاسخ ذکر شده برای 46 مقدار مختلف از پارامترهای ورودی می‌توان چندجمله‌ای مدل شده هرکدام از پاسخ‌ها را برحسب پارامترهای ورودی پیدا کرد. مقادیر ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) برای هر کدام از 46 داده جدول 3 با استفاده از مدلسازی المان محدود بدست می‌آیند. مقادیر این دو پاسخ در جدول 4 آورده شده است.

بررسی نتایج داده‌ها نشان می‌دهد که مدل درجه 2 برای مدلسازی ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) برحسب پارامترهای هندسی مناسب است. این مدل برای ماکزیمم کاهش ضخامت دارای R^2 تنظیم یافته[2] برابر 0.91 و R^2 پیش بینی شده[3] برابر 0.86 است که توافق

[1] Design Optimal
[2] Adjusted R-squared
[3] Predicted R-squared

جدول3 ماتریس طراحی برای مدل‌سازی پارامترهای هندسی

Table 3 Design matrix for modeling geometrical parameters

شماره	طول L (mm)	طول پخ L_c (mm)	قطر استوانه D (mm)	طول ناحیه برآمده L_h (mm)	ارتفاع ناحیه برآمده H (mm)	ضخامت لایه بیرونی t_1 (mm)	ضخامت لایه داخلی t_2 (mm)
1	160	4	24	28	2	0.60	0.60
2	160	8	28	28	2	0.60	1.20
3	98	12	20	24	2	1.20	0/60
4	160	8	28	28	2	0.60	120
5	80	5	28	20	6	0.60	1.20
6	160	4	20	28	4	1.20	1.20
7	86	4	20	28	2	1.20	0.60
8	160	12	20	28	6	1.20	0.60
9	102	12	24	28	2	0.60	1.20
10	80	4	28	20	2	0.60	0.60
11	94	12	24	20	2	1.20	1.20
12	94	8	28	28	2	1.20	0.60
13	160	12	28	20	4	1.20	0.60
14	160	4	20	20	6	1.20	0.90
15	109	9.65	26	25.7	5	1.05	0.90
16	160	12	20	20	6	0.90	1.20
17	80	5	28	20	6	0.60	1.20
18	120	4	20	20	6	0.60	0.60
19	160	12	20	28	6	0.60	1.20
20	160	4	20	20	2	0.90	0.60
21	127	12	28	20	2	0.60	1.20
22	160	12	28	28	6	1.20	1.20
23	160	4	20	20	2	0.90	0.60
24	160	4	28	20	4	0.60	1.20
25	86	4	20	28	6	1/20	0.90
26	160	4	28	28	2	1/20	0.60
27	87	8.5	20	20	2	0/60	1.20
28	94	8	20	28	2	0/60	0.60
29	80	5	24	20	2	1/20	0.60
30	160	4	20	24	2	0/60	1.20
31	80	5	20	20	4	1.20	1.20
32	160	12	20	20	2	0.60	0.90
33	160	8	28	20	6	0.60	0.60
34	160	12	20	20	2	0.60	0.90
35	160	12	20	28	6	1.20	0.60
36	102	12	28	28	6	0.60	0.90
37	102	12	20	28	2	1.20	1.20
38	94	12	20	20	6	0.60	0.60
39	160	4	20	28	6	0.60	0.90
40	160	4	24	20	2	1.20	1.20
41	86	4	28	28	6	0.60	0.60
42	86	4	20	28	4	0.60	1.20
43	123	4	28	28	6	0.60	1.20
44	80	4	28	20	6	1.20	0.60
45	160	12	28	28	2	0.90	0.60
46	83	4	28	25	2	1.20	1.20

جدول4 پاسخ‌های بدست آمده برای ماتریس طراحی

Table 4 Responses obtained for the design matrix

شماره	ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr (%)	ارتفاع چین‌خوردگی Wr (mm)	شماره	ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr (%)	ارتفاع چین‌خوردگی Wr (mm)
1	7.94	0.107	24	7.16	0.265
2	2.37	0.0658	25	1.60	1.80
3	3.72	0.0416	26	5.43	0.0927
4	2.37	0.166	27	-0.69	0.264
5	19.61	0.019	28	7.39	0.101
6	-0.077	1.22	29	3.79	0.235
7	2.64	0.042	30	0.334	1.13
8	70.68	0.653	31	-0.356	1.92
9	1.38	0.065	32	2.29	0.0686
10	7.86	0.207	33	50.58	0.228
11	-0.716	0.159	34	2.29	0.0686
12	5.71	0.246	35	70.68	0.653
13	15	0.091	36	47.50	0.109
14	1.95	1.58	37	-0.46	0.844
15	31.01	0.0252	38	49	0.104
16	0.028	1.410	39	51.57	0.01
17	19.61	0.0142	40	-0.365	0.867
18	47.80	0.0258	41	60.72	0.132
19	1.12	1.340	42	1.58	2.01
20	3.87	0.103	43	19.35	0.0195
21	2.21	0.218	44	35.70	0.0005
22	38.13	0.0182	45	7.70	0.158
23	3.87	0.06888	46	0.31	0.249

خوبی با هم دارند. مقدار F-value برای این پاسخ نیز برابر 34.2 است که نشان می‌دهد مدل در اثر نویز ایجاد نشده است. برای ارتفاع چروکیدگی نیز R^2 تنظیم یافته برابر 0.87 و R^2 پیش بینی شده برابر 0.75 است و مقدار F-value برای آن نیز برابر 17.1 است. برای کاهش جملات مدل نیز از روش بازگشتی[1] استفاده شده است. در این مدل مقادیر R^2 نسبتا بالایی برای دو پاسخ ذکر شده به دست می‌آید و توافق بین R^2 تنظیم یافته و R^2 پیش‌بینی شده مطلوب است و این دو برای هر دو پاسخ نزدیک به هم هستند.

مدل نهایی برای ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) به صورت روابط (5) و (6) است:

$$\begin{aligned}\mathrm{Sqrt}(Tr+1.00) = {} & +14.847 - 0.428\times D - 0.0646 \\ & \times L - 4.142\times t_1 + 6.12\times t_2 \\ & + 0.355\times H - 0.266\times L_b \\ & - 0.475\times L_c + 0.387\times D\times t_2 \\ & + 0.0547\times D\times H + 2.753\times 10^{-3} \\ & \times L\times L_b + 0.399\times t_1\times L_c \\ & - 1.373\times t_2\times H + 0.0433\times H \\ & \times L_c - 8.155\times {t_2}^2\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{Ln}(Wr+1.00) = {} & -5.184 + 0.236\times D + 0.0211\times L \\ & - 1.575\times t_1 + 1.552\times t_2 + 0.320 \\ & \times H + 0.0775\times L_b - 0.0596\times L_c \\ & - 0.0738\times D\times t_1 - 0.162\times D \\ & \times t_2 - 0.0181\times D\times H - 7.723 \\ & \times 10^{-4}\times L\times H - 7.888\times 10^{-4} \\ & \times L\times L_b + 0.116\times t_1\times H \\ & + 0.0916\times t_2\times H - 0.0451\times t_2 \\ & \times L_c + 8.136\times 10^{-3}\times H\times L_c \\ & + 2.531\times 10^{-3}\times L_b\times L_c + 1.722 \\ & \times {t_1}^2 + 1.575\times {t_2}^2\end{aligned} \tag{6}$$

اگر منحنی توزیع نرمال باقیمانده‌ها را رسم کنیم انتظار می‌رود که باقیمانده‌ها نزدیک به خط راست باشند. در شکل 8 و شکل 9 نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها به ترتیب برای ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نمودارها نزدیک به خط راست هستند و نشان‌دهنده این است که مدل ارائه شده مطلوب است.

5- نتایج و بحث

در این بخش نتایج شبیه سازی و طراحی آزمایشات به روش پاسخ سطح برای انواع پارامترهای هندسی و تأثیر آن‌ها بر روی خروجی نهایی فرآیند مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

5-1- صحه گذاری مدل المان محدود

آزمایشات تجربی برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده انجام شده است. قطعه‌کار تولید شده به همراه برش وایرکات آن در شکل 10 آورده شده است. برای صحت‌سنجی، توزیع ضخامت بدست آمده از قطعه‌کار آزمایش شده با توزیع ضخامت المان محدود مقایسه شده است. توزیع ضخامت‌های تجربی و المان محدود در شکل 11 نشان داده شده است. روند توزیع ضخامت دقیقاً مشابه روند توزیع ضخامت المان محدود می‌باشد و بیشترین خطای آن 5٪ می‌باشد. با توجه به قابل قبول بودن خطای مدل شبیه‌سازی شده، از این مدل المان محدود برای بهینه‌سازی فرآیند هیدورفرمینگ لوله‌های دولایه استفاده شده است.

5-2- کاهش ضخامت لوله

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره به تمامی پارامترهای هندسی وابسته است. در شکل 12 نمودار اختلالی ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره رسم شده است.

این نمودار نحوه تأثیر تغییر هر کدام از پارامترها را بر روی ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها در مقدار میانی آن‌ها، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع قسمت برآمده (H) کاهش ضخامت دیواره به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش H افزایش قطر لوله در قسمت میانی بیشتر است و کاهش ضخامت لوله‌ها بیشتر خواهد بود.

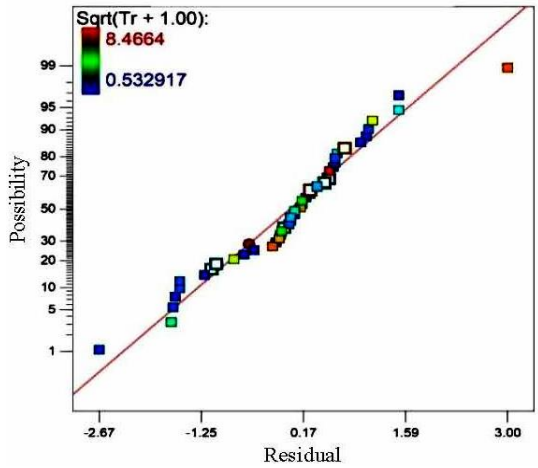


Fig. 8 Residuals normal distribution curve for maximum wall thickness reduction

شکل 8 منحنی توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره

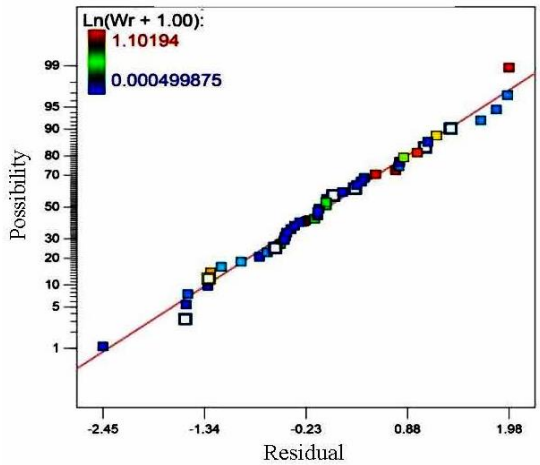


Fig. 9 Residuals normal distribution curve for wrinkling height

شکل 9 منحنی توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای ارتفاع چروکیدگی

[1] Backward

Fig. 10 Comparison of finite element and experimental samples

شکل 10 مقایسه نمونه های المان محدود و تجربی

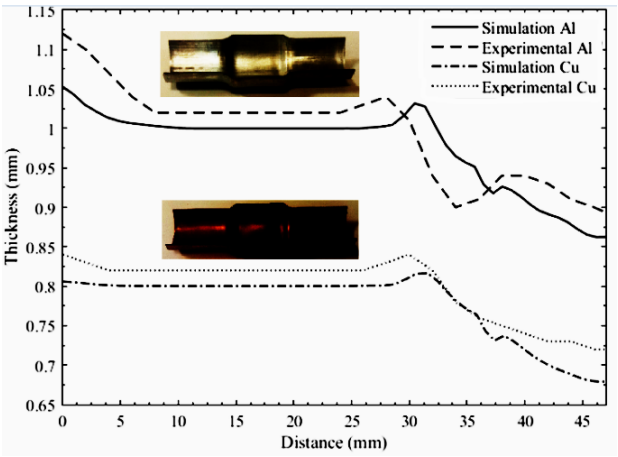


Fig. 11 distribution of thickness in experimental and FE data

شکل 11 توزیع ضخامت لوله‌ها در نتایج تجربی و المان محدود

با افزایش طول ناحیه برآمده (L_b) و طول پخ (L_c) نیز طول قسمتی که در آن قطر لوله افزایش یافته بیشتر می‌شود و درنتیجه کاهش ضخامت بیشتر خواهد بود. با افزایش قطر لوله‌ها (D) نیز در ضخامت ثابت کاهش ضخامت بیشتر می‌شود. اما هرچه لوله داخلی و خارجی (t_1 و t_2) ضخیم‌تر باشد، کاهش ضخامت کمتر خواهد بود.

تأثیر جملات برهمکنشی دوتایی در شکل‌های 13 تا 18 نشان داده شده است.

مطابق شکل 13، با افزایش قطر لوله و ارتفاع قسمت برآمدگی، ماکزیمم کاهش ضخامت لوله، افزایش خواهد یافت که این کاهش ضخامت در ارتفاع-های بالاتر، بیشتر خواهد بود. همچنین طبق شکل 14، با افزایش طول لوله و طول قسمت برآمده، کاهش ضخامت لوله بیشتر خواهد شد.

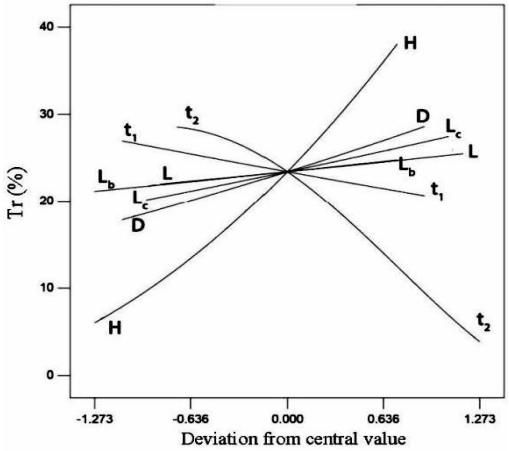


Fig. 12 Diagram of maximum thickness reduction according to geometrical parameters

شکل 12 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره برحسب پارامترهای هندسی

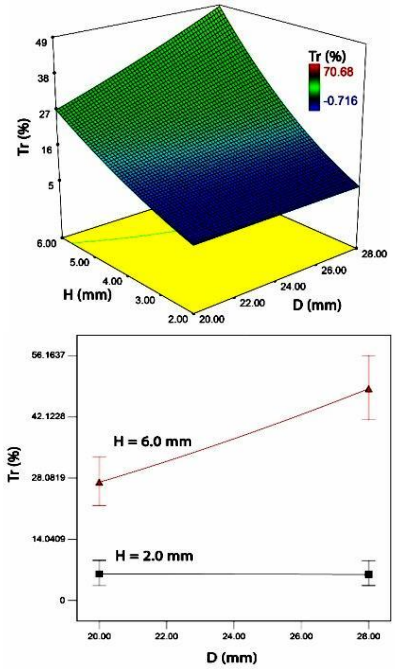


Fig. 13 Interaction plot between Thickness Reduction and Branc Height and Tube Diameter

شکل 13 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr بر حسب ارتفاع قسمت برآمده H و قطر لوله D

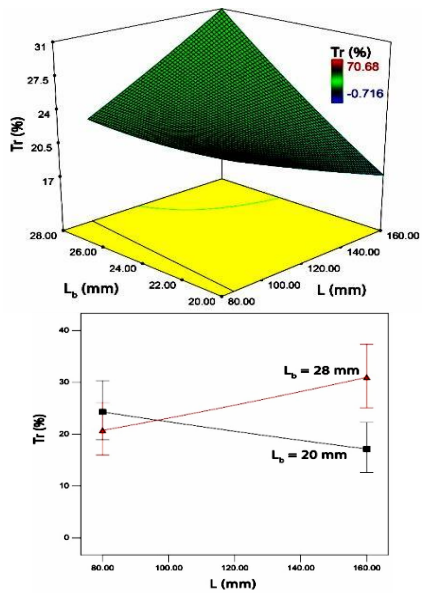


Fig. 14 Interaction plot between Thickness Reduction and Tube Diameter ane Lengths of Tube

شکل 14 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr بر حسب طول لوله (L) و طول قسمت برآمده L_b

مطابق شکل 15، با افزایش قطر لوله، درصد کاهش ضخامت لوله، بیشتر خواهد شد. همچنین طبق شکل 16، در ضخامت های بالاتر لوله، درصد کاهش ضخامت لوله کمتر خواهد بود.

مطابق شکل 17، با بالاتر رفتن میزان برآمدگی و طول پخ، درصد کاهش ضخامت بیشتر خواهد بود. همچنین طبق شکل 18، در طول پخ‌های پایین، با افزایش ضخامت لوله، درصد کاهش ضخامت کاهش خواهد یافت.

با توجه به مدل‌سازی انجام شده برای چروکیدگی لوله، می‌دانیم که ارتفاع چروکیدگی به تمامی پارامترهای هندسی وابسته است. در شکل 19 نمودار اختلالی تغییرات ارتفاع چروکیدگی برحسب تمامی پارامترهای فرآیند رسم شده است. همان‌طور که از این نمودار مشاهده می‌شود چروکیدگی با افزایش قطر لوله کاهش قابل توجهی می‌یابد. با افزایش طول لوله نیز چروکیدگی کمتر می‌شود. با افزایش ضخامت لوله‌های داخلی و خارجی نیز چروکیدگی بیشتر می‌شود. هر چه ارتفاع قسمت برآمده در لوله بیشتر باشد نیز منجر به چروکیدگی بیشتری در لوله می‌شود. تغییرات طول ناحیه برآمده نیز تأثیر کمی در چروکیدگی دارد. تغییرات ارتفاع چروکیدگی بر حسب جملات برهمکنشی دوتایی در شکل‌های 20 تا 24 نشان داده شده است.

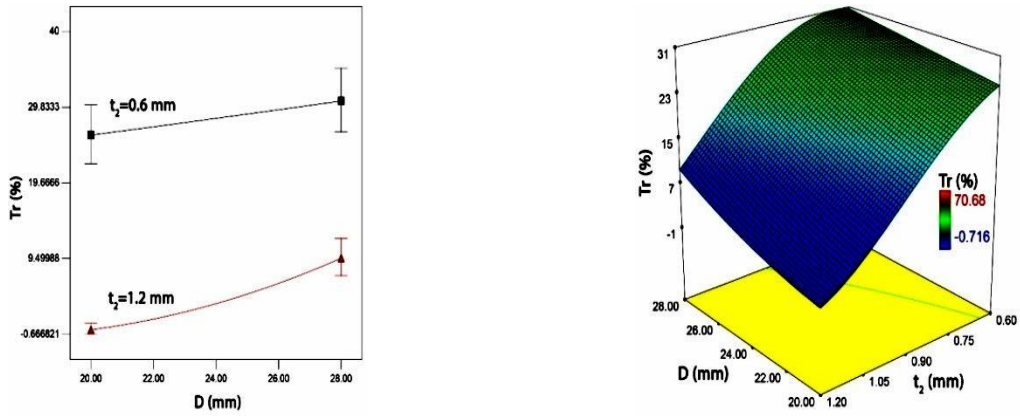


Fig. 15 Interaction plot between Thickness Reduction and Tube Diameter and Thickness of Outer Tube

شکل 15 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr بر حسب قطر لوله D و ضخامت لوله خارجی t_2

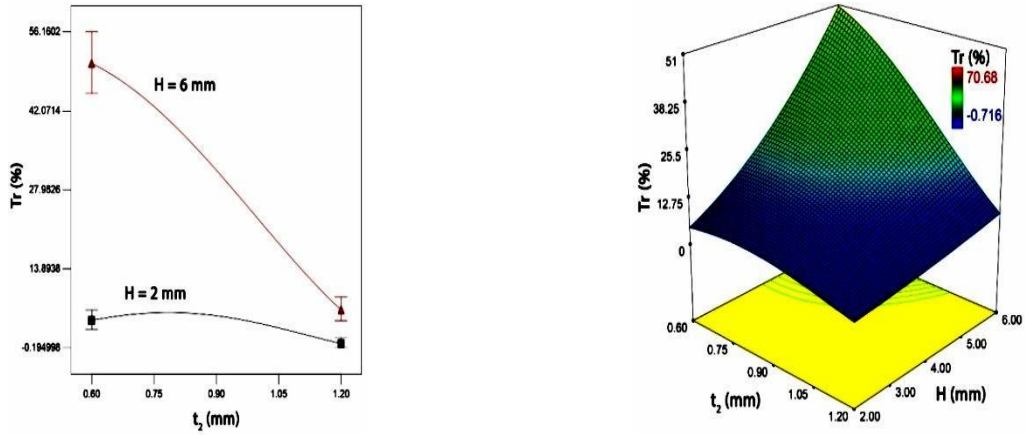
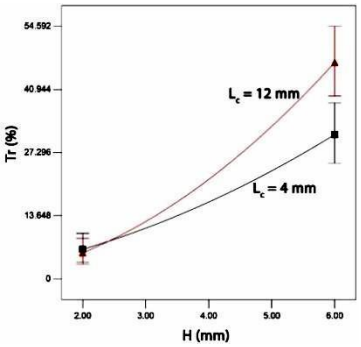


Fig. 16 Interaction plot between Thickness Reduction and Branch Height and Thickness of Outer Tube

شکل 16 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr بر حسب ارتفاع قسمت برآمده H و ضخامت لوله خارجی t_2



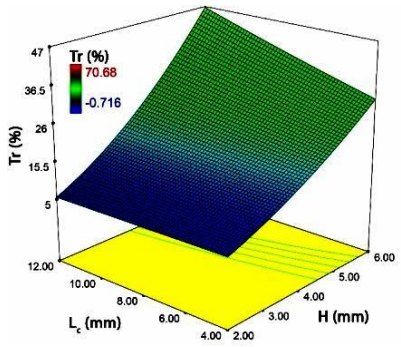
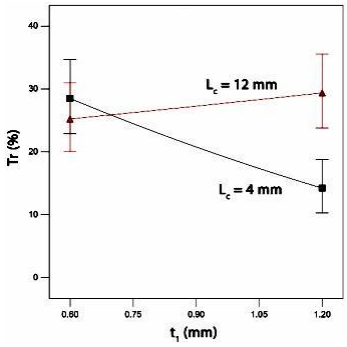


Fig. 17 Interaction plot between Thickness Reduction and Branch Height and Lengths of Chamfer

شکل 17 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr بر حسب ارتفاع قسمت برآمده H و طول پخ L_c



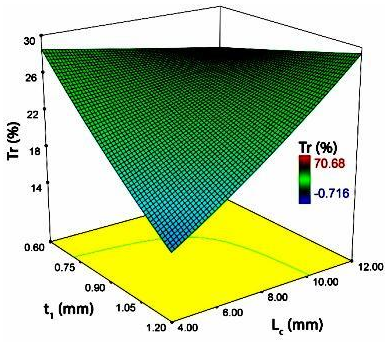


Fig. 18 Interaction plot between Thickness Reduction and Lengths of Chamfer and Thickness of Outer Tube

شکل 18 نمودار تغییرات ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره Tr طول پخ L_c و ضخامت لوله خارجی t_2

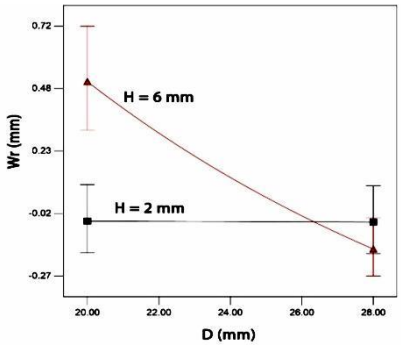


Fig. 20 Interaction plot between Wrinckling Height and Branch Height and Tube Diameter

شکل 20 نمودار تغییرات ارتفاع چروکیدگی Wr بر حسب ارتفاع قسمت برآمده H و قطر لوله D

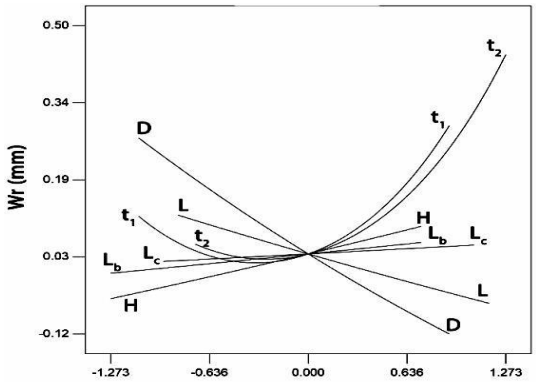
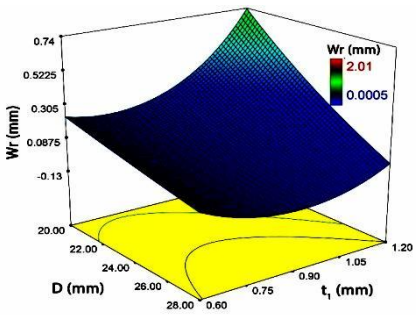
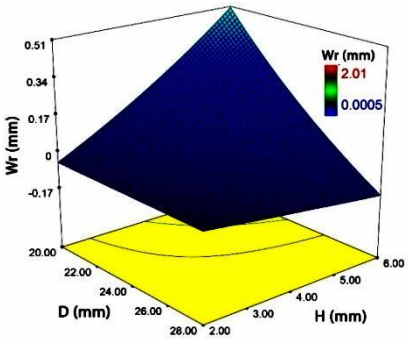


Fig. 19 Perturbation of Wrinckling Height on Gemetrical parameters

شکل 19 نمودار اختلالی تغییرات ارتفاع چروکیدگی برحسب پارامترهای هندسی





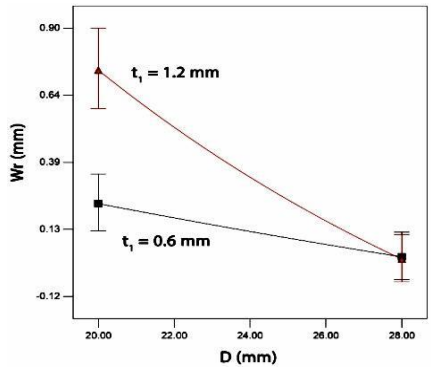


Fig. 21 Interaction plot between Wrinckling Height and Tube Diameter and inner Tube Thickness

شکل 21 نمودار تغییرات ارتفاع چروکیدگی Wr قطر لوله D و ضخامت لوله داخلی t_1

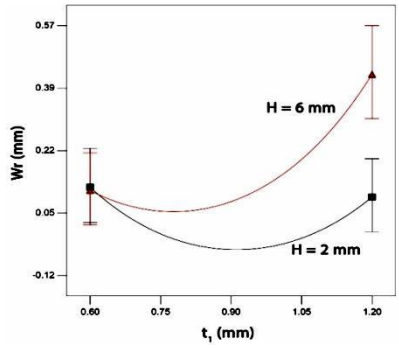
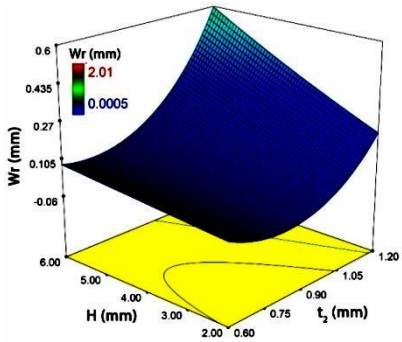
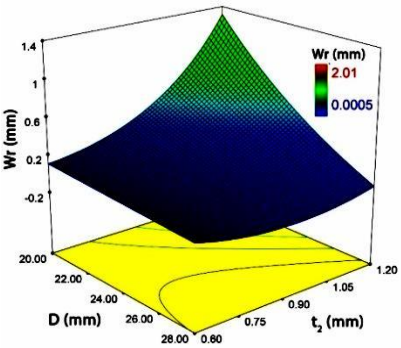


Fig. 23 Interaction plot between Wrinckling Height and Branch Height and inner Tube Thickness

شکل 23 نمودار تغییرات ارتفاع چروکیدگی Wr برحسب ارتفاع قسمت برآمده H و ضخامت لوله داخلی t_1





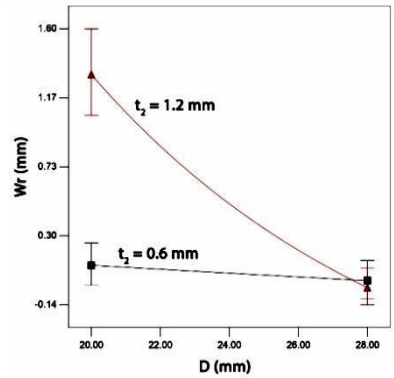


Fig. 22 Interaction plot between Wrinckling Height and Tube Diameter and outer Tube Thickness

شکل 22 نمودار تغییرات ارتفاع چروکیدگی Wr قطر لوله D و ضخامت لوله خارجی t_2

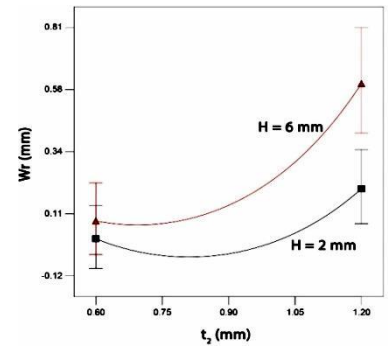
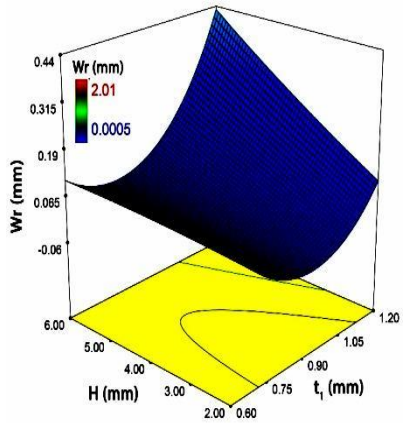


Fig. 24 Interaction plot between Wrinckling Height and Branch Height and outer Tube Thickness

شکل 24 نمودار تغییرات ارتفاع چروکیدگی Wr برحسب ارتفاع قسمت برآمده H و ضخامت لوله خارجی t_2



6- بهینه سازی پارامترهای هندسی

هدف از این بهینه‌سازی، می‌نیمم‌کردن میزان کاهش ضخامت لوله (Tr) و چروکیدگی (Wr) و بدست آوردن بیشینه ارتفاع قسمت برآمده (H) است. در معیار اول بهینه‌سازی، قطر لوله را برابر 24 mm و ضخامت لایه بیرونی را 1 mm و ضخامت لایه درونی را 0.8 mm فرض می‌کنیم و بهینه‌سازی را برای لوله دولایه با این مشخصات انجام می‌دهیم. سایر پارامترهای هندسی نیز کافیست در محدوده در نظر گرفته شده باشند. مقدار درجه اهمیت (r) برای همه پارامترها برابر 3 در نظر گرفته شده است. وزن (wt) برای حد

پایینی ارتفاع ناحیه برآمده برابر 2 و برای سایر متغیرها برابر 1 در نظر گرفته شده است. در جدول 5 حد بالایی و حد پایینی و هدف در نظر گرفته شده برای هر متغیر در بهینه‌سازی آورده شده است.

جدول5 معیارهای متغیرهای مختلف در بهینه‌سازی و محدوده در نظر گرفته شده برای آن‌ها

Table 5 Criterion of different variables in Optimization and it's limit

متغیر	هدف	حد پایینی	حد بالایی
طول استوانه (mm)	در محدوده	80	160
طول پخ (mm)	در محدوده	4	12
قطر استوانه (mm)	برابر 24	20	28
طول ناحیه برآمده (mm)	در محدوده	20	28
ارتفاع ناحیه برآمده (mm)	ماکزیمم	4	6
ضخامت لایه بیرونی (mm)	برابر 1	0.6	1.2
ضخامت لایه درونی (mm)	برابر 0.8	0.6	1.2
ارتفاع چروکیدگی (mm)	مینیمم	0	0.1
ماکزیمم کاهش ضخامت (%)	مینیمم	0	20

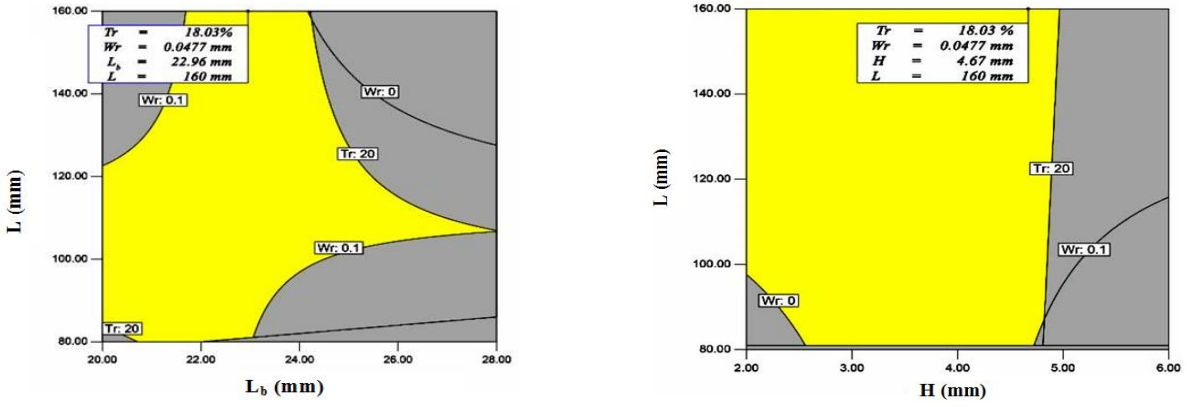
نتایج بهینه‌سازی با توجه به این معیارها در جدول 6 آورده شده است. نخستین جواب بهینه به‌دست آمده برای لوله با طول 160 mm و ناحیه برآمده با طول 22.96 mm و پخ با طول 4 mm به دست آمده است. ارتفاع ناحیه برآمده در این حالت برابر 4.67 mm و ماکزیمم کاهش ضخامت برابر 18٪ و ارتفاع چروکیدگی نیز برابر 0.048 mm است. جواب‌های بهینه برای لوله با طول حدود 100 mm و طول ناحیه برآمده 20 mm و طول پخ 4 mm نیز به دست آمده‌اند. سایر جواب‌ها نیز در جدول آورده شده است.

برای انجام بهینه‌سازی گرافیکی نخست با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی عددی بازه‌ای برای دو پاسخ مورد نظر در نظر می‌گیریم. در اینجا چون میخواهیم که کاهش ضخامت دیواره و ارتفاع چین‌خوردگی می‌نیمم باشند، بازه خود را فقط از بالا محدود می‌کنیم و جواب‌هایی را قبول می‌کنیم که ماکزیمم کاهش ضخامت لوله (Tr) کمتر از 20 درصد و ارتفاع چروکیدگی (Wr) نیز کمتر 0.1 میلی‌متر باشد. در نمودار حاصل از بهینه‌سازی گرافیکی برای طول لوله (L) و ارتفاع قسمت برآمده (H) برای جواب اول بهینه به دست آمده، نشان داده شده است. اگر سایر پارامترها را برابر مقادیر بدست آمده از بهینه‌سازی عددی قرار دهیم، مقادیر طول لوله (L) و ارتفاع قسمت برآمده (H) را می‌توان از نواحی مشخص شده با رنگ زرد در گراف روبرو انتخاب کرد، به نحوی که ماکزیمم کاهش ضخامت لوله (Tr) کمتر از 20 درصد و ارتفاع چروکیدگی (Wr) نیز کمتر 0.1 میلی‌متر باشد. در شکل 25 نیز نمودار حاصل از بهینه‌سازی گرافیکی برای طول لوله (L) و طول ناحیه برآمده (L_b) برای جواب اول بهینه به دست آمده، رسم شده است که ناحیه بهینه برای این دو پارامتر در آن نشان داده شده است.

جدول6 نتایج بهینه‌سازی برای معیارهای ذکر شده در جدول 5

Table 6 Optimization results for the Criterion listed in Table 5

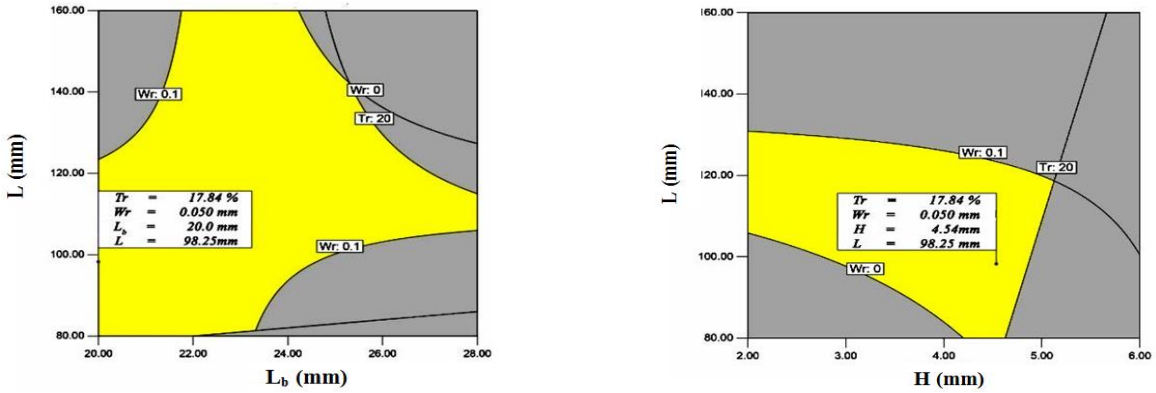
شماره	D (mm)	L (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	H (mm)	L_b (mm)	L_c (mm)	Tr (%)	Wr (mm)	مطلوبیت
1	24	160	1	0.8	4.67	22.96	4	18.03	.0476	0.152
2	24	159.42	1	0.8	4.66	22.95	4	17.96	0.0486	0.152
3	24	160	1	0.8	4.66	22.95	4.12	18.08	0.0482	0.149
4	24	160	1	0.8	4.77	22.53	4	18	0.0635	0.148
5	24	160	1	0.8	4.61	23	4.26	17.97	0.0472	0.145
6	24	98.25	1	0.8	4.54	20	4	17.83	0.0490	0.133
7	24	99.49	1	0.8	4.56	20	4	17.86	0.0529	0.133
8	24	98.75	1	0.8	4.53	20.03	4	17.77	0.0511	0.133
9	24	93.03	1	0.8	4.49	20	4	17.95	0.0380	0.132
10	24	92.04	1	0.8	4.43	20	4	17.67	0.0340	0.130
11	24	102.24	1	0.8	4.65	20	4	18.27	0.0611	0.129
12	24	98.65	1	0.8	4.49	20	4.33	17.81	0.0611	0.128
13	24	98.34	1	0.8	4.43	20.34	4	17.18	0.0524	0.126
14	24	87.04	1	0.8	4.38	20	4	17.77	0.0221	0.125
15	24	134.53	1	0.8	4.46	24.37	4	18.24	0.0355	0.122
16	24	133.60	1	0.8	4.57	22.28	4	17.12	0.0766	0.118
17	24	11.65	1	0.8	4.43	20	4.28	16.32	0.0711	0.114
18	24	80.94	1	0.8	4.42	22.47	4.23	17.87	0.0772	0.093
19	24	83.23	1	0.8	4.17	20	6.62	19.12	-0.0230	0.058
20	24	160	1	0.8	4.04	22.59	11.27	19.74	0.0311	0.014



(b) (a)

Fig. 25 Graphical optimization of the first criterion, (a) Tube Length and Branch Height, (b) Tube and Branch Height

شکل 25 بهینه سازی گرافیکی برای جواب اول، (a) طول لوله و ارتفاع قسمت برآمده، (b) طول لوله و طول ناحیه برآمده



(b) (a)

Fig. 26 Graphical optimization of the Six criterion, (a) Tube Length and Branch Height, (b) Tube and Branch Height

شکل 26 بهینه سازی گرافیکی برای جواب ششم، (a) طول لوله و ارتفاع قسمت برآمده، (b) طول لوله و طول ناحیه برآمده

محصول نهایی بهینه‌شده توسط ماشین پیشرفته هیدروفرمینگ ساخته شده و جهت مشاهده قسمت‌های داخلی، یک‌چهارم آن توسط دستگاه وایرکات برش خورده، در شکل 27 نشان داده شده است.

Fig. 27 The Optimized metal composite part

شکل 27 قطعه بهینه‌سازی شده کامپوزیت فلزی

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار ترکیب مدل المان محدود و طراحی آزمایشات برای بهینه‌سازی لوله‌های کامپوزیت فلزی مورد استفاده قرار گرفت و نشان داده شد که این روش بصورت موفقیت‌آمیز قادر به بهینه‌سازی چندمتغیره پارامترهای هندسی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کامپوزیتی می باشد.

مدل نهایی برای ماکزیمم کاهش ضخامت دیواره (Tr) و ارتفاع چین‌خوردگی (Wr) به صورت روابط تحلیلی بر پایه نتایج المان محدود صحه‌گذاری شده تعیین گردید. ماتریس طراحی برای مدل‌سازی پارامترهای هندسی تعیین گردید. با افزایش ارتفاع قسمت برآمده (H) کاهش ضخامت دیواره به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش H، افزایش قطر لوله در قسمت میانی بیشتر است و کاهش ضخامت لوله‌ها بیشتر خواهد بود. با افزایش طول

ناحیه برآمده (L_b) و طول پخ (L_c) نیز طول قسمتی که در آن قطر لوله افزایش یافته بیشتر می‌شود و درنتیجه کاهش ضخامت بیشتر خواهد بود. با افزایش قطر لوله‌ها (D) نیز در ضخامت ثابت کاهش ضخامت بیشتر می‌شود. اما هرچه لوله داخلی و خارجی (t_1 و t_2) ضخیم‌تر باشند، کاهش ضخامت کمتر خواهد بود. چروکیدگی با افزایش قطر لوله کاهش قابل توجهی می‌یابد. با افزایش طول لوله نیز چروکیدگی کمتر می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت لوله‌های داخلی و خارجی، چروکیدگی بیشتر می‌شود. هرچه ارتفاع قسمت برآمده در لوله بیشتر باشد، منجر به چروکیدگی بیشتری در لوله می‌شود. تغییرات طول ناحیه برآمده نیز تأثیر کمی در چروکیدگی دارد. نخستین جواب بهینه به دست آمده برای لوله با طول 160 mm و ناحیه برآمده با طول 22.96 mm و پخ با طول 4 mm به دست آمده است. ارتفاع ناحیه برآمده در این حالت برابر 4.67 mm و ماکزیمم کاهش ضخامت برابر 18٪ و ارتفاع چروکیدگی نیز برابر 00.048 mm است. جواب‌های بهینه برای لوله با طول حدود 100 mm و طول ناحیه برآمده 20 mm و طول پخ 4mm نیز به دست آمده‌اند. نتایج کامل بهینه سازی برای درک راحت تر توسط نمودارهای گرافیکی ارائه گردید و در نهایت نشان داده شد با استفاده از نتایج بهینه سازی، به قطعه با کیفیت مطلوب دست خواهیم یافت.

8- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود واجب می دانند از حمایت های بی دریغ مادی و معنوی پژوهشکده سازمان صنایع هوایی کمال تشکر و امتنان را داشته باشند.

9- مراجع

[1] Islam, M. D., Olabi, A.G., Hashmi, M.S.J., "Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation," Journal of Materials Processing Technology pp. 394–398, 2006.

[2] Seyedkashi, S.M.H., Liaghat, Gh., Moslemi Naeini, H., Mahdavian, H., S.M., Gollo. M.H., " Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process," Advanced Materials Research, pp. 264–265, 2011.

[3] Harjinder, S., "Fundamentals of Hydroforming", Society of Manufacturing Engineers, 2003.

[4] Alaswad, A., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., "Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes", Materials & Design, Vol. 32, No. 2, 2011

[5] Hashmi, M.S.J., Islam, M.D., Olabi, A. G., "Experimental and finite element simulation of formability and failures in multilayered tubular components," Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 1-10, 2007.

[6] Alaswad, A., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., "Employment of finite element analysis and Response Surface Methodology to investigate the geometrical factors in T-type bi-layered tube hydroforming", Advances in Engineering Software, Vol. 42, No. 11, 2011.

[7] Parto D., M.; Seyedkashi, S. M. H.; Liaghat, Gh.; Naeini, H. Moslemi; Panahizadeh, R., "Investigation of aluminum-copper tube hydroforming with axial feeding," SOURCE AIP Conference Proceedings;, Vol. 1315, No. 1, pp. 475, 2011.

[8] Loh-Mousavi, M., Mirhosseini, A. M., Amirian, G. , "Investigation of Modified Bi-Layered Tube Hydroforming by Pulsating Pressure", Key Engineering Materials, Vol. 486, No. 1, pp. 5-8, 2011.

[9] Seyedkashi, S.M.H., Liaghat, Gh., Moslemi Naeini, H., "Numerical and Experimental Study of Two-Layered Tube Forming by Hydroforming Process," Advanced Materials Research ,Vol. 264-265 .2011.

[10] Islam, M.D., Olabi, A.G., Hashmi, M.S.J., "Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation," Journal of Materials Processing Technology,, Vol. 174, No. 1–3, 2006.

[11] Islam, M.D., Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J., "Mechanical stresses in the multilayered T-branch hydroforming: numerical simulation," Int. J. Manufacturing Technology and Management, Vol. 15, No. 2, 2008.

[12] Payganeh, Gh., Shahbazi Karami, J., Malekzadeh Fard, K., "Finite element comparison of single, bi-layered and three-layered tube hydroforming processes, " Journal of Computational and Applied Research in Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 2, 2013.

[13] Shahbazi Karami, J., Malekzadeh, K., Payganeh, G., "Study of geometrical parameters on hydroforming of a new three-layered sandwich tube and finite element simulation," International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering, 2012.

[14] Xu, H., Seyedkashi, SMH., Joo, BD, Moon, YH, "Analytical prediction of forming pressure for three-layered tube hydroforming," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 229, No. 9, pp. 1575-1583, 2014.