

Optimization of loading paths of T-joints in hydroforming process based on Sobol sensitivity analysis by experimental experiment

Seyed Hasan Bathaee^{a*}, Mohammad Sabzevari^b, Hassan Moslemi Naeini^c

^{a, b, c}Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Bathaee SH, Sabzevari M, Moslemi Naeini H. Optimization of loading paths of T-joints in hydroforming process based on Sobol sensitivity analysis by experimental experiment. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;2(1):53-72

 <https://10.52547/masm.2.1.53>.

KEYWORDS

Hydroforming process, sensitivity analysis, Sobol method, loading paths, regression.

ABSTRACT

In this paper, using the Sobol sensitivity analysis method, which is based on variance, 11 factors affecting the optimization of the loading path of the hydroforming process are investigated, then the feasibility and validation of the results with other optimization methods such as finite element and experimental method are reported. Input factors include, expansion pressure, final pressure, yield time, end of expansion time, intermediate mandrel displacement, final mandrel displacement, intermediate mandrel displacement time, initial position of reciprocating mandrel, final position of reciprocating mandrel, start time of reciprocating mandrel and time The stops of the reciprocating mandrels are considered, then the effect of each of them on the minimum thickness and maximum height in the loading path of the hydroforming process to produce T-joints is investigated and reported in detail. Quantitatively and qualitatively, the optimal values are obtained for each of the 11 input factors and are calculated based on the loading paths.

Extended Abstract

1. Introduction

The uninterrupted and dramatic growth of the hydroforming process in the automotive and aerospace industries has attracted the attention of many manufacturers and researchers. This process, which is a subset of metal forming processes, has facilitated the production of very complex parts. On the other hand, all production and industrial processes feel the need to optimize for better quality of parts and reduce economic problems more and more. Powerful Assistant as a Sensitivity Analyzer has met this need to a large extent.

Hydroforming has many applications in the automotive and aerospace industries, which makes it possible to produce very complex parts in the production of strong, light, rigid structures for the vehicle body. One of the effective parameters in hydroforming forming processes is the initial dimensions of the sheet. The initial dimensions of the sheet are very important, especially in terms of economic issues. On the other hand, the mechanical properties of the sheets are not the same in all directions, which causes many defects in the part because many mechanical properties such as tensile strength and behavior. Waxes are related to the orientation of the grains. A study on the 2024 aluminum fiber-reinforced hydroforming process based on Taguchi method has been performed to optimize the parameters, the results of which show; Thinning of the layer during applying force has a great effect on the stress-strain of failure in different directions [1]. The method of using sheet composition is one of the new methods in the hydroforming process, which greatly reduces defects and prevents defects in this shaping process. In the sheet combining method, the upper sheet is used to eliminate the defects of wrinkles in the lower sheet. The stress caused by surface friction has been identified as the cause of these defects. In one experiment, the target sheet (bottom) was made of aluminum-lithium alloy (2198 Al-Li) and the top sheet was made of aluminum alloy (A06-O aluminum5) [2]. Ahmadaghloo and Altan have studied the principles of pipe hydroforming technology and how various parameters, such as pipe material, preform geometry, lubrication and process control, have been applied to product design and quality. In addition, it examines the relationships between variables and the geometry of the achievable part [3]. Eulen et al. Have studied the determination of optimal loading paths for forming structural parts with different tubular shapes. Finite

* Corresponding author. Tel.: 09186947399; Fax: 021- 82883390

E-mail address: h.bathaee@modares.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.1.53>

Received: February 12, 2022; Received in revised form: April 09, 2022; Accepted: May 17, 2022

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.

element simulation is performed. Using experimental and simulation results, they have concluded that loading paths based on the finite element method can significantly reduce trial and error and increase productivity, as well as extend the hydroforming process capability in the formation of complex parts [4]. Zhang provides a brief overview of recent developments in hydroforming processes, including process changes used to form tubular and flat components, hydraulic test apparatus for parts, and how and how process pressure is applied, their specifications and applications, especially its applications in automotive processes [5]. Mahang and Tsai have developed a pipe hydroforming process using a new movable mold design to reduce internal pressure and maximize the thinning ratio in the product [6]. Pourhamid and Shirazi have presented the Johnson-Cook injury model as a comprehensive damage criterion for predicting the types of possible failures in the pipe hydroforming process. They also used the Johnson-Cook material model to predict the characteristics of hydroform pipes and their dimensions. They conclude that this model can accurately predict all possible failures in the hydroforming process in terms of position and in terms of pipe loading conditions, and a suitable model for predicting the characteristics of hydroform pipes can be accurately observed [7]. Cigarette et al. Conducted a general study on the possibility of hydroforming sheet metal as well as hydroforming and extrusion tubing. They have also studied the deep drawing process with rigid molds, molds specially designed for presses with a multi-point cushioning system required for hydroforming sheet metal [8]. Kalpani et al. Have studied the characteristics and optimization of the pipe hydroforming process for connecting stainless steel parts in both small and large sizes. They conclude that during the forming process, the thinning of the tube can be minimized. In addition, the evaluation of different geometric options allows to reduce the stresses on the alloy materials by 45% [9]. Jiang and his colleagues have reached a very important relationship in the study of the hydroforming process; With increasing internal pressure, the thickness of the abdominal wall is generally thinned [10].

2. Modeling

Modeling in this research consists of two parts. First, based on the design of the experiments and the use of mini-software, the input variables for the process are extracted and then leveled. Then, using the sensitivity analysis by Sobol method in Simlab software, the quantitative and qualitative effects of each of them on the output factors have been investigated. Finally, validation and comparison with experimental experiments are performed.

Minimum pipe thickness: The effect of 11 input factors on the minimum pipe thickness in two cases with complete and corrected linear regression model has been investigated. In this equation, the coefficients of each factor are determined, which are shown as Equations 2 and 1:

$$\begin{aligned}
 Thickness = & 3.89 - 0.00341P_{expan} - 0.0244P_{final} - 0.0219T_{yield} - 0.00087T_{expan} - 0.00544 S_{middle} \\
 & + 0.0122S_{final} + 0.00019T_{middle} + 0.00671CP_s - 0.0244CP_f + 0.00742T_{start} \\
 & + 0.00213 T_{stop}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 Thickness = & 3.895 - 0.0244 P_{final} - 0.0219 T_{yield} - 0.0054 S_{middle} + 0.0122 S_{final} + 0.0067 CP_s \\
 & - 0.0244 CP_f + 0.0074 T_{start}
 \end{aligned} \tag{2}$$

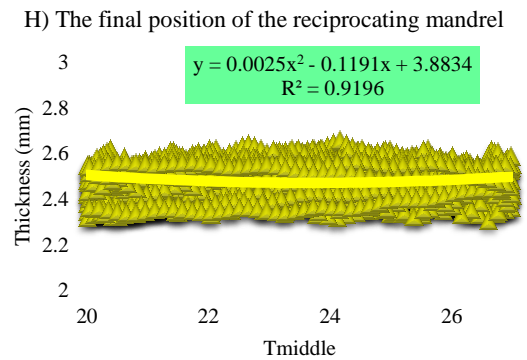
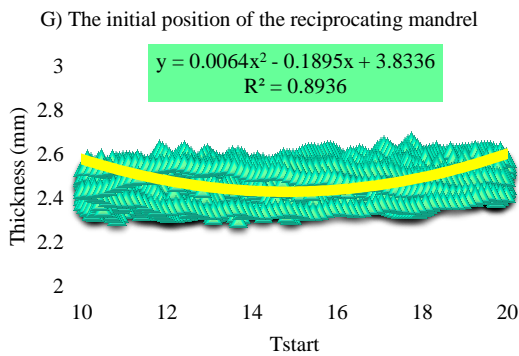
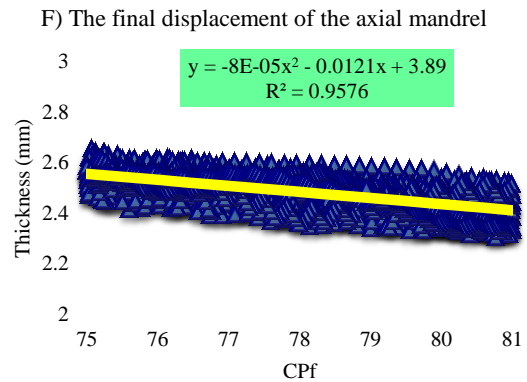
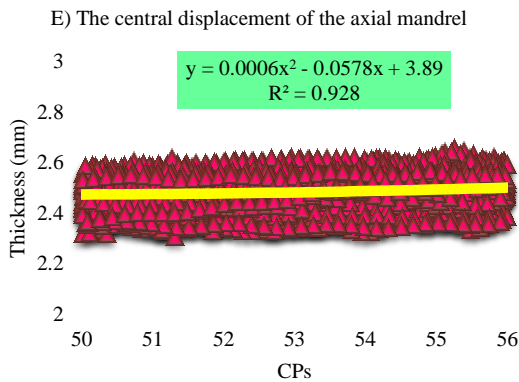
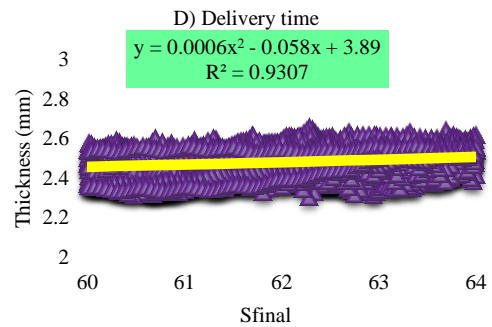
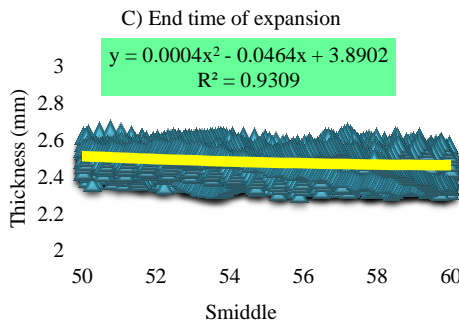
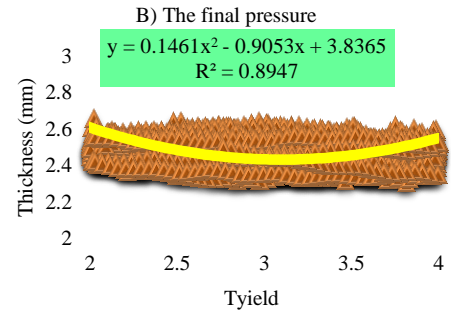
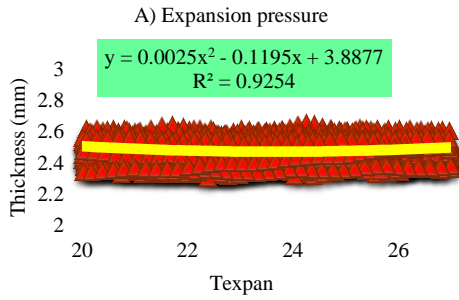
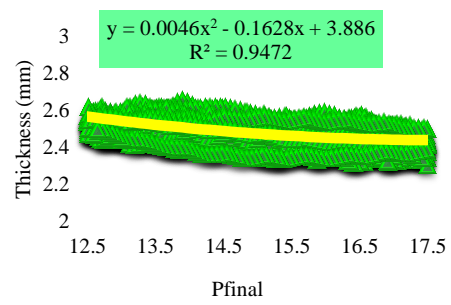
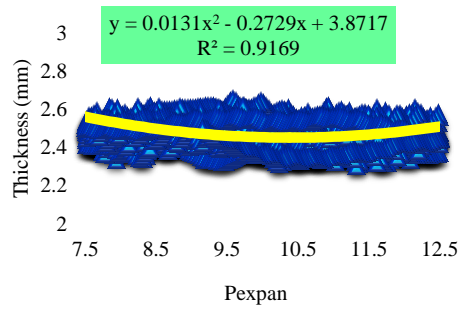
Maximum pipe height: Two regression equations in complete and corrected linear states consisting of input variables of Table 1 are also considered for this output factor, which are equations 4 and 3:

$$\begin{aligned}
 Height = & -15.5 + 0.387P_{expan} + 0.231P_{final} - 0.329 T_{yield} - 0.158 T_{expan} - 0.183 S_{middle} + 0.513 S_{final} \\
 & + 0.342 T_{middle} + 0.0636 CP_s + 0.310 CP_f - 0.190 T_{start} - 0.131 T_{stop}
 \end{aligned} \tag{3}$$

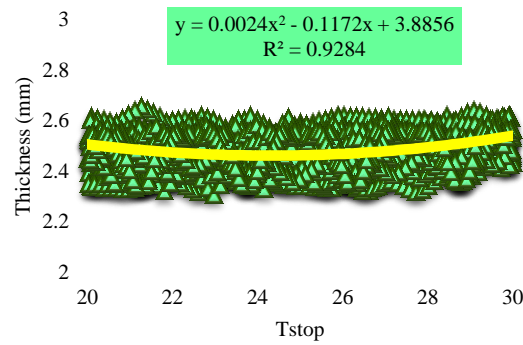
$$\begin{aligned}
 Height = & -12.14 + 0.387P_{expan} + 0.231P_{final} - 0.33 T_{yield} - 0.158 T_{expan} + 0.183S_{middle} \\
 & + 0.513 S_{final} + 0.342 T_{middle} + 0.310 CP_f - 0.190 T_{start} - 0.131 T_{stop}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Minimum thickness is one of the main factors of the loading path in the hydroforming process. 11 input factors based on Sobol analysis have been investigated for this very important factor. The effects of these factors are qualitatively characterized and the amount of variance of each and the equation of its changes are shown in Figure 1. Based on this, it can be concluded to what extent the input factor should be reduced and increased to achieve the ideal process and how its relationship with the minimum thickness changes. Figure 1 shows the 11 input factors on the minimum thickness.

Figure 1-a shows the effect of the expansion pressure inlet factor on the minimum thickness. As the pressure increases, the thickness first decreases and then increases. Of course, it can be seen from the slope of the line that the effect was not so significant. This input factor has been reduced. The end time of expansion is an ineffective factor on the thickness and its diagram in Figure 1-C is a straight line, meaning that increasing or decreasing it has no effect on the minimum thickness. This is an indication of the ineffectiveness of this input factor. Figure 1 shows the yield time, which decreases and then increases with a very gentle slope on the minimum thickness. The displacement of the axial mandrel in the middle mode decreases and in the final mode increases the minimum thickness. They have a direct and inverse relationship with the output factor, respectively, shown in Figures 1-E and F. The initial position of the mandrel in Figure 1-G has a fixed relationship with the thickness, while the final position of the mandrel increases the minimum thickness by increasing its amount, which is shown in Figure 1-H. Also, the final position of the mandrel had the greatest effect on the thickness changes. The figures show the starting, moving and stopping times of the mandrel in reciprocal, axial and reciprocal positions. The start time of the reciprocating motion has the greatest effect among the time modes because the pressure is applied at this time in such a way that first it reduces the thickness and then with the passage of time and uniformity of the pressure the thickness increases and establishes a direct relationship. The fitting type of all diagrams is a polynomial of degree 2.



I) Time to start the movement of the reciprocating mandrel j) The intermediate displacement time of the axial mandrel



K) The time of stopping the reciprocal mandrel
 Figure 1. effect of input factors on the minimum thickness

3. Conclusion

The method of sensitivity analysis, which is being developed as a very powerful assistant, has come to the aid of all production processes and provides a detailed study of the path of a process from selecting the primary influencing factors and their path of influence and finally their effectiveness quantitatively and qualitatively. In this paper, 11 input variables have been selected to optimize the loading path of the hydroforming process using the Sobol sensitivity analysis method, which is based on variance. The effect of each of them on the minimum thickness and maximum height of the hydroforming process has been investigated.



بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری اتصالات T شکل در فرایند هیدروفرمینگ مبتنی بر تحلیل حساسیت سوبول توسط آزمایش تجربی

سید حسن بطحائی^{الف*}، محمد سبزواری^ب و حسن مسلمی نائینی^ج

^{الف*} دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، h.bathae@modares.ac.ir
^ب دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mohammad_sabzevari@modares.ac.ir
^ج استاد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، moslemi@modares.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
فرایند هیدروفرمینگ، تحلیل حساسیت، روش سوبول، مسیرهای بارگذاری، رگزیون	در این مقاله، با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبول که مبتنی بر واریانس است، به بررسی ۱۱ فاکتور تأثیرگذار بر روی بهینه‌سازی مسیر بارگذاری فرایند هیدروفرمینگ پرداخته شده است. سپس امکان‌سنجی و صحت‌سنجی نتایج با روش‌های دیگر بهینه‌سازی مانند اجزای محدود و همچنین روش تجربی گزارش شده است. فاکتورهای ورودی شامل، فشار انبساط، فشار نهایی، زمان تسلیم، زمان انتهای انبساط، جابه‌جایی میانی سنبه محوری، جابه‌جایی نهایی سنبه محوری، زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری، موقعیت اولیه سنبه متقابل، موقعیت نهایی سنبه متقابل، زمان شروع حرکت سنبه متقابل و زمان توقف سنبه متقابل در نظر گرفته شده‌اند، سپس تأثیر هر یک از آن‌ها بر روی ضخامت کمینه و ارتفاع بیشینه در مسیر بارگذاری فرایند هیدروفرمینگ برای تولید اتصالات T به تفصیل مورد بررسی و گزارش قرار داده شده است. مقادیر بهینه به جهت کمی و کیفی برای هر ۱۱ فاکتور ورودی به‌دست آمده و براساس مسیرهای بارگذاری محاسبه شده‌اند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۷	

۱- مقدمه

۱-۱- فرایند هیدروفرمینگ

رشد بی‌وقفه و چشم‌گیر فرایند هیدروفرمینگ در صنعت خودروسازی و هوافضا توجه بسیاری از تولیدکنندگان و پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. این فرایند که یکی از زیرمجموعه فرایندهای شکل‌دهی فلزات است، امکان تولید قطعات بسیار پیچیده را هموارتر کرده است، از طرفی تمامی فرایندهای تولیدی و صنعتی نیاز به بهینه‌سازی جهت کیفیت هرچه بهتر قطعه و کاهش مسائل اقتصادی را روزه‌روز بیش‌تر احساس می‌کنند. دستیاری قدرتمند به عنوان تحلیل حساسیت این نیاز را تا حدود بسیاری برطرف کرده است.

هیدروفرمینگ در صنعت خودروسازی و هوافضا کاربردهای بسیار زیادی دارد که امکان تولید قطعات بسیار پیچیده در تولید سازه‌های قوی، سبک، سفت و سخت را برای بدنه وسایل نقلیه ممکن می‌سازد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در فرایندهای شکل‌دهی به کمک هیدروفرمینگ، ابعاد اولیه ورق است. ابعاد اولیه ورق به‌ویژه از نظر مسایل اقتصادی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، از طرفی نیز خواص مکانیکی ورق‌ها در تمام جهت‌ها یکسان نیست، که این امر موجب به وجود

آمدن عیب‌های بسیار زیادی در قطعه می‌شود زیرا بسیاری از خواص مکانیکی نظیر، استحکام کششی و رفتار مومسانی با جهت‌گیری دانه‌ها ارتباط دارند. یک مطالعه بر روی فرآیند هیدروفرمینگ آلومینیوم ۲۰۲۴^۱ تقویت‌شده با الیاف شیشه برمبنای روش تاگوجی برای بهینه کردن پارامترها صورت گرفته است که نتایج آن نشان می‌دهد؛ نازک شدن لایه به هنگام اعمال نیرو تأثیر بسیار زیادی بر روی میزان تنش-کرنش شکست در جهت‌های مختلف دارد [۱]. روش استفاده از ترکیب ورق‌ها یکی از روش‌های نوین در فرآیند هیدروفرمینگ است که باعث کاهش بسیار زیاد نقص‌ها و جلوگیری از عیوب در این فرآیند شکل‌دهی می‌گردد. در روش ترکیب ورق‌ها، ورق فوقانی برای از بین بردن نقص چین و چروک در ورق تحتانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تنش به‌وجود آمده ناشی از اصطکاک سطحی، عامل رفع این عیوب شناسایی شده است. در یک آزمایش ورق هدف (تحتانی) از جنس آلیاژ آلومینیوم-لیتیوم (Al-Li 2198) و ورق فوقانی آلیاژ آلومینیوم (A06-O aluminum5) بوده است [۲]. احمدقلو و آلتان به مطالعه اصول فناوری هیدروفرمینگ لوله و چگونگی پارامترهای مختلف، مانند جنس لوله، هندسه پیش‌فرم، روغن‌کاری و کنترل فرآیند بر طراحی و کیفیت محصول پرداخته است. علاوه بر این، روابط بین متغیرها و هندسه قطعه قابل دستیابی را بررسی کرده است [۳]. آیولن و همکارانش به بررسی تعیین مسیرهای بارگذاری بهینه برای فرم‌دهی به قطعات ساختاری با شکل لوله‌ای مختلف پرداخته‌اند. شبیه‌سازی مبتنی بر المان محدود صورت گرفته است. آن‌ها با استفاده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی به این نتیجه رسیده‌اند که مسیرهای بارگذاری مبتنی بر روش المان محدود می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی آزمون و خطا را کاهش و بهره‌وری را افزایش دهند و همچنین قابلیت فرآیند هیدروفرمینگ را در تشکیل قطعات پیچیده گسترش دهند [۴]. ژانگ مروری کوتاه از تحولات اخیر در فرآیندهای هیدروفرمینگ از جمله تغییرات فرآیند مورد استفاده برای تشکیل اجزای لوله‌ای و مسطح، دستگاه تست هیدرولیک برای قطعات و چگونگی اعمال و میزان فشار فرآیند، مشخصات و کاربردهای آن‌ها بخصوص در مورد کاربردهای آن در فرآیندهای صنایع خودروسازی ارائه نموده است [۵]. ماهانگ و تسای یک فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از یک طرح قالب متحرک جدید برای کاهش فشار داخلی و حداکثر نسبت نازک شدن در محصول را ایجاد کرده‌اند [۶]. پورحمید و شیرازی مدل آسیب جانسون-کوک را به‌عنوان یک معیار خسارت جامع برای پیش‌بینی انواع خرابی‌های احتمالی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله ارائه کرده‌اند. همچنین آن‌ها، از مدل مواد جانسون-کوک برای پیش‌بینی مشخصات لوله‌های هیدروفرم و ابعاد آن‌ها استفاده کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که این مدل می‌تواند تمام خرابی‌های احتمالی در فرآیند هیدروفرمینگ از نظر موقعیت و از نظر شرایط بارگیری لوله را به‌درستی پیش‌بینی کند و یک مدل مناسب برای پیش‌بینی مشخصات لوله‌های هیدروفرم با دقت قابل‌توجه است [۷]. سیگرت و همکارانش به یک مطالعه کلی در مورد امکان ایجاد ورق فلز هیدروفرمینگ و همچنین لوله‌های هیدروفرمینگ و اکستروژن پرداخته‌اند. همچنین آن‌ها به مطالعه فرآیند کشش عمیق با قالب‌های سفت و سخت، قالب‌های مخصوص طراحی شده برای پرس‌های دارای سیستم بالشتک چند نقطه‌ای مورد نیاز برای ورق فلز هیدروفرمینگ پرداخته‌اند [۸]. کلپانی و همکارانش به مطالعه بر روی خصوصیات و بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌ای برای اتصال قطعات فولاد ضد زنگ در دو اندازه کوچک و بزرگ پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که در طی فرآیند فرم‌دهی، نازک شدن لوله می‌تواند به حداقل برسد. علاوه بر این، ارزیابی گزینه‌های مختلف هندسی اجازه می‌دهد تا تنش‌های وارد بر مواد آلیاژی به میزان ۴۵٪ کاهش یابد [۹]. جی‌آنگ و همکارانش در بررسی فرآیند هیدروفرمینگ به یک رابطه‌ی بسیار مهم دست یافته‌اند؛ که با افزایش داخلی فشار، ضخامت دیواره شکم به‌طورکلی نازک شده است [۱۰]. پریجان و همکارانش سعی در تولید یک قالب برای فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از دستگاه پرینتر سه‌بعدی لایه‌نشانی مذاب داشته‌اند، همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که، روش المان محدود برای شناسایی مناطق کم‌تنش و طراحی مجدد قالب برای کاهش دورریز مواد قبل از ساخت قالب استفاده می‌شود [۱۱]. یینگ و همکارانش از نرم‌افزار، طراحی سه‌بعدی برای مدل‌سازی لوله T و شبیه‌سازی عملکرد آن برای فرآیند هیدروفرمینگ در مسیرهای مختلف بارگذاری استفاده کرده‌اند. سرانجام آن‌ها، با مقایسه شبیه‌سازی و آزمایش تحت مسیر بارگذاری بهینه به این نتیجه رسیده‌اند که خطای بین آزمایش و شبیه‌سازی ۵٪ است، که نشان داده شده روش بهینه‌سازی از دقت بالا و امکان‌سنجی خوبی برخوردار است [۱۲]. فن و هسیاو به بررسی بهترین تنظیمات ممکن برای شرایط بارگیری بین فشار داخلی و تغذیه محوری توسط هیدروفرم‌اسیون یک لوله فلزی T پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش گرادیان مزدوج برمبنای اجزای

¹ Aluminum hydroforming process

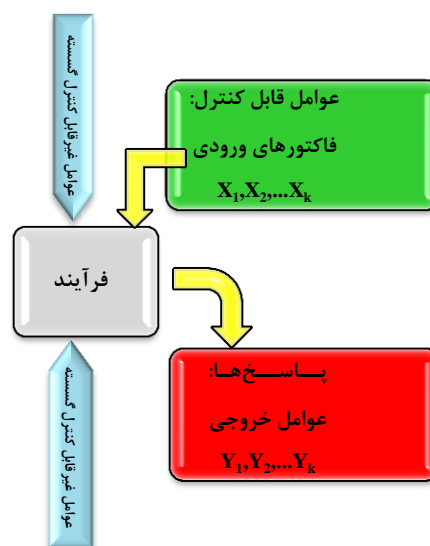
محدود، یک ماژول برنامه برای بررسی کیفیت لوله هیدروفورم در مورد یکنواختی ضخامت آن و دقت هندسه تولید کرده‌اند. و با توجه به کیفیت لوله به این نتیجه رسیده‌اند که، فرایند هیدروفورمینگ، که از منحنی بارگذاری تولیدشده توسط حالت ترتیبی-توماتیک پیروی می‌کند، بهتر از حالت دستی است [۱۳]. ایمانی‌نژاد و همکارانش نشان داده‌اند که استفاده از مسیرهای بارگذاری بهینه سازگاری بهتری با نتایج آزمایش‌های تجربی دارد. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر اجزای محدود نشان داده‌اند که، در یک مسیر بارگذاری بهینه، اثر تغذیه محوری باید پس از وارد شدن لوله، تحت فشار داخلی اعمال شده، تأمین شود. آن‌ها این نتایج را با انجام آزمایش‌ها روی لوله‌های آلومینیوم که در آن ارتباط خوبی بین نتایج آزمایش و شبیه‌سازی به دست آمده بود، تأیید کرده‌اند [۱۴]. هاشمی و همکارانش به شبیه‌سازی آزمایش کشش تک‌محوری برای به دست آوردن ثابت‌های محور شکست در نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که پیش‌بینی همه‌ی معیارهای شکست در حالت کرنشی که مشابه با آزمایش کشش تک‌محوری است، باهم‌دیگر برابر می‌باشد [۱۵]. تحلیل حساسیت سوبول متعلق به گروه تحلیل حساسیت جهانی می‌باشد. مبنای اصلی تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس واریانس است و با استفاده از متغیرهای ورودی به همراه معادله رگرسیون یک تخمین بسیار دقیق از نتایج خروجی را نشان می‌دهد. همچنین روش سوبول دارای سه اثرگذاری است که به ترتیب شامل: اثر مرتبه اول، اثر مرتبه دوم و اثر کل می‌باشد [۱۶]. روش سوبول بر اساس چندجمله‌ای‌های توانی می‌باشد که به‌طور معمول از درجه دوم است. به این دلیل در این روش همگرایی بسیار مناسبی بین متغیرهای ورودی و عوامل خروجی برقرار است [۱۷].

۲- مدل‌سازی

مدل‌سازی در این تحقیق از دو بخش تشکیل شده است. ابتدا بر اساس طراحی آزمایش‌ها و بهره‌گیری از نرم‌افزار مینی‌تب^۲ متغیرهای ورودی برای فرایند استخراج شده و سپس سطح‌بندی شده‌اند. سپس با استفاده از تحلیل حساسیت به روش سوبول در نرم‌افزار سیم‌لب اثرات کمی و کیفی هر یک از آن‌ها بر روی عوامل خروجی بررسی شده است. در نهایت به صحت‌سنجی و مقایسه با آزمایش تجربی پرداخته شده است.

۲-۱- طراحی و انجام آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها را می‌توان یک آزمون یا مجموعه‌ای از آزمون‌ها تعریف کرد به طوری که تغییرات مورد نظر در پارامترهای ورودی آزمایش در نظر گرفته می‌شود. تغییرات اعمال شده، دارای پاسخی هستند که نتایج آن در عوامل خروجی قابل مشاهده است. یک طرح کلی طراحی آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.



² Minitab

شکل ۱ مراحل طراحی یک آزمایش

در این تابع X به‌عنوان یک فاکتور قابل کنترل و متغیر مستقل فرض می‌شود و پاسخ‌های حاصل از فرآیند Y می‌باشد. هدف اصلی این است که ارتباط میان متغیرهای پاسخ با متغیرهای ورودی، با حداقل میزان خطا و به‌صورت یک رابطه منطقی در مدل ریاضی به دست بیاید. بدین منظور، روش اجرایی تحلیل آماری، شامل هشت گام زیر است:

- ❖ انتخاب متغیرهای پاسخ
- ❖ انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات
- ❖ انتخاب طرح آزمایش
- ❖ اجرای آزمایش
- ❖ اندازه‌گیری متغیرهای پاسخ
- ❖ تعریف مدل تحلیل حساسیت سوپول
- ❖ ایجاد رابطه بین فاکتورهای ورودی بر اساس واریانس
- ❖ بررسی گراف‌های پراکندگی

تعداد آزمایش‌ها با افزایش تعداد متغیرها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد این تعداد آزمایش نیز توجه‌پذیر نیست. بنابراین یکی از اهداف اصلی طراحی آزمایش‌ها، انتخاب مهم‌ترین حالات آزمایشی است که با استفاده از آن بتوان فرایند را به بهترین نحو بررسی کرد. در عین حال تعداد آزمایش‌ها نیز منطقی باشد. در این فرایند هیدروفرمینگ برای مسیرهای بارگذاری به‌منظور طراحی دقیق و انطباق هر چه بیشتر نتایج تجربی ۱۱ متغیر ورودی تعیین شده است. تا بر اساس آن‌ها مسیرهای بارگذاری را تحلیل حساسیت کرده و سپس به‌صورت سنجی پرداخته شود. برای بررسی مسیر بهینه بارگذاری پارامترهای فشار انبساط، فشار نهایی، زمان تسلیم، زمان انتهای انبساط، جابه‌جایی میانی سنبه محوری، جابه‌جایی نهایی سنبه محوری، زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری، موقعیت اولیه سنبه متقابل، موقعیت نهایی سنبه متقابل، زمان شروع حرکت سنبه متقابل و زمان توقف سنبه متقابل در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند، و سپس اثر هر یک از آن‌ها به‌صورت کمی و کیفی بر روی مسیر بهینه بارگذاری بررسی شده است.

جدول ۱ متغیرهای مستقل فرآیند

ردیف	متغیر	علامت	واحد	کمینه	بیشینه
۱	فشار انبساط	P_{expan}	[MPa]	۷/۵	۱۲/۵
۲	فشار نهایی	P_{final}	[MPa]	۱۲/۵	۱۷/۵
۳	زمان تسلیم	T_{yield}	[S]	۲	۴
۴	زمان انتهای انبساط	T_{expan}	[S]	۲۰	۲۷
۵	جابه‌جایی میانی سنبه محوری	S_{middle}	[mm]	۵۰	۶۰
۶	جابه‌جایی نهایی سنبه محوری	S_{final}	[mm]	۶۰	۶۴
۷	زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری	T_{middle}	[S]	۲۰	۲۷
۸	موقعیت اولیه سنبه متقابل	CP_s	[mm]	۵۰	۵۶
۹	موقعیت نهایی سنبه متقابل	CP_f	[mm]	۷۵	۸۱
۱۰	زمان شروع حرکت سنبه متقابل	T_{start}	[S]	۱۰	۲۰
۱۱	زمان توقف سنبه متقابل	T_{stop}	[S]	۲۰	۳۰

به‌طور کلی پارامترهای مختلفی برای تعیین کیفیت لوله در نظر گرفته می‌شوند و مهم‌ترین این پارامترها شامل ضخامت کمینه و ارتفاع بیشینه می‌باشد که به‌عنوان معیارهای شکل‌پذیری لوله انتخاب شده‌اند. اثر فاکتورهای ورودی جدول ۱ بر روی این دو عامل خروجی در حالت‌های مدل رگرسیون خطی کامل و مدل رگرسیون خطی تصحیح‌شده بررسی شده است.

ضخامت کمینه لوله: اثرگذاری ۱۱ فاکتور ورودی بر روی ضخامت کمینه لوله در دو حالت با مدل رگرسیون خطی کامل و خطی تصحیح شده بررسی شده است که در این معادله ضرایب هر فاکتور تعیین شده است که به صورت معادلات ۱ و ۲ نمایش داده شده است:

$$Thickness = 3.89 - 0.00341P_{expan} - 0.0244P_{final} - 0.0219T_{yield} - 0.00087T_{expan} - 0.00544 S_{middle} + 0.0122S_{final} + 0.00019T_{middle} + 0.00671CP_s - 0.0244CP_f + 0.00742T_{start} + 0.00213 T_{stop} \quad (1)$$

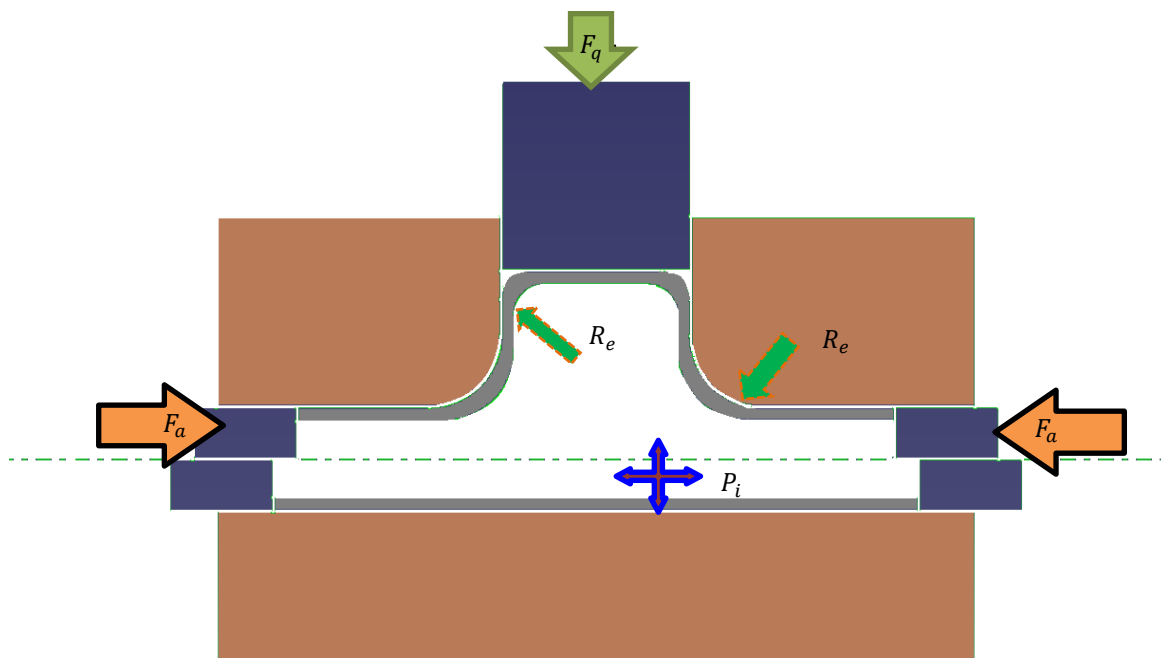
$$Thickness = 3.895 - 0.0244 P_{final} - 0.0219 T_{yield} - 0.0054 S_{middle} + 0.0122 S_{final} + 0.0067 CP_s - 0.0244 CP_f + 0.0074 T_{start} \quad (2)$$

حداکثر ارتفاع لوله: دو معادله رگرسیون در حالت های خطی کامل و تصحیح شده متشکل از متغیرهای ورودی جدول ۱ نیز برای این عامل خروجی در نظر گرفته شده است که معادله های به صورت ۳ و ۴ است:

$$Height = -15.5 + 0.387P_{expan} + 0.231P_{final} - 0.329 T_{yield} - 0.158 T_{expan} - 0.183 S_{middle} + 0.513 S_{final} + 0.342 T_{middle} + 0.0636 CP_s + 0.310 CP_f - 0.190 T_{start} - 0.131 T_{stop} \quad (3)$$

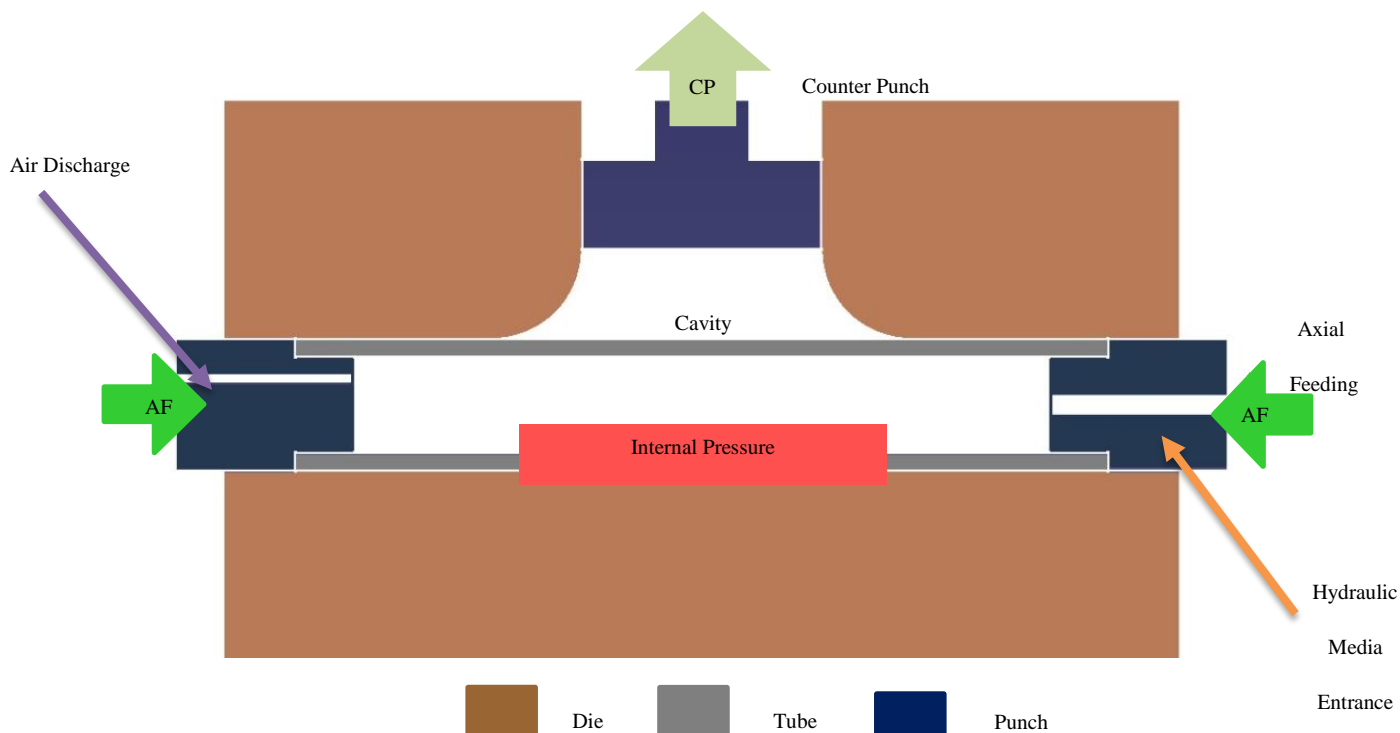
$$Height = -12.14 + 0.387P_{expan} + 0.231P_{final} - 0.33 T_{yield} - 0.158 T_{expan} + 0.183S_{middle} + 0.513 S_{final} + 0.342 T_{middle} + 0.310 CP_f - 0.190 T_{start} - 0.131 T_{stop} \quad (4)$$

در فرایند هیدروفرمینگ، لوله در داخل یک قالب با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری شکل داده می شود. شماتیک این فرایند برای تولید اتصالات T در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری از نازک شدگی حاصل از اعمال فشار داخلی، از دو سنبه محوری برای هدایت جریان فلز به داخل قالب استفاده می شود و به همین ترتیب از سنبه متقابل برای کنترل رفتار تغییر شکل لوله در ناحیه آزاد قالب استفاده می شود. با توجه به این اینکه اعمال پارامترهای فرایند به صورت همزمان صورت می گیرد، کنترل و تنظیم آنها، اثرگذاری و میزان کمی و رفتار کیفی آنها بسیار حائز اهمیت است که در بخش تحلیل حساسیت به آن پرداخته شده است.



شکل ۲ شماتیک فرایند هیدروفرمینگ برای تولید اتصالات T

یک نمونه ی تجربی موجود در آزمایشگاه در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل علاوه بر ابعاد قطعات آزمایشگاهی، چگونگی اعمال پارامترهای بارگذاری نیز قابل مشاهده است.



شکل ۳ یک نمونه‌ی تجربی موجود در آزمایشگاه

۲-۲- تحلیل حساسیت سوبول

روش سوبول یک روش تجزیه و تحلیل مبتنی بر واریانس است، مدل‌های محاسباتی در این روش برای ارزیابی اهمیت نسبی پارامترهای ورودی بر روی نتایج خروجی تعریف و مدل‌سازی می‌شوند. در روش سوبول مدل توسط یک تابع نشان داده می‌شود که می‌توان آن را برای حالت‌های غیریکنواخت و غیرخطی نیز مدل‌سازی کرد، پس در روش سوبول مبنای تجزیه داده‌ها واریانس است که سهم نسبی هر پارامتر ورودی و تعامل آن با خروجی مدل را مشخص می‌کند. معادله ۵ واریانس کل در این روش را نشان داده است [۱۸]:

$$D(f) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + D_{12...p}, \quad (5)$$

در این معادله، $D(f)$ واریانس کل یا اثر کل را نشان می‌دهد، D_i واریانس مرتبه اول و D_{ij} سهم مرتبه دوم است که به آن تعامل بین پارامترهای ورودی نیز گفته می‌شود. P مرتبه بالاتر واریانس را تا مرتبه کل نمایش می‌دهد. حساسیت مرتبه اول و کلی شاخص‌ها به شرح زیر است [۱۸]:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (6)$$

$$S_{Ti} = 1 - \frac{D_i}{D} \quad (7)$$

در این معادلات S_i شاخص مرتبه اول و S_{Ti} شاخص مرتبه کل نامیده می‌شوند. مزیت استفاده از این روش این است که یک فرض اساسی بین ورودی‌ها و خروجی مدل برقرار می‌کند که باعث تعامل بین آن‌ها می‌شود که این روش تبدیل به یک مدل سیستماتیک می‌نماید که در شکل ۵ نشان داده شده است. خروجی مدل تحت یک تابع در معادله ۸ آمده است [۱۸].

$$Y = f(X_1, \dots, X_p) \quad (8)$$

متغیرهای ورودی شامل X_1 تا X_p است و خروجی مدل Y که یک کمیت اسکالر است. با در نظر گرفتن واریانس همان طور که در معادله ۹ نشان داده شده است [۱۸]:

$$V_{X-i}(Y|X_i = x * i) \quad (9)$$

واریانس بر اساس تمامی پارامترهای ورودی محاسبه می شود. فضای $P - 1$ جایی است که X_i تمامی پارامترهای ورودی به جز X_i را نشان می دهد. قانون واریانس چارچوب اساسی روش تحلیل حساسیت سوبول است که به وضوح در معادله ۱۰ قابل مشاهده است [۱۸].

$$V(Y) = V_{xi}(E_{X-i}(Y|X_i)) + E_{xi}(V_{X-i}(Y|X_i)) \quad (10)$$

بعد از عادی سازی رابطه ۱۰ معادله به حالت زیر ساده می شود [۱۸]:

$$1 = \frac{V_{xi}(E_{X-i}(Y|X_i))}{V(Y)} + \frac{E_{xi}(V_{X-i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (11)$$

ترم اول معادله ۱۱ برای پارامترهای ورودی X_i به صورت زیر تعریف می شود [۱۸]:

$$S_i = \frac{V_{xi}(E_{X-i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲ ترم دوم بیانگر شاخص حساسیت مرتبه دوم است. در این ترم جایی است که تعامل متغیر ورودی (X_j و X_i) و عوامل خروجی (Y) تعیین می شود. با استفاده از رابطه ۱۳ مرتبه حساسیت بالاتر شامل سوم، چهارم و بیش تر تخمین زده می شود [۱۸].

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(Y)} \quad (13)$$

شاخص مرتبه کل حساسیت در معادله ۱۴ تعریف شده است. واریانس ورودی نیز از جمع فاکتورهای شاخص مرتبه اول تشکیل شده است [۱۸].

$$ST_i = \sum_{k \neq i} S_k$$

$$ST_i = 1 - \frac{V_{xi}(E_{X-i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (14)$$

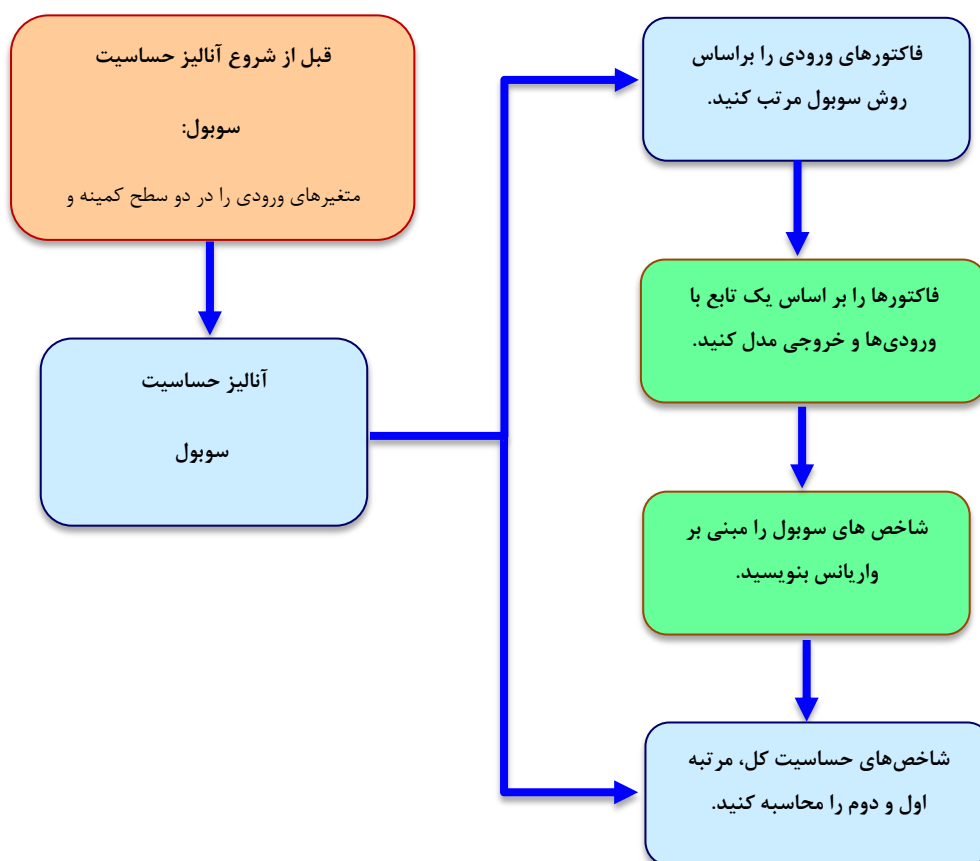
$$ST_i = 1 - \frac{E_{xi}(V_{X-i}(Y|X_i))}{V(Y)}$$

همچنین با توجه به معادلات ذکر شده رابطه $0 \leq S_i \leq ST_i \leq 1$ همیشه برقرار است. شکل ۵ نشان دهنده ی مراحل روش سوبول را نشان داده است.

۳- نتایج و شبیه سازی

در این بخش ابتدا به تحلیل و بررسی نتایج تحلیل حساسیت سوبول در دو دسته نمودارهای گرافیکی و کمی پرداخته شده است و اثرات هر یک از آن ها بر روی دو عامل مسیر بهینه سازی بارگذاری شامل ضخامت کمینه و ارتفاع بیشینه بررسی شده است. در نهایت امکان سنجی و صحت سنجی مدل ارائه شده است. نمودارهای گرافیکی شامل معادله اثرگذاری عامل خروجی بر مبنای فاکتورهای ورودی و میزان واریانس است. همچنین میزان پراکندگی در نمودارها نشان دهنده ی عمق تأثیرگذاری یک

فاکتور بر روی آن خروجی می‌باشد. برازش منحنی‌ها نیز از نوع چندجمله‌ای از درجه ۲ می‌باشد.



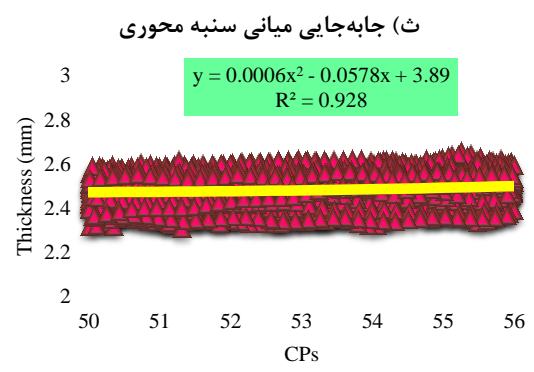
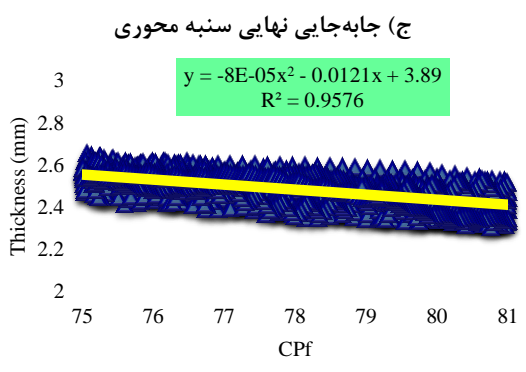
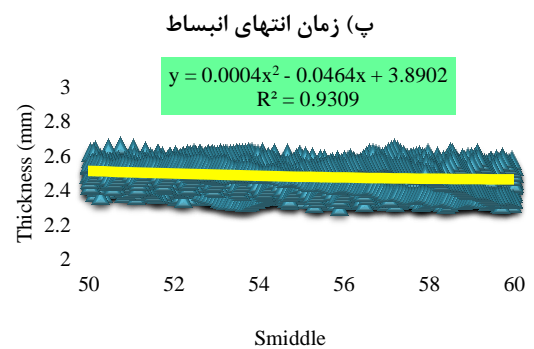
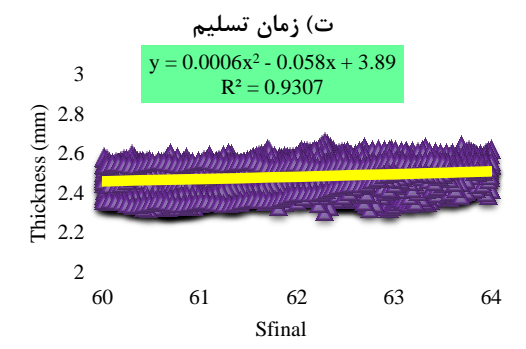
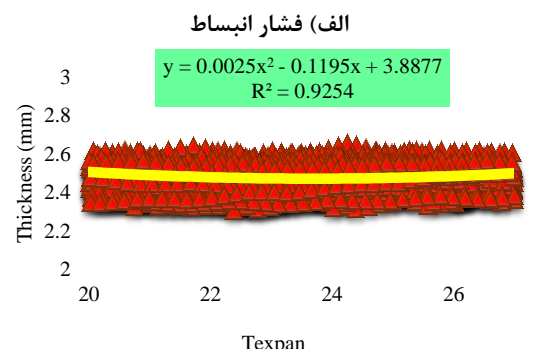
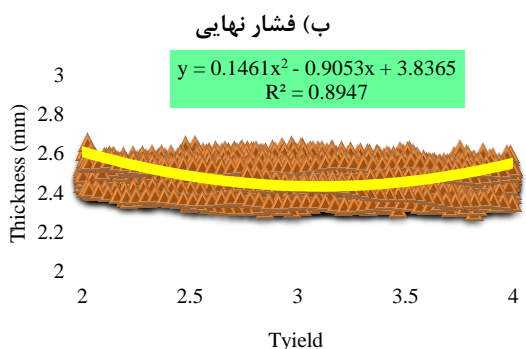
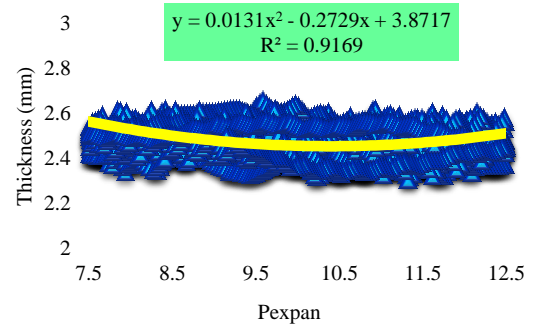
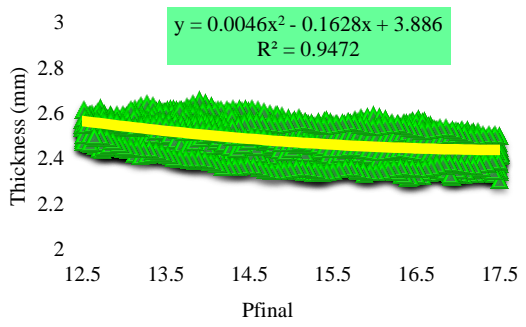
شکل ۴ فلوجارت و مراحل آنالیز حساسیت سوپول

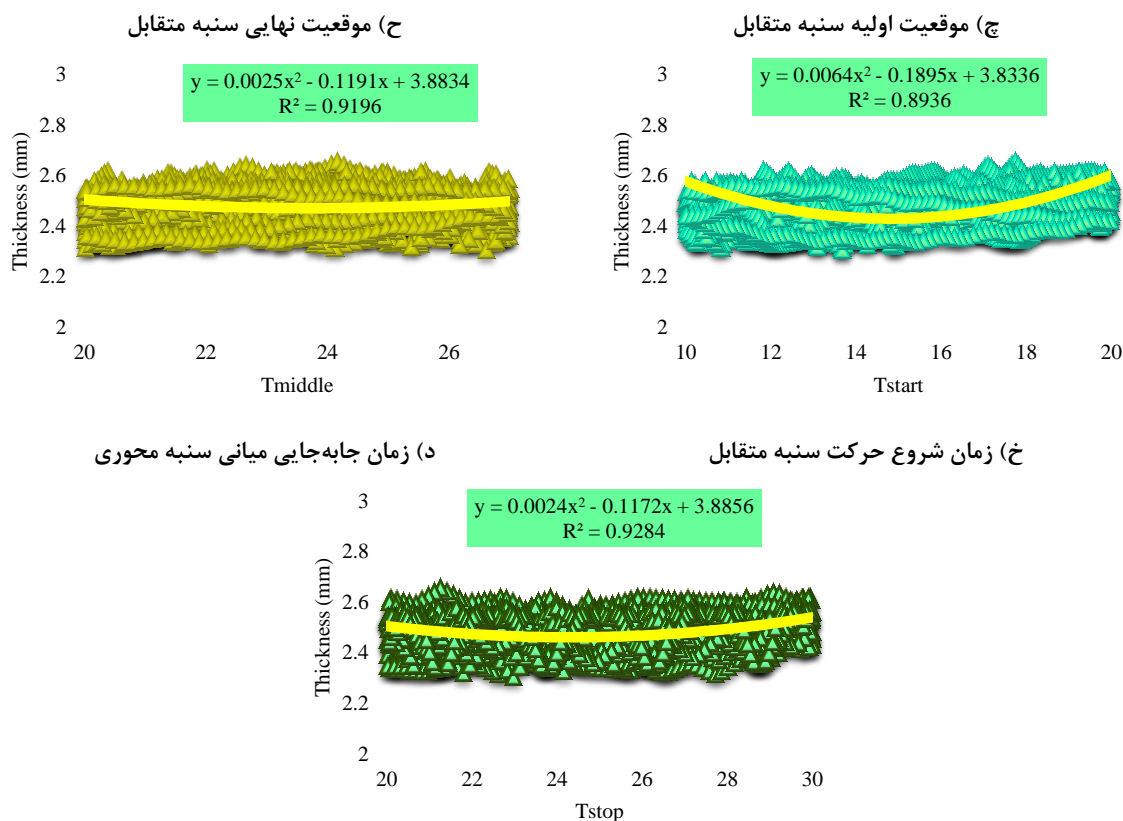
۳-۱- اثر فاکتورهای ورودی بر روی ضخامت کمینه

ضخامت کمینه یکی از عوامل اصلی مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ است. ۱۱ فاکتور ورودی بر اساس تجزیه و تحلیل به روش سوپول برای این عامل بسیار مهم بررسی شده است. اثرات این فاکتورها به صورت کیفی مشخص شده و میزان واریانس هر یک و معادله تغییرات آن بر روی شکل‌های ۵ نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان به این نتیجه رسید که برای دستیابی به فرآیند ایده‌آل کدام فاکتور ورودی را باید تا چه میزان کاهش و افزایش داد و رابطه‌ی آن با ضخامت کمینه به چه صورت تغییر می‌کند. شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی ۱۱ فاکتور ورودی بر روی ضخامت کمینه است.

شکل ۵-الف اثر فاکتور ورودی فشار انبساط بر روی ضخامت کمینه را نشان داده است. با افزایش فشار، ضخامت در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. البته از شیب خط می‌توان دریافت که میزان اثرگذاری آن چنان قابل‌ملاحظه نبوده است در بخش بررسی کمی فاکتورهای ورودی میزان تأثیر کمی این فاکتور بر روی ضخامت کمینه صفر به دست آمده است، اما در شکل ۵-ب فشار نهایی رابطه معکوس با ضخامت کمینه داشته است و با افزایش این فاکتور ورودی میزان آن کاهش یافته است. زمان انتهای انبساط یک فاکتور بی‌اثر بر روی ضخامت است و نمودار آن در شکل ۵-پ یک خط راست می‌باشد بدین معنا که افزایش یا کاهش آن هیچ‌گونه تأثیری بر روی ضخامت کمینه نمی‌گذارد، میزان درصد کمی آن نیز در بخش اثرات کمی فاکتورها صفر گزارش شده است و این نشان از بی‌اثر بودن این فاکتور ورودی می‌باشد. شکل ۵-ت زمان تسلیم را نشان می‌دهد که اثر خود را به صورت ابتدا کاهش و سپس افزایش با یک شیب بسیار ملایم بر روی ضخامت کمینه می‌گذارد. جابه‌جایی سنبه محوری در حالت میانی باعث کاهش و در حالت نهایی باعث افزایش میزان ضخامت کمینه شده است. به ترتیب رابطه‌ی مستقیم و معکوس با عامل خروجی برقرار کرده‌اند که در شکل‌های ۵ ث و ج نشان داده شده است. موقعیت

اولیه سنبه در شکل ۵-چ یک رابطه ثابت با ضخامت برقرار کرده است درحالی که موقعیت نهایی سنبه با افزایش میزان خود باعث کاهش اندازهی ضخامت کمینه شده است که در شکل ۵-ح نمایش داده شده است. همچنین موقعیت نهایی سنبه بیشترین اثر را بر روی تغییرات ضخامت داشته است. شکل‌های خ تا ذ زمان‌های شروع، جابه‌جایی و توقف سنبه را در حالت‌های متقابل، محوری و متقابل نشان می‌دهند. زمان شروع حرکت سنبه متقابل در بین حالت‌های زمانی بیشترین اثر را داشته است زیرا اعمال فشار در این زمان صورت می‌گیرد به طوری که در ابتدا باعث کاهش ضخامت شده و سپس با گذشت زمان و یکنواخت شدن فشار میزان ضخامت نیز افزایش یافته و یک رابطه مستقیم برقرار کرده است. نوع برازش تمامی نمودارها چندجمله‌ای از درجه ۲ می‌باشد.



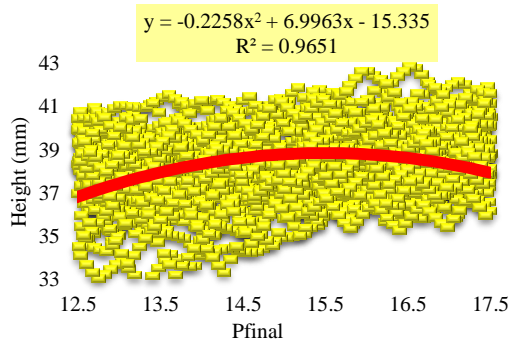


شکل ۵- اثر متغیرهای ورودی بر روی ضخامت کمینه

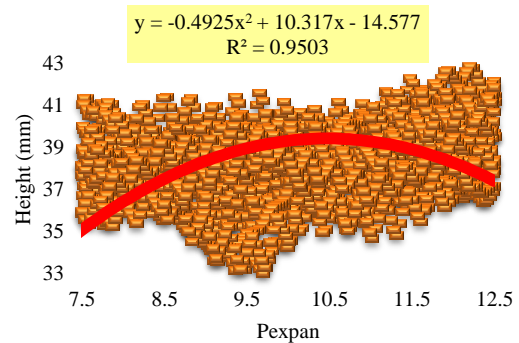
۳-۲- اثر فاکتورهای ورودی بر روی ارتفاع بیشینه

این بخش نیز همانند بخش قبل ۱۱ فاکتور ورودی بر روی دومین عامل در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی مسیر بارگذاری فرایند، ارتفاع بیشینه بررسی شده‌اند. برای ایجاد یک فرایند ایده‌آل علاوه بر میزان بهینه فاکتورها نوع ارتباط آن‌ها با عامل خروجی برای بررسی هرچه بهتر ضروری است. در شکل‌های ۶ الف تا ت یک رفتار سینوسی با دوره تناوب‌های مختلف از فاکتورهای ورودی بر روی عامل خروجی ارتفاع بیشینه نشان داده شده است. فشار انبساط یک رفتار نیمه سینوسی دارد به طوری که ابتدا باعث افزایش ارتفاع، بیشینه شده و سپس با افزایش مقدار ورودی، کاهش یافته و تقریباً به نقطه‌ی ابتدایی شروع فرایند برگشته است، پس کنترل این فرایند در حین انجام فرایند از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. فشار نهایی و زمان انتهای انبساط نیز به همین ترتیب عمل کرده‌اند و میزان اثرگذاری آن‌ها بسیار نزدیک می‌باشد فشار نهایی با میزان ۰/۹۶۵۱ و زمان انتهای انبساط با مقدار ۰/۹۶۶۶ واریانس که بسیار نزدیک به هم بوده است در ابتدا باعث افزایش ارتفاع بیشینه و سپس کاهش آن شده‌اند و در نهایت به میزان نقطه‌ی آغازین فرایند رسیده‌اند. زمان تسلیم یک رفتار تمام سینوسی داشته است که در ابتدا با یک شیب افزایش یافته و به بالاترین میزان رسیده و سپس با همان شیب به مقدار آغازین خود برگشته است، به دلیل تقارن در نوع رابطه؛ افزایش سپس کاهش کنترل آن برای بهینه کردن مسیرهای بارگذاری بسیار حائز اهمیت است. جابه‌جایی سنبه محوری در موقعیت‌های میانی و نهایی دو رفتار خطی کاملاً متفاوت داشته است. در جابه‌جایی میانی سنبه محوری در شکل ۶-ث یک رابطه معکوس وجود دارد به طوری که که با افزایش این فاکتور ورودی میزان عامل خروجی ارتفاع بیشینه کاهش یافته است. اما جابه‌جایی نهایی سنبه محوری با بیش‌ترین میزان واریانس در بین پارامترهای تعریف شده اثرگذاری مستقیمی بر روی ارتفاع بیشینه داشته است. شکل‌های ۶ چ و ح نیز مانند حالت‌های جابه‌جایی می‌باشند. موقعیت اولیه سنبه متقابل در شکل ۶-ج تأثیرگذاری تقریباً کمی داشته است و یک اثر خطی ثابت بر روی ارتفاع بیشینه داشته است، اما در شکل ۶-ح با افزایش میزان موقعیت نهایی سنبه میزان ارتفاع بیشینه نیز افزایش یافته است بدین معنا که یک رابطه‌ی مستقیم بین این دو وجود دارد. زمان شروع حرکت سنبه در شکل ۶-خ یک اثر سینوسی گذاشته است اما با این تفاوت زمانی

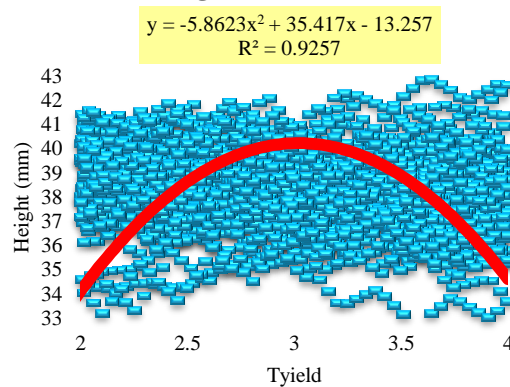
که فاکتور ورودی به بیشینه مقدار خود رسیده است عامل خروجی از مقدار آغازین فرایند خود نیز کمتر بوده است. و اثر آن یک رابطه‌ی افزایشی-کاهشی است. در شکل ۶-د اثر مستقیم زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری بر روی ارتفاع بیشینه نشان داده شده است، اما مقدار افزایش آن در طی فرایند اتفاق افتاده است و در پایان فرایند تقریباً به میزان آغازین خود برگشته است. درنهایت از بین فاکتورهای ورودی زمانی، زمان توقف سنبه متقابل اثر معکوس داشته است و با افزایش آن میزان عامل خروجی؛ ارتفاع بیشینه کاهش یافته است.



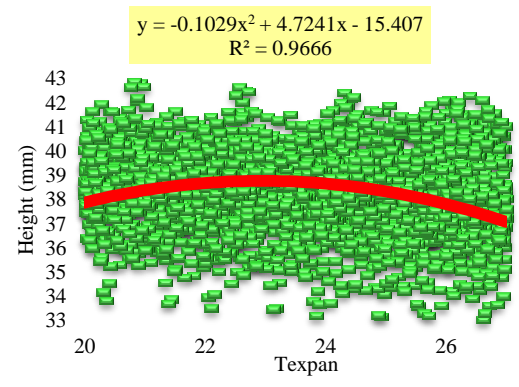
(ب) فشار نهایی



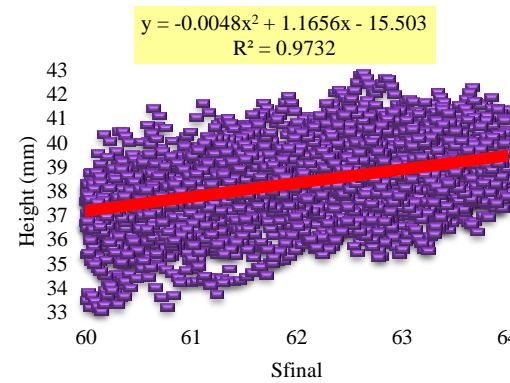
(الف) فشار انبساط



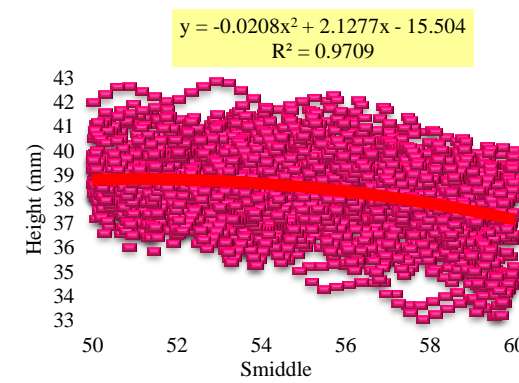
(ت) زمان تسلیم



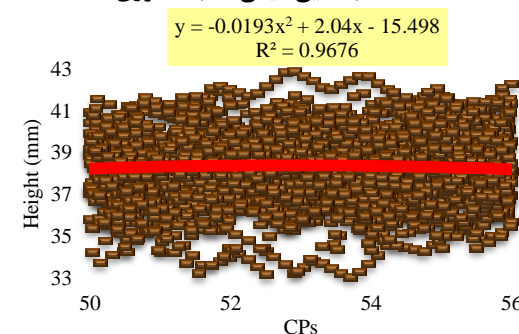
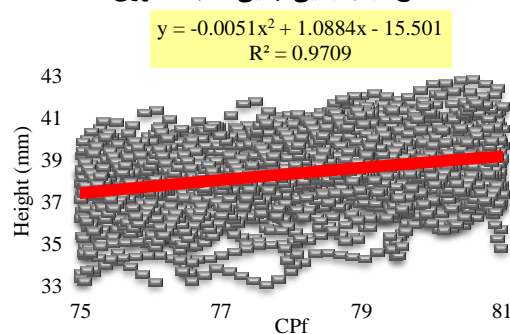
(پ) زمان انتهای انبساط

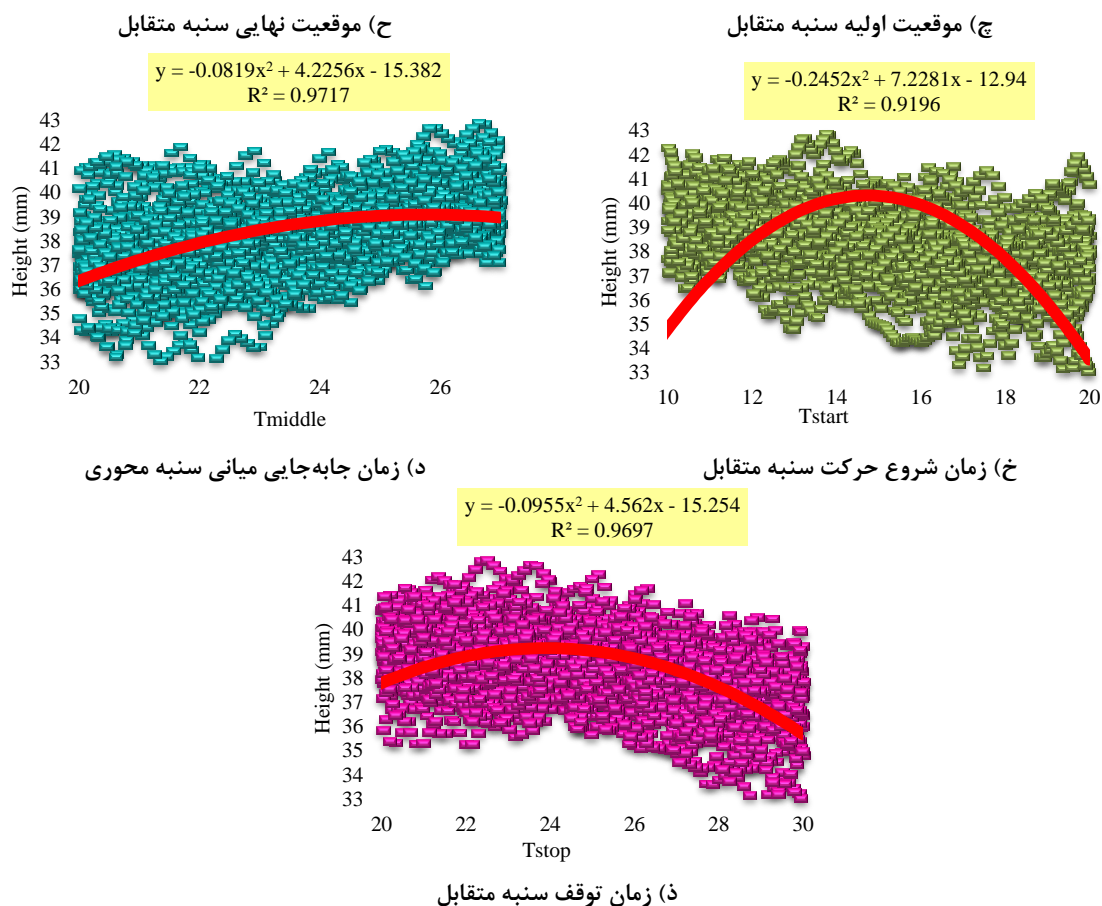


(ج) جابه‌جایی نهایی سنبه محوری



(ث) جابه‌جایی میانی سنبه محوری





شکل ۶- اثر متغیرهای ورودی بر روی ارتفاع بیشینه

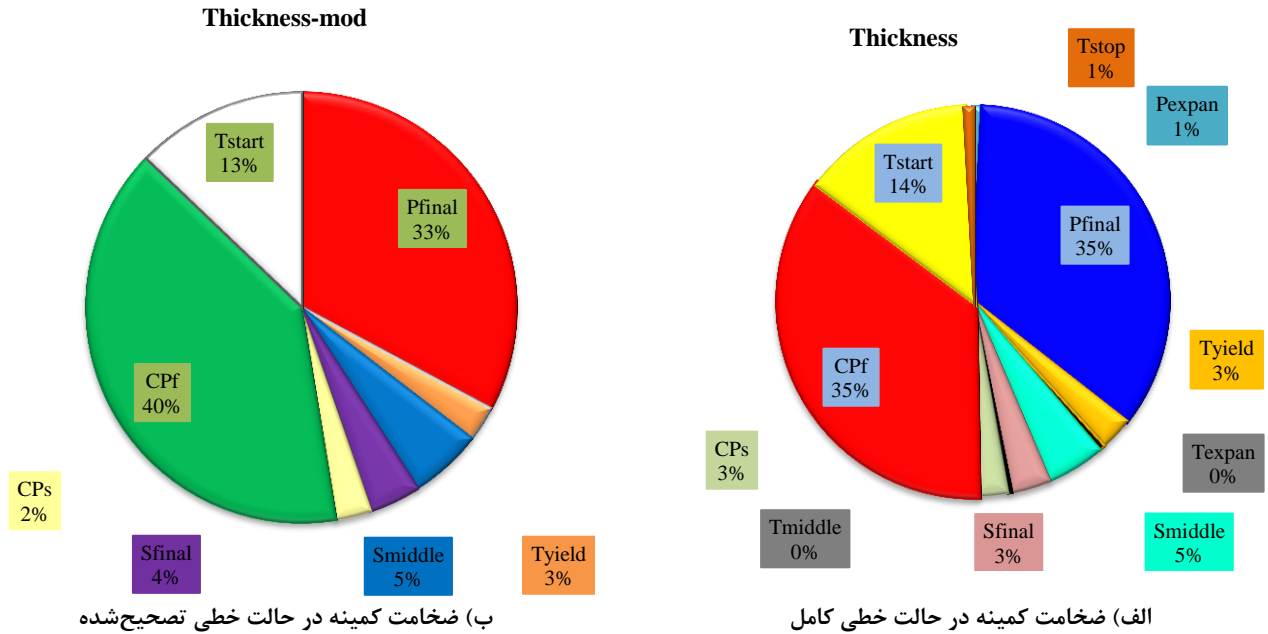
۳-۳- بررسی اثر کمی فاکتورهای ورودی بر روی ضخامت کمینه

در این بخش پس از بررسی نمودارهای گرافیکی و اثرگذاری‌های کیفی به تحلیل نمودارهای کمی پرداخته شده است تا میزان دقیق هر یک از ۱۱ پارامتر ورودی بر روی عامل خروجی ضخامت کمینه در دو حالت مدل خطی کامل و خطی تصحیح‌شده بررسی شود. اثرگذاری کمی این امکان در فرایند را ایجاد می‌کند تا با کم و زیاد کردن آن پارامتر خروجی‌ها به یک تعادل مناسب دست یابند. شکل ۷-الف نشان‌دهنده ضخامت کمینه در حالت خطی کامل است. موقعیت نهایی سنبه متقابل و فشار نهایی با ۳۵٪ بیش‌ترین میزان اثرگذاری را داشته‌اند. سپس زمان شروع حرکت سنبه متقابل با ۱۴٪ در جایگاه بعدی اثرگذاری قرار گرفته است. فاکتورهای مانند فشار انبساط و زمان توقف سنبه متقابل میزان اثرگذاری آن‌ها قابل‌چشم‌پوشی است و همچنین فاکتورهای زمان انتهای انبساط و زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری که هیچ‌گونه اثری بر روی ضخامت کمینه در مسیر بارگذاری نداشته‌اند. اما در شکل ۷-ب حالت خطی تصحیح‌شده برای ضخامت کمینه نمایش داده شده است. در این حالت ۴ فاکتور ورودی که اثرگذاری آن‌ها بر روی عامل خروجی بی‌تأثیر بوده است حذف شده و اهمیت فاکتورهای قبلی بر اساس میزان تأثیرشان اصلاح شده است. همانند حالت قبل موقعیت نهایی سنبه متقابل با میزان ۴۰٪، فشار نهایی با مقدار ۳۳٪ و زمان شروع حرکت سنبه متقابل ۱۳٪ در جایگاه اول تا سوم اثرگذاری و مهم‌ترین فاکتورهای ضخامت کمینه برای بهینه‌سازی مسیر بارگذاری فرایند هیدروفرمینگ محسوب می‌شوند.

۳-۴- بررسی اثر کمی فاکتورهای ورودی بر روی ارتفاع بیشینه

بررسی اثرگذاری کمی این امکان را در اختیار محققین و صنعتگران قرار می‌دهد تا با استفاده از آن به شرایط دلخواه در یک فرایند و تولید قطعه مورد نظر خود بپردازند. اثر هر فاکتور به‌طور دقیق بر روی خاصیت قطعه که عامل خروجی است مشخص شده است و برای رسیدن به آن باید میزان فاکتور ورودی کنترل گردد. در شکل ۸-الف ارتفاع بیشینه در حال خطی کامل نشان داده شده است. زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری با ۲۶٪ اثرگذارترین فاکتور ورودی در این حالت بر روی ارتفاع

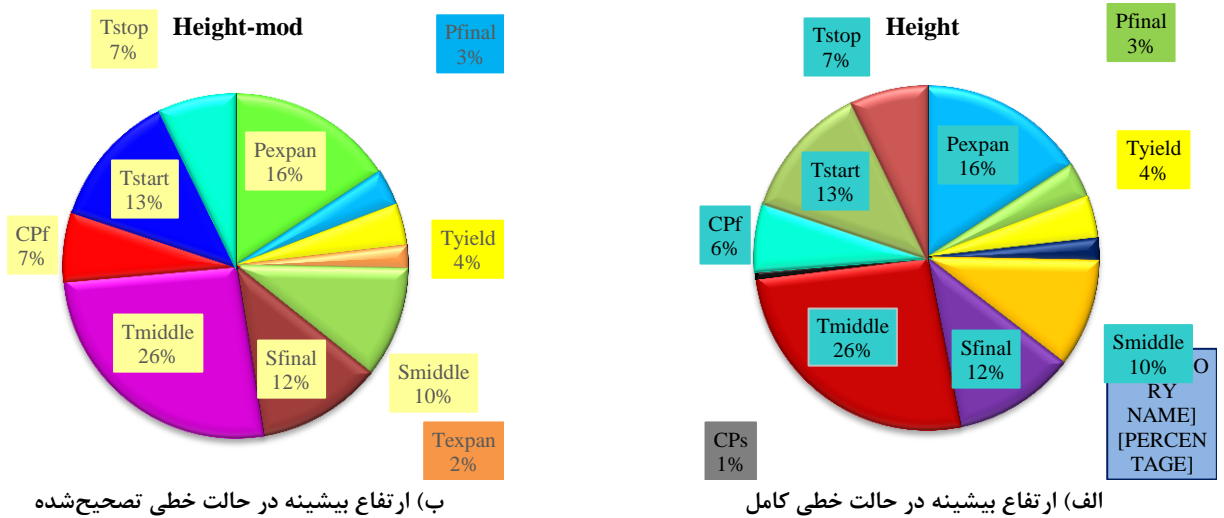
بیشینه بوده است. فشار انبساط، زمان شروع حرکت سنبه متقابل، جابه‌جایی نهایی سنبه محوری و جابه‌جایی میانی سنبه محوری هرکدام به ترتیب با ۱۶٪، ۱۳٪، ۱۲٪ و ۱۰٪ در مراتب بعدی اثرگذاری بر روی ارتفاع بیشینه در حالت خطی کامل می‌باشند. فاکتورهای فشار نهایی، زمان انتهای انبساط و موقعیت اولیه سنبه متقابل تقریباً اثرگذاری آن‌ها بی‌تأثیر بوده است. در حالت خطی تصحیح‌شده میزان فاکتور موقعیت اولیه سنبه متقابل حذف شده است و اندازه‌ی آن بر فاکتور موقعیت نهایی سنبه متقابل افزوده شده است. و ترتیب اثرگذاری فاکتورها همانند حالت خطی کامل است که در شکل ۸-ب نشان داده شده است.



ب) ضخامت کمینه در حالت خطی تصحیح‌شده

الف) ضخامت کمینه در حالت خطی کامل

شکل ۷- اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی ضخامت کمینه



ب) ارتفاع بیشینه در حالت خطی تصحیح‌شده

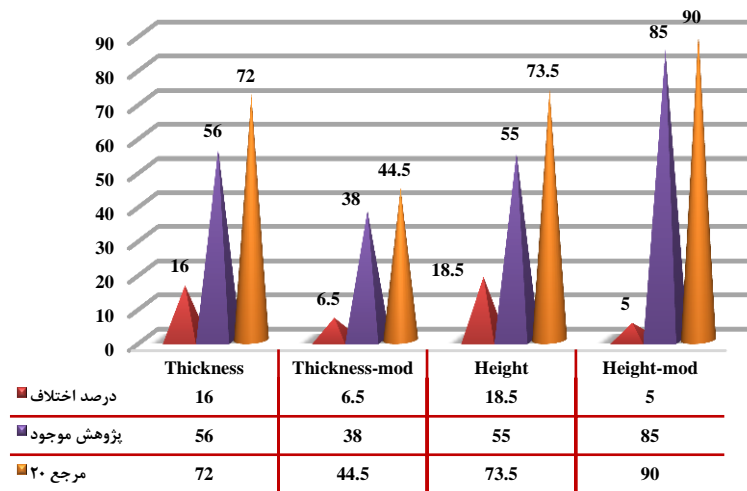
الف) ارتفاع بیشینه در حالت خطی کامل

شکل ۸- اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی ارتفاع بیشینه

۴- صحت و امکان‌سنجی نتایج

به‌منظور تایید شبیه‌سازی انجام‌شده نتایج به‌دست‌آمده با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی مشابه مقایسه می‌گردند. لذا، در این

صحه‌سنجی مدلی را که در مرجع [۱۹]، مورد آزمایش قرار گرفته است مورد مقایسه قرار داده شده است. نمونه مورد آزمایش همانند شکل ۳ است. در این شکل چگونگی اعمال پارامترهای بارگذاری نیز قابل مشاهده است. همانند نمونه آزمایشگاهی لوله‌ای با طول مشخص ۲۹۸/۵ میلی‌متر و قطر ۷۲ میلی‌متر و ضخامت ۲/۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این آزمایش از لوله AA6063-T5 بهره گرفته شده است که دارای خواص: مدول یانگ ۶۰ GPa، ضریب پواسون ۰/۳۵، تنش تسلیم ۵۵، ضریب مقاومت ۱۸۱/۰۹ MPa، توان کرنش سختی ۰/۳۱۸ و ناهمسانگردی با میزان ۰/۵۲۲۵ است. سپس با توجه به مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله و نتایج به‌دست‌آمده در مرجع [۱۹]، درصد نزدیکی نتایج به‌صورت شکل ۹ نمایش داده شده است. برای صحه‌گذاری نیز برازش مدل‌های ریاضی رگرسیونی که در معادلات ۱ تا ۴ آورده شده استفاده شده است. معیار مقایسه این مدل‌ها از لحاظ آماری ضریب همبستگی آن‌ها می‌باشد. ضریب همبستگی در واقع نشان‌دهنده‌ی وابستگی و نزدیکی نقاط به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با چندجمله‌ای ریاضی به وجود آمده است و هرچه مقدار وابستگی متغیرهای خروجی به متغیرهای ورودی بیشتر باشد ضریب همبستگی معادله به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر می‌شود. در این مقاله به‌منظور مقایسه مدل خطی و مدل تصحیح‌شده ضریب همبستگی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج پژوهش موجود و مرجع ۲۰

جدول ۲ ضرایب همبستگی معادلات رگرسیون دو عامل خروجی فرایند

ضخامت کمینه	۸۶/۷ درصد	مدل رگرسیون خطی	۸۵/۲۹ درصد	مدل رگرسیون تصحیح‌شده
ارتفاع بیشینه	۹۰/۶۰ درصد	مدل رگرسیون خطی	۹۰/۱۰ درصد	مدل رگرسیون تصحیح‌شده

۵- نتیجه‌گیری

روش تحلیل حساسیت که به‌عنوان یک دستیار بسیار قدرتمند در حال پیشرفت است به کمک تمامی فرایندهای تولیدی آمده است و یک بررسی دقیق بر روی مسیر یک فرایند از انتخاب فاکتورهای اولیه تأثیرگذار و مسیر اثرگذاری آن‌ها و درنهایت میزان اثرگذاری آن‌ها به‌صورت کمی و کیفی ارائه می‌دهد. در این مقاله با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوپول که بر پایه‌ی واریانس عمل می‌کند ۱۱ متغیر ورودی برای بهینه کردن مسیر بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ انتخاب شده است که اثرگذاری هریک از آن‌ها بر روی ضخامت کمینه و ارتفاع بیشینه فرایند هیدروفرمینگ بررسی شده است.

۶- فهرست علائم و اختصارات

CP_f	موقعیت نهایی سنبه متقابل (mm)	S_{middle}	جابه‌جایی میانی سنبه محوری (mm)
CP_s	موقعیت اولیه سنبه متقابل (mm)	S_{Ti}	شاخص مرتبه کل حساسیت
D	واریانس کل	T_{expan}	زمان انتهایی انبساط (S)
P_{expan}	فشار انبساط (MPa)	T_{middle}	زمان جابه‌جایی میانی سنبه محوری (S)
P_{final}	فشار نهایی (MPa)	T_{start}	زمان شروع حرکت سنبه متقابل (S)
P_{yield}	فشار تسلیم (MPa)	T_{stop}	زمان توقف سنبه متقابل (S)

زمان تسلیم (S) T_{yield} جابه‌جایی نهایی سنبه محوری (mm) S_{final}

۷- مراجع

- [1] Li L, Lang L, Hamza B, Zhang Q. Effect of hydroforming process on the formability of fiber metal laminates using semi-cured preparation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;107:3909-3920.
- [2] Zhou B-J, Xu Y-C, Zhang Z-C. Research on the selection principle of upper sheet in double-layer sheets hydroforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;109:1663-1669.
- [3] Ahmetoglu M, Altan T. Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends. Journal of Materials Processing Technology. 2000;98:25-33.
- [4] Aue-U-Lan Y, Ngaile G, Altan T. Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification. Journal of Materials Processing Technology. 2004;146:137-143.
- [5] Liu H, Gong J, Ma Y, Cui J, Li M, Wang X. Investigation of novel laser shock hydroforming method on micro tube bulging. Optics and Lasers in Engineering. 2020;129:106073.
- [6] Hwang Y-M, Tsai Y-J. Movable die and loading path design in tube hydroforming of irregular bellows. Metals. 2020;10:1518.
- [7] Pourhamid R, Shirazi A. A comprehensive damage criterion in tube hydroforming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2021;235:417-430.
- [8] Siegert K, Häussermann M, Lösch B, Rieger R. Recent developments in hydroforming technology. Journal of Materials Processing Technology. 2000;98:251-258.
- [9] Colpani A, Fiorentino A, Ceretti E. Characterization and optimization of the hydroforming process of AISI 316L steel hydraulic tubes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;107:293-309.
- [10] Jiang L, He Y, Lin Y, Zhang S, Feng Y, Sun M, Guo X. Influence of process parameters on thinning ratio and fittability of bellows hydroforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;107:3371-3387.
- [11] Prithvirajan R, Sugavaneswaran M, Sathishkumar N, Arumaikkannu G. Metal bellow hydroforming using additive manufactured die: a case study. Rapid Prototyping Journal. 2019.
- [12] Ying-ying F, Hong-ge Z, Zong-an L, Qing-lin W. Loading path optimization of T tube in hydroforming process using response surface method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;101:1979-1995.
- [13] Fann K-J, Hsiao P-Y. Optimization of loading conditions for tube hydroforming. Journal of Materials Processing Technology. 2003;140:520-524.
- [14] Imaninejad M, Subhash G, Loukus A. Loading path optimization of tube hydroforming process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005;45:1504-1514.
- [15] Hashemi S J, Moslemi N H, Liaghat G H, Deilami A H, Nematifaghir A. Prediction of forming limit curve using ductile fracture criteria in hydrofoming of aluminum tubes. 2014.
- [16] Tanyildizi H, Şahin M. Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. Construction and Building materials. 2015;79:97-103.
- [17] Khuri A I, Cornell J A. Response surfaces: designs and analyses: revised and expanded. CRC press. 2018.

- [18] Bathae S H. Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimensional nano-manipulation by using HK model. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019;9:123-139.
- [19] Hwang Y M, Lin T C, Chang W C. Experiments on T-shape hydroforming with counter punch. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;192:243-248.