



نشریه علمی پژوهشی
کامپوزیت
علوم و فناوری
<http://jstc.iust.ac.ir>



بهینه‌سازی فشار داخلی و تغذیه محوری در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کامپوزیت فلزی آلومینیوم- مس به کمک الگوریتم ژنتیک

جواد شهبازی کرمی^۱، محمد مراد شیخی^{۲*}، داود منافعی^۳، اورنگ چاچی^۴

- 1- دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
4- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
* تهران، صندوق پستی 163-16785، m.sheikhi@srutu.edu

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>دریافت: ۹۵/۵/۱۴ پذیرش: ۹۵/۷/۱۳</p> <p>کلیدواژگان: فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کامپوزیت فلزی بهینه‌سازی مسیر بارگذاری الگوریتم ژنتیک</p>	<p>لوله‌های کامپوزیت فلزی می‌توانند از طریق فرآیند هیدروفرمینگ چندلایه تولید شوند که در صنایع مختلفی از جمله هوافضا و نفت کاربرد دارند. مسیرهای بارگذاری فشار و پیش‌روی دو پارامتر مهم در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه می‌باشند که روابط تئوری برای به‌دست آوردن مسیرهای بارگذاری دقیق این پارامترها وجود ندارد. از طرف دیگر مسیر بارگذاری این پارامترها تأثیر زیادی روی کیفیت محصول تولیدی دارد. از این رو در این مقاله به تعیین مسیر بارگذاری این پارامترها با استفاده از روش بهینه‌سازی فراابتکاری پرداخته شده است. برای این کار ابتدا مدل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه، ایجاد و سپس این مدل با داده‌های تجربی صحت‌سنجی شده است. در نهایت این مدل المان محدود فرآیند با الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری برای تعیین مسیرهای بارگذاری فشار و پیش‌روی ترکیب شده است. در این مقاله از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک برای تعیین این مسیرهای بارگذاری استفاده شده است. در این الگوریتم تابع هدف، مطابقت ابعاد محصول تولیدی با مشخصات طراحی محصول نهایی تعریف شده است. همچنین دو قید حداکثر میزان تغییرات ضخامت و تنش ایجاد شده در طول لوله‌ها در نظر گرفته شده است. در این مقاله مسیر بارگذاری فشار داخلی و پیش‌روی محوری، خطی فرض شده است. برنامه‌نویسی پایتون و نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای پیاده‌سازی الگوریتم و شبیه‌سازی فرآیند به کار گرفته شده‌اند.</p>

Optimization of internal pressure and axial feed in metal composite Al-Cu tubes hydroforming process with genetic algorithm

Javad Shahbazi Karami¹, Mohammad Morad Sheikhi^{1*}, Davood Manafi², Orang Chaechi¹

- 1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
*P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran, m.sheikhi@srutu.edu

Keywords

Hydroforming process
Metal composite tubes
Optimization of loading path
Genetic algorithm

Abstract

Metallic composite tubes, used in special applications such as aerospace and oil industries, can be produced by multi-layered tube hydroforming. Pressure and feed loading paths are two important parameters in two-layered tube hydroforming process. Theoretical formulas don't exist to obtain correct pressure and feed loading paths. On the other hand, these loading paths have a significant influence on the quality of products. Therefore determining of optimal pressure and feed loading paths with meta-heuristic algorithm was studied in this paper. First, finite element (FE) model of two-layered tube hydroforming process was created and validated with experimental data. Then FE model and meta-heuristic optimization algorithm were combined to determine of the loading paths. In this paper, genetic algorithm was used as a meta-heuristic optimization. Conformation of the geometrical dimension of the product with the design dimension of final product was goal function in this algorithm. Also, the maximum amount of thickness changing and Von-mises stress were considered as constrains of optimization. Both loading paths were assumed linear. Python programming and ABAQUS software are utilized for process simulation and linking the FE model and genetic algorithm.

Please cite this article using:

Shahbazi Karami, J. Sheikhi, M. M. Manafi, D. and Chaechi, O., "Optimization of pressure and axial feed in metal composite Al-Cu tubes hydroforming process with genetic algorithm", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 275-282, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ لوله یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی می‌باشد که برای شکل‌دهی قطعات پیچیده و کامپوزیتی استفاده می‌شود. در این فرآیند، لوله اولیه به کمک فشار داخلی و پیش‌روی محوری به شکل نهایی تبدیل می‌شود. در مقایسه با روش‌های متداول شکل‌دهی، مزیت‌های همچون کاهش هزینه قطعه‌کار، هزینه ابزار و وزن قطعات را به دنبال خواهد داشت. فرآیند هیدروفرمینگ حساسیت‌های زیادی به پارامترهای فشار و پیش‌روی دارد. از این رو پیدا کردن بهینه‌ترین پارامترهای فرآیند برای تولید قطعات با کیفیت و هزینه کم لازم است [1, 2].

هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات زیادی روی آن‌ها انجام شده است. در برخی موارد به دلیل شرایط محیط کار قطعه‌کار لازم است که بجای لوله‌های تک‌لایه، از لوله‌های چندلایه کامپوزیتی استفاده شود. از کاربرد لوله‌های چندلایه می‌توان به اتصالات رادیاتور، محیط‌های شیمیایی، لوله‌های انتقال نفت بین چاه‌ها و صنایع هوایی اشاره کرد. لوله‌های دولایه مس- آلومینیوم به دلیل مقاومت به خوردگی و سایش، میراکننده صدا و ارتعاش‌ها، توزیع یکنواخت دما به دلیل متفاوت بودن ضریب انبساط لوله‌ها و کاهش چین خوردگی و برگشت فتری در صنایع‌های مختلف از جمله صنایع هوا فضا، لوله‌سازی و کشتی‌سازی کاربرد دارد [2-5]. در ادامه، پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های چندلایه و پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش‌های فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه، لی‌یو و همکاران [6] نحوه شکل‌دهی لوله‌های دولایه در فرآیند هیدروفرمینگ را به صورت تئوری مطالعه کرده‌اند و معادلات مربوط به تنش و کرنش را به دست آورده‌اند.

اسلام و همکاران [3] امکان‌سنجی تولید لوله‌های دولایه را در فرآیند هیدروفرمینگ لوله را به کمک شبیه‌سازی المان محدود و داده‌های تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که لوله‌های چندلایه قابلیت تولید به روش هیدروفرمینگ را دارد.

شهبازی و همکاران [2] هیدروفرمینگ لوله‌های تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه را از نظر چین‌خوردگی، کاهش ضخامت و ارتفاع بالج با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. آن‌ها برای مقایسه از روش المان محدود استفاده کرده‌اند. السواد و همکاران [7] فرآیند هیدروفرمینگ لوله دولایه را به کمک المان محدود و پاسخ سطح فرآیند مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها بعد از صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی، از مدل شبیه‌سازی شده برای انجام آزمایش‌ها استفاده نموده‌اند. آن‌ها چین‌خوردگی، کاهش ضخامت و ارتفاع بالج را به عنوان تابع خروجی و ابعاد هندسی لوله‌های به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفتند و تأثیر ابعاد لوله را روی تابع خروجی بررسی کرده‌اند. سیدکاشی و همکاران [8] روی تأثیر شرایط روانکاری در شکل‌دهی لوله‌های دولایه توسط فرآیند هیدروفرمینگ مطالعه کرده‌اند. آن‌ها در مطالعه خود از المان محدود استفاده کرده‌اند و نتایج به‌دست آمده را با داده‌های تجربی صحت‌سنجی نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که روانکاری مناسب سبب بهبود کیفیت لوله‌های تولیدی می‌شود.

سیدکاشی و همکاران [9] روی به‌دست آوردن روابط تئوری حاکم در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه مطالعه کرده‌اند. آن‌ها روابط تئوری فشار ترکیب‌دهی و چین‌خوردگی در شرایط متفاوت (وجود/عدم وجود پیش‌روی) به‌دست آورده و از داده‌های تجربی برای اثبات درستی روابط بیان

شده استفاده کرده‌اند. کیم و همکاران [4] روی شکل‌دهی لوله‌های سه‌لایه مطالعه کرده‌اند؛ به‌گونه‌ای که فقط لوله بیرونی تغییر شکل داده و لوله‌های داخلی بدون تغییر بمانند. آن‌ها برای این کار سوراخ‌های در لوله‌های داخلی ایجاد کرده‌اند.

آغچای و همکاران [10] روی شکل‌پذیری ورق‌های دولایه فولاد- آلومینیوم کار کرده‌اند. آن‌ها برای این کار از روش‌های تئوری و تجربی استفاده نمودند تا نمودار حد شکل‌دهی را به‌دست آورند. آن‌ها شکل‌پذیری ورق دولایه را با شکل‌پذیری ورق‌ها مقایسه و به این نتیجه رسیدند که شکل‌پذیری ورق‌های دولایه بهتر می‌باشد. مروتی و همکاران [11] روی چین‌خوردگی ورق‌های دولایه فولاد ضدزنگ- آلومینیوم در فرآیند کشش عمیق کار کرده‌اند. آن‌ها از روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی برای این کار استفاده نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نیروی نگهدارنده ورق وابسته به شکل هندسی ورق، ویژگی مواد و نحوه لایه‌گذاری ورق‌ها می‌باشد. کرجی بانی و همکاران [12] شکل‌پذیری ورق‌های دولایه (فولاد-آلومینیوم) را به‌صورت تجربی و المان محدود مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها از المان محدود برای بررسی پارامترهای ضخامت لایه‌ها، شعاع قالب، ضریب اصطکاک، و نحوه لایه‌گذاری روی محدودیت نرخ کشش (LDR) استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که LDR به این پارامترها وابسته بوده و بهبود این پارامترها باعث افزایش شکل‌پذیری ورق دولایه می‌شود. کرجی بانی و همکاران [13] روی تعیین منحنی محدودیت شکل‌دهی (FLC) برای ورق‌های دولایه به روش شبیه‌سازی مطالعه کرده‌اند و نشان داده‌اند که ضخامت ترتیب لایه‌گذاری روی منحنی محدودیت شکل‌دهی تأثیر قابل توجهی دارد. هاشمی و کرجی بانی [5] یک روش محاسباتی برای تعیین دیاگرام محدودیت شکل‌دهی ورق‌های دولایه آلومینیوم و مس پیشنهاد دادند. آن‌ها در این روش از تئوری بهبود یافته‌ی مارسینباک و کوکزنسیکی استفاده کردند. آن‌ها درستی روش پیشنهادی خود را با داده‌های تجربی نشان دادند. کرجی بانی و همکاران [14] روی به‌دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی در ورق‌های دولایه مس- آلومینیوم مطالعه کرده‌اند. آن‌ها برای به‌دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی از آزمایش کشش خارج از صفحه ناکازیم استفاده نمودند.

در پژوهش‌های بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله، پژوهشگران روی بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه کار کرده‌اند و سعی کرده‌اند به طریق‌های مختلف، مسیرهای بارگذاری مناسبی پیدا کنند. پژوهشگران از الگوریتم ژنتیک [15, 16]، منطق فازی [17]، تبری [18, 19]، روش‌های ترکیبی [20] برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده نموده‌اند. در این مقاله، با استفاده از ترکیب المان محدود و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به تعیین مسیر بهینه بارگذاری فشار و پیش‌روی محوری در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های کامپوزیتی دولایه مس-آلومینیوم پرداخته شده است. برای این کار مدل المان محدود فرآیند شبیه‌سازی شده و با داده‌های تجربی صحت‌سنجی شده است. سپس با الگوریتم بهینه‌سازی ترکیب شده تا مسیر بارگذاری بهینه تعیین شود. در این پژوهش مسیر بارگذاری خطی می‌باشد. از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و برنامه‌نویسی پایتون برای پیاده‌سازی بهینه‌سازی استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی المان محدود

المان محدود یک ابزار بسیار سودمند در بررسی فرآیندهای مهندسی می‌باشد و برای بهینه‌سازی درست فرآیند از طریق الگوریتم‌های فراابتکاری لازم است

جدول ۱ خواص مکانیکی آلومینیوم و مس

Table 1 Mechanical properties of aluminum and copper

مس	آلومینیوم	
130	65	تنش تسلیم، σ_y (MPa)
290	99	تنش نهایی، σ_{UTS} (MPa)
85	70	مدول الاستیسیته، E (GPa)
0.32	0.3	ضریب پواسون، ν
29	32	درصد ازدیاد طول
365	105	ضریب استحکام، k (Mpa)
0.185	0.09	توان سختی، n
8.9	2.7	چگالی، ρ (g/cm^3)
0.8	1	ضخامت (mm)



Fig. 3 Tension test for Al and Cu tubes

شکل ۳ دستگاه آزمون کشش برای لوله‌های آلومینیوم و مس

مقایسه بین نتایج تجربی و المان محدود نشان می‌دهد که بیشترین خطا در مقدار ضخامت برابر 5 درصد می‌باشد (شکل 4-ب). همان‌طور که از شکل 4-ب مشاهده می‌شود؛ نحوه‌ی توزیع ضخامت نیز در داده‌های تجربی و المان محدود مشابه هم می‌باشند. بنابراین از این مدل برای بهینه‌سازی فرآیند استفاده شده است.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

اصول انتخاب طبیعی داروین در الگوریتم ژنتیک برای یافتن بهینه‌ترین حالت مسائل استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه جواب‌ها (جمعیت اصلی) شروع می‌شود. از این جمعیت، دو جواب به عنوان والد انتخاب می‌شود. سپس براساس این والدین، فرزندان از طریق ترکیب و جهش ایجاد می‌شوند. بعد از ایجاد فرزندان، جمعیت جدیدی پدید می‌آید که شامل فرزندان و جمعیت اصلی است. از بین این جمعیت جدید، آن‌هایی که بهتر می‌باشند به عنوان جمعیت اصلی انتخاب می‌شود. این روند تا محقق شدن شرایط خاتمه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی تکرار می‌شود [21، 22]. الگوریتم ژنتیک بدین صورت می‌باشد:

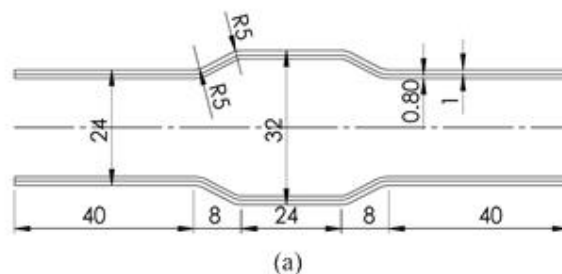
شروع:

- 1- جمعیت اصلی را ایجاد و ارزیابی کن
- 2- به تعداد مشخصی دو والد انتخاب و از این والدین دو فرزند از طریق ترکیب ایجاد کن (جمعیت فرزندان)

ابتدا فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های دولایه کامپوزیتی مدل‌سازی شود. ابعاد نهایی لوله‌ها و مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل 1 نشان داده شده است.

با توجه به متقارن بودن لوله‌های دولایه، یک‌هشتم لوله شبیه‌سازی و با توجه به همگرایی ضخامت، اندازه مش، یک در نظر گرفته شده است. جنس لوله‌ی داخلی و خارجی، به ترتیب مس (ASTM C 11000) و آلومینیوم (ASTMA A1050A) می‌باشد که خواص مکانیکی آن از آزمون کشش به‌دست آمده و در شکل 2 و جدول 1 خلاصه شده است. برای آزمون کشش از استاندارد ASTM-E8M-A370 استفاده شده است. سرعت فک دستگاه دانشگاه شهید رجایی 2 mm/min می‌باشد (شکل 3).

آزمایش تجربی به منظور صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده انجام شده است. در شکل 4-الف قطعه‌کار آزمایش شده نشان داده شده است. در این مقاله به دلیل اهمیت توزیع ضخامت در لوله‌های هیدروفورمینگ شده، از توزیع ضخامت برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده استفاده شده است. ضخامت لوله‌ها در نقاط مختلف قطعه‌کار تولید شده بعد از برش وایرکات اندازه‌گیری شده است.



(a)

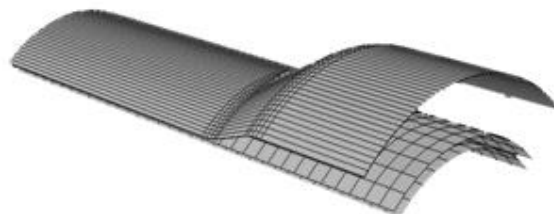


Fig. 1 Final dimension of tubes and simulation model (a) geometrical dimension (b) FE model

شکل ۱ شکل نهایی لوله‌ها و مدل شبیه‌سازی شده (الف) ابعاد هندسی (ب) مدل المان محدود

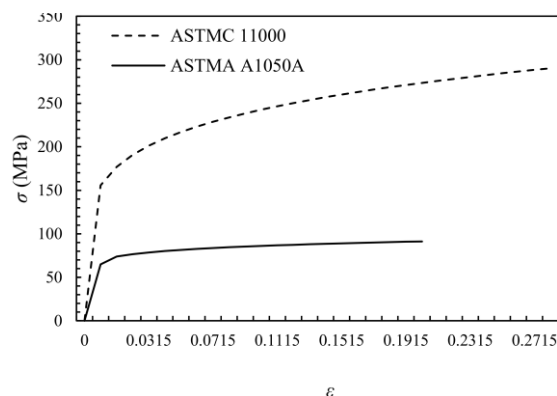


Fig. 2 The Stress-Strain diagram of aluminum and copper

شکل ۲ نمودار تنش- کرنش آلومینیوم و مس

$$X_1 = (x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1n}) \quad (2)$$

$$X_2 = (x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2n}) \quad (3)$$

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n); \quad -0.1 < \alpha_i < 1.1 \quad (4)$$

$$Y_1 = (y_{11}, y_{12}, y_{13}, \dots, y_{1n}) \quad (5)$$

$$Y_2 = (y_{21}, y_{22}, y_{23}, \dots, y_{2n}) \quad (6)$$

$$y_{1i} = \alpha_i x_{1i} + (1 - \alpha_i) x_{2i} \quad (7)$$

$$y_{2i} = (1 - \alpha_i) x_{1i} + \alpha_i x_{2i} \quad (8)$$

که در رابطه‌ی بالا، $x_{i,\min}$ کران پایین عضو نام، $x_{i,\max}$ کران بالای عضو نام، x ها اعضای جمعیت X و α_i اعضای نام ماسک α می‌باشد.

عمل جهش روی یک والد انجام می‌شود. برای این کار ابتدا والدی به تصادف انتخاب و تعداد متغیری تعیین می‌شود که باید عوض شود (طبق رابطه‌ی (9)). سپس به این تعداد، متغیرهای از والد انتخاب و مقدار آن طبق رابطه‌ی (10) عوض می‌شود.

$$m = \min\{\lceil \pi_m n \rceil, 1\}; \quad \pi_m = 5 - 20\% \quad (9)$$

$$x_i^{\text{new}} = x_i^{\text{current}} + \sigma N(0,1); \quad \sigma = 0.1(x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (10)$$

در آن x_i متغیر انتخاب شده، $N(0,1)$ توزیع نرمال، π_m شدت تأثیر جهش و σ گام حرکت می‌باشد.

۴- بهینه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های کامپوزیتی

برای آن که بتوان فرآیندی را بهینه کرد، لازم است ابتدا مدل ریاضی آن فرآیند تعیین شود. مدل ریاضی فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های دولایه برای بهینه‌سازی در رابطه‌ی (11) آورده شده است.

$$Q = (S, \Omega, f); \quad f: S \rightarrow R_0^+ \quad (11)$$

که در آن Q مدل فرآیند هیدروفورمینگ، S فضای جستجو، Ω قیدهای مدل، f تابع هدف و R_0^+ اعداد طبیعی مثبت می‌باشد.

به دلیل اینکه در این مقاله هدف، بهینه‌سازی دو متغیر فشار و پیش‌روی می‌باشد؛ پس فضای جستجو S یک فضای دو بعدی می‌باشد که در آن متغیر فشار در محدوده‌ی $[P_{\min}, P_{\max}]$ و متغیر پیش‌روی در محدوده‌ی $[F_{\min}, F_{\max}]$ می‌باشد. کران این متغیرها با توجه به روابط تئوری به راحتی تعیین می‌شوند [23]. در این مقاله فشار و پیش‌روی به ترتیب 15، 60 مگاپاسکال و 1.13 میلی‌متر انتخاب شده است.

تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی، مطابقت لوله‌های تولید شده با محصول طراحی شده در نظر گرفته شده است. در نتیجه f فاصله سطوح لوله‌ها از سطح داخلی قالب می‌باشد که باید کمینه شود. قیدهای این مدل، حد مجاز بیشترین تغییرات ضخامت (نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی) و تنش می‌باشد. با این قیدها این اطمینان به‌عمل می‌آید که محصول تولید شده عیوبی هم چون نازک‌شدگی، چین‌خوردگی و پارگی ندارد. همچنین اگر بهترین جواب سه دور ایجاد جمعیت تغییر نکند؛ آنگاه الگوریتم متوقف شده و برنامه اتمام می‌یابد.

برای آن که بتوان تابع هدف و رعایت شدن قیدهای بهینه‌سازی تعیین شود لازم است از مدل المان محدود استفاده شود. به همین دلیل مدل المان محدود با الگوریتم بهینه‌سازی ترکیب شده است. در شکل 5 نحوه‌ی یکپارچه‌سازی نشان داده شده است. مراحل یکپارچه‌سازی بدین صورت است که بعد از ایجاد جواب جدید توسط الگوریتم ژنتیک، جواب ایجاد شده به

- 3- به تعداد مشخصی والد انتخاب و از این والد، فرزندی از طریق جهش ایجاد کن (جمعیت جهش یافته‌گان)
- 4- جمعیت اصلی، فرزندان و جهش یافته‌گان را ادغام و جمعیت اصلی جدیدی ایجاد کن
- 5- در صورت محقق نشدن شرایط خاتمه به مرحله 3 برو
- 6- بهترین جواب را نمایش بده
- 7- پایان

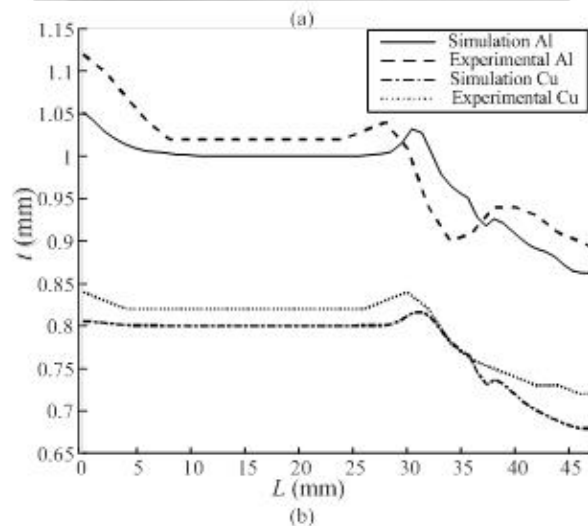
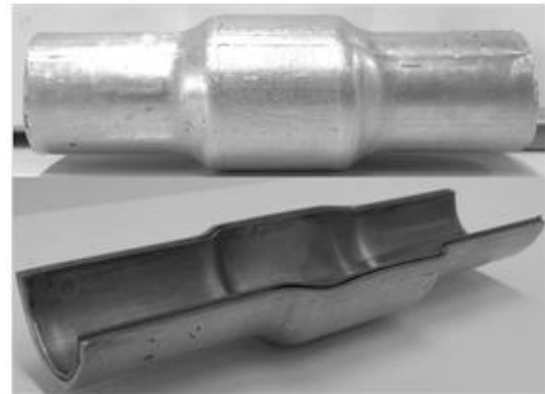


Fig 4 Experimental data (a) workpiece (b) distribution of thickness in experimental and FE data

شکل ۴ نتایج تجربی (الف) قطعه‌کار تولید شده (ب) توزیع ضخامت لوله‌ها با نتایج تجربی و المان محدود

عمل ترکیب بین دو والد جهت ایجاد فرزندان انجام می‌شود. انتخاب والدین به‌صورت تصادفی می‌باشد به‌طوری که عضو از جمعیت که بهتر است، احتمال انتخاب شدن آن نیز بیشتر است. در این مقاله از چرخ رولت برای انتخاب والدین استفاده شده است. فرض می‌شود که X_k عضو k ام از جمعیت اصلی باشد که n متغیر دارد که X جمعیت ژنتیک را نشان می‌دهد (رابطه‌ی (1)). اگر والدین انتخاب شده X_1 و X_2 باشد (رابطه‌ی (2) و (3))؛ آنگاه ماسکی (α) طبق رابطه‌ی (4) ایجاد می‌شود. از این ماسک برای تولید فرزندان Y_1 و Y_2 استفاده می‌شود (رابطه‌ی (5) و (6)). فرزندان طبق رابطه‌ی (7) و (8) ایجاد می‌شوند.

$$X_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}, \dots, x_{kn}); \quad x_{ki} \in [x_{i,\min}, x_{i,\max}] \quad (1)$$

تعداد جمعیت در الگوریتم ژنتیک یکی از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم می‌باشد که روی همگرایی آن تأثیر زیادی دارد. از این رو تعیین درست این جمعیت ضروری است. از این رو سه جمعیت متفاوت برای تعیین تعداد جمعیت متناسب با فرآیند انتخاب و براساس این جمعیت‌ها، الگوریتم اجرا شده است.

نتایج الگوریتم در شکل 6 نشان داده شده است. این نمودارها براساس تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف و مقدار تابع هدف ترسیم شده‌اند [24]. با وجود این که با تعداد جمعیت پنج به نظر می‌رسد خود الگوریتم همگرا شده باشد، ولی با توجه به مقدار تابع هدف می‌توان نتیجه گرفت که با این جمعیت، الگوریتم به کمینه‌های محلی همگرا شده است.

پس این تعداد جمعیت برای بهینه‌سازی فرآیند مناسب نمی‌باشد و باید تعداد جمعیت افزایش یابد.

مقدار جواب بهینه‌ی به‌دست آمده با افزایش تعداد جمعیت به مقدار 10 بهبود یافته است. با این حالت الگوریتم همگرا نشده است و شرط توقف باعث اتمام برنامه شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد جمعیت، جواب بهینه بهبود می‌یابد ولی همچنان تعداد جمعیت به اندازه‌ی نیست که باعث همگرایی الگوریتم شود. با افزایش تعداد جمعیت به مقدار 15، الگوریتم علاوه بر همگرا شدن، تابع هدف خوبی نیز حاصل می‌شود. بنابراین می‌توان بیان کرد که الگوریتم ژنتیک با جمعیت 15 به بالا به جواب بهینه دست خواهد یافت. لازم به ذکر است که وقتی الگوریتم به یک جواب واحدی همگرا می‌شود؛ بدین معناست که جستجوی الگوریتم به اتمام رسیده و جواب به‌دست آمده به احتمال قوی، همان جواب کمینه مطلق می‌باشد.

نرم‌افزار المان محدود ارسال شده و مدل شبیه‌سازی شده با این جواب ایجاد شده اجرا می‌شود.

بعد اجرا مدل در المان محدود، بیشترین تنش و درصد تغییرات ضخامت حساب شده و در صورتی که این موارد از حد مجازشان تجاوز نکرده باشد تابع هدف آن حساب شده و به الگوریتم بازگردانده می‌شود. در غیر این صورت جواب ایجاد شده قابل قبول نبوده و طبق الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، جواب جدید دیگری ایجاد می‌شود.

۵- نتایج و بحث

همان‌طور که بیان شد در این مقاله هر دو مسیر بارگذاری پیش‌روی محوری و فشار داخلی به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی برای فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌ی دولایه انتخاب شده‌اند. مسیر بارگذاری‌ها خطی فرض شده است و زمان انجام فرآیند (t) ثابت می‌باشد؛ زیرا فرآیند در دمای اتاق صورت گرفته و به نرخ کرنش وابسته نیست. لوله‌های مورد شکل‌دهی علاوه بر نداشتن عیوب ترکیدگی، نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی، باید محصول نهایی مطابقت بیشتری داشته باشند.

در این‌جا بیشترین تنش وان‌میسز و درصد تغییرات ضخامت لوله برای بررسی عیوب لوله انتخاب شده‌اند؛ به طوری که بیشترین تنش وان‌میسز لوله‌ها و درصد تغییرات ضخامت آن‌ها نباید از تنش استحکام نهایی و درصد مجاز تغییرات ضخامت لوله‌ها بیشتر باشند. درصد تغییرات ضخامت مجاز برای لوله‌ها طبق ویژگی مواد (جدول 1) و در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری 25٪ انتخاب شده است. برای تعیین تابع هدف ابتدا شکل‌دهی انجام می‌شود سپس فاصله تمام نودهای لوله‌ها با سطح داخلی قالب حساب شده و بیشترین مقدار، به‌عنوان مقدار تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

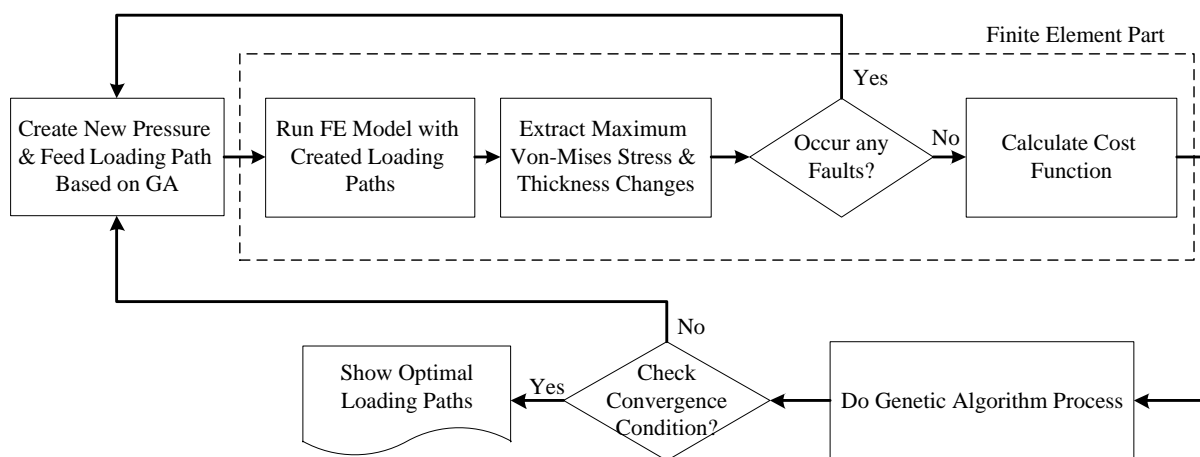


Fig 5 Intigration of genetic algothms and fininte element

شکل ۵ یکپارچه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی و المان محدود

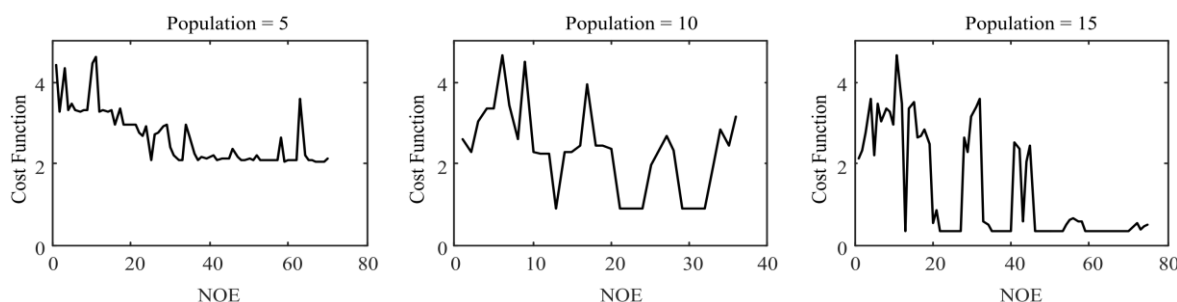


Fig 6 Genetic algorithm results (a) with 5 population (b) with 10 population (c) with 15 population

شکل ۶ نتایج الگوریتم ژنتیک (الف) با 5 جمعیت (ب) با 10 جمعیت (ج) با 15 جمعیت

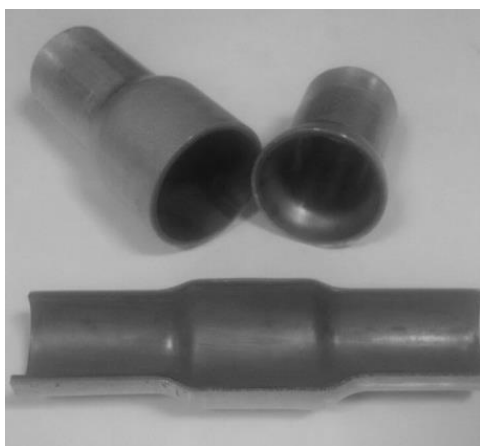


Fig 9 The Optimized metal composite part

شکل ۹ قطعه بهینه‌سازی شده کامپوزیت فلزی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تعیین بهینه‌ترین مسیرهای بارگذاری فشار و پیشروی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه پرداخته شد و دو عامل مهم در موفقیت‌آمیز بودن مورد بررسی و تست قرار گرفت. برای بهینه‌سازی از ترکیب الگوریتم ژنتیک و المان محدود استفاده شده است. ابتدا فرآیند هیدروفرمینگ دولایه شبیه‌سازی شده و با استفاده از نتایج تجربی، صحت‌گذاری فرآیند شبیه‌سازی شده مورد تأیید قرار گرفته است. سپس از این مدل شبیه‌سازی شده برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در این مقاله بیشترین خطای شبیه‌سازی ۵ درصد می‌باشد و از توزیع ضخامت در راستای محوری لوله برای بررسی صحت مدل‌سازی استفاده شده است. بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع هدف مطابقت با محصول نهایی و قیدهای حداکثر تنش و درصد تغییرات ضخامت انجام شده است. با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد که برای بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ دولایه، لازم است که حداقل تعداد جمعیت الگوریتم، ۱۵ عدد باشد. همچنین با فشار ۳۲۶ بار با تغییرات خطی با زمان و تغذیه محوری ۶.۸ میلی متر از هر طرف به قطعه بهینه دست خواهیم یافت.

۷- مراجع

- [1] A. Aydemir, J. H. P. de Vree, W. A. M. Brekelmans, M. G. D. Geers, W. H. Sillekens, R. J. Werkhoven, An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 3, pp. 303-310, 2005 .
- [2] A. Alaswad, K. Benyounis, A. Olabi, Finite element comparison of single and bi-layered tube hydroforming processes, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 7, pp. 1584-1593, 2011 .
- [3] M. Islam, A. Olabi, M. Hashmi, Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 174, No. 1, pp. 394-398, 2006 .
- [4] S. Y. Kim, B. D. Joo, S. Shin, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon, Discrete layer hydroforming of three-layered tubes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 68, pp. 56-62, 2013 .
- [5] R. Hashemi, E. Karajibani, Forming limit diagram of Al-Cu two-layer metallic sheets considering the Marciniak and Kuczynski theory, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016 .

مسیر بهینه‌بارگذاری به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک در شکل ۷ ترسیم شده است. با این مسیر بارگذاری، بیشترین فاصله‌ی ایجاد شده از سطح داخلی قالب و سطح بیرونی لوله‌ها بعد از شکل‌دهی ۰.۳۹۶ میلی‌متر می‌باشد. لازم بذکر است که این مقدار بیشترین فاصله یک گره می‌باشد و در تمام گره‌های دیگر، فاصله از این مقدار کمتر می‌باشد. با این مسیرها، بیشترین درصد تغییر ضخامت برای آلومینیوم و مس به ترتیب ۱۴.۰۱ و ۱۰.۳۸ درصد می‌باشد. همچنین بیشترین تنش ایجاد شده برای آلومینیوم و مس به ترتیب ۹۱ و ۲۸۹ مگاپاسکال است. بعد از تعیین مسیر بهینه بوسیله الگوریتم ژنتیک، لوله کامپوزیتی آلومینیوم-مس با مسیر بهینه شکل ۷ و توسط ماشین هیدروفرمینگ نشان داده شده در شکل ۸ تولید شد.

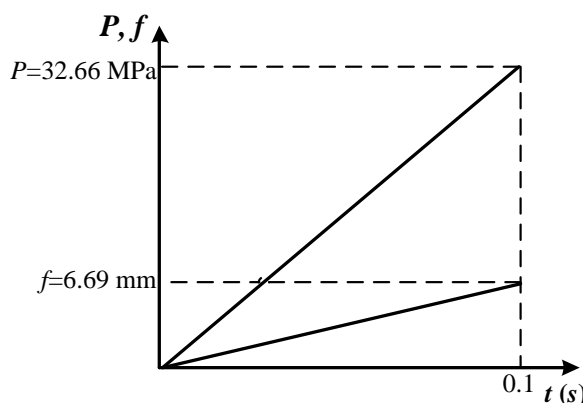


Fig 7 Optimal loading paths in two-layered hydroforming process

شکل ۷ مسیر بهینه بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ دولایه

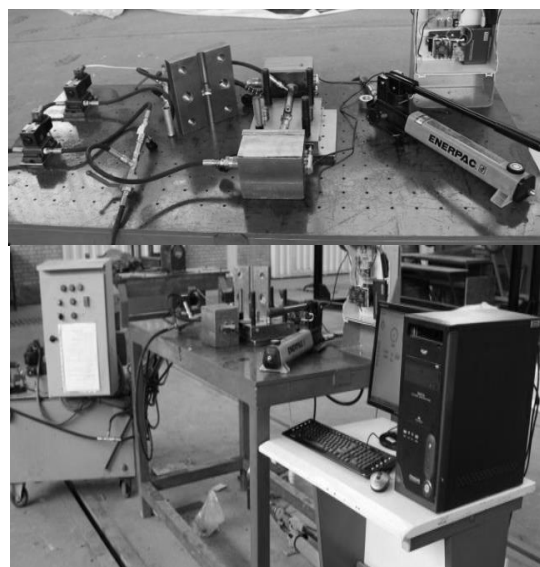


Fig 8 Advanced Tube Hydroforming Machine with Computer control

شکل ۸ ماشین پیشرفته هیدروفرمینگ لوله با کنترل کامپیوتری

پس از انجام آزمایش با مسیر بارگذاری بهینه به‌دست آمده، مشخص شد که نتایج بهینه‌سازی دقت خوبی داشته و قطعه بهینه با کیفیت مطلوب، توزیع ضخامت مناسب و بدون چروکیدگی و پارگی مطابق شکل ۹ شکل‌دهی شد.

- Algorithm, *Procedia Engineering*, Vol. 10, No. 0, pp. 3012-3019, 2011 .
- [20] Z. Yong, L. C. Chan, W. Chunguang, W. Pei, Optimization for Loading Paths of Tube Hydroforming Using a Hybrid Method, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 24, No. 6, pp. 700-708, 2009 .
- [21] S. S. Rao, S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*, John Wiley & Sons, 2009.
- [22] K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi, *Modern heuristic optimization techniques*, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008 .
- [23] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137-143, 2004 .
- [24] K. Socha, M. Dorigo, Ant colony optimization for continuous domains, *European journal of operational research*, Vol. 185, No. 3, pp. 1155-1173, 2008 .
- [6] F. Liu, J. Zheng, P. Xu, M. Xu, G. Zhu, Forming mechanism of double-layered tubes by internal hydraulic expansion, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, No. 7, pp. 625-633, 2004 .
- [7] A. Alaswad, A. Olabi, K. Benyounis, Integration of finite element analysis and design of experiments to analyse the geometrical factors in bi-layered tube hydroforming, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 838-850, 2011.
- [8] S. Seyedkashi, G. H. Liaghat, H. M. Naeini, S. Mahdavian, M. Hoseinpour Gollo, Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process, in *Proceeding of, Trans Tech Publ*, pp. 102-107, 2011 .
- [9] S. H. Seyedkashi, V. Panahizadeh, H. Xu, S. Kim, Y. H. Moon, Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 169-175, 2013 .
- [10] A. J. Aghchai, M. Shakeri, B. Mollaei-Dariani, Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 9, pp. 1131-1138, 2008 .
- [11] M. R. Morovvati, B. Mollaei-Dariani, M. H. Asadian-Ardakani, A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 13, pp. 1738-1747, 10/1/, 2010 .
- [12] E. Karajibani, A. Fazli, R. Hashemi, Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 80, No. 1, pp. 113-121, 2015 .
- [13] E. Karajibani, R. Hashemi, M. Sedighi, Determination of forming limit curve in two-layer metallic sheets using the finite element simulation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 2015 .
- [14] Karajibani, E. Hashemi, R. and Sedighi, M., "Experimental determination of forming limit diagram in Aluminum-Copper two-layer metallic sheets", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 45-50, 2016.
- [15] N. Abedrabbo, M. Worswick, R. Mayer, I. van Riemsdijk, Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 1, pp 110-123, 2009 .
- [16] T. Intarakumthornchai, Y. Aue-U-Lan, R. Kesvarakul, S. Jirathearanat, Feasible pressure and axial feed path determination for fuel filler tube hydroforming by genetic algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 4, pp. 623-630, April 1, 2015, 2015 .
- [17] B. Teng, K. Li, S. Yuan, Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, No. 5-8, pp. 1079-1086, 2013 .
- [18] M. Mirzaali, S. M. H. Seyedkashi, G. H. Liaghat, H. Moslemi Naeini, K. Shojaee G, Y. H. Moon, Application of simulated annealing method to pressure and force loading optimization in tube hydroforming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 55, No. 1, pp. 78-84, 2012 .
- [19] M. Mirzaali, G. H. Liaghat, H. M. Naeini, S. M. H. Seyedkashi, K. Shojaee, Optimization of Tube Hydroforming Process Using Simulated Annealing

