



شبیه‌سازی عددی و ساخت بافل پره ثابت توربین گاز به روش هیدروفرمینگ

پوریا رئیسی^{۱*}، علی محمد کلاگر^۱، محمد چراغزاده^۱، محمد جواد میرنیا^۲

۱- کارشناسی ارشد، واحد تحقیق و توسعه، شرکت مهندسی مواد کاران، گروه مینا، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۴-۳۱۷۵۵، raissi.pouria@mapnamk.com

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ اسفند ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۶ فروردین ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۴ فروردین ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

هیدروفرمینگ

شبیه‌سازی عددی

فولاد زنگ‌نزن AISI304

بافل پره ثابت توربین گاز

در سال‌های اخیر، فرایند هیدروفرمینگ برای ساخت قطعات پیچیده از قبیل محفظه احتراق و بافل پره ثابت توربین گاز که فرایند شکل‌دهی مواد به‌خصوص ورق‌های سوپرآلیاژ در آن‌ها نقش کلیدی دارد، مورد توجه صنایع نیروگاهی قرار گرفته است. همچنین این فرایند به‌عنوان یک فرایند تکمیلی و ساینینگ در انتهای فرایندهای ساخت جهت افزایش دقت ابعادی مجموعه مونتاژ شده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، به بررسی فرایند هیدروفرمینگ لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI304 جهت ساخت بافل پره ثابت توربین گاز پرداخته شده است. پیش از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و برای ارزیابی دقیق‌تر، فرایند هیدروفرمینگ لوله در سه مرحله پیش‌فرم لوله، عملیات حرارتی لوله پیش‌فرم شده و در نهایت انجام فرایند هیدروفرمینگ در قالب نهایی شبیه‌سازی گردید و در این راستا یک مدل عددی شبیه‌سازی اجزا محدود در محیط کد تجاری آباکوس توسعه داده شد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و مطابقت خوبی بین آن‌ها مشاهده گردید. همچنین بهترین حالت تغییر فرم جهت دستیابی به فرم نهایی بافل، انجام هیدروفرمینگ لوله پیش‌فرم آنیل شده در فشار روغن ۱۰۰ بار به دست آمده است.

Numerical simulation and of gas turbine nozzle baffle manufacturing by hydroforming method

Pouria Raissi^{1*}, Ali Mohammad Kolagar¹, Mohammad Cheraghzadeh¹, Mohammad Javad Mirnia²

1- Research and development Department, MavadKaran Engineering Company, Mapna Group, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 31755-144 Tehran, Iran, raissi.pouria@mapnamk.com

Article Information

Original Research Paper
Received: 25 February 2023
First Decision: 5 April 2023
Accepted: 13 April 2023

Keywords:

Hydroforming
Numerical Simulation
AISI304
Turbine Nozzle Baffle

Abstract

In recent years, the hydroforming process for manufacturing complex parts such as combustion chamber and gas turbine nozzle baffle, in which the forming process of materials, especially super alloy sheets, has a key role, has attracted the attention of power plant industries. Also, this process is used as a supplementary and sizing process at the end of the manufacturing process to increase the dimensional accuracy of the assembled component. In this research, the hydroforming process of AISI304 stainless steel tube for manufacturing of gas turbine nozzle baffle has been investigated. Before conducting the experimental tests and for a more accurate evaluation, the hydroforming process of the pipe was simulated in three stages: pre-forming the pipe, heat treatment of the pre-formed pipe and finally performing the hydroforming process in the final form, and in this regard, a numerical model was created. Finite element simulation was developed in Abaqus commercial code environment. In the following, the simulation results were compared with the laboratory results and a good agreement was observed between them. Also, the best form change mode to achieve the final form of the baffle is hydroforming the annealed preform tube at 100 bar oil pressure.

۱- مقدمه

صنایع نظامی و خودروسازی فرایند هیدروفرمینگ به‌صورت محدود اجرا شده است. در روش هیدروفرمینگ، قطعه خام اولیه در اثر اعمال فشار سیال، شکل حفره قالب یا سنبه شکل‌دهی را به خود می‌گیرد. قطعه خام اولیه مورد استفاده در این فرایند معمولاً ورق یا لوله است که در صورت استفاده از ورق، این فرایند هیدروفرمینگ ورق و در صورت استفاده از لوله به‌عنوان

با توجه به گسترش محصولات در حوزه ورق‌کاری از قبیل محفظه احتراق و بافل بعضی از پره‌های ثابت توربین گاز و با توجه به قابلیت‌های فرایند هیدروفرمینگ در ساخت قطعات پیچیده و منحصربه‌فرد، لزوم پیاده‌سازی و اجرای فرایند هیدروفرمینگ اهمیت می‌یابد. در بعضی از صنایع از قبیل

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Raissi, A.M. Kolagar, M. Cheraghzadeh, M.J. Mirnia, Numerical simulation and of gas turbine nozzle baffle manufacturing by hydroforming method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 10, pp. 28- 41, 2022 (in Persian). <https://doi.org/10.22034/IJME.2023.386880.1752>

اجزای قالب، کاهش فرایندهای مونتاژی، تolerانس ابعادی دقیق و قابلیت فرم‌دهی شکل‌های پیچیده را به دنبال دارد.

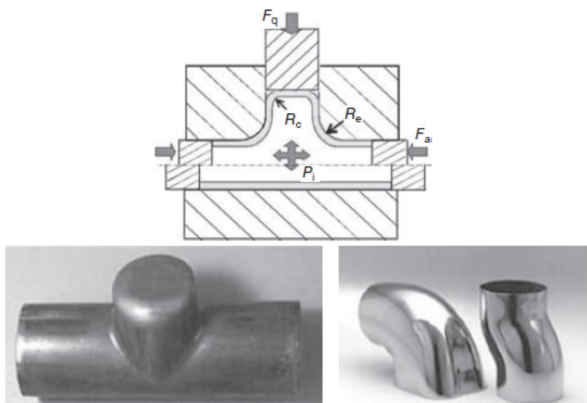


Fig. 2 Sample produced by pipe hydroforming method and process parameters [1]

شکل ۲ نمونه تولید شده به روش هیدروفرم لوله و پارامترهای فرایند [۱]

یوان و همکاران [۱] در پژوهش‌های خود رفتار چروکیدگی در فرایند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای را با استفاده از روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند چروکیدگی قابل رفع (چروکیدگی مفید) برای رسیدن به شکل نهایی بهتر کمک می‌کند. چروکیدگی مفید در اثر مسیر مناسب بارگذاری ایجاد می‌شود و چنانچه مسیر بارگذاری صحیح نباشد، چروکیدگی مرده به وجود می‌آید. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که گستره شکل‌دهی در هیدروفرمینگ لوله دارای دو قسمت شکل‌دهی با چروکیدگی مفید و شکل‌دهی بدون چروکیدگی می‌باشد. چروکیدگی مفید می‌تواند منطقه ایمن شکل‌دهی را افزایش دهد. امکان دستیابی به انبساط بیشتر با ایجاد چروکیدگی مفید و ورود ماده بیشتر در ناحیه انبساط قطعه وجود دارد. قطعه به دست آمده با ایجاد چروکیدگی مفید، دارای ضخامت یکسان نیست؛ به طوری که در پایین‌ترین نقطه چروکیدگی بیشترین و در بالاترین نقطه چروکیدگی کمترین ضخامت به وجود می‌آید. نیکر و همکاران [۲] فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار بالا و پایین را با استفاده از روش اجزا محدود برای یک قطعه نهایی مشابه شبیه‌سازی نمودند. در هیدروفرمینگ با فشار بالا قطعه لوله‌ای با اعمال فشار بالا در حالت کشیدگی تغییر شکل می‌یابد. در هیدروفرمینگ لوله با فشار پایین قالب پایینی ثابت و قالب بالا به سمت پایین حرکت کرده و لوله را شکل می‌دهد. در فرایند هیدروفرمینگ با فشار پایین محیط لوله باید با محیط نهایی یکی باشد. در این فرایند با فشار بالا لوله دچار نازک‌شدگی شده درحالی که در فرایند

قطعه خام اولیه، این فرایند هیدروفرمینگ لوله نام‌گذاری می‌شود. با توجه به هندسه محصول، فرایند هیدروفرمینگ به طور کلی به سه دسته هیدروفرمینگ لوله، پوسته و ورق تقسیم می‌شود.

توسعه صنعتی هیدروفرمینگ از سال ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد و امروزه در صنعت به گونه‌ای گسترش یافته است که طبق آمار، ۵۰ درصد شاسی تولید شده در سال ۲۰۰۴ میلادی در آمریکای شمالی به روش هیدروفرمینگ لوله بوده است. قطعه کار اولیه در این روش یک لوله مستقیم است که توسط عملیات اکستروژن به صورت یکپارچه ساخته شده و یا توسط عملیات نورد به صورت درزدار ساخته شده است و بسته به شکل قطعه نهایی تحت عملیات پیش‌فرم قرار گرفته و عملیات خم‌کاری روی آن انجام می‌شود و یا به همان صورت اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۱) چرخه تولید به روش هیدروفرمینگ لوله را نشان می‌دهد [۱].

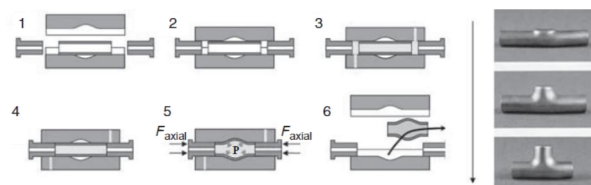


Fig. 1 Pipe hydroforming production cycle [1]

شکل ۱ چرخه تولید هیدروفرمینگ لوله [۱]

در ابتدا لوله اولیه درون نیمه قالب پایینی قرار گرفته و سپس قالب بالایی به طرف پایین حرکت می‌کند تا به قالب پایینی برسد؛ سپس سنبه‌های جانبی که وظیفه آب‌بندی و تغذیه محوری را بر عهده دارند، به سمت ابتدا و انتهای لوله حرکت می‌کنند. لوله با سیال پر شده و فشار داخل لوله تا فشار لازم برای فرم‌دهی بالا می‌رود. با افزایش فشار سیال، لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد. همزمان با افزایش فشار سیال، سنبه‌های جانبی لوله را به سمت ناحیه شکل‌دهی هدایت می‌کنند تا بدین وسیله کاهش جداره لوله ناشی از انبساط آن جبران شود. در نهایت فشار داخل لوله کاهش یافته و سیال داخل لوله خارج شده و سنبه‌های جانبی عقب رفته و قالب بالایی باز می‌شود. سپس قطعه کار از داخل قالب خارج می‌شود. شکل ۲ نمونه‌های تولید شده به این روش و نیروهای فرایند هیدروفرمینگ لوله را نشان می‌دهد که در آن P_i فشار داخل لوله، F_a نیروی محوری و F_q نیروی معکوس است [۱].

فرایند هیدروفرمینگ لوله در مقایسه با روش‌های متداول شکل‌دهی دارای صرفه‌جویی اقتصادی است و در نتیجه کاهش

بافل پره ثابت توربین گاز در گذشته به صورت درزدار ساخته می‌شد به این صورت که دو قطعه فرم داده شده بالا و پایین بافل با استفاده از جوشکاری به همدیگر متصل می‌شدند. در این روش جوشکاری در لبه حمله و فرار بافل صورت می‌گیرد که سبب اعوجاج و همچنین عدم شکل‌گیری انحنا مناسب لبه حمله و فرار بافل شده و در نتیجه در مرحله سوراخ‌کاری لبه حمله مشکلاتی ایجاد می‌گردد. در این مقاله هدف ساخت بافل به صورت یکپارچه به روش هیدروفرمینگ می‌باشد که علاوه بر کاهش هزینه‌های ساخت، کیفیت ساخت قطعه را نیز بهبود می‌بخشد.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- شبیه‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی اجزا محدود توسط نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام شد. ابعاد لوله اولیه (قطر خارجی، ضخامت و طول اولیه) در جدول ۱ آورده شده است. طول اولیه لوله با استفاده از مدل‌سازی‌ها و همچنین محدودیت قالب نهایی به دست آمده است. در فرایند هیدروفرمینگ لوله معمولاً ضریب اصطکاک با روان‌ساز بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود [۹].

جدول ۱ ابعاد لوله اولیه مورد استفاده در این تحقیق

Table 1 Dimensions of the primary pipe used in this research

طول اولیه (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)
۱۷۵	۰/۴	۱۲

مدل هندسی قالب نهایی بعد از ابعادبرداری نوری، در نرم‌افزار کتیا^۲ مدل‌سازی و سپس در نرم‌افزار آباکوس وارد گردید. تصاویر کفه بالا و پایین قالب پیش فرم و قالب نهایی بافل پره ثابت توربین گاز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. خواص مکانیکی مورد نیاز جهت شبیه‌سازی اجزا محدود از ورق سوپرآلیاژ پایه نیکل AISI304 با ضخامت اولیه ۰/۴ میلی‌متر استخراج گردید. در این راستا آزمون کشش تک‌محوری برای به دست آوردن خواص مکانیکی، مطابق استانداردهای ASTM E517 و ASTM E8 در سه جهت نورد (RD)، قطری (DD) و عمود بر نورد (TD) انجام شد (جدول‌های ۲ و ۳).

هیدروفرمینگ با فشار پایین تغییرات ضخامت ناچیز است. یوان و همکاران [۳] اثر مسیرهای فشار مختلف بر هیدروفرمینگ لوله‌های فولادی را در یک قالب با سطح مقطع مربعی بررسی کردند. مسیرهای فشار مختلف در فرایند هیدروفرمینگ در شکل ۳ نشان داده است. طبق مسیر فشار شماره ۱، قطعه شکل داده شده با اعمال فشار ۱۰۵ مگاپاسکال، شعاع گوشه ۱۳/۵ میلی‌متر به دست آمده که ۷/۵ میلی‌متر بزرگ‌تر از شعاع قالب است. در این مسیر سنبه‌های جانبی حرکتی نداشتند و حد شکل‌دهی پایین بوده و منجر به نازک‌شدگی و در نهایت پارگی ورق شده است [۳].

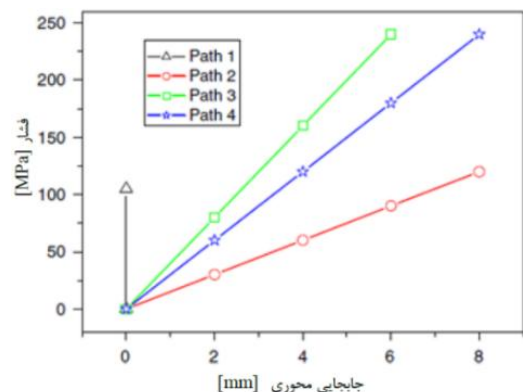


Fig. 3 Different pressure paths in the hydroforming process [3]

شکل ۳ مسیرهای فشار مختلف در فرایند هیدروفرمینگ [۳]

موسوی و همکاران [۴] در پژوهشی سعی کردند پرشدگی گوشه‌های قالب را با ایجاد یک مسیر فشار نوسانی مناسب بهبود بخشند. آن‌ها از این ایده بهره گرفتند که با کنترل چروکیدگی‌های قابل‌برگشت، می‌توان شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ را بهبود بخشید. نتایج حاصل از فشار حداکثر، فشار نوسانی و فشار میانگین در شکل ۴ نشان داده شده است.

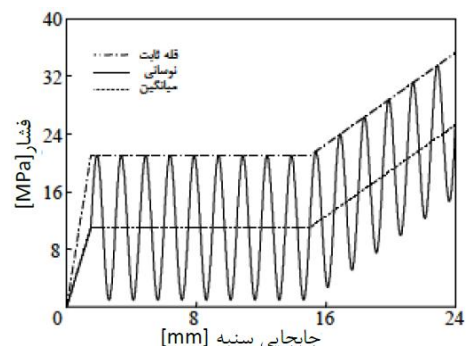


Fig. 4 Filling behavior of die corner for linear peak and pulsating pressures [4]

شکل ۴ مسیر فشار نوسانی جهت پرشدگی گوشه‌های قالب [۴]

¹ Abaqus

² Catia

هندسه پیش‌بینی شده تحت فشار ۳۵۰۰ بار به همراه تغذیه ۳۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در کنار فشار بالای اعمالی، همچنان قسمت عریض قالب به‌طور کامل پر نشده است؛ همچنین به دلیل اعمال تغذیه زیاد احتمال چین‌خوردگی بسیار بالا می‌رود. حالت‌های متفاوتی از مسیر فشار و تغذیه محوری برای شکل‌دهی در یک مرحله به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت نتیجه عنوان شده در بالا مبنی بر لزوم به‌کارگیری و طراحی قطعه پیش‌فرم مناسب تأیید شد. بدین منظور برای کاهش فشار و امکان پر کردن حفره قالب نهایی، به طراحی پیش‌فرم پرداخته شد. هندسه پیش‌فرم بایستی طوری باشد که میزان جابجایی مواد درون قالب نهایی در اثر اعمال فشار سیال داخلی کمتر شده و در نتیجه اثر اصطکاک کاهش یافته و فشار مورد نیاز کمتر گردد. در نتیجه با توجه به هندسه قطعه نهایی و لوله اولیه، هندسه پیش‌فرم مابین این دو حالت طراحی گردید به‌طوری‌که بتوان با فشار سیال کمتر قطعه پیش‌فرم را شکل داد و نیز تنها با بسته شدن دو نیمه قالب نهایی قطعه پیش‌فرم به هندسه مورد نظر شکل داده شود. عدم پرشدگی در شکل ۷ حتی در فشارهای بالا، بیشتر به دلیل گوشه‌های تیز قطعه نهایی با شعاع انحنای بسیار کوچک است. این مطلب بیشتر در گوشه بالا سمت راست تصویر به دلیل عرض بیشتر اتفاق می‌افتد.

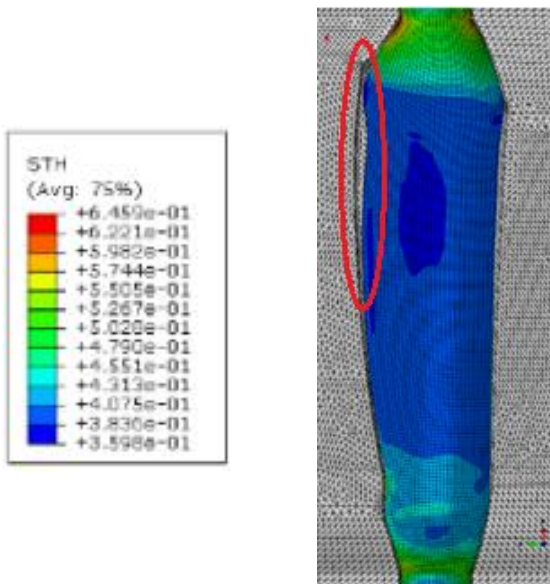


Fig. 7 Single-stage forming, 3500 bar pressure with 32 mm feed
 شکل ۷ شکل‌دهی تک‌مرحله‌ای، فشار ۳۵۰۰ بار با تغذیه ۳۲ میلی‌متر

بر این اساس به نظر می‌رسد که بایستی یک قطعه پیش‌فرم با شرایط زیر طراحی گردد:

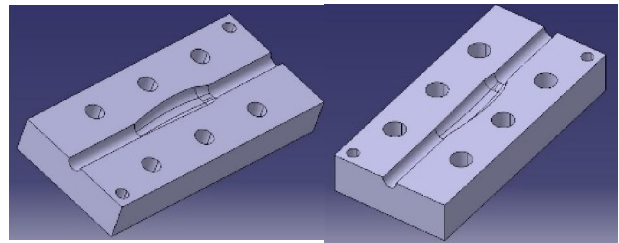


Fig. 5 Upper and lower die of the gas turbine vane baffle

شکل ۵ تصاویر کفه بالا و پایینی قالب نهایی بافل پره ثابت توربین گاز

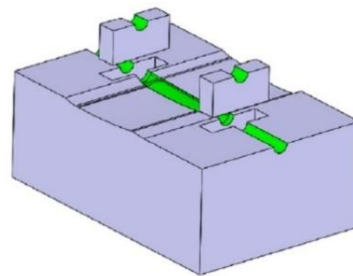


Fig. 6 Lower die of final mold and pipe holder

شکل ۶ تصویر فک پایینی قالب اصلی و نگهدارنده لوله

جدول ۲ خواص مکانیکی و ضرایب رابطه کارسختی سوئیفت ورق AISI304

در جهات مختلف در دمای محیط

Table 2 Mechanical properties and work hardening coefficients of Swift AISI304 sheet in different directions at ambient temperature

E (GPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)	Poisson's ratio	Swift hardening parameters		
				K (MPa)	ϵ_0	n
۲۰۰	۳۱۲	۷۶۳	۰/۳	۱۸۴۸	۰/۰۸۷	۰/۷۵
Lankford coefficients				YS: تنش تسلیم		
r_0	r_{45}	r_{90}	UTS: تنش شکست			
۰/۸۳	۱/۱۴	۰/۹۴	$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$			

جدول ۳ ضرایب رابطه کارسختی سوئیفت ورق AISI304 در جهات مختلف

در دمای محیط

Table 3 Work hardening coefficients of Hills in different directions at ambient temperature

پارامترهای معیار عملکرد	F	G	H	L	M	N
هیل در سال ۱۹۴۸	۰/۴۸	۰/۵۴۶	۰/۴۵۳	۱/۵	۱/۵	۱/۶۸۵
پارامترهای معیار هیل در	R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
سال ۱۹۴۸ در آباکوس	۱/۰	۱/۰۳۵	۰/۹۸۷	۰/۹۴۳	۱/۰	۱/۰

در ابتدا امکان هیدروفورمینگ تک‌مرحله‌ای بر روی لوله مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی اولیه، مشاهده شد که در صورت وجود اصطکاک (که اجتناب‌ناپذیر است)، امکان پر شدن قالب نهایی در یک مرحله از فرایند هیدروفورمینگ وجود ندارد؛ همچنین برای شکل‌دهی در یک مرحله نیاز به فشارهای هیدرولیک بالایی می‌باشد. شکل ۷

پیش‌فرم طراحی شده در شکل ۸-ب نمی‌تواند حفره‌های قالب نهایی نشان داده شده در شکل ۹ را به‌طور کامل پر نماید. به بیان دیگر مشکل نشان داده شده در شکل ۱ در اینجا نیز رخ می‌دهد. بدین منظور از پیش‌فرم شکل ۸-ج استفاده شد. در این صورت به دلیل کشیدگی جانبی زیاد، لهیدگی شدید بین دو نیمه قالب نهایی به وجود می‌آید. در ادامه از پیش‌فرم شکل ۸-د استفاده شد که در آن محل بیشینه انبساط عرضی مقداری به وسط قطعه منتقل گردید تا لهیدگی کمتر شود. در این صورت مشاهده شد که همچنان عدم پرشدگی و میزان اندک لهیدگی اتفاق می‌افتد.

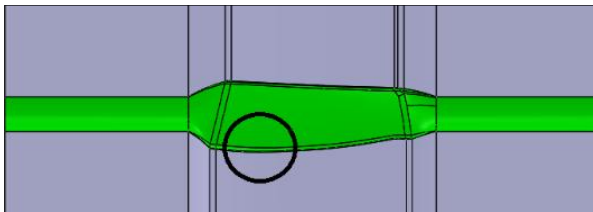


Fig. 9 Critical location of the final mold

شکل ۹ تصویر محل بحرانی قالب نهایی

با توجه به ناحیه بحرانی شکل ۹ و هندسه‌های اولیه نشان داده شده در شکل ۸، هندسه نهایی پیش‌فرم به‌صورت شکل ۱۰ طراحی شد. در شکل ۱۰، میزان انبساط جانبی قطعه پیش‌فرم به‌صورت تدریجی ولی این‌بار به‌صورت یک منحنی درجه سه از چپ به راست افزایش می‌یابد. بر اساس شکل پیش‌فرم نشان داده شده در شکل ۱۰، شبیه‌سازی عددی فرایند هیدروفرمینگ در قالب نهایی انجام شد.

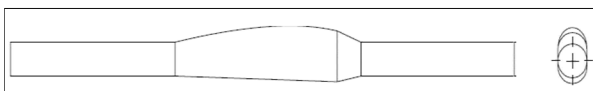


Fig. 10 Geometry of the final preform

شکل ۱۰ تصویر هندسه پیش‌فرم نهایی

شکل ۱۱ قطعه نهایی را تحت فشار داخلی ۲۰۰ بار و بدون اعمال تغذیه محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیش‌فرم طراحی شده توانسته است به مقدار زیادی به هندسه نهایی نزدیک شود. با توجه به لوله پیش‌فرم طراحی شده در شکل ۱۰، شبیه‌سازی مرحله نهایی هیدروفرمینگ لوله پیش‌فرم شده، در شرایط مرزی پیش‌فشار ۱۵۰ بار و نیروی ۳۰ تن انجام شده است. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به ترتیب کانتور تنش ون‌میسز، کرنش پلاستیک و توزیع ضخامت در لوله هیدروفرم شده نهایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است توزیع

- دارای انحنا زیاد نباشد تا بتوان با فشار کمتر آن را شکل‌دهی نمود.
- از لحاظ عرضی حفره قالب نهایی را طوری پر نماید که تنها با بسته شدن دو نیمه قالب نهایی و بدون نیاز به فشار بالا، گوشه‌های تیز قطعه نهایی توسط لولا شدن و خمش شکل‌دهی گردد.
- تغذیه محوری در قالب نهایی مورد نیاز نباشد و تنها در شکل‌دهی پیش‌فرم برای کنترل نازک‌شدگی استفاده شود.

بر اساس سه شرط بالا، سه هندسه اولیه قطعه پیش‌فرم در شکل ۸ طراحی و مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. طرح‌های اولیه پیش‌فرم توسط مدل‌سازی عددی با آزمون‌وخطا در نرم‌افزار آباکوس انجام شد تا بتواند شرایط ذکر شده در بالا را برآورده سازد. مطابق شکل ۸، هندسه و قطر ابتدا و انتهای پیش‌فرم‌ها دقیقاً برابر با قطر لوله اولیه می‌باشد و تنها مطابق با حفره قالب نهایی، هندسه پیش‌فرم به‌صورت عرضی به تدریج دارای کشیدگی از سمت چپ به راست در جهت ۱ و ۲ است. با مقایسه نمای جانبی شکل ۸-الف با سه هندسه پیش‌فرم، مشخص شد که انحنا گوشه پیش‌فرم دقیقاً برابر با انحنا لوله اولیه بوده و تنها انبساط به مقدار قابل توجه در جهت ۱ و به میزان کمتر در جهت ۲ باید در فرایند هیدروفرم مرحله اول انجام شود. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد بر روی هندسه‌های نشان داده شده در شکل ۸ مشخص گردید که با میزان فشار به‌مراتب کمتر از مقدار بیان شده در بالا می‌توان تمام پیش‌فرم‌ها را شکل‌دهی نمود. این فشارها در محدوده ۵۰۰ بار تا ۱۲۰۰ بار پیش‌بینی شدند. همچنین با قرارگیری پیش‌فرم‌ها داخل قالب نهایی می‌توان به‌راحتی تنها با بسته شدن دو نیمه قالب گوشه‌های دارای انحنا قطعه نهایی را به دست آورد. تنها مشکل باقیمانده میزان پرشدگی حفره قالب نهایی است.

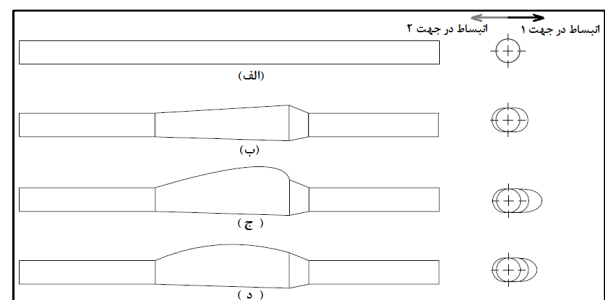


Fig. 8 Geometry of primary preforms: a) primary pipe, b) first preform, c) second preform and d) third preform

شکل ۸ هندسه پیش‌فرم‌های اولیه: الف) لوله اولیه، ب) پیش‌فرم اول، ج) پیش‌فرم دوم و د) پیش‌فرم سوم

از اهمیت خاصی جهت تحلیل شکل‌دهی برخوردار نیست. مطابق شکل ۱۳ مقدار بیشینه کرنش پلاستیک در سراسر بافل (قطعه برش خورده از لوله هیدروفرم‌شده) حدود ۱/۳ درصد می‌باشد که بنابراین انتظار می‌رود در ساختار لوله پس از انجام فرایندهای هیدروفرمینگ تغییر چندانی انجام نشده است.

ضخامت در بافل در محدود ۰/۳۸-۰/۴۰ میلی‌متر است که نشان‌دهنده تغذیه محوری و فشار مناسب در هر دو مرحله هیدروفرم می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ای از لوله هیدروفرم‌شده مقدار بیشینه تنش ون مایسز از مقدار استحکام نهایی لوله فراتر رفته است ولی به دلیل این‌که این ناحیه جز نواحی برش خورده لوله هیدروفرم شده می‌باشد

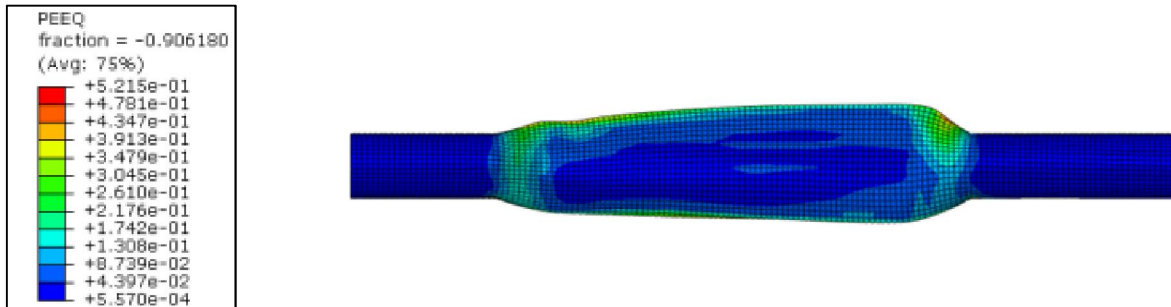


Fig. 11 Numerical simulation of final preform design (Plastic strain mm/mm)

شکل ۱۱ شبیه‌سازی عددی طراحی پیش‌فرم نهایی (کانتور کرنش پلاستیک mm/mm)

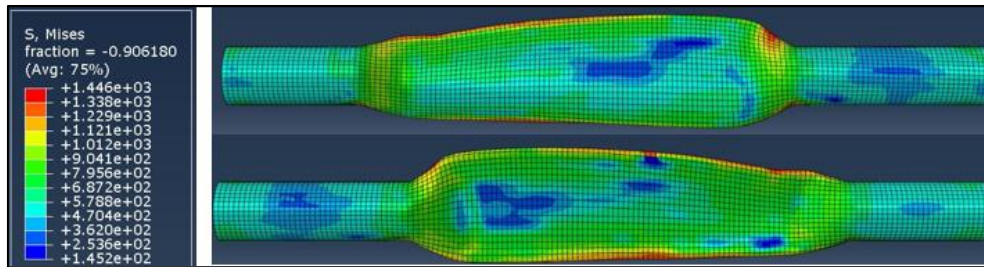


Fig. 12 Von Mises residual stress (MPa) in the final hydroforming pipe

شکل ۱۲ تنش پسماند ون مایسز (MPa) در لوله هیدروفرم نهایی

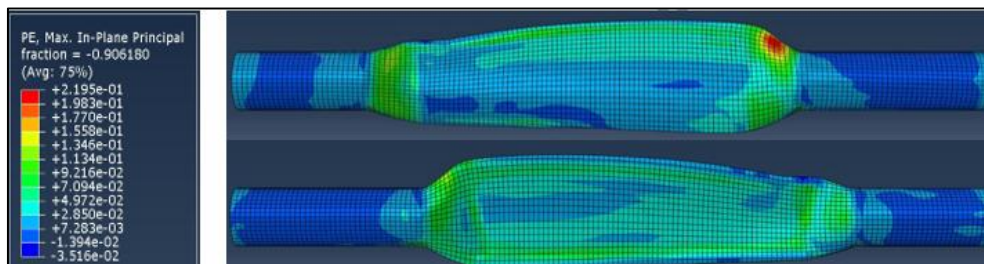


Fig. 13 Plastic strain (mm/mm) in the final hydroforming pipe

شکل ۱۳ کرنش پلاستیک (mm/mm) در لوله هیدروفرم نهایی

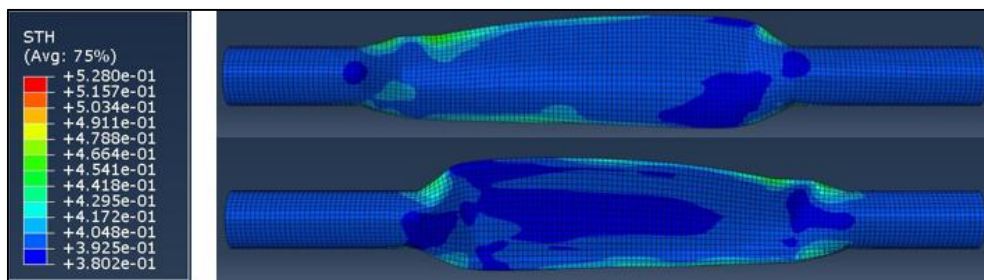


Fig. 14 Thickness distribution (mm) in the final hydroforming pipe

شکل ۱۴ توزیع ضخامت (mm) در لوله هیدروفرم نهایی

برای ساخت بافل به روش هیدروفرمینگ پیش‌فرم، از لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI304 به ضخامت ۰/۴ میلی‌متر، قطر ۱۲ میلی‌متر و طول ۱۷۵ میلی‌متر استفاده شد. ترکیب شیمیایی اسمی این فولاد در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ ترکیب شیمیایی اسمی فولاد زنگ‌نزن AISI304 مورد استفاده در این تحقیق بر حسب درصد وزنی

Table 5 The nominal chemical composition of AISI304 stainless steel used in this research in terms of weight percent

عنصر شیمیایی، %	C	Cr	Ni	S	P	Mn	Fe
AISI304	۰/۰۷	۱۹/۲	۹/۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۱/۵	باقیمانده

مطابق تئوری‌های مدل مینا (بافل پره ثابت توربین گاز)، در قسمت کورد^۱ بافل در قسمت میانی تئرانس مثبت تا ۰/۲ و تئرانس منفی تا ۰/۵ مجاز می‌باشد. در قسمت Tmax ایرفویل بافل تئرانس مثبت ۰/۱ و تئرانس منفی ۰/۱ مجاز است که نشان دهنده بسته بودن تئرانس در قسمت مثبت بافل در تمامی ابعاد بوده است و به همین دلیل چاقی بافل به هیچ‌عنوان قابل قبول نخواهد بود.

با توجه به اینکه شبیه‌سازی اجزا محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله پیش‌فرم بر اساس خواص لوله اولیه بوده و میزان برگشت فنی لوله نیز در نظر گرفته نشده است، در مرحله آزمایشگاهی با تغییر فشار داخل روغن لوله پیش‌فرم، حداقل فشار روغن لازم جهت جلوگیری از چروکیدگی و پرشدن قالب مشخص شد. بنابراین برای ساخت قطعه، میزان فشارهای روغن ۱، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ بار در نظر گرفته شد. در این مرحله جهت جلوگیری از لهیدگی لوله، لوله‌های پیش‌فرم شده در فک پایین قالب اصلی قرار داده شد و با استفاده از تکیه‌گاه طراحی شده در فک نگهداری شده (شکل ۱۶) و سپس فک پایین بر روی لوله پیش‌فرم در حالت مماس قرار گرفته است.

همان‌طور که اشاره شد بخش تغذیه محوری، مهم‌ترین جز فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ها می‌باشد. این مجموعه معمولاً بر روی یک دستگاه پرس نصب می‌شود و دستگاه پرس تنها نقش بسته نگه داشتن حفره‌های قالب را دارد. به‌طورکلی سیستم تغذیه محوری به‌صورت مجزا از دستگاه پرس عمل کرده و می‌تواند طوری طراحی شود که بر روی دستگاه‌های مختلف سوار شود. شکل ۱۷ تصویر اجزا اصلی از سیستم مورد نظر را

یکی از نکات مهم و اساسی در هر تحلیل اجزا محدود، آنالیز حساسیت به مش است. اندازه مش، اطراف منطقه‌ای که بیشترین تغییر شکل را دارد، در نظر گرفته شد و تغییرات تنش ون مایسز به دست‌آمده از تحلیل با آن مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۱۵ این تغییرات ارائه شده و همان‌طور که دیده می‌شود بعد از اندازه مش در حدود ۲ میلی‌متر (۴۰ میکرومتر)، با تغییر اندازه مش، تنش ون مایسز تغییرات چندانی ندارد.

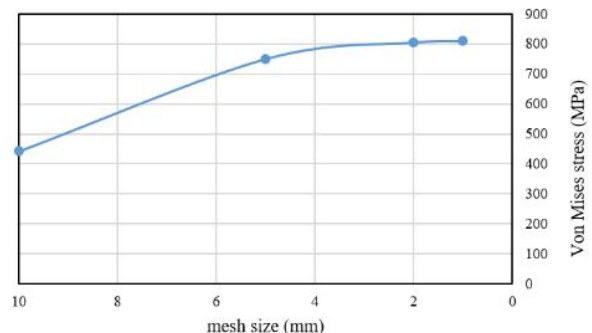


Fig. 15 Mesh sensitivity analysis results

شکل ۱۵ نتایج تحلیل حساسیت به مش

۲-۲- آزمون‌های تجربی

شبیه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ برای تولید بافل به‌صورت تک‌مرحله‌ای نشان داده است که به فشار سیال در حدود ۶۰۰۰ تا ۷۰۰۰ بار نیاز است ولی ساخت بافل در دو مرحله به‌صورت (الف) پیش‌فرم لوله با هندسه بهینه‌سازی شده تحت فشار تا ۹۰۰ بار و ۱۷ میلی‌متر تغذیه محوری از یک سمت و (ب) تولید نهایی قطعه با قالب نهایی با فشار پرس ۳۰ تن و فشار روغن ۲۰۰ بار منجر به نتایج بهتری می‌شود. در این حالت علاوه بر کاهش هزینه ساخت دستگاه و همچنین انجام آزمون در فشار روغن پایین، کیفیت ساخت بافل نیز بالاتر می‌رود؛ بنابراین طراحی متغیرهای آزمون‌های تجربی در سطوح متفاوت مطابق جدول ۴ تعیین شده است.

جدول ۴ طراحی آزمایش‌های اجرایی

Table 4 Design of Experiments (DOE)

متغیرها	مرحله پیش‌فرمینگ		مرحله هیدروفرم نهایی	
	فشار روغن (bar)	نیروی پرس (تن)	فشار روغن (bar)	نیروی پرس (تن)
سطح	۱	۱	۴	۱
مقادیر	۹۰۰	۳۰	۱۵۰ ۱۰۰ ۱	۲۰۰ ۳۰

¹ Chord

حفره قالب بوده است. در شکل ۱۸ هندسه لوله‌های پیش‌فرم شده مطابق مراحل فوق نشان داده شده است. در این مرحله مهم‌ترین نکته جلوگیری از چروکیدگی در ناحیه تغذیه محوری و نازک شدن لوله به‌خصوص در ناحیه افزایش قطر می‌باشد. در شکل ۱۹ مقدار پرشدگی قالب پیش‌فرم نشان داده شده است.



Fig. 18 Preformed pipes of AISI304 stainless steel material

شکل ۱۸ تصویر لوله‌های پیش‌فرم شده از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI304



Fig. 19 Preformed pipe in preform mold

شکل ۱۹ تصویر لوله پیش‌فرم شده در قالب پیش‌فرم

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- آزمون فشار ۲۰۰ بار

برای انجام آزمون در فشار ۲۰۰ بار، لوله پیش‌فرم شده در قالب نهایی قرار داده شده و سپس فک بالایی قالب با استفاده از پرس هیدرولیک بسته شده است. تصویر بافل هیدروفرم شده در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لهیدگی قابل توجهی در ناحیه لبه فرار بافل ایجاد شده است که مورد قبول نمی‌باشد.



Fig. 20 Final hydroforming pipe at 200 bar oil pressure

شکل ۲۰ لوله هیدروفرم شده در فشار روغن ۲۰۰ بار

جهت بررسی دقیق‌تر، هندسه لوله هیدروفرم شده توسط اسکن نوری ابعادبرداری شده و سپس با مدل مینا از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در این پروژه از اسکنر نوری برند Nub3d با دقت megapixel

نشان می‌دهد. در طراحی سیستم تغذیه محوری مدار هیدرولیک و کنترل دو جک تغذیه و فشار داخل لوله از بخش‌های مهم و حساس سیستم دستگاه هیدروفرمینگ می‌باشد.



الف



ب

Fig. 16 Upper die and lower die of final hydroforming

شکل ۱۶ الف) کفه بالا قالب، ب) کفه پایین قالب هیدروفرمینگ مرحله نهایی

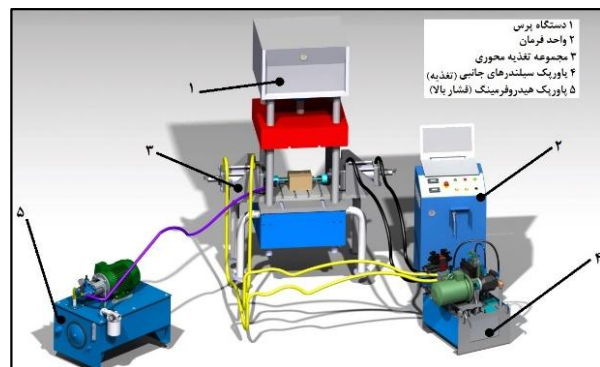


Fig. 17 Axial feeding device

شکل ۱۷ تصویر دستگاه تغذیه محوری

با توجه به نتایج شبیه‌سازی برای جلوگیری از چروکیدگی و نازک شدن لوله، مقدار تغذیه محوری و همچنین افزایش فشار، به‌صورت پله‌ای در نظر گرفته شد. در آخرین مرحله برای فرم‌دهی ناحیه کم‌انرژی شکل لوله پیش‌فرم، مقدار فشار تا ۹۰۰ بار افزایش داده شد که سبب کاهش ضخامت ورق در این ناحیه شده است. مجموعه لوله و سنبه‌ها به‌صورت هم‌راستا در داخل کفه پایینی قالب قرار گرفته به‌طوری‌که همراه لوله در وسط

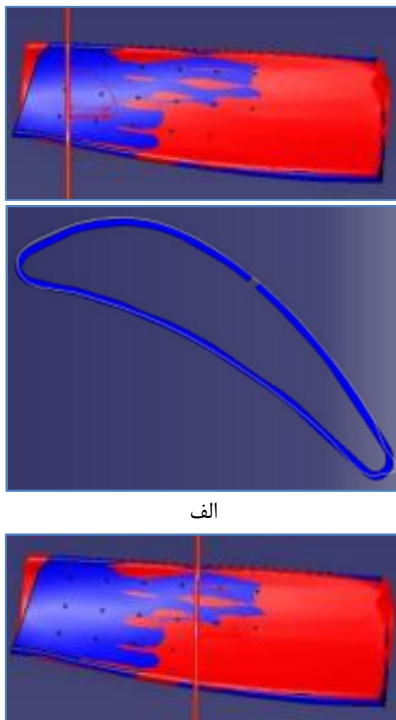
مقدار کمی خواص مکانیکی لوله پیش‌فرم شده به حالت اولیه برگشته و با کاهش تنش‌های داخلی میزان شکل‌پذیری لوله افزایش یابد. همانند حالت قبل در ابتدا فشار روغن در لوله به ۱۵۰ بار رسانده شده و سپس فک بالایی قالب با فشار پرس هیدرولیک بسته شده است. در شکل ۲۲ نمونه بافل تولید شده در این شرایط نشان داده شده است.



Fig. 22 Sample of baffles produced by hydroforming method

شکل ۲۲ نمونه بافل‌های تولید شده به روش هیدروفرم در قالب نهایی

در شکل ۲۳ هندسه بافل تولید شده با مدل مبنا در مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت با توجه به آنیل شدن لوله پیش‌فرم، همچنان مشکلات چاق شدن بافل وجود داشته است. بافل ساخته شده در فشار ۱۵۰ بار با مدل مبنا از لحاظ ابعادی در مقاطع a-a و b-b تطابق بالایی دارد اما در مقطع c-c طول کورد به اندازه ۰/۲۵ میلی‌متر کوتاه‌تر و ایرفویل حدود ۰/۴ میلی‌متر چاق‌تر می‌باشد.



resolution ۱/۲ استفاده شده است. در شکل ۲۱ وضعیت ابعادی لوله‌های هیدروفرم شده با مدل مبنا نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۱، طول کورد در لبه حمله به‌طور متوسط ۱ میلی‌متر کوتاه‌تر ولی در قسمت ایرفویل به‌طور متوسط ۰/۷ میلی‌متر از هر دو سمت بزرگ‌تر شده است.

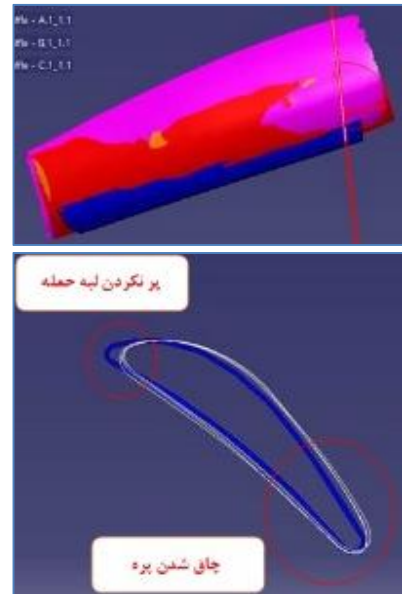


Fig. 21 Optical analysis of the final hydroforming pipe (white color) via the base model (blue color)

شکل ۲۱ مقایسه نتایج ابعادی لوله هیدروفرم شده (رنگ سفید) با مدل مبنا (رنگ آبی)

بزرگ‌تر شدن ایرفویل باعث عدم قرارگیری بافل در داخل پره شده و کوتاه‌تر شدن کورد در لبه حمله نیز موجب به هم خوردن الگوی خنک‌کاری در داخل پره می‌شود. نکته قابل توجه عدم پر شدن لبه حمله در قطرهایی است که بیشتر از قطر حداکثر در حالت پیش‌فرم می‌باشند؛ بنابراین با توجه به موارد فوق، کانتور^۱ ابعادی لوله هیدروفرم شده با کانتور ابعادی مدل مبنا هم‌پوشانی خوبی نداشته و مورد تأیید نمی‌باشد.

۳-۲- آزمون فشار ۱۵۰ بار

با توجه به نتایج آزمون فشار ۲۰۰ بار که با انحرافات ابعادی نظیر چاق شدن بافل و همچنین کوتاه شدن کورد همراه بوده است، در این مرحله برای رفع مشکلات مذکور، لوله‌های پیش‌فرم شده ابتدا در دمای ۱۰۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه آنیل شده و سپس در قالب اصلی قرار داده شدند. در این حالت انتظار می‌رود که با اعمال عملیات حرارتی، خواص فیزیکی و تا

^۱ - Contour

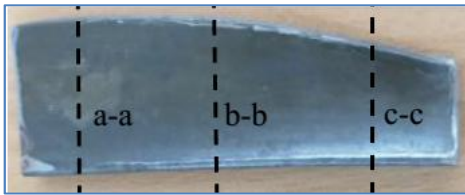
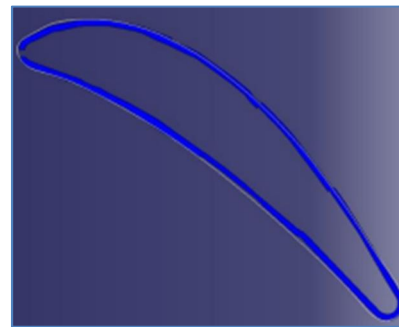


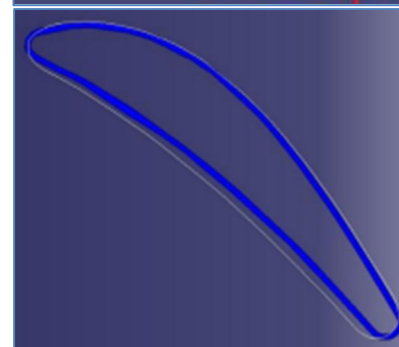
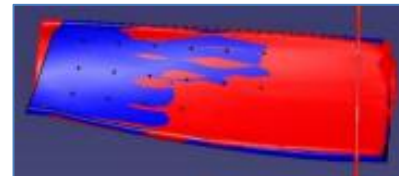
Fig. 24 Sample of baffles produced by hydroforming method

شکل ۲۴ نمونه بافل‌های تولیدشده به روش هیدروفرم در قالب نهایی

در شکل ۲۵ هندسه بافل تولید شده با ابعاد مدل مینا در مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ابعاد بافل هیدروفرم شده در فشار ۱۰۰ بار با مدل مینا در مقاطع a-a و b-b تطابق بالایی دارد و در مقطع c-c بافل طول کورد حدود ۰/۵ میلی‌متر کوتاه‌تر شده است.



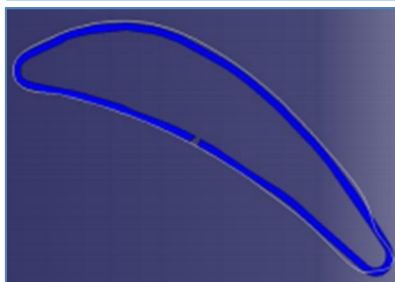
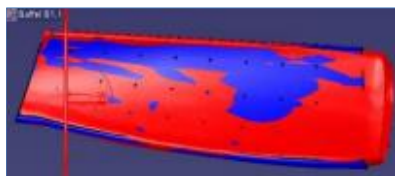
ب



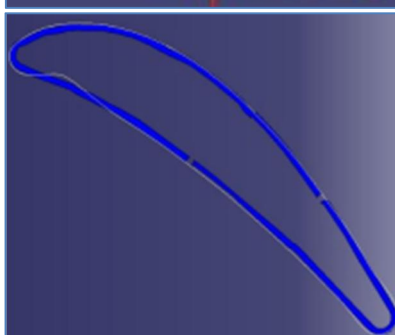
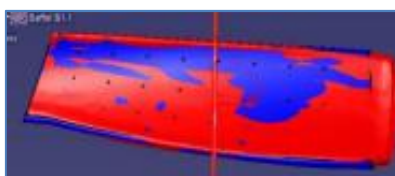
ج

Fig. 23 Comparing the optics of the production baffle with 150 bar (white color) oil pressure via the base sample (blue color) a) a-a section, b) b-b section and c) c-c section

شکل ۲۳ مقایسه ابعاد بافل تولید شده در فشار روغن ۱۵۰ بار (رنگ سفید) با نمونه مینا (رنگ آبی) (الف) در مقطع a-a، (ب) در مقطع b-b و (ج) در مقطع c-c



الف

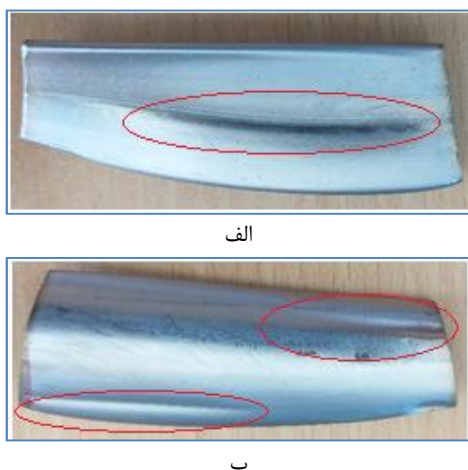


ب

۳-۳- آزمون فشار ۱۰۰ بار

با توجه به نتایج آزمون فشار ۱۵۰ بار که تا حدودی مشکل چاق شدن بافل در ناحیه همچنان وجود داشت، در این مرحله برای رفع مشکلات مذکور، لوله‌های پیش‌فرم آنیل شده در قالب اصلی با فشار روغن ۱۰۰ بار قرار داده شد و سپس فک بالایی قالب با فشار پرس هیدرولیک بسته شد. با کاهش فشار روغن داخل لوله، میزان برگشت فنری دیواره لوله کمتر شده و در نتیجه مشکل چاق شدن ایرفویل نیز کمتر شده است. در شکل ۲۴ نمونه‌های بافل تولید شده در فشار روغن ۱۰۰ بار را نشان داده شده است.

لحاظ ابعادی نیز قطعه به خوبی قالب را پر نکرده است؛ بنابراین برای انجام فرایند هیدروفرم نهایی به یک حداقل پیش‌فشار روغن داخلی نیاز است که در آزمون‌های قبلی مقدار بهینه آن (یعنی ۱۰۰ بار) مشخص شده است.



الف

ب

Fig. 26 Sample of baffles produced by hydroforming method a) Pressure side, b) Suction side

شکل ۲۶ نمونه بافل تولیدشده به روش هیدروفرمینگ با فشار روغن صفر (الف) سطح مقعر بافل (ب) سطح محدب بافل

۳-۵- بررسی ساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری ساختار فولاد زنگ‌نزن AISI304 لوله اولیه و لوله هیدروفرم‌شده با فشار روغن ۱۰۰ بار در بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر به ترتیب در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ نشان داده شده است. ساختار فولاد زنگ‌نزن AISI304 شامل فاز زمینه آستنیتی گاما به همراه ذرات پراکنده کاربید کروم بوده و اندازه دانه فاز زمینه مطابق استاندارد ASTM E112-96 در حدود ۵ اندازه‌گیری شده است. مطابق تصاویر، ساختار فولاد زنگ‌نزن AISI304 پس از اعمال بار از لحاظ اندازه و شکل دانه با ریزساختار لوله اولیه یکسان بوده و تغییر قابل ملاحظه‌ای در آن‌ها مشاهده نشده است.

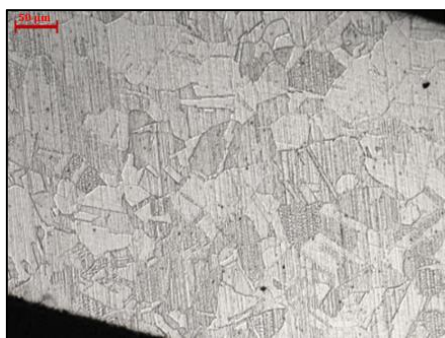
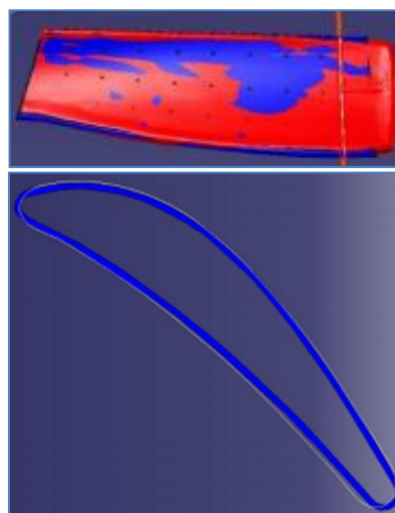


Fig. 27 Microstructure of AISI304 pipe in 200x magnification

شکل ۲۷ ریزساختار لوله از جنس AISI304 در بزرگ‌نمایی ۲۰۰×



ج

Fig. 25 Comparing the optics of the production baffle with 100 bar oil pressure (white color) via the base sample (blue color) a) a-a section, b) b-b section and c) c-c section

شکل ۲۵ مقایسه ابعاد بافل هیدروفرم شده در فشار روغن ۱۰۰ بار (رنگ سفید) با نمونه مبنا (رنگ سفید) (الف) در مقطع a-a، (ب) در مقطع b-b و (ج) در مقطع c-c

در جدول ۶ توزیع ضخامت لوله در فشار روغن ۱۰۰ بار در سه مقطع a-a، b-b و c-c نشان داده شده است. ضخامت بافل هیدروفرم شده در نواحی لبه حمله و فرار بافل تقریباً یکسان بوده و مشکل نازک‌شدگی در بافل دیده نمی‌شود؛ بنابراین با توجه به شکل ۲۵ قطعه هیدروفرم شده در فشار روغن ۱۰۰ بار با مدل مبنا تطابق قابل قبولی داشته و مورد تأیید می‌باشد.

جدول ۶ نتایج اندازه‌گیری ضخامت بافل‌های هیدروفرم شده در فشار روغن ۱۰۰ بار در مقاطع مختلف

Table 6 Result measuring the thickness of baffles produced at 100 bar oil pressure at different times

مشخصات	مقطع a	مقطع b	مقطع c
ضخامت بافل در فشار روغن ۱۰۰ بار (میلی‌متر)	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۰

۳-۴- آزمون فشار روغن یک بار

در آزمون‌های قبلی نشان داده شد که با کاهش فشار روغن مقدار چاقی بافل و همچنین کوتاهی طول کورد کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین انتظار می‌رود که با کاهش فشار روغن مشکلات کمتری مشاهده شود؛ لذا جهت بررسی این موضوع حالت هیدروفرم نهایی لوله در فشار روغن یک بار نیز انجام شد. در شکل ۲۶ تصویر بافل تولید شده در شرایط فوق نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۶، قطعه دچار فرورفتگی در قسمت میانی ایرفویل و همچنین لهیدگی در لبه فرار شده است. از

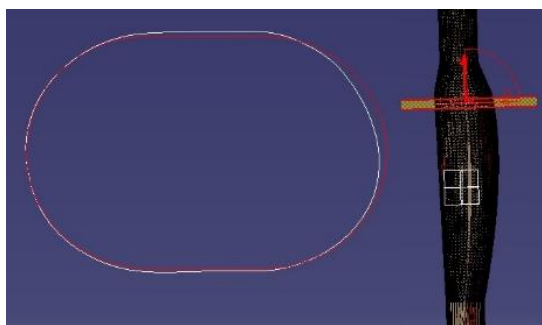


Fig. 30 Dimensional comparison of experimental preformed pipe (white color) via simulation results (red color)

شکل ۳۰ مقایسه ابعادی لوله پیش‌فرم شده تجربی (رنگ سفید) با نتایج شبیه‌سازی (رنگ قرمز)

جهت صحت‌سنجی نتایج حل عددی، ابعاد لوله هیدروفرمینگ نهایی طراحی شده در مرحله شبیه‌سازی با ابعاد هیدروفرمینگ نهایی لوله پیش‌فرم در آزمون تجربی در شرایطی که لوله پیش‌فرم شده ابتدا آنیل شده و سپس تحت شرایط مرزی فشار روغن ۱۰۰ بار و پرس ۱۰۰ تن ساخته و مقایسه شده است. جهت بررسی دقت ابعادی، لوله هیدروفرم شده در مرحله تجربی توسط اسکن نوری ابعادبرداری شده و سپس با مدل شبیه‌سازی از لحاظ ابعادی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳۱). میزان انحراف نتایج عددی با تجربی کمتر از ۱۰ درصد در طول کورد بافل بوده که در محدوده تolerانس مجاز ابعادی برای ساخت قطعه می‌باشد.

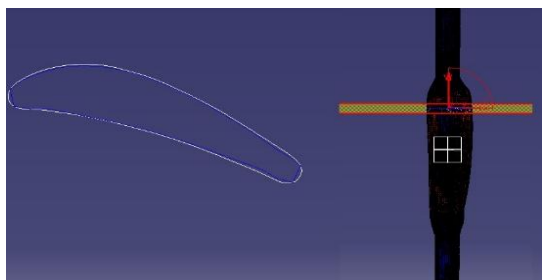


Fig. 31 Dimensional comparison of the experimental final baffle (white color) via the results of the final hydroforming simulation (blue color)

شکل ۳۱ مقایسه ابعادی بافل هیدروفرم شده تجربی (رنگ سفید) با نتایج شبیه‌سازی هیدروفرمینگ نهایی (رنگ آبی)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی عددی و آزمون‌های تجربی جهت ساخت بافل پره ثابت توربین گاز به روش هیدروفرمینگ لوله از جنس فولاد AISI304 در فشارهای روغن ۱، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ بار صورت گرفته و نتایج زیر به دست آمده است:

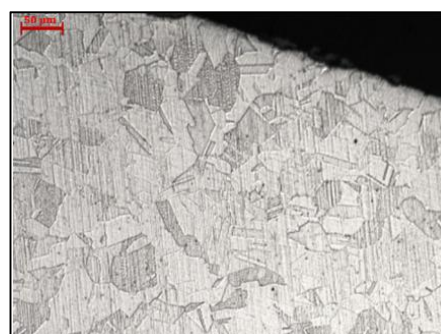


Fig. 28 Microstructure of hydroforming baffle made of AISI304 pipe in 200x magnification

شکل ۲۸ ریزساختار بافل هیدروفرم شده از جنس AISI304 در بزرگ‌نمایی ۲۰۰×

۳-۶- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی

جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، ابعاد لوله پیش‌فرم طراحی شده در مرحله شبیه‌سازی، با ابعاد لوله پیش‌فرم ساخته شده در آزمون تجربی با استفاده از شرایط مرزی مطابق شکل ۲۹ مقایسه شد.

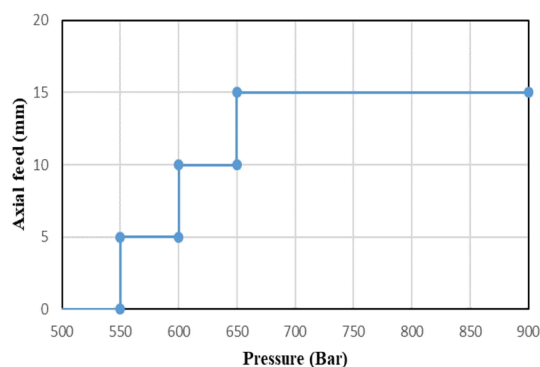


Fig. 29 Pressure conditions and axial feeding of preformed pipe in experimental test

شکل ۲۹ شرایط فشار و تغذیه محوری لوله پیش‌فرم شده در حالت تجربی

جهت افزایش دقت لوله پیش‌فرم شده تجربی، ابتدا لوله توسط اسکن نوری ابعاد برداری شده و سپس با مدل شبیه‌سازی شده از لحاظ ابعادی مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل ۳۰ نتایج ابعادی لوله پیش‌فرم شده و نتایج شبیه‌سازی از لحاظ ابعادی نشان داده شده است. مطابق شکل ۳۰ لوله پیش‌فرم ساخته شده در تمامی مقطع به‌خصوص در نواحی که بیشترین فرم را دارد، نتایج شبیه‌سازی با تجربی مطابقت دارد. میزان انحراف ابعادی مقدار طول لوله اولیه و لوله پیش‌فرم شده به روش شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۵ درصد بوده و در نتیجه نتایج حل عددی قابل قبول و معتبر است.

ایرفویل و همچنین لهیدگی در لبه فرار شده است. از لحاظ ابعادی نیز قطعه به خوبی قالب را پر نکرده است؛ بنابراین برای انجام فرایند هیدروفرم نهایی به یک حداقل پیش‌فشار روغن داخلی نیاز می‌باشد.

۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد AISI304 نشان داده است که انجام فرایند هیدروفرم نهایی در فشار روغن ۱۰۰ بار تغییری در اندازه و شکل دانه نسبت به ریزساختار اولیه آن نداشته است.

۷. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی در مرحله صحنه‌گذاری مشاهده شده است که مدل اجزا محدود ارائه شده در طراحی پیش‌فرم لوله و همچنین فرایند هیدروفرمینگ نهایی لوله از مطابقت خوبی برخوردار می‌باشد؛ بنابراین با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان تعداد آزمایش‌های تجربی جهت رسیدن به طراحی قالب پیش‌فرم و قالب نهایی را کاهش داد.

۵- مراجع

- [1] S. Yuan, X. Wang, G. Liu, Z. R. Wang, Control and use of wrinkles in tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 6-11, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.06.007>
- [2] C. Nikhare, M. Weiss, P. D. Hodgson, FEA comparison of high and low pressure tube hydroforming of TRIP steel, *Computational Materials Science*, Vol. 47, pp. 146-152, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.06.024>
- [3] S. J. Yuan, C. Han, X. S. Wang, Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 46, pp. 1201-1206, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.01.038>
- [4] M. Loh-Mousavi, K. Mori, K. Hayashi, M. Bakhshi-Jooybari, Improvement of filling of die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling, *Key Engineering Materials*, Vol. 344, pp. 461-467, 2007.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.461>
- [5] ASTM Standard E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2011.
- [6] ASTM Standard E517, Standard Test Methods for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2000.

۱. نتایج شبیه‌سازی ساخت بافل از لوله فولادی به روش هیدروفرمینگ در یک مرحله نشان داده است که به فشار روغن در حدود ۶۰۰۰ تا ۷۰۰۰ بار نیاز می‌باشد ولی ساخت قطعه در دو مرحله پیش‌فرم و هیدروفرم نهایی موجب کاهش فشار روغن تا ۳۰۰ درصد، کاهش ریسک کاری در فشار روغن بالا، کاهش هزینه ساخت دستگاه هیدروفرم و درعین‌حال بهبود سیلان مواد و کیفیت ساخت بافل می‌شود.

۲. با توجه به نتایج هیدروفرمینگ نهایی در آزمون فشار ۲۰۰ بار، لهیدگی قابل توجهی در ناحیه لبه فرار بافل ایجاد شده است. همچنین لوله هیدروفرم شده با انحرافات ابعادی نظیر چاق شدن و کوتاه شدن طول کورد همراه بوده است. بزرگ‌تر شدن ایرفویل موجب عدم قرارگیری بافل در داخل پره شده و کوتاه‌تر شدن کورد در لبه حمله نیز موجب به هم خوردن الگوی خنک‌کاری در داخل پره می‌شود؛ بنابراین با توجه به موارد فوق، کانتور ابعادی لوله هیدروفرم شده با کانتور ابعادی مدل مینا هم‌پوشانی خوبی نداشته و قطعه مورد تأیید نمی‌باشد.

۳. با کاهش فشار روغن به ۱۵۰ بار و همچنین آنیل لوله پیش‌فرم در این شرایط، همچنان مشکلات چاق شدن بافل وجود داشته (۰/۴ میلی‌متر بزرگ‌تر) اما میزان کوتاهی طول کورد در مقطع c-c در حدود ۰/۳ میلی‌متر نسبت به حالت ۲۰۰ بار بهبود پیدا کرده است؛ همچنین بافل ساخته شده در مقایسه با مدل مینا در مقاطع a-a و b-b از لحاظ ابعادی تطابق بالایی دارد.

۴. برای رفع مشکل چاقی و همچنین کوتاهی طول کورد، لوله پیش‌فرم آنیل شده در قالب نهایی با فشار روغن ۱۰۰ بار هیدروفرم شد. با کاهش بیشتر فشار روغن میزان برگشت فنری دیواره لوله کمتر شده و در نتیجه مشکل چاق شدن ایرفویل نیز کمتر شده است. در این حالت بافل ساخته شده با مدل مینا از لحاظ ابعادی در کلیه مقاطع از مطابقت خوبی برخوردار بوده است.

۵. با کاهش فشار روغن مقدار چاقی بافل و همچنین کوتاهی طول کورد کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین انتظار می‌رود که با کاهش فشار روغن مشکلات کمتری مشاهده شود. لذا جهت بررسی این موضوع حالت هیدروفرم نهایی لوله در فشار روغن یک بار نیز انجام شد. در این حالت قطعه دچار فرورفتگی در قسمت میانی

- welded IF steel blanks with non-uniform blank holder forces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, no. 2, pp. 286-300, 2017.
<https://doi.org/10.1177/095440541557755>
- [9] A. Safari, Friction in tube hydro forming processes, B.S project, University of Tehran, 2005. (in Persian)
- [7] S. Bagherzadeh, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 131-140, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.03.004>
- [8] M. H. Asadian-Ardakani, M. R. Morovvati, M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, Theoretical and experimental investigation of deep drawing of tailor-