



## بررسی تجربی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

جواد شهبازی کرمی<sup>۱</sup>، محمد مراد شیخی<sup>۲\*</sup>، کرامت ملک‌زاده فرد<sup>۳</sup> و داود منافعی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۷

### چکیده

تنظیم دقیق پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه، برای تولید محصول سالم و مطابق با مشخصات طراحی، لازم و ضروری است. متأسفانه روابط دقیق و مشخصی برای تعیین پارامترهای این فرآیند وجود ندارد و پارامترهای این فرآیند، از طریق سعی و خطا و تجربه‌ی مهندسیین تولید تعیین می‌شود؛ بنابراین در این مقاله، روش ترکیبی از المان محدود و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین پارامترهای این فرآیند پیشنهاد شده است. برای این کار، ابتدا این فرآیند به صورت المان محدود، مدل‌سازی و صحت این مدل‌سازی با داده‌های تجربی تأیید شده است. سپس از ادغام مدل المان محدود و الگوریتم بهینه‌سازی، جهت تعیین دقیق پارامترهای فرآیند استفاده شده است. در تعیین پارامترهای فرآیند، دو قید عدم تجاوز تغییرات ضخامت (نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی) از حد مجاز تعیین شده و عدم تجاوز تنش ایجاد شده در لوله‌ها از تنش نهایی مواد در نظر گرفته شده است. همچنین مطابقت محصول تولید شده با مشخصات طراحی، به عنوان تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شده است. در این مقاله، پارامترهای اصلی فرآیند هیدروفرمینگ دولایه، یعنی مسیر بارگذاری فشار و پیشروی بهینه شده است. جنس لوله خارجی و داخلی به ترتیب، آلومینیوم و مس است.

**کلمات کلیدی:** فرآیند هیدروفرمینگ؛ هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه؛ بهینه‌سازی مسیر بارگذاری؛ بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

## Experimental Investigation and Optimization of Bi-Layered Tube Hydroforming Process Parameters with Particle Swarm Optimization Algorithm

J. Shahbazi Karami<sup>1</sup>, M. Sheikhi<sup>2,\*</sup>, K. Malekzadeh Fard<sup>3</sup>, D. Manafi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D, Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Prof., Mech. Eng., Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

### Abstract

Determining of exact loading paths for bi-layered hydroforming are very necessary to produce good products that confirmed design specifications. Unfortunately, theoretical formulas don't exist to determine the process parameters. The process parameters were determined by trial-and-error and experiences of process planner. Therefore, a hybrid method of finite element and particle swarm optimization (PSO) was proposed for determining of the bi-layered hydroforming parameters. First, this process was simulated and verified by experimental data. Then, finite element and optimization algorithm were linked and used to determine of exact process parameters. Two constrains, thickness variations and maximum stress, were considered in the optimization process. Also, conformation of the geometrical dimension of the product with the design dimension was considered as a goal function. Pressure and feed loading paths were optimized in this research and both loading paths were assumed to be linear. Also, external and internal tubes materials are aluminium and copper, respectively.

**Keywords:** Hydroforming Process; Bi-layered Tube Hydroforming; Loading Paths; PSO.

## ۱- مقدمه

فرآیند هیدروفرمینگ لوله به دلیل تولید یکپارچه قطعات پیچیده و حذف عملیات جانبی مانند، جوشکاری و مونتاژ، زمان تولید قطعات را کاهش و استحکام آن‌ها را افزایش داده است. در فرآیند هیدروفرمینگ لوله اولیه، با فشار داخلی و پیشروی محوری به درون قالب هدایت شده، شکل محصول نهایی را به خود می‌گیرد. تنظیم این پارامترها برای تولید محصول بدون عیب ضروری است. به‌طور معمول این پارامترها به صورت سعی و خطا تنظیم می‌شوند [۱-۳].

در محیط‌هایی که نیاز به قطعات مقاوم به سایش است، از لوله‌های چندلایه استفاده می‌شود. صنایع هوافضا، کشتی‌سازی و دستگاه‌های سرمایشی، مهم‌ترین صنایعی هستند که از لوله‌های چندلایه استفاده می‌کنند [۴].

از جمله پژوهش‌هایی که در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های چندلایه انجام شده، می‌توان به لی‌یو و همکاران [۵] اشاره کرد که در آن به نحوه شکل‌دهی لوله‌های دولایه در فرآیند هیدروفرمینگ لوله پرداخته، روابط تنش و کرنش لوله‌های دولایه به دست آمده است. اسلام و همکاران [۶]، روی امکان‌سنجی تولید لوله‌های دولایه در فرآیند هیدروفرمینگ لوله مطالعه کرده‌اند. آن‌ها برای این کار از شبیه‌سازی المان محدود و داده‌های تجربی استفاده کرده‌اند و نشان دادند که امکان تولید لوله‌های دولایه به روش هیدروفرمینگ وجود دارد.

شهبازی کرمی و همکاران [۷]، به مقایسه‌ی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های تک‌لایه، دولایه و سه لایه به کمک شبیه‌سازی المان محدود پرداخته‌اند. السواد و همکاران [۸]، فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه را به کمک المان محدود و پاسخ سطح بررسی کرده، از داده‌های تجربی برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده استفاده کرده‌اند. سیدکاشی و همکاران [۹]، فرآیند هیدروفرمینگ دولایه را با شرایط روان‌کاری متفاوت مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای بررسی از روش المان محدود استفاده و نتایج به دست آمده را با داده‌های تجربی آزمایش کرده‌اند و نشان دادند که شرایط روان‌کاری مناسب برای تولید محصول با کیفیت لازم است. سیدکاشی و همکاران [۴]، فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه را به صورت تئوری، مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها معادلات مربوط به تعیین فشار ترکیبگی و چین‌خوردگی را

به دست آورده‌اند؛ همچنین روابط تئوری به دست آمده را با داده‌های تجربی مقایسه و درستی روابط را نشان دادند. شهبازی و همکاران [۱۰]، شکل‌دهی با گاز لوله‌های دولایه مس-آلومینیوم را بررسی کرده‌اند.

پژوهش‌های دیگری نیز، روی بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله تک‌لایه (مسیر بارگذاری فشار و پیشروی) انجام شده است که می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۱۱، ۱۲]، منطق فازی [۱۳]، الگوریتم تیریدی [۱، ۱۴]، روش‌های ترکیبی [۱۵] و دیگر روش‌ها [۱۶، ۱۷] اشاره کرد. در این الگوریتم‌ها، پارامترهای فشار داخلی و پیشروی محوری بهینه‌سازی شده‌اند و مسیر بارگذاری خطی فرض شده است. با وجود اینکه روی تأثیر پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه روی کیفیت نهایی لوله تولید شده بحث شده است؛ ولی تاکنون روشی برای تعیین حالت بهینه پارامترها بیان نشده است. از این رو در این مقاله، به تعیین بهینه مسیرهای بارگذاری فشار و پیشروی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه پرداخته شده است. برای این کار، فرآیند به صورت یک مسئله مقید در نظر گرفته شده، از ترکیب مدل‌سازی المان محدود و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به تعیین پارامترهای فرآیند هیدروفرمینگ لوله پرداخته شده است؛ همچنین مسیر بارگذاری فشار و پیشروی خطی فرض شده است.

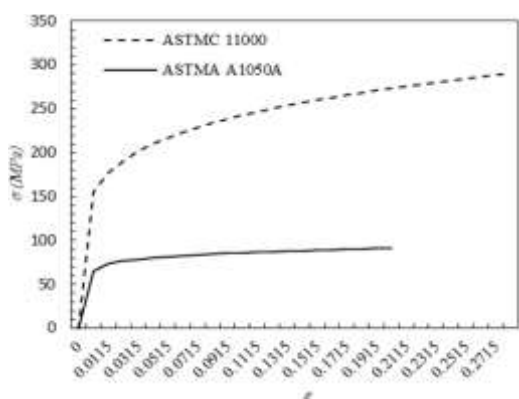
## ۲- مدل‌سازی المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه

ابعاد نهایی لوله‌ها در شکل ۱-الف آورده شده است که باید از طریق فرآیند هیدروفرمینگ تولید شود؛ همچنین مدل فرآیند شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، در شکل ۱-ب نشان داده شده است. در این فرآیند، جنس لوله بیرونی و درونی به ترتیب، آلومینیوم ASTM A1050A و مس ASTM C11000 است؛ همچنین ضخامت لوله‌های بیرونی و درونی به ترتیب، ۱ و ۰/۸ میلی‌متر است. ویژگی‌های مواد استفاده شده توسط آزمایش کشش لوله‌ها در آزمایشگاه خستگی و شکست دانشگاه شهید رجایی انجام و نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است.

مدل المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در این مدل‌سازی به دلیل

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی آلومینیوم و مس

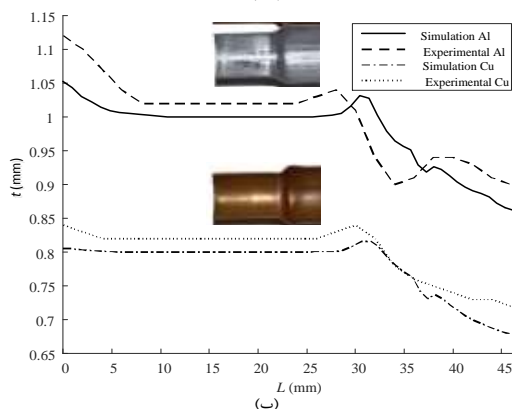
مس	آلومینیوم	
۱۳۰	۶۵	تنش تسلیم، $\sigma_y$ (MPa)
۲۹۰	۹۹	تنش نهایی، $\sigma_{UTS}$ (MPa)
۸۵	۷۰	مدول الاستیسیته، E (GPa)
۰/۳۲	۰/۳	ضریب پواسون، $\nu$
۲۹	۳۲	درصد ازدیاد طول،
۳۶۵	۱۰۵	ضریب استحکام، k (Mpa)
۰/۱۸۵	۰/۰۹	توان سختی، n
۸/۹	۲/۷	چگالی، $\rho$ ( $g/cm^3$ )



شکل ۲- نمودار تنش- کرنش آلومینیوم و مس



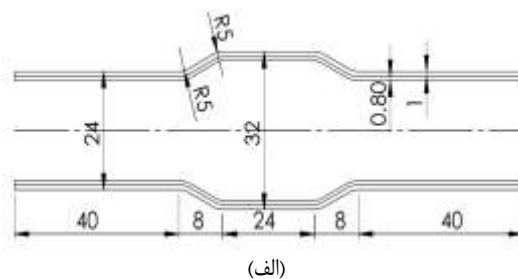
(الف)



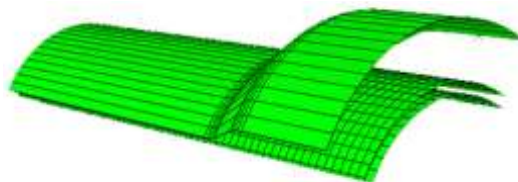
شکل ۳- نتایج تجربی و المان محدود؛ (الف) لوله کامپوزیتی و (ب) مقایسه توزیع ضخامت در لوله‌ها

وجود تقارن، یک هشتم قالب و لوله‌ها مدل‌سازی شده است. با این کار، دقت و سرعت حل مدل‌سازی افزایش می‌یابد. لوله‌ها به صورت المان پوسته‌ای و قالب به صورت جسم صلب مدل‌سازی شده است. نوع تماس سطح به سطح و ضریب اصطکاک بین اصطکاک بین قالب و ورق بیرونی ۰/۱ و ضریب اصطکاک بین ورق‌ها ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. نوع حل نیز، دینامیکی و صریح است. اندازه مش، از طریق همگرایی ضخامت لوله‌ها تعیین شده که مقدار آن ۱ است.

آزمایش تجربی برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده انجام شده است. قطعه‌کار تولید شده به همراه برش وایرکات آن، در شکل ۳-الف آورده شده است. برای صحت‌سنجی، توزیع ضخامت به دست آمده از قطعه‌کار آزمایش شده با توزیع ضخامت المان محدود مقایسه شده است. توزیع ضخامت‌های تجربی و المان محدود، در شکل ۳-ب نشان داده شده است. در این شکل به دلیل تقارن، اندازه‌گیری ضخامت از ابتدای لوله تا وسط آن انجام گرفته و با توزیع ضخامت المان محدود مقایسه شده است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری با کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام شده است. روند توزیع ضخامت، دقیقاً مشابه روند توزیع ضخامت المان محدود است و بیشترین خطای آن ۰/۵٪ است. با توجه به قابل قبول بودن خطای مدل شبیه‌سازی شده، از این مدل برای بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- ابعاد لوله‌ها و مدل المان محدود؛ (الف) ابعاد هندسی لوله‌ها و (ب) مدل المان محدود

## ۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، با الهام از رفتار اجتماعی زنبور، ماهی و یا دسته پرنندگان ابداع شده است؛ به طوری که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، رفتار این جوامع را تقلید می‌کند. این الگوریتم برای اولین توسط کندی و ابرهات، در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است. برای بهینه‌سازی یک فرآیند، ابتدا فضای جستجو و تابع هدف (منبع غذا) مشخص می‌شود. سپس ذرات در فضای جستجو به طور کاملاً تصادفی پخش می‌شوند. هر ذره (که حکم یک ماهی یا زنبور را دارد)، دارای دو ویژگی است: موقعیت و سرعت. بعد از پخش شدن ذرات، هر ذره موقعیت و مقدار تابع هدف خود را با دیگر اعضا در میان می‌گذارد. سپس موقعیت بهترین ذره شناسایی و براساس آن، ذرات با سرعت مشخصی به موقعیت جدید هدایت می‌شوند. مقدار و راستای سرعت حرکت هر ذره، وابسته به سرعت قبلی، فاصله ذره از بهترین موقعیت کشف شده و غیره است [۱۸، ۱۹].

اگر شماره ذره‌ها با  $J$  و مرحله الگوریتم با  $i$  نشان داده شود؛ روند کلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بدین صورت است:

- ۱- ابتدا  $N$  ذره در نظر بگیر.
- ۲- متغیرهای تصمیم تصادفی را برای  $N$  ذره در نظر بگیر.
- ۳- تابع هدف هر یک از ذرات را حساب کن.
- ۴- سرعت اولیه ذرات را صفر در نظر بگیر.
- ۵-  $i=1$ .
- ۶- برای مرحله  $i$ ام مراحل  $a$  تا  $j$  را انجام بده
  - ا. بهترین موقعیتی که تا به حال هر ذره تجربه کرده است را در  $P_{best,j}$  ذخیره کن (بهترین موقعیت ذره مکانی است که آن ذره در آن مکان بیشترین تابع هدف را داشته است).
  - ب. بهترین ذره را در کل جمعیت شناسایی و آن را در  $G_{best}$  ذخیره کن.
  - ت. سرعت هر ذره  $j$ ام را طبق رابطه ۱ تعیین کن.

$$V_j(i) = V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_{j(i-1)}] + c_2 r_2 [G_{best} - X_{j(i-1)}] \quad (1)$$

در آن  $c_1$  و  $c_2$ ، ضرایب نرخ یادگیری شخص و جامعه است.  $r_1$  و  $r_2$ ، عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است.

ث. موقعیت بعدی هر یک از ذرات را طبق رابطه ۲ حساب کن

$$X_j(i) = X_j(i-1) + V_j(i) \quad (2)$$

ج. تابع هدف هر یک از ذرات را طبق موقعیت جدید حساب کن.

۷- در صورتی که شرط همگرایی ارضاء نشده باشد،  $i=i+1$  کن و به مرحله ۵ برو؛ در غیر این صورت برنامه رو تمام کن.

در این مقاله، هر دو نرخ یادگیری شخص و جامعه در ۱/۴۹۶۲ در نظر گرفته شده است [۲۰].

## ۴- روند کلی بهینه‌سازی فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های دولایه

زمانی می‌توان از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مثل، ازدحام ذرات به بهینه‌سازی فرآیند پرداخت که با دادن هر مقدار از متغیرهای تصمیم (در محدود تعیین شده است)، مقدار تابع هدف فرآیند تعیین شود. از این رو لازم است، فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های دولایه مدل‌سازی المان محدود شود تا هر زمانی که لازم شد، از طریق الگوریتم بهینه‌سازی فراخوانی شده، با دادن مسیرهای بارگذاری، تابع هدف متناسب با آن گزارش شود.

متغیرهای فرآیند که باید بهینه‌سازی شوند؛ متغیرهای هستند که علاوه بر اینکه روی فرآیند تأثیر به سزایی دارند، باید قابل کنترل نیز باشند. مسیرهای بارگذاری فشار داخلی و پیشروی محوری دو پارامتر، مهم و قابل کنترل در فرآیند هیدروفورمینگ لوله‌های دولایه است. از این رو این دو پارامتر، به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند.

تابع هدف (تابع هزینه) بهینه‌سازی، باید متناسب با نوع فرآیند تعیین شود تا در نهایت محصولی سالم و بدون عیب تولید شود. از آنجایی که ابعاد نهایی لوله‌ها بسیار مهم است، تابع هدف مطابقت ابعاد لوله‌های تولید شده با محصول طراحی شده در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مقدار تابع هدف بدین صورت تعیین می‌شود که بعد از اجرای مدل المان محدود، فاصله سطوح لوله‌ها از سطح داخلی قالب محاسبه

المان محدود فرآیند توسط الگوریتم بهینه‌سازی فراخوانی شده، مدل المان محدود با مسیرهایی اجرا می‌شود که به ذره مورد نظر نسبت داده شده است. بعد از اجراء المان محدود فرآیند، بیشترین تنش و درصد تغییر ضخامت لوله‌ها حساب شده، در صورتی که این موارد از حد مجازشان تجاوز نکرده باشند؛ تابع هدف آن حساب شده، به الگوریتم بازگردانده می‌شود؛ در صورتی که تنش و درصد نازک‌شدگی از حد مجازشان تجاوز کرده باشند، آنگاه موقعیت ذره قابل قبول نبوده، الگوریتم بهینه‌سازی موقعیت جدید برای آن حساب می‌کند.

### ۵- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد در این مقاله، مسیره‌های بارگذاری فشار و پیشروی بهینه‌سازی می‌شوند. تعیین یک محدوده برای این متغیرها، سبب عملکرد بهتر الگوریتم بهینه‌سازی می‌شود. از این رو از طریق روابط تئوری کران بالا و پایین برای فشار و پیشروی به ترتیب، [۱۵، ۶۰] مگاپاسکال و [۱۳، ۱] میلی‌متر تعیین شده است [۲۱]. قیود بهینه‌سازی تضمینی بر نداشتن عیوب ترکیدگی، نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی در لوله‌های شکل داده شده است. از این رو در این مقاله، 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 ۱) و در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری، ۲۵٪ انتخاب شده است.

می‌شود و بیشترین فاصله به عنوان مقدار تابع هدف گزارش می‌شود که کمینه شدن این مقدار مطلوب است. در واقع هر چقدر تابع هدف کم‌تر باشد، لوله‌ها با سطح داخلی قالب چسبیده و مطابقت بیشتری با ابعاد نهایی طراحی دارد. تابع هدف طبق رابطه ۳ تعیین می‌شود:

$$F = \max(S) \quad (3)$$

در آن مجموعه S، فاصله عمودی تمام گره‌های روی سطح خارجی لوله‌ها تا سطح داخلی قالب است.

قیدهای الگوریتم بهینه‌سازی، عدم تجاوز تغییرات ضخامت (نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی)، از حد مجاز تغییرات ضخامت تعیین شده ( $TH_{all}$ ) و عدم تجاوز بیشترین تنش ( $\sigma_{max}$ )، از تنش مجاز مواد ( $\sigma_{all}$ ) تعریف شده است. با قیدهای در نظر گرفته شده این اطمینان به عمل می‌آید که محصول تولید شده عیوبی هم چون نازک‌شدگی، پارگی و چین‌خوردگی ندارد.

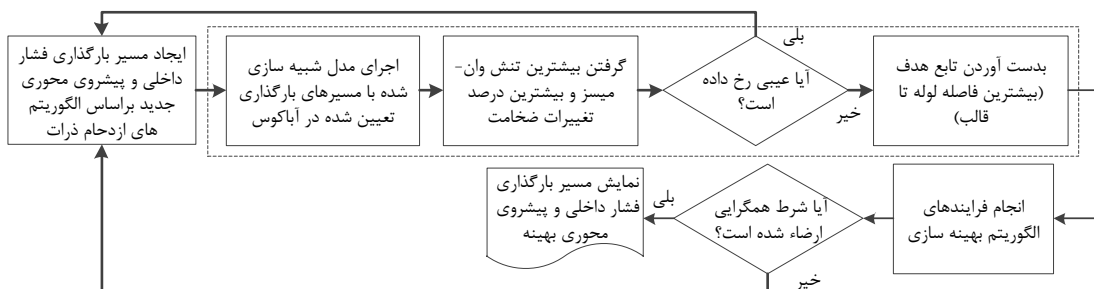
روابط کلی بهینه‌سازی در رابطه‌ی ۴ آورده شده است که در آن t و  $t_0$ ، ضخامت لوله‌ها و ضخامت اولیه است.

$$\text{Object Function} = \min\{F\}$$

$$\text{subject to: } \sigma_{max} \leq \sigma_{all} \ \& \ \frac{|t - t_0|}{t_0} \leq TH_{all} \quad (4)$$

شرط همگرایی برای متوقف کردن و پایان دادن به روند بهینه‌سازی، لازم و ضروری است. در این مقاله، شرط همگرایی بدین صورت تعریف شده است که اگر بعد از سه بار حرکت دادن کل ذرات، جواب بهینه به دست آمده عوض نشود؛ آنگاه بهینه‌سازی متوقف و جواب نمایش داده می‌شود.

نحوه یکپارچه‌سازی مدل المان محدود با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، در شکل ۴ آورده شده است. روند کلی ترکیب المان محدود و الگوریتم بهینه‌سازی، بدین صورت است که برای تعیین مقدار تابع هدف هر ذره، مدل



شکل ۴- فلوچارت ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و نرم افزار المان محدود برای تعیین مسیره‌های بارگذاری

آن وجود دارد که با اجرای دوباره، جواب بهینه خوبی تولید نشود.

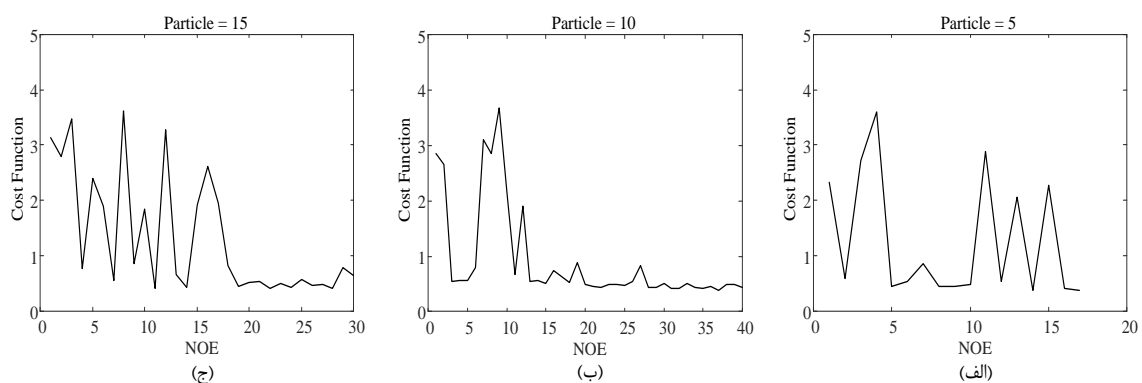
برای اینکه عمل جستجو به خوبی صورت گیرد، لازم است که محدودیتی برای مقدار سرعت ذرات در نظر گرفته شود. اعمال محدودیت سرعت بدین صورت است که ابتدا ضریب کنترل سرعت مثلاً  $0/1$  در نظر گرفته می‌شود و سرعت حرکت ذرات نباید بیشتر از حاصل ضرب ضریب کنترل در بازه تغییرات متغیر مورد مطالعه باشد. برای آنکه بتوان این محدودیت سرعت را نیز مورد بررسی قرار داد، سه عدد متفاوت  $0/1$ ،  $0/5$  و  $1$  برای این ضریب در نظر گرفته شده است. ضریب یک به معنای عدم اعمال محدودیت سرعت است.

نتایج حاصل از اعمال این محدودیت‌ها، در شکل ۶ آورده شده است. در شکل ۶، تعداد ذره ۱۰ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال ضریب کنترل سرعت  $0/1$  الگوریتم عملکرد خوبی دارد؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با تعداد ذره ۱۰ و ضریب کنترل سرعت  $0/1$ ، به خوبی به جواب بهینه فرآیند همگرا می‌شود.

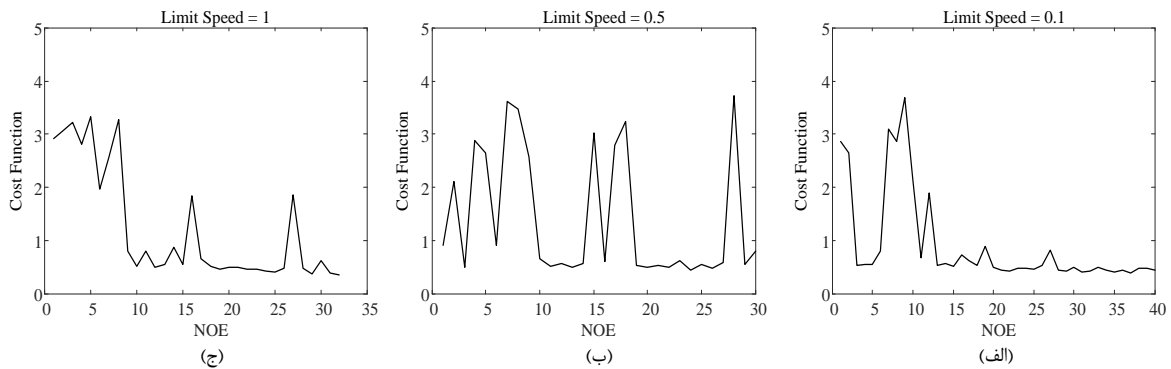
مسیر بهینه به دست آمده برای بارگذاری مسیر پیشروی محوری و فشار داخلی در شکل ۷ نشان داده شده که از طریق الگوریتم ازدحام ذرات به دست آمده است. در این الگوریتم، تعداد ذره ۱۰ و ضریب کنترل سرعت  $0/1$  است.

دو پارامتر مهم در عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پارامترهای تعداد ذرات و سرعت حرکت است. عموماً این پارامترهای متناسب با فرآیند مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. برای تنظیم این پارامترها در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه، تعداد ذرات ۵، ۱۰ و ۱۵ در نظر گرفته شده است. نمودارهای همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات متناسب با هر یک از ذرات در شکل ۵ آورده شده است. در این نمودارها تابع هدف، برحسب تعداد دفعات فراخوانی تابع هدف ترسیم شده‌اند [۲۲].

همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم در هر سه حالت به جواب قابل قبولی از نظر مقدار تابع هدف رسیده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ازدحام ذرات با هر یک از ذرات به جواب بهینه خوبی دست خواهد یافت با این تفاوت که وقتی تعداد ذرات ۵ است، الگوریتم هنوز همگرا نشده است؛ بنابراین در این حالت، احتمال این امر وجود دارد که با اجرای دوباره برنامه با این تعداد ذرات، جواب بهینه خوبی حاصل نشود. این در حالی است که الگوریتم با تعداد ذرات ۱۰ به بالا همگرا شده است. همگرا شدن الگوریتم بدین معناست که تمام ذرات به نقطه بهینه رسیده‌اند و کار جستجو به اتمام رسیده است. زمانی که الگوریتم هنوز همگرا نشده است، بدین معناست که هنوز کار جستجو برای یافتن جواب بهینه ادامه دارد و اگر نقاطی با تابع هدف بهتر تولید شده است، به دلیل ماهیت تصادفی بودن الگوریتم است و امکان



شکل ۵- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ذرات متفاوت (الف) ۵ ذره، (ب) ۱۰ ذره و (ج) ۱۵ ذره



شکل ۶- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی با سرعت کنترل متفاوت الف) محدودیت ۰/۱، ب) محدودیت ۰/۵ و ج) بدون محدودیت

که مشاهده می‌شود، با مسیر بهینه، توزیع ضخامت بهتری حاصل شده است و ضخامت قسمت بالچ شده لوله، اختلاف کمتری با قسمت بالچ نشده‌ی لوله نسبت به حالت غیربهینه دارد.

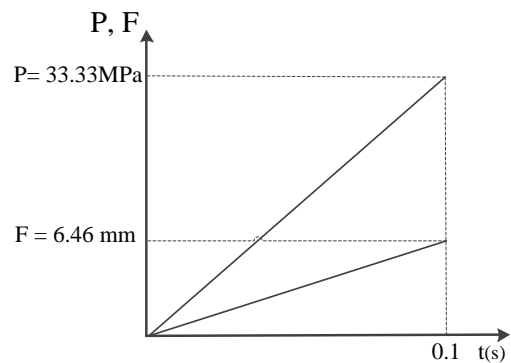


الف)



ب)

شکل ۸- ماشین هیدروفرمینگ و لوله کامپوزیتی الف) ماشین هیدروفرمینگ و ب) لوله کامپوزیتی



شکل ۷- مسیر بهینه بارگذاری فشار و پیشروی

با این مسیر بارگذاری، بیشترین فاصله ایجاد شده از سطح داخلی قالب و سطح بیرونی لوله‌ها بعد از شکل‌دهی، ۰/۳۸۴۶ میلی‌متر است. لازم به ذکر است که این مقدار، بیشترین فاصله یک گره است و در تمام گره‌های دیگر، فاصله از این مقدار کمتر است. با این مسیرها، بیشترین درصد تغییر ضخامت برای آلومینیوم و مس به ترتیب، ۱۴/۸۲ و ۱۰/۳۱ درصد و همچنین بیشترین تنش ایجاد شده برای آلومینیوم و مس به ترتیب، ۹۱ و ۲۸۹ مگاپاسکال است.

لوله کامپوزیتی فلزی با مسیرهای فشار داخلی و پیشروی محوری بهینه به دست آمده از روش پیشنهادی از طریق ماشین هیدروفرمینگ نشان داده شده در شکل ۸-الف تولید شده است. بعد از تولید لوله کامپوزیتی فلزی (شکل ۸-ب) برش وایرکات شده، توزیع ضخامت و میزان چسبیدگی فلزها به یکدیگر، مورد مطالعه قرار گرفته است.

توزیع ضخامت در لوله کامپوزیتی تولید شده با مسیر بهینه و غیربهینه، در شکل ۹-الف آورده شده است. همان‌طور

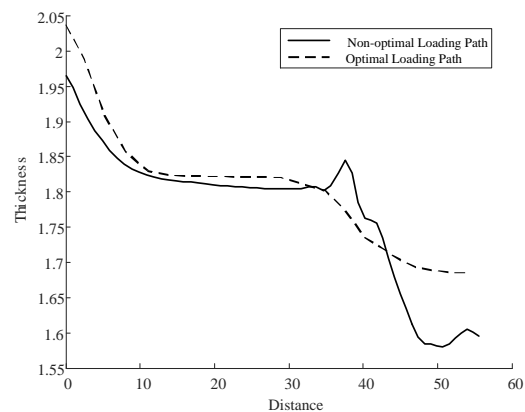
### ۶- نتیجه‌گیری

لوله‌های دولایه کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله، هوافضا و کشتی‌سازی دارند که با استفاده از روش هیدروفرمینگ تولید می‌شوند. یکی از مشکلات فرایند هیدروفرمینگ، تعیین دقیق پارامترهای آن است. از این رو در این مقاله، ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و المان محدود برای تعیین مسیر بارگذاری فشار و پیشروی پیشنهاد شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی با تعداد ذره ۱۰ و ضریب کنترل سرعت ۰/۱، بهترین عملکرد را داشته و بهتر است از این مقادیر برای بهینه‌سازی استفاده شود. لوله‌ی کامپوزیتی با مسیرهای بهینه پیدا شده تولید و مشاهده شد که با این مسیرهای بارگذاری، توزیع ضخامت بهتر می‌شود. همچنین دو فلز به خوبی به هم متصل و یک لوله واحد را تشکیل داده، عیوبی هم چون چین‌خوردگی و پارگی ندارد. لازم به ذکر است که در این الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف، مطابقت با محصول نهایی و قیدهای الگوریتم، حداکثر تنش و درصد تغییرات ضخامت است.

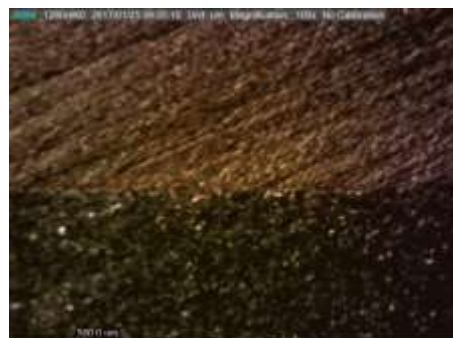
### ۷- مراجع

- [1] Mirzaali M, Seyedkashi SMH, Liaghat GH, Moslemi Naeni H, Shojaee K, Moon YH (2012) Application of simulated annealing method to pressure and force loading optimization in tube hydroforming process. *Int J Mech Sci* 55(1): 78-84.
- [2] Aydemir A, de Vree JHP, Brekelmans WAM, Geers MGD, Sillekens WH, Werkhoven RJ (2005) An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes. *J Mater Process Technol* 159(3): 303-310.
- [3] Hartl C (2005) Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming. *J Mater Process Technol* 167(2-3): 383-392.
- [4] Seyedkashi SH, Panahizadeh V, Xu H, Kim S, Moon YH (2013) Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification. *J Mech Sci Technol* 27(1): 169-175.
- [5] Liu F, Zheng J, Xu P, Xu M, Zhu G (2004) Forming mechanism of double-layered tubes by internal hydraulic expansion. *Int J Pres Ves Pip* 81(7): 625-633.
- [6] Islam M, Olabi A, Hashmi M (2006) Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation. *J Mater Process Technol* 174(1): 394-398.

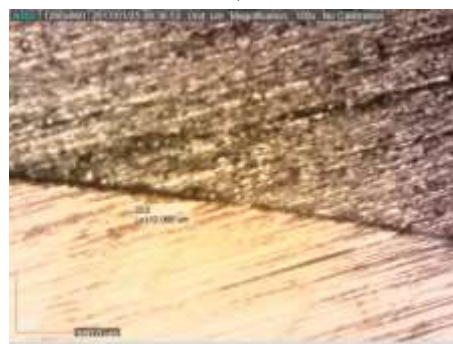
در شکل ۹-ب و ج، عکس میکروسکوپی بین دو لوله آورده شده است. این عکس‌ها با بزرگنمایی ۱۰۰ گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قسمت بالج (شکل ۹-ب) دو فلز کاملاً در تماس با یکدیگر قرار دارند و فاصله‌ی بین آن‌ها وجود ندارد. در قسمت بالج نشده (ابتدای لوله) نیز، بیشترین فاصله‌ی بین دو فلز ۱۱۲ میکرومتر است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- بررسی نتایج لوله کامپوزیتی (الف) مقایسه توزیع ضخامت، (ب) عکس میکروسکوپی از قسمت بالج و (ج) عکس میکروسکوپی از قسمت بالج نشده



- [14] Mirzaali M, Liaghat GH, Naeini HM, Seyedkashi SMH, Shojaee K (2011) Optimization of Tube Hydroforming Process Using Simulated Annealing Algorithm. *Procedia Eng* 10(0): 3012-3019.
- [15] Yong Z, Chan LC, Chunguang W, Pei W (2009) Optimization for Loading Paths of Tube Hydroforming Using a Hybrid Method. *Mater Manuf Process* 24(6): 700-708.
- [16] Huang T, Song X, Liu X (2016) The multi-objective robust optimization of the loading path in the T-shape tube hydroforming based on dual response surface model. *Int J Adv Manuf Tech* 82(9):1595-1605.
- [17] Ge Yl, Li Xx, Lang Lh, Ruan Sw (2017) Optimized design of tube hydroforming loading path using multi-objective differential evolution. *Int J Adv Manuf Tech* 88(1): 837-846.
- [18] Clerc M (2010) Particle swarm optimization. John Wiley & Sons.
- [19] Rao SS, Rao S (2009) Engineering optimization: theory and practice. John Wiley & Sons.
- [20] Clerc M, Kennedy J (2002) The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Trans Evolut Comput* 6(1): 58-73.
- [21] Aue-U-Lan YY, Ngaile GG, Altan TT (2004) Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification. *J Mater Process Technol* 146(1): 137-143.
- [22] Socha K, Dorigo M (2008) Ant colony optimization for continuous domains. *Eur J Oper Res* 185(3): 1155-1173.
- [7] Payganeh G, Shahbazi J, Malekzadeh K (2013) Finite element comparison of single, bi-layered and three-layered tube hydroforming processes. *Jcarne* 2(2): 69-80.
- [8] Alaswad A, Olabi A, Benyounis K (2011) Integration of finite element analysis and design of experiments to analyse the geometrical factors in bi-layered tube hydroforming. *Mater Des* 32(2): 838-850.
- [9] Seyedkashi S, Liaghat GH, Naeini HM, Mahdavian S, Hoseinpour Gollo M (2009) Numerical and experimental study of two-layered tube forming by hydroforming process. *Proc Trans Tech Publ* 102-107.
- [10] Hoseinipour SJ, Kargar Pishbijari H, Shahbazi Karami J (2016) Experimental Comparison of the Formability of Single-layer Aluminium Tubes and two-layer Copper-Aluminium Tubes in the Hot Gas Blow Forming Process. *SME* 2(2): 36-46.
- [11] Abedrabbo N, Worswick M, Mayer R, van Riemsdijk I (2009) Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification. *J Mater Process Technol* 209(1): 110-123.
- [12] Intarakumthornchai T, Aue-U-Lan Y, Kesvarakul R, Jirathearnat S (2015) Feasible pressure and axial feed path determination for fuel filler tube hydroforming by genetic algorithm. *P I Mech Eng B-J Eng* 229(4): 623-630.
- [13] Teng B, Li K, Yuan S (2013) Optimization of loading path in hydroforming T-shape using fuzzy control algorithm. *Int J Adv Manuf Tech* 69(5-8): 1079-1086.