



## بررسی تجربی و المان محدود فرآیند شکل دهی داغ با دمش گاز لوله های دولایه کامپوزیتی A6063-AZ80 با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی

محمد امین شاهرخیان دهکردی<sup>1</sup>، جواد شهبازی کرمی<sup>2</sup>، غلامحسن پایگانه<sup>3\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، اصفهان، ایران

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

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

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

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/4/15

پذیرش: 96/6/5

### چکیده

امروزه با توجه به نیاز صنایع مختلف به قطعات با استحکام بالا و وزن پایین، روش ساخت قطعات اهمیت بسیاری پیدا کرده است. روش شکل دهی داغ با دمش گاز، فرآیند نوینی است که به دلیل حذف عملیات جانبی مانند جوشکاری، وزن کلی قطعات کاهش یافته، استحکام افزایش و در نهایت زمان تولید کاهش می یابد. در فرآیند هیدروفرمینگ به علت استفاده از سیال آب و یا روغن نمی توان از دماهای خیلی بالا برای شکل دهی استفاده نمود اما در فرآیند شکل دهی داغ با دمش گاز با توجه به اینکه سیال مورد استفاده گاز است محدودیت دما وجود ندارد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی برای دماهای مختلف 350، 400، 450 درجه سانتی گراد پارامترهای تغذیه محوری و فشار داخلی هر کدام در سه سطح از نظر کمترین مقدار نازک شدگی مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی این حالات با استفاده از شبیه سازی المان محدود بوده است و بهترین حالت بدست آمده مورد آزمون عملی فرآیند بالچ آزاد گرم بر روی لوله دولایه کامپوزیتی A6063-AZ80 قرار گرفت. نتایج حاصل از روش تاگوچی و شبیه سازی اجزا محدود فرآیند نشان می دهد که بالچ لوله در دمای 400°C و فشار داخلی به مقدار 55bar با تغذیه محوری 4 میلی متر بهترین حالت برای انجام فرآیند شکل دهی داغ با دمش گاز است که آزمایشات عملی نیز در این شرایط با موفقیت انجام پذیرفت و با بیشینه اختلاف 5.49 درصدی در مقدار کاهش ضخامت نسبت به نتایج شبیه سازی تطابق خوبی با آن ها داشت.

### کلیدواژگان:

شکل دهی داغ با دمش گاز

لوله کامپوزیتی

روش تاگوچی

شبیه سازی المان محدود

## Experimental and finite element investigation of hot gas forming process of A6063-AZ80 bi-layered composite tubes using taguchi methods for design of experiments

Mohammad Amin Shahrokhian Dehkordi<sup>1</sup>, Javad Shahbazi Karami<sup>2</sup>, Gholamhasan Payganeh<sup>2\*</sup>

1- Young Researchers Club and the Elite Islamic Azad University of KhomeiniShahr, Esfahan, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16785-163, Tehran, Iran., payganeh@srttu.edu

### Keywords

Hot gas forming,  
Composite tube  
Taguchi method  
Finite element analysis

### Abstract

Given the demand for high strength, light materials in today's industry, fabrication methods implemented for manufacturing parts have become increasingly important. Hot Metal Gas Forming (HMGF) is a novel process that enhances the strength of the parts, while reducing total weight and fabrication time, due to the elimination of auxiliary processes such as welding. High temperatures are not feasible in hydroforming given the presence of water/oil in the forming process; however, there is no temperature limit in HMGF as the working fluid is gas. Drawing on Taguchi methods of experimental design, first, the axial feed and the internal pressure were evaluated at different temperatures (350, 400, 450 °C) and at three levels in terms of lowest thinning. The evaluation was performed through finite element simulation and the resulting optimum conditions were experimentally applied in bulge forming of a double-walled composite Al6063-AZ80 tube. The results of Taguchi methods and finite element simulation show that bulge forming of the tube at 400 °C with an internal pressure of 55 bar and axial feed of 4 mm is optimal for the HMGF process. Experiments were successfully performed under these conditions and showed good agreement with simulation results with a maximum difference of 5.49% in thickness reduction compared to simulations.

### 1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیم و منیزیم دارای نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی مناسب می باشند. مشکل اصلی این آلیاژها شکل پذیری پایین آن ها در دمای اتاق به دلیل وجود درصد بالای عناصر آلیاژی در آلیاژهای آلومینیم

استفاده از آلیاژهای آلومینیم و منیزیم امروزه به علت سبک بودن آن ها در صنایع مختلف از جمله: خودروسازی و هوافضا روبه گسترش می باشد زیرا

### Please cite this article using:

Shahrokhian Dehkordi, M. A. Shahbazi Karami, J. and Payganeh, G., "Experimental and finite element investigation of hot gas forming process of A6063-AZ80 bi-layered composite tubes using taguchi methods for design of experiments", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 79-90, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

مقدار 55 درصد گزارش کرده‌اند [9]. همچنین وادیلو و همکارانش در تحقیق دیگری فرآیند گازفرمینگ را در حالت قالب متحرک و برای دستیابی به قطعه نهایی با مقطع مستطیل شکل از لوله با مقطع اولیه دایره انجام دادند. آن‌ها در تحقیقشان به شبیه‌سازی عددی فرآیند پرداختند و نتیجه شبیه‌سازی را با نتایج حاصل از کار تجربی برای زوایای با شعاع انحنای 3.5 میلی‌متر و با فشار داخلی 2 bar تطبیق دادند [10]. هوانگ و کای لین با روش شبیه‌سازی المان محدود به آنالیز رفتار پلاستیک مواد در محل‌های نازک شده در فرآیند هیدروفرمینگ قالب باز پرداخته و به نتایج قابل توجهی دست یافته‌اند که نشان می‌دهد بیشترین مقدار بالج برابر با 49 میلی‌متر است و تغذیه محوری برای جلوگیری از نازک‌شدگی را ضروری دانستند [11]. تومویوشی و همکاران به بررسی اثر فشار داخلی و شدت جریان به منظور ایجاد گرما و جنس قالب بر روی مقدار بالج برای لوله‌های آلومینیومی پرداختند. نتایج نشان داده است که با افزایش شدت جریان در ابتدا نسبت بالج افزایش یافته و در ادامه کاهش می‌یابد و برای فشار داخلی نیز در ابتدا با افزایش آن مقدار بالج افزایش یافته اما در ادامه ثابت می‌شود. همچنین بیان نمودند که هرچه رسانندگی حرارتی قالب کمتر باشد، پرتشدگی زوایا و گوشه‌های قالب بهتر است [12]. ضوئی و همکاران به بررسی تاثیر دما و فشار بر روی شکل‌پذیری ورق آلومینیومی به صورت تجربی پرداختند که نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دمای فرآیند مقدار فشار داخلی مورد نیاز برای شکل‌دهی کاهش می‌یابد و همچنین شکل‌پذیری ورق آلومینیومی نیز در این حالت افزایش می‌یابد [13]. ژوبین و همکاران در تحقیقی به بررسی خواص مکانیکی لوله‌های اکستروژن شده تحت عملیات گاز فرمینگ گرم در دمای بالا پرداخته و دمای ایده آل برای انجام این فرآیند را معرفی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دما استحکام لوله‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه فشار داخلی کمتری برای شکل‌دهی و ترکیب لوله مورد نیاز است به نحوی که مقدار آن از 6.2 MPa به 1.2 MPa برای لوله TA2 می‌رسد و دمای مناسب جهت انجام فرآیند شکل‌دهی را بین 860 تا 920 درجه سانتی‌گراد برای این نوع لوله معرفی نمودند [14]. موری و همکارانش به بررسی فرآیند گاز فرمینگ لوله‌های استحکام بالا با استفاده از گرمای حاصل از مقاومت الکتریکی پرداخته است و برای گاز پرکننده از دی اکسید کربن استفاده نموده است و به وسیله آن مانع از اکسید شدن لایه داخلی لوله شده است و همچنین دقت ابعادی قطعه حاصل از فرآیند بالا رفته است [15]. شکل‌دهی قطعات فلزی چندلایه با توجه به متفاوت بودن خواص مواد از پیچیدگی خاصی برخوردار است و بسته به نوع فلز باید در دماهای مختلف شکل‌دهی انجام پذیرد. امروزه لوله‌های کامپوزیتی دارای کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون می‌باشند که عبارتند از: اتصالات رادیاتور، لوله‌های کامپوزیتی دو لایه برای استفاده در برابر خوردگی شیمیایی و اکسیدی در محیط‌های ویژه با استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی که در صنایع هسته‌ای و نفت و گاز و پتروشیمی استفاده می‌گردند. همچنین لوله‌های چندلایه کامپوزیتی به طور قابل توجهی خاصیت ارتعاشی را در مصارف خاص تعدیل می‌کند [16].

در این پژوهش با توجه به قابلیت شکل‌پذیری پایین لوله‌های آلومینیومی و منیزیمی در دمای محیط لذا برای شکل‌دهی لوله دولایه AA6063-AZ80 از روش شکل‌دهی داغ با دمش گاز استفاده گردیده است همچنین بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد تا کنون پژوهشی در زمینه بررسی شکل‌دهی داغ با دمش گاز لوله‌های کامپوزیتی دو لایه AA6063-AZ80 به کمک روش طراحی آزمایشات تاگوچی انجام نپذیرفته است. در این پژوهش با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی در ابتدا طراحی آزمایشات برای

و ساختار بلوری شش وجهی فشرده در منیزیم می‌باشد [1]. راه حل مناسب برای افزایش شکل‌دهی این آلیاژها افزایش دما می‌باشد که اگر تا زیر دمای تبلور مجدد باشد به آن شکل‌دهی گرم و اگر بالاتر از آن باشد به آن شکل‌دهی داغ می‌گویند [2]. در سال 2001 میلادی، روش جدیدی برای انجام فرآیند هیدروفرمینگ در دمای بالا پیشنهاد شد. در این روش برای جلوگیری از تبخیر سیال درون لوله، به جای آب یا روغن از گاز به عنوان عامل فشار داخلی استفاده می‌شود. اگرچه پیشینه فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز با استفاده از دمش جریان هوا در صنعت شیشه‌گری به سال‌ها پیش باز می‌گردد، اما شروع تحقیقات بر روی این روش برای استفاده در صنعت فرم‌دهی فلزات، به دهه 1990 باز می‌گردد و البته تا چند سال اخیر کار تحقیقاتی قابل توجهی در این زمینه انجام نشده است [3]. فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز یک روش شکل‌دهی است که در آن یک لوله فلزی تا نزدیکی دمای نقطه ذوب خود حرارت داده می‌شود (معمولاً لوله به وسیله مقاومت الکتریکی گرم می‌شود) و فشار داخلی لوله نیز به وسیله یک گاز افزایش می‌یابد. سپس در اثر انبساط حرارتی گاز محبوس شده در لوله، فشار داخلی افزایش یافته و در صورت نیاز با کمک نیروی پیشروی محوری، شکل خارجی لوله به فرم محفظه قالب درمی‌آید [4]. نیاز و یا عدم نیاز به پیشروی محوری در فرآیند وابسته به شکل نهایی قطعه و میزان کاهش ضخامت در جداره لوله است، به طوری که در صورت امکان و برای به تعویق افتادن پدیده پارگی در لوله وجود پیشروی محوری ضروری است. دمای بالا در این روش این امکان را می‌دهد تا حد کشیدگی فلز افزایش یابد و قطعه با جزئیات بیشتری فرم‌دهی شود و نیاز به نیروی محوری و فشار داخلی بالا نسبت به روش مشابه هیدروفرمینگ نسبتاً کاهش یابد [5]. علت گسترش تحقیقات روی این روش مربوط به مزایا و برتری‌های این روش نسبت به فرآیندهای مشابه نظیر هیدروفرمینگ می‌باشد، که عبارتند از: امکان افزایش دمای قطعه و در نتیجه افزایش قابلیت فرم‌پذیری که در هیدروفرمینگ به دلیل استفاده از سیال مایع مقدور نیست، افزایش یافتن استحکام کششی و صلبیت قطعات تولید شده، بهبود نسبت افزایش قطر لوله در روش شکل‌دهی داغ با دمش گاز خصوصاً در مورد آلیاژهایی مثل آلومینیوم که در دماهای پایین فرم‌پذیری کمی دارند، امکان تیراژ بالاتر به دلیل سیکل‌های کاری کوتاه‌تر در شکل‌دهی داغ با دمش گاز، هزینه پایین‌تر فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز به سبب عدم نیاز به تجهیزات ایجاد فشار هیدرولیکی و نیروی محوری بالا که در هیدروفرمینگ مورد نیاز هستند [6].

مانتو و همکارانش به صورت آزمایشگاهی به بهینه‌سازی پارامترهایی چون ضخامت اولیه لوله، چگالی جریان الکتریکی، فشار اولیه داخل لوله، سرعت و مقدار پیشروی محوری و جنس قالب برای دستیابی به شکل نهایی مورد نظر و بهترین توزیع ضخامت (کمترین کاهش ضخامت دیواره) پرداخته‌اند که از تغذیه محوری نیز استفاده نمودند. نتایج نشان داد که افزایش فشار داخلی گاز و دمای قالب باعث افزایش قابلیت شکل‌پذیری لوله می‌گردد [7]. زارازوا و همکارانش در تحقیقشان به بررسی پارامترهای فشار داخلی، دما و زمان فرآیند در ارتباط با یکدیگر پرداخته‌اند و با بهینه‌سازی این پارامترها حداکثر نرخ افزایش قطر را برای فرآیند بدون قالب به دست آورده‌اند [8]. وادیلو و همکارانش در تحقیقشان به بررسی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فرآیند گازفرمینگ برای آلیاژهای فولادی پرداخته‌اند. آن‌ها در بررسی خود فرآیند را بدون اعمال نیروی محوری و برای حالت بدون قالب و دارای قالب شبیه‌سازی کردند، اما گرادیان دما را در طول فرآیند ثابت فرض کردند و از تغییرات آن صرف نظر نمودند که بیشترین مقدار بالج در فشار 14 bar و به

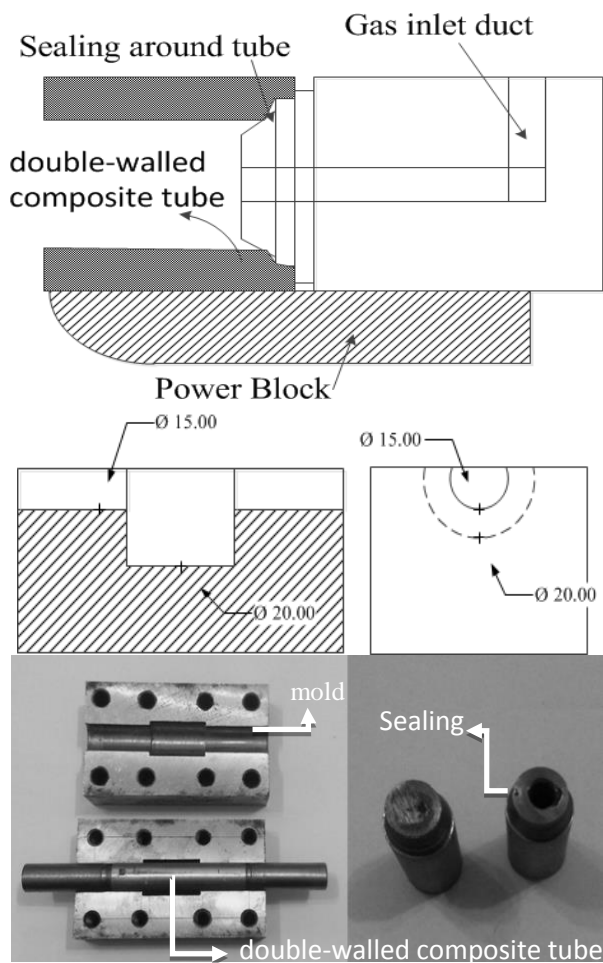


Fig. 1 View of mold and seal

شکل 1 نمای از قالب و آب بند

با جایگذاری المنت، اطراف آن با مواد نسوز و پشم سنگ پوشیده شد تا انتقال حرارت کمی با محیط داشته باشد و دمای ایجاد شده به صورت یکنواخت در تمامی قسمت‌های قالب توزیع گردد. همچنین اندازه‌گیری و کنترل دما به کمک دو عدد ترموکوپل نوع K صورت پذیرفت که ترموکوپل اول دمای روی سطح لوله‌ها و ترموکوپل دیگر دمای بین قالب و المنت را نشان می‌داد. هر دو ترموکوپل به کنتاکتور دما متصل بوده‌اند و دما به صورت دائم در طی فرآیند کنترل می‌گردید. گاز مورد استفاده در این پژوهش، گاز آرگون است زیرا در هر دمایی، بی‌رنگ و بی‌بو، غیرآتش‌گیر و غیرسمی می‌باشد و توسط مانومتری با توانایی کنترل فشار تا مقدار 70bar به داخل لوله‌ها انتقال می‌یافت. مجموعه اتصالات از شلنگ‌های فشار قوی به همراه شیرالکترونی به خاطر اعمال فشارتحت برنامه تشکیل شده است. سیستم هیدرولیکی با قابلیت اعمال 60ton نیرو و پذیرش برنامه حرکت پیشروی توسط مدار الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم توانایی پذیرش برنامه بر حسب زمان و مقدار نیروی اعمالی را داشت که در شکل 2 نمای کلی از سیستم مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

### 3- طراحی آزمایش‌ها

به طور کلی در طراحی آزمایشات، برای مشخص کردن سطوح بهینه، سطوح پارامترها و تعیین میزان تاثیرگذاری آنها، متغیرهای فرآیند به دو دسته‌ی کنترلی و غیرکنترلی تقسیم می‌شوند. عوامل کنترلی عواملی هستند که به

هر دما به سبب اختلاف تغییر شکل پلاستیک لوله‌ها در دماهای مختلف صورت پذیرفت سپس مطابق با الگوریتم ارائه شده برای آزمایش‌ها شبیه‌سازی امان محدود با نرم افزار آباکوس انجام شد و نتایج آن بر روی مقدار نازک شدگی لوله‌ها استخراج گردید که پس از مقایسه و بررسی تمامی نتایج کمترین مقدار نازک‌شدگی به عنوان بهترین حالت در نظر گرفته شد و با نتایج حاصل از روش تاگوچی مورد مقایسه قرار گرفت تا بتوان حالت بهینه برای انجام این آزمایش را با ایجاد کمترین مقدار نازک شدگی استخراج نمود و در نهایت با توجه به مقادیر بدست آمده اقدام به آزمایش عملی شد. مقدار نازک شدگی در حالت عملی اندازه‌گیری شد و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی امان محدود مقایسه گردید.

### 2- مواد و روش آزمایش

به منظور تولید لوله دولایه کامپوزیتی از لوله آلومینیومی A6063 با قطر داخلی 11 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر و لوله منیزی AZ80 به قطر داخلی 8 میلی‌متر و ضخامت 1.5 میلی‌متر استفاده شد که در جدول 1 مشخصات لوله‌های مورد استفاده بیان شده است. قسمت‌های در تماس لوله‌ها در ابتدا با توجه به نوع انطباق پرسی پولیش داده شد و سپس با اعمال نیرو لوله منیزی درون لوله آلومینیومی قرار داده شد.

جدول 1 مشخصات هندسی لوله‌های مورد استفاده

Table 1 The geometry of pipes

جنس لوله	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)
AZ80	8	11
Al6063	11	15

پس از آماده سازی لوله دولایه به منظور ایجاد بالج بر روی آن تا قطر نهایی 20 میلی‌متر از قالب دو تکه‌ای از جنس فولاد گرمکار 2714 استفاده شد که در این حالت مطابق با فرمول شماره (1) میزان انبساط لوله برابر با 33.3 درصد می‌باشد همچنین آب‌بند کردن دو انتهای لوله نیز به کمک آب‌بندهای فلزی که در یکی از آنها سوراخی جهت دمش گاز وجود داشت، انجام شد. تصویر قالب و آب‌بندهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل 1 نشان داده شده است.

$$\text{Bulge ratio} = \frac{D_{\max} - D_0}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

با قرار دادن مجموعه آب‌بندها در دو انتهای لوله ابتدا با استفاده از نیروی پرس، آب‌بندها به منظور جلوگیری از نشتی گاز جاگذاری شدند و سپس لوله دولایه که آب‌بندها به آن متصل شده‌اند درون قالب انتقال یافت. پس از مونتاژ و بستن قالب، اتصالات مربوط به ورودی گاز درون لوله‌ها به آب‌بند متصل شد و قالب بر روی میز پرس هیدرولیکی قرار داده شد. آب‌بندی که ورودی گاز بر روی آن قرار دارد به صورت ثابت به بدنه قالب متصل شد تا در هنگام اعمال نیرو توسط پرس هیدرولیکی مانع از حرکت محوری لوله و خارج شدن آن از قالب شود. پس از جانمایی و اتصال مجموعه ورودی گاز برای گرم نمودن قالب و لوله‌ها از المنت کمربندی با توان 4Kw که قابلیت افزایش دما تا 1000 درجه سانتی‌گراد را داشت، استفاده شد به صورتی که المنت به دور قالب بسته می‌شد و به یک کنتاکتور با قابلیت ثابت نگاه‌داشتن دما در محدوده  $\pm 2$  درجه سانتی‌گراد متصل گردید.

$$S/N = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{Y_i^2} \right) \right) \quad (2)$$

در روابط بالا،  $n$  مرتبه تکرار و  $Y$  مقدار خروجی آزمایش و واحد نسبت سیگنال به نویز دسیبل می‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از این مقدار نسبت سیگنال به نویز محاسبه می‌شود. پس از محاسبه تابع زیان برای هر خروجی از فرمول مقدار سیگنال به نویز کل را محاسبه می‌کنیم.  $L$  در این فرمول همان مقدار تابع زیان محاسبه شده در قسمت قبل است:

$$S/N = -10 \log \left( \sum_{i=1}^n (L_i) \right) \quad (3)$$

در این پژوهش به منظور بدست آوردن بهترین دما، مقدار تغذیه محوری و فشار داخلی که هر کدام در سه سطح تعریف شده‌اند از روش طراحی آزمایشات تاگوچی به کمک نرم افزار Minitab 16.2 استفاده شد. از آنجاییکه مقدار تنش تسلیم و تغییر شکل پلاستیک لوله‌های آلومینیمی و منیزی می‌در دماهای مختلف با یکدیگر متفاوت است لذا طراحی آزمایشات در هر دما به صورت جداگانه صورت پذیرفت و مطابق با طراحی آزمایشات صورت پذیرفته، شبیه‌سازی امان محدود برای هر آزمایش انجام شد. سپس بهترین حالت از نظر داشتن کمترین مقدار نازک شدگی برای هر دما استخراج گردید و مورد مقایسه با نتایج سایر دماها قرار گرفت. در نهایت بهترین حالت از نظر دما، مقدار تغذیه محوری و فشار داخلی برای انجام فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش انتخاب گردید و مورد آزمون عملی قرار گرفت. در جداول 2 تا 4 پارامترهای ورودی و مقادیر آن‌ها برای دماهای مختلف بیان شده است. فشارهای مختلف در هر دما به صورت مرحله‌ای می‌باشد که این فشارها با استفاده از شبیه‌سازی تعیین شد. در شکل 3 برای دماهای مختلف این نوع فشار نشان داده شده است و بر مبنای فشار تسلیم، فشار شکل‌دهی و فشار کالیبراسیون در زمان انجام فرآیند می‌باشد. به فشار مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک در لوله، فشار تسلیم  $P_{yield}$  می‌گویند. در روش اعمال فشار داخلی به صورت مرحله‌ای تا زمانی که لوله در ناحیه الاستیک است تغذیه محوری مورد نیاز نبوده و بر روی لوله اعمال نمی‌شود. فشار شکل‌دهی  $P_{bursting}$  مقدار فشار مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک روی لوله و بالج آن تا رسیدن به دیواره قالب است. در زمان زیاد شدن فشار داخلی از تسلیم به شکل‌دهی برای جلوگیری از نازک شدن دیواره لوله، تغذیه محوری اعمال می‌شود. فشار کالیبراسیون  $P_{calibration}$  مقدار فشار داخلی مورد نیاز برای پرشدن کامل گوشه‌های قالب است که در زمان اعمال آن تغذیه محوری برداشته شده و یا مقدار کمی خواهد داشت. در شکل 4 نحوه تغذیه محوری متناسب با فشار داخلی مرحله‌ای نشان داده شده است.

جدول 2 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها در دمای  $350^\circ\text{C}$

Table 2 Investigating parameters with their levels in  $350^\circ\text{C}$

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A تغذیه محوری (mm)	3	3.5	4
B فشار داخلی (bar)	P1	P2	P3

جدول 3 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها در دمای  $400^\circ\text{C}$

Table 3 Investigating parameters with their levels in  $400^\circ\text{C}$

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A تغذیه محوری (mm)	3	3.5	4
B فشار داخلی (bar)	P1	P2	P3

منظور انتخاب بهترین شرایط در طراحی پروسه ساخت به کار گرفته می‌شوند.

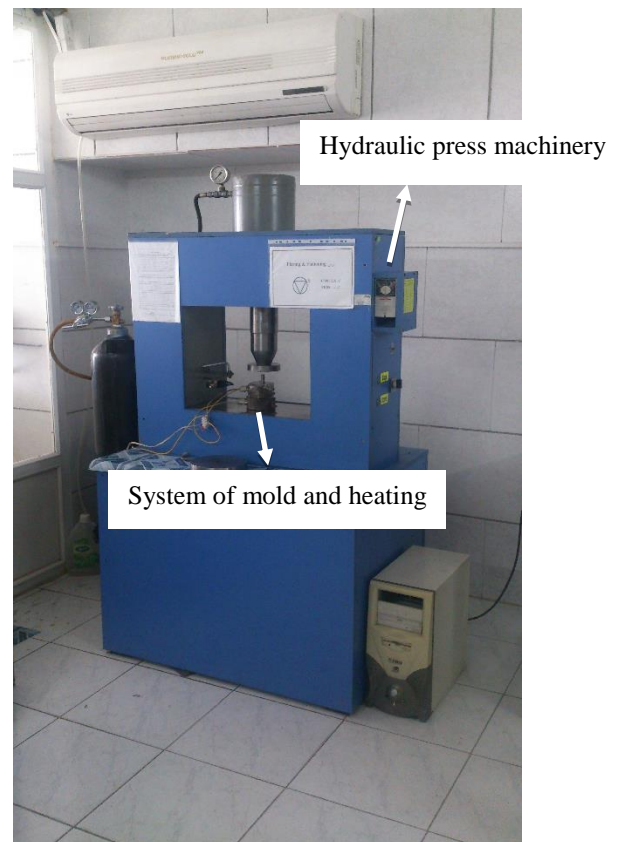


Fig. 2 View of HMGF process

شکل 2 نمایی از تجهیزات فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز

عوامل غیرکنترلی تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند، اما آن‌ها بر حسب شرایط، ثابت فرض می‌شوند. نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ )، نشان دهنده حساسیت مشخصه کیفی مورد بررسی به عوامل کنترلی و غیرکنترلی (پارامترهای اغتشاشی)، در یک فرآیند کنترل شده می‌باشد. در هر آزمایش، ما همواره به دنبال بالاترین نسبت ( $S/N$ ) در نتایج هستیم. مقدار ( $S/N$ ) بالا نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و یا پارامترهای اغتشاشی است. طراحی فرآیند تولید با بالاترین نسبت ( $S/N$ )، همواره باعث ایجاد کیفیت بهینه با حداقل واریانس می‌شود.

در روش تاگوچی، پس از تعیین پارامترهای ورودی و خروجی و مقادیر آن‌ها، تبدیل داده‌ها و مشاهدات به یک عدد ( $S/N$ ) در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، میانگین مجموع مربعات انحراف ( $MSD$ )، که یک کمیت آماری است و انحراف از مقدار مشخصه و هدف را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود. این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالت‌های مختلفی است که حالت استفاده شده در این تحقیق به قرار زیر است:

مقدار کوچک‌تر بهتر<sup>1</sup> است: در اندازه‌گیری مقدار نازک شدگی لوله هرچه عدد کوچک‌تر باشد بهتر است. بنابراین برای محاسبه تابع زیان از فرمول (2) استفاده می‌شود:

<sup>1</sup> The Smaller is better

4- شبیه سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی المان محدود فرآیند از نرم افزار ABAQUS 6.14 در محیط ضمنی آباکوس<sup>1</sup> استفاده گردید که به دلیل متقارن بودن قطعه و کاهش زمان حل، مدل‌سازی به صورت یک چهارم قطعه اصلی در نظر گرفته شد.

جدول 4 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها در دمای 450°C  
Table 4 Investigating parameters with their levels in 450°C

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
A تغذیه محوری (mm)	3	3.5	4
B فشار داخلی (bar)	P1	P2	P3

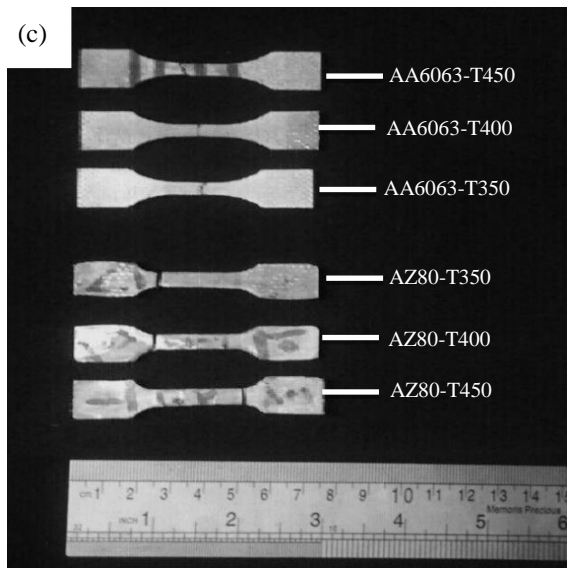
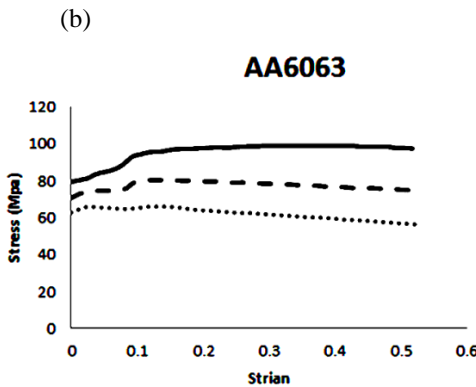
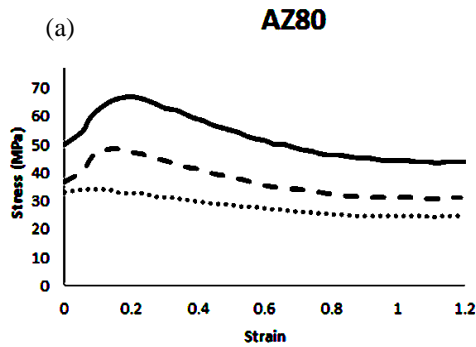


Fig. 5 True Stress-Strain curve and Tensile test specimen

شکل 5 منحنی تنش-کرنش و نمونه‌های آزمایش کشش

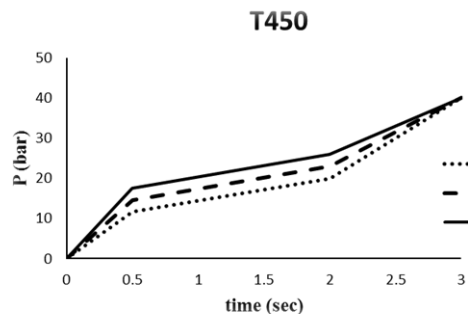
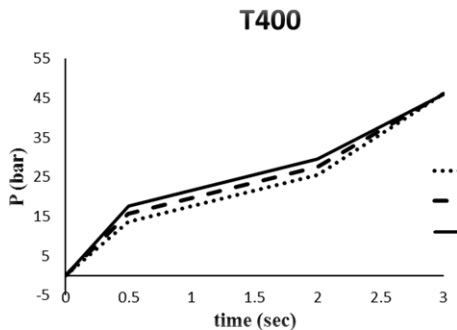
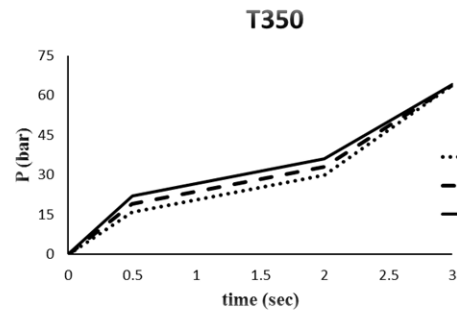


Fig. 3 Pressure step at different temperatures.

شکل 3 فشار مرحله‌ای در دماهای مختلف

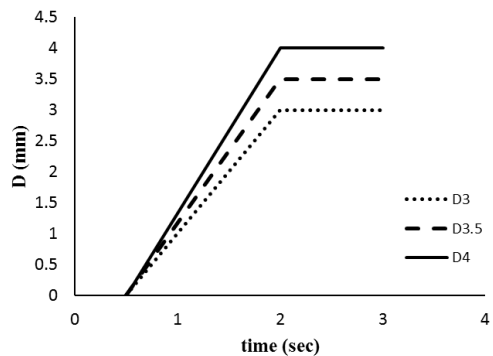


Fig. 4 Axial feed at HMGF process for step pressure

شکل 4 تغذیه محوری در فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز برای فشار مرحله‌ای

<sup>1</sup> Abaqus/implicit

در شکل 7 نحوه بدست آوردن فشارهای تسلیم، شکل‌دهی و کالیبراسیون با استفاده از شبیه‌سازی نشان داده شده است و قسمت (a) مربوط به فشار تسلیم، قسمت (b) مربوط به فشار شکل‌دهی و قسمت (c) فشار کالیبراسیون را نشان می‌دهد که برای هر دما این مقادیر به صورت جداگانه بدست آمد. در این راستا بدون اعمال تغذیه محوری فشار بالا برده شده تا در دو لوله تغییر شکل پلاستیک آغاز شود و فشار تسلیم بدست آید. سپس در ادامه به همین ترتیب فشار شکل‌دهی و کالیبراسیون نیز محاسبه می‌شوند.

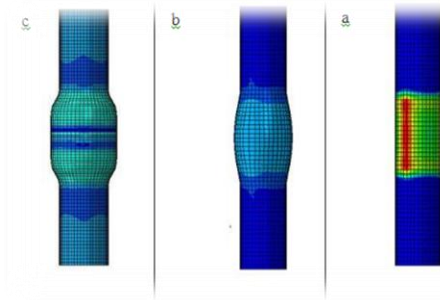


Fig. 7 Change form of tube with change pressure

شکل 7 تغییر شکل لوله با تغییر فشار

مقدار فشارهای تسلیم، شکل‌دهی و کالیبراسیون را همچنین می‌توان به صورت تحلیلی و با استفاده از روابط (4)، (5) و (6) که به ترتیب مربوط به فشار تسلیم، فشار شکل‌دهی و فشار کالیبراسیون هستند، محاسبه نمود. با توجه به اینکه لوله مورد مطالعه به صورت دولایه می‌باشد لذا مقادیر فشار برای هر لوله به صورت جداگانه بدست می‌آید و سپس مطابق با اصل برهم‌نهی مقادیر فشار در هر لوله با یکدیگر جمع می‌شوند تا فشار مورد نیاز برای انجام فرآیند تعیین گردد.

$$P_{yield} = \sigma_{y1} \frac{2t_{01}}{D_{01}-t_{01}} + \sigma_{y2} \frac{2t_{01}}{D_{02}-t_{02}} \quad (4)$$

$$P_{bursting} = \sigma_{u1} \frac{4t_{01}}{D_{01}-t_{01}} + \sigma_{u2} \frac{4t_{02}}{D_{02}-t_{02}} \quad (5)$$

$$P_{calibration} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{u1} \ln \frac{r_b}{r_b-t_{01}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{u2} \ln \frac{r_b}{r_b-t_{02}} \quad (6)$$

در معادلات بالا  $\sigma_y$  حداکثر تنش کششی هر یک از لوله‌ها،  $t_{01}$  و  $t_{02}$  ضخامت لوله داخلی و خارجی،  $D_{01}$  و  $D_{02}$  قطر اولیه لوله‌های داخلی و خارجی و  $r_b$  شعاع گوشه قالب می‌باشند. در شکل 8 نمودار اعمال فشار از دو روش تحلیلی و شبیه‌سازی برای دماهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تنها تفاوت این دو حالت با یکدیگر در مقدار فشار کالیبراسیون است که برای روش تحلیلی مقدار بیشتری می‌باشد و فشار شکل‌دهی و فشار تسلیم در دو حالت تقریباً برابر می‌باشند. البته با توجه به اینکه در مرحله کالیبراسیون به دو انتهای لوله تغذیه محوری اعمال نمی‌شود، مقدار فشار نهایی یا کالیبراسیون در ضخامت نهایی تاثیرگذار نیست و هرچقدر این فشار زیادتر شود بعد از پرسیدن گوشه‌های قالب ضخامت قطعه نهایی تغییر نخواهد داشت. مقدار فشار کالیبراسیون بدست آمده از شبیه‌سازی در حالت بدون تغذیه محوری برابر فشار پرسیدن قالب در حالت بارگذاری خطی است. در واقع بدون اعمال تغذیه محوری مسیر فشار روی فشار پرشدگی قالب تاثیری نخواهد داشت. در حل تحلیلی تغییر نسبت

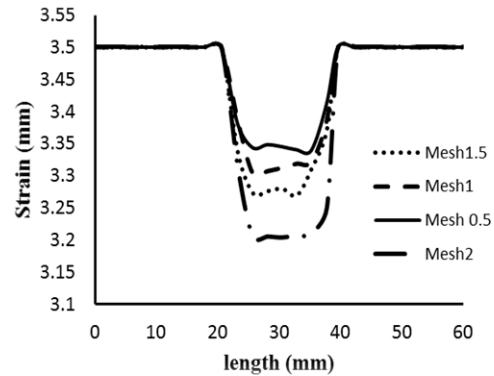


Fig. 6 Impact of size elements on strain

شکل 6 تاثیر اندازه المان بر روی کرنش

با توجه به اینکه شبیه‌سازی در سه دمای مختلف 350، 400، 450 درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت لذا خواص هر یک از لوله‌ها در دماهای مختلف به صورت داده‌های تنش-کرنش حقیقی پلاستیک که از آزمایش کشش تک محوره بدست آمده وارد نرم افزار شد. به منظور دستیابی به نمودار تنش-کرنش جنس لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش، نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM-E8M از روی لوله آماده شد و با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال Santam stm.150 در دماهای مورد مطالعه تحت آزمایش کشش تک محوره قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش کشش به صورت نمودارهای تنش-کرنش در دماهای مختلف برای لوله‌ها در شکل 5 نشان داده شده است که قسمت (a) برای لوله آلومینیم AA6063 و قسمت (b) برای لوله منیزیمی AZ80 می‌باشد و قسمت (c) نمونه‌های آزمایش کشش را پس از انجام تست نشان می‌دهد.

در این شبیه‌سازی به دلیل اینکه نسبت ضخامت به شعاع کوچک می‌باشد از مدل پوسته برای بررسی رفتار لوله استفاده شد که می‌تواند به خوبی رفتار لوله را توصیف نماید. قالب نیز به صورت یک جسم صلب گسسته در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده به منظور مش بندی لوله از نوع المان S4RT انتخاب شد زیرا این نوع المان دارای چهار گره بوده و از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته<sup>1</sup> استفاده می‌نماید. برای انتخاب بهترین اندازه المان، شبیه‌سازی با اندازه‌های المان‌های مختلف انجام شد و مقدار کرنش محیطی در مسیری از ابتدا تا انتهای لوله مورد بررسی قرار گرفت. شکل 6 نتایج به دست آمده برای اندازه‌های مختلف المان را نشان می‌دهد که با المان‌های کوچک‌تر از 1 میلی‌متر نتایج تغییر محسوسی نداشت و مقادیر توزیع ضخامت در این اندازه المان همگرا شده است. در نتیجه اندازه المان یک میلی‌متر برای همه شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

شرایط تماسی خارجی لوله و قالب بر اساس مدل تماسی سطح به سطح استاندارد با ضریب اصطکاک بر طبق مدل اصطکاک کولمب با مقدار 0.15 تعریف شد. سطوح قالب که به صورت سطوح صلب هستند، به عنوان سطوح اصلی<sup>2</sup> و سطوح لوله که تغییر شکل‌پذیر هستند به عنوان سطوح فرعی<sup>3</sup> در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی به صورت کوپل ترمومکانیکی بوده و دمای لوله در همه نقاط یکسان فرض شده است. فشار گاز به صورت فشار یکنواخت سطح بیان شده است و مطابق با منحنی‌های اعمال فشار و زمانی ارائه شده در هر دما بر سطح داخلی لوله اعمال می‌شود.

<sup>1</sup> Reduced integration

<sup>2</sup> Master

<sup>3</sup> Slave

جدول 5 پارامترهای مورد ارزیابی به همراه سطوح آن‌ها

Table 5 Investigating parameters with their levels

دمای 450°C		دمای 400°C		دمای 350°C		شماره آزمایش
نازک	نسبت	نازک	نسبت	نازک	نسبت	
شدگی <td>سیگنال</td> <td>شدگی <td>سیگنال</td> <td>شدگی <td>سیگنال</td> <td></td> </td></td>	سیگنال	شدگی <td>سیگنال</td> <td>شدگی <td>سیگنال</td> <td></td> </td>	سیگنال	شدگی <td>سیگنال</td> <td></td>	سیگنال	
به نوبز		به نوبز		به نوبز		
13.0086	0.22365	13.1468	0.22012	10.8940	0.28530	1
13.9175	0.20143	14.5743	0.18676	12.0086	0.25094	2
14.7268	0.18351	15.6740	0.16455	14.4309	0.18987	3
13.7526	0.20529	15.2667	0.17245	12.6779	0.23233	4
14.3889	0.19079	16.0071	0.15836	13.5863	0.20926	5
15.2990	0.17181	17.3375	0.13587	15.4299	0.16924	6
12.2650	0.24364	10.8812	0.28572	9.6042	0.33097	7
12.5289	0.23635	12.6559	0.23292	11.7253	0.25926	8
13.9833	0.19991	14.1824	0.19538	12.7912	0.22932	9

### 1-5 اثر پارامترهای فرآیند بر روی نازک شدگی در دمای 350°C

در این تحقیق مقدار نازک شدگی شامل مجموع نازک شدگی دو لوله آلومینیمی و منیزی می‌باشد که با افزایش فشار داخلی درون لوله‌ها انتظار می‌رود نازک شدگی در آن‌ها افزایش یابد اما مطابق شکل 9 که بررسی اثر نازک شدگی در شبیه‌سازی را مطابق با الگوریتم طراحی آزمایشات و فشارها و مقدار تغذیه محوری متفاوت نشان می‌دهد و همچنین شکل 10 که مربوط به نمودار نسبت سیگنال به نوبز می‌باشد، مشاهده می‌گردد که در فشار P2 کمترین مقدار نازک شدگی را داریم اگرچه با افزایش فشار از مقدار P2 به P3 مقدار نازک شدگی افزایش می‌یابد. علت این امر که فشار P2 با توجه به بالاتر بودن مقدار فشار آن نسبت به فشار P1 دارای نازک شدگی کمتری است را می‌توان این‌گونه بیان نمود که مقدار نازک شدگی بستگی به مسیر بارگذاری، تغذیه محوری، اصطکاک بین قالب و لوله و شرایط دمای قالب و... دارد که حسینی‌پور و همکاران شرایط دمایی هم‌دما را مناسب‌تر برای بالچ لوله دولایه بیان نموده‌اند [16]. همچنین اگرچه فشار در حالت P1 نسبت به فشار P2 کمتر است اما در این حالت فشار تسلیم پایین‌تری را نسبت به سایر فشارها مطابق با شکل 3 شاهد هستیم در نتیجه نیروی تغذیه محوری در ابتدای فرآیند بیشتر صرف افزایش ضخامت در لبه‌های لوله و مکان‌هایی که نیرو به آن‌ها وارد می‌شود و نقاط ابتدایی بالچ که دارای زاویه هستند می‌شود زیرا در این قسمت‌ها جریان مواد با سختی بیشتری می‌تواند عبور نماید و قسمت مرکز بالچ را تغذیه کند در نتیجه در مرکز بالچ مقدار نازک شدگی افزایش می‌یابد. در فشار P3 مطابق انتظار کاهش بیشتر نازک شدگی را نسبت به دو حالت فشار دیگر شاهد هستیم زیرا فشار در این حالت بالا بوده و همخوانی مناسب را نتوانسته است با مقادیر تغذیه محوری بدست آورد و شاهد نازک شدگی بیشتر می‌باشیم. مطابق شکل 9 در دو ناحیه ابتدای بالچ و ابتدای لوله‌ها به سبب فشار وارد شده از سوی سیلندر هیدرولیکی و تغذیه محوری، افزایش ضخامت مشاهده می‌گردد که نقاط ابتدای بالچ به سبب داشتن زاویه از حرکت مواد جلوگیری می‌کند و همین امر موجب افزایش ضخامت در این نقاط گردیده است و در لبه‌های لوله‌ها نیز به سبب تماس

ضخامت به قطر لوله‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود اما در شبیه‌سازی این تغییر ضخامت باعث می‌شود تا فشار کالیبراسیون کاهش یابد.

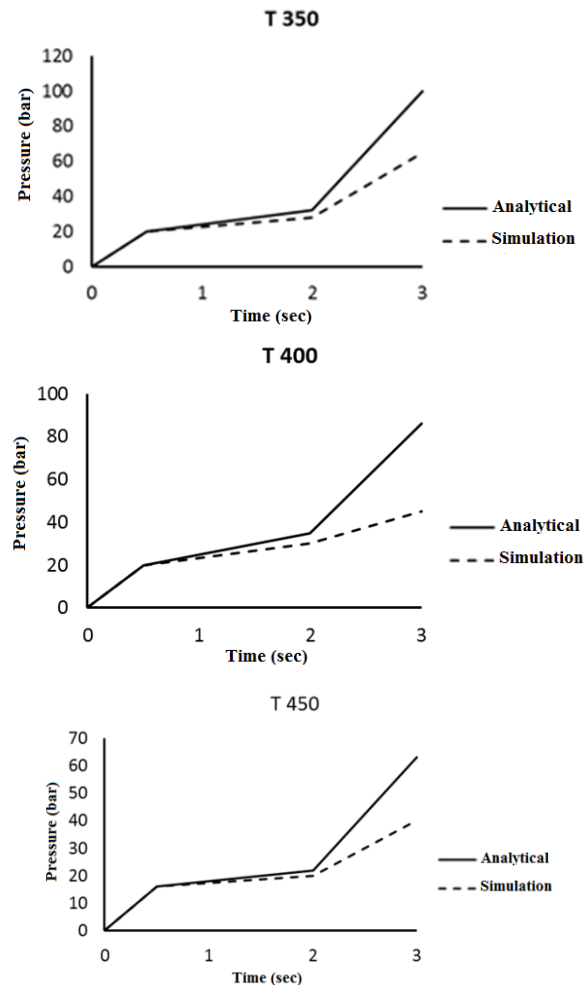


Fig. 8 Simulation and Analysis of load curves

شکل 8 منحنی بارگذاری شبیه‌سازی و تحلیلی

در انتها برای هر دما مطابق با روش طراحی آزمایشات تاگوشی صورت گرفته شده، شبیه‌سازی انجام شد و نتایج حاصل از هر آزمایش بر روی مقدار کاهش ضخامت لوله‌ها به منظور دستیابی به کمترین کاهش ضخامت مورد ارزیابی قرار گرفت تا بهترین حالت برای پارامترهای دما، فشار داخلی و مقدار پیشروی بدست آید. از آنجاییکه دو لوله با استفاده از انطباق پرسی و نیروی زیادی درون یکدیگر قرار داده شدند، جداسازی آن‌ها از یکدیگر بسیار مشکل می‌باشد از اینرو در شبیه‌سازی المان محدود مقادیر کاهش ضخامت برای لوله‌ها در هر گره بدست آمد و سپس با توجه به اصل برهم‌نهی این مقادیر نازک‌شدگی با یکدیگر جمع شده‌اند و به صورت کلی بیان می‌گردد. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار نازک‌شدگی در حالت عملی تغییر مقدار ضخامت دو لوله مطابق اصل برهم‌نهی به صورت یک لوله اندازه‌گیری شد.

### 5- نتایج و بحث

در جدول 5 نتایج حاصل از مقادیر نسبت سیگنال به نوبز به همراه مقادیر نازک شدگی لوله‌ها در شبیه‌سازی نشان داده شده است که در ادامه به بررسی و تشریح اثر پارامترها بر روی نازک شدگی لوله‌ها به صورت کامل پرداخته می‌شود.

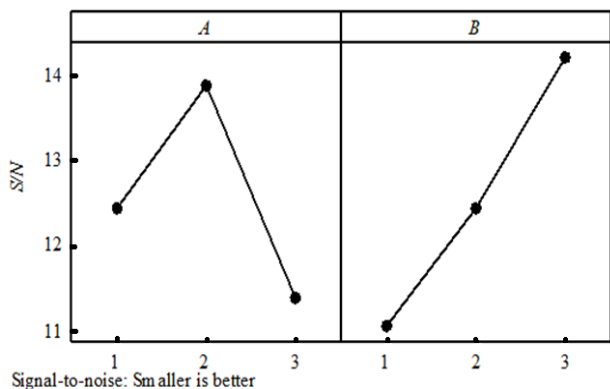


Fig. 10 S/N parameters effect on reducing the thickness for 350°C  
شکل 10 نمودار نسبت سیگنال به نویز بر روی کاهش ضخامت برای دمای 350°C

با توجه به نمودارهای  $S/N$  خروجی از نرم افزار و نتایج حاصل از بررسی مقدار نازک‌شدگی در شبیه‌سازی، شرایط بهینه جهت انجام فرآیند با کمینه مقدار نازک‌شدگی در دمای 350 درجه سانتی‌گراد برابر 0.16924 میلی‌متر است که نسبت سیگنال به نویز آزمایش مربوطه 15.429 می‌باشد، با اعمال همین شرایط در نرم افزار Minitab 16.2 عدد حاصل از پیش‌بینی  $S/N$  نرم افزار مقدار 15.249 می‌باشد و مقدار نازک‌شدگی پیش‌بینی شده نیز 0.16599 است که بسیار به نتیجه شبیه‌سازی به دست آمده نزدیک می‌باشد و تطابق مناسبی با نتایج شبیه‌سازی فرآیند دارد.

یکی دیگر از مزایای روش سیگنال به نویز، تعیین میزان تاثیرگذاری هر پارامتر در خروجی مورد نظر می‌باشد. بدین منظور می‌توان از نتایج تحلیل واریانس داده‌های مقدار نازک‌شدگی استفاده نمود. در جدول 6 نتایج حاصل از تحلیل واریانس و در نتیجه اثرگذاری متغیرهای مورد بررسی بر روی مقدار نازک‌شدگی نشان داده شده است که نشان می‌دهد تغذیه محوری با داشتن بیشترین ضریب تاثیر همانند آنچه در شکل 10 و نمودار نسبت سیگنال به نویز مشخص است بر روی مقدار نازک‌شدگی، اثرگذارتر از سایر پارامترها می‌باشد. مقدار تاثیرگذاری تغذیه محوری برابر با 54.24% و مقدار تاثیرگذاری فشار داخلی برابر 35.00% است که نشان می‌دهد تغذیه محوری نسبت به سایر متغیرها از اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است زیرا تغذیه محوری باعث ایجاد حرکت مواد در لوله‌ها می‌شود و جریان مواد را به سمت مرکز بالچ بوجود می‌آورد. در نتیجه با جریان یافتن مواد به سمت مرکز بالچ مقدار نازک‌شدگی در لوله‌ها کاهش می‌یابد و قطعات به صورت سالم و بدون عیب با کمترین مقدار نازک‌شدگی بدست می‌آیند.

جدول 6 تحلیل ANOVA متغیرها بر روی نازک‌شدگی در دمای 350°C

Table 6 ANOVA for parameters on reducing the thickness at 350°C

پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع میانگین مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	ضریب تاثیر (%)
مقدار فشار داخلی	2	0.00364	1.80	35.00
تغذیه محوری	2	0.00564	4.14	54.24
خطا	2	0.00112	-	10.76

2-5 اثر پارامترهای فرآیند بر روی نازک‌شدگی در دمای 400°C

نتایج حاصل از بررسی مقدار نازک‌شدگی در شبیه‌سازی برای دمای 400 درجه سانتی‌گراد در شکل 11 نشان داده شده است که مطابق با دمای 350

مستقیم با آب‌بندها و اعمال نیروی تغذیه محوری از طریق آن‌ها مقداری افزایش ضخامت مشاهده می‌گردد.

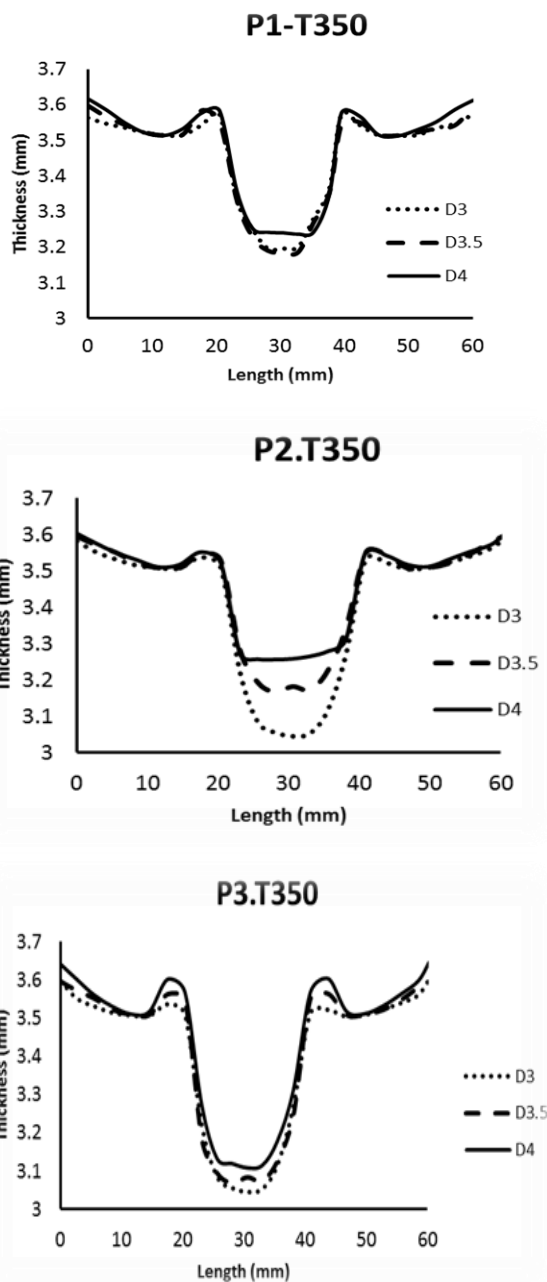


Fig. 9 Thickness variations for load step at 350 °C  
شکل 9 تغییرات ضخامت برای بارگذاری مرحله‌ای در دمای 350 درجه سانتی‌گراد

نتایج حاصل از نمودار نسبت سیگنال به نویز برای نازک‌شدگی لوله‌ها با اعمال حالت دستیابی به مقدار نازک‌شدگی کمتر در دمای 350 درجه سانتی‌گراد در شکل 10 نشان داده شده است که قسمت A مربوط به فشار داخلی و قسمت B مربوط به تغذیه محوری می‌باشد. مطابق شکل 10 بیشترین مقادیر نسبت سیگنال به نویز و یا بهترین حالت برای انجام آزمایش بر طبق نمودارهای نسبت سیگنال به نویز مربوط به فشار داخلی P2 و تغذیه محوری 4 میلی‌متر می‌باشد و این بدان معناست که با توجه به جدول شماره 5، آزمایش شماره 6 در این دما بهترین حالت را از نظر داشتن کمترین مقدار نازک‌شدگی در لوله‌ها دارا می‌باشد.



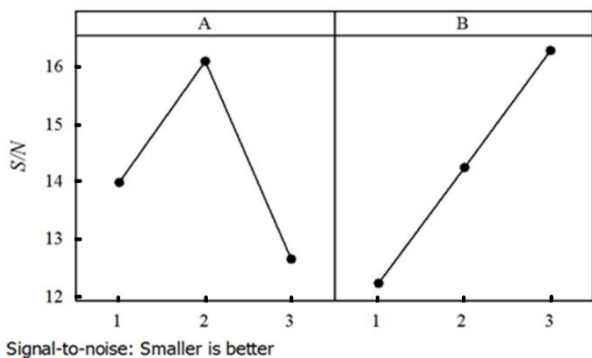


Fig. 12 Thickness variations for load step at 400 °C

شکل 12 تغییرات ضخامت برای بارگذاری مرحله‌ای در دمای 400 درجه سانتی‌گراد

مقادیر پیش‌بینی شده تاگوچی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد برای نسبت سیگنال به نویز برابر 17.211 و مقدار نازک‌شدگی 0.13587 بدست آمد که با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی آن که برای نسبت سیگنال به نویز 17.3375 و برای نازک‌شدگی مقدار 0.13587 می‌باشد، اختلاف کمی دارد و تطابق مناسب از نتایج طراحی و تحلیل آزمایشات به روش تاگوچی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند نشان می‌دهد. جدول 7 نیز نتایج حاصل از تحلیل واریانس و اثربخشی هر یک از متغیرها را بر روی نازک‌شدگی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. مطابق با نتایج نمودار نسبت سیگنال به نویز در شکل 12 و همچنین نتایج جدول 7 مشخص است که تغذیه محوری بیشترین تاثیر را بر روی نازک‌شدگی در دمای 400 درجه سانتی‌گراد با مقدار 51.70% نسبت به مقدار فشار داخلی با ضریب تاثیر 36.48% دارد. مطابق با نتایج جدول 7 و جدول 6 مشاهده می‌شود که با افزایش دما از مقدار 350 به 400 درجه سانتی‌گراد از مقدار اثرگذاری تغذیه محوری کاسته شده و در مقابل مقدار اثرگذاری فشار داخلی افزایش یافته است اما همچنان مقدار اثرگذاری تغذیه محوری بیشتر می‌باشد زیرا با ایجاد جریان در مواد تاثیر بیشتری بر روی مقدار نازک‌شدگی دارد اما علت کاهش اثرگذاری آن در دمای بالاتر را می‌توان اینگونه بیان نمود که با افزایش دما مقدار نازک‌شدگی افزایش می‌یابد زیرا لوله‌ها با سرعت بیشتری شکل می‌پذیرند و اثر اعمال تغذیه محوری در مرکز بالج که بیشترین نازک‌شدگی را دارد کمتر می‌گردد.

جدول 7 تحلیل ANOVA متغیرها بر روی نازک‌شدگی در دمای 400°C

Table 7 ANOVA for parameters on reducing the thickness at 400°C

پارامتر	درجه آزادی (f)	مجموع مربعات (MS)	عدد فیشر (F)	ضریب تاثیر (%)
مقدار فشار داخلی	2	0.00472	1.97	36.48
تغذیه محوری	2	0.00669	3.84	51.70
خطا	2	0.00153	-	11.82

3-5 اثر پارامترهای فرآیند بر روی نازک‌شدگی در دمای 450°C

در شکل 13 مقدار تغییرات ضخامت لوله برای فشارهای داخلی و تغذیه‌های محوری مختلف در دمای 450 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است که مطابق آن کمترین مقدار نازک‌شدگی لوله در حالت فشار P2 و تغذیه محوری 4 میلی‌متر مشاهده می‌شود زیرا در این مقادیر فشار داخلی و تغذیه محوری

درجه سانتی‌گراد افزایش ضخامت در ابتدای لوله‌ها و نقاط ابتدایی بالج مشاهده می‌گردد. همچنین کمترین مقدار نازک‌شدگی برای حالت فشار P2 و تغذیه محوری 4 میلی‌متر مشاهده می‌شود.

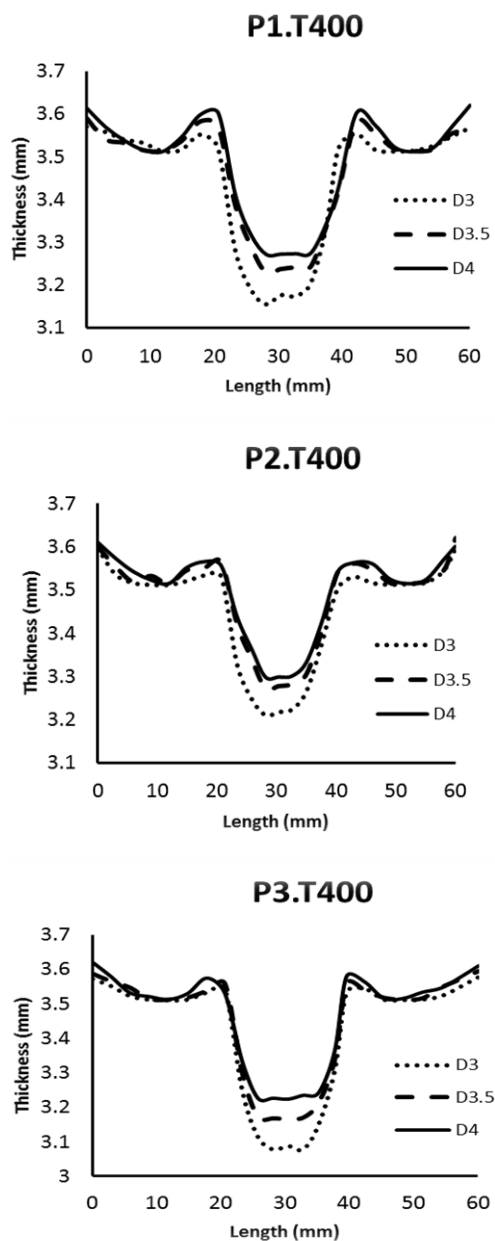
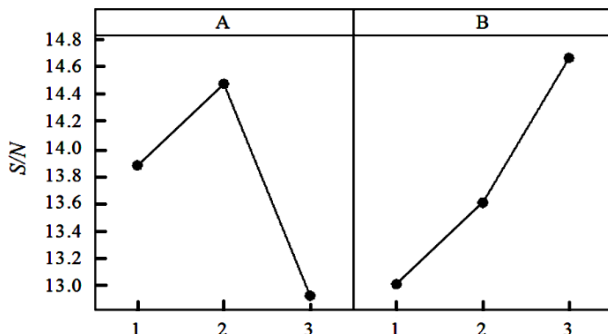


Fig. 11 Thickness variations for load step at 400 °C

شکل 11 تغییرات ضخامت برای بارگذاری مرحله‌ای در دمای 400 درجه سانتی‌گراد

نمودار نسبت سیگنال به نویز در شکل 12 و برای پارامترهای فشار داخلی که قسمت A و تغذیه محوری که قسمت B است در دمای 400 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. مشابه دمای 350 درجه سانتی‌گراد بهترین حالت برای فشار داخلی مقدار P2 و برای تغذیه محوری 4 میلی‌متر می‌باشد که دارای بیشترین نسبت سیگنال به نویز هستند.

می‌باشد که با دماهای دیگر مورد بررسی در این آزمایش مطابق می‌باشد و شاهد بیشترین نسبت سیگنال به نویز در این مقادیر هستیم.



Signal-to-noise: Smaller is better

Fig. 14 S/N parameters effect on reducing the thickness for 450°C

شکل 14 نمودار نسبت سیگنال به نویز بر روی کاهش ضخامت برای 450°C

مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی در این دما برای بهترین حالت بدست آمده که همان فشار P2 و تغذیه محوری 4 میلی‌متر می‌باشد برای نسبت سیگنال به نویز در این حالت برابر 15.2990 و نازک‌شدگی لوله مقدار 0.17181 میلی‌متر بدست آمد که با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی که برای نسبت سیگنال به نویز 15.1375 و برای نازک‌شدگی لوله مقدار 0.16987 میلی‌متر می‌باشد، اختلاف کمی دارد. در جدول 8 نتایج حاصل از تحلیل واریانس در دمای 450 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. مطابق با نتایج نمودار نسبت سیگنال به نویز در شکل 14 و همچنین نتایج جدول 8 مشخص است که در این دما نیز تغذیه محوری بیشترین تاثیر را بر روی نازک‌شدگی با مقدار 50.53% دارد که از مقدار اثر گذاری فشار داخلی با مقدار 37.2% بیشتر می‌باشد. علت این امر نیز وجود حرکت جریان مواد و کاهش مقدار نازک‌شدگی به سبب اعمال نیرو به لوله‌ها است اما کاهش ضریب اثرگذاری تغذیه محوری نسبت به دو دمای قبلی را نیز همانند بخش قبل و دمای 400 درجه سانتی‌گراد اینگونه می‌توان بیان نمود که با افزایش دما سرعت شکل‌پذیری و بالج لوله افزایش می‌یابد و مقدار مواد کمتری در اثر جریان مواد در لوله‌ها به خاطر وجود تغذیه محوری به مرکز بالج می‌رسد و در نتیجه اثرگذاری تغذیه محوری با افزایش دما کاهش می‌یابد.

جدول 8 تحلیل ANOVA متغیرها بر روی نازک‌شدگی در دمای 450°C

Table 8 ANOVA for parameters on reducing the thickness at 450°C

ضریب تاثیر (%)	عدد فیشر (F)	مجموع میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (f)	پارامتر
37.2	2.60	0.003072	2	مقدار فشار داخلی
50.53	3.10	0.004171	2	تغذیه محوری
12.24	-	0.001011	2	خطا

#### 4-5 مقایسه کمترین نازک‌شدگی در دماهای مختلف

به منظور مقایسه و تعیین بهترین شرایط برای انجام آزمایش عملی و ایجاد بالج بر روی لوله دولایه کامپوزیتی AA6063-AZ80 مقادیر فشار داخلی به صورت مرحله‌ای، مقدار تغذیه محوری و دمای انجام آزمایش پس از طراحی

مطابق آنچه برای دمای 350 درجه سانتی‌گراد بیان گردید بهترین تناسب از نظر حرکت جریان مواد به سمت مرکز بالج و سرعت شکل‌پذیری و بالج لوله‌ها برقرار شده است. همچنین این نتایج با مقادیر و نتیجه خروجی از تحلیل نمودار نسبت سیگنال به نویز در روش تاگوچی و شکل 14 مطابقت دارد.

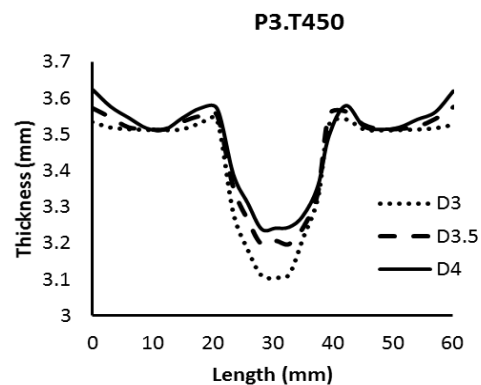
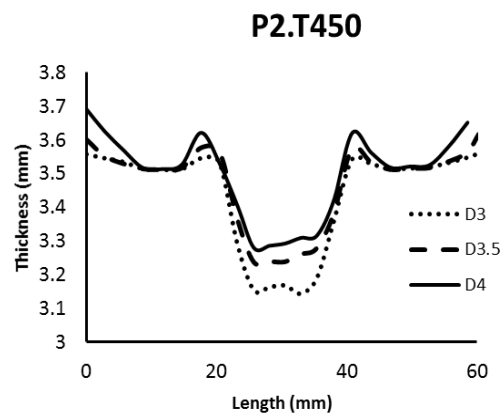
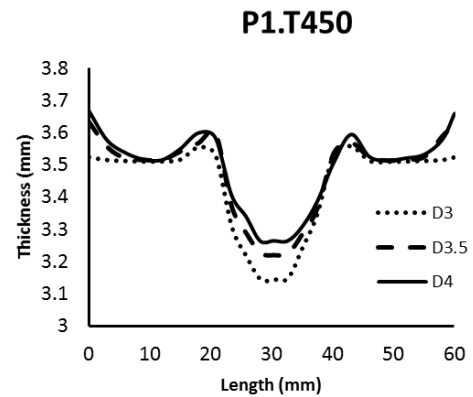


Fig. 13 Thickness variations for load step at 450 ° C

شکل 13 تغییرات ضخامت برای بارگذاری مرحله‌ای در دمای 450°C

در شکل 14 نمودار نسبت سیگنال به نویز در دمای 450 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است که قسمت A مربوط به فشار داخلی و قسمت B مربوط به تغذیه محوری است. مطابق شکل بهترین حالت برای فشار داخلی و تغذیه محوری به ترتیب فشار P2 و مقدار تغذیه محوری 4 میلی‌متر

یکسان در سرتاسر طول لوله اعمال نمی‌گردد و در نتیجه جریان مواد کمتر می‌شود اما برای نمونه شبیه‌سازی شده اعمال نیرو و ضریب اصطکاک به صورت یکسان در نظر گرفته شده است که در نتیجه این امر تغییر ضخامت کمتر در حالت عملی نسبت به شبیه‌سازی می‌باشد. در مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشات عملی درصد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و عملی در بیشترین اختلاف که مربوط به بیشترین مقدار نازک‌شدگی است، برابر 5.49% می‌باشد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج عملی و شبیه‌سازی وجود دارد.

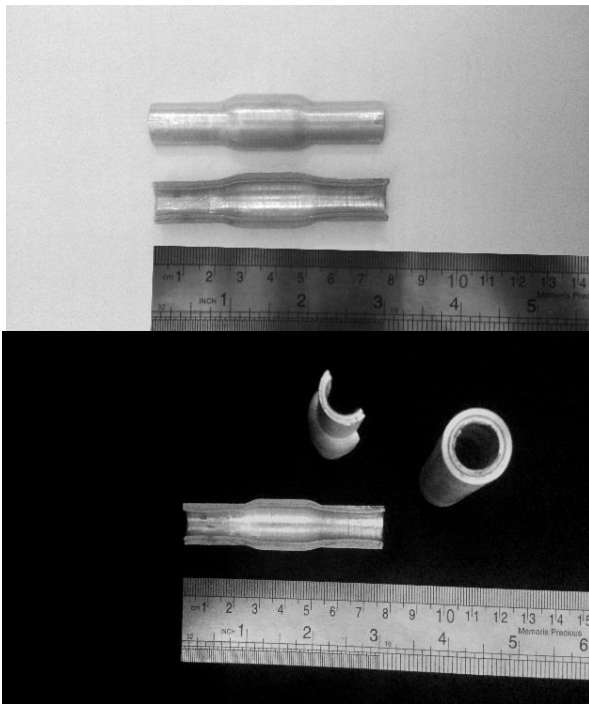


Fig. 15 Sample products

شکل 15 نمونه تولید شده

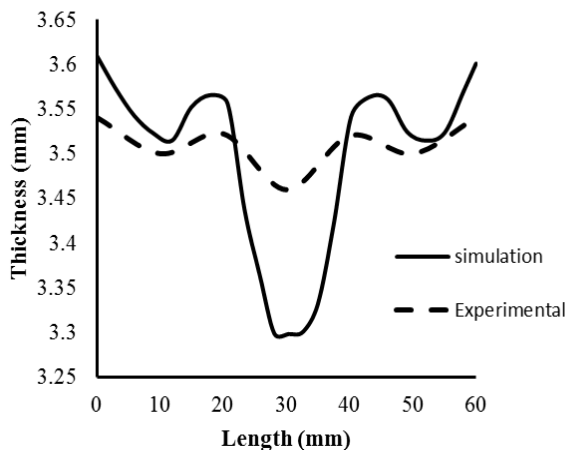


Fig. 16 Compare thinning in simulation mode and practical tests

شکل 16 مقایسه نازک‌شدگی در حالت شبیه‌سازی و آزمایشات عملی

#### 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر متغیرهای تأثیرگذار فرآیند شکل‌دهی داغ با دمش گاز به صورت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی و تحلیل واریانس به منظور بدست آوردن مقادیر بهینه هر یک از

آزمایشات به روش تاگوچی و انجام شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی از نظر کمترین مقدار نازک‌شدگی قرار گرفت که بهترین حالت بدست آمده در هر دما با یکدیگر از نظر مقدار نازک‌شدگی مقایسه شده است. نتایج حاصل در جدول 9 نشان داده شده است. مطابق با نتایج این جدول کمترین مقدار نازک‌شدگی در حالت P2 و تغذیه محوری 4 میلی‌متر برای دمای 400 درجه سانتی‌گراد می‌باشد که برابر با 0.13587 میلی‌متر است. در دماهای 350 و 450 درجه سانتی‌گراد مقدار نازک‌شدگی بیشتری را نسبت به دمای 400 درجه سانتی‌گراد شاهد هستیم علت را این‌گونه می‌توان بیان نمود که در دمای 450 درجه سانتی‌گراد استحکام قطعه کاهش می‌یابد و خواص پلاستیک قطعه تغییر یافته و قطعه با نیروی کمتر و سرعت بیشتری شکل می‌پذیرد که در این حالت نیروی تغذیه محوری نیز در لبه‌های قطعه بیشتر صرف افزایش ضخامت لوله می‌گردد و در نهایت جریان مواد کمتری به سمت مرکز بالچ که بیشترین مقدار نازک‌شدگی را دارد، اتفاق می‌افتد و قطعه دچار کاهش ضخامت می‌گردد اما در دمای 350 درجه سانتی‌گراد قطعه استحکام بالاتری نسبت به دو دمای دیگر داشته و خواص پلاستیکی آن پایین‌تر از می‌باشد که همین امر مانع از تغذیه مناسب و جریان مواد به سمت مرکز بالچ می‌شود و در نهایت کاهش ضخامت بیشتری در این دما نسبت به دمای 400 درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌گردد اما نسبت به دمای 450 درجه سانتی‌گراد نازک‌شدگی کمتری وجود دارد.

جدول 9 مقایسه مقدار نازک‌شدگی لوله در بهترین حالات شبیه‌سازی

Table 9 Compare of thinning tube in the best simulation scenarios

دمای فرآیند (°C)	فشار داخلی (bar)	مقدار تغذیه محوری (mm)		
		3	3.5	4
350	P2	0.2853	0.25094	0.16924
400	P2	0.17245	0.15836	0.13587
450	P2	0.20529	0.19079	0.17181

#### 5-5 مقایسه نتایج عملی و شبیه‌سازی بر روی نازک‌شدگی لوله‌ها

شکل 15 نمونه‌های تولید شده لوله دولایه کامپوزیتی Al6063-AZ80 را با شرایط دمای 400 درجه سانتی‌گراد، مقدار پیشروی 4 میلی‌متر و فشار داخلی مرحله‌ای P2 که از نتایج طراحی و تحلیل روش تاگوچی و شبیه‌سازی المان محدود فرآیند استخراج گردید، نشان می‌دهد. نمونه‌های تولید شده به منظور بررسی سالم بودن و همچنین بررسی تغییر ضخامت لوله‌ها در طی فرآیند به صورت طولی از وسط با وایرکات برش داده شده‌اند که مطابق شکل نمونه‌های بدست آمده از لحاظ ظاهری و مقدار بالچ مورد نظر کاملاً سالم و مناسب می‌باشند. مقایسه تغییر ضخامت لوله‌ها در راستای طول بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند و نتایج بدست آمده از آزمون عملی در شکل 16 نشان داده شده است. پس از برش نمونه‌های بدست آمده با وایرکات در راستای طول قطعه به کمک میکرومتر ضخامت لوله در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد و سپس با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل که در شکل 16 نشان داده شده است نتایج شبیه‌سازی با دقت مناسبی نسبت به نتایج عملی می‌باشند همچنین مقدار پیش‌بینی روش تاگوچی نیز از مقدار بیشترین کاهش ضخامت در لوله‌ها با نتایج عملی تطابق مناسبی دارد. علت وجود اختلاف تغییر ضخامت در دو ابتدای لوله در نمونه شبیه‌سازی شده و نمونه عملی این نکته می‌باشد که در نمونه عملی مقداری ابتدای لوله‌ها مطابق شکل 15 تغییر فرم داشته است و به سمت سطح خارجی لوله انحنایافته‌اند همچنین نیروی اصطکاک تأثیرگذار می‌باشد که به سبب همین نکات فشاری که به لوله وارد می‌شود به صورت

- Stainless Steel Tubes Forming" IDDRG International Conference, Hungary, 2007.
- [10] Vadillo, L. Perez, I. Hori, I. Zarazua, J. I. Mangas, A. San, J. I. Paar, U., "Gas Forming of Boron Steel Tubes at Low Pressure Applasting" Proceedings of the 13th International Conference on Metal Forming, Japan, 2010.
- [11] Hwang, Y. M. Su, Y. H. Cen, B. J., "Tube Hydroforming of Magnesium Alloys at Elevated Temperatures" Journal of Engineering materials and technology, Vol. 32 No. 3, pp105-116, 2010.
- [12] Maeno, T. Mori, K. I. Unou, C., "Improvement of Die Filling by Prevention of Temperature Drop in Gas Forming of Aluminum Alloy Tube Using Air Filled Into Sealed Tube and Resistance Heating" Procedia Engineering, Vol. 81, pp 2237-2242, 2014.
- [13] Zoei, M. S. Farzin, M. Mohammadi, A. H., "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)
- [14] Zhu-bin, H. Bu-gang, T. Chang-yang, Ch. Zhio-biao, W. Shjian, Y. Kia, L., "Mechanical Properties and Formability of TA2 Extrude Tube for Hot Metal Gas Forming at Elevated Temrature" Transactions of Nonferrous Metals society of china, Vol 22, pp 479-484.2012.
- [15] Maeno, T. Mori, K. Adachi, K. "Gas Forming of Ultra-High Strength Steel Hollow Part Using Air Filled into Sealed Tube and Resistant Heating" Journal of Materials processing technology, Vol 214, pp 97-105, 2014.
- [16] Hosseinipour, S. J. Kargar Pishbijari, H. Shahbazi-Karami, J. "Experimental Comparison of The Formability of Single-Layer Aluminum Tubes and Two layer Copper-Aluminum Tubes in The Hot Gas Blow Forming Process" Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol.2, No.4, pp.36-46, 2016. (In Persian)

پارامترها و بررسی درصد تاثیر هر یک بر روی مقدار نازک‌شدگی لوله دو لایه کامپوزیتی AA6063-AZ80 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

- کمترین مقدار نازک‌شدگی در لوله دولایه کامپوزیتی به مقدار 0.13587 میلی‌متر در شرایط فشار داخلی P2 با تغذیه محوری 4 میلی‌متر و در دمای 400 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.
- بیشترین تاثیر بر روی مقدار نازک‌شدگی لوله‌ها در دماهای مختلف و در بررسی پارامترهای فشار داخلی و تغذیه محوری مربوط به تغذیه محوری است که به ترتیب برای دماهای 350، 400، 450 درجه سانتی‌گراد مقادیر 54.24، 51.70، 50.53 درصد می‌باشد.
- با افزایش دما مقدار استحکام لوله کاهش می‌یابد و خواص پلاستیک آن تغییر یافته در نتیجه مقدار تاثیر تغذیه محوری بر روی نازک‌شدگی لوله کاهش یافته است زیرا در این شرایط بخشی از نیروی تغذیه محوری صرف افزایش ضخامت در نقاط ابتدایی لوله می‌گردد.
- در نقاط ابتدایی لوله‌ها که محل اعمال نیروی تغذیه محوری است و نقاط ابتدایی بالچ به سبب داشتن زاویه، افزایش ضخامت مشاهده می‌شود و بیشترین کاهش ضخامت در لوله مربوط به نقاط مرکزی بالچ است زیرا تغذیه و جریان مواد کمتری برای این قسمت وجود دارد.
- نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود با آزمایشات عملی که در شرایط بهینه استخراج شده به کمک شبیه‌سازی و روش تاگوچی صورت پذیرفت مطابقت خوبی با یکدیگر داشته‌اند و در بیشترین اختلاف میان نتایج آن‌ها که مربوط به مرکز بالچ است به مقدار 5.49% می‌باشد.

#### -7 مراجع

- [1] Choi, H. Koc, M. Ni, J., "Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 190, No. 1, pp. 230-242, 2007.
- [2] Aue-u-lan, Y., "Hydroforming of Tubular Materials at Various Temperatures" Doctoral dissertation, The Ohio State University, Japan, 2007.
- [3] Maeno, T. Mori, K. Unou, C., "Optimisation of Condition in Hot Gas Bulging of Aluminium Alloy Tube Using Resistance Heating Set into Dies" Key Engineering Materials, Vol. 473, pp. 69-74, 2011.
- [4] Paul, A. Strano, M., "The Influence of Process Variables on The Gas Forming and Press Hardening of Steel Tubes" Journal of Materials Processing Technology, Vol 228, pp. 160-169, 2016.
- [5] Jung-Sung, T. Shyong, L., "Hot Bend Assisted Gas Forming of AA5083 Sheet for Making V-Shaped Trough Containing Deep Uneven Concavities" Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 26, pp 1546-1554. 2016.
- [6] Nasrollahzade, M. Shahbazi Karami, J. Moslemi Naeini, H. Hashemi, S. J. Ohammadi Najafabadi, H., "Multi Objective 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)
- [7] Maeno, T. Mori, K. I. Fujimoto, K., "Hot Gas Bulging of Sealed Aluminium Alloy Tube Using Resistance Heating" Manufacturing Review, Vol. 1, No. 5, pp. 31-38, 2014.
- [8] Zarazua, J. I. Vadillo, L. Mangas, A. Santos, M. M. A. Gutierrez, B. Gonzalez, C. Testani, S. Argentero., "Alternative Hydroforming Process for High Strength and Stainless Steel Tubes in the Automotive Industry" IDDRG International Conference Hungary, 2007.
- [9] Vadillo, L. Santos, M. T. Gutierrez, M. A. Perez, I. Gonzalez, B. Uthaisangsk, V., "Simulation and Experimental Results of the Hot Metal Gas Forming Technology for HighStrength Steel and