

## طراحی مسیرهای بهینه بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از روش طرح آزمایش ها و الگوریتم تبرید تدریجی

در مقاله حاضر، طراحی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات  $T$  شکل لوله مطالعه می‌شود. در ابتدا متغیرهای مربوطه برای طراحی مسیرهای بارگذاری انتخاب می‌گردند. با استفاده از طرح تاگوچی، ۳۲ مسیر بارگذاری برای هر یک از پارامترهای موجود طراحی می‌شود. نتایج حاصل از اعمال این مسیرهای بارگذاری بر روی لوله در فرآیند هیدروفرمینگ، با شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه می‌گردد و با انجام تحلیل واریانس بر روی جدول تاگوچی، تغییر شکل لوله بر اساس متغیرهای بارگذاری به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌شود. در ادامه با اعمال مدل‌های ریاضی بدست آمده در الگوریتم تبرید تدریجی، مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرهای بارگذاری تعیین می‌گردند و بر اساس این مقادیر بهینه، مسیرهای بارگذاری طراحی می‌شوند. کارایی این روش برای طراحی مسیرهای بهینه بارگذاری بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی می‌گردد.

مهران کدخدایان<sup>۱</sup>

استاد

احمد عرفانی مقدم<sup>۲</sup>

کارشناس ارشد

مهدی حیدری<sup>۳</sup>

کارشناس ارشد

واژه‌های راهنما: هیدروفرمینگ، مسیرهای بارگذاری، رگرسیون، تحلیل واریانس، الگوریتم تبرید تدریجی

### ۱- مقدمه

با توجه به دغدغه امروزی بشر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و همچنین ذخیره انرژی، نیاز برای تولید وسایل نقلیه با بازدهی بیشتر و مصرف سوخت کمتر بیش از پیش احساس می‌شود [۱]. مطالعات نشان می‌دهد که ۱۰٪ کاهش وزن یک خودروی متوسط، موجب بهبود ۶ تا ۸ درصد در مصرف سوخت می‌گردد [۲]. مقاومت خمشی قطعات توخالی بیشتر از قطعات توپر است و به واسطه وزن کمتر این قطعات در مقایسه با قطعات توپر، استفاده از این قطعات در صنایع مختلف از جمله خودروسازی افزایش یافته است. هیدروفرمینگ یکی از روش‌های تولید قطعات توخالی است که در سال‌های اخیر استفاده از این روش برای تولید قطعات مختلف به شدت رایج شده است. تولید قطعات اتومبیل به روش هیدروفرمینگ مزایای عمده‌ای نسبت به سایر روش‌های تجاری دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش وزن قطعات تولید شده، بهبود مقاومت محصول نهایی، یکپارچگی و یکنواختی، دقت ابعادی بهتر و کاهش هزینه قطعه تولید شده اشاره

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد [kadkhoda@um.ac.ir](mailto:kadkhoda@um.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

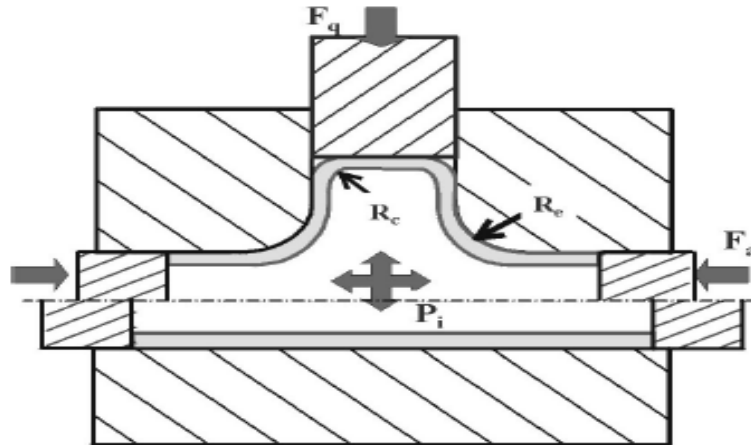
نمود [۱]. در این روش قطعه مورد نظر با استفاده از فشار داخلی و نیروی محوری در داخل قالب شکل داده می‌شود و اخیراً از یک سنبه متقابل نیز برای کنترل رفتار سطح لوله در ناحیه آزاد تغییر شکل، استفاده می‌گردد. در فرآیند هیدروفرمینگ، چگونگی تغییر فشار داخلی، جابجایی سنبه‌های محوری و سنبه متقابل بر حسب زمان به مسیر بارگذاری تعبیر می‌شود. با اعمال نامناسب مسیر بارگذاری در طول فرآیند، احتمال بروز نواقصی همانند نازک‌شدگی، پارگی و همچنین چروکیدگی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. لذا، محققان بسیاری بر روی بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در این فرآیند مطالعه نموده‌اند. ریمکوس و همکاران [۳] طراحی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ را مطالعه نمود. ایشان منحنی فشار را به سه قسمت فشار تسلیم، فشار انبساط و فشار نهایی تقسیم نمودند و سپس بر مبنای فشار بر حسب جابجایی سنبه محوری، مقادیر بهینه را تعیین نمودند. روابطی که توسط ایشان استفاده شد بسیار ساده و در حد حدس اولیه بود. فآن و همکاران [۴] با استفاده از ترکیب روش گرادیان با روش اجزای محدود، بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری را بررسی کردند. در این مطالعه نویسندگان با در نظر گرفتن مسیر فشار ساده و محدود به تعداد متغیرهای کم، مسیر بهینه را پیشنهاد نمودند. ایمانی‌نژاد و همکاران [۵] با استفاده از کدهای آماده در نرم‌افزارهای تجاری به بهینه‌سازی مسیر بارگذاری پرداختند. ایشان در این مطالعه با ارائه چند مسیر مختلف، مسیر بهینه را بر اساس بهترین نتایج از نظر ضخامت و ارتفاع شاخه انتخاب نمودند. در ادامه، هیو و همکاران [۶] با استفاده از رویکرد مشابه مقاله قبل، مسیرهای بهینه را محاسبه نمودند. آیدمیر و همکاران [۷] و شوه‌ای و همکاران [۸] با ترکیب روش اجزا محدود و روش فازی و با استفاده از روش بهینه‌سازی تدریجی مسیرهای بهینه را برای پارامترهای بارگذاری تعیین نمودند. در اکثر مطالعات انجام شده روابط تحلیلی برای معیارهای شکل‌پذیری بر حسب متغیرهای بارگذاری وجود ندارد، بنابراین ارائه یک روش بهینه‌سازی برای تعیین مسیرهای بارگذاری بهینه با محدودیت‌های زیادی روبرو می‌باشد. لذا، اکثر مطالعات انجام شده به گونه‌ای است که برای فشار داخلی و جابجایی سنبه محوری مسیرهایی به دلخواه پیشنهاد و سپس با مقایسه نتایج مسیر بهینه تعیین می‌گردد.

در مطالعه حاضر با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، مسیرهای بارگذاری طراحی می‌شود و نتایج حاصل از اعمال مسیرهای بارگذاری بر روی تغییر شکل لوله به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود محاسبه می‌گردد. مدل‌های ریاضی مطلوب برای تخمین تغییر شکل، با استفاده از تحلیل رگرسیون در نرم‌افزارهای آماری تعیین می‌شوند و در ادامه به منظور طراحی مسیرهای بارگذاری بهینه، از الگوریتم تبرید تدریجی استفاده می‌شود.

## ۲- معرفی فرآیند

در فرآیند هیدروفرمینگ، لوله در داخل قالب دلخواه با اعمال همزمان فشار داخلی و نیروی محوری شکل داده می‌شود. شماتیک این فرآیند برای تولید اتصالات T، در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از نازک‌شدگی حاصل از اعمال فشار داخلی، از دو سنبه محوری برای هدایت جریان فلز به داخل قالب استفاده می‌شود و به همین ترتیب از سنبه متقابل برای کنترل رفتار تغییر شکل لوله در ناحیه آزاد قالب استفاده می‌گردد. با توجه به همزمانی اعمال پارامترهای بارگذاری در این فرآیند، تنظیم مناسب این

پارامترها امری ضروری است. طراحی بهینه مسیرهای بارگذاری، مستلزم شناخت دقیق پارامترهای بارگذاری می‌باشد که در ادامه بررسی می‌گردد.

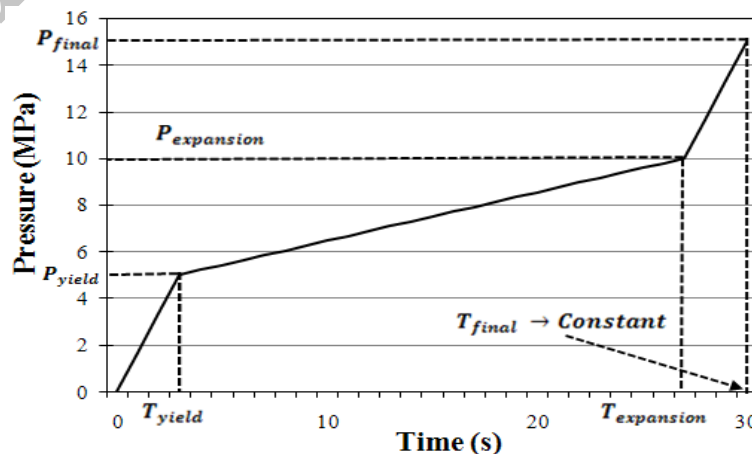


شکل ۱- شماتیک فرآیند هیدروفورمینگ برای تولید اتصالات T [۲]

### ۳- پارامترهای بارگذاری

#### ۳-۱- فشار داخلی

مقدار فشار داخلی سیال تاثیر ویژه ای بر روی تغییر شکل لوله دارد و در عین حال پارامتر کلیدی برای تعیین ظرفیت دستگاه می‌باشد. تاثیر این پارامتر توسط محققان بسیاری مطالعه شده است و هر یک از این محققان مسیرهای مختلفی را برای اعمال فشار پیشنهاد نموده اند. به طور کلی رایج‌ترین منحنی فشار، منحنی سه مرحله‌ای است که بر اساس فشار تسلیم، فشار انبساط و فشار نهایی طراحی می‌گردد. در اینجا فشار لازم برای به حد نهایی رسیدن تغییر شکل فشار انبساط و فشار نهایی همان فشار کالیبراسیون است. محققان بسیاری بهبود شکل‌پذیری لوله را بواسطه اعمال این منحنی در مقایسه با منحنی‌های دیگر نشان داده اند. چروت و همکاران [۹] و هوانگ و همکاران [۱۰] با اعمال این منحنی کلی برای فشار، فرآیند هیدروفورمینگ را مطالعه نمودند. شمای کلی منحنی فشار سه مرحله‌ای مطابق شکل (۲) می‌باشد. بر اساس این منحنی، پنج متغیر برای طراحی مسیر فشار انتخاب گردیده است که در جدول (۱) معرفی شده‌اند.



شکل ۲- منحنی کلی فشار برای تعیین متغیرهای بارگذاری

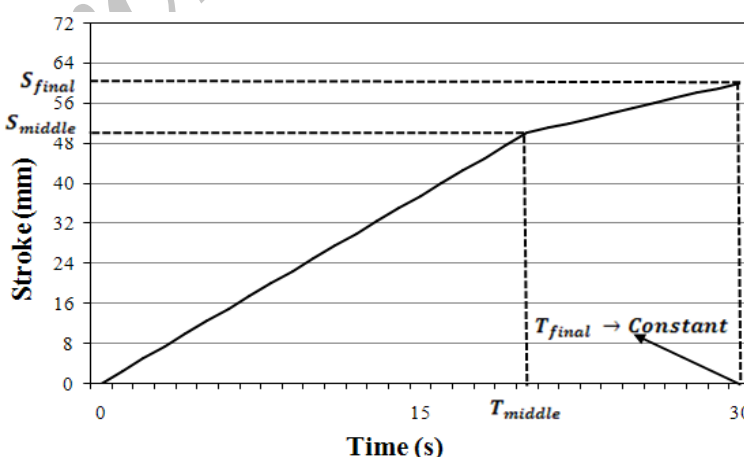
جدول ۱- متغیرهای بارگذاری مربوط به فشار

شماره	فاکتور	واحد	نماد
۱	فشار تسلیم	MPa	$P_{yield}$
۲	فشار انبساط	MPa	$P_{expansion}$
۳	فشار نهایی	MPa	$P_{final}$
۴	زمان تسلیم	s	$T_{yield}$
۵	زمان انتهای انبساط	s	$T_{expansion}$

شبه‌سازی‌های انجام شده توسط نگارندگان مقاله نشان داد که برای مسئله حاضر بهترین مقدار برای فشار تسلیم ۲.۵ مگاپاسکال می‌باشد و به همین دلیل در طراحی بعدی مسیرهای بارگذاری مقدار آن ثابت در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- جابجایی سنبه‌های محوری

به منظور جلوگیری از نازک‌شدگی لوله در فضای باز قالب از دو سنبه محوری برای هدایت جریان فلز به داخل قالب استفاده می‌گردد. با توجه به تقارن موجود در تغییر شکل، منحنی جابجایی دو سنبه محوری مشابه یکدیگر می‌باشند و بنابراین یک منحنی برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود. معمولاً یک منحنی با جابجایی دو مرحله‌ای برای این پارامتر انتخاب می‌شود. این منحنی بوسیله محققان بسیاری پیشنهاد شده است. لانگ و همکاران [۱۱]، ری و مک‌دونالد [۱۲] و دیگران این منحنی را به عنوان مرجع برای سنبه محوری استفاده نموده‌اند. نمای کلی این منحنی در شکل (۳) نشان داده شده است و متغیرهای مربوط به این پارامتر مطابق شکل در جدول (۲) مشاهده می‌گردد.



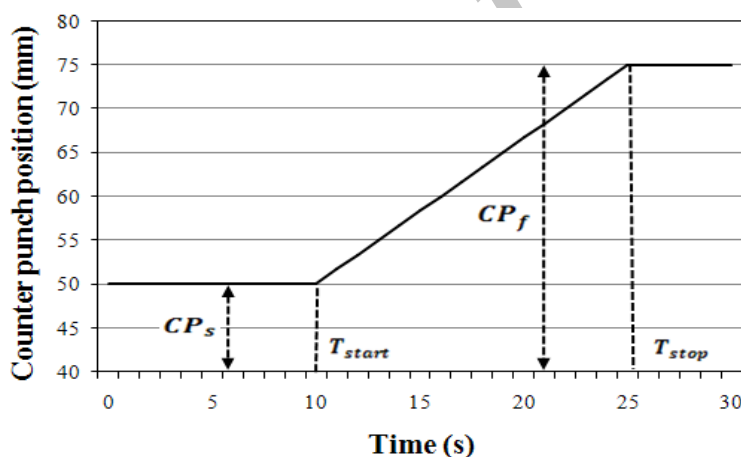
شکل ۳- منحنی عمومی جابجایی سنبه محوری

جدول ۲- متغیرهای مربوط به طراحی مسیر جابجایی سنبه محوری

شماره	فاکتور	واحد	نماد
۱	جابجایی میانی سنبه محوری	mm	$S_{middle}$
۲	جابجایی نهایی سنبه محوری	mm	$S_{final}$
۳	زمان جابجایی میانی سنبه محوری	s	$T_{middle}$

## ۳-۳- منحنی جابجایی سنبه متقابل

اخیرا استفاده از سنبه متقابل برای کنترل رفتار تغییر شکل لوله در ناحیه آزاد قالب رایج شده است. این پارامتر توسط بویدیا و همکاران [۱۳] و چنگ و همکاران [۱۴] برای هیدروفورمینگ اتصالات استفاده شده است. مسیر تغییر این پارامتر در مجموع چهار متغیر را شامل می‌شود که به ترتیب، موقعیت های اولیه و نهایی سنبه و زمان شروع و توقف سنبه متقابل می‌باشند. در این مطالعه به منظور طراحی دقیق این مسیر، دو متغیر موقعیت اولیه سنبه و موقعیت نهایی سنبه به منظور تخمین جابجایی سنبه در نظر گرفته شده است. این مسیر در شکل (۴) قابل مشاهده است و متغیرهای مربوط به آن در جدول (۳) آورده شده اند.



شکل ۴- مسیر جابجایی سنبه متقابل

جدول ۳- متغیرهای طراحی مسیر جابجایی سنبه متقابل

شماره	فاکتور	واحد	نماد
۱	موقعیت اولیه سنبه متقابل	mm	$CP_{first\ place}$
۲	موقعیت نهایی سنبه متقابل	mm	$CP_{final\ place}$
۳	زمان شروع حرکت سنبه متقابل	s	$T_{start}$
۴	زمان توقف سنبه متقابل	s	$T_{stop}$

#### ۴- طراحی آزمایش ها

با توجه به موارد گفته شده برای مسیرهای بارگذاری و به منظور طراحی دقیق این منحنی‌ها لازم است تا ۱۱ متغیر تعیین گردند تا بتوان بر اساس آنها مسیرهای بارگذاری را طراحی نمود. در این مطالعه به منظور طراحی این مسیرهای بارگذاری از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup> (DOE)، به معنی تعیین تعداد آزمایش‌ها و متغیرهای مورد بررسی در هر آزمایش از طریق مطالعه و بررسی توأم چندین متغیر فرآیند می‌باشد. به بیان ساده‌تر انجام آزمایش‌های کامل برای دستیابی به کنترل همه جانبه فرآیند، انجام بینهایت آزمایش را می‌طلبد و اگر برای کاهش تعداد آزمایش‌ها فقط چند سطح از هر متغیر مورد بررسی قرار گیرد، تعداد آزمایش‌ها با افزایش تعداد متغیرها بصورت نمایی افزایش می‌یابد که این تعداد آزمایش نیز توجیه پذیر نیست. بنابراین یکی از اهداف اصلی طراحی آزمایش‌ها انتخاب مهم‌ترین حالات آزمایشی است که با استفاده از آن بتوان فرآیند را به بهترین نحو بررسی کرد و در عین حال تعداد آزمایشها توجیه پذیر باشد. به عنوان نمونه برای مسئله فوق با وجود ۱۱ متغیر بارگذاری، اگر برای هر متغیر تنها دو سطح مینیمم و ماکزیمم تعیین شود آنگاه تعداد<sup>۱۱</sup> ۲ مسیر بارگذاری طراحی می‌شود که اعمال این تعداد مسیر بارگذاری بر روی فرآیند امری غیر ممکن می‌باشد. بنابراین ابتدا باید بر اساس طرح‌های موجود در این روش تعداد مناسب آزمایش‌ها را طراحی و سپس تحلیل مربوطه را انجام داد. به طور کلی در این روش سه طرح عمومی وجود دارد که به ترتیب عبارتند از [۱۵]:

۱. طرح فول فاکتوریل<sup>۲</sup>

۲. طرح مرکب مرکزی<sup>۳</sup>

۳. طرح تاگوچی<sup>۴</sup>

طرح فول فاکتوریل یک طرح بسیار جزیی است و معمولا برای مطالعه بسیار دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد و زمانی استفاده از آن پیشنهاد می‌شود که تعداد متغیرها محدود باشد [۱۵]. بنابراین در مطالعه حاضر با وجود ۱۱ متغیر ورودی طرح مناسبی برای طراحی آزمایش‌ها نمی‌باشد. طرح مرکب مرکزی از حالات محدود شده طرح فول فاکتوریل می‌باشد و تعداد آزمایش‌های آن در مقایسه با طرح کامل کاهش یافته است [۱۵]. در اینجا با توجه به تعداد بالای آزمایش‌ها، طرح مطلوبی نمی‌باشد. طرح تاگوچی به طور کلی با دو روش فوق متفاوت است و با توجه به کاربرد فراوان این طرح در آزمایش‌های مختلف و با توجه به نوع مسئله فعلی به عنوان طرح مناسب برای این مطالعه انتخاب شده است.

طرح تاگوچی مطابق با رابطه (۱) بیان می‌شود. در این رابطه  $L$  نماد طرح تاگوچی،  $N$  تعداد آزمایش‌ها،  $n$  تعداد سطوح متغیر و  $k$  تعداد متغیرهای ورودی فرآیند می‌باشد.

$$L_N(n^k) \quad (1)$$

<sup>1</sup> Design of Experiments

<sup>2</sup> Full factorial design

<sup>3</sup> Central composite design

<sup>4</sup> Taguchi design

مطابق با موارد ذکر شده ابتدا باید متغیرهای مربوطه تعیین شوند. با توجه به ماهیت مسئله برای هر متغیر دو سطح مینیمم و ماکزیمم در نظر گرفته شده است. این محدوده‌ها بر اساس تجربه و نمونه آزمایشگاهی موجود [۱۰] و انجام شبیه سازی‌های اجزای محدود محاسبه شده‌اند و در جدول (۴) مقادیر مربوط به این بازه‌ها آورده شده است. با توجه به بیشترین تعداد آزمایش‌ها در این طرح (مقدار N)، ۳۲ آزمایش انتخاب می‌گردد. بنابراین طرح تاگوچی برای این آزمایش به صورت  $L_{32}(2^{11})$  می‌باشد. جدول این طرح مطابق با جدول (۵) است که بر اساس بخش طراحی آزمایش‌ها در نرم‌افزار Minitab محاسبه شده است.

جدول ۴- محدوده مینیمم و ماکزیمم مربوط به متغیرهای بارگذاری

شماره	نماد	حداقل (-)	حداکثر (+)
۱	$P_{\text{expn}}$	7.5	12.5
۲	$P_{\text{final}}$	12.5	17.5
۳	$T_{\text{yield}}$	2	4
۴	$T_{\text{expn}}$	20	27
۵	$S_{\text{middle}}$	50	60
۶	$S_{\text{final}}$	60	64
۷	$T_{\text{middle}}$	20	27
۸	$CP_s$	50	56
۹	$CP_f$	75	81
۱۰	$T_{\text{start}}$	10	20
۱۱	$T_{\text{stop}}$	20	30

بر اساس این جدول امکان طراحی مسیرهای بارگذاری فراهم می‌شود. برای هر یک از پارامترهای بارگذاری، چهار مسیر بارگذاری به عنوان نمونه ترسیم شده‌اند که چهار منحنی فشار مربوط به چهار آزمایش دلخواه مطابق شکل (۵) می‌باشد. به همین ترتیب چهار منحنی مربوط به سنبه محوری و سنبه متقابل به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) ترسیم شده‌اند.

## ۵- انجام آزمایش‌ها

### ۵-۱- تایید نمونه شبیه‌سازی

در این مطالعه از روش شبیه‌سازی اجزا محدود برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. به منظور تایید شبیه‌سازی انجام شده نتایج بدست آمده با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی مشابه مقایسه می‌گردند. لذا، در اینجا ابتدا مدلی که توسط هوانگ [۱۰] مورد آزمایش قرار گرفته است، شبیه‌سازی می‌گردد. نمونه آزمایشگاهی هوانگ، مطابق شکل (۸) می‌باشد. در این شکل علاوه بر ابعاد قطعات آزمایشگاهی، چگونگی اعمال پارامترهای بارگذاری نیز قابل مشاهده است. نمونه مورد نظر مطابق با شکل (۹) شبیه‌سازی گردید و

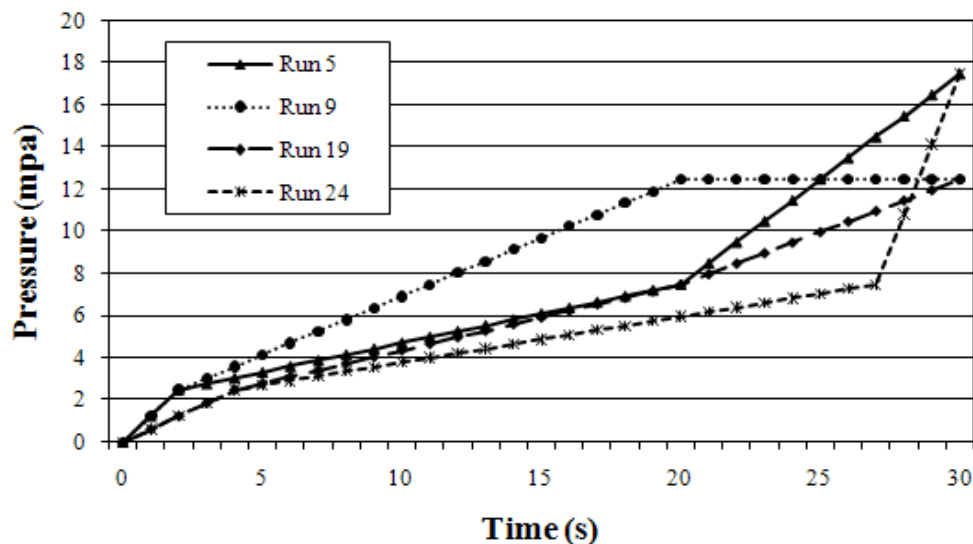
برای وضوح بیشتر نصف مدل کامل نشان داده شده است. همانند نمونه آزمایشگاهی، لوله ای با طول ۲۹۸.۵ میلی‌متر و قطر ۷۲ میلی‌متر و ضخامت ۲.۸ میلی‌متر مطابق با شکل (۹) مدل‌سازی گردید و سایر اجزا همانند سنبه‌های محوری و متقابل به صورت جداگانه طراحی و با یکدیگر مونتاژ شدند. در ایجا از لوله AA6063-T5 بهره گرفته شده است که خواص آن بر اساس مرجع [۱۰] و به صورت جدول (۶) می‌باشد، به علاوه برای لوله، ناهمسانگردی نیز در نظر گرفته شده است.

جدول ۵- جدول طرح تاگوچی برای طراحی مسیرهای بارگذاری

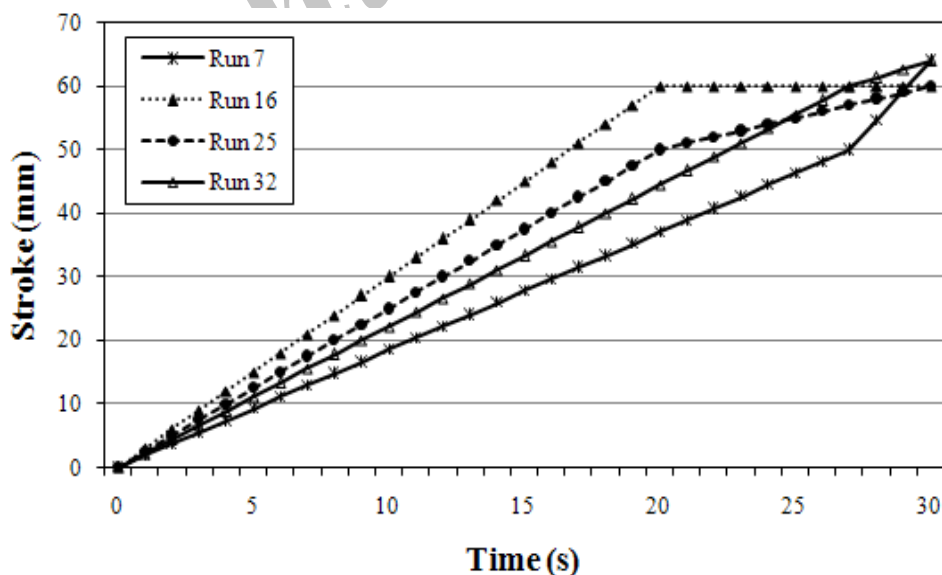
No	P <sub>expan</sub>	P <sub>final</sub>	T <sub>yield</sub>	T <sub>expan</sub>	S <sub>middle</sub>	S <sub>final</sub>	T <sub>middle</sub>	CP <sub>s</sub>	CP <sub>f</sub>	T <sub>start</sub>	T <sub>stop</sub>
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+
3	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
4	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
5	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+
6	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-
7	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+
8	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	-
9	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-
10	-	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+
11	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
12	-	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+
13	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	+
14	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-
15	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+
16	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-
17	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+
18	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-
19	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+
20	+	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-
21	+	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-
22	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
23	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-
24	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+
25	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	+
26	+	+	-	-	+	-	-	+	+	+	-
27	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+
28	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-
29	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
30	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+
31	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-
32	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+



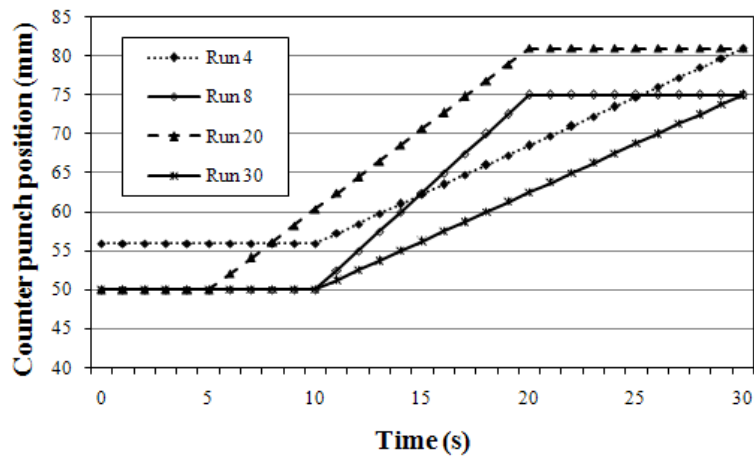
با اعمال مسیرهای بارگذاری بر روی نمونه، شبیه‌سازی اجزا محدود انجام گردید. پس از حل مسئله، منحنی توزیع ضخامت تار میانی استخراج گردید که مطابق شکل (۱۰) می باشد. همانگونه که از این شکل مشاهده می‌گردد مقدار مینیمم ضخامت برابر ۲.۴۱۴ میلی‌متر است که اختلاف اندکی با نمونه آزمایشگاهی دارد. از مقایسه دو نمودار مشخص گردید که اختلاف این دو منحنی در حدود کمتر از ۰.۵٪ است که این مقدار خطا درستی نمونه شبیه‌سازی با Abaqus/Explicit را نشان می‌دهد.



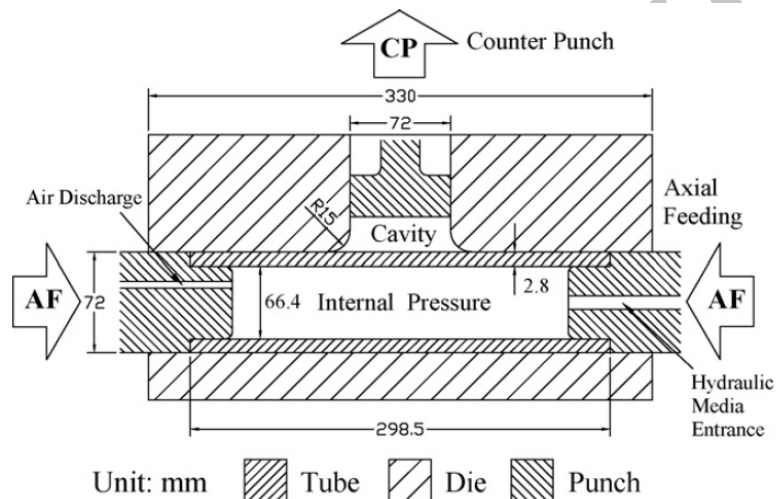
شکل ۵- چهار منحنی تغییرات فشار داخلی بر اساس طرح تاگوچی



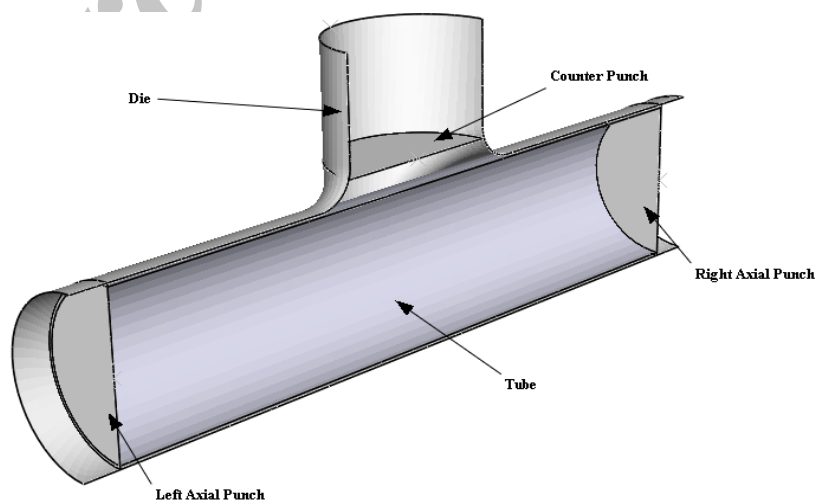
شکل ۶- منحنی‌های ترسیم شده برای سنبه محوری



شکل ۷- چهار منحنی جابجایی سنبه متقابل



شکل ۸- مدل شبیه‌سازی شده مطابق با نمونه آزمایشگاهی [۱۰]

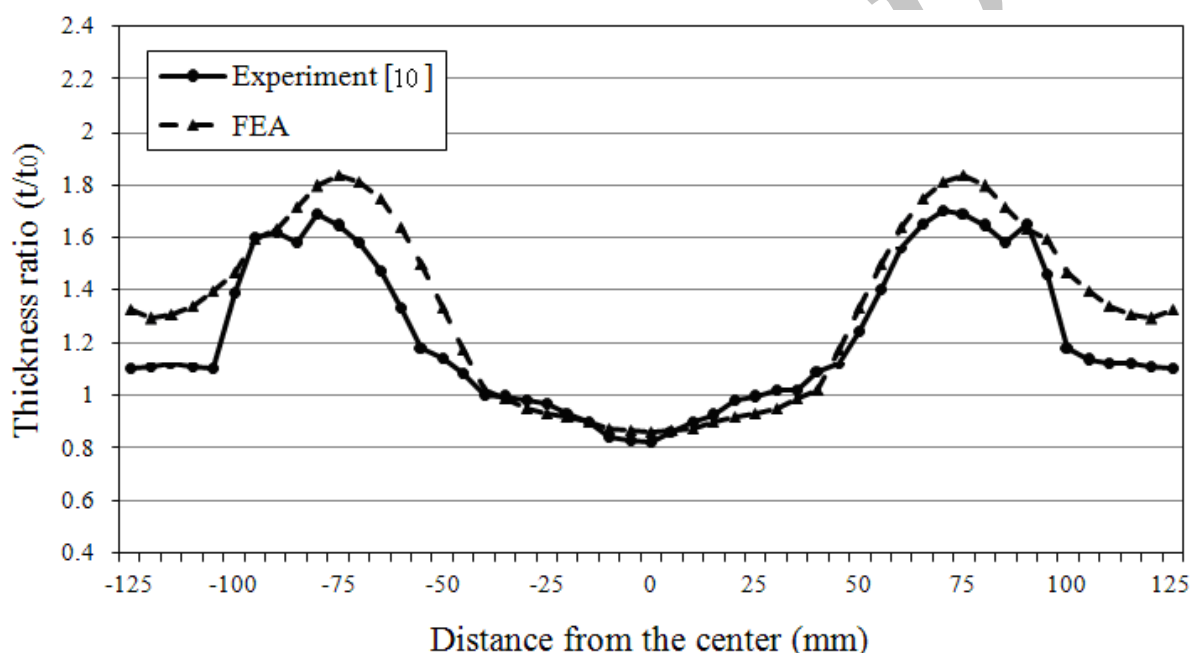


شکل ۹- نصف مدل شبیه‌سازی شده

## جدول ۶- خواص لوله AA6063-T5

مطابق با نمونه آزمایشگاهی [۱۰]

مقدار	فاکتور
60	مدول یانگ E (GPa)
0.35	نسبت پواسون ( $\nu$ )
55	تنش تسلیم ( $\sigma_y$ )
181.09	ضریب مقاومت K (MPa)
0.318	توان کرنش سختی
0.5225	ناهمسانگردی



شکل ۱۰- منحنی ضخامت تار میانی بدست آمده از شبیه سازی در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی

## ۵-۲- معیارهای شکل پذیری لوله و انجام آزمایشها

به طور کلی پارامترهای مختلفی برای تعیین کیفیت لوله در نظر گرفته می شوند و مهمترین این پارامترها شامل ضخامت مینیمم و ارتفاع ماکزیمم می باشد که به عنوان معیارهای شکل پذیری لوله توسط محققان بسیاری استفاده می گردند. بنابراین بعد از تایید نمونه شبیه سازی، آزمایشهای طراحی شده بر اساس طرح تاگوچی شبیه سازی می شوند. در ابتدا برای هر آزمایش مسیرهای بارگذاری مربوطه طراحی می شود و با انجام شبیه سازی دو معیار شکل پذیری، ضخامت مینیمم و ارتفاع ماکزیمم شاخه محاسبه می گردند که نتایج مربوط به این آزمایشها مطابق جدول (۷) می باشد.

## جدول ۷- نتایج حاصل از انجام آزمایش ها

No	P <sub>expan</sub>	P <sub>final</sub>	T <sub>yield</sub>	T <sub>expan</sub>	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>	T (mm)	H (mm)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.51	38.23
2	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	2.47	36.36
3	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-	-	2.56	41.05
4	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	2.46	40.07
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
29	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	2.40	38.86
30	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	2.22	35.49
31	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	2.41	42.15
32	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.35	42.34

## ۶- تحلیل واریانس

بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری زمانی امکان‌پذیر است که بتوان شکل‌پذیری لوله را بر اساس متغیرهای بارگذاری تخمین زد. بدین منظور با انجام تحلیل آماری می‌توان ارتباط ریاضی میان متغیرهای ورودی و خروجی را محاسبه نمود. در ادامه برای هر یک از معیارهای شکل‌پذیری رابطه ریاضی مناسب محاسبه می‌گردد.

## ۶-۱- مدل‌سازی

تحلیل رگرسیون، امکان ارتباط ریاضی میان متغیرهای وابسته و مستقل را فراهم می‌کند. در مطالعه فعلی از این تحلیل برای مدل‌سازی معیار شکل‌پذیری بر حسب متغیرهای بارگذاری استفاده شده است. با استفاده از تحلیل رگرسیون در نرم‌افزار آماری Minitab معیارهای شکل‌پذیری بوسیله دو مدل خطی و تصحیح شده تقریب زده شده است. لازم به ذکر است که مدل تصحیح‌شده، بر مبنای حذف متغیرهای کم‌اثر محاسبه می‌گردد.

## مدل رگرسیون خطی کامل

$$\text{Thickness} = 3.89 - 0.00341 P_{\text{expan}} - 0.0244 P_{\text{final}} - 0.0219 T_{\text{yield}} - 0.00087 T_{\text{expan}} - 0.00544 S_{\text{middle}} + 0.0122 S_{\text{final}} + 0.00019 T_{\text{middle}} + 0.00671 CP_s - 0.0244 CP_f + 0.00742 T_{\text{start}} + 0.00213 T_{\text{stop}} \quad (2)$$

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

## • مدل رگرسیون خطی تصحیح شده

$$\text{Thickness} = 3.895 - 0.0244 P_{\text{final}} - 0.0219 T_{\text{yield}} - 0.0054 S_{\text{middle}} + \quad (4)$$

$$0.0122 S_{\text{final}} + 0.0067 CP_s - 0.0244 CP_f + 0.0074 T_{\text{start}}$$

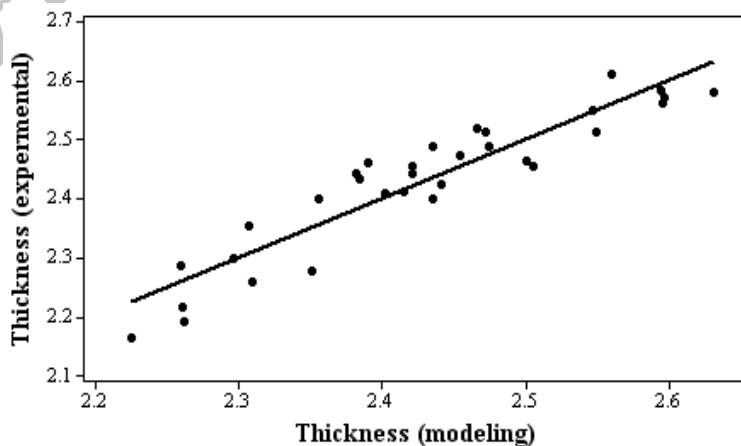
$$\text{Height} = -12.14 + 0.387 P_{\text{expan}} + 0.231 P_{\text{final}} - 0.33 T_{\text{yield}} - 0.158 T_{\text{expan}} - 0.183 S_{\text{middle}} + 0.513 S_{\text{final}} + 0.342 T_{\text{middle}} + 0.310 CP_f - 0.190 T_{\text{start}} - 0.131 T_{\text{stop}} \quad (5)$$

## ۶-۲- صحنه‌گذاری

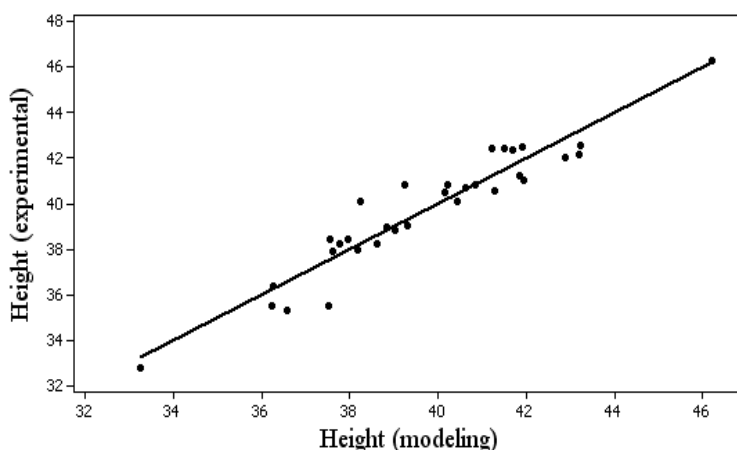
در این قسمت به منظور ایجاد برآزش از مدل‌های ریاضی رگرسیونی استفاده می‌گردد. معیار مقایسه این مدل‌ها از لحاظ آماری ضریب همبستگی آن‌ها می‌باشد. ضریب همبستگی در واقع نشان‌دهنده وابستگی و نزدیکی نقاط به دست آمده از آزمایش‌ها با چند جمله‌ای ریاضی بوجود آمده است. هرچه مقدار وابستگی متغیرهای خروجی به متغیرهای ورودی بیشتر باشد ضریب همبستگی تابع به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر می‌شود. لذا در این‌جا به منظور مقایسه مدل خطی و مدل تصحیح شده ضریب همبستگی آن‌ها به صورت جدول (۸) آورده شد. با توجه به جدول (۸) ضرایب همبستگی معادلات (بالتر از ۰.۸۵) نشان از ارتباط مناسب ورودی-ها و پارامترهای خروجی دارد. با انجام آزمایش‌های آماری بر حسب متغیرهای بارگذاری دلخواه، مدل خطی به عنوان مدل خطی انتخاب شده است. پس از انتخاب مدل خطی کامل نمودار پراکنش داده‌ها حول خط رگرسیون برای هر دو خروجی ضخامت و ارتفاع محاسبه شده‌اند. شکل (۱۱) پراکنش ضخامت و شکل (۱۲) پراکنش ارتفاع را نشان می‌دهد. در این دو شکل خط ترسیم شده، بهترین خط برای تخمین تابع بر اساس نتایج آزمایشگاهی است و هرچه تراکم نقاط حول خط بیشتر باشد مدل دقیق‌تر است. این امر برای مدل خطی مربوط به ارتفاع صادق است و ضریب همبستگی مربوط به آن بهتر از ضریب همبستگی مربوط به ضخامت است.

جدول ۸- ضرایب همبستگی مربوط به دو معادله

مدل رگرسیون	Thickness	Height
مدل خطی	86.7%	90.60%
مدل تصحیح شده	85.29%	90.10%

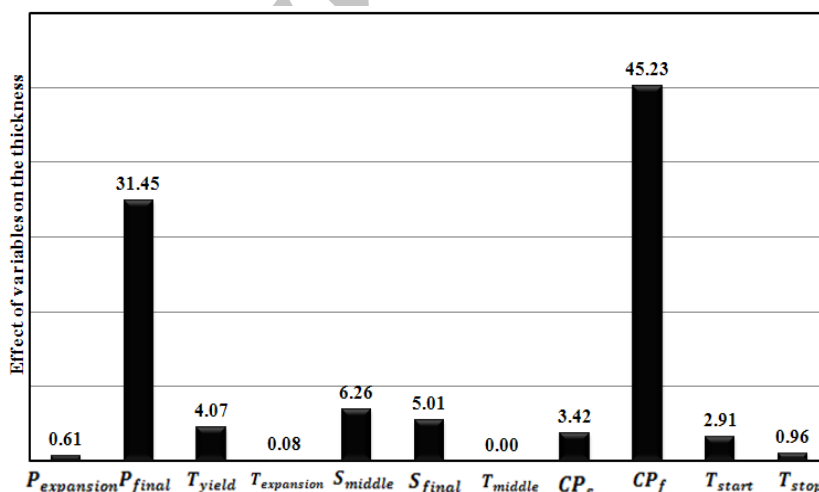


شکل ۱۱- پراکنش داده‌ها در ضخامت نهایی لوله

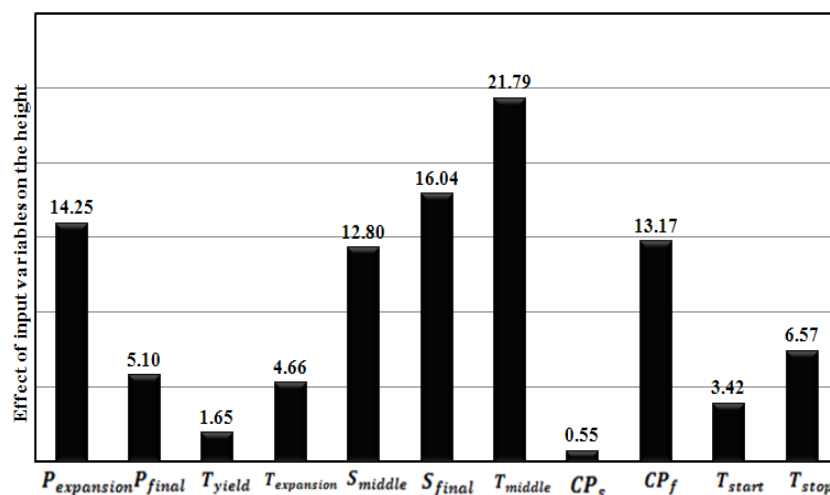


شکل ۱۲- پراکندگی داده‌ها در ارتفاع شاخه تولید شده

تحلیل واریانس امکان مطالعه میزان تاثیرگذاری پارامترهای ورودی بر روی پارامترهای خروجی را نیز فراهم می‌کند. در شکل (۱۳) میزان تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ضخامت محاسبه شده است و درصد تاثیر هر یک از پارامترها بر روی شکل‌پذیری متناسب با هر متغیر تعیین گردیده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود دو پارامتر فشار نهایی و موقعیت نهایی سنبه متقابل تاثیر شاخصی بر روی ضخامت مینیمم دارند. به همین ترتیب درصد تاثیرگذاری هر یک از متغیرهای بارگذاری بر روی ارتفاع شاخه نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بر اساس این دو شکل می‌توان متغیرهای با تاثیر کم را از مطالعه حذف نمود و مسیرهای بارگذاری را با دقت بیشتری طراحی کرد.

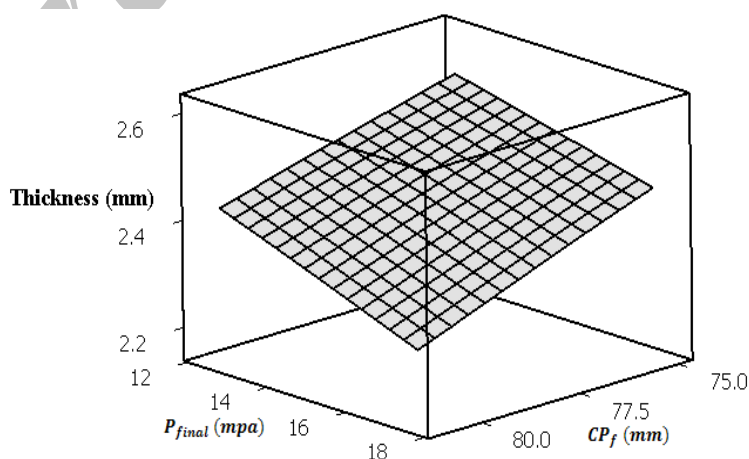


شکل ۱۳- درصد تاثیر گذاری پارامترهای ورودی بر روی مینیمم ضخامت لوله

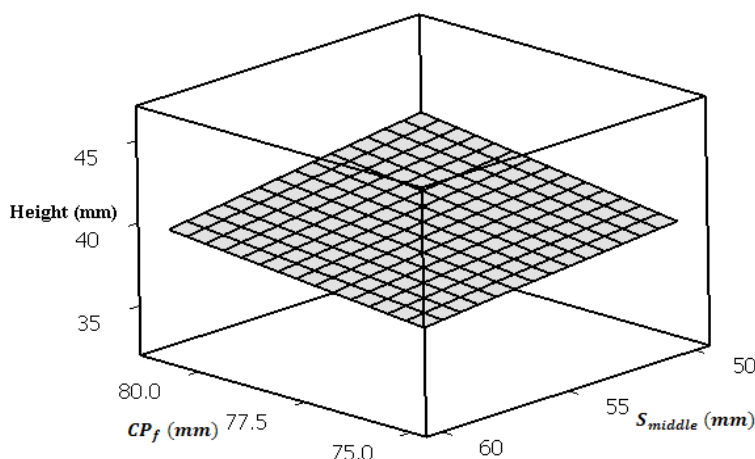


شکل ۱۴- درصد تاثیر گذاری پارامترهای ورودی بر روی ارتفاع شاخه ماکزیمم نهایی

در ادامه پارامترهایی که بر روی خروجی بیشترین تاثیر را داشتند به صورت دو به دو تحلیل شدند. شکل (۱۵) نشان دهنده توزیع ضخامت بر اساس دو متغیر موثر می باشد که تاثیر همزمان تغییر فشار نهایی و موقعیت توقف سنبه متقابل را بر روی ضخامت نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد با افزایش همزمان فشار نهایی و موقعیت نهایی سنبه متقابل مقدار ضخامت کاهش می یابد. به همین ترتیب می توان تاثیر متقابل سایر پارامترها را با یکدیگر بر روی ضخامت مطالعه نمود که در این جا از ذکر آن ها خودداری شده است. تحلیل مشابهی نیز برای ماکزیمم ارتفاع انجام گرفته است. شکل (۱۶) تاثیر متقابل موقعیت نهایی سنبه متقابل و جابجایی اولیه سنبه محوری بر روی ارتفاع شاخه را نشان می دهد. ملاحظه می گردد که کاهش جابجایی میانی سنبه محوری و افزایش موقعیت نهایی سنبه متقابل موجب افزایش ارتفاع شاخه می گردد که این امر با مشاهدات تجربی نیز منطبق است. مشابه مورد قبل، امکان مطالعه سایر پارامترها بر روی ارتفاع شاخه نیز وجود دارد که از ذکر آن ها خودداری شده است.



شکل ۱۵- تاثیرات متقابل فشار نهایی و موقعیت نهایی سنبه متقابل بر روی ضخامت



شکل ۱۶- تاثیرات متقابل جابجایی سنبه محوری و موقعیت نهایی سنبه متقابل بر روی ارتفاع

## ۷- بهینه‌سازی

تنظیم همزمان ۱۱ متغیر ورودی فرآیند هیدروفرمینگ، بطوری که منجر به ایجاد یک تغییر شکل مطلوب در لوله شود، بسیار دشوار است. از اینرو مسئله اصلی در اکثر کاربردهای عملی آنست که چگونه می‌توان مقادیر مناسبی برای پارامترهای فرآیند را انتخاب نمود تا به تغییر شکل مطلوب دست یافت. به عبارت دیگر، باید بهترین ترکیب بین این پارامترها که منجر به خروجی دلخواه شود را پیدا نمود. لذا باید روشی یافت که با دریافت مقادیر مطلوب ارتفاع شاخه و ضخامت، سطوح مناسب ۱۱ پارامتر ورودی را تعیین نماید. این امر مستلزم حل معکوس و همزمان دو معادله مربوط به خروجی‌ها است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی، مسئله بهینه‌سازی همزمان پارامترهای تنظیمی حل شده است. قبل از ارایه مثال‌های عددی، ساختار و نحوه عملکرد الگوریتم مزبور باختصار تشریح می‌شود.

### ۷-۱- الگوریتم تبرید تدریجی (SA)

اصول ریاضی الگوریتم تبرید تدریجی اولین بار توسط متروپولیس در ۱۹۵۳ مطرح شد [۱۶] و سپس کیرپاتریک و سرنی آن را به صورت یک الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد کردند [۱۷]. الگوریتم تبرید تدریجی برگرفته از اصول آنیل کردن فلزات یعنی تبرید تدریجی یک مذاب تا حالت جامد (دمای محیط) می‌باشد، بطوریکه تمام ذرات آن در یک شبکه بلوری منظم و در پایین‌ترین سطح انرژی متبلور شوند. حالت پایدار (سطح انرژی حداقل) در صورتی ایجاد می‌شود که سرعت تبرید بسیار کم باشد. سطح انرژی هر ذره در هر دمای خاص یک تابع احتمالی است که طبق تابع احتمال بولتزمن (معادله (۶)) تعیین می‌گردد. تابع بولتزمن با کاهش دما به حالت‌های کم انرژی‌تر متمایل می‌شود. در این الگوریتم وقتی دما به صفر میل می‌کند، تنها حالت‌هایی با کمترین سطح انرژی احتمال وقوع غیر صفر دارند.

در بهینه‌سازی، حالات با سطوح انرژی حداقل متناظر با مقادیر کمینه تابع هدف هستند. طبق اصول تبرید تدریجی، برای رسیدن به این مقادیر کمینه، کوچکترین تغییرات بصورت مرحله‌ای در جواب‌ها صورت می‌گیرد. مراحل الگوریتم پیشنهادی بصورت زیر می‌باشد:

۱- ورود داده‌های مسئله و تنظیم پارامترهای الگوریتم و تشکیل جواب اولیه بصورت تصادفی،



۲- تشکیل یک جواب مناسب در همسایگی جواب فعلی و مقایسه جواب جدید نسبت به جواب فعلی، جواب جدید در یکی از حالات زیر پذیرفته می‌شود:  
 الف) جواب جدید یک جواب بهبود دهنده باشد،  
 ب) مقدار تابع احتمال پذیرش بولتزمن (طبق معادله (۶))، از یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک بیشتر باشد.

$$P_r(S_k \Rightarrow S_{k+1}) = \exp\left(\frac{-\Delta c}{c_k}\right) \quad (۶)$$

در صورت عدم تحقق شروط فوق، الگوریتم به ابتدای مرحله ۲ بازگشته و جواب تصادفی دیگری تولید می‌شود.

۳- به روزرسانی پارامترهای الگوریتم (تابع سرمایش، تعداد تکرارها، ...) در رابطه (۶)،  $\Delta c$  اختلاف بین مقدار تابع هدف جواب جدید و فعلی است،  $c_k$  پارامتر کنترلی (دمای سیستم) در تکرار  $k$ ام است. دمای سیستم در تکرارهای متوالی بر اساس تابع سرمایش کاسته می‌شود. این تابع معمولاً بصورت  $c_k = \alpha c_{k+1}$  تعریف می‌شود که در آن  $\alpha$  بین ۰/۹ تا ۱ می‌باشد.  
 ۴- بررسی شرط توقف، شرط توقف الگوریتم می‌تواند تعداد تکرارها، زمان محاسباتی، رسیدن به مقدار مشخصی از تابع هدف (خطا) و یا تلفیقی از این معیارها باشد.

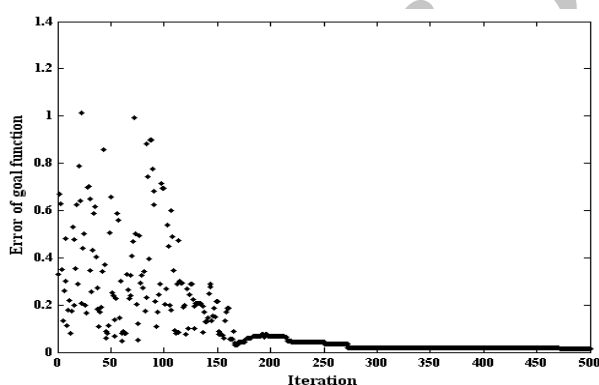
## ۸- بررسی نتایج

در اکثر کاربردهای صنعتی، هدف تعیین مقادیر پارامترهای تنظیمی فرآیند است به نحوی که تغییر شکل مطلوب برای لوله ایجاد شود. بدین منظور لازم است تا مدل‌های ارائه شده در بخش ۶-۱ حل معکوس شوند. در این قسمت با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی، نتایج مربوط به نمونه بهینه با شبیه‌سازی مقایسه شده است. در فرآیند بهینه‌سازی، از یک تابع خطا که بر مبنای بهترین مدل آرایه شده مدل خطی می‌باشد، به عنوان معیار شایستگی استفاده شده است. این تابع مطابق رابطه (۷) تعریف می‌شود،

$$f = \frac{(T_{\text{exp}} - T)^2}{T_{\text{exp}}} + \frac{(H_{\text{exp}} - H)^2}{H_{\text{exp}}} \quad (۷)$$

در تابع فوق، پارامترهایی که با اندیس (exp) مشخص شده‌اند مقدار محاسبه شده با استفاده از معادلات (۴) و (۵) هستند و پارامترهای بدون اندیس در هر جمله بیانگر مقادیر مطلوب می‌باشند. مبنای روش پیشنهادی، کمینه کردن اختلاف بین مقادیر مطلوب و مقادیر بدست آمده از الگوریتم می‌باشد.  
 الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم افزار MATLAB کدنویسی شده است. در این الگوریتم سرعت محاسباتی یکی از معیارهای مهم ارزیابی عملکرد روش‌های بهینه‌سازی است. روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱۷) نشان داده شده است. نقاط نشان داده شده در این نمودار مقادیر تابع هدف (مجموع مربعات خطاها) در هر تکرار می‌باشند. زمان اجرای الگوریتم برای هر مسئله ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

همانطور که در این نمودار نشان داده شده است، الگوریتم در حدود تکرار ۴۵۰ به بعد به جواب بهینه مناسب همگرا شده است. این امر بیانگر سرعت بسیار بالای الگوریتم تبرید تدریجی در حل مسئله مورد نظر است. دو خروجی مورد نظر به همراه مقادیر پارامترهای تنظیمی که توسط الگوریتم SA محاسبه شده‌اند برای پنج حالت مختلف در جدول (۹) نشان داده شده است. سپس این ورودی‌ها توسط نرم‌افزار Abaqus شبیه‌سازی شده و مقادیر ارتفاع و ضخامت مربوط به هر آزمایش در جدول (۱۰) آورده شده است. در این جدول خطای مربوط به مقادیر بهینه با مقادیر شبیه‌سازی آزمایشگاهی محاسبه گردیده و در نهایت حالتی که کمترین مقدار خطا را دارد به عنوان خروجی بهینه انتخاب شده است. همانگونه که از جدول (۱۰) پیداست متغیرهای محاسبه شده برای تحلیل سوم بهترین جواب برای ضخامت و ارتفاع است. جدول (۱۱) نشان دهنده مقادیر بهینه برای متغیرهای بارگذاری می باشد. با توجه به مقادیر ورودی بهینه پیداست که مقدار فشار ماکزیمم در نمونه آزمایشگاهی از ۱۵ به ۱۲.۵ مگاپاسکال کاهش داده شده است و این در حالی است که مقدار ضخامت مینیمم و یکنواختی آن افزایش یافته است. بنابراین با انتخاب مسیر بهینه برای شرایط بارگذاری طراح قادر است با ظرفیت کمتر دستگاه نتایج بهتری بدست آورد.



شکل ۱۷- همگرایی در الگوریتم تبرید تدریجی

جدول ۹- مقادیر بهینه متغیرهای ورودی محاسبه شده با SA

No	$P_{\text{expan}}$	$P_{\text{final}}$	$T_{\text{yield}}$	$T_{\text{expan}}$	$S_{\text{middle}}$	$S_{\text{final}}$	$T_{\text{middle}}$	$CP_s$	$CP_f$	$T_{\text{start}}$	$T_{\text{stop}}$
1	10.5	13.5	2	20.5	50	63.5	27	56	75	7	30
2	11	12.5	2	21	52	64	23	56	75	10	28
3	9.5	12.5	2	24.5	50	63.5	25.5	56	75.5	9.5	30
4	12	12.5	2.4	22.5	52	64	26.5	53.5	76.5	6.5	30
5	7.5	12.5	2	21.5	50	64	26.5	56	75	10	30

**جدول ۱۰-** مقادیر محاسبه شده برای ضخامت و ارتفاع بوسیله SA و Abaqus و میزان

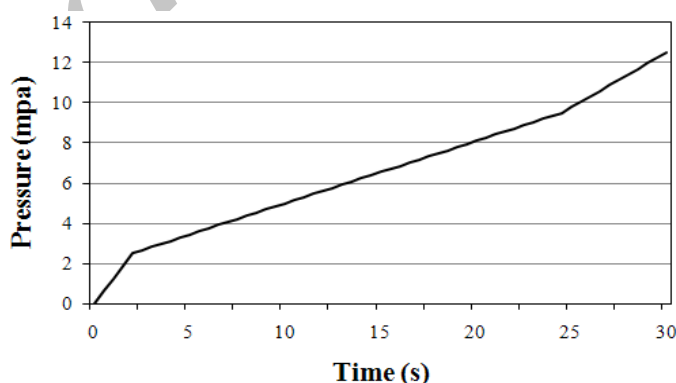
خطای بین آنها

شماره تحلیل	بهینه‌سازی SA		Abaqus		Error	
	T (mm)	H (mm)	T (mm)	H (mm)	T	H
تحلیل اول	2.63	41.99	2.48	41.79	5.79	0.49
تحلیل دوم	2.68	40.09	2.527	41.1	5.26	2.51
تحلیل سوم	2.66	39.91	2.553	40.8	4.13	2.22
تحلیل چهارم	2.58	42.02	2.476	42.35	4.01	0.79
تحلیل پنجم	2.69	39.96	2.558	40.59	5.34	1.55

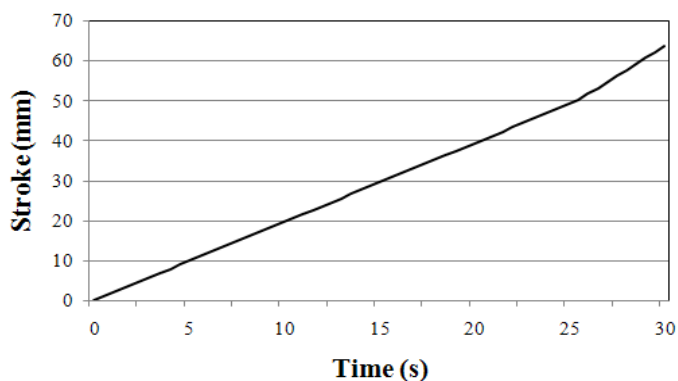
**جدول ۱۱-** متغیرهای بهینه برای طراحی مسیرهای بارگذاری

$P_{\text{expan}}$	$P_{\text{final}}$	$T_{\text{yield}}$	$T_{\text{expan}}$	$S_{\text{middle}}$	$S_{\text{final}}$	$T_{\text{middle}}$	$CP_s$	$CP_f$	$T_{\text{start}}$	$T_{\text{stop}}$
9.5	12.5	2	24.5	50	63.5	25.5	56	75.5	9.5	30

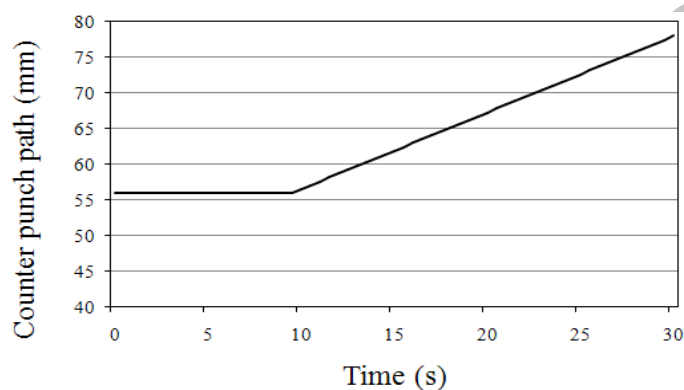
با بکارگیری مقادیر بدست آمده، مسیرهای بارگذاری برای شرایط بهینه به ترتیب برای فشار داخلی، جابجایی سنبه محوری و جابجایی سنبه متقابل در شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) ترسیم شده‌اند. نمودار ضخامت لوله برای تار میانی لوله نشان داد که علاوه بر افزایش مقدار ضخامت برای لوله تغییر شکل یافته، توزیع یکنواختی برای ضخامت قسمت میانی لوله بدست آمده است. علاوه بر این، تغییر یکنواخت جابجایی برای سطح بالای لوله نیز حاصل شده است. شکل (۲۱) مربوط به لوله تغییر شکل یافته برای شرایط بهینه است که یکنواختی تغییر شکل در سطح بالای لوله را نشان می‌دهد.



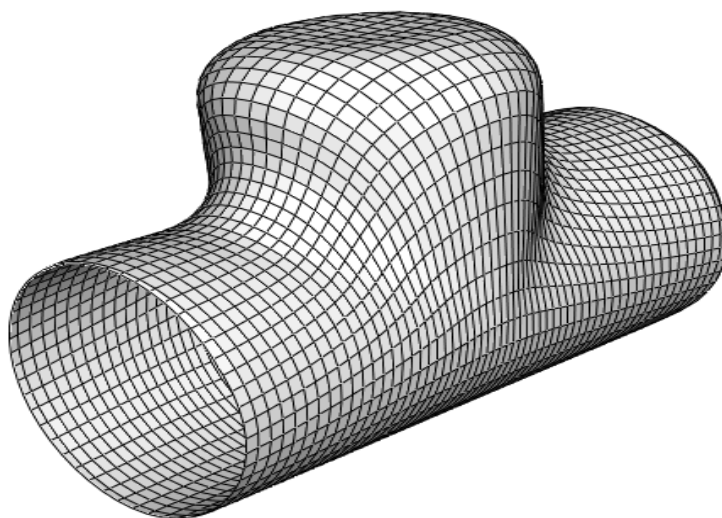
شکل ۱۸- منحنی تغییر فشار بهینه



شکل ۱۹- منحنی جابجایی محوری سنبه متقابل



شکل ۲۰- منحنی جابجایی سنبه متقابل



شکل ۲۱- لوله بعد از تغییر شکل برای شرایط بهینه بارگذاری

## ۹- نتیجه گیری

در این مقاله هیدروفرمینگ اتصالات T شکل مطالعه گردید و بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری با استفاده از یک روش جدید مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا اکثر پارامترهای بارگذاری قابل کنترل در این فرآیند در نظر گرفته شد و به کمک روش طرح آزمایش های تاگوچی، ۳۲ آزمایش برای شرایط مختلف بارگذاری

طراحی گردید. با استفاده از روش اجزا محدود نتایج مربوط به ضخامت مینیمم لوله و ارتفاع ماکزیمم شاخه برای لوله تغییر شکل داده استخراج شد و با استفاده از این نتایج، یک مدل ریاضی بر اساس متغیرهای ورودی محاسبه گردید. بعد از تعیین صحت مدل‌های ریاضی، تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی تغییرشکل مطالعه شد. با اعمال مدل‌های ریاضی در الگوریتم تبرید تدریجی، مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرهای بارگذاری محاسبه گردید و بر اساس این مقادیر، مسیرهای بارگذاری مربوط به هر یک از پارامترها طراحی شده‌است. با مقایسه نتایج حاصل از این روش با نمونه آزمایشگاهی، علاوه بر کاهش ظرفیت دستگاه نتایج مطلوبی برای لوله هیدروفرم شده از نظر معیارهای شکل پذیری حاصل شد.

## مراجع

- [1] Bardelcik, A., and Worswick, M.J., "The Effect of End-feed on Straight and Pre-bent Tubular Hydroforming of DP600 Tubes", NUMISHEET 2008, pp. 651-656, Interlaken, Switzerland, (2008).
- [2] Choi, H., Koç, M., and Ni, J., "Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 190, No. 1-3, pp. 230-242, (2007).
- [3] Rimkus, W., Bauer, H., and Mihsein, M.J.A., "Design of Load-curves for Hydroforming Applications", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 108, No. 1, pp. 97-105, (2000).
- [4] Fann, K.J., and Hsiao, P.Y., "Optimization of Loading Conditions for Tube Hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1-3, pp. 520-524, (2003).
- [5] Imaninejad, M., Subhash, G., and Loukus, A., "Loading Path Optimization of Tube Hydroforming Process", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1504-1514, (2005).
- [6] Heo, S.C., Kim, J., and 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, No. 1-3, pp. 653-657, (2006).
- [7] Aydemir, A., Vree, J.H.P., Brekelmans, W.A.M., Geers, M.G.D., Sillekens, W.H., and Werkhoven, R.J., "An Adaptive Simulation Approach Designed for Tube Hydroforming Processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, No. 3, pp. 303-310, (2005).
- [8] Li, S.H., Yang, B., Zhang, W.G., and Lin, Z.Q., "Loading Path Prediction for Tube Hydroforming Process using a Fuzzy Control Strategy", Materials & Design, Vol. 29, No. 6, pp. 1110-1116, (2008).
- [9] Cherouat, A., Saanouni, K., and Hammi, Y., "Numerical Improvement of Thin Tubes Hydroforming with Respect to Ductile Damage", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, No. 12, pp. 2427-2446, (2002).

- [10] Hwang, Y.M., Lin, T.C., and Chang, W.C., "Experiments on T-shape Hydroforming with Counter Punch", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 192-193, pp. 243-248, (2007).
- [11] Lang, L., Yuan, S., Wang, X., Wang, Z.R., Fu, Z., Danckert, J., and Nielsen, K.B., "A Study on Numerical Simulation of Hydroforming of Aluminum Alloy Tube", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 3, pp. 377-388, (2004).
- [12] Ray, P., and 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, No. 2, pp. 173-192, (2004).
- [13] Boudeau, N., Lejeune, A., and Gelin, J.C., "Influence of Material and Process Parameters on the Development of Necking and Bursting in Flange and Tube Hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125-126, pp. 849-855, (2002).
- [14] Cheng, D.M., Teng, B.G., Guo, B., and Yuan, S.J., "Thickness Distribution of a Hydroformed Y-shaped Tube", Materials Science and Engineering: A, Vol. 499, No. 1-2, pp. 39-39, (2009).
- [15] Douglas, C.M., "Introduction to Linear Regression Analysis", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 8-15, (1996).
- [16] Metropolis, M.C., "Simulated Annealing and I.E.T. Algorithm: Theory and Experiments", Lmens-96-21, Report, Department of Mathematics, Paris, France, June (1996).
- [17] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., and Vecchi, M.P., "Optimization by Simulated Annealing", IBM Research Report RC 935, (1982)

### فهرست نمادهای انگلیسی

فشار تسلیم	: $P_{yield}$
فشار انبساط	: $P_{expan}$
فشار نهایی	: $P_{final}$
زمان تسلیم	: $T_{yield}$
زمان انتهای انبساط	: $T_{expan}$
جابجایی میانی سنبه محوری	: $S_{middle}$
جابجایی نهایی سنبه محوری	: $S_{final}$
زمان جابجایی میانی سنبه محوری	: $T_{middle}$
موقعیت اولیه سنبه متقابل	: $CP_s$
موقعیت نهایی سنبه متقابل	: $CP_f$
زمان شروع حرکت سنبه متقابل	: $T_{start}$
زمان توقف سنبه متقابل	: $T_{stop}$
نماد طرح تاگوچی	: L

: N	تعداد کل آزمایش ها
: n	تعداد سطح هر متغیر
: k	تعداد متغیرهای ورودی
: E	مدول یانگ
: K	ضریب مقاومت

### نمادهای یونانی

: $U$	ضریب پواسون
: $\sigma_y$	تنش تسلیم

Archive of SID

**Abstract**

In the present paper, design of optimal load curves for T-shape hydroforming process is studied. At first, all loading variables to design the load paths are chosen. By the aid of Taguchi design, 32 load paths for each loading parameter are designed. The obtained results from applying these load paths on the tube are calculated from finite element simulation. using analysis of variance on the Taguchi table, tube deformation versus loading variables is modeled in the form of mathematical equations. In the following, by inserting these mathematical relations in the simulated annealing algorithm, an optimal value for each loading variable is determined and the optimal paths are designed using these values. The efficiency of this method to design the optimal load paths is proved by comparing the obtained results of experimental model and finite element simulation.

Archive of SID