

# طراحی مسیرهای بهینه بارگذاری در فرایند هیدروفرمینگ T شکل با اعمال مسیر فشار نوسانی

مهران کدخدایان\* و احمد عرفانی مقدم\*\*  
گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۲/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۶/۲۰)

T

چکیده -

T

واژگان کلیدی :

## An investigation into the optimal load paths for the pulsationg T-shaped hydroforming of tubes

M. Kadkhodayan, A. Erfani Moghadam

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

**Abstract:** This paper addresses modeling and optimization of loading path in T-shape hydroforming of tubes. A set of experimental data designed by DOE method is used to assess the influence of loading process parameters in hydroformed geometry. The minimum thickness and maximum height of protrusion are used as formability criteria and the regression modeling is used in order to establish the relationship between the input and output parameters. The adequacy of the model is evaluated using analysis of variance technique. The proposed model is embedded into a Simulated Annealing algorithm to

\*\* - کارشناس ارشد

\* - دانشیار

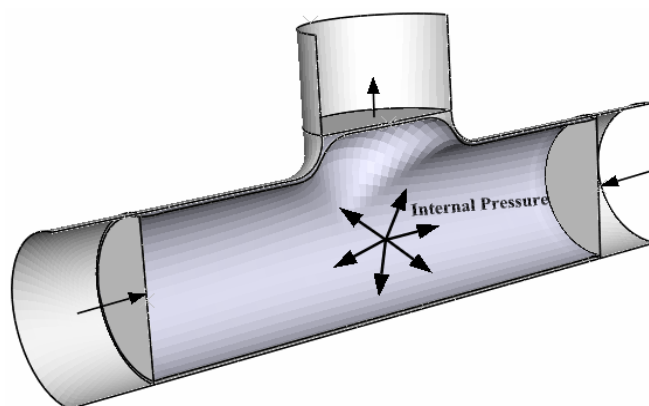
*optimize the loading process parameters and to find the best input variables to produce T shaped tubes. The comparison between the current results and the experimental data show the capability of the method.*

**Keywords:** Hydroforming, Load paths, Pulsating pressure, Analysis of variance technique, Optimization.

## ۱- مقدمه

تولید قطعات با استحکام بالا و در عین حال وزن کمتر، موجب شد تا هیدروفورمینگ به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. علی‌رغم کاربرد گسترده هیدروفورمینگ، این روش از جمله روشهای پیچیده شکل‌دهی به شمار می‌رود و به دلیل تغییر شکل غیر خطی لوله، وجود سطح اصطکاکی متغیر میان قالب و لوله، تولید قطعات بهینه در این روش با مشکلات زیادی همراه است. از جمله پارامترهای موثر بر روی کیفیت قطعات، تنظیم مناسب شرایط بارگذاری در طول فرایند است. پارامترهای موثر بارگذاری در این فرایند شامل فشار داخلی، جابه‌جایی پانچهای محوری و پانچ متقابل است و تعیین شرایط بارگذاری در طول فرایند، طراحی مسیرهای بارگذاری تعبیر می‌شود. طراحی مسیر بارگذاری به عنوان عامل کلیدی برای تولید قطعات بدون بروز نقص است. به دلیل پیچیدگی ناشی از همزمانی اعمال پارامترهای بارگذاری، محققان بسیاری به مطالعه بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری پرداختند و با توجه به گستردگی روشهای بهینه‌سازی، روشهای مختلفی را برای این منظور اعمال کردند. کوک [۱] تاثیر مسیرهای بارگذاری و تغییر خواص ماده بر روی کیفیت محصول نهایی را مطالعه کرد و برای این منظور، هیدروفورمینگ سه قطعه را مطالعه کرد و برای هر پروسه دو مسیر بار برای فشار داخلی و پانچ محوری پیشنهاد کرد و نتایج حاصل برای مقدار نازک‌شدگی و ارتفاع شاخه را مطالعه و با یکدیگر مقایسه کرد. اتصالات T-شکل یکی از قطعاتی بود که مورد بررسی قرار گرفت و برای تولید این قطعه از پانچ متقابل استفاده نشد. این قطعه با استفاده از فشار داخلی و پانچ محوری هیدروفورمینگ شد. باید اشاره شود که مسیرهای پیشنهادی او به طور دلخواه معرفی شد و تاثیر مسیرهای بارگذاری با استفاده از روش اجزای محدود مطالعه شد. هیو و همکاران [۲] با استفاده از روش زبان طراحی

پارامتریک نرم‌افزار انسیس (APDL)، تعیین مسیرهای بارگذاری را به منظور بهبود قابلیت شکل‌پذیری در فرایند هیدروفورمینگ، طراحی کردند. آنان نیز برای طراحی مسیرهای بارگذاری بهینه دو مسیر بارگذاری بر حسب زمان برای فشار داخلی و پانچ محوری پیشنهاد کردند. سپس تاثیر این مسیرها را بر روی مقدار نازک‌شدگی در فرایند هیدروفورمینگ با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه و مسیر بارگذاری بهینه را از میان این دو مسیر پیشنهادی تعیین کردند. ینگیوت و همکاران [۳] با استفاده از تکنیکهای بهینه‌سازی، مسیرهای بارگذاری بهینه را مطالعه و با استفاده از دو روش مختلف مسیرهای بارگذاری بهینه را طراحی کردند. آنان در هر روش چند مسیر مختلف را پیشنهاد و سپس با استفاده از تحلیلهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود مسیر بهینه را پیشنهاد کردند. استفاده از روشهای هوشمند از جمله دیگر روشهایی بود که برخی از محققان با استفاده از آن به طراحی مسیرهای بار در فرایند هیدروفورمینگ پرداختند. ری و مک‌دونالد [۴] با روش الگوریتم کنترل بار فازی، مسیر بارگذاری بهینه برای هیدروفورمینگ اتصالات T شکل را تعیین کردند. این روش از جمله روشهای بسیار پیچیده برای طراحی مسیرهای بارگذاری محسوب می‌شود و با توجه به اینکه باید رفتار هر المان در طول کل فرایند بهینه‌سازی مطالعه شود، زمان و هزینه بهینه‌سازی بسیار بالاست. در مطالعه ذکر شده یک مسیر خاص برای تولید اتصالات T-شکل ارائه شد و تاثیر مسیرهای دیگر بر روی فرایند مطالعه نشد. از طرفی اثر پانچ متقابل نیز به طور کل برای تولید اتصالات T-شکل در نظر گرفته نشد. لین و کوان [۵] با ترکیب روش اجزای محدود و شبکه تطبیقی مسیر بار بهینه را برای هیدروفورمینگ اتصالات پیش‌بینی کردند. آنان در این مطالعه ۷۵ آزمایش را بر اساس مسیرهای فشار مختلف و شرایط هندسی متفاوت بررسی و در هر آزمایش ضخامت مینیمم و ارتفاع ماکزیمم شاخه T-شکل را



شکل ۱- مراحل میانی تغییر شکل لوله در فرایند هیدروفرمینگ

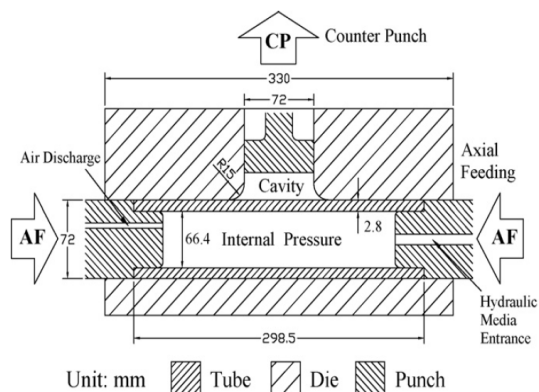
مطالعه تمام پارامترهای موجود و تعداد آزمایشهای معقول از روش طرح آزمایشها استفاده می‌شود. برای این مسئله بر اساس طرح تاگوچی ۳۲ مسیر بارگذاری برای هر پارامتر طراحی می‌شود. متغیرهای وابسته برای هر یک از مسیرهای بارگذاری با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار Abaqus/Explicit محاسبه می‌شوند. مدل ریاضی مناسب برای متغیرهای وابسته بر اساس متغیرهای مستقل به وسیله تحلیل رگرسیون تعیین می‌شود و بر مبنای جدول آزمایشها، با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) تاثیر هر یک از پارامترهای بارگذاری بر روی معیارهای شکل‌پذیری ارزیابی می‌شود. در ادامه به منظور جستجو در میان تمام جوابهای ممکن، مدل‌های ریاضی محاسبه شده در الگوریتم تیرید تدریجی اعمال و متغیرهای بارگذاری بهینه محاسبه و بر اساس آنها مسیرهای بارگذاری مناسب طراحی می‌شوند.

## ۲- هیدروفرمینگ اتصالات T شکل

در فرایند هیدروفرمینگ لوله در داخل قالب با استفاده از فشار سیال و اعمال نیروهای محوری شکل داده می‌شود. شکل (۱) فرایند هیدروفرمینگ برای تولید اتصالات T شکل را نشان می‌دهد. ابتدا لوله در داخل قالب قرار می‌گیرد و سپس اعمال فشار داخلی و نیروهای محوری از جانب پانچهای محوری تغییر شکل لوله آغاز می‌شود و اتصال مورد نظر شکل

محاسبه کردند. سپس با استفاده از تکنیکهای آماری ارتباط ریاضی میان دو پارامتر خروجی و پارامترهای ورودی را محاسبه و با استفاده از تکنیکهای آماری مسیر بهینه را طراحی کردند. در مطالعه آنان آزمایشات به طور دلخواه طراحی شدند و از یک الگوی مشخص برای این منظور استفاده نشد و تاثیر پانچ متقابل نیز مطالعه نشد. عدم وجود رابطه تحلیلی میان معیارهای شکل‌پذیری و پارامترهای بارگذاری در این فرایند، موجب پیچیدگی فرایند بهینه سازی می‌شود. از طرفی در نظر گرفتن تمام پارامترهای موجود موجب افزایش پیچیدگی فرایند بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری می‌شود. در اکثر مطالعات بالا شرایط بهینه تنها برای شرایط هندسی خاص طراحی شد و این در حالی است که طراحی همه‌جانبه مستلزم توجه به تمام پارامترهای موجود است. استفاده از الگوی مشخص برای طراحی مسیرهای بار از موارد مهمی است که در مطالعات بالا بدان پرداخته نشده است.

در این مطالعه، ابتدا پارامترهای بارگذاری به عنوان متغیرهای مستقل (ورودی) و معیارهای مناسب برای قابلیت شکل‌پذیری به عنوان متغیرهای وابسته (خروجی) تعیین می‌شود. برای هر متغیر وابسته محدوده مینیمم و ماکزیمم با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی و تجربی طراحی می‌شود. بر مبنای آزمایشهای دو سطحی برای تمام متغیرهای مستقل، مطالعه تمام شرایط امری ناممکن است. بنابراین، به منظور



شکل ۳- نمونه آزمایشگاهی فرایند

هیدروفرمینگ [۷]



شکل ۲- لوله تغییر شکل یافته در انتهای فرایند هیدروفرمینگ بعد از

برش لبه‌ها [۶]

## ۲-۲- پارامترهای بارگذاری

فشار داخلی، پانچ محوری و پانچ متقابل، سه پارامتر بارگذاری، سه پارامتر بارگذاری در فرایند هیدروفرمینگ اتصالات T شکل هستند. پارامتر اصلی در فرایند هیدروفرمینگ فشار داخلی است که مستقیماً بر روی ظرفیت دستگاه و هزینه تولید تاثیر می‌گذارد. به منظور جلوگیری از نازک شدن بیش از اندازه در طول فرایند از پانچ محوری به منظور هدایت جریان فلز به داخل قالب و از پانچ متقابل به منظور کنترل رفتار تغییر شکل در ناحیه آزاد قالب استفاده می‌شود. طراحی منحنی تغییرات پارامترهای بارگذاری مستلزم شناخت دقیق هر یک از پارامترهای بارگذاری است، بنابراین ابتدا هر یک از پارامترهای بارگذاری از به طور دقیقتری معرفی می‌شوند.

### ۲-۲-۱- فشار داخلی

از مهمترین پارامترهای فرایند هیدروفرمینگ، طراحی ظرفیت فشار داخلی است. محققان بسیاری بر روی طراحی مناسب تغییرات فشار در طول فرایند مطالعه و مسیرهای بارگذاری متفاوتی برای تولید قطعات در این روش ارائه کردند [۳-۶]. به طور کلی دو منحنی فشار داخلی خطی و نوسانی برای مسیر بارگذاری ارائه شده است. طراحی مسیرهای بارگذاری بر اساس فشار خطی در مطالعه قبلی توسط نویسندگان انجام گرفت [۸] و در مطالعه حاضر صرفاً رفتار تغییر شکل لوله در بارگذاری نوسانی مطالعه می‌شود.

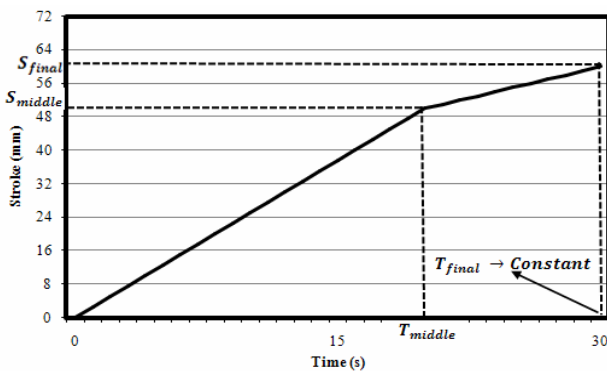
## جدول ۱- خواص لوله AA6063-T5

مقدار	متغیر
60	مدول یانگ E (Gpa)
0.35	ضریب پواسان (ν)
55	تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )
181.09	ضریب سخت شوندگی (K)
0.318	نمای سخت شوندگی (n)

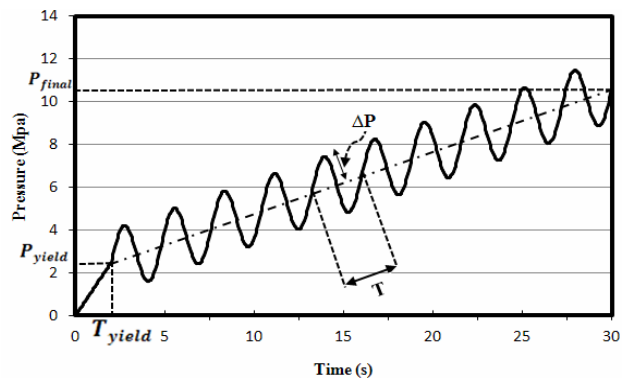
می‌گیرد. در شکل (۲) لوله تغییر شکل یافته به اتصال T، نشان داده شده است.

## ۲-۱- پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی در این فرایند شامل جنس لوله، ابعاد اتصال مورد نظر، ابعاد قالب و همچنین ابعاد پانچهای مورد نظر هستند که در ابتدا برحسب نظر و نیاز طراح انتخاب می‌شوند. در مطالعه حاضر به منظور مقایسه با نمونه آزمایشگاهی، پارامترهای ورودی مشابه نمونه مطالعه شده توسط هوانگ و همکاران [۷] انتخاب شده است. هندسه مربوط به فرایند هیدروفرمینگ برای ابعاد قالب و لوله مطابق شکل (۳) است. لوله از جنس آلایاز آلومینیوم 6063-T5 انتخاب شده است و خواص آن مطابق جدول (۱) تعیین شده است.



شکل ۵- منحنی جابه‌جایی پانچ محوری



شکل ۴- منحنی فشار نوسانی به همراه متغیرهای بارگذاری

جدول ۳- متغیرهای بارگذاری برای پانچ محوری

شماره	متغیر	واحد	نماد
۱	جابه‌جایی اولیه پانچ محوری	mm	$S_{middle}$
۲	جابه‌جایی نهایی پانچ محوری	mm	$S_{final}$
۳	زمان جابه‌جایی اولیه پانچ محوری	s	$T_{middle}$

جدول ۲- متغیرهای بارگذاری نوسانی

شماره	متغیر	واحد	نماد
۱	فشار نهایی	Mpa	$P_{final}$
۲	دوره تناوب	s	$T$
۳	دامنه نوسان	Mpa	$\Delta P$

فرایند هیدروفورمینگ لوله AA6063-T5 مقادیر مناسب برای فشار تسلیم و زمان اعمال فشار تسلیم به ترتیب برابر ۲/۵ مگاپاسکال و ۲ ثانیه هستند. بنابراین، در مطالعه فعلی مقادیر مربوط به این دو پارامتر ثابت در نظر گرفته شده است. به این ترتیب برای طراحی میدان فشار نوسانی، لازم است تا سه متغیر تعیین شوند که در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

### ۲-۲-۲- منحنی جابه‌جایی پانچ محوری

در هیدروفورمینگ اتصالات T شکل به دلیل تقارن موجود، منحنی جابه‌جایی پانچهای محوری مشابه است و در مطالعات صورت گرفته از یک نوع منحنی برای پانچها استفاده می‌شود. در مطالعه فعلی از منحنی جابه‌جایی دو مرحله‌ای بهره گرفته شده است که مطابق شکل (۵) است. بر اساس این شکل، سه متغیر برای طراحی مسیر جابه‌جایی پانچ محوری مورد نیاز است که به ترتیب جابه‌جایی گام اول پانچ و زمان مربوط به آن و موقعیت نهایی پانچ محوری به عنوان متغیر سوم است که در جدول (۳) مشخصات مربوط به این متغیرها آورده شده است.

استفاده از میدان فشار نوسانی برای هیدروفورمینگ قطعات ابتدا توسط موری و همکاران [۹] پیشنهاد شد و بهبود قابلیت شکل‌پذیری لوله در بارگذاری نوسانی در فرایند بادکردگی<sup>۲</sup> مطالعه شد. تاثیر بارگذاری نوسانی در هیدروفورمینگ قطعات T شکل توسط لوح موسوی و همکاران [۱۰] مطالعه شد. به طور کلی با توجه به اینکه فشار در طول فرایند روند کاهشی-افزایشی بر روی لوله دارد، این عمل موجب ایجاد یک فرایند کار سختی بر روی مواد لوله می‌شود. لذا، موجب افزایش استحکام لوله و در نتیجه به تاخیر انداختن نازک‌شدگی در لوله منجر می‌شود. برای این پارامتر توابع مختلفی ارائه شده است که در مطالعات [۹-۱۰] به آنها اشاره شد. بهترین تابع برای این پارامتر مطابق معادله زیر است:

$$P = \Delta P \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - T_y\right) + P_y + \left(\frac{P_{final} - P_y}{T_{final} - T_y}\right)(t - T_y) \quad (1)$$

تابع فوق در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل سه متغیر برای فشار خطی وجود دارد که به ترتیب شامل فشار تسلیم، زمان اعمال فشار تسلیم و فشار نهایی است. در فشار نوسانی دو پارامتر دوره تناوب و دامنه نوسان به عنوان دو پارامتر اصلی‌اند. مطابق با مطالعات قبلی انجام شده بر روی

جدول ۴- متغیرهای طراحی مسیر جابه‌جایی پانچ متقابل

شماره	متغیر	واحد	نماد
۱	موقعیت اولیه پانچ متقابل	mm	$CP_s$
۲	موقعیت نهایی پانچ متقابل	mm	$CP_f$
۳	زمان شروع حرکت پانچ متقابل	s	$T_{start}$
۴	زمان توقف پانچ متقابل	s	$T_{stop}$

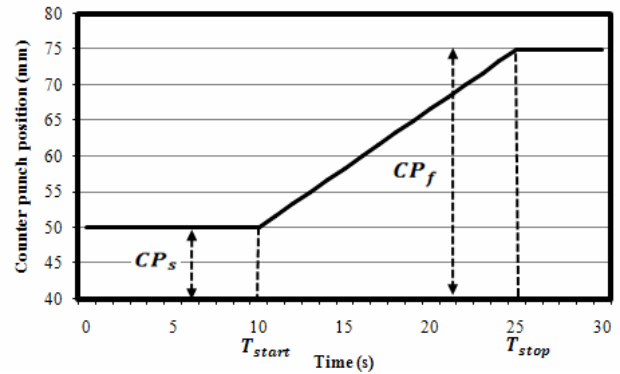
مهمترین پارامتر خروجی فرایند است و این امر زمانی میسر است که لوله بدون بروز هر گونه نقص از قبیل چروکیدگی و نازک شدگی شکل گیرد. دو پارامتر عمده که به عنوان شاخص در این فرایند تعیین می‌شوند عبارت از ضخامت مینیمم لوله و ارتفاع ماکزیمم شاخه در انتهای تغییر شکل‌اند، شکل (۷). این دو شاخص توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در مطالعه حاضر نیز به عنوان معیار شکل‌پذیری لوله به کار می‌روند.

### ۳- طرح مسئله

در این بخش اثر پارامترهای بارگذاری بر روی فرایند و روش یافتن مسیرهای بارگذاری بهینه مطالعه می‌شود. همان‌گونه که در بخشهای قبل عنوان شد، ۱۰ متغیر بارگذاری در فرایند هیدروفرمینگ وجود دارد و دو شاخص نیز برای تعیین کیفیت شکل‌پذیری لوله معرفی شد. اگر فقط دو وضعیت برای متغیرهای بارگذاری تعیین شود آنگاه با احتساب تمام متغیرها، ۲<sup>۱۰</sup> آزمایش مورد نیاز است تا تمامی حالات ممکن برای مسیرهای بارگذاری در نظر گرفته شود که انجام تمامی این آزمایشها امری ناممکن و طاقت فرساست. بنابراین باید به دنبال مکانیزمی بود تا علاوه بر در نظر گرفتن تمامی متغیرها، تعداد آزمایشها نیز منطقی باشد. برای این منظور از روش طراحی آزمایشها استفاده می‌شود که در بخش زیر تشریح شده است.

#### ۳-۱- طراحی آزمایشها

طراحی آزمایشها، به معنی تعیین تعداد آزمایشها و متغیرهای



شکل ۶- مسیر جابه‌جایی پانچ متقابل با متغیرهای مربوطه



شکل ۷- معیارهای شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ اتصالات T شکل

#### ۳-۲-۲- منحنی جابه‌جایی پانچ متقابل

پانچ متقابل برای کنترل رفتار تغییر شکل در سطح آزاد لوله استفاده می‌شود. در مجموع لازم است تا سه متغیر برای طراحی این پارامتر در فرایند مشخص شود که به ترتیب زمان شروع حرکت، مقدار جابه‌جایی و زمان توقف حرکت‌اند. در این مطالعه، برای تعیین مقدار جابه‌جایی از دو متغیر، موقعیت اولیه پانچ متقابل و موقعیت نهایی پانچ متقابل بهره گرفته شده است. این چهار متغیر در شکل (۶) نشان داده شده‌اند و مشخصات آنها در جدول (۴) معرفی شده‌اند.

#### ۳-۲- پارامترهای خروجی یا معیارهای شکل‌پذیری لوله

تغییر شکل مطلوب لوله در انتهای هیدروفرمینگ، به عنوان

جدول ۵- مقادیر مربوط به سطوح متغیرها

شماره	نماد	مینیم (-)	ماکزیمم (+)
۱	$P_{final}$	۸	۱۲
۲	$\Delta p$	۰/۵	۲
۳	T	۱/۴	۲/۸
۴	$S_{middle}$	۸	۵۸
۵	$S_{final}$	۵۸	۶۴
۶	$T_{middle}$	۲۰	۲۷
۷	$CP_{first\ place}$	۵۰	۵۶
۸	$CP_{final\ place}$	۷۵	۸۱
۹	$T_{start}$	۵	۱۰
۱۰	$T_{stop}$	۲۰	۳۰

مورد بررسی در هر آزمایش از طریق مطالعه و بررسی توأم چندین متغیر فرایند است. به بیان ساده‌تر بررسی کامل به منظور دستیابی به کنترل همه جانبه فرایند، انجام بینهایت آزمایش را می‌طلبد. اگر برای کاهش تعداد آزمایشها فقط چند سطح از هر متغیر مورد بررسی قرار گیرد، تعداد آزمایش با افزایش تعداد متغیرها به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۱۰ متغیر بارگذاری در این فرایند وجود دارد که به طور مستقیم با دو معیار خروجی در ارتباط است. این متغیرها باید به گونه‌ای انتخاب شوند تا بهترین تغییر شکل برای لوله حاصل شود. مسلماً محاسبه تنظیم مناسب برای این ۱۰ متغیر بسیار پیچیده است و باید ارتباط مناسب بین ۱۰ متغیر تعیین شود. بدین منظور معمولاً طرحهای مختلفی ارائه می‌شوند که شامل فول فاکتوریل، مرکب مرکزی و تاگوچی اند [۱۱]. طرحهای فول فاکتوریل و مرکب مرکزی زمانی مناسب‌اند که تعداد متغیرهای ورودی کم باشند. در مطالعه حاضر با ۱۰ متغیر ورودی، طرح تاگوچی برای طراحی آزمایشها استفاده شده است. در طرح تاگوچی طراحی آزمایشها بر اساس سطوح متغیر انجام می‌گیرد. بنابراین، قبل از تعیین شرایط متغیر در آزمایشها باید سطوح متغیرها تعیین شوند. این سطوح بر اساس آزمایشهای مختلف، ماهیت پارامترها و عوامل دیگر

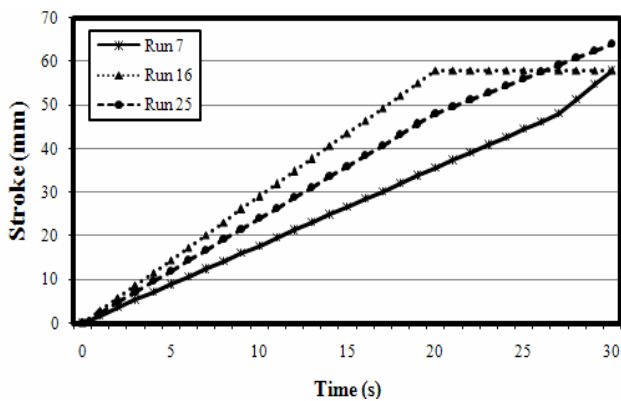
تعیین می‌شوند. در مطالعه حاضر بر اساس نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازیهای انجام شده این سطوح تعیین شدند، جدول (۵) با استفاده از طرح تاگوچی و بر مبنای آزمایشهای دو سطحی ۳۲ آزمایش بر اساس جدول (۶) طراحی می‌شود. با توجه به وضعیت هر یک از متغیرها می‌توان مسیرهای بارگذاری را طراحی کرد که در ادامه برای هر یک از پارامترهای بارگذاری چند مسیر به عنوان نمونه طراحی شده است. بر اساس طرح بالا می‌توان مسیرهای بارگذاری را طراحی کرد که در شکلهای (۸) تا (۱۰) نمودارهای نمونه برای فشار نوسانی، جابه‌جایی پانچهای محوری و جابه‌جایی پانچ متقابل نشان داده شده است.

#### ۴- انجام آزمایشها

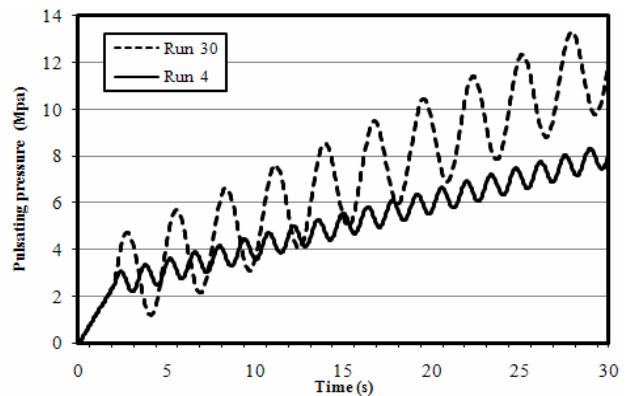
از شبیه‌سازی اجزای محدود برای انجام آزمایشها استفاده شده است. برای این منظور نرم افزار تحلیل اجزای محدود دینامیکی صریح Abaqus/Explicit برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. ابعاد نمونه شبیه‌سازی مطابق شکل (۳) و خواص لوله مورد نظر در شبیه‌سازی مطابق جدول (۱) انتخاب شد. سپس مسیرهای بارگذاری مطابق شکلهای (۸) الی (۱۰) برای هر آزمایش بر روی لوله شبیه‌سازی شد. سپس، نتایج مربوط به

جدول ۶- جدول تاگوچی طراحی شده بر اساس آزمایشهای دو سطحی

شماره	P <sub>final</sub>	Δp	T	S <sub>middle</sub>	S <sub>final</sub>	T <sub>middle</sub>	CP <sub>s</sub>	CP <sub>f</sub>	T <sub>start</sub>	T <sub>stop</sub>
۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
۳	-	-	-	+	-	+	-	+	+	+
۴	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-
۵	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+
۶	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-
۷	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
۸	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+
۹	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
۱۰	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-
۱۱	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-
۱۲	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+
۱۳	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-
۱۴	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+
۱۵	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+
۱۶	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-
۱۷	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-
۱۸	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+
۱۹	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+
۲۰	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-
۲۱	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+
۲۲	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
۲۳	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-
۲۴	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+
۲۵	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+
۲۶	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+
۲۷	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+
۲۸	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
۲۹	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
۳۰	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
۳۱	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+
۳۲	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

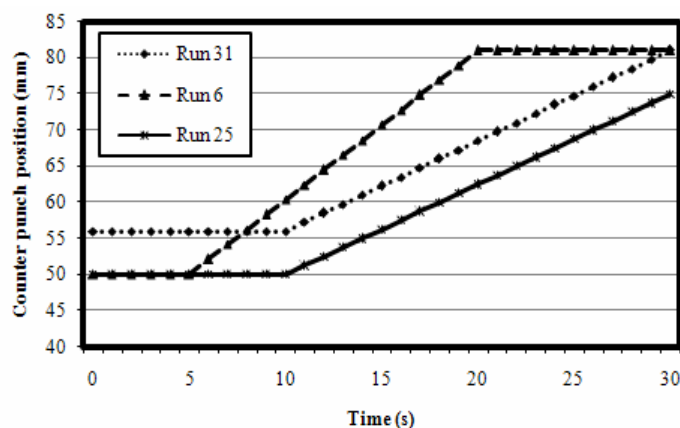


شکل ۹- مسیرهای طراحی شده برای جابه‌جایی پانچ محوری



شکل ۸- دو نمونه منحنی فشار داخلی در طی فرایند





شکل ۱۰- مسیرهای طراحی شده برای جابه‌جایی پانچ متقابل

جدول ۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای آزمایشهای طراحی شده

Height	Thickness	T <sub>stop</sub>	T <sub>start</sub>	CP <sub>f</sub>	CP <sub>s</sub>	T <sub>middle</sub>	S <sub>final</sub>	S <sub>middle</sub>	T	Δp	P <sub>final</sub>	شماره
۳۵/۳۸	۲/۵۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱
۳۸/۶۳	۲/۵۸	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	۲
۳۴/۷۳	۲/۵۵	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	۳
۳۸/۸۲	۲/۶	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	۴
۳۶/۶۵	۲/۵۷	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	۵
۴۰/۴۲	۲/۵۶	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	۶
۳۳/۷۸	۲/۶	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	۷
۳۳/۴۶	۲/۶۱	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	۸
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
۳۶/۰۷	۲/۴۵	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	۲۵
۴۲/۲۲	۲/۴۴	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	۲۶
۳۹/۳۸	۲/۴۲	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	۲۷
۴۰/۴۸	۲/۴۸	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	۲۸
۳۹/۱۳	۲/۴۴	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	۲۹
۴۳/۳۵	۲/۴	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	۳۰
۳۴/۳۵	۲/۳۸	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	۳۱
۴۰/۲۲	۲/۵۱	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	۳۲

خروجیهای مورد نظر است. مدل‌های ریاضی توسعه یافته، ابزار مناسبی برای دستیابی به پارامترهای صحیح در کنترل خروجیهای مطلوب برای سطح مشخصی از ورودیها هستند. در این مدلها امکان بهینه‌سازی فرایند و نیز تحلیل حساسیت فراهم است و با استفاده از آنها تاثیر پارامترهای تنظیمی بر روی خروجیها قابل مطالعه است. در این میان تحلیل رگرسیونی که بر پایه میانپایی داده‌های آماری است، جزو مهمترین روشهای مدلسازی ریاضی است [۱۲].

ارتفاع ماکزیمم شاخه و ضخامت مینیمم لوله محاسبه شد که نتایج حاصل برای چند نمونه در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. حال می‌توان تاثیر هر یک از پارامترها را ارزیابی کرد و به دنبال آن مسیر بارگذاری بهینه را برای تولید اتصال T شکل جستجو کرد. بدین منظور ابتدا باید رابطه میان پارامترهای خروجی و متغیرهای بارگذاری تعیین شود. در اینجا از تحلیل رگرسیون برای مدلسازی ریاضی استفاده می‌شود. مدلسازی ریاضی ارتباط دهنده پارامترهای ورودی فرایند با

## ۵- تحلیل رگرسیون

حاضر با توجه به تعداد آزمایشها، تعداد متغیرها، مدل رگرسیونی مرتبه دوم و مدل نمایی از دقت کافی برخوردار نیست و بنابراین از بیان آنها خودداری شده است.

### ۵-۲-۱- مدلسازی رگرسیون خطی

$$\begin{aligned} \text{Thickness} = & 2.87 - 0.0217 \times P_{\text{final}} - 0.0354 \times \Delta p \\ & + 0.00848 \times T + 0.000437 \times S_{\text{middle}} \\ & + 0.00448 \times S_{\text{final}} - 0.00134 \times T_{\text{middle}} \\ & + 0.00052 \times CP_s - 0.00490 \times CP_f \\ & - 0.00088 \times T_{\text{start}} - 0.00106 \times T_{\text{stop}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Height} = & -13.6 + 0.650 \times P_{\text{final}} + 0.212 \times \Delta p - 0.042 \\ & \times T - 0.172 \times S_{\text{middle}} + 0.578 \times S_{\text{final}} + 0.320 \\ & \times T_{\text{middle}} + 0.0531 \times CP_s + 0.148 \times CP_f \\ & - 0.121 \times T_{\text{start}} - 0.0850 \times T_{\text{stop}} \end{aligned} \quad (3)$$

### ۵-۲-۲- مدلسازی رگرسیونی اصلاح شده

$$\begin{aligned} \text{Thickness} = & 2.878 - 0.0217 \times P_{\text{final}} - 0.0354 \times \Delta p \\ & + 0.00448 \times S_{\text{final}} - 0.00490 \times CP_f \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Height} = & -10.61 + 0.650 \times P_{\text{final}} - 0.172 \times S_{\text{middle}} \\ & + 0.577 \times S_{\text{final}} + 0.320 \times T_{\text{middle}} + 0.148 \\ & \times CP_f - 0.121 \times T_{\text{start}} - 0.085 \times T_{\text{stop}} \end{aligned} \quad (5)$$

حال صحت مدل‌های ارائه شده مطالعه می‌شود. در ابتدا اعتبار مدل‌های ارائه شده و سپس معنادار بودن آنها بررسی می‌شود. به منظور بررسی اعتبار مدل‌های ارائه شده در ابتدا توزیع باقیمانده‌ها برای مقادیر آزمایشگاهی بر اساس مقادیر پیش‌بینی شده برای ضخامت و سپس توزیع نرمال باقیمانده‌ها، مطابق شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده می‌شوند. مطابق با موارد گفته شده برای توزیع باقیمانده‌ها و توزیع نرمال آنها، اعتبار مدل ارائه شده برای ضخامت تأیید می‌گردد. بر اساس دو شکل (۱۳) و (۱۴) اعتبار مدل ارائه شده برای ارتفاع ماکزیمم شاخه نیز تأیید می‌شود. اکنون فرض معنادار بودن مدل‌های ارائه شده با محاسبه ضرایب همبستگی برای دو مدل ارائه شده محاسبه می‌شود. مطابق با جدول (۸) ضرایب همبستگی برای دو مدل خطی و تصحیح شده برای دو مدل ضخامت و ارتفاع به دست آمده است. مقادیر مربوط به ضرایب همبستگی بسیار مطلوب است و بنابراین فرض معنادار بودن مدل‌های ارائه شده نیز برقرار است. در دو شکل (۱۵) و (۱۶) توزیع

تحلیل رگرسیون روشی ساده برای بررسی و تعیین روابط کمی میان متغیرهای خروجی و ورودی یک فرایند (سیستم) است. گام اول تحلیل رگرسیونی، برآورد پارامترهای مدل (ضرایب متغیرهای رگرسیونی) است به طور کلی روند برآورد پارامترها، برازش مدل به داده‌ها نامیده می‌شود. شیوه‌های مختلفی برای برآورد این ضرایب وجود دارد که پرکاربردترین آنها روش حداقل مربعات خطاست و علاوه بر این، برازش می‌تواند خطی، درجه دو (سه‌موی) و یا لگاریتمی باشد [۱۲].

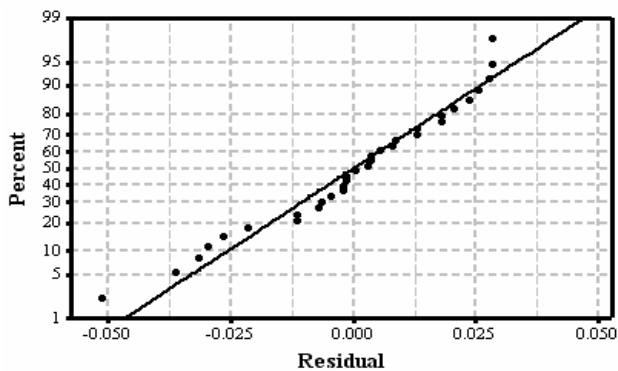
### ۵-۱- کنترل فرضیات و اعتبار مدل‌های رگرسیونی

توابع رگرسیونی که از درجه اعتبار برخوردار باشند به عنوان توابع مدل‌کننده فرایند برای پیش‌بینی خروجیها بر مبنای ورودیهای معلوم به کار گرفته می‌شوند. در اینجا مدلی از درجه اعتبار بیشتری برخوردار است که کمترین خطا و بیشترین انطباق را بر داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. روشهای کنترل مدل‌های رگرسیونی شامل موارد نرمال بودن باقیمانده‌ها، هم‌واریانس بودن و مستقل بودن باقیمانده‌هاست که این سه مورد با تحلیل توزیع باقیمانده‌ها بررسی می‌شوند [۱۲].

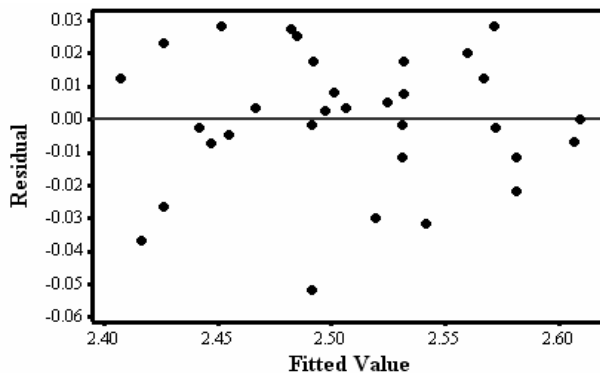
یکی دیگر از روشهای سنجش مناسب بودن مدل، استفاده از ضریب همبستگی است. از این ضریب به عنوان یک شاخص کلی برای بیان میزان برازش مدل استفاده می‌شود. این ضریب بر اساس مفهوم مجموع مربعات باقیمانده‌ها محاسبه می‌شود و هر چه مقدار این ضریب به ۱۰۰٪ نزدیکتر شود دقت مدل بالاتر است [۱۲].

### ۵-۲- مدلسازی ریاضی فرایند هیدروفورمینگ

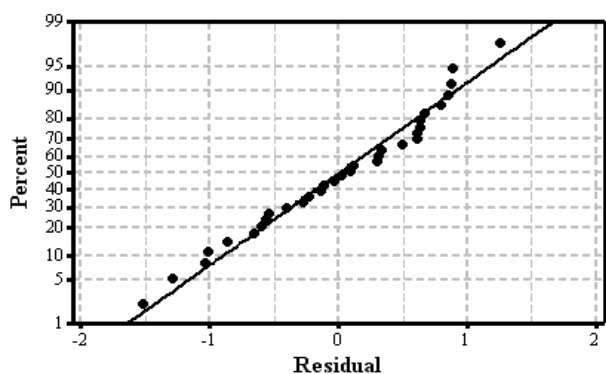
مدل‌های خطی برازش داده شده بر داده‌های حاصل از اجرای طرح آزمایشهای (تاگوچی) برای دو متغیر خروجی ارتفاع ماکزیمم شاخه و ضخامت مینیمم لوله به طور مجزا معرفی می‌شوند. برای محاسبه مدل‌های رگرسیونی از نرم‌افزار Minitab استفاده می‌شود. علاوه بر مدل پایه (بدون حذفی)، مدل با روش مرحله‌ای اصلاح شده‌اند و در ادامه محاسبه می‌شوند. در مطالعه



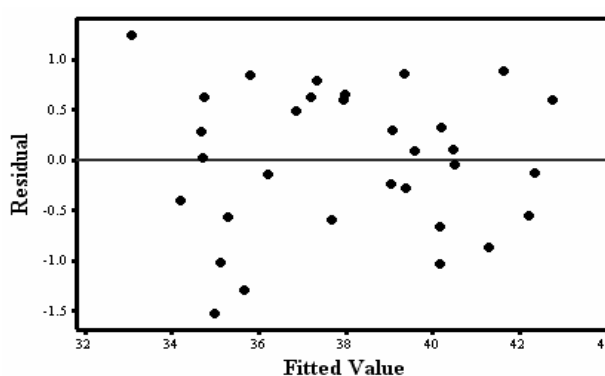
شکل ۱۲- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای مدل ضخامت مینیمم



شکل ۱۱- توزیع باقیمانده‌ها برای ضخامت مینیمم



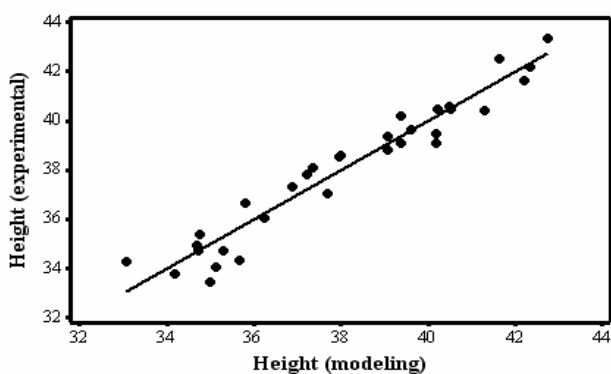
شکل ۱۴- توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای ارتفاع ماکزیمم شاخه



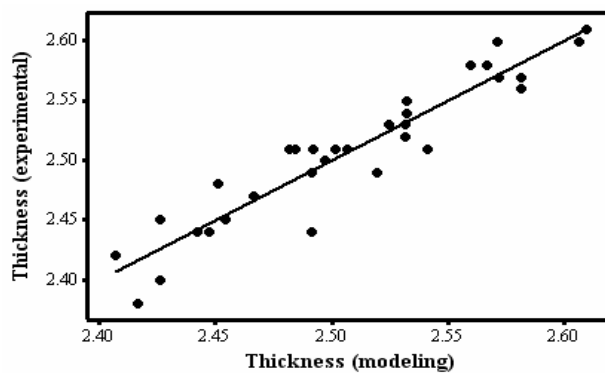
شکل ۱۳- توزیع باقیمانده‌ها برای ارتفاع ماکزیمم شاخه

جدول ۸- ضرایب همبستگی مربوط به دو مدل ارائه شده

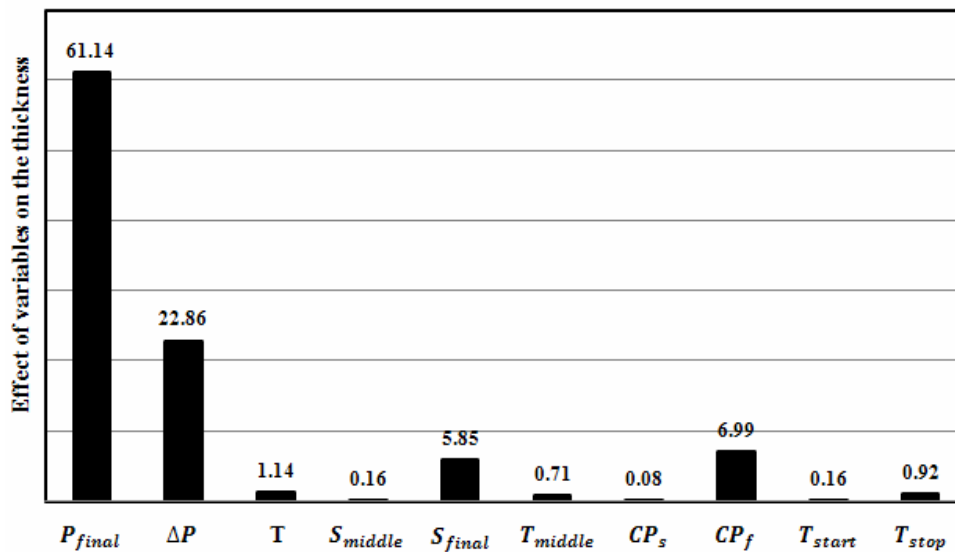
Height	Thickness	جواب معادله خروجی
۹۳/۷۰٪	۸۸/۷٪	چند جمله‌ای درجه اول
۹۳/۰۲٪	۸۵/۸۹٪	چند جمله‌ای تصحیح شده



شکل ۱۶- مقایسه نتایج شبیه سازی اجزای محدود و مدلسازی آماری برای ارتفاع ماکزیمم شاخه



شکل ۱۵- مقایسه نتایج شبیه سازی اجزای محدود و مدلسازی آماری برای ضخامت مینیمم



شکل ۱۷- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم

امکان را فراهم می‌کند تا متغیرهای با تاثیر اندک از فرایند بهینه‌سازی حذف شوند و مطالعه دقیقتری بر روی سایر پارامترهای بارگذاری انجام گیرد. البته باید توجه کرد که این امکان وجود دارد که یک پارامتر بر روی ضخامت تاثیر اندکی داشته و همان متغیر بر روی ارتفاع شاخه، تاثیر شاخصی داشته باشد. بنابراین پارامترهای بارگذاری باید به صورت همزمان بر روی پارامترهای خروجی مطالعه شوند.

## ۶-۲- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی

### ارتفاع ماکزیمم شاخه

درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ارتفاع شاخه در شکل (۱۸) ترسیم شده است. همان‌گونه که در بخش قبل عنوان شد ممکن است تاثیر برخی از پارامترها بر روی یک پارامتر بسیار ناچیز باشد و بر روی پارامتر دیگر بسیار شاخص باشد که در اینجا این امر در مورد جابه‌جایی نهایی پانچ محوری مشاهده می‌شود. مطابق شکل (۱۸) واضح است که سه پارامتر مورد نظر برای طراحی مسیر جابه‌جایی پانچ محوری، تاثیر شاخصی بر روی ارتفاع شاخه اتصال تولید شده دارند و این در حالی است که تاثیر این سه پارامتر بر روی ضخامت مینیمم

مقادیر مربوط به آزمایشها بر اساس شبیه‌سازی اجزای محدود و مدلسازی آماری با یکدیگر مقایسه شده است. مطابق با این دو شکل تطابق خوبی میان نتایج مدلسازی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.

## ۶-۳- مطالعه تاثیر پارامترهای بارگذاری بر روی تغییر

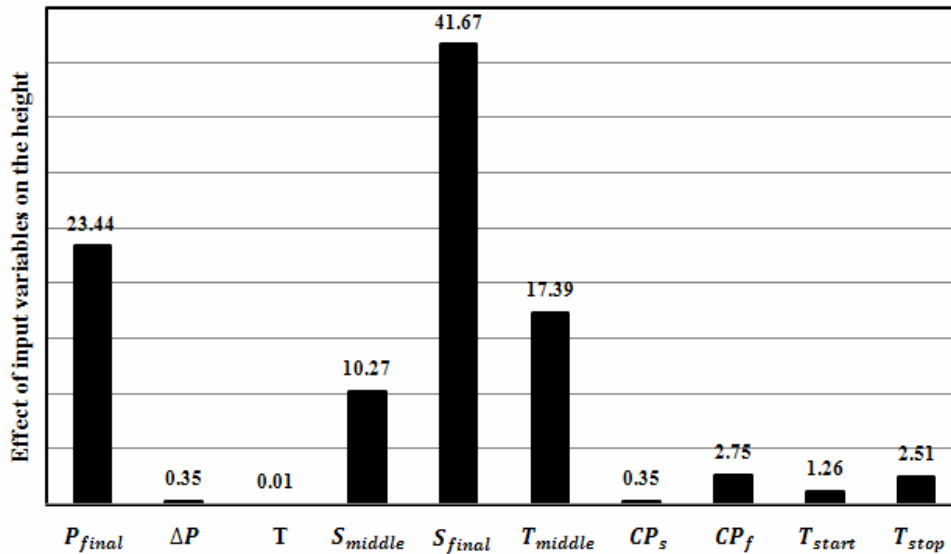
### شکل لوله

آزمایشهای تاگوچی امکان مطالعه تاثیر هر یک از پارامترهای بارگذاری را بر روی شکل تغییر شکل فراهم می‌کند. در مطالعه حاضر تاثیر هر یک از پارامترهای بر روی دو معیار شکل پذیری به صورت جداگانه مطالعه شده است.

## ۶-۱- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر

### ضخامت مینیمم

در شکل (۱۷) میزان تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم نشان داده شده است. با توجه به شکل برخی از پارامترها تاثیر بیشتری بر روی تغییر شکل دارند و تاثیر برخی از پارامترها بسیار ناچیز است. تحلیل انجام شده این



شکل ۱۸- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ارتفاع ماکزیمم شاخه

گرمایی پیشنهاد کردند. تقریباً ۳۰ سال بعد، کیرک پاتریک شباهت عمیق بین مینیمم کردن تابع هزینه یک مسئله بهینه سازی و سردکردن تدریجی یک جسم جامد تا رسیدن به حداقل انرژی را نشان دادند [۱۴]. به طور کلی، جستجوگر تبرید تدریجی، یکی از روشهای تصادفی است که بر گرادیان استوار نیست. این جستجوگر نیز یک جستجوگر همسایگی است که از یک جواب قابل قبول شروع به جستجو می کند و بر اساس یک مکانیزم تولید همسایگی که می تواند از نوع جابه جایی دوتایی یا از نوع جاگذاری باشد، یک همسایگی جدید را تولید و ارزیابی می کند. شکل (۱۹) نمودار جریانی مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم تبرید تدریجی (SA) را نشان می دهد.

## ۸- نتایج حاصل و بحث

الگوریتم ارایه شده در بخش قبلی برای مسئله هیدروفورمینگ لوله بر اساس توابع مدل سازی شده، در نرم افزار Matlab کدنویسی شد و بر اساس آن مقادیر بهینه برای متغیرهای بارگذاری به دست آمد. در این مطالعه از تابع خطا شامل دو معیار خروجی برای تابع هدف استفاده شد که شکل کلی این تابع مطابق معادله (۶) است.

بسیار ناچیز است. بنابراین اگر طراح قصد داشته باشد تا حجم و پیچیدگی آزمایش خود را کاهش دهد لازم است تا میانگین درصد تاثیرگذاری هر متغیر را بر روی تمام پارامترهای خروجی محاسبه و سپس متغیرهای با تاثیر اندک را حذف کند. بنابراین، روش ارائه شده امکان کاهش حجم آزمایش را فراهم می کند.

## ۷- بهینه سازی

بعد از تعیین متغیرهای بارگذاری، معیارهای شکل پذیری و رابطه سازی میان این پارامترها، حال باید شرایط بهینه متغیرهای بارگذاری برای طراحی مسیرهای بارگذاری مطالعه شود. بنابراین ابتدا می باید روش مناسب برای بهینه سازی این مسئله تعیین شود. در مورد مسئله حاضر از روش الگوریتم تبرید تدریجی برای بهینه سازی مسیرهای بارگذاری استفاده شده است که در ادامه به طور مختصر این الگوریتم معرفی می شود.

## ۷-۱- الگوریتم تبرید تدریجی

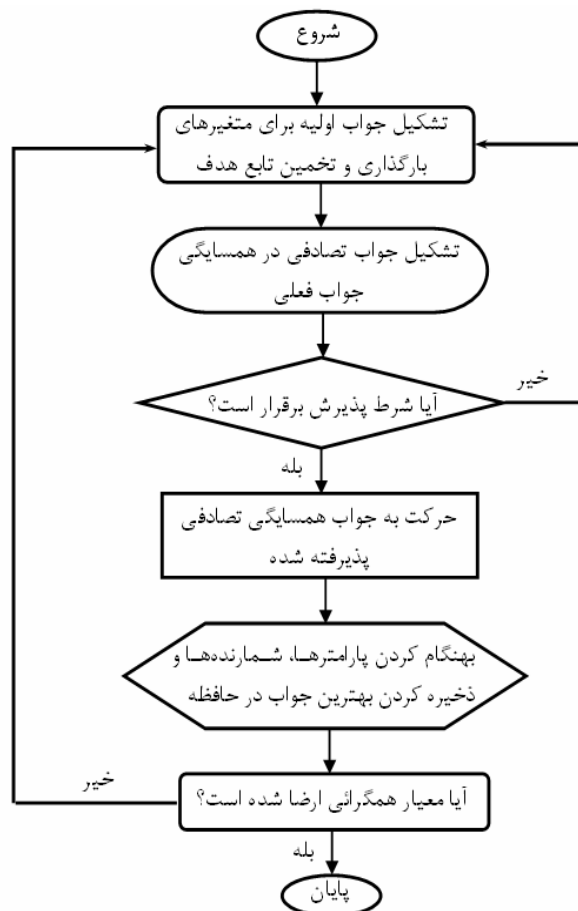
در سال ۱۹۵۳، متروپولیس و همکارانش [۱۳]، الگوریتمی را برای شبیه سازی سرد شدن یک جسم جامد تا رسیدن به تعادل

$$\text{Thinning} = 100 \times \left( \frac{T_{\text{initial}} - T_{\text{final}}}{T_{\text{initial}}} \right) \quad (7)$$

هرچه میزان اختلاف مقدار ضخامت مینیمم از ضخامت اولیه لوله (۲٫۸ میلی‌متر در تحقیق فعلی) بیشتر باشد مقدار نازک‌شدگی نیز بیشتر است. این امر در فرایند هیدروفورمینگ به عنوان یک نقص تلقی می‌شود. بنابراین یکی از اهداف این الگوریتم بهینه‌سازی طراحی مسیر بارگذاری برای تولید قطعه با بیشترین مینیمم ضخامت است.

پارامتر بعدی که باید تعیین شود H است که در ابتدا ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مشاهدات بعدی نشان داد که انتخاب مقادیر دیگری نیز تغییری در نتیجه نهایی حاصل نمی‌کند. اگر متغیرهای بارگذاری به گونه‌ای طراحی شوند که ارتفاع افزایش یابد در این صورت واضح است که ضخامت به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه حد مجاز برای نازک‌شدگی ۱۵٪ است، این امر معقول نیست. بنابراین، متغیرهای بارگذاری باید به گونه‌ای تعیین شوند که شرایط بهینه برای هر دو معیار شکل‌پذیری حاصل شود. بعد از تعیین متغیرهای موجود در تابع هدف، آنها داخل الگوریتم قرار می‌گیرند و متغیرهای بهینه تعیین می‌شوند.

در جدول (۹) مقادیر بهینه برای متغیرهای بارگذاری محاسبه شده است. بر اساس این مقادیر ابتدا نتایج معیارهای شکل‌پذیری مربوط به کد تیرید تدریجی (SA) و سپس نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تعیین شده‌اند. مقادیر مربوط به نتایج شکل‌پذیری در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند و مقدار خطای مربوط به هر آزمایش نیز محاسبه شده است. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از بهینه‌سازی از دقت مناسبی برخوردار هستند و ماکزیمم اختلاف میان نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی اجزای محدود کمتر از ۲٪ است که این مقدار دقت بالای الگوریتم بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. بر اساس بهترین نتایج به‌دست‌آمده و کمترین خطا میان نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی اجزای محدود بهترین مسیر بارگذاری انتخاب می‌شود. برای مسئله حاضر مقادیر مربوط به متغیرهای



شکل ۱۹- نمودار جریانی مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم تیرید تدریجی (SA)

$$f = \frac{(T_{\text{exp}} - T)^2}{T_{\text{exp}}} + \frac{(H_{\text{exp}} - H)^2}{H_{\text{exp}}} \quad (6)$$

در این معادله  $T_{\text{exp}}$  مقدار مربوط به ضخامت مینیمم است که از معادله (۲) محاسبه و  $H_{\text{exp}}$  مقدار مربوط به ارتفاع ماکزیمم است که از معادله (۳) محاسبه می‌شود. دو پارامتر  $H$  و  $T$  مقادیر مطلوبی‌اند که با توجه به نوع مسئله و مشخصات نمونه آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. در مسئله جاری یکی از این معیارهای بهینه‌سازی ضخامت مینیمم است. بنابراین، با توجه به هدف مسئله برای تولید قطعه با بیشترین مینیمم ضخامت، مقدار اولیه آن با توجه به نمونه آزمایشگاهی ۲٫۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که مقدار مینیمم ضخامت، معیار نازک‌شدگی است که این معیار مطابق با معادله زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۹- مقادیر بهینه حاصل از الگوریتم تبرید تدریجی

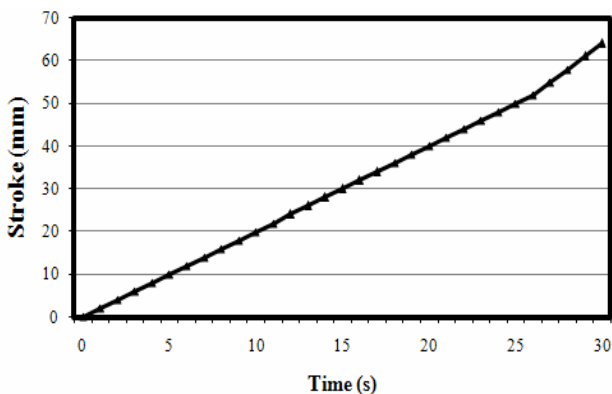
$T_{stop}$	$T_{start}$	$CP_f$	$CP_s$	$T_{middle}$	$S_{final}$	$S_{middle}$	$T$	$\Delta p$	$P_{final}$	Test
۲۰	۷	۷۵	۵۵	۲۷	۶۴	۵۱	۲/۳	۰/۶	۹/۵	۱
۲۰	۵	۷۵/۵	۵۶	۲۷	۶۴	۴۹	۲/۵	۰/۵	۹/۵	۲
۲۰	۶	۷۶	۵۵	۲۷	۶۴	۴۸	۲/۶	۰/۵	۱۰	۳
۲۰	۵/۵	۷۹/۵	۵۳/۵	۲۷	۶۴	۴۹	۲/۷	۰/۵	۹	۴
۲۱	۵/۵	۷۷	۵۶	۲۶	۶۴	۴۸	۲/۵	۰/۷	۹/۵	۵

جدول ۱۰- مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم و شبیه سازی اجزا محدود

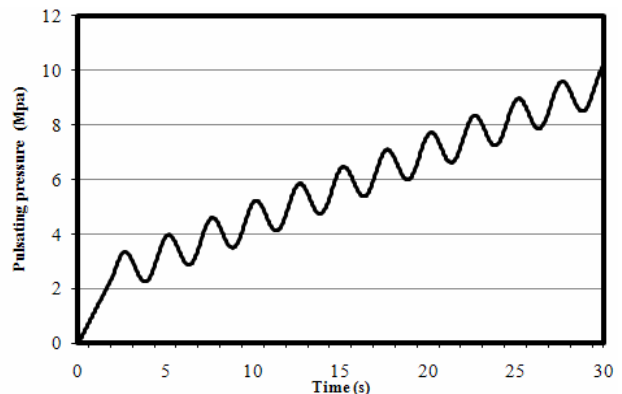
Error		Abaqus		بهینه سازی تبرید تدریجی (SA)		شماره تحلیل
H	T	H (mm)	T (mm)	H (mm)	T (mm)	
۰/۸۸	۰/۴۷	۴۰/۵۸	۲/۵۷	۴۰/۹۴	۲/۵۸	۱
۰/۷۱	۰/۱۹	۴۱/۳۳	۲/۵۷	۴۱/۶۲	۲/۵۸	۲
۱/۷۸	۰/۳۸	۴۱/۲۸	۲/۵۵	۴۲/۰۲	۲/۵۶	۳
۱/۵۳	۱/۱۵	۴۱/۰۶	۲/۵۴	۴۱/۶۹	۲/۵۶	۴
۰/۴۲	۰/۴۱	۴۱/۷۴	۲/۵۷	۴۱/۹۱	۲/۵۶	۵

جدول ۱۱- مقادیر بهینه متغیرهای بارگذاری برای طراحی مسیرهای بارگذاری

$P_{final}$	$\Delta p$	$T$	$S_{middle}$	$S_{final}$	$T_{middle}$	$CP_s$	$CP_f$	$T_{start}$	$T_{stop}$
۹/۵	۰/۷	۲/۵	۴۸	۶۴	۲۶	۵۶	۷۷	۵/۵	۲۱



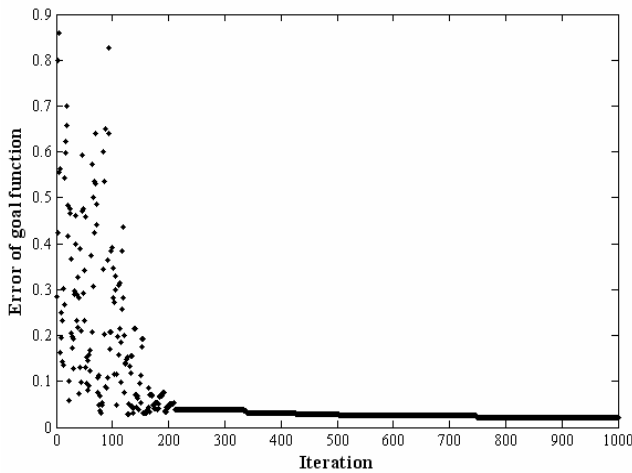
شکل ۲۱- مسیر بهینه جابه جایی پانچ محوری



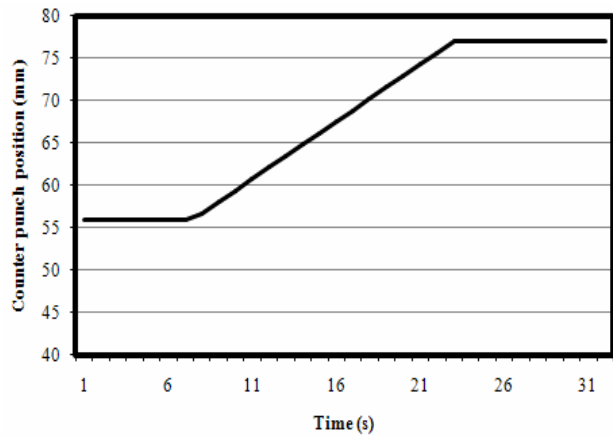
شکل ۲۰- مسیر بهینه تغییرات فشار داخلی

مطلوبی همگرا شده است که این فرایند در نمودار همگرایی الگوریتم مطابق شکل (۲۳) نشان داده شده است. بر طبق این نمودار مشاهده می شود که الگوریتم با سرعت نسبتاً مناسبی جواب بهینه را محاسبه می کند. مطابق نمودار جریانی ارائه شده

بارگذاری، در جدول (۱۱) نشان داده شده اند. برای هر یک از پارامترهای بارگذاری مسیرهای بارگذاری مطابق شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) ترسیم شده اند. با استفاده از الگوریتم فوق تابع هدف به سمت مقدار

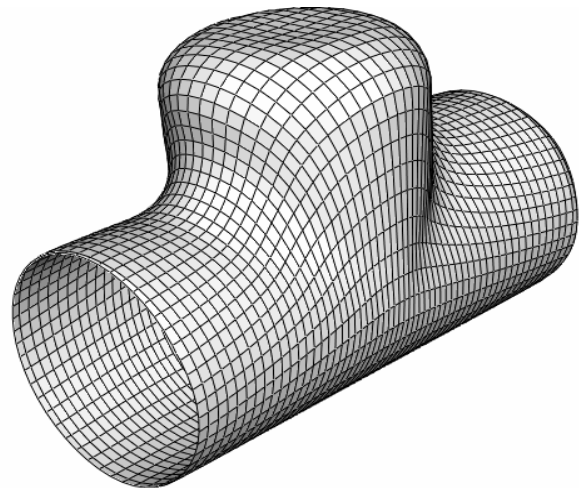


شکل ۲۳- منحنی همگرایی الگوریتم تبرید تدریجی



شکل ۲۲- مسیر بهینه جابه‌جایی پانچ متقابل

چروکیدگی رخ نخواهند داد که این مورد به وضوح در این شکل نشان داده شده است. از طرف دیگر برای نشان دادن تاثیر کیفی حاصل از اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه، نتایج به دست آمده با نمونه آزمایشگاهی مربوط به مطالعه هوانگ [۷] مقایسه شده است. با توجه به یکسان بودن نمونه آزمایشگاهی می‌توان مسیرهای بارگذاری دو نمونه را مقایسه نمود و از طرفی کیفیت اعمال دو مسیر بارگذاری خطی و نوسانی قابل بررسی است. مینیمم ضخامت در نمونه آزمایشگاهی برابر ۲/۲۴ میلی‌متر شد. از آنجایی که این مطالعه بر اساس شبیه‌سازی بنا شده است بنابراین نتایج این مطالعه با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نمونه هوانگ مقایسه شده است. ماکزیمم فشار در نمونه آزمایشگاهی برابر ۱۵ مگاپاسکال بوده است. در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی، علی‌رغم کاهش ۳۰٪ در ظرفیت فشار دستگاه، لوله با معیارهای مطلوبی شکل گرفته است و نازک‌شدگی لوله از ۱۴٪ به ۸٪ کاهش یافته است و به علاوه ارتفاع شاخه نیز در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی بهبود یافته است. برای مقایسه، تغییرات ضخامت در راستای خط مرکزی اتصال تولید شده در شکل (۲۵) نشان داده شده است. در این مقایسه تغییرات ضخامت در اتصال بهینه شده به همراه مدل تأیید شده مربوط به مطالعه هوانگ [۷] آورده شده است. در این شکل بهبود تغییرات ضخامت در ناحیه برآمده قابل مشاهده است. این در

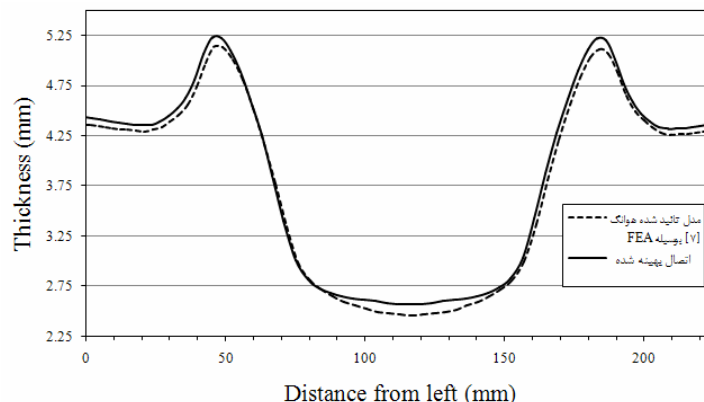


شکل ۲۴- لوله تغییر شکل یافته با اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه

برای الگوریتم تبرید تدریجی در شکل (۱۹)، این الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از یک روش تکراری<sup>۳</sup> به سمت جواب بهینه همگرا می‌شود و برای مسئله حاضر، بعد از ۷۵۰ تکرار، مقادیر مطلوب برای متغیرهای بارگذاری تعیین می‌شود. این نکته یکی از مزایای روش الگوریتم تبرید تدریجی است که در مقایسه با سایر الگوریتم‌های موجود مانند الگوریتم ژنتیک و یا الگوریتم فازی بسیار قابل توجه است.

لوله تغییر شکل یافته بر اساس مسیرهای بارگذاری بهینه در شکل (۲۴) نشان داده شده است. اگر دو معیار شکل‌پذیری به طور مناسب انتخاب شوند نواقص رایج مانند نازک‌شدگی و





شکل ۲۵- مقایسه تغییرات ضخامت خط مرکزی اتصال تولید شده برای نمونه بهینه و مدل تائید شده هوانگ [۷]

#### با تحلیل اجزای محدود [FEA]

مطالعه بینهایت مسیر بارگذاری را فراهم کرد. با اعمال این مدلها در الگوریتم تبرید تدریجی مسیرهای بارگذاری بهینه برای هر پارامتر به دست آمد. با استفاده از روش فوق نشان داده شد که می توان ظرفیت دستگاه را به طور قابل ملاحظه کاهش داد و این در حالی است که لوله با شرایط مطلوبتری شکل داده می شود. در مطالعه حاضر مشاهده شد که با کاهش ۳۰٪ ظرفیت فشار می توان لوله را با ضخامت مینیمم بهتر و ارتفاع شاخه بیشتر شکل داد. شاخص مقدار ضخامت مینیمم، مقدار نازک شدگی است که هر چه مقدار آن کمتر باشد برای طراح مطلوبتر است. در مطالعه حاضر مقدار نازک شدگی از ۱۴٪ در نمونه آزمایشگاهی به ۸٪ کاهش داده شد که با توجه به کاهش ظرفیت فشار و بهبود ارتفاع شاخه بسیار قابل توجه است.

حالی است که ظرفیت فشار دستگاه نیز به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

#### ۹- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از یک روش جدید بهینه سازی مسیرهای بارگذاری در فرایند هیدروفرمینگ نوسانی اتصالات T- شکل مطالعه شد. با استفاده از روش طراحی آزمایشها مهمترین مسیرهای بارگذاری برای پوشش بیشترین حالات ممکن موجود انتخاب شد و سپس با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود تاثیر هر مسیر بارگذاری مطالعه شد. با اعمال تحلیل رگرسیون مدل ریاضی مناسب برای هر متغیر خروجی بر حسب متغیرهای بارگذاری محاسبه شد که این امر امکان

#### واژه نامه

1. design of experimental (DOE)
2. bulging
3. iterative

#### مراجع

1. Koç, M., "Investigation of the Effect of Loading Path and Variation in Material Properties on Robustness of the tube Hydroforming Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, Issue 3, P. 276-281, 2003.
2. Heo, S. C., Kim, J., Kang, B. S., "Investigation on Determination of Loading Path to Enhance Formability in Tube Hydroforming Process Using APDL," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, Issues 1-3, P. 653-657, 2006.
3. Yingyot, A. U. L., Gracious, N., Taylan, A., "Optimizing Tube Hydroforming Using Process Simulation and Experimental Verification," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, Issue 1, P. 137-143, 2004.
4. Ray, P., Mac Donald, B. J., "Determination of the Optimal Load Path for Tube Hydroforming Processes Using a Fuzzy Load Control Algorithm and Finite

- Element Analysis,” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, Issue 2, P. 173-192, 2004.
5. Lin, F. C., Kwan, C. T., “Application of Abductive Network and FEM to Predict an Acceptable Product on T-shape Tube Hydroforming Process, ” *Computers & Structures*, Vol. 82, Issues 15-16, P. 1189-1200, 2004.
  6. Manabe, K., Suetake, M., Koyama, H., Yang, M., “Hydroforming Process Optimization of Aluminum Alloy Tube Using Intelligent Control Technique,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, Issue 11, P. 1207-1211, 2006.
  7. Hwang, Y.M., Lin, T.C., Chang, W.C., “Experiments on T-shape Hydroforming with Counter Punch,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192-193, P. 243-248, 2007.
  8. Kadkhodayan, M., Erfani-Moghadam, A., Heidari, M., “Loading Path Optimization of T-Shape Tube Hydroforming Process,” *Journal of Steel Research International*, Vol. 81, Issue 9, P. 524-528, 2010.
  9. Mori, K., Maeno, T., Maki, S., “Mechanism of Improvement of Formability in Pulsating Hydroforming of Tubes,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, Issue 6, P. 978-984, 2007.
  10. Loh-Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Bakhshi, M., “3-D Finite Element Simulation of Pulsating T-Shape Hydroforming of Tubes,” *Key Engineering Materials*, Vol. 340-341, P. 353-358, 2007.
  11. Montgomery Douglas, C., Runger, George C., “*Applied Statistics and Probability for Engineers*,” John Wiley & Sons, Inc. Third Edition, P. 457, 2003.
  12. Montgomery Douglas C., “*Introduction to Linear Regression Analysis*,” Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. P. 8-15, 1996.
  13. Metropolis, M.C., “*Simulated Annealing and I.E.T. Algorithm: Theory and Experiments*,” Lmens-96-21, 1996.
  14. Kirkpatrick, S., “Transportation Planning and Technology”, *Science*, Vol. 16, Issue 4, P. 261 – 273, 1992.