Archive of SID

مقاله

بهینه‌سازی نرخ تغذیهٔ محوری در هیدروفرمینگ لوله‌های تیلور جوش با استفاده از روش متامدل

مهدی ظهور، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

غلامعلی خواجوند، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم وتحقیقات
Ali_khajvand@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، یک لولهٔ تیلور جوش - لوله‌ای متشکل از دو لوله با ضخامت دیوارهٔ متفاوت - در نظر گرفته و فرض شده است که فشار داخلی آن با یک شیب ثابت افزایش می‌یابد و نرخ تغذیهٔ محوری قابل تغییر است. اعمال نامناسب نرخ تغذیهٔ محوری منجر به چروکیدگی دیوارهٔ محصول نهایی می‌گردد؛ لذا جهت دست‌یابی به یک مسیر بهینه برای نرخ تغذیهٔ محوری، ترکیبی از روش اجزاء محدود و روش متامدل به‌کار گرفته شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج، از روش اجزاء محدود با نتایج محققان دیگر، یک مسیر بهینه برای نرخ تغذیهٔ محوری - با تعریف تغییرات ضخامت دیواره به‌عنوان تابع هدف - به‌دست آمده است. مسیر بهینهٔ به‌دست آمده منجر به پرشدن کامل قالب می‌شود و کمترین تغییرات ضخامت را ایجاد می کند.

واژه‌های کلیدی: لولهٔ تیلور جوش، بهینه‌سازی، هیدروفرمینگ، روش اجزاء محدود، متامدل

مقدمه

صنایع خودروسازی در تلاش است تا خودروهایی با وزن کم، کیفیت بالا و هزینهٔ پایین تولید کند. یک روش مبتکرانه برای طراحی چنین خودروهایی، ساخت قطعات تشکیل‌دهندهٔ بدنه با استفاده از ورق‌ها و لوله‌های تیلور جوش[1] (TW) است. لولهٔ تیلور جوش لوله[2] (TWT) فلز مرکبی است که از جوش‌دادن لوله‌های فلزی متفاوت به‌دست می‌آیند و توسط روش هیدروفرمینگ شکل‌دهی می‌شوند. فرایند جوشکاری این لوله‌ها می‌تواند اصطکاکی، فرکانس‌بالا یا لیزر باشد که اغلب از جوشکاری لیزر به‌دلیل ظاهر و عملکرد بهتر آن استفاده می‌شود. از مهم‌ترین محاسن استفاده از لوله‌های مذکور می‌توان به افزایش تلرانس هندسی و ابعادی قطعهٔ نهایی، تولید محصولی با جنس و ضخامت‌های متفاوت در نواحی گوناگون، همچنین بهبود مقاومت قطعهٔ نهایی نام برد. این مزیت‌ها عمدتاً

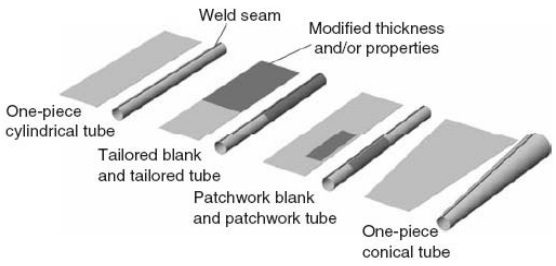
Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir

www.SID.ir

Archive of SID

ناشی از کاربرد فشار مایع به‌عنوان بخشی از ابزار تغییرشکل در فرایند می‌باشد [۱].

امروزه اکثر محققان به بررسی هیدروفرمینگ ورق‌های تیلور جوش[۳] (TWB) پرداخته‌اند. لیو[٤] و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش اجزاء محدود به مطالعهٔ لوله‌های تیلور جوش با دو قطر متفاوت در فرایند هیدروفرمینگ پرداخته‌اند [۱]. در مقالهٔ حاضر، بالجینگ لوله‌ای متشکل از دو لوله با ضخامت دیوارهٔ متفاوت، در قالبی که فشار درون محفظه و تغذیهٔ محوری فک‌های آن متغیر می‌باشد، مطالعه شده است و پس از صحت‌سنجی با نتایج سایر محققان، با استفاده از روش بهینه‌سازی متامدل، الگوریتمی برای بهینه‌سازی تابع هدف – که همانا تغییرات ضخامت دیوارهٔ محصول نهایی می‌باشد – پیاده‌سازی شده است.



شکل۱. نمونه‌هایی از لوله‌های تیلور جوش با چیدمان‌های متفاوت

شکل‌دهی لوله‌های تیلور جوش، به‌دلیل وجود ناحیهٔ جوش که به‌نوعی یک ناحیهٔ مستعد پارگی محسوب می‌شود، به‌شدت وابسته به انتخاب صحیح پارامترهای شکل‌دهی می‌باشد. بررسی روند تغییرات فشار و نرخ تغذیهٔ محوری در شکل‌دهی هیدروفرمینگ لوله‌های تیلور جوش با استفاده از روش اجزاء محدود و همچنین بهینه‌سازی فرایند براساس پارامترهای مؤثر بر آن را می‌توان جنبه‌های جدید این مقاله دانست.

مدل‌سازی اجزاء محدود

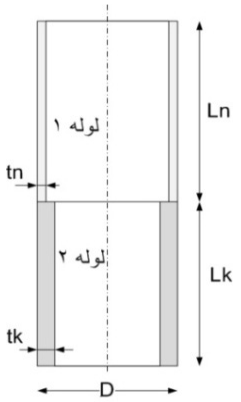
شناخت دقیق فرایند در شبیه‌سازی اجزاء محدود از اهمیت بالایی برخوردار است. فرضیات مورد استفاده جهت مدل‌سازی عبارت‌اند از:

- لوله ایزوتروپیک فرض شده است.
- از تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری دو لوله صرف‌نظر شده است.
- سطح تماس بین لوله و قالب به‌صورت خشک در نظر گرفته شده است.

مشخصات لولهٔ تیلور جوش مورد استفاده در جدول ۱ داده شده است.

جدول۱. مشخصات مدل (ابعاد به میلی‌متر)

طول		ضخامت		قطر خارجی
L_n	L_k	t_n	t_k	D
۸۰	۸۰	۲	۲/۵	٤۰



شکل۲. لولهٔ تیلور جوش مورد بررسی

جهت تعریف خواص مکانیکی لوله و ناحیهٔ جوش، از معادلهٔ ۱، که به معادلهٔ لودویک – هالومون[٥] معروف است، با ضرائب نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است [۱].

$$\sigma = K \varepsilon^n \qquad (۱)$$

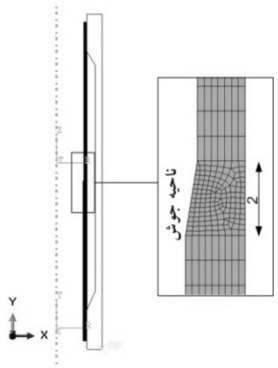
Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲. خواص مکانیکی لوله و ناحیهٔ جوش

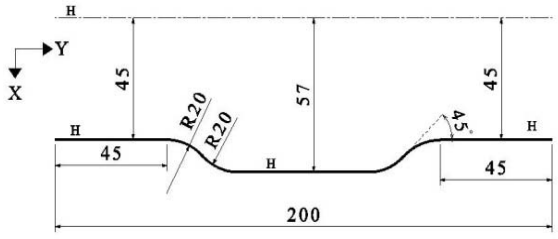
	جنس	K (مگاپاسکال)	کرنش‌سختی (n)
لوله	فولاد AISI1005	٥٦١	۰/۱۷۵۷
ناحیهٔ جوش	–	۱۱٦٥	۰/۱۱٥٤

برای مدل‌سازی اجزاء محدود مسئلهٔ تعریف‌شده، از نرم‌افزار ABAQUS 6.10 استفاده شده است. با توجه به ماهیت شبه‌استاتیک[٦] مسئله، از حلگر Explicit نرم‌افزار استفاده شده است [۷]. وجود تقارن محوری در لوله و قالب این امکان را فراهم می‌کند که مدل به‌صورت دوبعدی ایجاد شود.



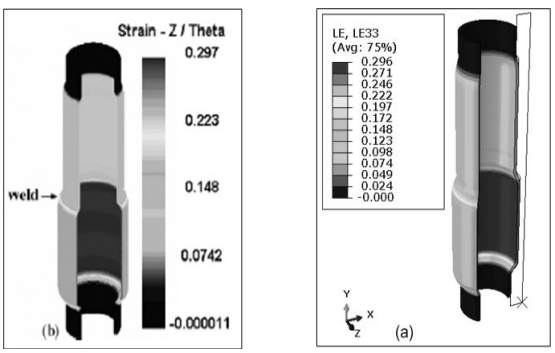
شکل۳. مدل‌سازی مسئله و تعریف ناحیهٔ جوش

همان‌گونه که در شکل ۳ نیز ملاحظه می‌شود، ناحیهٔ جوش به عرض ۲ میلی‌متر، دو لوله با ضخامت‌های متفاوت را به هم متصل کرده است. به‌دلیل تقارن محوری از المان‌های سازه‌ای چهار گره‌ای CAX4R استفاده شده است [۲]. المان‌ها از فرمولاسیون انتگرال کاهش‌یافته استفاده می‌کنند. قالب به‌صورت جسم صلب Analytical و لوله به‌صورت جسم تغییرشکل پذیر مدل شده‌اند. در نواحی تماس، فرمولاسیون Kinematic با ضریب اصطکاک ۰/۱۲ استفاده شده است.



شکل۴. ابعاد قالب بالجینگ (ابعاد به میلی‌متر)

فشار درون محفظه به‌صورت تابعی خطی در طول زمان شکل‌دهی، از صفر تا ۱۰۰ مگاپاسکال، افزایش می‌یابد. جابه‌جایی محوری بر لوله اعمال نمی‌شود و دو انتهای لوله به‌صورت کامل مقید شده‌اند که این امر با توجه به درپوش‌های مخروطی – که در عمل جهت آب‌بندی استفاده می‌شوند – لحاظ شده است. پس از حل مسئله و با مقایسهٔ کرنش حلقوی[۷] در مدل حاضر با نتایج ارائه‌شده توسط لیو [۱]، که توسط نرم‌افزار Deform انجام شده، تطابق نزدیکی میان نتایج مشاهده شد.



(ب) (الف)

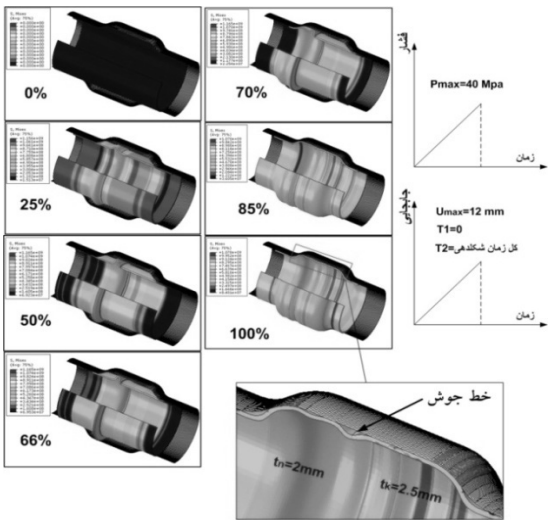
شکل۵. مقایسهٔ کرنش حلقوی در مدل ایجاد شده در الف) نرم‌افزار ABAQUS ب) نرم‌افزار Deform

به‌منظور بهبود و کاهش فشار مورد نیاز شکل‌دهی، اعمال جابه‌جایی محوری ضروری است. متغیرهای جابه‌جایی محوری عبارتند از حداکثر جابه‌جایی و زمان آغاز و پایان آن. انتخاب نادرست پارامترهای مربوط به جابه‌جایی محوری منجر به ایجاد قطعه معیوب می‌شود

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

که این امر هدف اصلی جابه‌جایی محوری را ارضاء نمی‌کند. همان‌گونه در شکل ٦ نیز مشاهده می‌شود انتخاب نادرست جابه‌جایی محوری به ایجاد چروکیدگی در لولهٔ با ضخامت جدارهٔ کمتر می‌انجامد.



شکل۶. تأثیر انتخاب نادرست جابه‌جایی محوری بر کیفیت محصول نهایی در مراحل گوناگون پیشرفت فرایند

بهینه‌سازی

در مدل حاضر سه متغیر t_1، t_2 ، U_{max} که به‌ترتیب عبارت‌اند از: زمان شروع تغذیهٔ محوری، زمان توقف تغذیه محوری و حداکثر جابه‌جایی محوری، متغیرهای طراحی مسئله می‌باشند. فشار درون محفظه با سرعت ۱۰۰ مگاپاسکال بر ثانیه در یک بازهٔ زمانی ۱۰ ثانیه‌ای افزایش می‌یابد. نخستین گام در بهینه‌سازی یک مسئله، مدل‌نمودن آن یا به‌عبارتی مشخص‌کردن متغیرهای طراحی، قیود مربوطه و همچنین تابع هدف می‌باشد [۳]. هدف از بهینه‌سازی مینیمم‌نمودن تابع هدف یا مینیمم‌نمودن تغییرات ضخامت جدارهٔ لوله بعد از شکل‌دهی است. قید Implicit به‌منظور حصول اطمینان از اینکه لولهٔ اولیه به‌صورت کامل محفظهٔ قالب را پر می‌کند و قید Explicit نیز به بررسی اینکه زمان توقف تغذیه محوری بزرگتر از زمان شروع تغذیه محوری باشد می‌پردازد.

جدول۳. تعریف تابع هدف و قیود مربوطه

تابع هدف	$\min f(t_1, t_2, U_{max}) = \left\| \frac{h_k - h_{k0}}{h_{k0}} + \frac{h_n - h_{n0}}{h_{n0}} \right\|$
قید Implicit	$g_{implicit} = \frac{V_f}{V_0} \approx 0$
قیود Explicit	$g_{explicit} = t_1 - t_2 \leq 0$ $g_{explicit} = U_{max} - \vartheta(t_2 - t_1) \leq 0$
مشخصات اولیه	$0s \leq t_1 \leq 5s$ $3s \leq t_2 \leq 10s$ $0mm \leq U_{max} \leq 9mm$

در جدول ۳، h_k و h_n به‌ترتیب ضخامت نهایی لولهٔ نازک و لولهٔ کلفت، h_{k0} و h_n به‌ترتیب ضخامت اولیهٔ لولهٔ نازک و لولهٔ کلفت و V_f و V_0 به‌ترتیب حجم محصور مابین محصول نهایی و جدارهٔ قالب و لولهٔ اولیه و جدارهٔ قالب می‌باشد. اکنون با استفاده از روش LHS[8] به مشخص‌نمودن مقادیر متغیرهای طراحی (t_1، t_2، U_{max}) در هر آزمایش می‌پردازیم [۵]. همان‌طور که در جدول ٤ نیز مشخص است، مسیر A مربوط به لحظه ابتدایی (بدون تغییر شکل) می‌باشد و در مسیر B حرکت محوری اعمال نمی‌گردد و قالب با شکل‌دهی با فشار سیال انجام می‌گیرد. با محاسبات انجام‌شده به‌کمک روش‌های فوق، جدول ٤، مقادیر قید Implicit و تابع هدف را برای مدل‌های متفاوت نشان می‌دهد.

با مشخص‌شدن مقادیر تابع هدف و قیود، نوبت به استفاده از روش RSM[9] جهت استخراج مقادیر بهینه می‌رسد. جهت به‌کارگیری روش RSM از جعبه‌ابزار rstool در نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود. این جعبه‌ابزار با توجه به متغیرهای ورودی سطح پاسخ

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

مورد نظر را محاسبه می‌نماید و به‌صورت دوبعدی در وجوه لازم نمایش می‌دهد. مثلاً برای یک مسئله با سه متغیر، تابع پاسخ می‌تواند به‌صورت یکی از حالات زیر باشد:

جدول۴. مشخصات مدل‌های ایجاد شده و مقادیر تابع هدف و قید Implicit برای مدل‌های گوناگون

مشخصه مسیر	t_1 (Sec)	t_2 (Sec)	U_{max} (mm)	تابع هدف	قید Implicit
A	-	-	-	۰	-
B	۰	۰	۰	۰/۱٤	۰/۰۱
C	۰	۳	۹	۰/۲٤	۰/۱۳
D	۰	۱۰	۹	۰/۱۹	۰/۰۸
E	٤/۸	٦/۲	۷/۷	۰/۲۸	۰/۲۳
F	۰	۲/٥	۸/۳	۰/۲۱	۰/۰۳

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \ldots \\ b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \ldots \qquad (۲)$$

در مسئله پیشروی سه متغیر وجود دارد که باید به‌صورت ماتریسی تعریف شوند. ماتریس x که بیانگر تعداد و مقدار متغیرهاست به‌صورت زیر در محیط MATLAB بیان می‌گردد [٦].

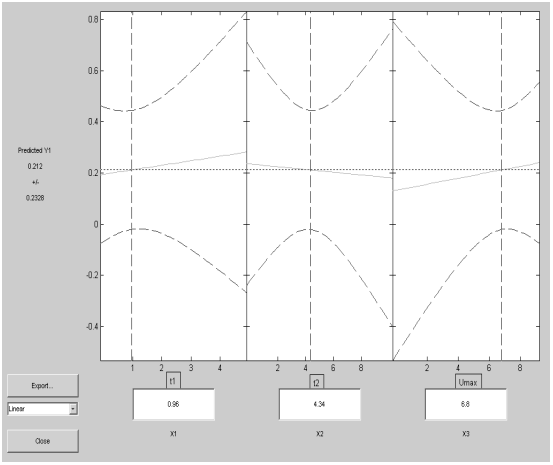
$$\begin{matrix} t_1 & t_2 & U_{max} \end{matrix}$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.0000 & 9.0000 \\ 0 & 10.0000 & 9.0000 \\ 4.8000 & 6.2000 & 7.7000 \\ 0 & 2.5000 & 8.3000 \end{bmatrix}$$

تابع هدف را نیز به شکل بردار زیر تعریف می‌کنیم:

[۰/۱٤ ۰/۲٤ ۰/۱۹ ۰/۲۸ ۰/۲۱]

حال با اجرای دستور rstool(X,Y) در نرم‌افزار MATLAB یک رابطهٔ گرافیکی همانند شکل ۷ ظاهر می‌گردد که در آن مقادیر بهینهٔ متغیرها نمایش داده می‌شود.

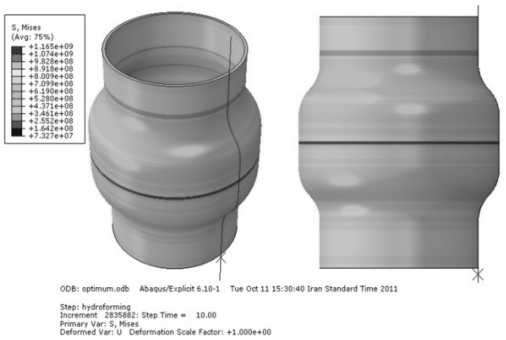
مقادیر U_{max} = ٦/۸ , t_2=٤/۳٤ , t_1= ۰/۹٦ به‌عنوان مقادیری که تابع فیت‌شده بر داده‌ها را مینیمم می‌کند به‌دست آمده‌اند. در جعبه‌ابزار استفاده شده از چندجمله‌ای خطی استفاده شده است که ضرایب آن به‌صورت زیر به‌دست آمده‌اند:



شکل۷. رابط گرافیکی جعبه‌ابزار rstool

b_0=۰/۱۳۹ , b_1=۰/۰۱۷ , b_2= -۰/۰۰٥ , b_3=۰/۰۱۱

حال با استفاده از مقادیر به‌دست آمده تحلیل اجزاء محدود را مجدداً اجرا و نتایج مقایسه می‌گردد.



شکل۸. شکل‌دهی بهینه لولهٔ تیلور جوش با نسبت ضخامت۱: t_k/t_n= ۱/۲٥

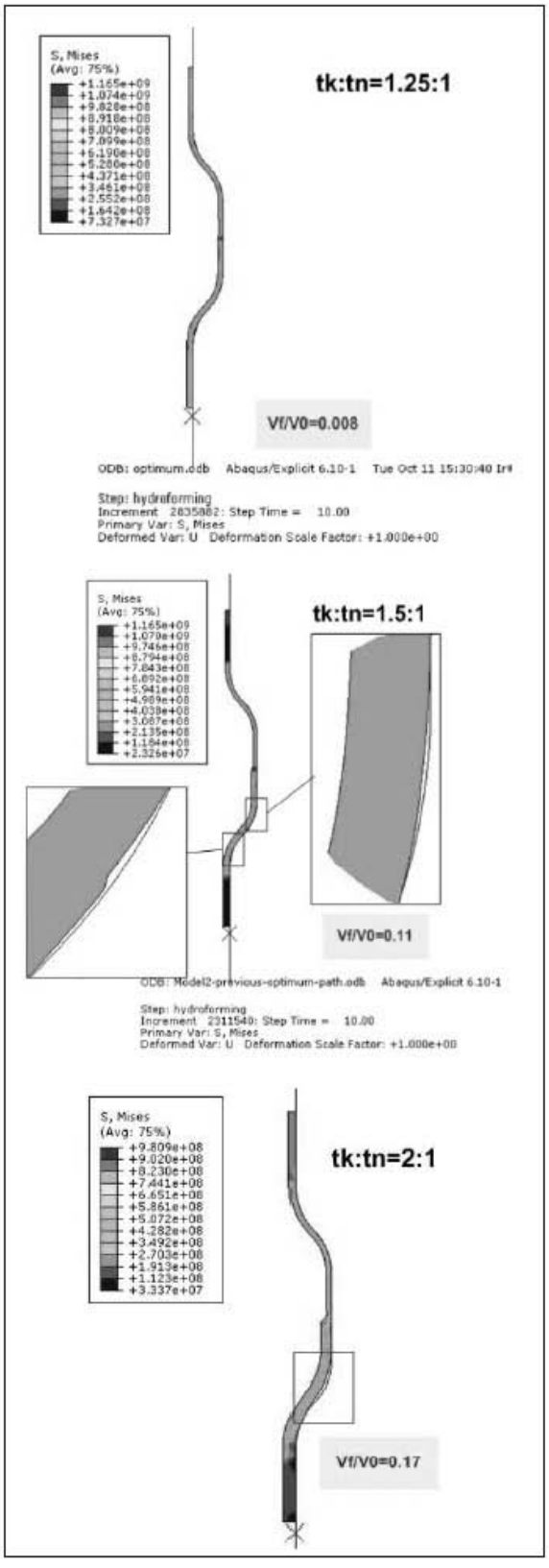
با بررسی تأثیر نسبت ضخامت لولهٔ تیلورجوش روی مسیر بهینهٔ تغذیهٔ محوری به‌دست آمده، مشاهده شد که مسیر بهینهٔ به‌دست آمده برای نسبت ضخامت ۱/۲٥:۱ در مورد مدل‌های دیگر با نسبت‌های ضخامت متفاوت صادق نیست و نیاز به بهینه‌سازی مجدد است (شکل۹).

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

با استفاده از مسیر بهینه برای تغذیهٔ محوری، قالب به‌صورت کامل پر شده است و همچنین توزیع تنش یکنواخت‌تری ایجاد گردید. مسیر بهینهٔ به‌دست آمده برای نسبت ضخامت ۱/۲۵:۱می‌باشد و در مورد مدل‌های دیگر با نسبت‌های ضخامت متفاوت صادق نمی‌باشد و نیاز به بهینه‌سازی مجدد است؛ لذا مسیر بهینهٔ به‌دست آمده برای یک حالت را نمی‌توان به حالت‌های دیگر تعمیم داد. اعمال تغذیهٔ محوری نامناسب منجر به ایجاد چروکیدگی در ناحیهٔ اتصال دو نیمه به هم شده و در صورت ادامه بیش ازحد تغذیه، چروکیدگی در نواحی ابتدایی لوله‌ها رخ خواهد داد. در هیدروفرمینگ لوله‌های تیلور جوش که دو لولهٔ هم‌جنس با ضخامت دیوارهٔ متفاوت به‌یکدیگر جوش داده شده‌اند، خط جوش به‌سمت نیمهٔ ضخیم‌تر کشیده می‌شود.



شکل۹. عدم ثبات مسیر بهینهٔ تغذیه با تغییر نسبت ضخامت

مراجع

[1] Gang Liu, Shijian Yuan, Guannan Chu; "FEA on deformation behavior of tailor-welded tube in hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 287–291, (2007).

[2] User Guide Documentation of ABAQUS.

[3] M. H. A. Bonte, A. H. van den Boogaard, J. Hu´etink;"*Solving optimization problems in metal forming using Finite Element simulation and metamodelling techniques*, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, In Structural and Multidisciplinary Optimization, volume 42, pp. 797-810, (2010).

[4] Bing Li, "*Multi-objective Optimization of Forming Parameters for Tube Hydroforming Process Based on the*

www.SID.ir

Archive of SID

پی‌نوشت

1. Tailor Welded (TW)
2. Tailor Welded Tube (TWT)
3. Tailor Welded Blank (TWB)
4. Liu
5. Ludwick – Hollomon
6. Quasi-static
7. Hoop Strain
8. Latin Hypercube sampling (LHS)
9. Response Surface Methodology (RSM)

✶ ✶ ✶

Taguchi Method", McMaster Manufacturing Research Institute, (2006).

[5] T. W. Simpson, J. D. Peplinski, P. N. Koch, and J. K. Allen; "*Metamodels for computer-based engineering design*", Survey and recommendations, Engineering with Computers, pp.17:129–150, (2001).

[6] MATLAB User's Guide-Optimization Toolbox for Use with Matlab.

[7] Yingyot Aue-U-Lan, Gracious Ngaile, Taylan Altan; "Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 137–143, (2004).

www.SID.ir