مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 364-374

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهینه‌سازی چند هدفه فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا برای تولید قطعات مربعی

مهرداد نصرالله زاده[1]، جواد شهبازی کرمی[2]، حسن مسلمی نائینی[3*]، سیدجلال هاشمی[4]، حسین محمدی نجف آبادی[5]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران
3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
4- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی کار، قزوین
5- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-143، moslemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 خرداد 1395
پذیرش: 10 شهریور 1395
ارائه در سایت: 01 آبان 1395

کلید واژگان:
شکل‌دهی با دمش گاز در دمای بالا
بهینه‌سازی
الگوریتم ژنتیک
شبکه عصبی
مدل رگرسیونی

چکیده

شکل‌دهی دمشی فلز در دماهای بالا فرآیندی است برای شکل‌دادن فلزاتی از قبیل آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم که شکل‌پذیری پایین یا استحکام بالایی در دمای اتاق دارند و با افزایش دمای فرآیند تا دماهایی بالاتر از دمای تبلور مجدد فلز، شکل‌پذیری آن‌ها افزایش و استحکامشان کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. در این فرآیند برای تولید قطعاتی با خواص مطلوب، تعیین میزان بهینه برای پارامترها ضروری می‌باشد. در این تحقیق فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و توسط نتایج شبیه‌سازی، نحوه تاثیرگذاری پارامترهای ورودی بر خروجی‌های فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تأیید آزمایش‌های شبیه‌سازی نیز آزمایش‌های تجربی با استفاده از مجموعه شکل‌دهی دمشی انجام گرفت. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از شبیه‌سازی عددی فرآیند، مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی به منظور مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا ایجاد شد و دقت این دو مدل مورد بررسی قرار گرفت. در این دو مدل، فشار، تغذیه محوری و زمان به عنوان پارامترهای ورودی و شعاع، کمینه و بیشینه ضخامت به عنوان خروجی‌های مساله درنظر گرفته شد. درمرحله بعد مدل دقیق‌تر به عنوان تابع ورودی به الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدفه ارائه گردید تا جبهه پارتو و پارامترهای بهینه‌ی فرآیند به دست آیند. پارامترهای بهینه‌ی حاصل شده عبارتند از: فشار داخلی 15.82bar، تغذیه محوری 2.76mm و زمان 69.02s و مقادیر شعاع گوشه، کمینه و بیشینه ضخامت بدست آمده از پارامترهای بهینه به ترتیب برابر 4.43mm، 0.808mm و 1.93mm می‌باشد.

Multiobjective optimization of hot metal gas forming process to production of square parts

Mehrdad Nasrollahzade[1], Javad Shahbazi Karami[2], Hassan Moslemi Naeini [1*], Seyed Jalal Hashemi [3], Hosein Mohammadi Najafabadi[1]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran
3- Faculty of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran
*P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 May 2016
Accepted 31 August 2016
Available Online 22 October 2016

Keywords:
Hot metal gas forming, Optimization
Genetic algorithm
Neural network
Regression model

ABSTRACT

Hot gas forming process forms materials with low formability or high strength at room temperature such as aluminum, magnesium and titanium. With increasing temperature, the formability of these metals increases and the strength decreases. In this process, for producing products with desirable properties, determination of optimal parameters is essential. In this study, hot gas forming process was investigated numerically by using Abaqus software, and the effects of input parameters on the outputs were studied by analyzing simulation results. In order to validate simulation results, the experimental test was carried out by using hot gas forming setup. For modeling hot gas forming process, artificial neural network and regression models was created by using data obtained from the numerical simulation and then the accuracy of these models was examined. In these models, pressure, axial feeding and time were assumed as input parameters and the radius, minimum and maximum thickness were considered as output. In the next stage, best model was used as input function in multi-objective genetic optimization algorithm to obtain Pareto front and optimum process parameters. Optimum parameters were obtained as follows: pressure 15.82bar, axial feeding 2.76mm and time 69.02s. In addition, values of radius corner, minimum and maximum thickness achieved from using optimum parameters are 4.43mm, 0.808mm and 1.93mm respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Nasrollahzade, J. Shahbazi Karami, H. Moslemi Naeini, S. J. Hashemi, H. Mohammadi Najafabadi, Multiobjective optimization of hot metal gas forming process to production of square parts, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 364-374, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

امروزه استفاده از موادی با نسبت استحکام به وزن بالاتر در صنعت حمل و نقل و دیگر صنایع به شکل رقابتی دنبال می‌شود. کاهش وزن تولیدات با توجیهات اقتصادی و محیط زیستی صورت می‌گیرد. آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به دلیل وزن کم از قابلیت بالایی در استفاده در صنایع خودروسازی و هوافضا برخوردارند. در صورت جایگزینی فلزات آهنی با آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم می‌توان وزن خودرو را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. 10% کاهش وزن خودروها می‌تواند 8%-6 مصرف سوخت را کاهش دهد [2,1]. آلیاژهای آلومینیوم با نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی و قابلیت بازیافت بالا، از رقبای اصلی فولاد در ساخت قطعات خودرو هستند [3]. مشکل اصلی این آلیاژها، شکل‌پذیری پایین آن‌ها در دمای اتاق به دلیل وجود درصد بالای عناصر آلیاژی در آلیاژهای آلومینیوم و ساختار بلوری شش وجهی فشرده[1](HCP) در منیزیم می‌باشند. به همین دلیل کاربردشان در حال حاضر محدود می‌باشد [4]. راه حل مناسب برای بهبود شکل‌پذیری این آلیاژها، افزایش دمای شکل‌دهی می‌باشد [5]. درصورتی‌که افزایش دما تا زیر دمای تبلور مجدد (معمولا نصف دمای ذوب) باشد، به آن شکل‌دهی گرم و درصورتی‌که دما بالای آن باشد، شکل‌دهی داغ گفته می‌شود [5].

به وسیله فرآیند اکستروژن می‌توان قطعات توخالی و جدار نازک را تولید کرد اما سطح مقطع محصول ثابت است. به منظور ساخت قطعاتی با دیواره نازک و سطح مقطع‌های به نسبت پیچیده که شکل سطح مقطع نیز می‌تواند در طول قطعه تغییر کند، از فرآیند هیدروفرمنیگ لوله استفاده می‌شود. هیدروفرمینگ یکی از پیشرفته‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی فلزات می باشد که شامل استفاده از فشار بالای سیال برای شکل‌دهی فلز به شکل‌هایی می باشد که به غیر از این روش ممکن است توسط فرآیندهای دیگر تولید متعارف، غیر ممکن باشد. این فرآیند برای تولید قطعات بدون درز، سبک وزن و با کیفیت بالا برای هوافضا و خودروسازی که تلرانس خیلی بسته ای دارند ایده آل می باشد. به فرآیند هیدروفرمینگی که در آن قطعه، قالب و سیال یا هر یک از آن‌ها به تنهایی تا دمای طراحی گرم می‌شوند، هیدروفرمینگ در دمای بالا، هیدروفرمینگ حرارتی یا هیدروفرمینگ گرم گویند. اصول حاکم بر این فرآیند همان اصول فرآیند هیدروفرمینگ در دمای اتاق است، با این تفاوت که پارامتر مهمی چون دما بر روی کلیه‌ی خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه تاثیرگذار می‌باشد. در سال‌های اخیر محققان تحقیقات فراوانی را در زمینه‌ی هیدروفرمینگ گرم انجام داده‌اند و توانسته‌اند موفقیت‌های فراوانی در این زمینه کسب کنند، از جمله این تحقیقات عبارتند از:

هی[2] و همکارانش رفتار تغییر شکل لوله‌های منیزیمی AZ31B را در راستای محیطی و طولی مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آنها شکل‌پذیری ماده در راستای محیطی در یک محدوده دمایی کاهش می‌یابد ولی در راستای طولی با افزایش دما شکل‌پذیری ماده به صورت پیوسته افزایش می‌یابد [6]. یی[3] و همکارانش برای ایجاد توزیع یکنواخت دما روی سطح لوله در فرآیند هیدروفرمینگ گرم از یک سیستم گرمایش ترکیبی استفاده کردند که شامل یک گرم‌کننده القایی روی سطح لوله و یک کویل حرارتی در درون لوله بوده است [7]. سید کاشی و همکاران اثر ابعاد لوله، شعاع گوشه و نرخ کرنش را بر میزان فشار داخلی بهینه و جابجایی محوری مورد نیاز برای شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی در دمای 300C مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم بازپخت منحنی‌های بارگذاری فشار و نیروی محوری را بهینه ساختند [8]. هاشمی و همکاران به کمک معیارهای شکست نرم اصلاح شده و با در نظر گرفتن تاثیر دما و نرخ کرنش در شکست، ترکیدگی لوله و شعاع گوشه قطعه مربعی را در هیدروفرمینگ گرم تا دمای 300C پیش‌بینی کردند [9].

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه هیدروفرمینگ گرم مشاهده می‌شود به علت ظرفیت گرمایی پایین سیال، تمام پژوهش‌های صورت گرفته در دماهای پایین‌تر از 300C می‌باشد. علاوه بر این در فرآیند هیدروفرمینگ برای شکل‌دهی نیاز به فشار بالایی می‌باشد که سبب استفاده از ابزارها و اتصالات بزرگتر و گران‌تر می‌شود. برخی از فلزات سبک مانند آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم در دماهای بالاتر از دمای تبلور مجدد (یعنی بالای 300C) تنش تسلیم آن‌ها به طور چشم‌گیری کاهش و شکل‌پذیری آن‌ها افزایش می‌یابد. محققان برای از میان برداشتن این محدودیت‌های فرآیند هیدروفرمینگ گرم، روش شکل‌دهی دمشی[4] در دماهای بالا را مورد بررسی قرار داده‌اند. در فرآیند شکل‌دهی دمشی از سیال دیگری که قابلیت تحمل دماهای بالاتر از 300C را داشته باشد استفاده می‌شود. این سیال ممکن است هوا یا گازهای خنثی از قبیل آرگون، نیتروژن و دی اکسید کربن باشد. در زیر به تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا اشاره شده است.

مورسی[5] و همکاران لوله‌هایی از آلیاژ تیتانیوم را با استفاده از روش جدید آزمایش بالج لوله چندتایی[6] در دمای 825C مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها خواص بدست آمده از این روش و خواص بدست آمده از آزمایش کشش تک محوره را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بالج لوله مورد مقایسه قرار دادند و مشاهده کردند آزمایش بالج چندگانه نتایج دقیق‌تری می‌دهد. آن‌ها هم‌چنین با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه جعبه‌ای شکل در دمای 800C، تاثیر خواص ماده از قبیل رابطه تنش- نرخ کرنش، حساسیت به نرخ کرنش و ضریب استحکام ماده را که توسط آزمایش بالج بدست آوردند، مورد بررسی قرار دادند [11,10]. ضوئی و همکاران فرآیند شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما شکل‌پذیری افزایش می‌یابد و فشار مورد نیاز شکل‌دهی کاهش می‌یابد [12]. مائنو[7] و همکاران با استفاده از روش مقاومتی دمای قطعه آلومینیومی را تا حدود 400C بالا برده و با استفاده از دمش هوا، لوله آلومینیومی را بالج کردند و اثر فشار داخلی و شدت جریان الکتریسیته بر روی نسبت انبساط را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها با بررسی تاثیر جنس قالب به این نتیجه رسیدند که هرچه رسانندگی حرارتی قالب کمتر باشد، پرشدگی گوشه‌ها بهبود می‌یابد [13-15]. نصرالله‌زاده و همکاران فرآیند شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی با روش دمش گاز در دماهای بالا و تولید قطعات با سطح مقطع مربعی را مورد بررسی قرار دادند و پس از تولید قطعات مربعی توزیع ضخامت، شعاع گوشه، فشار شکل‌دهی و اثر زمان اعمال فشار بر شکل‌گیری گوشه‌های نمونه‌های تولیدشده در دماهای مختلف را باهم مقایسه کردند [16].

با بررسی پژوهش‌های انجام گرفته‌شده در زمینه شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا، مشاهده می‌شود اکثر پژوهش‌های انجام گرفته شده در این زمینه مربوط به بررسی فرآیند و پارامترهای تاثیرگذار در آن می‌باشد و غالبا

[1] Hexagonal close-packed
[2] He
[3] Yi
[4] Hot metal gas forming
[5] Morsy
[6] Multi-tube bulge test
[7] Maeno

مربوط به شکل‌دهی دمشی ورق و یا بالج آزاد لوله در دماهای بالا می‌باشد و تاکنون مطالعه‌ای در زمینه بهینه‌سازی فرآیند شکل‌دهی دمشی قطعات مربعی صورت نگرفته است. معمولا در فرآیندهای شکل‌دهی فلز از سعی و خطا برای طراحی فرآیند استفاده می‌شود که معمولاً پرهزینه و زمان‌بر است. استفاده از روش‌های نوین ترکیبی نظیر شبیه‌سازی عددی به همراه تکنیک‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی، این امکان را فراهم می‌کند تا بدون ایجاد هزینه‌های گزاف بتوان بهترین طرح ممکن را ایجاد کرد.

در این تحقیق ابتدا شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس[1] صورت گرفت و تطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا با نتایج تجربی مورد بررسی قرار گرفت. بعد از این مرحله، دقت مدل‌های رگرسیونی و عصبی در پیش‌بینی خروجی‌های مساله مورد بررسی قرار گرفت و درنهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی فرآیند انجام شد.

2- مجموعه شکل‌دهی دمشی

به منظور تولید نمونه‌های تجربی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، مجموعه شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا طراحی و ساخته شد. این مجموعه در شکل 1 نشان داده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده مجموعه شکل‌دهی دمشی عبارتند از: قالب مربعی، مجموعه گرمایشی، سیستم کنترل کننده دما، مجموعه تامین فشار و پرس هیدرولیک.

نحوه کار مجموعه شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا به این‌صورت می‌باشد که ابتدا لوله آلومینیومی در داخل قالب قرار می‌گیرد. این قالب از جنس فولاد ابزار سردکار 1.2080[2] می‌باشد و دارای حفره‌ای مربعی با گوشه‌های تیز می‌باشد که لوله در داخل این حفره تغییر شکل می‌یابد و به شکل مربع در می‌آید. قالب دارای چهار سوراخ سرتاسری نیز می‌باشد که محل قرارگیری المنت‌های الکتریکی می‌باشد. قالب مربعی مورد استفاده در این پژوهش و ابعاد آن به صورت شماتیک در شکل 2 نشان داده شده است.

به منظور آب‌بندی نیز از دو عدد مخروط فولادی استفاده شده است که با استفاده از پرس هیدرولیک تحت فشار در دو طرف لوله قرار می‌گیرد. در

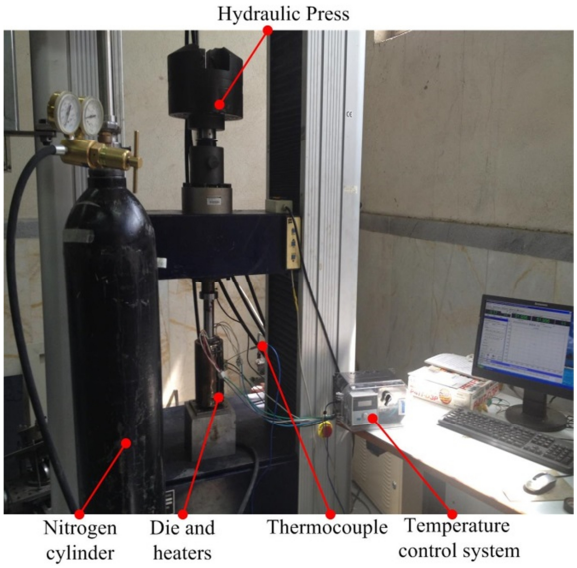

Fig. 1 Hot metal gas forming set up

شکل 1 مجموعه شکل‌دهی داغ با دمش گاز

[1] Abaqus
[2] Spk

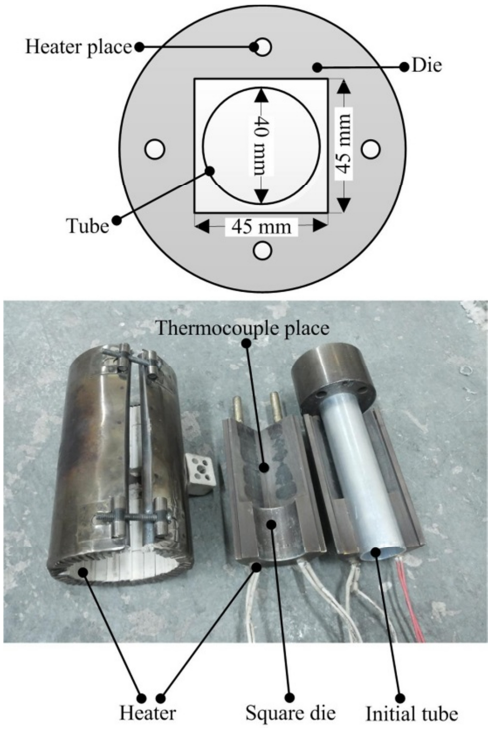

Fig. 2 Hot metal gas forming die and its dimensions

شکل 2 قالب شکل‌دهی داغ با دمش گاز و ابعاد آن

مرحله بعد، با استفاده از مجموعه گرمایشی، دمای قالب و لوله به 500C می‌رسد. مجموعه گرمایشی شامل چهار عدد گرمکن فشنگی با توان 200 وات، که در داخل سوراخ‌های سرتاسری قالب قرار می‌گیرد، و یک عدد گرمکن کمربندی به توان 1200 وات، که قالب را احاطه می‌کند، می‌باشد.

به منظور اندازه‌گیری و کنترل دما نیز از یک ترموکوپل نوع K و سیستم کنترل کننده دما استفاده شده است. این مجموعه به این صورت عمل می‌کند که دمای لوله توسط ترموکوپل اندازه گرفته می‌شود و به سیستم کنترل‌کننده فرستاده می‌شود، سیستم کنترل کننده نیز با مقایسه این دما و دمای تنظیم شده، جریان برق ورودی به گرمکن‌ها را کنترل می‌کند و از این طریق دما را کنترل می‌کند. بعد از اینکه دمای لوله به دمای هدف رسید با توجه به اینکه آزمایش در دمای ثابت انجام می‌شود، مجموعه قالب و لوله به مدت 5 دقیقه در دمای مورد نظر ثابت نگه داشته می‌شود تا به توزیع دمایی یکنواختی برسند.

برای تامین نیرو و تنش مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل در لوله نیز از فشار گاز نیتروژن استفاده شده است. فشار داخلی با استفاده از یک کپسول نیتروژن اعمال و با یک رگولاتور کنترل شد.

3- شبیه‌سازی عددی

مدل فرآیند مطابق شکل 3 در نرم‌افزار آباکوس آماده شد و تغییر شکل لوله در دمای بالا در محیط ضمنی آباکوس[3] تحلیل شده است. با توجه به تقارن و همچنین کاهش زمان حل، یک‌هشتم لوله و قالب مدل شده است. لوله‌های آلومینیومی مورد استفاده در این پژوهش دارای قطر خارجی 40mm و ضخامت اولیه 1.5mm بوده‌اند. لوله‌ها بدون درز بوده و با فرآیند اکستروژن تولید شده‌اند. ترکیب شیمیایی لوله‌ها با استفاده از آزمایش کوانتومتری تعیین شده که در جدول 1 نشان داده شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی

[3] Abaqus/implicit

جدول 1 ترکیب شیمیایی لوله

Table 1 chemical composition of tube

مس	روی	آهن	سیلیسویم	منیزیم	آلومینیوم
0.06	0.08	0.30	0.44	0.47	پایه
گالیوم	نیکل	قلع	تیتانیوم	سرب	منگنز
0.01	0.02	0.017	0.03	0.03	0.03

آلیاژ لوله AA6063 می‌باشد.

خواص ماده به صورت داده‌های تنش- کرنش حقیقی پلاستیک که از آزمایش کشش تک محوره بدست آمده وارد نرم افزار شده است. به منظور دست‌یابی به منحنی تنش- کرنش جنس لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش، ابتدا نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8M که در شکل 4 نشان داده شده است، از روی لوله با استفاده از دستگاه برش سیمی[1] آماده شدند. سپس نمونه‌های آماده شده بر روی دستگاه کشش یونیورسال تحت آزمایش کشش تک‌محوره قرار گرفت. آزمایش‌ها در دمای 500C و تحت سه نرخ کرنش متفاوت 0.001, 0.01 , 0.1 انجام شد. در شکل 4 نمونه‌های کشیده شده نشان داده شده است. برای بدست آوردن خواص مکانیکی ماده، هر آزمایش سه بار تکرار شد و میانگین نتایج سه آزمون به عنوان نتیجه نهایی برای هر حالت انتخاب شده است. منحنی تنش- کرنش حقیقی که از آزمایش کشش تک محوری بدست آمده، در شکل 5 نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی نسبت ضخامت به شعاع کوچک‌تر از 0.1 می‌باشد بنابراین مدل پوسته به خوبی می‌تواند رفتار لوله را در این فرآیند توصیف کند. قالب نیز به صورت یک جسم صلب گسسته مدل شده است. برای مش‌بندی لوله، المان از نوع S4RT انتخاب شده است. این المان دارای چهار گره بوده و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته[2] استفاده می‌کند. برای انتخاب بهترین اندازه المان، شبیه‌سازی با اندازه‌های مختلف المان انجام شد و تغییرات توزیع ضخامت در یک هشتم قطعه نهایی مورد بررسی قرار گرفت. 0شکل 6 نتایج بدست آمده برای اندازه‌های مختلف المان را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود مقادیر توزیع ضخامت در اندازه المان 1mm همگرا شده است. بنابراین از اندازه المان 1mmبرای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

Fig. 3 Simulation model

شکل 3 مدل شبیه‌سازی

[1] Wire cut
[2] Reduced integration

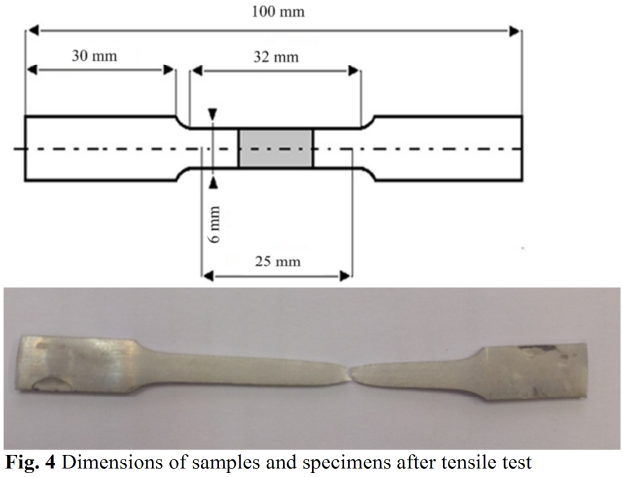

Fig. 4 Dimensions of samples and specimens after tensile test

شکل 4 ابعاد نمونه کشش و نمونه بعد از آزمایش کشش

شرایط تماسی سطح خارجی لوله و قالب بر اساس مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک بر طبق مدل اصطکاکی کولمب با مقدار 0.15 تعریف شد. سطوح قالب که به صورت سطوح صلب هستند، به عنوان سطوح اصلی[3] و سطوح لوله که تغییر شکل پذیرند، به عنوان سطوح فرعی[4] معرفی شدند.

شبیه سازی به صورت کوپل ترمومکانیکی بوده و دمای لوله در همه نقاط یکسان فرض شده است. فشار گاز با فشار یکنواخت سطح جایگزین شده

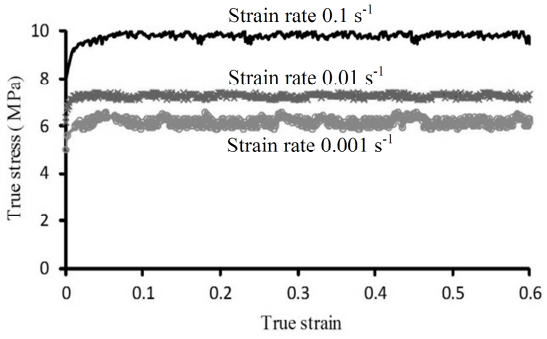

Fig. 5 Diagram of true stress-strain for AL6063 in temperature of 500C and in three strain rates of 0.1, 0.01, 0.001

شکل 5 منحنی تنش- کرنش حقیقی آلومینیوم 6063 در دمای 500C و سه نرخ کرنش 0.1, 0.01, 0.001

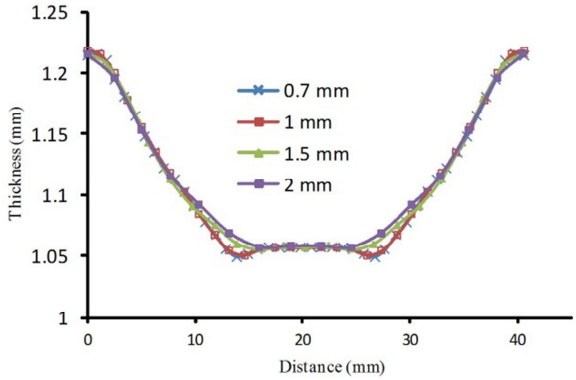

Fig. 6 Thickness distribution changes by resizing elements

شکل 6 تغییرات توزیع ضخامت با تغییر اندازه المان

[3] Master
[4] Slave

و بر طبق منحنی زمانی مورد نیاز بر سطح داخلی لوله اعمال شده است.

قطعه شبیه سازی شده در دمای 500C و فشار داخلی 12bar در شکل 7 نشان داده شده است.

4- بهینه‌سازی

اغلب مسائل در طبیعت، چندین هدف احتمالاً ناسازگار برای دست‌یابی دارند. ممکن است دسترسی به یک هدف باعث دور شدن از هدفی دیگر شود. واضح است که شکل‌دهی ورق نیز یک مساله چند هدفه با روابط ناسازگار بین توابع هدف می‌باشد. یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه[1] به صورت رابطه (1) بیان می‌شود.

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots . f_m(x)\};\ x \in D \qquad (1)$$

که در آن، $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ بردار متغیرهای طراحی و D فضای طراحی ممکن است که توسط قیود مسأله تعیین می‌شود و $f_i(x)$, i=1, 2,…,m توابع هدف را نشان می‌دهد.

در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، معمولاً توابع هدف در تعارض با یکدیگرند. به این معنی که با بهبود یک تابع، تابع دیگر دچار افت می‌شود، لذا نمی‌توان هم‌زمان تمامی توابع هدف را در بهترین حالت خود مشاهده کرد.

برای بهینه‌سازی تمام توابع هدف از مفهوم نقاط بهینه پارتو[2] استفاده شده است. نقاط غیر مغلوب پارتو نقاطی هستند که هیچ نقطه دیگری بر آنها غالب نیست. به عبارتی دیگر x_1 نسبت به x_2 یک نقطه غالب است اگر و تنها اگر رابطه (2) برقرار باشد.

$$\begin{aligned} &f_i(x_1) \le f_i(x_2), \quad \text{برای تمام } i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ &j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{برای تمام } f_j(x_1) < f_j(x_2), \end{aligned} \qquad (2)$$

در رابطه (2)، n تعداد توابعی است که باید کمینه شوند. حال اگر هیچ نقطه‌ای در فضای طراحی وجود نداشته باشد که بتواند طبق رابطه (2) بر $\boldsymbol{x_1}$ غلبه کند آنگاه $\boldsymbol{x_1}$ یک نقطه پارتو است. مجموعه نقاط پارتو یک پیشانی پارتو را در فضای توابع هدف ایجاد می‌کنند.

به منظور بهینه‌سازی مسائل غیرخطی پیچیده مانند فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، استفاده از روش‌های تصادفی که الگوریتم جست و جوی آنها بر مبنای احتمال و آمار است، کارایی بیشتری نسبت به روش‌های مرسوم کلاسیک که بر پایه گرادیان توابع بنا نهاده شده‌اند دارند. زیرا روش‌های کلاسیک تنها برای توابع پیوسته و منظم کاربرد دارند و علاوه بر آن امکان

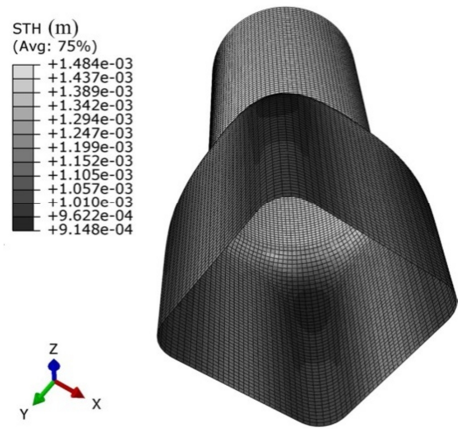

Fig. 7 Simulated specimen in 500C and 12 bar internal pressure

شکل 7 قطعه شبیه سازی شده در دمای 500C و فشار داخلی 12bar

[1] Multiobjective optimization
[2] Pareto front

محبوس شدن در مینیمم‌های محلی در این روش‌ها وجود دارد [17]. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی است که می‌تواند با قابلیت جستجوی همزمان نواحی مختلف فضای طراحی، نقاط بهینه را برای مسائل پیچیده‌ای نظیر مسائل غیر محدب و گسسته جستجو کند. دسته‌ای از الگوریتم‌های ژنتیک که بر پایه نقاط پارتو ایجاد شده است، الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی چند هدفه نام دارد که قادر است تا هم‌زمان چند تابع هدف را بهینه کند.

5- شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی[3]، به طور گسترده در تحقیقات هوش مصنوعی برای حل مسائل مختلف در علوم و در جایی که یک تابع تقریبی برای نگاشت غیر خطی بین پارامترهای ورودی و خروجی نیاز است، کاربرد دارند. حوزه کاربرد این شبکه بسیار گسترده است و کاربردهایی نظیر درون‌یابی، تخمین، آشکارسازی و غیره را شامل می‌شود.

در شبکه عصبی وزن‌های اولیه، انتخاب تابع فعال‌سازی و انتخاب تعداد نرون‌های استفاده شده در لایه میانی (پنهان) به عنوان فاکتورهای یادگیری در نظر گرفته می‌شوند. شناخت و انتخاب صحیح این فاکتورها مهم بوده، زیرا آنها نه تنها بر روی همگرایی شبکه تاثیر داشته، بلکه بر روی دقت پیش‌بینی و تخمین نیز موثر می‌باشد. همان‌طور که در شکل 8 دیده می‌شود شبکه بر مبنای تطابق و هم‌سنجی بین ورودی و هدف سازگاری می‌شود تا این‌که خروجی شبکه و هدف بر هم منطبق گردند.

به طور معمول تعداد زیادی از این زوج‌های ورودی و خروجی به کار گرفته می‌شوند تا در این روند که از آن تحت عنوان یادگیری نظارت شده یاد می‌شود، شبکه آموزش داده شود.

شبکه‌های عصبی با توانایی قابل توجه خود در استنتاج نتایج از داده‌های پیچیده می‌توانند در استخراج الگوها و شناسایی گرایش‌های مختلفی که برای انسان‌ها و کامپیوتر شناسایی آنها بسیار دشوار است، استفاده شوند.

از ویژگی‌های شبکه عصبی مصنوعی می توان به قابلیت یادگیری، قابلیت تعمیم و پردازش موازی آن اشاره کرد. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سازمان‌دهی داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی و تحلیل اجزای محدود فرایند، می‌توان یک راه حل ساده‌تر و سریع‌تر برای حل این مسئله به دست آورد.

6- طراحی آزمایش به روش رویه‌ی پاسخ[4]

روش رویه‌ی پاسخ شامل مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که به منظور تعیین یک تابع مناسب بین پاسخ[5]، y و تعدادی از متغیرهای قابل

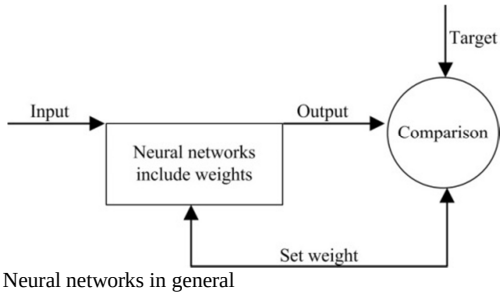

Fig. 8 Neural networks in general

شکل 8 شبکه عصبی در حالت کلی

[3] Artificial Neural Networks (ANN)
[4] Response Surface Methodology (RSM)
[5] Response

کنترل[1] یا ورودی که با $x_1, x_2 \dots, x_k$ نمایش داده می‌شود، به کار می‌رود. به طور کلی، تعیین دقیق این رابطه غیر ممکن است اما می‌توان آن را به کمک یک تابع چند جمله‌ای با درجه‌ی پایین، به صورت زیر، تقریب زد:

$$y = f'(x)\beta + \epsilon$$

در این معادله، x به صورت $x = (x_1, x_2 \dots, x_k)$ تعریف می‌شود و $f(x)$ یک تابع برداری با p درایه است. این تابع از توان‌های $x_1, x_2 \dots, x_k$ و همچنین ضرب خارجی توان‌های $x_1, x_2 \dots, x_k$ تا یک درجه‌ی مشخص، که با $w\ (\geq 1)$ نشان داده می‌شود، تشکیل شده است. β برداری متشکل از p ضریب ثابت مجهول است و ϵ نیز خطای تصادفی تجربی با فرض میانگین صفر می‌باشد. در این تحقیق، برای پیش‌بینی مقادیر پاسخ از مدل چند جمله‌ای درجه دو مطابق رابطه 3 در نرم افزار دیزاین اکسپرت[2] استفاده شده است.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

در رابطه بالا β_0، βi، βii و βij ضرایب برازش چند جمله‌ای می‌باشد. x_i و x_j متغیرهای مستقل طراحی و Y تابع هدف است.

7- نتایج

فشار داخلی، تغذیه محوری و زمان اعمال فشار از پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا می‌باشد که بر خروجی‌های فرآیند تاثیرگذار می‌باشد. برای یافتن شرایط بهینه‌ی فرآیند، سه عامل فشار داخلی، تغذیه محوری و زمان اعمال فشار به عنوان متغیرهای ورودی مسأله در نظر گرفته شد. در این پژوهش هدف، تولید نمونه‌هایی با شعاع گوشه کمتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر می‌باشد بنابراین شعاع گوشه، کمینه ضخامت و بیشینه ضخامت به عنوان خروجی‌های شبیه‌سازی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت تا مشخص شود به ازای چه مقادیری از ورودی‌ها، نمونه با شعاع گوشه کوچک‌تر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر حاصل می‌شود.

7-1- شبیه‌سازی عددی

به منظور به دست آوردن ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی، آزمایش‌های شبیه‌سازی در سه سطح 13.2 bar، 14.52 و 15.84 برای فشار داخلی، 0 mm، 1.5 و 3 برای اندازه‌ی تغذیه محوری و 30 s، 60 و 90 برای زمان اعمال فشار انجام گرفت. پس از انجام 27 (3^3) مرتبه اجرای شبیه‌سازی در سطوح بالا، مقادیر شعاع گوشه، کمینه ضخامت و بیشینه ضخامت لوله به عنوان خروجی‌های شبیه‌سازی استخراج شد. این نتایج در جدول 2 آورده شده است.

در شکل‌های 9 تا 11 تاثیرگذاری هرکدام از پارامترهای فشار دخلی، تغذیه محوری و زمان اعمال فشار، بر شعاع گوشه، کمینه ضخامت و بیشینه ضخامت نشان داده شده است. از آنجاکه پارامترهای ورودی از یک نوع نمی‌باشد، به منظور مقایسه تاثیرگذاری هرکدام از پارامترهای ورودی بر خروجی‌های مساله بر روی یک شکل، سه سطح ابتدایی، متوسط و انتهایی از پارامترهای ورودی به صورت اعداد 0، 0.5 و 1 نشان داده شده است. برای بررسی تاثیر هرکدام از پارامترهای ورودی، دو متغیر دیگر در حالت میانی خود ثابت باقی مانده است و متغییر مورد نظر در سه سطح تغییر کرده تا تاثیر آن بر پارامترهای خروجی مشخص شود.

به منظور بررسی تاثیر متقابل پارامترها، از مدلی که با استفاده از روش پاسخ سطح بین ورودی‌ها و خروجی‌ها برقرار شده، استفاده گردید. در شکل

جدول 2 نتایج حاصل از شبیه‌سازی

Table 2 Simulation results

آزمایش	فشار(bar)	تغذیه(mm)	زمان(s)	بیشینه ضخامت(mm)	کمینه ضخامت(mm)	شعاع(mm)
1	15.84	3	30	1.90	0.85	4.85
2	15.84	0	90	1.48	0.77	4.23
3	13.2	0	90	1.48	0.85	5.32
4	13.2	1.5	30	1.67	0.92	5.9
5	14.52	0	30	1.48	0.85	5.35
6	14.52	3	60	1.89	0.86	5.04
7	15.84	3	90	1.96	0.8	4.32
8	14.52	1.5	60	1.74	0.84	4.96
9	13.2	0	30	1.48	0.9	5.86
10	14.52	3	30	1.87	0.89	5.53
11	15.84	1.5	60	1.77	0.8	4.45
12	13.2	3	30	1.82	0.94	5.94
13	15.84	1.5	30	1.72	0.83	4.8
14	13.2	3	60	1.85	0.91	5.69
15	15.84	0	30	1.43	0.82	4.73
16	14.52	0	60	1.48	0.82	4.90
17	15.84	1.5	90	1.79	0.79	4.27
18	14.52	1.5	90	1.76	0.82	4.74
19	13.2	1.5	60	1.71	0.89	5.65
20	13.2	1.5	90	1.73	0.87	5.4
21	13.2	3	90	1.89	0.89	5.48
22	14.52	3	90	1.92	0.84	4.80
23	14.52	1.5	30	1.70	0.87	5.44
24	15.84	0	60	1.48	0.78	4.41
25	14.52	0	90	1.48	0.81	4.68
26	15.84	3	60	1.93	0.81	4.50
27	13.2	0	60	1.43	0.87	5.6

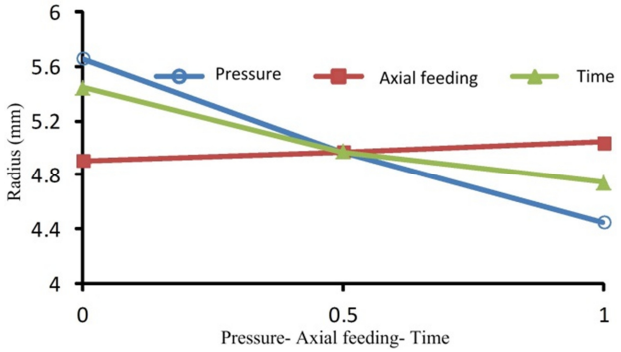

Fig. 9 Effect of input parameters on the corner radius

شکل 9 تاثیر پارامترهای ورودی بر شعاع گوشه

12 معادلات و سطوح پاسخ مربوط به هریک از خروجی‌های فرآیند بر حسب متغیرهای ورودی نشان داده شده است. در هریک از شکل‌ها، یکی از متغیرهای ورودی در مقدار میانگین خود ثابت باقی می‌ماند و دو متغیر دیگر در محدوده مجاز تعیین شده تغییر می‌یابند.

بررسی شکل‌های 9 تا 12 نشان می‌دهد در پارامترهای خروجی شعاع گوشه و کمینه ضخامت، دو پارامتر ورودی فشار و زمان اعمال فشار به صورت همسو عمل می‌کنند و تغذیه محوری عکس این دو پارامتر تاثیر می‌گذارد. با افزایش فشار داخلی و زمان اعمال فشار تا بیشینه مقدار خود، شعاع گوشه

[1] Control Variables
[2] Design Expert

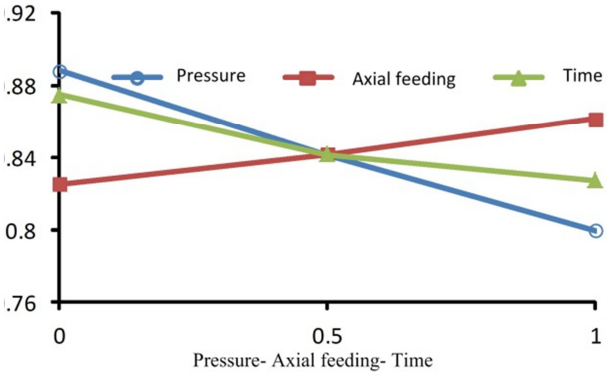

Fig. 10 Effect of input parameters on the minimum thickness

شکل 10 تاثیر پارامترهای ورودی بر کمینه ضخامت

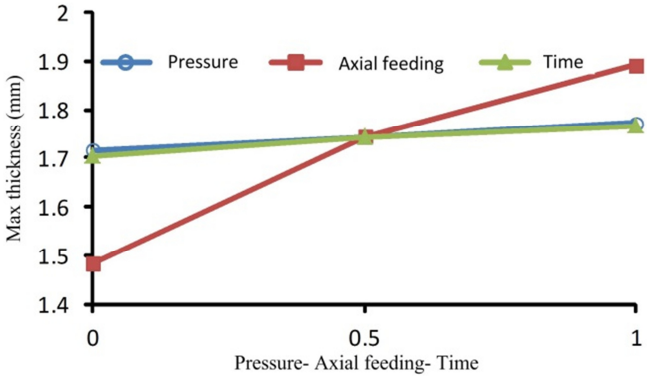

Fig. 11 Effect of input parameters on the maximum thickness

شکل 11 تاثیر پارامترهای ورودی بر بیشینه ضخامت

21.3% و 12.8% کاهش می‌یابد و در اثر افزایش تغییر شکل، کمینه ضخامت نیز 9.9% و 5.4% کاهش پیدا می‌کند. با افزایش تغذیه محوری این نازک‌شدگی کاهش می‌یابد و کمینه ضخامت 4.4% افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش تغذیه محوری، ماده بیشتری به گوشه‌های قطعه تغذیه می‌شود، از آنجاکه فشار و زمان ثابت می‌باشد تنش و نیروی شکل‌دهی افزایش پیدا نمی‌کند تا بتواند گوشه‌های قطعه را بیشتر شکل دهد در نتیجه شعاع گوشه‌ها افزایش پیدا می‌کند. تغییرات بیشینه ضخامت نیز نشان می‌دهد این پارامتر خروجی بیشتر تابعی از تغذیه محوری می‌باشد و با افزایش تغذیه، 27.5% افزایش می‌یابد و فشار و زمان تاثیر چندانی بر این پارامتر ندارد. بررسی شیب نمودارها نشان می‌دهد مهمترین عامل تاثیرگذار در تغییرات شعاع گوشه و کمینه ضخامت، فشار داخلی و در بیشینه ضخامت، تغذیه محوری می‌باشد. ضرایب عبارت‌های AB و BC در چند جمله‌ای مربوط به خروجی بیشینه ضخامت نشان می‌دهد اثر متقابل تغذیه محوری- زمان و تغذیه محوری- فشار پارامتری تاثیرگذار در خروجی می‌باشد اما در سایر چند جمله‌ای‌ها اثرات متقابل زیاد به چشم نمی‌آیند.

مشاهده می‌شود سه پارامتر ورودی تاثیرهای متفاوتی بر خروجی‌های مساله دارند و سه خروجی هم‌زمان نمی‌توانند بهترین حالت خود را داشته باشند. برای دست‌یابی به قطعه‌ای مطلوب، نیاز به انتخاب حالت بهینه‌ای از پارامترهای ورودی می‌باشد تا در نهایت قطعه‌ای با شعاع گوشه کوچکتر و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر حاصل شود. انتخاب حالت بهینه توسط الگوریتم ژنتیک صورت گرفته که نتایج حاصله در ادامه آورده شده است.

7-2- بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی

استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی منوط به صحت‌سنجی آن با نتایج تجربی می‌باشد. به منظور معتبرسازی نتایج شبیه‌سازی، آزمایش‌های عملی با استفاده از مجموعه شکل‌دهی دمشی در دمای 500C و فشار 12bar انجام شد. قطعه تولید شده در این شرایط در شکل 13 نشان داده شده است.

کمینه و بیشینه ضخامت و شعاع گوشه قطعات شکل گرفته شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در شرایطی یکسان مقایسه شده است. این نتایج در جدول 3 نشان داده شده است.

در جدول 3 مشاهده می‌شود شبیه‌سازی عددی با دقت بسیار خوبی شعاع گوشه قطعات سطح مقطع مربعی را در فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا پیش‌بینی کرده است، به طوری که درصد خطا برابر 5.44% شده است. همچنین خطای شبیه‌سازی انجام شده در پیش‌بینی کمینه و بیشینه ضخامت به ترتیب برابر 5% و 4.1% می‌باشد. نتایج حاصل از مقایسه بین شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج عملی دارد و نرم‌افزار اجزای محدود با دقت خوب و خطای کمی، نتایج را پیش بینی کرده است.

7-3- شبکه عصبی

یکی از مرسوم ترین انواع شبکه های عصبی، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) است که به طور موفقیت آمیزی در بازه وسیعی از کاربردها از جمله طبقه‌بندی داده‌ها و شناسایی الگو، مورد استفاده قرار گرفته است. به علت پیچیدگی و تنوع داده‌ها، توجه به انتخاب روش آموزش شبکه عصبی با توجه به زمان‌بر بودن آن، اهمیت فراوانی دارد. یکی از فاکتورهای اساسی و عملی در آموزش، نرخ همگرایی شبکه است که رابطه مستقیمی با مدت زمان آموزش خواهد داشت که برای روش‌های گرادیانی که امروزه برای آموزش شبکه عصبی استفاده می شود، کاملا وابسته به نقطه شروع خواهد بود. از طرفی شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، توپولوژی خوبی برای تابع تقریب دارد و مسائلی که بصورت غیرخطی هستند را با پیچیدگی زمانی کم حل می کند، چرا که بصورت موازی کار را پیش می‌برد و همچنین دارای تعمیم‌دهندگی خوبی است. از آنجا که شبکه‌های عصبی لایه‌ای می تواند هر نوع مسئله غیرخطی را حل کند، در این پژوهش از شبکه عصبی سه لایه استفاده شده است.

برای ساخت و آموزش شبکه از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. به منظور ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های حاصل از آزمایش‌های شبیه‌سازی و ایجاد یک تابع تخمین مناسب، شبکه عصبی مناسب با مشخصات زیر آموزش داده شد:

تعداد نورون‌های لایه‌های ورودی و خروجی به ترتیب برابر تعداد متغیرهای طراحی و توابع خروجی یعنی عدد سه است. این شبکه، یک شبکه پیش‌خور از نوع پس‌انتشار بوده که به روش لونبرگ- مارکورات[1] آموزش داده شده است. توابع محرک لایه‌های پنهان و خروجی به ترتیب به صورت توابع تانژانت سیگموئد[2] و خطی تعریف شده است.

جدول 3 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

Table 3 Comparison between simulation results with experimental data

	شعاع	کمینه ضخامت	بیشینه ضخامت
تجربی	5.7mm	1mm	1.19mm
شبیه‌سازی	6.01mm	1.048mm	1.25mm
خطا	5.44%	4.8%	5.04%

[1] Levenberg-Marquardt
[2] Tangent Sigmoid

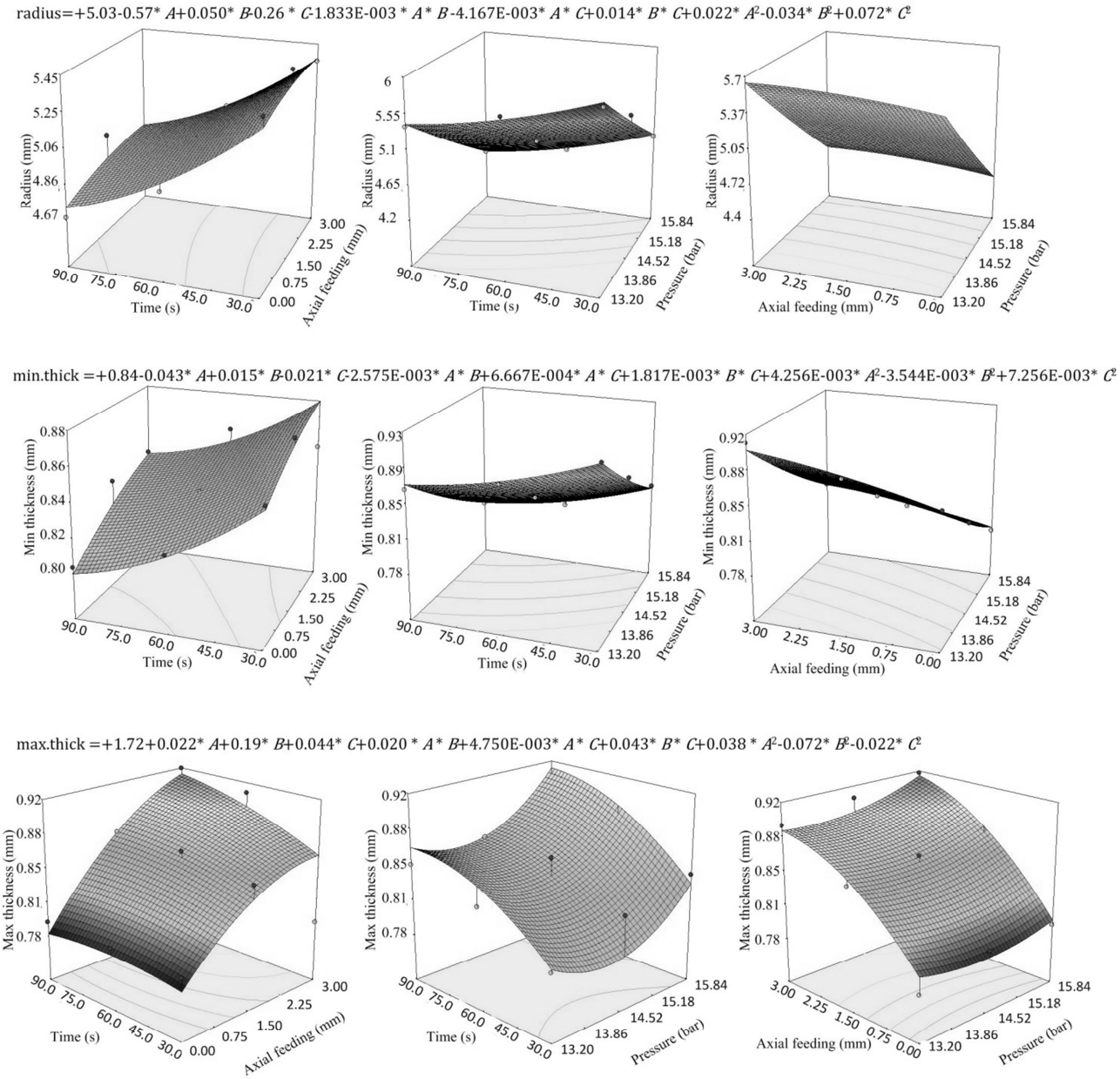

Fig. 12 The interaction of input parameters (in equations, pre: internal pressure, dis: axial feeding and time: pressure time)

شکل 12 اثر متقابل پارامترهای ورودی (در معادلات pre فشار داخلی، dis تغذیه محوری و time زمان اعمال فشار می‌باشد.)

برای ارزیابی دقت آموزش شبکه عصبی، برای هریک از پارامترهای شعاع گوشه، کمینه و بیشینه ضخامت، رگرسیون خطی بین نقاط شبیه‌سازی شده و خروجی شبکه عصبی انجام شده است. یک ملاک مناسب برای تعیین همبستگی دو متغیر کمی ضریب همبستگی پیرسن است که با R_{xy} نشان داده می‌شود و مطابق رابطه (4) بدست می‌آید. ضریب همبستگی شاخصی است که میزان رابطه بین متغیرها را نشان می‌دهد، این ضریب همواره بین 1 و 1- می‌باشد. درصورتیکه ضریب همبستگی برابر 1 باشد، همبستگی کامل و مستقیم می‌باشد و اگر 1- باشد، همبستگی کامل و غیر مستقیم می‌باشد. اگر این ضریب برابر صفر شود دو متغییر همبستگی ندارند.

$$R_{xy}=\frac{\overline{x.y}-\bar{x}.\bar{y}}{\sqrt{s_x{}^2\,.\,s_y{}^2}} \qquad (4)$$

هریک از اجزای فرمول ضریب همبستگی به صورت زیر است:

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i\ , \qquad \bar{y}=\frac{1}{n}\sum y_i\ , \qquad \overline{xy}=\frac{1}{n}\sum x_i\,y_i\ ,$$
$$s_x{}^2=\overline{x^2}-\bar{x}^2, \qquad s_y{}^2=\overline{y^2}-\bar{y}^2$$

Fig. 13 Specimen produced in 500C and 12bar

شکل 13 نمونه تولید شده در دمای 500C و فشار 12bar

نتایج حاصل از مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی عددی و شبکه عصبی و همچنین ضرایب همبستگی بدست آمده برای هرکدام از خروجی‌ها در شکل 14 نشان داده شده است. نتایج رگرسیون بیان می‌کند که ضریب همبستگی برای تمامی نمودارها بالاتر از $R = 0.92$ است که نشان می‌دهد شبکه به خوبی آموزش دیده است.

7-4- مدل رگرسیون

به منظور مقایسه دقت شبکه عصبی با مدل رگرسیونی در پیش‌بینی خروجی‌های مساله، از مدل چند جمله‌ای درجه دوم به صورت رابطه (3) استفاده شده است. با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی، مقادیر ضرایب این معادله به کمک روش رگرسیونی و با استفاده از نرم افزار

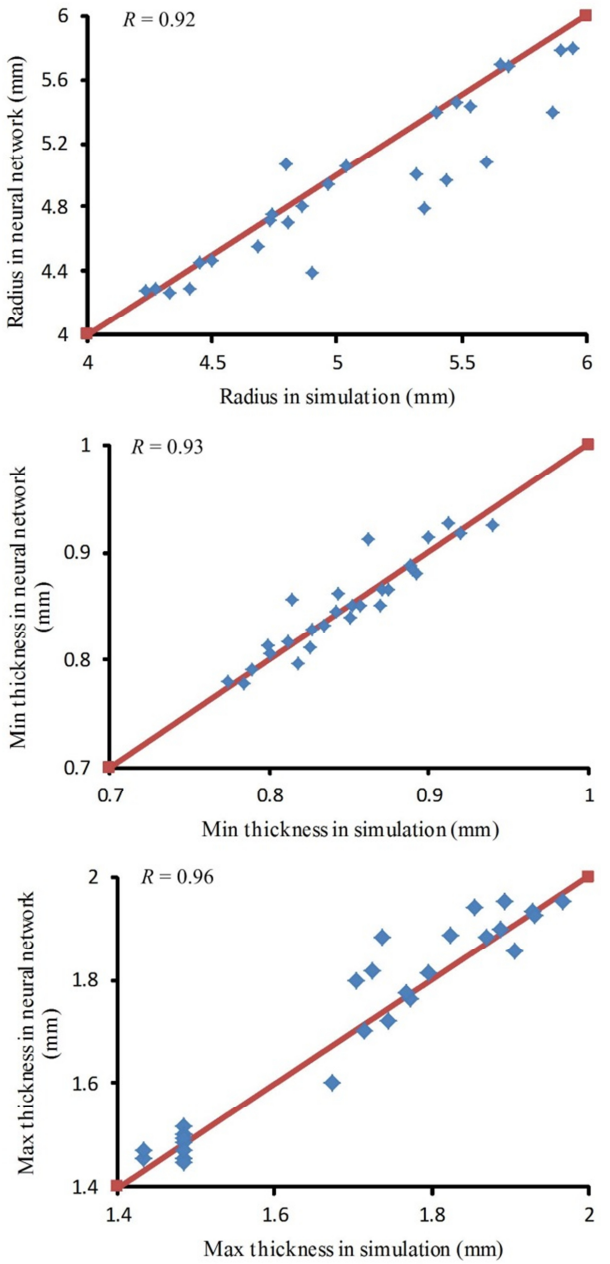

Fig. 14 Comparison between radius, minimum and maximum thickness on the simulation and prediction of neural network

شکل 14 مقایسه شعاع گوشه، کمینه و بیشینه ضخامت حاصل از شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی شبکه عصبی

دیزاین اکسپرت[1] محاسبه شدند. با جایگذاری مقادیر در معادله (3)، مدل نهایی شعاع گوشه، کمینه ضخامت و بیشینه ضخامت به صورت معادله‌های 5، 6 و 7 خواهد بود:

$$radius = 14.65206 - 0.79634pre + 0.072667dis - 0.017307time - 0.000925926\ pre \times dis - 0.000105219\ pre \times time + 0.000318519\ dis \times time + 0.012818\ pre^2 - 0.015037dis^2 + 0.0000798148\ time^2 \quad (5)$$

$$min.thick = 1.87705 - 0.10278pre + 0.031335dis - 0.00197426time - 0.00130051pre \times dis + 0.000016835\ pre \times time + 0.0000403704dis \times time + 0.00244235pre^2 - 0.00157531dis^2 + 0.00000806173time^2 \quad (6)$$

$$max.thick = 6.09354 - 0.64499pre + 0.018889dis + 0.00118519time + 0.010017pre \times dis + 0.000119949pre \times time + 0.000964815dis \times time + 0.022032pre^2 - 0.031901dis^2 - 0.0000241975time^2 \quad (7)$$

همان‌گونه که در بخش شبکه عصبی برای ارزیابی دقت شبکه، رگرسیون خطی بین نقاط شبیه‌سازی شده و خروجی شبکه عصبی انجام شد، در این بخش نیز برای بررسی دقت مدل رگرسیونی در پیش‌بینی خروجی‌های مساله، برای هریک از پارامترهای شعاع گوشه، کمینه و بیشینه ضخامت، رگرسیون خطی بین نقاط شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از معادله‌های 5، 6 و 7 انجام شد و ضرایب همبستگی برای هرکدام از خروجی‌ها بدست آمد. در شکل 15 رگرسیون خطی بین نتایج شبیه‌سازی و مدل رگرسیونی و ضرایب همبستگی حاصل از هرکدام از خروجی‌ها نشان داده شده است.

در شکل 15 مشاهده می‌شود ضریب همبستگی برای تمام خروجی‌ها بالای 0.98 می‌باشد، این ضریب همبستگی بالا حاکی از دقت بالای مدل رگرسیونی در پیش‌بینی خروجی‌های مساله می‌باشد. مقایسه ضرایب همبستگی در شبکه عصبی و مدل رگرسیونی نشان می‌دهد، ضرایب همبستگی در تمام خروجی‌ها برای مدل رگرسیونی بیشتر از مدل عصبی می‌باشد. میانگین ضرایب همبستگی در مدل رگرسیونی 0.986 و در شبکه عصبی برابر 0.936 می‌باشد. بیشتر بودن ضریب همبستگی در مدل رگرسیونی نشان می‌دهد در این مساله مدل رگرسیونی نسبت به مدل عصبی، مدلی مناسب‌تر و دقیق‌تر برای پیش‌بینی خروجی‌های مساله می‌باشد. دلیل دقت بالاتر مدل رگرسیونی نسبت به مدل عصبی نیز تعداد کم داده‌های مساله می‌باشد، مدل عصبی به منظور آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی نیاز به داده‌های بیشتری دارد تا کارایی مناسب‌تری از خود نشان دهد.

7-5- الگوریتم ژنتیک

پس از مقایسه دقت مدل رگرسیونی و مدل عصبی در پیش‌بینی خروجی‌های فرآیند، این نتیجه حاصل شد که در این مساله مدل رگرسیونی دارای دقت بیشتری می‌باشد. در ادامه به منظور یافتن شرایط بهینه برای پارامترهای فشار داخلی، تغذیه محوری و زمان اعمال فشار برای حداکثر کردن مقدار

[1] Design Expert

کمینه ضخامت و حداقل کردن شعاع گوشه و بیشینه ضخامت، مدل رگرسیونی به دست آمده به عنوان تابع هزینه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

الگوریتم ژنتیک دارای پارامترهای اولیه‌ای می‌باشد که بر خروجی الگوریتم تاثیرگذار می‌باشد، این پارامترها بعد از صحیح و خطا و در حالتی که خروجی در بهترین حالت خود می‌باشد، انتخاب شده است. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده دارای جمعیت اولیه 200 کروموزوم، تعداد نسل 2000 و نرخ تقاطع 0.8 می‌باشد. الگوریتم ژنتیک چند هدفه با ابزارهای متداول جهش و آمیزش صورت گرفته و اعضای هر نسل به صورت غیر مغلوب مرتب‌سازی شده‌اند تا به تدریج جبهه پارتو نهایی شکل بگیرد. جبهه نهایی حاصل شده

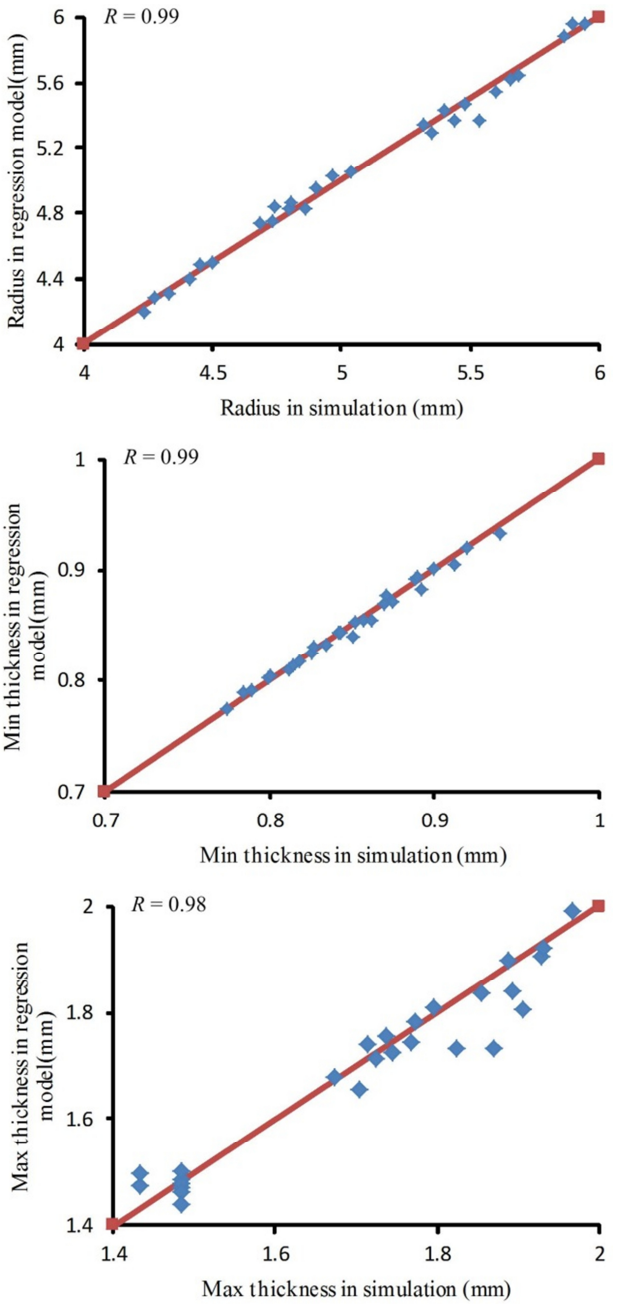

Fig. 15 Comparison between radius, minimum and maximum thickness on the simulation and prediction of regression model

شکل 15 مقایسه شعاع گوشه، کمینه و بیشینه ضخامت حاصل از شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی مدل رگرسیونی

در شکل 16 نشان داده شده است. تمامی نقاط پارتو به نوعی نقاط بهینه هستند؛ بدین معنی که هیچ یک از آن‌ها بر دیگری برتری کامل ندارد ولی نسبت به نقاط دیگر برترند. اما در نهایت یکی از این نقاط باید برای ساخت و اجرا انتخاب شود.

همان‌طور که متداول است برای معرفی یک نقطه بینابینی که از نظر همه اهداف مناسب باشد، در فضای توابع هدف نقطه یوتوپیا (نقطه‌ای که از مقادیر حداقل هر سه تابع تشکیل می‌شود) تعیین شده و نزدیکترین نقطه از جبهه پارتو به یوتوپیا، به عنوان این نقطه بینابینی معرفی و مقادیر متغیرهای طراحی متناظر با آن ارائه می‌شود.

با توجه به این‌که پارامترهای دخیل در بهینه‌سازی، هرکدام دارای واحدهای متفاوتی بوده و از یک جنس نمی‌باشد، لذا مقایسه آنها با یکدیگر صحیح نیست. بنابراین به منظور ایجاد امکان مقایسه، ابتدا باید پارامترها را نرماله نمود تا مقایسه آنها درست و معنی‌دار گردد. بر همین اساس برای نرماله کردن داده‌ها یکی از روابط (8) و (9) به ترتیب زیر استفاده می‌شود [18].

در حالتی که کمترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ باشد از رابطه

$$X^*_i(k) = \frac{X^0_i(k) - \min X^0_i(k)}{\max X^0_i(k) - \min X^0_i(k)} \quad (8)$$

و هنگامی که بیشترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ است از رابطه

$$X^*_i(k) = \frac{\max X^0_i(k) - X^0_i(k)}{\max X^0_i(k) - \min X^0_i(k)} \quad (9)$$

استفاده می‌شود. در این روابط پارامترهای $X^*_i(k)$ مقدار پارامتر نرماله شده در i امین پاسخ و $X^0_i(k)$ مقدار داده به صورت خام می‌باشد.

با توجه به مقادیر جبهه پارتو کمترین مقدار برای شعاع گوشه 4.26mm و مربوط به نقطه‌ای با مختصات (16bar, 0.04mm, 69.9s)، بیشترین مقدار کمینه ضخامت 0.94mm متعلق به نقطه‌ای با مختصات (13bar, 2.84mm, 30s) و کمترین مقدار بیشینه ضخامت برابر 1.45mm در نقطه‌ای با مختصات (14.56bar, 0.016mm, 34.21s) می‌باشد که تشکیل نقطه یوتوپیا با مختصات (4.26mm , 0.94mm , 1.45mm) می‌دهند. پس از نرماله کردن پارامترها با استفاده از فرمول‌های (8) و (9)، کمترین فاصله نقاط جبهه پارتو از نقطه یوتوپیا محاسبه شد.

کمترین فاصله مربوط به نقطه‌ای با مختصات (4.43mm , 0.808mm , 1.93mm) می‌باشد که فشار داخلی 15.82bar، تغذیه محوری 2.76mm و زمان اعمال فشار 69.02s است. این نقطه به عنوان نقطه بهینه نهایی انتخاب شد. به منظور ارزیابی نقطه بهینه به‌دست آمده، شبیه‌سازی فرآیند در این نقطه انجام گرفت. در جدول 4 نتایج حاصل

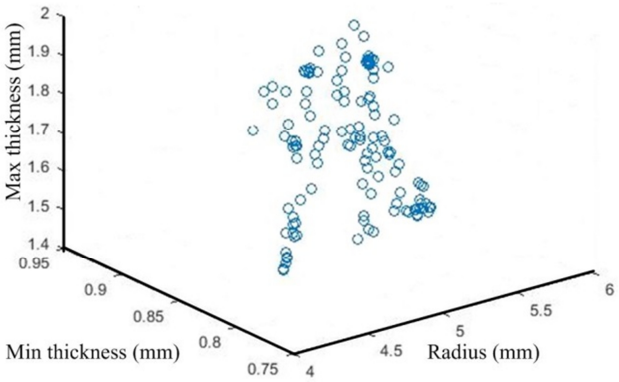

Fig. 16 Pareto front and optimal points

شکل 16 جبهه پارتو و نقاط بهینه

از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود مدل رگرسیونی و الگوریتم ژنتیک توانسته است با دقت خوبی نقطه بهینه را پیش‌بینی کند.

در انتها، بعد از آنکه پارامترهای بهینه با استفاده از مدل رگرسیونی و الگوریتم ژنتیک حاصل شد و نتایج آن با شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفت، با استفاده از پارامترهای بهینه، نمونه‌ای توسط مجموعه شکل‌دهی دمشی در دمای 500 C تولید شد. نمونه تولید شده با استفاده از پارامترهای بهینه در شکل 17 نشان داده شده است.

8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تولید نمونه‌های مربعی با استفاده از روش شکل‌دهی با دمش گاز در دماهای بالا بر روی لوله‌های آلومینیومی 6063 مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت و دقت مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیونی در پیش‌بینی خروجی‌های فرآیند بررسی شد و درنهایت با استفاده از مدل رگرسیونی و الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه فرآیند بدست آمد. نتیجه‌گیری به‌دست آمده به شرح زیر است:

1. فشار داخلی با 21.3% و 9.9% تاثیر در شعاع گوشه و کمینه ضخامت و تغذیه محوری با 27.5% تاثیر در بیشینه ضخامت مهمترین عامل‌های تاثیرگذار در این پارامترهای خروجی می‌باشد.
2. نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج عملی دارد و نرم‌افزار اجزای محدود با دقت خوب و خطای کمی، نتایج را در فرآیند شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا پیش بینی کرده است.
3. رگرسیون خطی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج حاصل از مدل رگرسیونی و شبکه عصبی نشان می‌دهد مدل رگرسیونی با دقت بیشتری خروجی‌ها را پیش‌بینی می‌کند به‌طوری که میانگین ضرایب همبستگی در مدل رگرسیونی برابر 0.986 و در مدل عصبی 0.936 می‌باشد.
4. کمترین مقدار برای شعاع گوشه، 4.26mm و مربوط به نقطه‌ای با مختصات (16bar, 0.04mm, 69.9s)، بیشترین مقدار کمینه ضخامت، 0.94mm با مختصات (13bar, 2.84mm, 30s) و کمترین مقدار بیشینه ضخامت برابر 1.45mm در نقطه‌ای با مختصات (14.56bar, 0.016mm, 34.21s) می‌باشد که تشکیل نقطه یوتوپیا با مختصات (4.26mm , 0.94mm , 1.45mm) را می‌دهند.
5. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد نقطه‌ای با مقدار فشار داخلی 15.82bar، تغذیه محوری 2.76mm و زمان اعمال فشار 69.02s نقطه بهینه را تشکیل می‌دهد و شعاع گوشه، کمینه ضخامت و بیشینه ضخامت به ازای این مقادیر بهینه به ترتیب برابر 4.43mm، 0.808mm و 1.93mm می‌باشد.
6. نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از مدل رگرسیونی و الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد این روش در شکل‌دهی دمشی در دماهای بالا بسیار موثر و کاربردی است.

جدول 4 مقایسه نتیجه حاصل از شبیه‌سازی عددی و مدل رگرسیونی در نقطه بهینه نهایی

Table 4 Comparison between simulation and regression model result in optimum point

	شعاع گوشه	کمینه ضخامت	بیشینه ضخامت
شبیه‌سازی	4.56mm	0.830mm	2.01mm
بهینه‌سازی	4.43mm	0.808mm	1.93mm
درصد خطا	3%	2.8%	4.4%

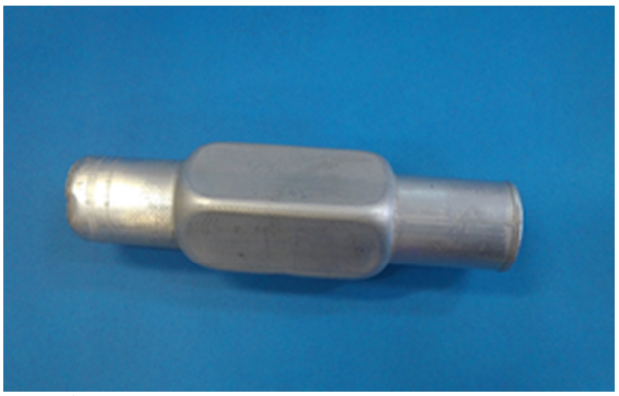

Fig. 17 final specimen produced by using the optimal parameters

شکل 17 قطعه نهایی تولید شده با استفاده از پارامترهای بهینه

9- مراجع

[1] H. Choi, M. Koc, J. Ni, A study on the analytical modeling for warm hydro-mechanical deep drawing of lightweight materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 11, pp. 1752-1766, 2007.

[2] H. Choi, M. Koç, J. Ni, Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, No. 1, pp. 230-242, 2007.

[3] M.-Y. Lee, S.-M. Sohn, C.-Y. Kang, D.-W. Suh, S.-Y. Lee, Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155, No. 2, pp. 1337-1343, 2004.

[4] S. Novotny, M. Geiger, Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 594-599, 2003.

[5] Y. Aue-u-lan, *Hydroforming of tubular materials at various temperatures*, pp. 25, The Ohio State University, Doctoral dissertation, 2007.

[6] Z.-b. He, X.-b. Fan, S. Fei, K.-l. Zheng, Z.-b. Wang, S.-j. Yuan, Formability and microstructure of AA6061 Al alloy tube for hot metal gas forming at elevated temperature, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 2, pp. 364-369, 2012.

[7] H. Yi, E. Pavlina, C. Van Tyne, Y. Moon, Application of a combined heating system for the warm hydroforming of lightweight alloy tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1, pp. 532-536, 2008.

[8] S. M. H. Seyedkashi, H. Moslemi Naeini, G. H. Liaghat, M. Mosavi Mashadi, Y. H. Moon, Numerical and experimental study on the effects of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminum tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, 2012. (in Persian فارسی)

[9] S. J. Hashemi, H. Moslemi Naeini, G. H. Liaghat, J. Shahbazi Karami, A. H. Roohi, Prediction of bursting in warm tube hydroforming using modified ductile fracture criteria, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 211-201, 2015. (in Persian فارسی)

[10] A.-W. El-Morsy, K.-i. Manabe, FE simulation of rectangular box forming using material characteristics from the multi-dome forming test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125, No. 9, pp. 772-777, 2002.

[11] A. El-Morsy, N. Akkus, K. Manabe, H. Nishimura, Evaluation of superplastic characteristics of tubular materials by multi-tube bulge test, *Materials Letters*, Vol. 60, No. 4, pp. 559-564, 2006.

[12] M. S. Zoei, M. Farzin, A. H. Mohammadi, Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 49-56, 2011. (in Persian فارسی)

[13] T. Maeno, K.-i. Mori, C. Unou, Improvement of die filling by prevention of temperature drop in gas forming of aluminium alloy tube using air filled into sealed tube and resistance heating, *Procedia Engineering*, Vol. 81, No. 31, pp. 2237-2242, 2014.

[14] T. Maeno, K.-i. Mori, K. Adachi, Gas forming of ultra-high strength steel hollow part using air filled into sealed tube and resistance heating, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 1, pp. 97-105, 2014.

[15] T. Maeno, K.-i. Mori, K. Fujimoto, Hot gas bulging of sealed aluminium alloy tube using resistance heating, *Manufacturing Review*, Vol. 1, No. 5, pp. 31-38, 2014.

[16] M. Nasrollahzade, H. Moslemi Naeini, S. J. hashemi, B. Abbaszadeh[4], J. Shahbazi Karami, Experimental investigation of Aluminum tubes hot gas forming and production of square cross-section specimens, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 442-435, 2015. (inPersian فارسی)

[17] D. Kalynmoy, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, *Multi-Objective Optimization*, Vol. 16, No. 5, pp. 88-89, 2001.

[18] U. Caydas, A. Hascalik, Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics, *Optics & laser technology*, Vol. 40, No. 7, pp. 987-994, 2008