

مطالعه عددی و تجربی اثر نسبت انبساط، شعاع گوشه و نرخ کرنش در فرایند هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی

سیدمحمدحسین سیدکاشی^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*}، غلامحسین لیاقت^۳، محمود موسوی مشهدی^۴، یانگ هون مون^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
۴- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی پوسان، بوسان، کره جنوبی
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، moslemi@modares.ac.ir

چکیده- فرایند هیدروفرمینگ گرم آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل وجود استانداردهای سختگیرانه آلاینده‌گی و لزوم صرفه‌جویی در مصرف سوخت بسیار مورد توجه صنعت خودروسازی مدرن قرار گرفته است. عیب اصلی این آلیاژها شکل‌پذیری پایین آنها در دمای اتاق می‌باشد که با بالا بردن دمای فرایند تا زیر دمای تبلور مجدد فلز می‌توان آن را تا حد قابل توجهی افزایش داد. به دلیل پیچیدگی فرایند در دمای بالا، کنترل عوامل مختلف موثر در شکل‌دهی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مقاله، اثر ابعاد لوله، شعاع گوشه و نرخ کرنش بر میزان فشار داخلی بهینه و جابجایی محوری مورد نیاز برای شکل‌دهی موفقیت‌آمیز محصول در هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی ۶۰۶۱ در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفته است. روش جدیدی بر اساس الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده برای بهینه‌سازی منحنی‌های بارگذاری فشار و نیروی محوری تدوین شده است. نتایج عددی با آزمایش‌های تجربی مورد بحث، تأیید و صحت‌سنجی قرار گرفته است.
کلیدواژگان: هیدروفرمینگ گرم لوله، بازپخت شبیه‌سازی شده، مسیر بارگذاری، فشار داخلی، جابجایی محوری.

Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes

S.M.H. Seyedkashi¹, H. Moslemi Naeni^{2*}, G.H. Liaghat², M. Mosavi Mashadi³, Y.H. Moon⁴

1- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- Prof. of Mech. Eng., Tehran Univ, Tehran, Iran

4- Prof. of Mech. Eng., Pusan National Univ., Busan, South Korea

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. moslemi@modares.ac.ir

Abstract- Due to the strict emission standards and fuel consumption restrictions, automotive industry is greatly interested in warm tube hydroforming of aluminum and magnesium alloys. The main shortcoming of these alloys is their inferior formability at room temperature, which can be improved by forming at temperatures below the recrystallization temperature. Because of the complex nature of forming at high temperatures, the proper determination and control of forming parameters are very important in fulfillment of the process. In this paper, the effects of tube geometry, bulge height, corner fillets and strain rate are investigated on optimal internal pressure and axial feeding loading paths, which are required for successful hydroforming of annealed AA6061 tubes at 300 °C. A new approach based on simulated annealing algorithm is developed for optimization of pressure and feed loading paths. Numerical results are discussed, verified and validated by experiments. A good agreement is observed between numerical and experimental results.

Keywords: Warm Tube Hydroforming, Simulated Annealing, Loading Path, Internal Pressure, Axial Feeding.

۱- مقدمه

کیم و همکارانش (۲۰۰۷) برای ارزیابی اثر تغییر شکل پلاستیک و توزیع دما روی شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در فرایند هیدروفرمینگ، به شبیه‌سازی ترمومکانیکی کوپل این فرایند پرداختند [۶]. یی و همکارانش (۲۰۰۸) یک سیستم حرارتی ترکیبی به‌صورت القایی و الکتریکی ابداع و آزمایش کردند [۷]. هوانگ و همکارانش (۲۰۱۰) نیز به بررسی هیدروفرمینگ آلیاژ منیزیم AZ۶۱ در تولید یک قطعه سهرامی پرداختند و بارگذاری‌های مختلف را برای حصول شاخه با ارتفاع‌های متفاوت آزمودند [۸].

تعیین و کنترل دقیق عوامل تأثیرگذار در فرایند از قبیل بارگذاری فشار و جابجایی محوری نقش کلیدی در موفقیت فرایند ایفا می‌کند [۹]. در این مقاله با استفاده از روش جدیدی به نام بازپخت شبیه‌سازی شده^۱، مقادیر بهینه فشار و نیروی محوری در نرخ کرنش‌های متفاوت به دست آمده‌اند. روش بکار رفته به‌طور کامل تشریح شده، و با اعمال منحنی‌های بارگذاری بهینه، اثر ابعاد قطعه خصوصاً ضخامت اولیه (t)، شعاع گوشه (r) و ارتفاع برآمدگی بر توزیع ضخامت به‌صورت عددی و تجربی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- بهینه‌سازی فرایند

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده برای تولید یک محصول متقارن با نسبت‌های انبساط (η) ۲۲/۰۵٪، ۲۹/۹۲٪ و ۳۵/۸۳٪ استفاده شده است. شکل ۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره این ماده را در دماهای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد و در سه نرخ متفاوت نشان می‌دهد. در صورت تبدیل این منحنی‌ها به تنش-کرنش مهندسی، مشاهده می‌شود که با افزایش دما، تنش تسلیم و حداکثر استحکام کششی ماده کاهش، ازدیاد طول کلی افزایش و ازدیاد طول یکنواخت کاهش یافته است. اما اثر نرخ کرنش که در دماهای بالا قابل صرف‌نظر نیست، در هر یک از دو حالت متفاوت است. با کاهش نرخ کرنش در دمای ۲۰۰ درجه با افزایش ازدیاد طول کلی و یکنواخت، و در دمای ۳۰۰ درجه با کاهش آنها روبرو هستیم. باید توجه داشت که این مساله با تغییر شکل و ابعاد دانه‌ها در این آلیاژ این‌گونه اثر داشته و در مواد دیگر می‌تواند متفاوت باشد.

هیدروفرمینگ لوله فرایندی نوین است که به خاطر کاربردهای گسترده در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، گسترش بسیار یافته است. شکل حفره قالب با اعمال فشار داخلی توسط سیال به‌همراه تغذیه محوری از دو انتهای لوله توسط جک‌های هیدرولیکی ایجاد می‌شود. به‌دلیل تولید یکپارچه قطعات با مقاطع پیچیده و حذف عملیات جانبی مانند جوشکاری، وزن کلی قطعات کاهش یافته، استحکام بالاتر رفته و زمان تولید کاهش می‌یابد [۱]. استانداردهای سختگیرانه آلاینده‌گی و لزوم کاهش مصرف سوخت خودرو، باعث روی آوردن خودروسازها به استفاده از آلیاژها و مواد سبک وزن در ساختار خودرو شده است. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم با نسبت استحکام به وزن خوب و مقاومت به خوردگی بالا، جایگزین مناسبی برای فولاد در صنعت خودروسازی به شمار می‌روند. اما آلیاژهای آلومینیوم به‌دلیل وجود درصد بالای عناصر آلیاژی، و آلیاژهای منیزیم به‌دلیل ساختار بلوری شش وجهی فشرده که منجر به کاهش تعداد صفحه‌های لغزش می‌شوند، دارای شکل‌پذیری پایینی در دمای اتاق هستند [۲]. راه حل این مشکل، شکل‌دهی این مواد در دماهای بالا، زیر دمای تبلور مجدد فلز، می‌باشد که منجر به شکل‌پذیری بهتر آنها خواهد شد [۳]. هیدروفرمینگ گرم با در داشتن هر دو مزیت استفاده از فرایند نوین هیدروفرمینگ و شکل‌دهی در دمای بالا به عنوان یکی از راهکارهای قابل‌توجه قلمداد می‌شود. کاهش وزن، کم شدن انرژی شکل‌دهی به‌دلیل پایین آمدن استحکام کششی ماده در دماهای بالا و در نتیجه ساده شدن تجهیزات هیدرولیکی از مزیت‌های هیدروفرمینگ گرم می‌باشد.

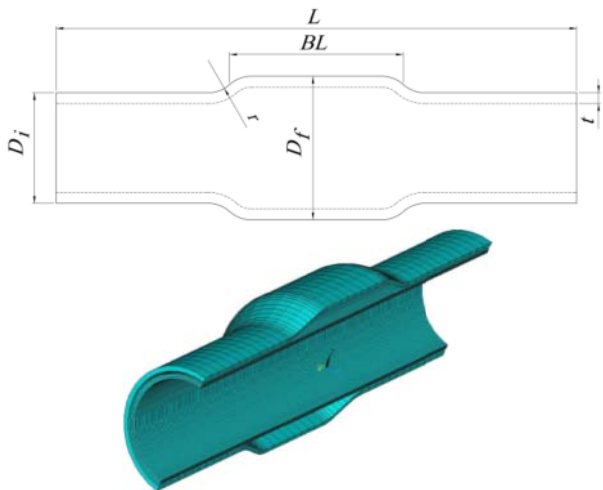
سابقه فرایند هیدروفرمینگ گرم لوله به کمتر از یک دهه قبل باز می‌گردد. لی و همکارانش (۲۰۰۴) تأثیر عملیات حرارتی را روی هیدروفرمینگ گرم لوله‌های آلومینیومی بررسی نمودند [۴]. معیار شکل‌پذیری در این تحقیق شکل نهایی محصول، ازدیاد طول لوله و مقادیر سختی بود. کیگلر و همکارانش (۲۰۰۵) فرایند هیدروفرمینگ گرم لوله و ورق را به عنوان ابزاری برای بالا بردن شکل‌پذیری آلومینیوم مورد بررسی عددی و تجربی قرار دادند [۳]. یوان و همکارانش (۲۰۰۶) شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیومی را با استفاده از هیدروفرمینگ در دمای بالا به‌صورت یک هیدروبالج ساده بررسی کردند [۵].

1. Simulated Annealing

می‌گردد. در انتهای فرایند، سیستم دارای کمترین انرژی ممکن می‌باشد. در الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده فرض می‌شود که سیستم از یک دمای اولیه بالا با انرژی زیاد، به آرامی در حال سرد شدن است. در واقع الگوریتم به دنبال یافتن کمترین مقدار انرژی در هر دما برای تابع هزینه یا همان تابع هدف می‌باشد. در این پژوهش، تابع هدف، انطباق شکل نهایی محصول با حفره قالب تعریف شده است. این مقدار با محاسبه مجموع فاصله گره‌های المانهای لبه خارجی لوله با گره‌های المانهای لبه داخلی قالب به دست می‌آید. هنگامی که این فاصله به سمت صفر میل می‌کند، لوله شکل نهایی قالب را به خود گرفته است.

جدول ۱ خواص مکانیکی ماده در دمای ۳۰۰ درجه

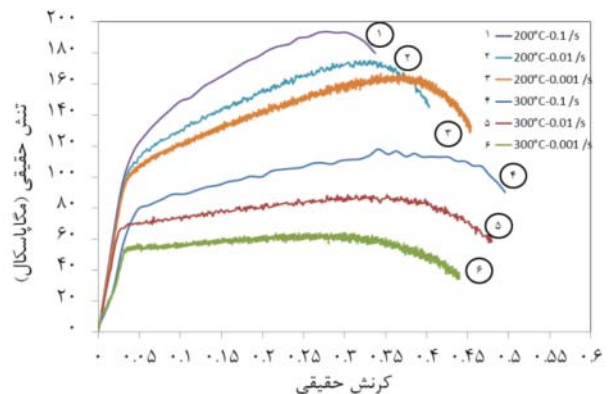
نرخ کرنش (/s)	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۱
تنش تسلیم (MPa)	۵۲	۶۴	۷۴
حداکثر استحکام کششی (MPa)	۵۴/۲	۶۹/۴	۸۴/۱
ازدیاد طول کلی (%)	۳۵/۱۲	۴۲/۱۵	۴۶/۹۵
ازدیاد طول یکنواخت (%)	۴/۹۲	۶/۹۶	۲۳/۴۵
ضریب استحکام K (MPa)	۷۰/۶۲	۱۰۲/۲	۱۴۳
توان کرنش‌سختی، n	۰/۱۰۰	۰/۱۴۴	۰/۲۱۱



شکل ۲ طرحواره محصول نهایی و گسترش ۱۸۰ درجه‌ای مدل دو بعدی

جدول ۲ ابعاد هندسی محصول

قطر نهایی D_f (mm)	ضخامت t (mm)	شعاع گوشه r (mm)
۶۹، ۶۶، ۶۲	۷، ۵، ۳	۱۰، ۷، ۵، ۳، ۲



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی آلیاژ ۶۰۶۱

با توجه به نتایج عددی و تجربی، امکان شکل‌دهی محصول در دمای ۲۰۰ درجه با نسبت‌های انبساط ذکر شده وجود ندارد. لذا در جدول ۱، خواص مکانیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی بر اساس منحنی‌های شکل ۱ در دمای ۳۰۰ درجه ارائه شده است.

شکل ۲ طرحواره محصول نهایی را با ابعاد پارامتریک نشان می‌دهد. سی و شش هندسه متفاوت در هر حالت (در مجموع ۱۰۸ حالت) مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. جدول ۲ این حالت‌ها را نشان می‌دهد. در همه آنها، طول اولیه لوله ۲۴۰ میلی‌متر و قطر اولیه آن ۵۰/۸ میلی‌متر است. برای تعیین مقادیر جابجایی محوری، شبیه‌سازی به صورت آزاد صورت گرفته است، بدین مفهوم که دو انتهای لوله مقید نیستند و با فرض وجود روانکاری کامل (ضریب اصطکاک ۰/۰۵ [۱۰]) به واسطه جریان ماده، به داخل حفره قالب کشیده می‌شوند. بدین ترتیب معیار اولیه مناسبی برای جابجایی محوری در آزمایش‌های تجربی به دست خواهد آمد.

در این مقاله از روش جدیدی برای بهینه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ استفاده شده است. بازپخت شبیه‌سازی شده یکی از روش‌های فرا-ابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد. این روش با الهام از فرایند بازپخت یا آنیل کردن فلزات، به جستجو برای یافتن مقدار کمینه مطلق یک تابع هزینه در یک فضای جستجوی بزرگ می‌پردازد [۱۱]. عملیات بازپخت فیزیکی به منظور کاهش سختی، حذف تنش‌های داخلی و تصحیح میکروساختار انجام می‌شود. فلز تا دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد در مدت زمان مشخص حرارت داده می‌شود و سپس به آرامی تا دمای اتاق سرد

ورودی در شرط پذیرش بولتزمن صدق می‌کنند. با استفاده از این روش، مقدار دمای اولیه برابر ۵ درجه به دست آمده است.

$$T_0 = \frac{-(\max E - \min E)}{\ln(0.5)} \quad (1)$$

در هر دما، الگوریتم به جستجو برای یافتن مقادیر متغیرهای اولیه می‌پردازد به نحوی که سیستم در آن دما کمترین انرژی (تابع هزینه) را داشته باشد. به تعداد چرخه‌های جستجو در هر دمای ثابت یا همان تعداد حلقه‌های داخلی الگوریتم، طول زنجیره مارکوف گفته می‌شود. طول زنجیره مارکوف برای هر مسئله خاص به صورت تجربی به دست می‌آید. در این مقاله، طول زنجیره مارکوف به صورت تطبیقی انتخاب شده است، به طوری که در ابتدای الگوریتم، طول زنجیره مارکوف نرخ صعودی دارد و در انتهای الگوریتم جستجو، طول زنجیره مارکوف نرخ نزولی پیدا می‌کند. بدین ترتیب بیشترین تکرار در محدوده دمایی میانی انجام می‌شود [۱۴]. در هر زنجیره خارجی، دما بر اساس تابعی کاهش می‌یابد که به تابع سرمایه‌ش معروف است. توابع مختلفی تاکنون توسط محققین استفاده شده است [۱۵]. در این مقاله گونه‌ای از تابع دمایی لگاریتمی با بهبود روند کاهش دما به صورت معادله (۲) بکار گرفته شده است.

$$T_k = \frac{T_{k-1}}{1 + \ln(k+1)}; k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

آخرین پارامتر برنامه بازبخت، شرط همگرایی است. شرط همگرایی را می‌توان بسته به نوع مساله بر حسب دمای انجماد، مقدار تابع هدف (اختلاف انرژی)، یا تعداد حلقه‌های خارجی الگوریتم (تعداد مراحل کاهش دما، k) و یا ترکیبی از این سه حالت تعریف نمود. در این مقاله، با توجه به اینکه هدف دستیابی به حداکثر انطباق شکل می‌باشد، شرط همگرایی در برقراری رابطه (۳) تعریف شده است:

$$(3) \quad (0.001 < \text{حداقل انرژی} - \text{حداکثر انرژی})$$

جدول ۳ پارامترهای تعریف شده برای مسئله بهینه‌سازی هیدروفورمینگ گرم لوله را نشان می‌دهد.

جدول ۳ پارامترهای بهینه‌سازی

دمای اولیه	طول زنجیره مارکوف	حداکثر حلقه خارجی
۵°C	تطبیقی	۲۵

متغیر اولیه یا در واقع متغیری که باید بهینه شود، شیب منحنی فشار داخلی-زمان در نظر گرفته شده است. در هر مرحله، متغیرهای جدید تولید شده بر اساس تابع توزیع بولتزمن مورد پذیرش قرار می‌گیرند. بر اساس این تابع، در صورتی که تغییر انرژی منفی باشد متغیرهای جدید قابل قبول هستند ولی در صورتی که این تغییرات مثبت باشد، متغیرهای جدید با احتمال $\exp(-\Delta \text{Energy} / T)$ قبول می‌شوند. این قابلیت ارزشمند امکان "بالاروی" را برای الگوریتم فراهم می‌کند و آن را از گیر افتادن در کمینه‌های محلی باز می‌دارد [۱۲].

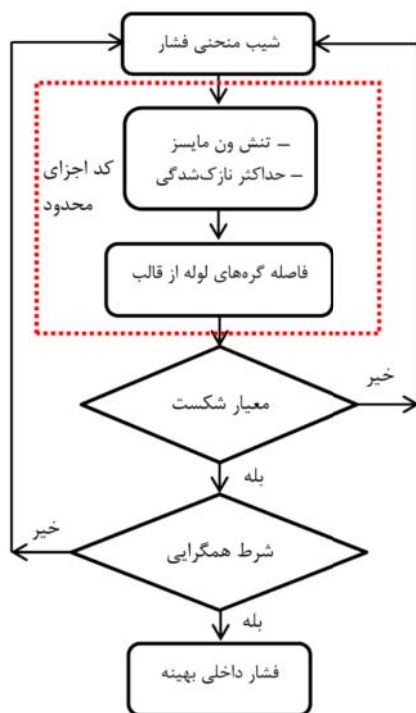
مهمترین عامل در طراحی موفقیت‌آمیز الگوریتم، انتخاب مناسب پارامترهای برنامه بازبخت می‌باشد [۱۳]. برنامه بازبخت شامل چهار قسمت است: (۱) دمای اولیه، (۲) طول زنجیره مارکوف، (۳) تابع سرمایه‌ش و (۴) شرط همگرایی. باید توجه داشت که عیب اصلی کلیه روشهای جستجوی اتفاقی این است که پارامترها برای هر مساله باید به صورت خاص و با توجه به شرایط حاکم در فرایند بازتعریف شوند که لزوماً قابل استفاده برای مسایل دیگر نیستند. نحوه بازتعریف این پارامترها هم روش ثابتی ندارد و مقادیر مناسب معمولاً به صورت تجربی و با آزمون و خطا تعیین می‌گردند. لذا با تغییر تعاریف، نتایج نهایی نیز ممکن است دستخوش تغییر گردد.

انتخاب صحیح دمای اولیه تأثیر زیادی در نتیجه جستجو خواهد داشت. همانند فرایند بازبخت، در صورتی که این مقدار خیلی بالا انتخاب شود، اجرای الگوریتم زمان زیادی را به خود اختصاص خواهد داد و اگر مقدار پایین انتخاب شود، الگوریتم فرصت کافی برای برقراری تعادل ترمودینامیکی را نخواهد داشت، لذا زودتر از موعد مقرر به برقراری شرط همگرایی خواهد رسید و به اصطلاح منجمد خواهد شد. برای یافتن دمای اولیه روشهای مختلفی وجود دارد که عمده آنها بر اساس تجربه می‌باشند. در این مقاله، با انتخاب و نمونه‌برداری از ۱۰۰۰ متغیر تصادفی تولید شده و محاسبه دامنه تغییرات توابع هزینه نمونه‌های انتخاب شده، دمای اولیه از معادله ۱ به دست می‌آید. در این روش، فرض می‌شود به ازای قرار دادن تابع بولتزمن برابر با ۵۰٪ می‌توان دمای اولیه را تخمین زد. این بدان معناست که فرض می‌شود در این دما، ۵۰٪ درصد از متغیرهای

1. Uphill Move

کامل هر مقطع را نشان می‌دهد. میزان انحراف معیار استاندارد هر نسبت نیز نشان داده شده است. منحنی نشان داده شده در هر نرخ کرنش، میانگین ۹ مقدار بهینه فشار در یک r/t ثابت و در نسبت‌های انبساط (η) و نسبت‌های قطر اولیه به ضخامت (D/t) متفاوت است. در واقع این انحراف، خطا نیست و برای نشان دادن محدوده تغییرات فشار بکار رفته است. همان گونه که مشاهده می‌شود بازه تغییرات با کاهش r/t افزایش می‌یابد. به تعبیر دیگر، با تیز شدن گوشه‌ها، مقدار تغییرات فشار نسبت به تغییرات η و D/t بیشتر خواهد شد. علاوه بر این، با کاهش نرخ کرنش مقدار نواسانات نیز کاهش می‌یابد.

شکل ۵ اثرات نرخ کرنش، نسبت انبساط و نسبت قطر اولیه به ضخامت را بر میزان جابجایی محوری نشان می‌دهد. به دلیل این که از شکل‌دهی آزاد در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده، میزان نسبت r/t تأثیر چندانی بر مقدار جابجایی محوری ندارد. لذا در طراحی‌ها می‌توان مقدار نیروی محوری را با در نظر داشتن چروکیدگی، کمی بیشتر در نظر گرفت تا بخش بیشتری از نازک‌شدگی جبران شود.



شکل ۳ فلوجارت بهینه‌سازی

همان طور که مشاهده می‌شود روند افزایشی میزان جابجایی محوری با افزایش نسبت انبساط در تمامی حالات

در هر حلقه داخلی، الگوریتم با برقراری ارتباط با نرم‌افزار عددی، فرایند را تحلیل و سپس با بررسی خروجی‌های حاصل از حل عددی، متغیرهای جدید را انتخاب می‌کند. نتایج ابتدا با معیار شکست تعریف شده در الگوریتم مقایسه می‌شوند و در صورت عدم تأیید، از چرخه حذف خواهند شد. در این پژوهش از معیار شکست ون‌مایسز به همراه معیار حداکثر نازک‌شدگی استفاده شده است. کد الگوریتم در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شده که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی تطبیقی نرم‌افزار انسیس^۱ به ارسال داده‌های ورودی و دریافت خروجی از محیط انسیس می‌پردازد. المان دوبعدی متقارن محوری PLANE162 برای مش‌بندی لوله انتخاب گردیده و مدل ماده به صورت الاستیک-پلاستیک و بر اساس رابطه هولومُن (قانون توان)^۲ طبق مقادیر جدول ۱ ارائه شده است. شرایط مرزی در این مدل، تقارن محوری المان حول محور لوله و فشار روی سطح زیرین کلیه المان‌ها تعریف شده است. گره‌های دو سر لوله نیز آزاد هستند. تعداد المان‌ها به صورت پارامتریک بر حسب طول و ضخامت لوله تعریف گردیده‌اند. تعداد المان‌ها در راستای ضخامت برابر مقدار گرد شده ضخامت تقسیم بر $1/3$ و تعداد المان‌ها در راستای طولی برابر طول ضربدر 3 انتخاب شده است. ضریب اصطکاک بین لوله و قالب برای حالت روانکاری کامل برابر $0/05$ در نظر گرفته شده است [۱۰].

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در تعداد تکرارها و اجرای کامل الگوریتم، تعریف فضای جستجو می‌باشد. از مزیت‌های روش بازپخت شبیه‌سازی شده سرعت پاسخ بالای آن در فضاهای بزرگ است، با این وجود هرچه این فضا محدودتر و دقیق‌تر تعریف شود زمان کلی و تعداد تکرارها کاهش خواهد یافت. در بخش بعدی، این قضیه بیشتر شرح داده خواهد شد. شکل ۳ روند بهینه‌سازی و ارتباط اجزا با یکدیگر را در الگوریتم نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

جدول ۴ نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. شکل ۴ خلاصه مقادیر جدول ۴ است و اثر نسبت شعاع گوشه به ضخامت (r/t) بر فشار داخلی مورد نیاز برای شکل‌دهی

1. APDL
2. Power Law

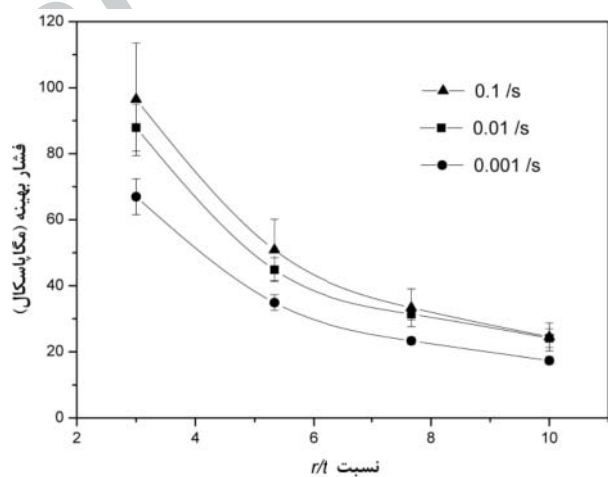
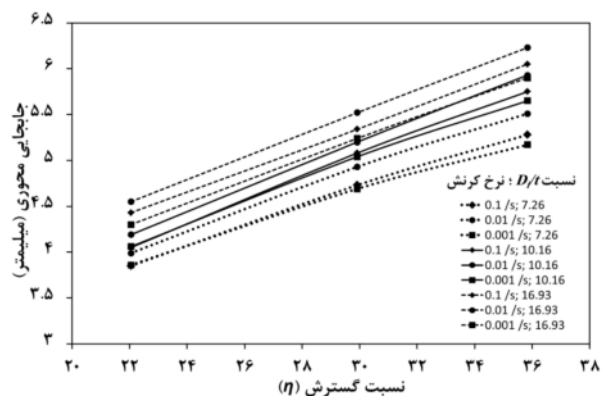
جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی

فشار بهینه (مگاپاسکال)			r/t	D_i/t	η
۰/۱/s	۰/۰۱/s	۰/۰۰۱/s			
۱۹/۸۶	۱۹/۹۲	۱۵/۴۴	۱۰		
۳۴/۶۴	۳۴/۲۷	۲۵/۰۰	۷	۱۶/۹۳	
۴۸/۰۰	۴۷/۸۹	۳۶/۴۸	۵		
۹۰/۹۲	۸۹/۰۸	۶۶/۸۱	۳		
۲۰/۵۳	۲۰/۳۶	۱۷/۰۷	۱۰		۲۲/۰۵
۳۴/۷۹	۳۳/۴۱	۲۷/۵۷	۷	۱۰/۱۶	
۴۹/۵۹	۴۹/۰۰	۴۲/۰۰	۵		
۸۷/۷۹	۹۲/۹۰	۷۰/۵۶	۳		
۲۸/۲۴	۲۵/۶۵	۱۸/۰۰	۱۰		۷/۲۶
۳۸/۶۴	۳۵/۳۷	۲۳/۸۳	۷	۱۰/۱۶	
۵۲/۹۹	۴۹/۸۴	۳۹/۵۶	۵		
۹۴/۳۰	۷۲/۵۸	۶۱/۳۶	۳		
۱۹/۹۱	۲۲/۲۷	۱۸/۰۲	۱۰		۲۹/۹۲
۲۹/۸۱	۳۶/۱۷	۲۳/۷۳	۷	۱۶/۹۳	
۴۹/۳۴	۵۱/۲۵	۳۷/۳۸	۵		
۹۸/۰۰	۸۱/۹۷	۷۲/۴۱	۳		
۲۶/۵۰	۲۶/۹۴	۱۵/۸۶	۱۰		۷/۲۶
۳۶/۹۵	۳۳/۲۹	۲۶/۵۰	۷	۱۰/۱۶	
۵۷/۱۹	۴۵/۸۳	۳۳/۸۴	۵		
۱۰۲/۸۹	۸۵/۸۴	۵۸/۹۵	۳		
۲۸/۶۷	۲۶/۷۹	۱۸/۰۵	۱۰		۷/۲۶
۴۰/۸۵	۳۵/۱۳	۲۵/۷	۷	۱۰/۱۶	
۵۹/۶۱	۵۱/۷۲	۳۴/۰۷	۵		
۱۱۷/۷۴	۸۸/۹۲	۶۵/۹۸	۳		
۱۹/۸۹	۲۵/۰۴	۱۶/۹۸	۱۰		۳۵/۸۳
۳۶/۵۷	۳۰/۵۸	۲۳/۹۸	۷	۱۶/۹۳	
۵۸/۱۹	۴۱/۲۸	۳۷/۸۸	۵		
۸۹/۸۰	۹۴/۹۰	۷۶/۰۰	۳		
۲۸/۰۲	۲۳/۱۰	۱۷/۸۰	۱۰		۷/۲۶
۴۰/۳۶	۲۹/۷۶	۲۳/۴۰	۷	۱۰/۱۶	
۶۰/۲۱	۴۱/۲۳	۳۳/۷۴	۵		
۹۹/۳۳	۹۵/۴۱	۶۷/۴۹	۳		
۲۸/۸۱	۲۶/۹۸	۱۸/۹۸	۱۰		۷/۲۶
۴۲/۵۹	۳۳/۵۱	۲۵/۵۶	۷	۱۰/۱۶	
۶۶/۰۶	۴۶/۱۲	۳۶/۶۷	۵		
۱۱۷/۳۹	۸۹/۶۵	۶۳/۱۳	۳		

مشابه است. همچنین تأثیر D_i/t در هر نسبت انبساط بیشتر از تأثیر نرخ کرنش می‌باشد.

بر اساس آنچه قبلاً اشاره شد، انتخاب بازه مناسب برای متغیرهای اولیه تأثیر فراوانی در سرعت همگرایی دارد. در این پژوهش، برای تعیین کران پایین، با علم به افزایش فشار نسبت به کاهش r/t ، در بالاترین مقدار این نسبت ($r=10t$) از رابطه فشار ترکیبگی، و برای نسبت‌های بعدی از مقدار فشار بهینه به دست آمده برای حالت قبل استفاده شده است. برای کران بالا نیز از رابطه فشار کالیبراسیون با ضریب اطمینان ۳ استفاده شده است [۱۶].

شکل ۶ روند همگرایی تابع هدف را برای سری نمونه $\eta=35/83$ ، $D_i/t=16/93$ و نرخ کرنش $0.1/s$ که در جدول ۴ مشخص شده است نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، تعداد تکرارهای موفق در بهینه‌سازی حالت $r=10t$ که بازه جستجو برای آن بزرگتر است، ۱۶۹ می‌باشد.

شکل ۴ اثر نسبت r/t و نرخ کرنش بر فشار داخلیشکل ۵ اثر η ، D_i/t و نرخ کرنش بر جابجایی محوری

شکل ۸ قطعه حاصل از آزمایش ناموفق در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. نتایج تجربی به‌طور کامل با نتایج عددی در خصوص عدم امکان شکل‌دهی قطعه‌ای با نسبت انبساط ۰/۲۹/۹٪ با این آلیاژ در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد همخوانی دارد.

شکل ۹ نمونه‌های ۱ و ۴ با شعاع گوشه‌های به ترتیب ۵۰ و ۱۵ میلی‌متر را با بارگذاری مطابق نتایج به‌دست آمده در شرایط نرخ کرنش ۰/۰۰۱/S نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که قطعه‌ها به‌طور کامل شکل نگرفته‌اند. این مطلب مؤید این است که فشار داخلی اعمال شده برای شکل‌دهی محصول، بر خلاف پیش‌بینی عددی، کافی نبوده است. با توجه به اینکه طبق جدول ۱ و شکل‌های ۱ و ۴، برای شکل‌دهی محصول با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ فشار کمتری نسبت به دو حالت دیگر مورد نیاز است، می‌توان نتیجه گرفت که بر حسب ظرفیت پمپ هیدرولیک، نرخ کرنش واقعی بیش از ۰/۰۰۱/S بوده و بدین دلیل علیرغم اعمال فشاری که بسته بهینه‌سازی ارائه داده، گوشه‌ها پر نشده‌اند.

شکل ۱۰ نمونه‌های ۲ و ۳، و شکل ۱۱ نیز نمونه‌های ۵ و ۶ را به همراه مقایسه درصد نازک‌شدگی هریک با پیش‌بینی مدل اجزای محدود نشان می‌دهد.



شکل ۷ دستگاه هیدروفورمینگ گرم لوله (آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته تولید، دانشگاه ملی پوسان، کره جنوبی)

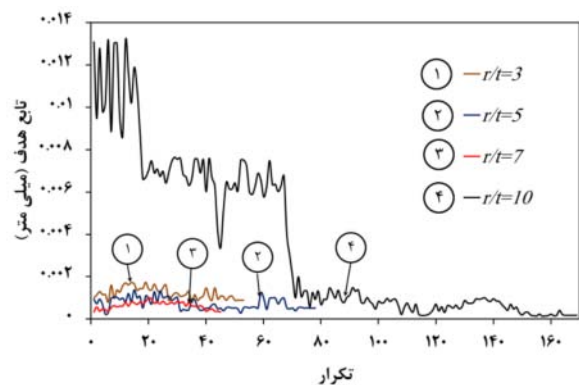


شکل ۸ قطعه تولیدی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد

این تعداد بیش از دو برابر تکرارهای موفق در نسبت‌های شعاع گوشه به ضخامت کمتر است که در آنها با استفاده از مقدار بهینه حالت قبل، بازه جستجو از کران پایین محدود شده است. این روش به افزایش سرعت همگرایی کمک قابل ملاحظه‌ای می‌کند.

همچنین مشاهده می‌شود که کمترین مقدار تابع هدف برای نسبت $r/t=10$ و بیشترین مقدار آن برای حالت $r/t=3$ حاصل شده است. تابع هدف نشانگر میزان انطباق شکل می‌باشد و هرچه کوچکتر باشد، انطباق شکل بیشتر است. در این شکل نشان داده شده که با کاهش نسبت r/t انطباق شکل نیز کمتر می‌شود.

برای ارزیابی و تأیید نتایج بهینه‌سازی، ۶ حالتی که در جدول ۴ به‌صورت خاکستری نشان داده شده‌اند، مورد آزمون عملی قرار گرفتند. جدول ۵ شرایط بارگذاری روی این نمونه‌ها را در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. پرس هیدرولیک ۴ ستونه در شکل ۷، با ظرفیت ۸۰۰ کیلو نیوتن و سیستم تشدید فشار تا ۲۰۰ مگاپاسکال به‌همراه دو جک هیدرولیک برای اعمال تغذیه محوری هر یک به ظرفیت ۸۰۰ کیلو نیوتن و حداکثر طول جابجایی ۱۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۷].



شکل ۶ همگرایی تابع هدف در $D/t=16/93$ ، $\eta=35/83$

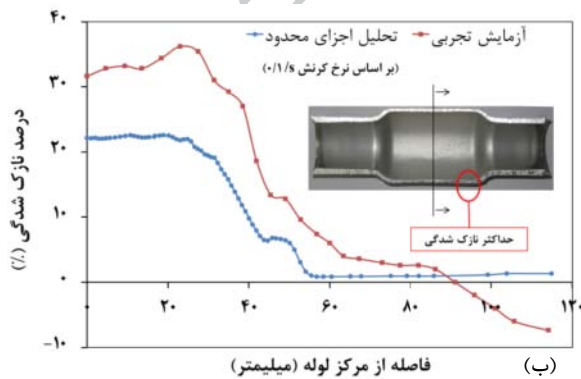
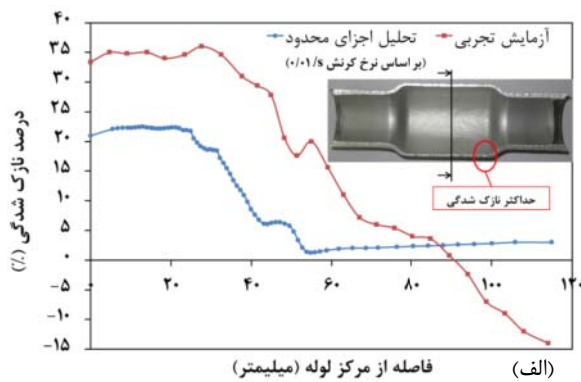
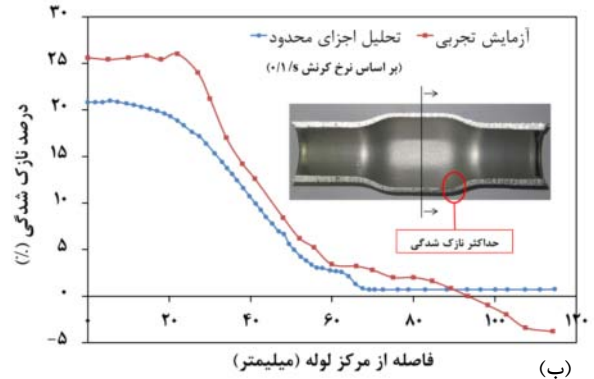
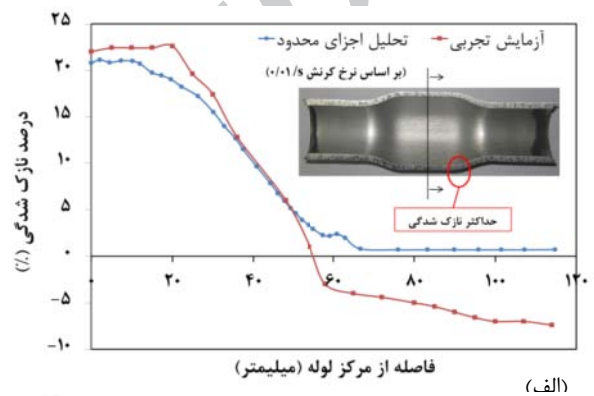
جدول ۵ شرایط نمونه‌های تجربی ($t=5$ mm و $D_f=66$ mm)

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
غ	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱
r	۵۰	۵۰	۵۰	۱۵	۱۵	۱۵
فشار	۱۵/۸۶	۲۶/۹۴	۲۶/۵۰	۵۸/۹۵	۸۵/۸۴	۱۰۲/۸۹
تغذیه	۵/۰۴	۵/۲	۵/۰۵	۵/۰۴	۵/۲	۵/۰۵

تفاوت که با نزدیک شدن به دو انتهای لوله، نه تنها با کاهش ضخامت روبه‌رو نمی‌شود بلکه افزایش ضخامت را تجربه خواهد کرد. این امر به دلیل عدم جریان یافتن مطلوب مواد به داخل حفره قالب هم‌زمان با اعمال تغذیه محوری است که منجر به افزایش ضخامت می‌شود، لذا در این‌جا فقط روی نتایج ناحیه برآمدگی بحث می‌شود. در همه حالتها مشاهده می‌شود که بیشینه نازک‌شدگی در انتهای ناحیه برآمدگی و نزدیک به گوشه اتفاق افتاده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با انجام آزمایش در نسبت $r=1.04$ با بارگذاری فشار و تغذیه محوری حاصل از نرخ کرنش $0.01/s$ ، نتایج تجربی و عددی از مرکز لوله تا انتهای طول برآمدگی انطباق بهتری نسبت به حالت نرخ کرنش $0.1/s$ دارند به‌طوری‌که بیشترین اختلاف، در حالت اول 3% و در حالت دوم 7% می‌باشد. در نسبت $r=3.4$ که بر کردن گوشه تیز فشار بالاتری را می‌طلبد (شکل ۱۱) حداکثر اختلاف در حالت اول 12% و در حالت دوم 13% است. در هر چهار حالت، بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در ناحیه حداکثر نازک‌شدگی واقع شده است.



شکل ۹ پر نشدن کامل گوشه‌ها در بارگذاری مطابق شرایط نرخ کرنش $0.01/s$ ؛ (الف) نمونه ۱ و (ب) نمونه ۴



شکل ۱۱ مقایسه نازک‌شدگی در نسبت $r=3.4$ در آزمایشات تجربی با اجزای محدود؛ (الف) نمونه ۵ و (ب) نمونه ۶

شکل ۱۰ مقایسه نازک‌شدگی در نسبت $r=1.04$ در آزمایشات تجربی با اجزای محدود؛ (الف) نمونه ۲ و (ب) نمونه ۳

برای اندازه‌گیری ضخامت، طول لوله برش خورده در فواصل مشخص از مرکز لوله با استفاده از کولیس نشانه‌گذاری و ضخامت هر قسمت با استفاده از میکرومتر استفاده شده است. اندازه‌گیری‌ها سه بار تکرار گردیده و میانگین نتایج در شکل ارائه شده است.

از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ بر می‌آید که روند کاهش نازک‌شدگی از مرکز لوله به گوشه‌ها با نتایج عددی همخوانی دارد، با این

جدول ۶ ضریب اصطکاک بین لوله و قالب در دماهای مختلف

دما (°C)	۲۵	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
ضریب اصطکاک	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۷۶

۴- نتیجه‌گیری

روش جدیدی برای بهینه‌سازی منحنی‌های بارگذاری فشار و نیروی محوری در فرایند هیدروفرمینگ گرم لوله با استفاده از روش بازپخت شبیه‌سازی شده ارائه گردید و با استفاده از آزمون‌های تجربی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. با محدود کردن فضای جستجو، به حداکثر سرعت همگرایی در الگوریتم دست یافته شد. نسبت انبساط قابل‌توجهی معادل $0.35/0.83$ برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بازپخت شده به دست آمد. نتایج آزمون‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در حالت‌های نرخ کرنش $0.1/s$ و $0.01/s$ همخوانی بهتری داشت. تعریف صحیح شرایط اصطکاک در دماهای مختلف و شیب حرارتی ماده در حین اجرای فرایند می‌تواند به بهبود نتایج بهینه‌سازی کمک شایانی نماید.

۵- قدردانی

نویسندگان مقاله، تشکر و قدردانی ویژه خود را از مسئولین آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته تولید، دانشگاه ملی پوسان در کشور کره جنوبی بابت حمایت‌های مالی و معنوی در این پروژه و همکاری در انجام آزمون‌های تجربی اعلام می‌دارند.

۶- مراجع

- [۱] سیدکاشی سیدمحمدحسین، لیاقت غلامحسین، مسلمی نائینی حسن، ظهیر میردامادی سیدمحسن، "بررسی تاثیر فشار داخلی، نیروی محوری و اصطکاک در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های مسی"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۱، ۱۳۸۷، صص ۷۹-۸۹.
- [2] Mahabunphachai S., Koç M., "Investigations on Forming of Aluminum 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperatures", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 5, 2010, pp. 2422-2434.
- [3] Keigler M., Bauer H., Harrison D., De Silva A. K. M., "Enhancing the Formability of Aluminium Components Via Temperature Controlled Hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, 2005, pp. 363-370.

اختلاف بین نتایج تجربی و عددی می‌تواند به دلیل پیچیدگی زیاد شکل‌دهی در دمای بالا و عدم امکان دقیق ایجاد شرایط آزمایشگاهی مطابق با شرایط عددی باشد. یکی از عوامل اختلاف نتایج، تغییر شرایط اصطکاک در دماهای بالا است. برای بررسی این امر ضریب اصطکاک بین دو فلز در دماهای مختلف با استفاده از روش پین روی دیسک در حالت بدون استفاده از روانکار (اصطکاک خشک) اندازه‌گیری گردید. جدول ۶ نتایج این آزمون را در چهار دمای مختلف نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که با افزایش دما مقدار ضریب اصطکاک افزایش قابل‌توجهی می‌یابد، به طوری که از دمای اتاق تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد مقدار آن $0.58/0.3$ افزایش می‌یابد. لذا باید در حین طراحی فرایند این نکته را در نظر داشت.

علاوه بر این، وجود شیب حرارتی در حین اجرای فرایند نیز بر روی میزان شکل‌پذیری تأثیر منفی خواهد گذاشت، زیرا خواص مکانیکی فلز با استفاده از آزمون کشش استاندارد در هر دمای ثابت استخراج شده‌اند، در حالیکه در آزمون تجربی پس از اتمام فرایند حرارت‌دهی و بسته شدن قالب، افت دمایی برابر حدود 40°C در عرض ۵ ثانیه (طول مدت شکل‌دهی در حالت $r=1.04$) الی 50°C در عرض ۱۲ ثانیه (طول مدت شکل‌دهی در حالت $r=3.4$) اتفاق می‌افتد. این افت دما، همان‌گونه که بحث شد، علاوه بر تغییر در خواص مکانیکی فلز منجر به تغییر ضریب اصطکاک نیز خواهد شد. چند روش برای کاهش این شیب حرارتی از طرف پژوهشگران مختلف ارائه شده است. در بهترین حالت با استفاده از انجام کل فرایند شکل‌دهی در داخل محفظه سیال داغ توانستند میزان افت دما را به ۱۰ درجه سانتیگراد برسانند [۱۷]. با این وجود، این روش به دلیل شرایط خاص آن و قرارگیری کل مجموعه قالب در داخل حوضچه سیال، بسیار پرهزینه و کنترل پارامترهای آن نیز مشکل است. در این پژوهش، نظر به اینکه هدف استخراج منحنی‌های بهینه بارگذاری و صحت‌سنجی روش مورد استفاده بود که مستلزم انجام تعداد زیادی تکرار می‌باشد، استفاده از تحلیل عددی به صورت ترمومکانیکی کوپل به دلیل زمان زیاد مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی‌ها به این صورت امکان‌پذیر نبود. با این وجود، استفاده از المان‌هایی با قابلیت تعریف شرایط مکانیکی مختلف در دماهای متفاوت می‌تواند منجر به بهبود نتایج نهایی شود.

- [11] Kadkhodayan M., Erfani A., "Optimization of Load Paths in X- and Y-Shaped Hydroforming", *International Journal of Material Forming*, 2011, DOI: 10.1007/s12289-011-1074-3.
- [12] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, 1983, pp. 671-680.
- [13] Shojaee K., Behnam M., Shakouri H., Rezaei M., "Enhancement of SA Algorithm by Intelligent Time Schedule", *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing 2010, pp. 1768-1774.
- [14] Seyedkashi S. M. H., Moslemi Naeini H., Liaghat G. H., Mosavi Mashadi M., Shojaee Ghandashtani K., Mirzaali M., Moon Y. H., "Experimental and Numerical Investigation of Simulated Annealing Technique in Optimization of Warm Tube Hydroforming", Accepted for publication in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 2012.
- [15] Keikha M. M., "Improved Simulated Annealing using Momentum Terms" *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, Cambodia 2011, pp. 44-48.
- [16] Mirzaali M., Seyedkashi S. M. H., Liaghat G. H., Moslemi Naeini H., Shojaee K., Moon Y. H., "Application of Simulated Annealing Method to Pressure and Force Loading Optimization in Tube Hydroforming Process", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 55, 2012, pp. 78-84.
- [17] Aue-u-lan Y., "Hydroforming of Tubular Materials at Vari-Ous Temperatures", PhD dissertation in Mechanical engineering, The Ohio State University, Ohio 2007.
- [4] Lee M. Y., Sohn S. M., Kang C. Y., Suh D. W., Lee S. Y., "Effects of Pre-Treatment Conditions on Warm Hydroformability of 7075 Aluminum Tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155, 2004, pp. 1337-1343.
- [5] Yuan S. J., Qi J., He Z. B., "An Experimental Investigation into the Formability of Hydroforming 5A02 Al Tubes at Elevated Temperature", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, 2006, pp 680-683.
- [6] Kim B. J., Van Tyne C. J., Lee M. Y., Moon Y. H., "Finite Element Analysis and Experimental Confirmation of Warm Hydroforming Process for Aluminum Alloy", *Journal of Materials Processing technology*, Vol. 187-188, 2007, pp. 296-299.
- [7] Yi H. K., Pavlina E. J., Van Tyne C. J., Moon Y. H., "Application of a Combined Heating System for the Warm Hydroforming of Lightweight Alloy Tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1-3, 2008, pp 532-536.
- [8] Hwang Y. M., Su Y. H., Chen B. J., "Tube Hydroforming of Magnesium Alloys at Elevated Temperatures", *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME*, Vol. 132, No. 3, 2010.
- [9] Mirzaali M., Liaghat G. H., Moslemi Naeini H., Seyedkashi S. M. H., Shojaee K., "Optimization of Tube Hydroforming Process Using Simulated Annealing Algorithm", *Procedia Engineering*, Vol. 10, 2011, pp. 3012-3019.
- [10] Thiruvarudchelvan S., "A Theory for the Bulging of Aluminium Tubes Using a Urethane Rod", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, 1994, pp. 311-330.