

بررسی پارامترهای هندسی و فیزیکی مؤثر در هیدروفرمینگ لوله‌های سه‌لایه کامپوزیتی به کمک روش اجزای محدود

کرامت ملک زاده فرد^{۱*} جواد شهبازی کرمی^۲ غلامحسن پایگانه^۳
 مجتمع دانشگاهی هوافضا پژوهشکده سازمان صنایع هوایی دانشکده مهندسی مکانیک
 دانشگاه صنعتی مالک اشتر دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
 (تاریخ دریافت: ۹۰/۰۹/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۲۲)

چکیده

هیدروفرمینگ لوله‌های چندلایه کامپوزیتی روشی مناسب برای تولید اتصالات چندلایه در کاربردهای خاص است. در این مقاله، ایده هیدروفرمینگ لوله‌های سه‌لایه ساندویچی (لایه خارجی از جنس برنج، لایه میانی از جنس فوم آلومینیوم و لایه داخلی از جنس مس) ارائه شده و پارامترهای هندسی و فیزیکی آن به کمک روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.10 شبیه‌سازی و تحلیل شده است. همچنین مطالعه‌ای در مورد استفاده از فشار نوسانی انجام و در آن نشان داده شده که فشار نوسانی باعث بهبود فرآیند می‌شود. با توجه به اینکه در مورد هیدروفرمینگ لوله‌های سه‌لایه تاکنون تحقیقی انجام نشده، بنابراین برای صحت‌گذاری، ضخامت لایه میانی در چندین مرحله کاهش و به سمت صفر میل داده شده و با نتایج تجربی لوله دولایه مقایسه شده است. با بررسی نتایج حل عددی این تحقیق و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، نشان داده شده که نتایج مدل‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایش‌های تجربی دارای همخوانی مناسبی هستند.

واژه‌های کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، شبیه‌سازی اجزای محدود، ساخت ماشین هیدروفرمینگ، لوله‌های چندلایه کامپوزیتی، فشار نوسانی

Effect of Geometrical and Physical Parameters on Hydro-Forming of a New Three-Layered Composite Tube with Finite Element Simulation

K. Malek Zadeh Fard J. Shahbazi-Karami G.H. Payganeh
 Univ. of Complex Aerospace Aviation Industries Mech. Eng. Dep't.
 Malek Ashtar Univ. of Tech. Organization Research Center Shahid Rajaei Teacher Training Univ.

(Received: 17 December, 2011; Accepted: 12 May, 2013)

ABSTRACT

Multi-layered tube hydro-forming is suitable to produce multi-layered joints to be used in special application in the industries. In this paper, for first time, three-layered tube (inner layer of copper, middle layer of aluminum foam and outer layer of brass) hydro-forming processes was numerically simulated using finite element method by ABAQUS/Explicit 6.10. One of the effective methods in improving the tube hydro-forming is by using the pulsating internal pressure. It was shown that pulsating pressure improves the formability in hydro-forming of three-layered tubes. Since three-layered sandwich tubes hydro-forming has not been reported in the literature, the middle layer thickness was gradually decreased and approaching to zero. The present results are compared with experimental results of bi-layered tube in hydro-forming process. Comparison of numerical and experimental results have shown good agreements.

Keywords: Tube Hydro-Forming, Finite Element Simulation, Hydro-Forming Machine, Multi-Layered Composite Tubes, Pulsating Pressure

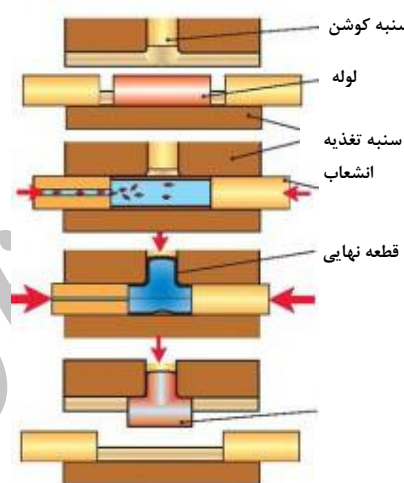
۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): k.malekzadeh@gmail.com

۲- مربی: shahbazi.mech@gmail.com

۳- استادیار: g.payganeh@srutu.edu

۱- مقدمه

هیدروفرمینگ لوله، یکی از روش‌های جدید و پیشرفته شکل‌دهی است که به صورت گسترده برای تولید قطعات توخالی با هندسه خاص به کار می‌رود و به جهت اهمیت این فرآیند به ویژه در صنایع خودروسازی، نفت، گاز و هوافضا به سرعت رو به گسترش است. در این روش با اعمال فشار داخلی هیدرولیک و نیروی محوری، لوله خام اولیه تغییر شکل داده و به فرم سطح داخلی قالب درمی‌آید. شکل ۱ به صورت شماتیک مراحل مختلف این فرآیند را نشان می‌دهد [۱].



شکل (۱): شماتیک مراحل فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۱].

همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود پس از قرار گرفتن لوله خام اولیه درون قالب و بسته شدن قالب، سنبه‌های هیدرولیکی اعمال نیروی محوری، پیش رانده شده و عمل آب‌بندی لوله را انجام می‌دهند. سپس فشار سیال داخلی اعمال شده و سنبه‌های محوری در صورت نیاز تغذیه محوری لوله را در جهت راندن مواد به درون قالب آغاز می‌کنند که این کار به جهت جلوگیری از نازک شدن احتمالی قطعه در محل انبساط آن است. در مقایسه روش‌های سنتی شکل‌دهی، هیدروفرمینگ دارای مزیت‌هایی نظیر کاهش تعداد قطعات توسط تولید قطعات یکپارچه، افزایش نسبت استحکام به وزن به علت کاهش وزن قطعات تولیدی، بهبود خواص مکانیکی به علت کارسختی یکنواخت قطعات، امکان ساخت قطعات با هندسه پیچیده و کاهش تعداد فرآیندهای تولیدی به علت کیفیت سطح خوب محصولات است. از جمله قطعات تولید شده به این روش می‌توان به قطعات تولید شده در صنایع خودرو سازی (قطعات آگزوز، فریم بدنه و شاسی، میل بادامک و اکسل عقب)، صنایع نفت و گاز (اتصالات T، Y و X شکل)، صنایع نظامی (انواع

فشنگ، خمپاره و قطعات داخلی اسلحه) و تولید لوازم خانگی و شیرآلات بهداشتی اشاره کرد [۲].

در کاربردهای خاص و محیط‌های کاری پیچیده که لوله‌های تک لایه عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند، می‌توان از لوله‌های دو یا چندلایه استفاده کرد. یکی از کاربردهای خاص لوله‌های دولایه در انتقال سیالات خورنده می‌باشد که نیاز به لوله‌ها و اتصالات از جنس آلیاژهای مقاوم به خوردگی است. در این حالت، برای لوله داخلی یک لایه مقاوم به خوردگی (نظیر CRA، مس یا تیتانیوم) و لوله خارجی یک لایه مقاوم به تنش ارزان قیمت (نظیر فولاد کربنی، فولاد ضدزنگ) است. در شرایط فشار بالا و خوردگی، لوله‌های چندلایه مزایای اقتصادی زیادی نسبت به لوله‌های تک لایه دارند [۳]. لوله‌های دولایه خواص مقاومت در برابر نیروهای مکانیکی، مقاومت در برابر خوردگی و انتقال حرارت ایجاد می‌کنند که لوله‌های تک لایه قادر به تأمین آن نیستند. کاربرد این لوله‌ها در صنایع کشتی سازی، کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی و هسته‌ای، سیستم‌های حرارتی و برودتی، خطوط انتقال زیر دریا، سیستم‌های با خوردگی بالا (کندانسور، اواپراتور، خطوط انتقال آمونیاک و اسیدهای خورنده)، مبدل‌های حرارتی نیروگاه‌ها و صنایع غذایی و سردخانه‌ها مشاهده شده است [۳]. در شکل ۲ انواع لوله‌های دولایه نشان داده شده است.



شکل (۲): انواع لوله‌های دو لایه [۳].

برای اولین بار در این مقاله، ایده لوله‌های سه لایه کامپوزیتی ارائه می‌شود. بدیهی است در صورت موفقیت می‌توان از این روش در بسیاری از لوله‌های حرارتی که نباید نشست حرارت رخ دهد و از طرفی نیاز است که لایه خارجی فلزی باشد، استفاده کرد. در این مقاله، هیدروفرمینگ لوله سه لایه (لایه خارجی از جنس برنج، لایه میانی از جنس فوم آلومینیوم و لایه داخلی از جنس مس) مدنظر است. هدف آن است که با به کار بردن لایه فوم میانی، این لایه دو نقش مهم را ایفاء نماید:

کم شده و احتمال ترکیدگی لوله افزایش می‌یابد. همچنین تغذیه محوری نامناسب موجب به وجود آمدن عیوبی نظیر چروکیدگی و کماتش لوله می‌شود.

به طور کلی برای تولید قطعات بی‌عیب باید مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) به صورت بهینه انتخاب شود. وانگ^۱ و همکارانش [۴] مقاله‌ای در مورد هیدروفرمینگ لوله‌های دوفلزی منتشر کردند. آنها در این مقاله روش اتصال مکانیکی بین دو لایه لوله با لایه داخلی از جنس آلیاژ مقاوم به خوردگی و لایه خارجی از جنس فولاد ارزان قیمت توسط روش هیدروفرمینگ را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. اسلام و همکارانش [۵] اولین مقاله را در زمینه شکل‌دهی هیدرولیک لوله‌های دولایه برای تولید قطعات T و X شکل ارائه نمودند. الاسود^۲ و همکارانش [۶] هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه را به صورت تجربی در نرم‌افزار Ansys Ls-dyna بررسی نمودند. آنها هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه از جنس لایه داخلی مس و لایه خارجی برنج آنیل شده را شبیه‌سازی کرده و آزمایش‌های گوناگون برای رسیدن به فاکتورهای بهینه برای تولید مقطع X شکل، انجام دادند. همچنین این محققان در مقاله‌ای دیگر، هیدروفرمینگ لوله‌های تک لایه و دولایه را مورد مقایسه قرار دادند [۷]. محسن لوح موسوی و همکارانش [۸] در تحقیقی، فرآیند هیدروفرمینگ لوله با فشار داخلی نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل، به کمک روش اجزای محدود و به صورت سه بعدی را شبیه‌سازی کرده و ساز و کار بهبود پرشدگی گوشه قالب را تحلیل و بررسی کرده‌اند.

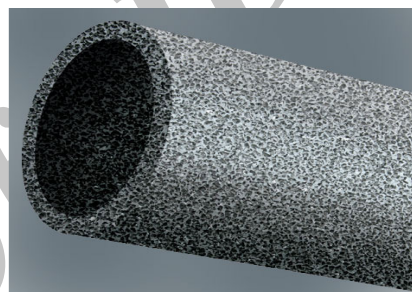
در این مقاله برای اولین بار هیدروفرمینگ لوله‌های سه لایه کامپوزیتی به کمک روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.10 شبیه‌سازی شده است. سپس با بررسی نتایج حل عددی این تحقیق و میل دادن ضخامت لایه میانی به صفر و مقایسه آن با نتایج تجربی لوله‌های دولایه در مقاله [۶]، صحت‌گذاری انجام می‌شود.

۲- مدل‌سازی فرآیند

از آنجایی که تعیین مسیر بارگذاری از طریق تجربی نیازمند آزمون و خطا بوده و هزینه زیادی به دنبال دارد، شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند دارای اهمیت زیادی است. شبیه‌سازی به منظور درک رفتار تغییر شکل لوله‌ها در طی فرآیند در نرم‌افزار المان محدود انجام شده است. مدل هندسی، ابعاد و جنس لوله‌ها در جدول ۲ و شکل ۴ نشان داده شده است.

۱- بین لایه داخلی و خارجی نقش عایق حرارتی را بازی کرده و در خطوط انتقال سیال با حرارت بالا از نشط حرارت جلوگیری می‌کند. در این حالت به علت ضریب هدایت حرارتی پایین لایه میانی فوم، نیاز به عایق کاری لوله نیز از بین می‌رود و

۲- با استفاده از لایه میانی فوم و ساندویچی کردن سازه لوله، استحکام خمشی لوله‌ها در مقابل بارهای وارده افزایش می‌یابد. همچنین به علت جذب انرژی بالای فوم، باعث افزایش مقاومت خطوط لوله‌ها در حوادث طبیعی نظیر زلزله در صنایع مهم و خطرآفرینی نظیر صنایع هسته‌ای و اتمی می‌شود. شکل ۳ نشان دهنده لوله از جنس فوم آلومینیوم است. مشخصات خواص مکانیکی و فیزیکی فوم آلومینیوم استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است [۳].



شکل (۳): لوله از جنس فوم آلومینیوم [۳].

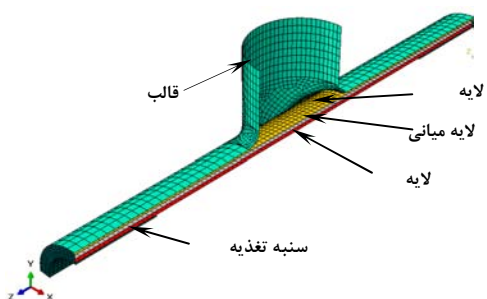
جدول (۱): مشخصات خواص مکانیکی و فیزیکی فوم آلومینیوم [۳].

مقدار	پارامتر
۶۶۰	دمای ذوب (C)
۶۱۰۱	نوع آلیاژ
۵/۸	هدایت حرارتی w/m.C
۲۰۰	مدول برشی (MPa)
۱/۲۴	استحکام کششی (MPa)
۲/۵۳	استحکام فشاری (MPa)

در این مقاله همچنین فرآیند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب X شکل شبیه‌سازی شده و نتایج استخراج شده‌اند. به عبارت دیگر هدف از این تحقیق، مقایسه بین قطعات هیدروفرم شده توسط فشار نوسانی و انواع فشار ثابت است. همچنین نشان داده شد که با استفاده از فشار نوسانی، شکل‌پذیری بهبود یافته، ارتفاع بالچ افزایش و درصد کاهش ضخامت کاهش می‌یابد. در این فرآیند ممکن است عیوبی نظیر ترکیدگی، چروکیدگی و کماتش در قطعات تولیدی ایجاد شود. اگر فشار داخلی زیاد بوده و تغذیه محوری کم باشد، ضخامت جداره لوله

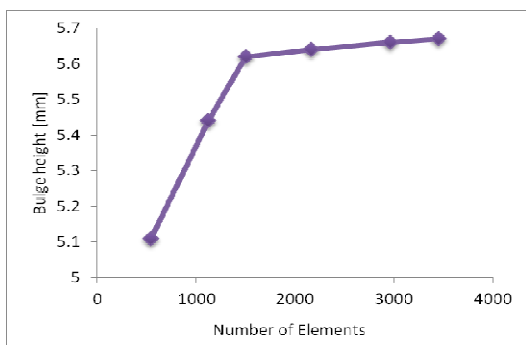
1- Wang

2- Alaswad



شکل (۵): مدل هندسی قالب، لوله‌ها و سنجه‌های محوری.

چون تغییرات تنش در راستای ضخامت لوله‌ها مدنظر نمی‌باشد، برای لوله‌ها از المان پوسته‌ای S4R استفاده شده که با این کار سرعت تحلیل نیز بالاتر می‌رود. تعداد المان‌های مناسب در نظر گرفته شده برای لوله‌های خارجی، میانی و داخلی به ترتیب ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ المان می‌باشد که همگرایی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): تأثیر تعداد المان‌های لایه خارجی بر ارتفاع بالج.

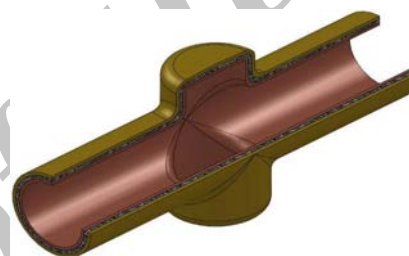
چون قالب و سنجه‌های محوری صلب فرض شده‌اند، فقط سطح خارجی آنها مدل شده و از المان صلب R3D4 استفاده شده است. برای مدل‌سازی رفتار تماس قالب و لوله خارجی، تماس بین لوله‌ها و تماس لوله داخلی با سنجه‌ها از روش پنالتی استفاده شده است. ضریب اصطکاک قالب و سنجه با لوله‌ها برابر ۰/۱۵ و ضریب اصطکاک بین لوله‌ها با هم برابر ۰/۵۷ در نظر گرفته شده است [۶].

فشار داخلی و تغذیه محوری از مهم‌ترین پارامترهای ورودی برای رسیدن به قطعه نهایی مطلوب است. به صورت معمول برای تولید قطعات T و X شکل در نیمه ابتدایی، فرآیند فشار افزایش شدیدی یافته و در نیمه دوم، فرآیند فشار افزایش کمتر و تغذیه محوری افزایش شدیدتری دارد. با اعمال تغذیه محوری در طول فرآیند، حجم داخلی قطعه اندکی کم می‌شود و به همین دلیل بارگذاری فشار داخلی در انتهای فرآیند افزایش خیلی کمی داشته و یا ثابت در نظر گرفته می‌شود تا منجر به ترکیدگی لوله‌ها نشود [۱۰].

انتخاب جنس مناسب با خواص مطلوب از مهم‌ترین عوامل موفقیت در فرآیند است. پارامترهایی که در انتخاب جنس مناسب مؤثرند عبارتند از:

- توان کارسختی کرنشی بالا،
- درصد ازدیاد طول بالا و یکنواخت،
- ناهمسانگردی پایین،
- قابلیت شکل پذیری بالا،
- قیمت مناسب و
- در دسترس بودن.

بر اساس آزمون کشش لوله‌ها که در آزمایشگاه خستگی و شکست دانشگاه صنعتی شریف انجام شده، نمودار تنش-کرنش مهندسی مواد و خواص آنها طبق جدول ۲ تعیین شده است.



شکل (۴): انشعاب X شک سه لایه.

جدول (۲): خواص مکانیکی لایه‌ها [۹ و ۶].

پارامتر	لایه داخلی	لایه میانی	لایه خارجی
جنس	مس	فوم آلومینیوم	برنج
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۰۵	۰/۱۰۲	۱۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۲۲۰	۱/۲	۹۸۰
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳
چگالی g/cm^3	۸/۹۸	۰/۲۷	۸/۸۰
قطر خارجی (mm)	۲۴	۲۲	۲۰
ضخامت (mm)	۰/۸۵	۱	۱

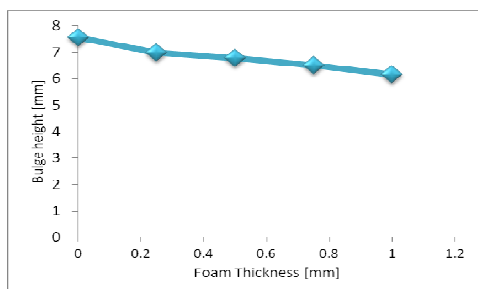
توجه شود که طول همه لوله‌ها یکسان و برابر ۱۲۰ میلی‌متر، شعاع گوشه قالب ۳ میلی‌متر و جنس لوله‌ها هموزن فرض شده است. برای سرعت بیشتر تحلیل و با استفاده از مزایای تقارن، فقط یک چهارم کل هندسه مدل شده و شرایط مرزی مناسب برای گره‌هایی که در صفحه تقارن هستند، در نظر گرفته شده است. همچنین قالب صلب به صورت کامل مقید شده و تمام درجات آزادی آن سلب شده است. سنجه‌های محوری نیز مقید شده و فقط درجه آزادی حرکت در راستای محور z آن باقی مانده که برای تغذیه محوری لوله‌ها است. مدل هندسی شامل یک قالب صلب، سه لوله و دو سنجه محوری برای آب‌بندی و اعمال نیروی محوری است (شکل ۵).

۳- آزمون‌های تجربی و تصدیق

برای صحت‌گذاری بر روی تحقیقات و شبیه‌سازی المان محدود انجام شده در این مقاله، ضخامت لایه میانی را به صفر میل داده و با نتایج آزمایش‌های تجربی هیدروفرمینگ لوله‌های دولایه انجام شده در پژوهشکده سازمان صنایع هوایی و نتایج تجربی محققان ایرلندی [۶] مقایسه می‌شود. مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) استفاده شده طبق شکل‌های ۷-۹ است.

طبق شکل‌های ۱۱-۱۳، میزان ارتفاع بالج و درصد کاهش ضخامت طبق جدول ۳ است.

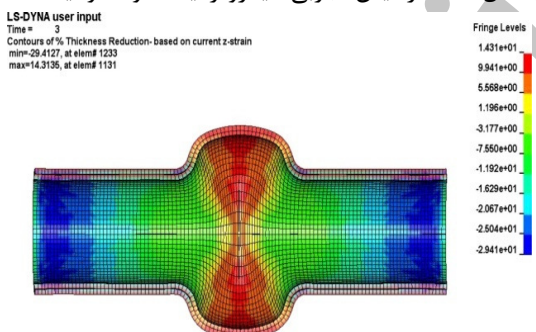
با میل دادن ضخامت لایه میانی به صفر و انجام شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.10 برای لوله دولایه، نتایج طبق جدول ۳ به دست آمده است.



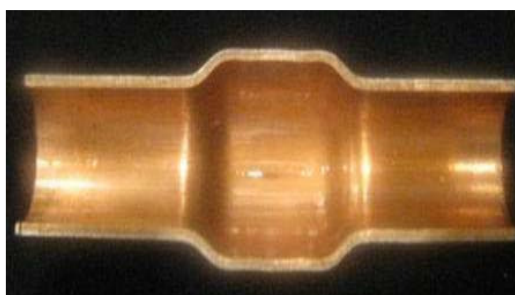
شکل (۱۰): نمودار تأثیر ضخامت لایه میانی بر ارتفاع بالج.



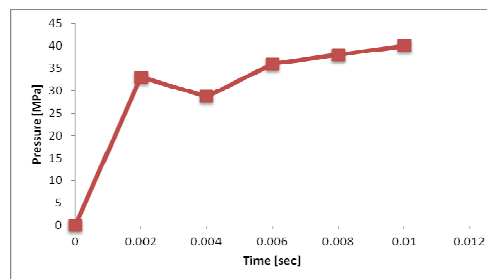
شکل (۱۱): آزمایش تجربی هیدروفرمینگ لوله دولایه [۶].



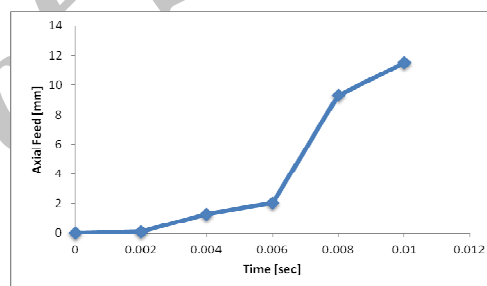
شکل (۱۲): شبیه‌سازی المان محدود هیدروفرمینگ لوله دولایه [۶].



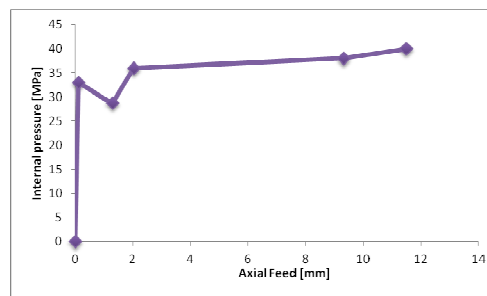
شکل (۱۳): آزمایش تجربی هیدروفرمینگ لوله دولایه.



شکل (۷): تغییرات فشار داخلی در زمان [۶].



شکل (۸): تغییرات تغذیه محوری در زمان [۶].



شکل (۹): مسیر بارگذاری استفاده شده [۶].

برای صحت‌گذاری بر روی تحقیق انجام شده، ضخامت لایه میانی فوم آلومینیوم را از ضخامت اولیه یک میلی‌متر در نظر گرفته شده، در چند مرحله کاهش داده تا به ضخامت لایه میانی صفر و حالت دو لایه رسیده شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی مطابق نمودار شکل ۱۰ است.

برای تصدیق با نتایج تجربی، دو پارامتر اصلی یعنی مقدار ارتفاع بالج و درصد کاهش ضخامت در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۵): جک هیدرولیک ۲۰ تن مورد استفاده در ساخت ماشین هیدروفرمینگ در پژوهشگاه سازمان صنایع هوایی.

انواع مسیر بارگذاری: با اعمال مسیرهای بارگذاری متفاوت، شکل پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ دارای تغییرات محسوسی می‌باشد. در هیدروفرمینگ قطعات T و X شکل، رسیدن به ارتفاع بالجه مناسب، توزیع ضخامت خوب بدون چروک خوردگی و پارگی نیاز به اعمال یک مسیر بارگذاری مناسب و بهینه دارد. مسیرهای بارگذاری متفاوت در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این مسیرهای بارگذاری شامل سه دسته کلی می‌باشند. در مسیرهای بارگذاری A، B و C، افزایش تغذیه محوری مقدم بر فشار داخلی است. در مسیر بارگذاری D، فشار داخلی و تغذیه محوری دارای تغییرات خطی در طول فرآیند می‌باشند. در نهایت در مسیرهای بارگذاری E، F و G، افزایش فشار داخلی مقدم بر بارگذاری محوری است [۷]. این هفت مسیر بارگذاری در شبیه‌سازی اعمال شده و نتایج استخراج شده‌اند (شکل ۱۷).

ارتفاع بالجه: همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشخص است در مسیرهای بارگذاری A، B و C به علت تغذیه محوری زیاد و فشار داخلی کم، در قطعه چروک‌خوردگی شدید ایجاد شده است. در مسیر بارگذاری D نیز که فشار و تغذیه محوری دارای تغییرات خطی می‌باشند، انشعاب به صورت صحیح شکل نگرفته و ارتفاع آن نیز کم است. در مسیرهای بارگذاری E، F و G که فشار اولیه زیاد و تغذیه محوری کم است، انشعاب به درستی شکل گرفته که طبق شکل، مسیر بارگذاری G دارای بیشترین ارتفاع انشعاب بدون چروک خوردگی می‌باشد. همچنین شکل ۱۸ نمایشگر ارتفاع بالجه در مسیرهای بارگذاری متفاوت است که طبق آن، مسیرهای بارگذاری A و B دارای بیشترین ارتفاع انشعاب هستند ولی چون در این حالات چروکیدگی اتفاق افتاده، مورد قبول نمی‌باشند. همچنین در مسیر بارگذاری G که ارتفاع انشعاب زیاد است، به علت نازک‌شدگی شدید، احتمال ترکیدگی لوله‌ها افزایش می‌یابد. بین مسیرهای بارگذاری نشان داده شده، مسیر بارگذاری F بهترین انتخاب است.

جدول (۳): نتایج تجربی و شبیه‌سازی.

نوع نتایج	تجربی [۶]	تجربی حاضر [۶]	عددی [۶]	شبیه‌سازی حاضر	خطا با تجربی (%)	خطا با عددی (%)
ارتفاع انشعاب (mm)	۷/۸۸	۶/۹۴	۸/۴۴	۷/۵۴۸	۴/۲	۱۰/۵
کاهش ضخامت (%)	۱۴/۰۶	۱۳/۷۵	۱۵/۲۵	۱۵/۱۷	۷/۹	۰/۵

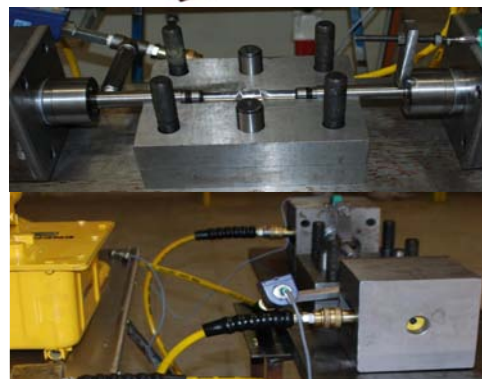
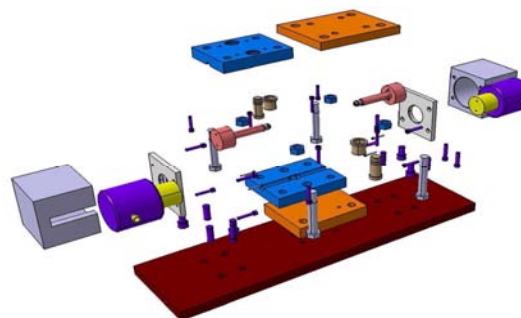
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق دارای همخوانی مناسب و میزان خطای قابل قبول (به صورت میانگین ۶٪ با تجربی و عددی مرجع) است. نمای انفجاری مجموعه قالب و ابزار ساخته شده و جک استفاده شده جهت اعمال نیروی محوری در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

برخی از نتایج طراحی و تحلیل انجام شده بر روی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های چند لایه در زیر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- تحلیل پارامترهای کلیدی فرآیند

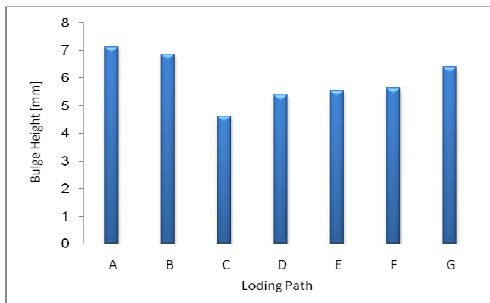
در این بخش، به بررسی چند پارامتر مهم پرداخته می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد، مهم‌ترین پارامتر در تعیین کیفیت محصول نهایی، مسیر بارگذاری (فشار داخلی و تغذیه محوری) است.



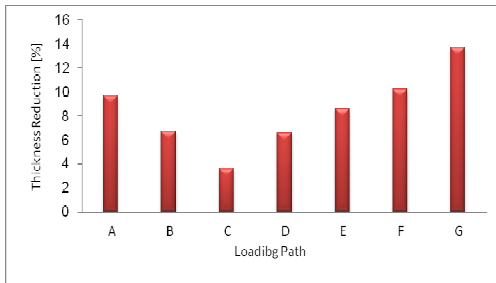
شکل (۱۴): نمای ماشین هیدروفرمینگ طراحی و ساخته شده.

تغییرات ضخامت: شکل ۱۹ نشان دهنده کاهش ضخامت لوله‌ها در طی فرآیند هیدروفرمینگ در مسیرهای بارگذاری متفاوت است. در مسیرهای بارگذاری A، B و C که تغذیه محوری ارجع است، ابتدا لوله به داخل قالب جریان پیدا کرده و سپس فشار داخلی افزایش پیدا می‌کند و این امر باعث کاهش ضخامت کم لوله می‌شود.

اما در مسیرهای بارگذاری E، F و G که فشار داخلی ارجع است، به دلیل اعمال نیروی بیشتر لوله‌ها به یکدیگر و لوله خارجی به سطح قالب، اصطکاک بالا رفته و این امر باعث کاهش ضخامت بیشتر لوله‌ها می‌شود. به همین علت کاهش ضخامت در G دارای حداکثر مقدار خود می‌باشد.



شکل (۱۸): ارتفاع بالج در مسیرهای بارگذاری متفاوت.

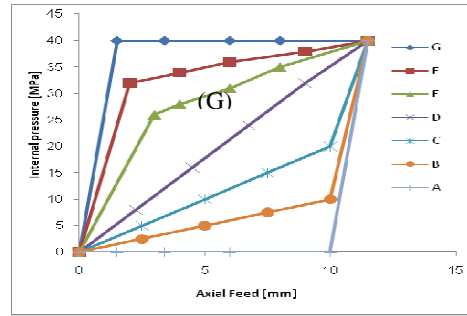


شکل (۱۹): درصد کاهش ضخامت در مسیرهای بارگذاری متفاوت.

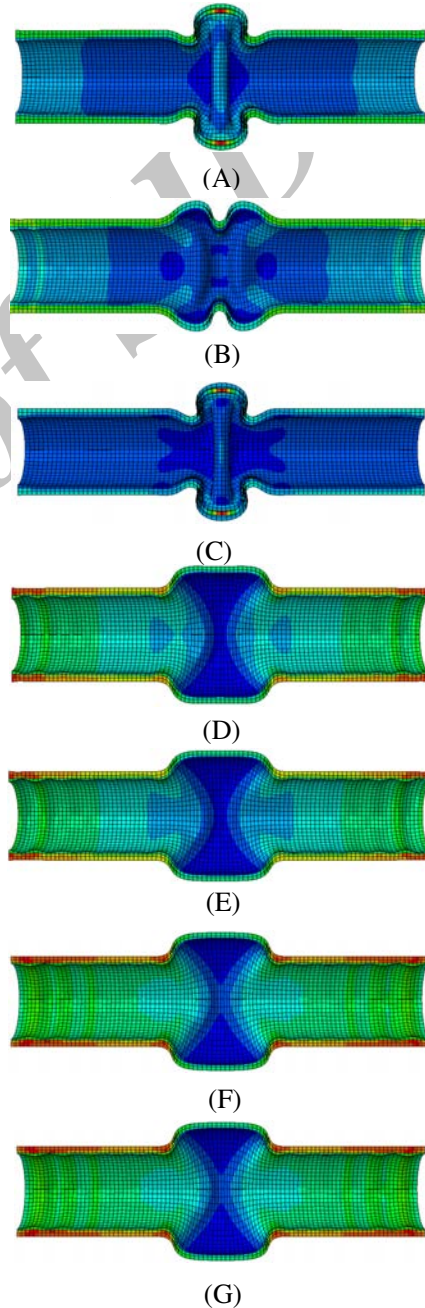
نمودار شکل ۲۰ نشان دهنده تغییرات ضخامت لوله خارجی در طول لوله است. همان‌گونه که در شکل نیز مشاهده می‌شود، حداقل ضخامت در وسط لوله و بالاترین گره انشعاب ایجاد شده است.

کاهش ضخامت لایه میانی فوم بیشتر از لایه هم‌ضخامت آن (لایه خارجی) است که این امر به دلیل استحکام کششی و فشاری و همچنین چگالی کمتر لایه فوم فلزی نسبت به لایه برنجی است.

تنش: همان‌گونه که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، حداکثر تنش ون مایسز برای لوله‌های خارجی، میانی و داخلی در

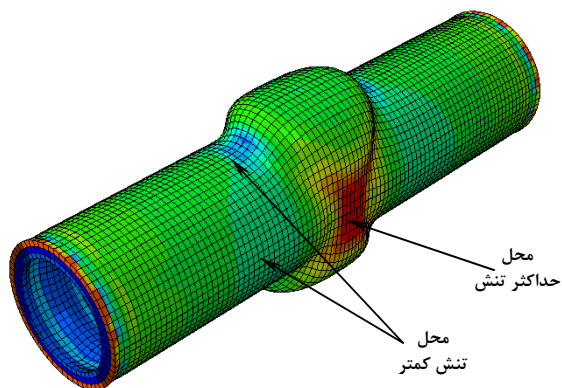


شکل (۱۶): انواع مسیرهای بارگذاری اعمالی.

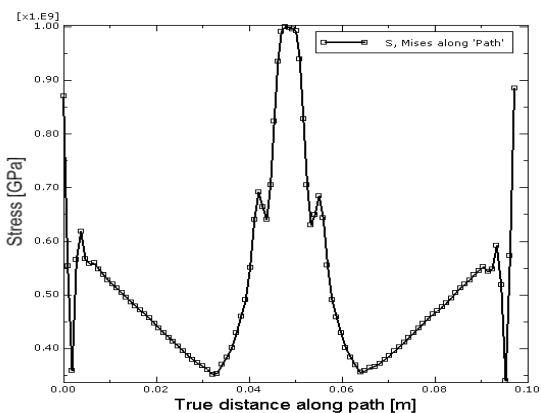
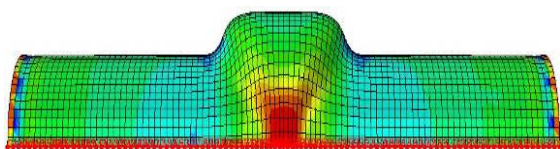


شکل (۱۷): قطعات هیدروفرم شده تحت بارگذاری‌های متفاوت.

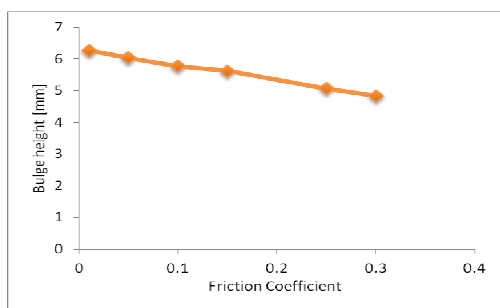
می‌یابد. همچنین افزایش اصطکاک باعث بالاتر رفتن تنش در لوله‌ها می‌شود. در شکل ۲۴، تأثیر ضریب اصطکاک بر روی ارتفاع بالج نشان داده شده است.



شکل (۲۲): محل حداکثر و حداقل تنش ون مایسز.



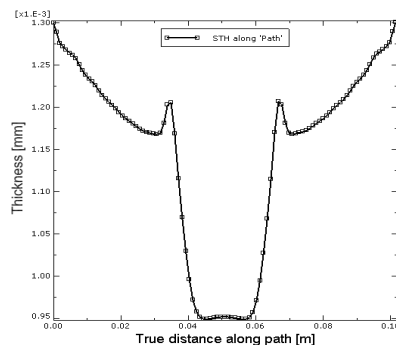
شکل (۲۳): نمودار تغییرات تنش ون مایسز در مسیر نشان داده شده.



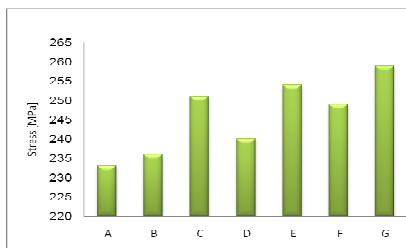
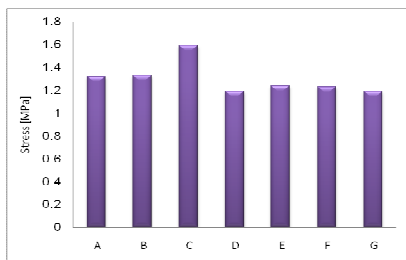
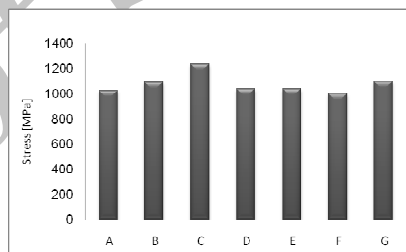
شکل (۲۴): میزان ارتفاع بالج در ضرایب اصطکاک مختلف.

انتهای فرآیند بررسی شده است. مقادیر حداکثر تنش باید از استحکام نهایی ماده کمتر باشد. محل حداکثر و حداقل تنش در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

در شکل ۲۳ تغییرات تنش در مسیر نشان داده شده در شکل بر روی لوله خارجی مشاهده شده و محل حداکثر تنش ایجاد شده به وضوح مشخص است.



شکل (۲۰): تغییرات ضخامت لوله در طول آن.



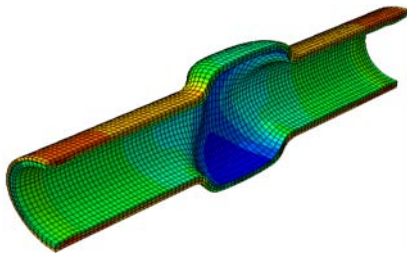
شکل (۲۱): نمودار بیشینه تنش در لوله‌های خارجی، میانی و داخلی.

اصطکاک: اصطکاک تأثیری مهم بر روی فرآیند هیدروفورمینگ لوله دارد. با بالاتر رفتن اصطکاک، مواد در هنگام تغذیه محوری به خوبی داخل قالب جریان پیدا نکرده و ارتفاع بالج کاهش

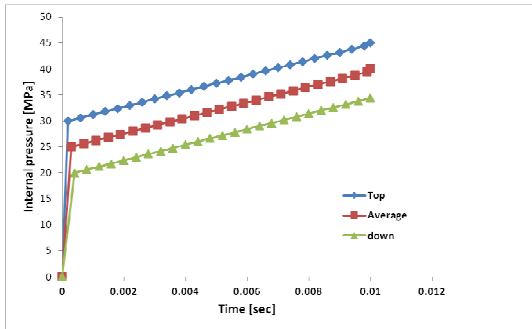
۲-۴- مطالعه مسیر فشار ثابت و نوسانی

با اعمال مسیرهای فشار متفاوت، شکل‌پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ دارای تغییرات محسوسی است. در هیدروفرمینگ قطعات T و X شکل، رسیدن به ارتفاع بالج مناسب، توزیع ضخامت خوب بدون چروک خوردگی و پارگی نیاز به اعمال یک مسیر فشار مناسب و بهینه دارد. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرآیند هیدروفرمینگ لوله، استفاده از مسیر فشار نوسانی است که به آن هیدروفرمینگ نوسانی لوله گفته می‌شود. در این روش، فشار داخلی در هنگام تولید قطعات تولید شده به روش هیدروفرمینگ به صورت نوسانی اعمال می‌شود. البته علت بهبود شکل‌پذیری در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی هنوز به صورت شفاف و روابط منطقی مشخص نیست [۸].

در این بخش مقاله، تأثیر فشار نوسانی بر روی پارامترهای خروجی و مهم فرآیند، نظیر ارتفاع بالج و کاهش ضخامت لوله‌ها بررسی و مورد بحث قرار گرفته است. برای بررسی اثر فشار نوسانی بر تغییر شکل لوله‌ها، ارتفاع بالج و توزیع ضخامت مسیر فشار نوسانی نشان داده شده در شکل ۲۵ در نظر گرفته شده است.

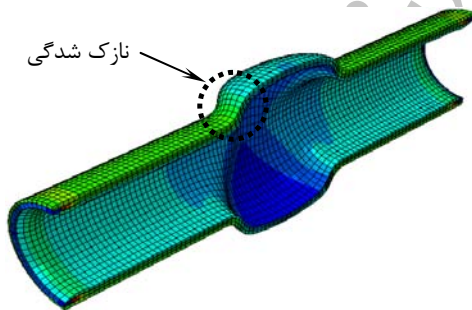


شکل (۲۶): شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از فشار نوسانی.

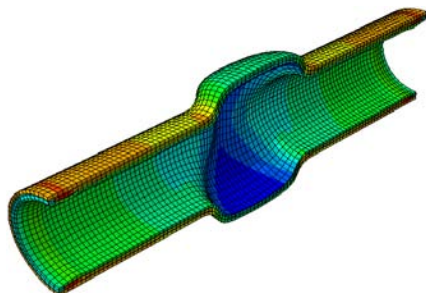


شکل (۲۷): منحنی فشار حداکثر، میانگین و حداقل اعمال شده.

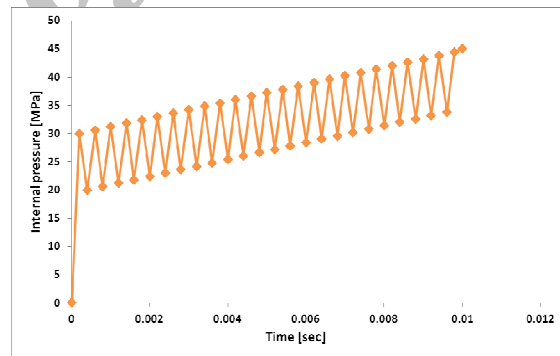
فشار میانگین بیانگر مقدار متوسط فشار نوسانی در طول فرآیند است. با اعمال مسیرهای فشار ذکر شده، نتایج شبیه‌سازی المان محدود مطابق شکل‌های ۳۰-۲۸ استخراج شده است.



شکل (۲۸): شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از فشار حداکثر.



شکل (۲۹): شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از فشار میانگین.

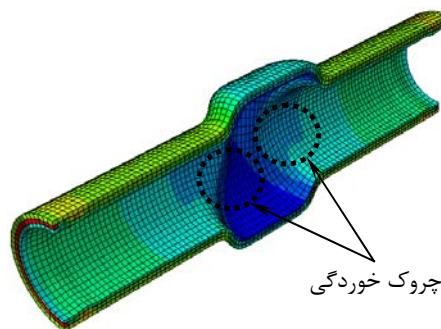


شکل (۲۵): منحنی فشار نوسانی اعمال شده.

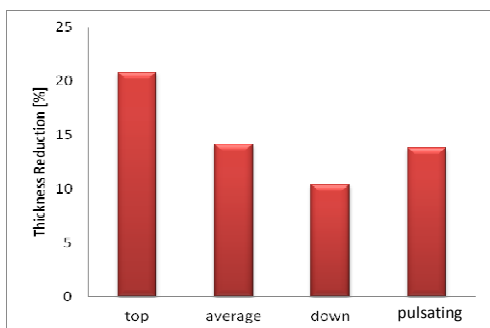
با انتخاب و اعمال منحنی فشار نوسانی مطابق شکل، نتیجه شبیه‌سازی المان محدود مطابق شکل ۲۶ استخراج شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، انشعاب X شکل به خوبی شکل گرفته و هیچ‌گونه چروکیدگی اتفاق نیفتاده است. دامنه فشار نوسانی انتخاب شده (AP) برابر ۵ مگاپاسکال است. به منظور انجام مقایسه بین فرآیندها، علاوه بر این مسیر فشار، سه مسیر فشار ثابت با حداکثر، حداقل و مقدار میانگین فشار مطابق نمودارهای شکل ۲۷ نیز در نظر گرفته شده است که منطبق بر منحنی فشار نوسانی شکل ۲۵ است.

بالج ایجاد شده که باعث بالا رفتن احتمال ترکیدگی لوله می شود.

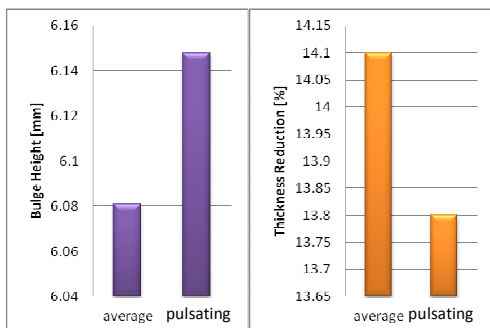
در مسیر فشار حداقل نیز چروکیدگی اتفاق افتاده و قطعه نهایی تولید شده مناسب نمی باشد. در مقایسه بین مسیر فشار متوسط و نوسانی، همان طور که در نمودارها نیز مشخص است، در حالت استفاده از فشار نوسانی، ارتفاع بالج افزایش و درصد کاهش ضخامت، کاهش یافته است (شکل ۳۴).



شکل (۳۰): شبیه سازی اجزای محدود با استفاده از فشار حداقل.



شکل (۳۳): درصد کاهش ضخامت لایه کلی در مسیرهای فشار متفاوت.

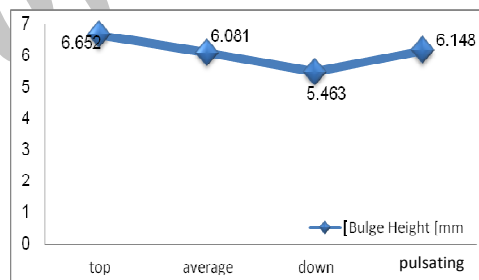


شکل (۳۴): مقایسه ارتفاع بالج و درصد کاهش ضخامت در دو حالت فشار متوسط و نوسانی.

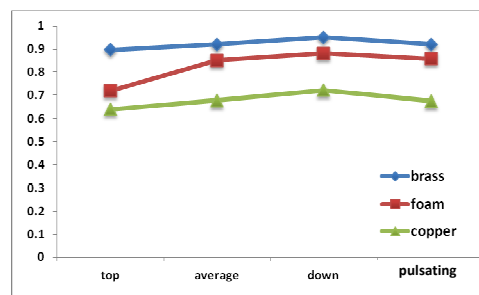
۵- نتیجه گیری

نتیجه حاصل از تحقیق این است که با سه لایه کردن لوله ها می توان به خواص حرارتی و مکانیکی بهتر رسید. به علت ضریب هدایت حرارتی پایین فوم، لایه میانی همانند یک عایق عمل کرده و باعث بهبود خواص حرارتی این نوع خاص لوله ها می شود. همچنین با در نظر گرفتن مزایای سازه های ساندویچی، می توان به این نتیجه رسید که با اضافه کردن لایه میانی فوم، خواص مکانیکی نیز بهبود خواهد یافت. همچنین می توان برای کاهش هزینه و زمان، به جای روش سعی و خطا از روش المان محدود برای طراحی و تحلیل فرآیند هیدروفرمینگ لوله استفاده نمود. سایر نتایج عبارتند از:

همان گونه که در شکل ها مشخص است، در حالتی که از فشار حداکثر استفاده شده، نازک شدگی و در حالتی که از فشار حداقل استفاده شده، چروکیدگی اتفاق افتاده است. مقایسه بین ارتفاع بالج ایجاد شده پس از اعمال مسیرهای فشار مختلف در شبیه سازی، در نمودار شکل ۳۱ نشان داده شده است. مقدار حداقل ضخامت لایه های خارجی، میانی و داخلی در مسیرهای فشار متفاوت در نمودار شکل ۳۲ نشان داده شده است.



شکل (۳۱): ارتفاع بالج در مسیرهای فشار متفاوت.



شکل (۳۲): حداقل ضخامت لایه ها در مسیرهای فشار متفاوت.

همچنین درصد کاهش ضخامت کلی لوله سه لایه در مسیرهای فشار متفاوت در شکل ۳۳ نشان داده شده است. همان طور که در نمودارها نیز به وضوح مشخص است، در حالتی که از فشار حداکثر استفاده شده است کاهش ضخامت شدید در

۷- مراجع

- Schuler, Metal Forming Handbook, ISBN 3-540-61185-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998.
 - Muammer, K. "Hydroforming for Advanced Manufacturing", Woodhead Publisher, Cambridge England, 2008.
 - Be. Ca. Eng. "Bimetallic Tube Production", <http://www.becaengineering.com/bimetallic.html>.
 - Wang, X., Li, P., and Wang, R. "Study on Hydro-Forming Technology of Manufacturing Bimetallic CRA-Lined Pipe", Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No's. 4-5, pp. 373-378, 2005.
 - Islam, M.D. Olabi, A.G. and Hashmi, M.S.J. "Feasibility of Multi-Layered Tubular Components Forming by Hydroforming and Finite Element Simulation", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 174, No's. 1-3, pp. 394-398, 2006.
 - Alaswad, A., Olabi, A.G., and Benyounis, K.Y. "Integration of Finite Element Analysis and Design of Experiments to Analyse the Geometrical Factors in Bi-Layered Tube Hydroforming, Materials & Design, Vol. 32, No. 2, pp. 838-850, 2011.
 - Alaswad, A., Benyounis, K.Y., and Olabi, A.G. "Finite Element Comparison of Single and Bi-Layered Tube Hydroforming Processes", Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 19, No. 7, pp. 1584-1593, 2011.
 - Loh Mousavi, M., Bakhshi, M., Mori, K., Maneo, T., Farzin, M., and Hoseinpour, S.J. "3-D Finite Element Simulation of Pulsating Free Bulge Hydroforming of Tubes", Iranian J. Sci. & Tech., Trans. B, Eng., Vol. 32, No. B6, pp 611-618.
 - "Duocel® Aluminum Foam", <http://www.ergaerospace.com/Aluminum-Properties.html>, 2011.
 - Gorji, A., Alavi Hashemi, H., Bakhshi, M., Vali zadeh, M.E., and Shirkorshidian, A. "Finite Element Simulation and Experimental Study of Forming Conical Parts with Hydrodynamic Deep Drawing Forming with Radial Pressure", Aerospace Mech. J., Vol. 5, No. 3, pp. 69-79, 2009 (In Persian).
- مسیر بارگذاری مهم‌ترین پارامتر ورودی بوده و بیشترین تأثیر را بر روی پارامترهای خروجی نظیر ارتفاع بالچ، درصد کاهش ضخامت و تنش‌ها دارد،
- برای رسیدن به قطعه نهایی بدون عیوب ترکیدگی، چروکیدگی و کمانش، مسیر بارگذاری باید به صورت مناسب انتخاب و اعمال شود،
- کاهش ضخامت به پارامترهایی نظیر اصطکاک و مسیر بارگذاری وابسته است. یکی از مهم‌ترین اهداف فرآیند هیدروفرمینگ لوله، تولید قطعاتی با کمترین کاهش ضخامت و سعی در یکنواخت نگه داشتن ضخامت قطعات است،
- در فرآیند هیدروفرمینگ قطعات X شکل، محل حداقل ضخامت در وسط لوله و بالاترین گره انشعاب است. همچنین محل حداکثر تنش، در وسط لوله و مابین دو انشعاب می‌باشد (طبق نتایج شبیه‌سازی و شکل ۲۲)،
- هر چه ضریب اصطکاک بیشتر باشد، ارتفاع بالچ کمتر و توزیع ضخامت غیریکنواخت‌تر است (طبق نتایج شبیه‌سازی و نمودار شکل ۲۴)،
- مسیرهای بارگذاری نوسانی و ثابت گوناگون به مدل سه لایه اعمال شده و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است،
- در حالتی که از فشار حداکثر ذکر شده استفاده شود، نازک‌شدگی شدید در قسمت بالای انشعاب اتفاق می‌افتد که ممکن است موجب ترکیدگی لوله شود (شکل ۲۸)،
- در حالتی که از فشار حداقل ذکر شده استفاده شود، عیب چروکیدگی در لوله‌ها ایجاد می‌شود که حتی با افزایش فشار در پایان فرآیند نیز حذف نمی‌شود (شکل ۳۰) و
- در مقایسه بین فشار متوسط و نوسانی، نشان داده شده که در صورت استفاده از فشار نوسانی در فرآیند هیدروفرمینگ، ارتفاع بالچ افزایش یافته و درصد کاهش ضخامت کمتر می‌شود (طبق نتایج شبیه‌سازی و شکل ۳۴).