

بهینه‌سازی مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفورمینگ لوله با استفاده از منطق فازی

حمیدرضا رضایی آشتیانی*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

صالح بیاتی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

امروزه معیار ارزیابی بهره‌وری تولید در صنعت، تولید در کوتاه‌ترین زمان ممکن، با کمترین هزینه و بالاترین کیفیت می‌باشد. فرآیند هیدروفورمینگ به علت ویژگی‌های منحصر به فرد آن، به‌طور فزاینده‌ای در صنایع نظامی، خودروسازی، هوافضا و دوجرخه‌سازی در حال استفاده می‌باشد. اغلب لوله‌های هیدروفورم شده توسط چندین مرحله فرآیند بارگذاری تولید می‌شوند که با انتخاب مناسب شرایط بارگذاری شامل فشار داخلی و پیشروی محوری می‌توان شکل پذیری ماده را بهبود داده و از بوجود آمدن عیوب مختلف در این فرآیند و قطعه نهایی تولیدی جلوگیری کرد. در این مطالعه به یافتن روشی کارآمد جهت دستیابی به مسیر بارگذاری مناسب فرآیند هیدروفورمینگ لوله پرداخته شده است، بطوری که مسیر بارگذاری مناسب در این فرآیند با استفاده از الگوریتم کنترل فازی که با کنترل مناسب بارگذاری مانع از کرنش بیش از اندازه لوله در حال تغییر شکل و یا شکست آن شود، تعیین می‌گردد. برای این منظور و با توجه به مزیت‌های منطق و کنترل فازی از الگوریتم کنترل فازی ممدانی و با استفاده از کد نرم افزار المان محدود Abaqus برای کنترل فرآیند هیدروفورمینگ لوله استفاده شد. اندازه‌گیری‌های چروکیدگی و تغییر ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی به‌عنوان ورودی در کنترل فازی استفاده شده و خروجی کنترل فازی جهت تنظیم مسیر بارگذاری استفاده می‌شود. الگوریتم کنترل‌کننده طوری طراحی شده است که انبساط قطعه را بیشینه کرده و به‌طور هم‌زمان تغییرات ضخامت دیواره و چروکیدگی را حداقل می‌کند. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی حاکی از دقت قابل قبول شبیه‌سازی‌ها و مدل ارائه شده جهت پیش‌بینی مسیر بارگذاری و رفتار ماده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدروفورمینگ لوله؛ مسیر بارگذاری؛ کنترل فازی؛ چروکیدگی؛ تغییر ضخامت.

Optimization of the load path for tube hydroforming processes using fuzzy logic

H.R. Rezaei Ashtiani
S. bayati

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Abstract

Today, Production in the shortest possible time, with the lowest cost and highest quality is the one of the most important criterions in the industry. Tube hydroforming (THF), because of its unique feature, increasingly used in military, industries, automobile manufacturing, aerospace, and bicycle industries. Most tube hydroformed parts are produced by a multistage loading process which the suitable loading condition in THF with regard to internal pressure and axial feeding should be designed to improve formability and to avoid failure modes on the final hydroformed product. This study deals with the procedure for the determination of the proper loading path in THF using a fuzzy logic control algorithm, which avoids the failure of the tube due to excessive induced strain during the forming process. For this purpose, Mamdani fuzzy control algorithm was used in conjunction with Abaqus FEA code for simulation of the THF process. The wrinkling measurements and the thickness variation obtained from simulation are used as input in fuzzy control and fuzzy control outputs are used to set the loading path. A controlled algorithm is designed to maximize the expansion of the tube and minimize the thickness variation of the wall and wrinkling at the same time. The numerical results were verified and validated by conducting experiments where a good agreement was obtained between the experimental results and simulations.

Keywords: Tube hydroforming; Load path; Fuzzy logic; Wrinkling; Thickness variation.

نیروی محوری، به شکل حفره قالب درآورد. در این تکنولوژی سنبه صلب حذف می‌شود و یک سیال به‌عنوان سنبه (یک سنبه نرم) انتخاب می‌شود و لوله از طریق به‌کارگیری هم‌زمان فشار داخلی و نیروهای محوری فشاری، شکل داخلی حفره قالب‌های بالا و پایین را به خود می‌گیرد [۲]. در صورتیکه تنها از فشار داخلی بعنوان نیروی شکل‌دهی در طول این فرآیند استفاده شود، هندسه و کیفیت قطعه بدلیل خیلی نازک شدن دیواره لوله در برخی قسمت‌های آن، محدود می‌گردد. لذا با اعمال یک نیروی محوری بر دو انتهای لوله، ماده می‌تواند به‌راحتی در داخل حفره قالب جریان یابد [۳]. دو مورد از مهم‌ترین پارامترهای این فرآیند فشار داخلی و تغذیه محوری اعمال‌شده در دو انتهای لوله می‌باشد. یک نمایش نموداری از این دو پارامتر، مسیر اعمال نیرو (بارگذاری) نامیده می‌شود [۴]. به‌منظور دستیابی به شکل مناسب قطعه می‌بایست مسیر بارگذاری در یک چارچوب خاص تعریف و اعمال شود،

۱- مقدمه

امروزه نیروی سیالات برای شکل دادن به فلزات در اختیار انسان قرار گرفته است. این فناوری که هیدروفورمینگ نامیده می‌شود، پتانسیل فراوانی را برای تحول آینده صنایع خودروسازی، نفت و گاز، هوافضا و نظامی خواهد داشت. هیدروفورمینگ یکی از پیشرفته‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی فلزات می‌باشد که شامل استفاده از فشار بسیار بالا مایع برای شکل‌دهی فلز، به شکل‌هایی که ممکن است به غیر از این روش، توسط فرآیندهای تولید متعارف غیرممکن باشد. این فرآیند برای تولید قطعات بدون درز، سبک‌وزن و با کیفیت بالا در صنایع مهمی چون هوافضا و خودروسازی که ترانس خیلی بسته‌ای دارند ایده‌آل می‌باشد [۱]. در هیدروفورمینگ لوله هنگام استفاده از لوله‌های بدون درز یا لوله‌های جوشکاری شده، لقمه اولیه را می‌توان با استفاده از فشار داخلی و اعمال

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hr_rezaei@arakut.ac.ir

مسیر بارگذاری نادرست باعث ایجاد عیوبی از قبیل چروکیدگی^۱، ترکیدگی^۲ و یا کمناش^۳ در قطعه و عدم دستیابی به قطعه ای با کیفیت مدنظر منجر خواهد شد. لازم به ذکر است مسیر بارگذاری برای قطعات هیدروفرمینگ لوله از اعمال فشار و تغذیه مواد تشکیل شده، از دیدگاه نظری ممکن است راه‌های متعددی جهت به دست آوردن مسیر بارگذاری (تغذیه مواد در برابر فشار) وجود داشته باشد. پیش‌بینی مسیر بارگذاری مناسب برای یک مجموعه خاص از شرایط فرآیند، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در هیدروفرمینگ لوله می‌باشد. محققان مختلف به بررسی فرآیند هیدروفرمینگ لوله و بهینه سازی این فرآیند از روش‌های مختلف از جمله منطق فازی پرداخته‌اند [۱۶-۱۵]. یولن و همکاران [۱۵] با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، مسیرهای بارگذاری مناسب را مطالعه و با استفاده از دو روش مختلف مسیرهای بارگذاری بهینه را طراحی کردند. آنان در هر روش چند مسیر مختلف را بررسی و سپس با استفاده از تحلیل نتایج تجربی 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 فرآیند هیدروفرمینگ پرداختند. هیو و همکاران [۶] با استفاده از روش زبان طراحی پارامتری نرم‌افزار انسیس (APDL)، تعیین مسیرهای بارگذاری را به‌منظور بهبود قابلیت شکل‌پذیری در فرآیند هیدروفرمینگ، طراحی کردند. آنها جهت طراحی مسیرهای بارگذاری بهینه ابتدا دو مسیر بارگذاری برحسب زمان را برای فشار داخلی و پانچ محوری پیشنهاد کردند و سپس تأثیر این مسیرها را بر روی مقدار نازک شدگی در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه و مسیر بارگذاری بهینه را از میان این دو مسیر پیشنهادی تعیین کردند. عابدراو و همکاران [۷] از ترکیب الگوریتم ژنتیک با یکی از کدهای اجزای محدود استفاده کردند. گرچه الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو بر اساس مکانیزم انتخاب طبیعی بهینه‌ی مطلق است ولی تعداد زیاد ارزیابی‌ها از معایب این الگوریتم می‌باشد. افتخاری و همکاران [۸] جهت بهینه‌سازی مسیر بارگذاری از روش سطح پاسخ که از روش‌های الگوریتم بهینه‌سازی تقریبی محسوب می‌گردد استفاده کردند. این روش بر اساس تطبیق دادن یک مدل چندوجهی درجه‌ی پایین بر روی داده‌های پاسخ استوار است که با استفاده از محاسبات اجزای محدود برای متغیرها و در نهایت بهینه کردن این مدل به دست می‌آید. کاشی و همکاران [۹] نیز جهت بررسی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های آلومینیوم از روش الگوریتم تبرید تدریجی استفاده کردند. در این روش آنها ابتدا تابع هدف که معادل انرژی در تبرید می‌باشد را برای الگوریتم تعریف کرده و با استفاده از تکرارهای زیاد مقدار کمینه تابع هدف را مشخص کردند. آنها تابع هدف را فاصله بین قطعه هیدروفرمینگ شده و قالب تعریف کردند و مقدار کمینه آن که همان بیشترین انطباق قطعه با حفره قالب می‌باشد را به دست آوردند. کدخدایان و همکاران [۱۰] نیز از همان روش الگوریتم تبرید تدریجی استفاده کردند اما به‌جای افزایش فشار به‌صورت خطی از یک فشار نوسانی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با توجه به اثر کرنش سختی به وجود آمده در اثر نوسان فشار،

استحکام لوله افزایش می‌یابد که نتیجه آن به تأخیر انداختن نازک شدگی در لوله و افزایش بهره‌وری نسبت به فشار خطی می‌باشد. قوش و همکاران [۱۱] در بررسی‌های خود قطعات مختلف را به خانواده‌های مجزا تقسیم کرده و برای آنها پایگاه داده به وجود آوردند سپس با استفاده از تابع درون یاب درجه ۳ مسیر بارگذاری را برای هر قطعه‌ای که در این خانواده‌ها قرار می‌گرفتند، با تقریب به دست آوردند. جی و همکارانش [۱۲] یک روش طراحی مسیر بارگذاری انطباقی یا سازگار با استفاده نظریه منطق فازی ارائه کردند، بطوریکه کنترل کننده فازی آنها براساس ویژگی‌های فرآیند هیدروفرمینگ لوله و بطور ویژه برای قطعات متقارن استوار می‌باشد، همچنین کنترل کننده فازی آنها شامل تعداد قابل توجهی ورودی در مرحله بارگذاری فرآیند می‌باشد که این امر منجر به تحلیل بهتر فرآیند هیدروفرمینگ نسبت به بارگذاری خطی در این فرآیند می‌گردد. ری و مک‌دونالد [۱۳] با روش الگوریتم کنترل بار فازی، مسیر بارگذاری بهینه برای هیدروفرمینگ اتصالات T شکل را تعیین کردند. آنها در این شبیه‌سازی المان را بصورت پوسته در نظر گرفته و چروکیدگی را به عنوان حدود کنترل که معیار آن اختلاف کرنش المان است انتخاب کردند. در این مطالعه یک مسیر خاص برای تولید اتصالات T شکل ارائه شد. در تحقیق دیگر محمدی و همکاران [۱۴] روش الگوریتم کنترل بار فازی را با کنترل حدود چروکیدگی و ترکیدگی برای لوله‌های متقارن محوری به کار بردند. معیار چروکیدگی و ترکیدگی از روش تنش‌ی بوده و مخصوص لوله‌های متقارن محوری بود. با توجه به آنچه بیان شد الگوریتم کنترل فازی با توجه به مزایای ذکر شده و همچنین توانایی کنترل هم‌زمان یکی از مطمئن‌ترین، سریع‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها جهت کنترل فرآیندهای شکل‌دهی است. در این بررسی از سیستم استنتاج ممدانی در کنترل فرآیند هیدروفرمینگ لوله استفاده شده که به دلیل داشتن طبیعت بصری و تفسیری از قوانین می‌تواند به‌طور گسترده در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم استفاده شود، همچنین این سیستم دارای قدرت بیانی بالایی بوده و می‌تواند به هر دو صورت چند ورودی و چند خروجی و چند ورودی و یک خروجی پیاده‌سازی شود. در این تحقیق بهینه‌سازی مسیر بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از منطق فازی براساس معیارهای مختلف ضخامت، تماس یا کالیبراسیون و همچنین معیار جدیدی برای چروکیدگی لوله که بر پایه روش شیب پروفیل تعریف و استفاده می‌گردد، و با استفاده از شبیه‌سازی این فرآیند انجام می‌شود.

۲- نظریه معیارهای کنترل

۲-۱- معیار ضخامت

همانطور که در مرجع [۱۷] بدان اشاره شده است براساس استاندارد میزان کمترین ضخامت نباید از ۰.۸۰ ضخامت اولیه لوله کمتر شود. که در این بررسی نیز براساس همین موضوع معیار ضخامت به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$I_t = \frac{1 - th_{min}}{1 - th_p} \quad (1)$$

که در آن th_{min} کمترین ضخامت در هر گام، th_{in} ضخامت اولیه، th_p حد نسبت ضخامت، می‌باشد. همان‌طور که در رابطه (۱) مشخص است در ابتدای فرآیند چون نسبت

¹wrinkling

²bursting

³buckling

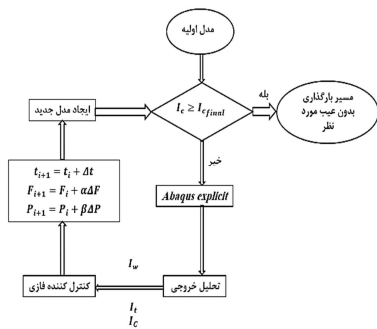
لوله از دیواره قالب در اولین گام فرآیند می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در لحظه اولیه مقدار I_c صفر بوده و هر چه مقدار I_c به یک نزدیک شود تماس بیشتر شده و قطعه شکل قالب را بطور کامل تری به خود می‌گیرد.

۳- کنترل فازی

فرآیند هیدروفورمینگ لوله به شرایط بارگذاری حساس می‌باشد و انواع عیوب و واماندگی‌ها مانند چروکیدگی و کاهش ضخامت در آن‌ها اتفاق می‌افتد. جهت رفع عیوب و مشکلات این فرآیند در این پژوهش از روش شبیه‌سازی تطبیقی با کمک یک کنترل‌کننده که بر اساس منطق فازی عمل می‌کند استفاده شده است. در این روش کاهش ضخامت و چروکیدگی و همچنین میزان شکل‌گیری قطعه به عنوان معیارها کنترل و محدود کننده فرآیند، در طول شبیه‌سازی اجزا محدود در هر مرحله محاسبه شده و در اختیار کنترل‌کننده فازی قرار داده می‌شود تا خروجی کنترل‌کننده فشار داخلی و جابجایی محوری را به دست آورد. روش کار به این صورت است که شبیه‌سازی هیدروفورمینگ لوله به گام‌های بسیار کوچک زمانی تقسیم می‌شود به طوری که در ابتدای فرآیند مدل المان محدود با گام‌های کوچک زمانی Δt ، فشاری ΔP و تغذیه محوری ΔF شروع به شبیه‌سازی فرآیند می‌کند. بعد از اجرای شبیه‌سازی خروجی‌های لازم از شبیه‌سازی گرفته شده و میزان چروکیدگی (I_w)، کاهش ضخامت (I_t) و میزان تماس یا کالیبراسیون (I_t) قطعه با توجه به معیارهای تعریف شده محاسبه شده و به کنترل‌کننده فازی داده می‌شود. کنترل‌کننده فازی دو ضریب یکی برای تغذیه محوری (α) و دیگری برای فشار داخلی (β) لوله را محاسبه کرده و در نتیجه فشار و تغذیه محوری را جهت مرحله بعد همان‌طور که در رابطه (۴) نشان داده شده است، محاسبه می‌کند.

$$\begin{aligned} t_{i+1} &= t_i + \Delta t \\ P_{i+1} &= P_i + \beta \Delta P \\ F_{i+1} &= F_i + \alpha \Delta F \end{aligned} \quad (4)$$

شبیه‌سازی فرآیند با زمان، تغذیه محوری و فشار جدید اجرا می‌شود این مراحل تکرار شده و به پیش می‌رود تا قطعه شکل نهایی لازم خود را بگیرد. روند نما این کنترل در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- روش شبیه‌سازی تطبیقی با کنترل فازی برای یافتن مسیر بارگذاری

۳-۱- فازی سازی ورودی‌های کنترل‌کننده

مهم‌ترین قدم طراحی در هنگام بکارگیری کنترل‌کننده ممدانی، تعریف متغیرهای زمانی است ابتدا I_w که معرف معیار چروکیدگی می‌باشد

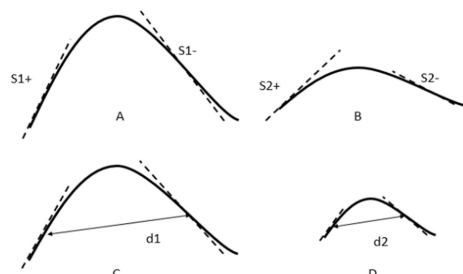
defined. برابر یک می‌باشد I_t برابر صفر می‌شود و هنگامی که نسبت $\frac{th_{min}}{th_p}$ به $\frac{th_{min}}{th_{in}}$ ، که طبق استاندارد مقدار 0.8 می‌باشد، رسید I_t مقدار یک را پیدا می‌کند، به عبارت دیگر مناسب‌ترین مقدار I_t صفر است که مربوط به ابتدای فرآیند بوده و مقدار بحرانی آن یک می‌باشد.

۲-۲- معیار چروکیدگی

از میان معیارهای مختلف برای چروکیدگی به علت ملموس بودن روش هندسی و همچنین به علت نوع فرآیند که هیدروفورمینگ متقارن می‌باشد، معیار شیب انتخاب شد. البته این معیار فقط تغییر علامت شیب را به عنوان وقوع و نه مقدار و میزانی برای چروکیدگی می‌داند، لذا نیاز است با تغییر در آن، به معیاری کمی دست یافت که بتوان آن را محاسبه کرد و در کنترل فازی آن را اعمال نمود. از این رو معیار چروکیدگی به این صورت تعریف می‌گردد که هر چه چروکیدگی بیشتر باشد، اختلاف شیب‌های با علامت مخالف بیشتر خواهد شد. برای مثال در شکل ۱ با مقایسه A، B مشاهده می‌شود چون اختلاف شیب‌های S1 از S2 بیشتر است چروکیدگی در A بیشتر از B می‌باشند. همچنین با افزایش فاصله طولی محل وقوع شیب‌های بزرگ‌تر، چروکیدگی کاهش می‌یابد؛ یعنی چروکیدگی D از C بیشتر است. پس با توجه به نکات گفته شده در یک ناحیه تغییر علامت شیب چروکیدگی به صورت زیر است:

$$I_w = \frac{|S_{max}^+ - S_{min}^-|}{d} \quad (2)$$

که در آن $S_{max}^+ = \max(\{s | s > 0\})$ بیشترین شیب مثبت منحنی، $S_{min}^- = \min(\{s | s < 0\})$ کمترین شیب منفی منحنی، و d فاصله بین بیشینه شیب و کمینه شیب می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۱ نیز مشخص است بررسی نتایج نشان می‌دهد که رابطه (۲) می‌تواند بصورت قابل قبولی میزان چروکیدگی را پیش‌بینی کند.



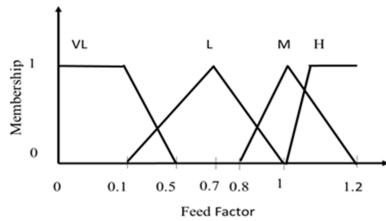
شکل ۱- تأثیر بیشینه و کمینه شیب و فاصله بین بیشینه شیب و کمینه شیب بر میزان چروکیدگی

۳-۲- معیار کالیبراسیون یا تماس

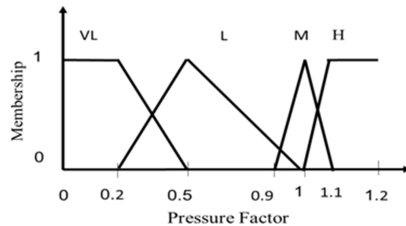
برای اینکه کنترل‌کننده فازی فرآیند را به پایان برساند یعنی قطعه‌ای با کمترین اختلاف با قالب تولید شود. باید معیاری برای کالیبراسیون و یا میزان تماس قطعه به قالب تعریف نمود. برای این کار بیشترین فاصله سطح خارجی لوله از قالب به عنوان معیار تماس در نظر گرفته می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$I_c = 1 - \frac{con}{con_{in}} \quad (3)$$

که در این رابطه con معرف بیشترین فاصله سطح خارجی لوله از دیواره قالب در هر گام از فرآیند و con_{in} بیشترین فاصله سطح خارجی



شکل ۶- متغیرهای زبانی خروجی ضریب تغذیه محوری (α)



شکل ۷- متغیرهای زبانی خروجی ضریب فشار (β)

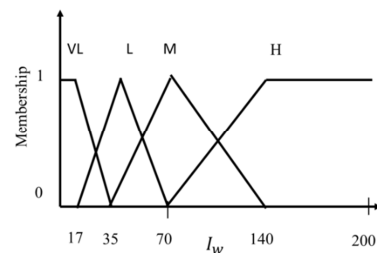
۳-۲- تعریف قوانین در کنترل کننده فازی ممدانی

هنگامی که از کنترل کننده ممدانی استفاده می شود، یکی دیگر از قدم های بسیار مهم تعیین قانون ها می باشد. این قوانین یا می تواند با انجام آزمایش های تجربی گسترده و یا ایجاد مدل سازی اجزاء محدود و تحلیل عددی فرآیند حاصل گردد. به عنوان مثال آزمایشات تجربی نشان می دهند چنانچه معیار تماس یا کالیبراسیون "کم" باشد و معیار تغییر ضخامت "خیلی کم" و معیار چروکیدگی "زیاد" باشد آنگاه جابجایی محوری "خیلی کم" و فشار داخلی "زیاد" بایستی انتخاب شود. از آنجاکه در فازی سازی ورودی های کنترل کننده یعنی شاخص های چروکیدگی، ترکیب (تغییر ضخامت) و کالیبراسیون به ترتیب دارای تعداد ۴، ۳ و ۴ عبارت زبانی می باشند، بنابراین برای کنترل کننده ۴۸ قانون وجود دارد. قانون های مورد نظر در جدول ۱ و ۲ به صورت خلاصه آورده شده است. برای اینکه خروجی های کنترل کننده، به متغیرهای کریسپ^۵ که قابل فهم برای ABAQUS، تبدیل شوند، از روش مرکز جرم برای غیرفازی سازی استفاده شده است. سپس این خروجی در اختیار نرم افزار شبیه ساز قرار می گیرد فشار و جابجایی به صورت خطی در هر گام مقدار خروجی از کنترل کننده در نرم افزار ABAQUS افزایش می یابد.

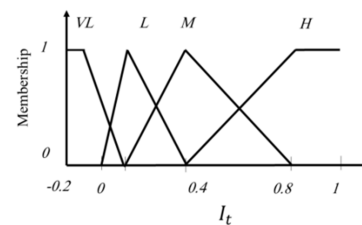
۴- شبیه سازی و تحلیل عددی فرآیند

شبیه سازی فرآیند در محیط نرم افزار Abaqus/Explicit انجام گردید. فرآیند کنترل و اندازه گیری معیارها و اجرا برنامه به زبان پایتون^۶ کد نویسی شد؛ و در محیط ABAQUS Scripting Interface به اجرا درآمد.

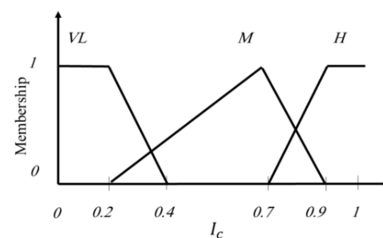
به صورت متغیر زبانی بیان می شود. متغیر زبانی برای I_w در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود شاخص چروکیدگی با چهار عبارت "خیلی کم" (VL)^۱، "کم" (L)^۲، "متوسط" (M)^۳ و "زیاد" (H)^۴ بیان می گردد. تمام متغیرهای دیگر از جمله شاخص تغییر ضخامت و شاخص کالیبراسیون و همچنین خروجی های کنترل کننده که شامل جابجایی محوری (F) و فشار داخلی (P) می باشد نیز می بایست همانطور که در شکل های ۴ تا ۷ نشان داده شده است برحسب متغیرهای زبانی بیان شده که در آنها "خیلی کم" (VL)^۱، "کم" (L)^۲، "متوسط" (M)^۳ و "زیاد" (H)^۴ می باشد. تعداد عبارات متغیرهای زبانی بر اساس حساسیت آنها می باشد، مثلاً به دلیل اینکه حساسیت در تعداد تقسیمات کالیبراسیون وجود ندارد می توان تعداد تقسیمات را به صورت "کم" (L)^۲، "متوسط" (M)^۳ و "زیاد" (H)^۴ در نظر گرفت.



شکل ۳- متغیر زبانی معیار چروکیدگی



شکل ۴- متغیر زبانی معیار ضخامت



شکل ۵- متغیر زبانی معیار تماس

⁵ Crips

⁶ Python

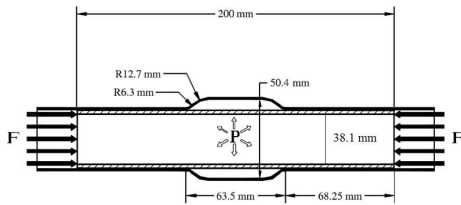
¹Very low

²Low

³Medium

⁴High

۴-۱- ابعاد، شکل و جنس قالب و لوله
 فرآیند به صورت Explicit-Dynamic شبیه‌سازی و ضریب اصطکاک بین لوله و قالب طبق مرجع [۱۸] ۰/۰۵ فرض گردید.



شکل ۸- نمایش قالب و ابعاد [۱۸] مورد استفاده

در این بررسی فرآیند هیدروفرمینگ لوله به صورت متقارن شبیه‌سازی گردیده است. برای ابعاد و جنس لوله و قالب از مرجع [۱۸] استفاده گردید که قطر خارجی لوله 38.1 mm، طول لوله 200 mm و ضخامت آن 3.18 mm در نظر گرفته شد. همچنین در شکل ۸ ابعاد قالب آورده شده است. برای کاهش زمان محاسبات و اجرای شبیه‌سازی بدون اینکه به کلیت مسئله خللی وارد شود قالب و لوله به صورت متقارن محوری در نظر گرفته شدند همچنین قالب به صورت صلب فرض شد و نیمی از قالب و لوله مدل گردید.

جنس لوله آلومینیم مورد استفاده در این تحقیق آلومینیوم-6063 T4 و می باشد که رفتار مکانیکی آن از رابطه توانی کار سختی هولمن $\sigma = K \bar{\epsilon}^n$ پیروی می کند که برخی از ثوابت مکانیکی و فیزیکی آن طبق استاندارد [ASTMB557] در جدول ۳ آورده شده است [۱۸].

جدول ۱- قانون‌های کنترل‌کننده برای خروجی تغذیه محوری

| "زیاد" Ic | | | | "متوسط" Ic | | | | "کم" Ic | | | | $\frac{I_t}{I_w}$ |
|-----------|----|----|----|------------|---|---|----|---------|---|----|----|-------------------|
| H | M | L | VL | H | M | L | VL | H | M | L | VL | |
| M | M | L | VL | H | H | H | H | H | H | M | M | VL |
| M | M | L | VL | H | H | H | M | H | M | M | M | L |
| L | L | VL | VL | M | M | M | M | M | M | L | L | M |
| L | VL | VL | VL | M | L | L | L | M | L | VL | VL | H |

جدول ۲- قانون‌های کنترل‌کننده برای خروجی فشار داخلی

| "زیاد" Ic | | | | "متوسط" Ic | | | | "کم" Ic | | | | $\frac{I_t}{I_w}$ |
|-----------|---|---|----|------------|---|---|----|---------|---|---|----|-------------------|
| H | M | L | VL | H | M | L | VL | H | M | L | VL | |
| M | M | M | H | VL | L | M | M | L | M | M | M | VL |
| M | M | M | H | VL | L | M | M | L | M | M | H | L |
| M | H | H | H | VL | L | M | M | L | M | M | H | M |
| H | H | H | H | VL | L | M | M | L | M | H | H | H |

جدول ۳- برخی خواص فیزیکی و مکانیکی آلومینیم [18] T4-6063

| | |
|----------------------------|-------|
| تنش تسلیم (MPa) | ۶۸ |
| چگالی (kg/m ³) | ۲۷۰۰ |
| نسبت پواسون ν | ۰/۳۳ |
| مدول الاستیک (Gpa) | ۶۸/۹ |
| K (MPa) | ۲۶۵/۲ |
| n | ۰/۱۶۶ |

جدول ۴- مسیر بارگذاری تک مرحله‌ای

| | | |
|------------------|---|------|
| زمان | ۰ | ۱ |
| فشار (MPa) | ۰ | ۵۰ |
| تغذیه محوری (mm) | ۰ | ۹.۷۹ |

۵- نتایج و بحث

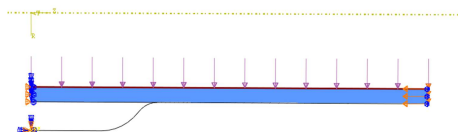
۵-۱- بررسی کارایی روش

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کنترل انجام شده برای تمامی حالت‌ها به‌جز حالتی که در آن مقدار ضریب اصطکاک ۰/۱۶ انتخاب شده است موفق بوده و قطعه نهایی در حدود کنترلی خود قرار گرفته است. یعنی در تمامی قطعات شکل‌گرفته کمترین ضخامت در محدوده ۱۰۰٪-۸۰٪ ضخامت اولیه لوله بوده و قطعات بدون چروکیدگی شکل گرفتند. مسیر بارگذاری برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ در دما ۲۰ °C ضخامت ۲/۵ میلی‌متر شعاع گوشه‌های (۲۰۰۹) میلی‌متر و ضریب اصطکاک ۰/۵ به‌صورت زیر به‌دست‌آمده است. زمان کل این فرآیند تا شکل‌گیری ۰/۳۹۲ ثانیه و در پایان معیار تماس ۰/۹۸، معیار چروکیدگی صفر و معیار تغییر ضخامت ۰/۴۳ به دست آمد.

همانطور که نمودارهای شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد، فرآیند هیدروفرمینگ لوله در سه مرحله صورت می‌گیرد: مرحله اول: تغییر شکل اولیه، مرحله دوم: نیمه فرآیند و مرحله سوم مرحله کالیبراسیون و شکل‌گیری لوله با هندسه مورد نظر. در مرحله اول چون فشار پایین می‌باشد افزایش تغذیه محور باعث ایجاد چروکیدگی می‌گردد. در این مرحله فشار و تغذیه محوری و همچنین معیار تماس با شیب ثابت افزایش می‌یابد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). با توجه به اینکه در این مرحله تنش‌ها و کرنش‌های اعمالی در محدوده الاستیک می‌باشند ضخامت تغییرات کمی از خود نشان داده و تقریباً ثابت باقی می‌ماند (شکل ۱۲) که این مرحله تقریباً ۰/۲۵ ثانیه زمان می‌برد. در مرحله دوم فرآیند هیدروفرمینگ ماده به تسلیم رسیده و در ناحیه پلاستیک تغییر ضخامت ناگهانی در قطعه رخ می‌دهد در این مرحله به منظور کنترل و جلوگیری از کاهش ضخامت زیاد لوله، فشار تغییرات کمی را خواهد داشت. این مرحله تا زمان رسیدن لوله به سطح مرکز قالب یعنی تقریباً تا زمان ۰/۳۵ ثانیه ادامه می‌یابد (شکل ۱۲). همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است در این مرحله همچنین میزان چروکیدگی لوله رو به افزایش است ولی با رسیدن به سطح قالب کم می‌شود. در مرحله سوم فرآیند هیدروفرمینگ و با رسیدن لوله به سطح قالب در مرکز و با افزایش بیشتر فشار چروکیدگی از بین می‌رود. در این مرحله شعاع‌های گوشه پر می‌شود و معیار تماسی افزایش می‌یابد. تغییرات ضخامت نیز در این مرحله کم می‌شود (شکل ۱۲). همان‌طور که در نمودار شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد در زمان ۰/۳۴ ثانیه از فرآیند، چروکیدگی به‌سرعت افزایش یافته و همان‌طور که از نمودارهای شکل ۱۴ مشخص است در همان ثانیه α به سرعت کم می‌شود تا تغذیه محوری، کمتر افزایش یابد و چروکیدگی را جبران کند. لذا این نمودارها نشان می‌دهند که فرآیند کنترل فازی با دقت مطلوبی عمل کرده است. شکل نهایی لوله هیدروفرم شده حاصل از شبیه‌سازی المان محدود با مشخصات ذکر شده که مسیر بارگذاری آن توسط کنترل فاز بهینه گردیده است در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

۴-۲- بارگذاری، شرایط مرزی، مش بندی و نوع المان

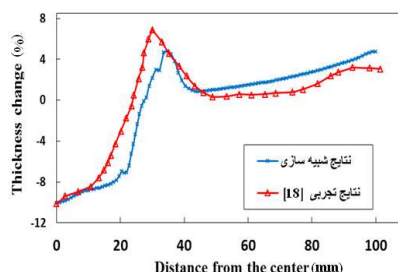
قیدهای اعمالی بر قالب به‌صورتی است که آن را ثابت در نظر گرفته است. بدلیل تقارن موجود در لوله و قالب در راستای طولی و شعاعی تنها یک هشتم قالب و لوله را می‌توان مدل کرد و وسط لوله در محل هیدروفرم طوری مقید شده است که تنها در راستای شعاعی و طولی حرکت داشته و حول این محور حرکت چرخشی نداشته باشد. در شکل ۹ نحوه بارگذاری و شرایط مرزی اعمالی نشان داده شده است. مسیر بارگذاری طبق مرجع [۱۸] به‌صورت تک‌مرحله‌ای و فشار پایین بوده و در جدول ۴ آورده شده است. نوع المان CAX4R در حالت Explicit با تقارن محوری تنش اعمالی، تعداد المان در راستای ضخامت ۴ و در راستای طول ۱۰۰ فرض شد که تعداد کل المان‌ها ۴۰۰ عدد می‌شود. همچنین برای مدل کردن اصطکاک بین لوله و قالب از مدل کلمب استفاده شد و فرآیند در دمای محیط انجام می‌شود ضمن اینکه سایر پارامترها به‌صورت پیش‌فرض در نظر گرفته شد. [۱۸].



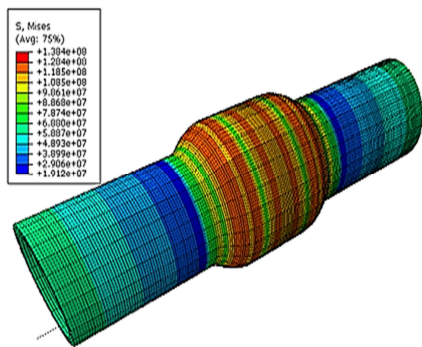
شکل ۹- شرایط مرزی و نحوه بارگذاری در شبیه‌سازی فرآیند

۴-۳- اعتبار سنجی

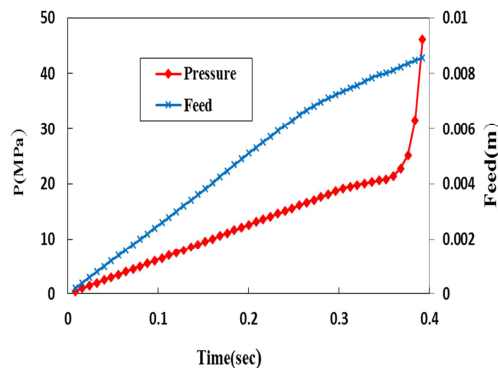
جهت اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود توسعه داده شده همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است نتایج شبیه‌سازی مربوط به تغییرات ضخامت لوله در واحد طول با نتایج تجربی مرجع [۱۸] مقایسه شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهند که نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی دارای انطباق خوب و قابل قبولی با متوسط خطای ۱۸ درصد در مقادیر می‌باشد در حالیکه تغییرات ضخامت با فاصله از مرکز روند یکسانی طی می‌کند.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات ضخامت نتایج شبیه‌سازی و تجربی [۱۸] در راستای طولی قطعه



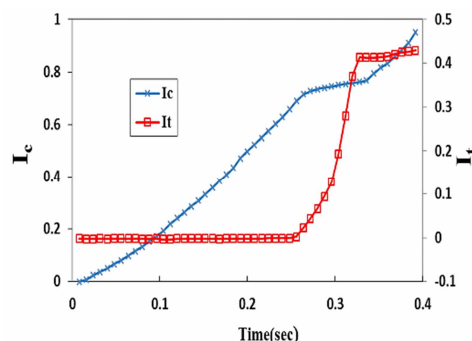
شکل ۱۵- لوله شبیه‌سازی بعد از اتمام فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از کنترل فازی



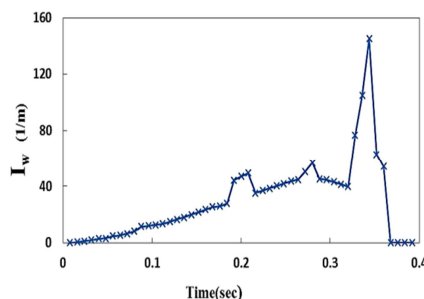
شکل ۱۱- نمودار فشار و تغذیه محوری طی فرایند

۵-۲- اثر اصطکاک

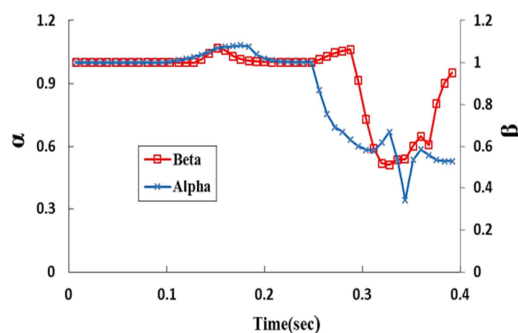
جهت بررسی اثر اصطکاک لوله و قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با ضخامت ۱/۵ میلیمتر و شعاع‌های گوشه ۲۰ و ۹ میلی‌متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، از ضرایب اصطکاک مختلف صفر (بدون اصطکاک)، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۶ تا ۰/۶، با فاصله ۰/۱، شبیه‌سازی فرآیند انجام و کنترل آن صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که برای ضرایب اصطکاک ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ کاهش ضخامت بیشتر از حد مجاز رخ خواهد داد، و هیدروفرمینگ در این شرایط اصطکاک می‌مجاز نمی‌باشد. در نمودارهای شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نتایج مربوط به میزان چروکیدگی، تغییر ضخامت و شکل‌پذیری (معیار تماس) برحسب تغذیه محوری برای لوله با مشخصات ذکر شده در شرایط اصطکاک می‌مجاز یعنی ضرایب اصطکاک f صفر تا ۰/۴ ارائه شده است. همانطور که از نمودارهای شکل ۱۶ مشخص می‌باشد، با افزایش مقدار اصطکاک از چروکیدگی لوله کاسته می‌شود به طوری که چروکیدگی برای اصطکاک ۰/۴ بسیار کوچک بوده و تقریباً بدون چروکیدگی می‌باشد. علت این رخداد بدلیل نقش اصطکاک در جلوگیری از حرکت ماده به سمت حفره قالب و تغذیه محوری است که نمی‌تواند به قسمت‌های داخلی لوله انتقال یابد. هر چه مقدار اصطکاک افزایش یابد، معیار کاهش ضخامت بیشتر می‌شود به طوری که در ضریب اصطکاک ۰/۴ معیار ضخامت به ۱ می‌رسد و لوله در ضخامت دچار واماندگی می‌شود (شکل ۱۷). معیار تماس با افزایش اصطکاک دیرتر به مقدار لازم می‌رسد به طوری که بازم برای ضریب اصطکاک ۰/۴ به میزان لازم نمی‌رسد. در این حالت در واقع اصطکاک مانع تغذیه محوری شده و اجازه حرکت ماده به داخل حفره قالب را نمی‌دهد و با افزایش فشار جهت جبران ضخامت لوله کاهش می‌یابد. از طرف دیگر چون چروکیدگی رخ نداده است، ضخامت بیشتر کاهش می‌یابد.



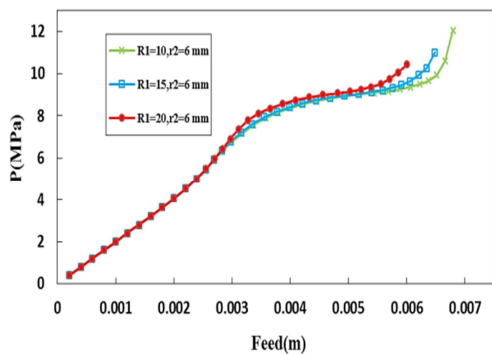
شکل ۱۲- نمودار معیار تماس (I_c) و معیار ضخامت (I_t) طی انجام فرایند هیدروفرمینگ لوله



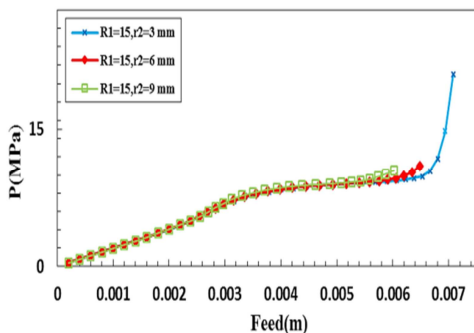
شکل ۱۳- نمودار تغییرات معیار چروکیدگی (I_w) طی فرایند هیدروفرمینگ لوله



شکل ۱۴- نمودارهای ضریب افزایش فشار (β) و ضریب تغذیه محوری (α) طی فرایند هیدروفرمینگ لوله



شکل ۱۹- منحنی بارگذاری در شعاع گوشه خارجی مختلف

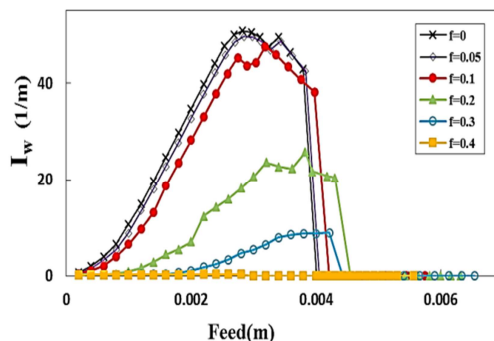


شکل ۲۰- منحنی بارگذاری در شعاع گوشه داخلی مختلف

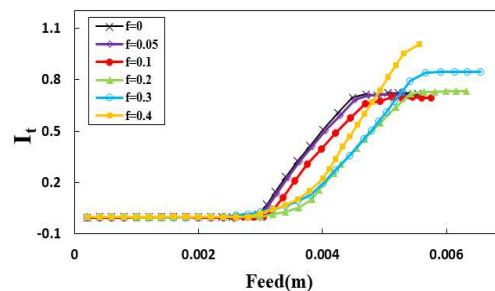
همان‌طور که از نمودارهای شکل ۱۹ و ۲۰ ملاحظه می‌گردد با کاهش شعاع گوشه لوله می‌بایست فشار و تغذیه محوری افزایش یابد، و نتایج نشان می‌دهند که فشار و تغذیه محوری در شعاع گوشه داخلی کوچک‌تر بیشتر افزایش می‌یابد. علت این رخداد به این دلیل می‌باشد که حرکت و تغییر شکل و در نتیجه رسیدن ماده به شعاع‌های کوچک‌تر، مشکل‌تری باشد بنابراین نیازمند افزایش فشار و تغذیه محوری می‌باشد. با کاهش شعاع در شعاع‌های گوشه داخلی در مقابل سیلان ماده مقاومت ایجاد می‌شود و تغییر شکل سخت‌تر انجام می‌گیرد؛ بنابراین لازم است فشار افزایش یابد تا هیدروفرمینگ لوله کامل شود.

۶- نتیجه‌گیری

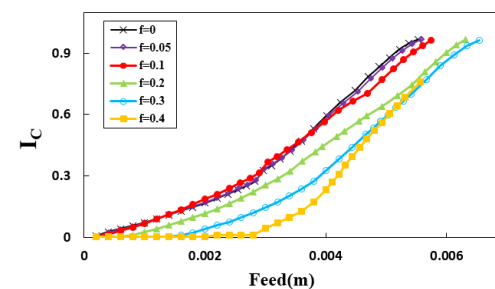
معیار ارائه شده چروکیدگی برای لوله‌های متقارن بدلیل سادگی، ملموس و قابل فهم بودن و همچنین عدم نیاز به اطلاعات اولیه روشی بسیار کارآمد می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داد روش تطبیقی ارائه شده در این مطالعه و کنترل‌کننده فازی مربوط به آن جهت یافتن مسیر بارگذاری بهینه فرآیند هیدروفرمینگ لوله بدلیل توانایی آن در یافتن مسیر بدون عیب‌های تعریف شده بسیار توانا و مناسب بوده و با یک شبیه‌سازی می‌تواند مسیر بارگذاری مناسب را بصورت هوشمند ارائه کند. بطوریکه اگر در طول فرآیند گام‌های (زمانی، تغذیه و فشاری) بطور متناسب انتخاب نشوند می‌تواند با تغییر آن‌ها طبق فرآیند این موارد را اصلاح کرده و مسیر مناسب انتخاب شود. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک میزان چروکیدگی لوله کاهش یافته در حالیکه فشار و تغذیه محوری مورد نیاز فرآیند افزایش خواهد یافت ضمن اینکه



شکل ۱۶- معیار چروکیدگی برحسب تغذیه محوری در ضرائب اصطکاکی مختلف



شکل ۱۷- معیار ضخامت برحسب تغذیه محوری در اصطکاک‌های مختلف



شکل ۱۸- معیار تماس برحسب تغذیه محوری در ضرائب اصطکاکی مختلف

۵-۳- اثر شعاع گوشه

در نمودارهای شکل های ۱۹ و ۲۰ نتایج اثر شعاع گوشه لوله توسط شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ لوله با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در دمای شکل دهی ۲۰ درجه سلیسوس و ضریب اصطکاک ۰/۰۵، برای شعاع های گوشه داخلی (r) ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر و شعاع گوشه‌های خارجی (R) ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر ارائه شده است. شعاع گوشه داخلی (r) و شعاع گوشه خارجی (R) در شکل ۶ با مقادیر به ترتیب ۶/۳ و ۱۲/۷ نشان داده شده است.

- [15] Shu-hui L., Bing Y., Wei-gang Z. and Zhong-qin L., Loading path prediction for tube hydroforming process using a fuzzy control strategy. *Materials and Design*, Vol. 29 , No.2, pp. 1110-1116, 2008.
- [16] Di Lorenzo R., Filice L., Umbrello D. and Micari F., Optimal design of tube hydroforming processes: a fuzzy-logic-based approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 218 Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 21 , No.8, pp. 599-606, 2004.
- [17] Mohammadi F., Kashanizade H. and MosaviMashadi M., Optimization using finite element analysis, neural network, and experiment in tube hydroforming of aluminium T joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 21 , No.8, pp. 1299-1305, 2007.
- [18] 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, pp. 1504-1514, 2005.

کاهش ضخامت افزایش و شکل پذیری لوله کاهش می یابد. همچنین نتایج حاکی از افزایش تغذیه محوری و فشار داخلی با کاهش شعاع گوشه لوله می باشد ضمن اینکه تاثیر شعاع داخلی از شعاع خارجی لوله در فرآیند بیشتر می باشد.

۷- مراجع

- [1] 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.
- [2] Zhang H. and Shi-Hong D., Developments in hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, No.1, pp. 236-244, 1999.
- [3] Ghosh, Angshuman B., Deshmukh K. and Ngaile G., Database for real-time loading path prediction for tube hydroforming using multidimensional cubic spline interpolation. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No.1, pp. 150-166, 2011.
- [4] Fann H., Kuang-Jau M. and Hsiao P. Y., Optimization of loading conditions for tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No.1, pp. 520-524, 2003.
- [5] Aue-U-Lan Y., Ngaile G. and Altan T., Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No.1, pp. 137-143, 2004.
- [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, pp. 653-657, 2006.
- [7] Abedrabbo N., Worswick M., Mayer R. and Riemsdijk I. V., Optimization methods for the tube hydroforming process applied to advanced high-strength steels with experimental verification." *journal of materials processing technology*, Vol. 209, No.1, pp. 110-123, 2009.
- [۸] افتخاری شهری س. ا.، خلیلی خ.، احمدی بروغنی س. ی.، بهینه سازی منحنی فشار جابجایی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله با استفاده از روش رویه پاسخ چند مرحله ای. مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۳، ش. ۱۳، ص. ۱۷۶-۱۸۷، ۱۳۹۲.
- [۹] سیدکاشی س. م. ح.، مسلمی نائینی ح.، لیاقت غ.، موسوی مشهدی م. و هون مون ی.، مطالعه عددی و تجربی اثر نسبت انبساط، شعاع گوشه و نرخ کرنش در فرآیند هیدروفرمینگ گرم لوله های آلومینیومی. مهندسی مکانیک مدرس، د. ۱۲، ش. ۵، ص. ۱۳۱-۱۳۲، ۱۳۹۱.
- [۱۰] کدخدایان م. و عرفانی مقدم ح.، طراحی مسیرهای بهینه بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ T شکل با اعمال مسیر فشار نوسانی. روش های عددی در مهندسی، د. ۲۹، ش. ۲، ص. ۱۲۰-۱۰۳، ۱۳۸۹.
- [11] Ghosh A., Deshmukh K. and Ngaile G., Database for real-time loading path prediction for tube hydroforming using multidimensional cubic spline interpolation. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No.1, pp. 150-166, 2011.
- [12] Ge Y. L., Li X., Lang L. H. and Ruan S., An adaptive loading path design method for tube hydroforming using fuzzy logic theory. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 39, No.7, pp. 2607-2617, 2011.
- [13] 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.
- [14] Chu E. and Xu Y., Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, No.2, pp. 263-283, 2004.