



شکل دهی تجربی و عددی لوله های T شکل فلزی تحت بار گذاری هیدرودینامیکی

مجید علی طاولی^{1*}, هاشم بابایی², آرمان محسنی³, رضا رجبیه فرد⁴

- 1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
 - 3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان
 - 4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
- * رشت، صندوق پستی tavoli@guilan.ac.ir، 3756-41635

چکیده

در این مقاله به منظور ساخت لوله های T شکل با روش هیدروفرمینگ از سامانه چکش پرتتابه ای استفاده شده است که منجر به بارگذاری هیدرودینامیکی می شود. برای شکل دهی قطعه اولیه به فرم داخلی قالب به دو عامل فشار داخلی هیدرولیکی و تغذیه محوری نیاز است که در فرآیند مورد بررسی، باید از یک منبع انرژی به دو صورت استفاده شود. برای دریافت انرژی جنسی چکش پرتتابه ای، قالبی با توجه به مسیر بارگذاری مذکور طراحی شده است که از طریق سنبه های تبیه شده بر قالب، ضربه حاصل از سقوط آزاد وزنه را دریافت کرده و ایجاد فشار هیدرولیکی می نماید، تغذیه محوری با قرار دادن چکش هایی در طرفین لوله با دریافت فشار از سیال واسط صورت می گیرد، همچنین با عبور سیال از سوراخ میانی چکش ها فشار داخلی برای تغییر شکل تأمین می شود. لوله های مسی و آلومینیومی در آزمایش ها مورد بررسی قرار گرفته اند. از نرم افزار المان محدود آباکوس برای بررسی عددی قطعات نهایی و بهبود کیفیت شکل دهی استفاده شده است. مدل شبیه سازی تشكیل لوله T شکل با درنظر گرفتن اثر نرخ کرنش و خواص مکانیکی مواد به صورت دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان می دهند که برای تغییر شکل مطلوب باید تمام عوامل ورودی مانند ارتفاع سقوط وزنه، مقدار ستون سیال داخل قالب پیش از اعمال ضربه، آبیندی، روان کاری، جنس و خصامت لوله با هم متناسب باشند، همچنین کیفیت ارتفاع برآمدگی با توجه به توزیع خصامت، تغییرات محوری و سطح ماس سیال با پانچ مقابله مورد بررسی قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 تیر 1395
پذیرش: 23 مرداد 1395
ارائه در سایت: 24 شهریور 1395
کلید واژگان:
هیدروفرمینگ
تجربی
چکش پرتتابه ای
لوله T شکل
ستون سیال

Experimental and numerical forming of T shaped metallic tubes subjected to hydrodynamic loading

Majid Alitavoli^{1*}, Hashem Babaei¹, Arman Mohseni², Reza Rajabiehfard¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

*P.O.B. 3756-41635 Rasht, Iran, tavoli@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 July 2016

Accepted 13 August 2016

Available Online 14 September 2016

Keywords:

Hydroforming

Experimental

Drop hammer

T shaped tube

Fluid column

ABSTRACT

In this paper, in order to build T shaped tube by hydroforming method, the drop hammer system is used which leads to the hydrodynamic load. To form the first piece as the die configuration, the hydraulic internal pressure and axial feeding is required, and in the study of this process a source of energy should be used in two ways. According to mentioned load path, the die is designed to get the impact of free fall weight by pistons on the die, which produces the hydraulic pressure. By putting the punches on both sides of the tube, axial feeding takes place by receiving the hydraulic pressure of intermediate fluid, and the internal pressure transmits the fluid from the middle hole of the punches. It is worth noting that copper and aluminum tubes have been analyzed in experimental tests. To check the numerical analysis of final pieces and improve the quality of shaping, the finite element software ABAQUS is used. The simulation model of forming T shaped tube has been evaluated dynamically by considering the effect of strain rate and mechanical properties of tube material. The results of tests show that to have favorable deformation, all the input parameters such as the kinetic energy, fluid column, sealing, lubrication, gender and the thickness of tube should be proportional to each other. Also, in this study, the height of the bulge has been analyzed due to the thickness distribution, axial displacement and surface embrace.

1- مقدمه

فشار داخلی هیدرولیکی و نیروی محوری صورت می گیرد. فرآیند هیدروفرمینگ با نیاز به قطعه ای با هندسه و طرح محصول متفاوت و محدودیت شکل و ابعاد قطعه در بخشی از تولید یک محصول پدید آمد. با توجه به این که در این روش انعطاف پذیری بیشتری از قطعه مشاهده می شود، استفاده از مواد با استحکام بالا و خصامت کم می تواند به کاهش وزن

تولید قطعات با استحکام بالا و در عین حال وزن کمتر موجب شد تا هیدروفرمینگ بهطور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. فرآیند هیدروفرمینگ روشی است که برای شکل دهی به منظور تولید قطعات تخلی پیچیده و ساده با شکل های مستقیم یا خمیده با استفاده از اعمال

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Alitavoli, H. Babaei, A. Mohseni, R. Rajabiehfard, Experimental and numerical forming of T shaped metallic tubes subjected to hydrodynamic loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 223-232, 2016 (in Persian)

اثر آن را با توجه به درنظر گرفتن پانچ مقابل، تغییرات ضخامت، تغییرات طول و ارتفاع برآمدگی مورد بررسی قرار دادند.

لورنزو و همکاران [5] جهت تخمین مناسب و تعیین مسیر بارگذاری بهینه به بررسی تأثیر فشار داخلی و پانچ مقابل برای شکل دهنده اتصالات^۲ شکل پرداختند و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی به منظور تعیین بهینه ترین مسیر بارگذاری، ترتیب دهنده عوامل وابسته مؤثر فرآیند را مورد بررسی قرار دادند.

لینانو و چنگ [6] با توجه به در اختیار داشتن منحنی تنش-کرنش لوله استیل کم کردن توسط آزمایش بالج هیدرولیکی و با مقایسه آن با مدل شیوه سازی، به معروفی روایطی براساس معادلات تعادل نیرو، نتایج تجربی و معادلات حاکم برای تغییر شکل های الاستیک و پلاستیک پرداختند. جهت بهبود کیفیت شکل پذیری لوله ها با جنس ها و ضخامت های مختلف در روش هیدروفرمینگ استفاده می شود.

کاشانی زاده و موسوی مشهدی [7] با شبیه سازی المان محدود و مطالعه تجربی به بررسی ساخت لوله سرهاری آلمینیومی پرداختند و اثر تغذیه محوری، فشار داخلی و پانچ مقابل را مورد بررسی قرار دادند و گزارشی از تأثیر مشخصات هندسی و اصطلاحات بر تغییرات ضخامت، ارتفاع برآمدگی و معایب محتمل (ترکیدگی، چروکیدگی و کمانش) براساس مسیر بارگذاری را ارائه کردند.

کد خدایان و عرفانی مقدم [8] با توضیح این مطلب که نحوه اعمال فشار داخلی به دو صورت منحنی فشار خطی و کاهشی- افزایشی، برای مسیر بارگذاری ارائه شده و این نکته که فشار نوسانی بر لوله به نوعی کار سختی بر لوله محسوب می شود، نتیجه گرفتند که فشار نوسانی بر استحکام لوله می افزاید و منجر به تأخیر در روند کاهش ضخامت لوله می شود. آن ها با طراحی مسیرهای بارگذاری مختلف اقدام به استفاده از سیستم بهینه سازی برای مطالعه ساخت لوله های T شکل کردند که کمترین تغییرات ضخامت و حداکثر ارتفاع برآمدگی را به همراه داشته باشد و آن را به عنوان معیار شکل پذیری در نظر گرفتند و با بهره مند شدن از مدل سازی و تحلیل رگرسیونی برای بهینه سازی، رابطه ای را جهت ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی معرفی کردند.

در این مقاله به بررسی عددی و تجربی برای ساخت لوله های سه راهی T شکل تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداخته شده و شکل دهنده توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت اصلی روش هیدروفرمینگ دینامیکی نسبت به سایر روش های استاتیکی در اعمال مسیر بارگذاری است. با توجه به نوع مسیر بارگذاری طراحی شده باید هر دو عامل فشار داخلی و نیروی محوری با یک ضربه اعمال شود. در این روش مسیر بارگذاری مختلفی در نظر گرفته شده که تأمین تغذیه محوری و فشار داخلی از طریق سیال واسطه به طور همزمان و از یک منبع انرژی صورت می گیرد و مقدار فشار تولید شده برای شکل دهنده براساس انرژی جنبشی و مقدار ستون سیال در قالب تأمین می شود، همچنین در این تحقیق مقدار برآمدگی با توجه به کیفیت سطح پذیری و تغییرات طول مورد بررسی قرار گرفته است.

2- معرفی سامانه انجام آزمایش ها

2-1- بررسی تجهیزات

بکی از دستگاه هایی که برای شکل دهنده فلزات به روش هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می گیرد چکش پرتابه ای نام دارد که این سیستم روشی براساس ترخ بارگذاری کم است. در این مقاله برای طراحی مسیر بارگذاری شکل دهنده

محصول کمک ویژه ای نماید. فرآیند هیدروفرمینگ برای کاهش اتصالات و به حداقل رساندن یک پارچگی مورد استفاده قرار می گیرد و از مزایای آن در مقایسه با سایر روش ها می توان به افزایش مقاومت، حداقل شدن تغییرات ضخامت، صافی سطوح، کاهش عملیات ثانویه، یک پارچگی قطعه تولید شده، کاهش دوربین، دقت ابعادی بالا، کاهش سایش ابزار مصرفی، عدم نیاز به قالب های متعدد، کاهش زمان تولید، کاهش وزن قطعات تولید شده و کاهش هزینه اشاره کرد. از نکاتی که جهت بهبود کیفیت باید مورد توجه قرار گیرد، طراحی شرایط مناسب بارگذاری است. تعیین شرایط بارگذاری در طول فرآیند، طراحی مسیر بارگذاری تعبیر می شود که تنظیم مناسب شرایط مسیر بارگذاری از جمله پارامترهای مؤثر بر کیفیت قطعات است و پارامترهای مؤثر در این فرآیند شامل فشار داخلی، جابه جایی پانچ های محوری و پانچ مقابل در این فرآیند هایی که این روش در صنعت دارد می توان به خودرسازی، هواپیماسازی، صنایع بهداشتی و شیرآلات اشاره کرد. برای نمونه در ساخت برخی قطعات رادیاتور و موتور اتومبیل، محورهای جلو و عقب اتومبیل، برخی قطعات اگزوز، فریم اصلی صندلی و جهت تولید سه راهی ۷ شکل و T شکل در لوله کشی های ساختمانی و صنایع نفت و گاز از این فناوری استفاده می شود. تحقیقات گسترده ای در زمینه شکل دهنده توسط فرآیند هیدروفرمینگ صورت گرفته است که از جمله می توان مواردی را تحت بررسی قرار داد:

کوک [1] با مطالعه تأثیر مسیرهای بارگذاری مختلف بر چند قطعه کیفیت محصول نهایی را بررسی کرد و به این جهت نتایج حاصل برای مقدار نازک شدنگی و ارتفاع برآمدگی را مورد مقایسه قرار داد، همچنین مسیرهای پیشنهادی به طور دلخواه معرفی شد و با استفاده از روش المان محدود تأثیر مسیرهای بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت. شکل دهنده لوله ها با استفاده از فشار داخلی و پانچ محوری انجام شد. با اعمال دو مسیر بارگذاری که از نظر فشار داخلی و زمان یکسان بودند، تغذیه محوری برای یک نمونه را بیش از دیگری اعمال کرد و مشاهده شد که ارتفاع برآمدگی بیشتری با حفظ تغییرات ضخامت یکسان به دست آمد، که البته به جنس لوله و حد معینی از نیروی محوری وابسته است. برای تغذیه محوری سه متغیر در طراحی مسیر جابه جایی پانچ محوری حائز اهمیت هستند که به عنوان جابه جایی پانچ ها، مدت زمان مربوط به آن و موقعیت نهایی پانچ های محوری می توان بیان کرد. همو و همکاران [2] برای طراحی تعیین مسیرهای بارگذاری پارامتریک از نرم افزار انسسیس^۱ به منظور بهبود قابلیت شکل پذیری در فرآیند هیدروفرمینگ استفاده کردند. در تحقیق آن ها برای طراحی مسیرهای بارگذاری بهینه دو مسیر بارگذاری بر حسب زمان برای فشار داخلی و پانچ محوری پیشنهاد شد. سپس تأثیر این مسیرها را بر مقدار نازک شدنگی در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه سازی المان محدود مطالعه کرده و مسیر بارگذاری بهینه دو میان این دو مسیر پیشنهادی تعیین شد.

ری و مک دونالد [3] به بررسی اتصالات سه راهی T شکل و چهار راهی با استفاده از روش هیدروفرمینگ پرداختند و در انتخاب مسیر بارگذاری، روش مدل سازی ال اس داینا² را به کار برند و نتایج آزمایش ها را با شبیه سازی المان محدود مقایسه کردند. در نتایج بدست آمده انتباقي مناسبي از مدل سازی و بررسی های تجربی مشاهده شد.

ژیراتیرات و همکاران [4] با بررسی تحلیلی و عددی تخمینی برای تغذیه محوری و فشار داخلی جهت تولید اتصالات ۷ شکل به دست آورند و

¹ ANSYS
² LS-DYNA

شکل های 4.3 تصویر شماتیکی از روند تغییر شکل لوله در قالب ساخت اتصالات T شکل تحت بارگذاری هیدرودینامیکی را نمایش می دهند. تصویر قالب همراه با تجهیزات مربوطه (سنبله، پانچ مقابل و کفشکها) و لوله تغییر شکل یافته از جنس مس در شکل 5 مشاهده می شود.

همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود برای ایجاد برآمدگی مناسب از پانچ مقابل استفاده شده است که مقدار برآمدگی را با تعیین آن برای تعیین ارتفاع برآمدگی با توجه به جنس و ضخامت لوله می توان مشخص کرد. شعاع فیلت قالب برای آغاز تغییر شکل در محفظه انبساطی (منطقه رشد برآمدگی) 3 میلی متر است. اثر شعاع فیلت بدین شرح است که اگر شعاع فیلت کم باشد تغذیه محوری پوسته برای افزایش برآمدگی به سختی انجام می شود و در نتیجه اختلال بروز معاوی در تغییر شکل بیشتر شده و شکل دهی مطلوب اتفاق نمی افتد. اگر شعاع فیلت زیاد در نظر گرفته شود با حرکت آزاده پوسته احتمال بروز پارگی لوله در منطقه آغاز رشد برآمدگی بیشتر می شود.

جهت یکسان و هماهنگ بودن تغذیه محوری از سنبله هایی که توسط نسمه آهنه به هم متصل شده اند استفاده می شود که در شکل 6 نمایش داده

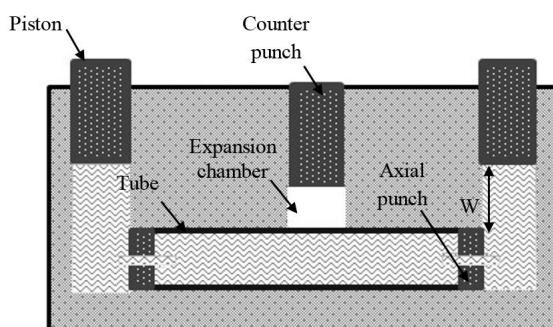


Fig. 3 Schematic view of the die before the deformation process (W is showing the fluid column)

شکل 3 نمای شماتیک از قالب پیش از آغاز فرآیند تغییر شکل (W نشان دهنده مقدار سیال است)

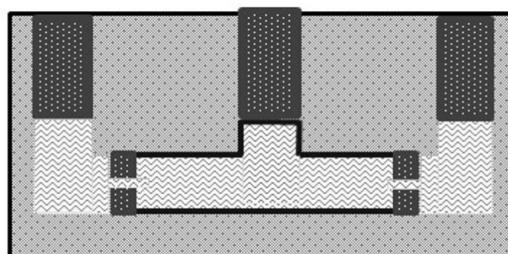


Fig. 4 Schematic view of the die after the deformation process

شکل 4 نمای شماتیک از قالب پس از اتمام فرآیند تغییر شکل

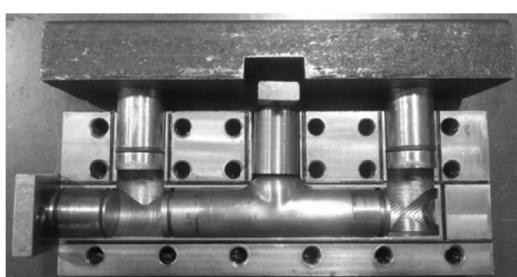


Fig. 5 The die used for experimental tests

شکل 5 قالب مورد استفاده برای آزمایش ها

لوله ها از سامانه چکش پرتابه ای استفاده شده است که متشکل از یک جعبه وزنه (چکش پرتابه) بوده و از طریق سه ریلی که با کمترین اصطکاک در اطراف آن مهار شده، عامل به وجود آورنده ضربه است. این وزنه با گیره مخصوصی کنترل شده و تا ارتفاع موردنظر بالا برده می شود و فرآیند سقوط آزاد با رهاسازی وزنه در راستای کاملاً عمودی اجسام می گردد. در شکل 1 تصویر شماتیک سامانه چکش پرتابه ای نمایش داده شده است. تصویر دستگاه چکش پرتابه ای واقع در موسسه آموزش عالی احرار رشت در شکل 2 قابل مشاهده است.

انرژی جنبشی حاصل از رهاسازی وزنه به صورت بار ضربه ای به سنبله تعیینه شده بر قالب وارد می شود و سیال (آب و روغن) موجود در قالب به عنوان عامل واسطه انتقال دهنده فشار وظیفه تولید فشار داخلی و تغذیه محوری را دارد. به بیان دیگر انرژی جنبشی به فشار هیدرودینامیکی در سیال تبدیل شده و با درنظر گرفتن کفشک هایی در طرفین لوله، تغذیه محوری صورت می گیرد و فشار داخلی با عبور سیال از سوراخ مرکزی کفشک ها تأمین می شود؛ بنابراین تغییر شکل در لوله صورت می گیرد. این فرآیند یک روش مکانیکی و دارای نرخ تغییر شکل در محدوده میلی ثانیه است، به معنی که شکل دهی با انتقال فشار حاصل از ضربه به نمونه انجام می پذیرد.

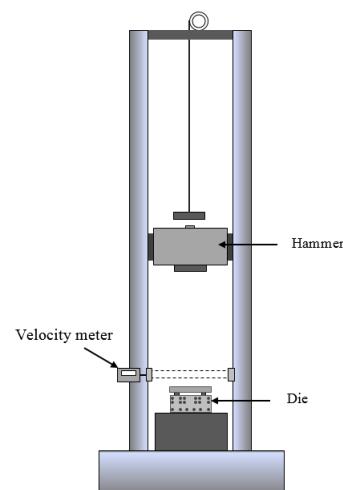


Fig. 1 Schematic of drop hammer

شکل 1 تصویر شماتیک چکش پرتابه ای



Fig. 2 Drop hammer system

شکل 2 دستگاه چکش پرتابه ای

تمام آزمایش‌ها در حالتی که وزنه چکش پرتابه‌ای ۵۵ کیلوگرم بوده انجام شده، همچنین برای تشخیص سرعت لحظه برخورد وزنه به سنبه از دستگاه سرعت سنج لیزری استفاده شده و تصویر آن در شکل ۹ قابل مشاهده است.

3-مدل سازی

در این مقاله جهت شبیه‌سازی فرآیند شکل دهی اتصالات T شکل، از روش صریح دینامیکی^۱ نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. معمولاً هدف از شبیه‌سازی فرآیند جهت بررسی جزئیات بیشتر و دقیق بر انتباطی با نتایج تجربی است.

با توجه به این که برای بررسی و پیش‌بینی نتیجه آزمایش‌ها، از فرآیند مدل سازی استفاده می‌شود، می‌توان از روابطی برای تخمین عوامل ورودی مانند فشار داخلی استفاده کرد و با اعمال آن در مدل شبیه‌سازی و آزمایش‌ها به مقایسه و بررسی نتایج محصول نهایی پرداخت که استفاده از این روابط برای انتخاب بازه اعمال فشار داخلی است تا از انجام آزمایش‌های مکرر جلوگیری نماید.

3-۱-مبانی تئوری در تخمین فشار

با توجه به این که به حداقلی از فشار داخلی برای آغاز تغییر شکل لوله نیاز است و در اثر فشار داخلی با افزایش قطر اولیه لوله ضخامت لوله به طور طبیعی کم خواهد شد؛ بنابراین برای یکنواخت نگهداشتن ضخامت باید پوسته را در جهت طول به حرکت درآورده و به ناحیه انساطو هدایت کرد. برای این منظور از رابطه (۱) با عنوان نیروی تغذیه محوری استفاده می‌شود.

$$(1) F_a = \pi t (D - t) \sigma_{ut}$$

F_a حداکثر نیروی تغذیه محوری است که در جهت محوری بر جداره لوله وارد می‌شود [۷]. هنگامی که لوله در حال حرکت به سوی محفظه انساطو است با حفظ فشار داخلی در حداقل معینی می‌توان مانع از پدیدآمدن چروکیدگی و ضخیم‌شدن قطعه شد. فشار تسليم حداقل فشاری است که برای آغاز تغییر شکل باید اعمال شود و تخمین اولیه مناسبی مانند رابطه (۲) برای یک لوله با تقارن محوری در اختیار است [۴].

$$(2) P_{iy} = S_y \frac{2t}{D - t}$$

P_{iy} فشار تسليم، S_y تنش تسليم مواد، ضخامت اولیه لوله و D قطر خارجی لوله است. فشار ترکیدگی در واقع بیشترین فشاری است که لوله پیش از ترکیدگی می‌تواند تحمل کند و از رابطه (۳) تخمین زده می‌شود [۴].

$$(3) p_{ib} = \sigma_{ut} \frac{4t}{D - t}$$



شکل ۹ سرعت سنج



شکل ۶ نمایی از سنبه‌های متصل به هم

شده است. کفشک‌هایی برای اعمال نیروی محوری و تأمین فشار داخلی لوله مورد نظر در طرفین لوله قرار داده شده است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. تأمین فشار داخلی توسط ایجاد سوراخی در مرکز کفشک‌ها انجام می‌پذیرد که با عبور سیال از سوراخ کفشک به داخل افزایش مقدار سیال در لوله و با توجه به تراکم‌ناپذیری‌بودن سیال، لوله تحت فشار داخلی قرار می‌گیرد و منجر به تغییر شکل می‌شود.

2-مراحل آماده‌سازی فرآیند و انجام آزمایش

برای آماده‌سازی قالب جهت انجام آزمایش و کاهش اصطکاک به منظور صافی سطح لوله و جلوگیری از نقص‌های احتمالی، در ابتدا داخل هر دو نیمه قالب با سمباده ۸۰۰ صیقل کاری شده و سپس با استفاده از گریس‌های موجود در بازار سطح داخلی قالب و سطح خارجی لوله روان کاری می‌شود. با اتصال کفشک‌ها به طرفین لوله و اعمال آبیندی از نفوذ سیال به طرفین لوله و کمبود فشار داخلی جلوگیری می‌شود. پس از انجام عملیات بالا نیمه دوم قالب بسته شده و گیره‌های نگهدارنده قالب به پایه چکش پرتابه‌ای متصل می‌شوند که تصویر آن در شکل ۸ قابل مشاهده است. علاوه بر این جنبشی، مقدار ستون سیال که با w نشان داده می‌شود نیز عامل تولید فشار داخلی است؛ بنابراین باید سیال به اندازه کافی درون قالب تزریق شود و با قرار دادن سنبه‌ها در مکان تعیین شده و اعمال هوکری آماده ضربه نهایی است.



شکل ۷ نمایی از کفشک‌ها برای تغذیه محوری و فشار داخلی



شکل ۸ قالب بسته شده آماده ضربه

^۱ Dynamic explicit

4-1-معرفی نمونه ها

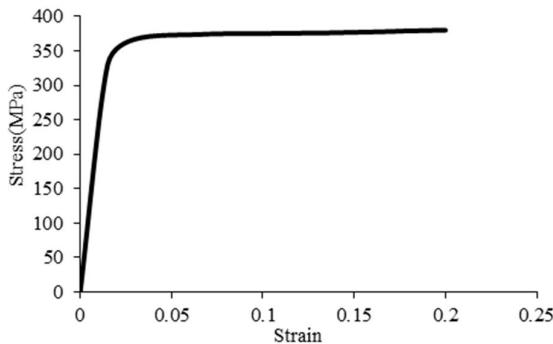
برای تعیین خواص مکانیکی نمونه لوله های مورد آزمایش که از دو جنس مختلف آلمینیوم و مس موجود در بازار استفاده شده اند، آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام⁴ در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشاء انجام شده و منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی ماده در شکل های 12,11 نمایش داده شده و دارای مشخصات ابعاد هندسی یادشده در جدول 1 است.

با توجه به نوع بارگذاری دینامیکی در این مقاله برای بررسی های عددی، نرخ کرنش در شکل دهی نمونه ها درنظر گرفته شده است که با استفاده از رابطه $\frac{v}{L}$ می توان نرخ کرنش را در مدل شبیه سازی اعمال کرد که بدین منظور باید تنش تسیلیم دینامیکی را مطابق رابطه (6) به دست آورد و برای بررسی عددی در نظر گرفت [11].

جدول 1 مشخصات لوله مسی و آلمینیومی

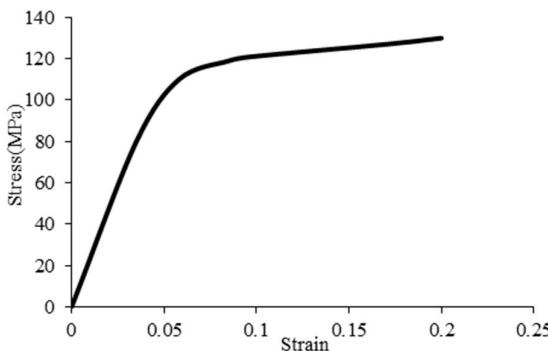
Table 1 The property of copper and aluminum tubes

آلمینیوم	مس	جنس
25	25	قطر خارجی (mm)
2.1	1	ضخامت (mm)
80	80	طول اولیه (mm)
0.33	0.355	ضریب پواسون
70	110	مدول یانگ (GPa)
2700	8940	چگالی



شکل 11 منحنی تنش-کرنش لوله مس

شکل 11 منحنی تنش-کرنش لوله مس



شکل 12 منحنی تنش-کرنش لوله آلمینیوم

شکل 12 منحنی تنش-کرنش لوله آلمینیوم

بنابراین برای تغییر شکل مناسب باید فشار داخلی بیشتر از فشار تسیلیم و کمتر از فشار ترکیدگی درنظر گرفته شود. با درنظر گرفتن نسبت نیروی محوری به فشار داخلی، ضریبی به نام k به دست می آید [9].

$$k = \frac{F_a}{P_{ib}} \quad (4)$$

$$k = 0.785(D - t)^2 \quad (5)$$

همانطور که در رابطه (5) مشاهده می شود ضریب k برای شرایطی که به کمک تغذیه محوری، نسبت مقدار تنش فشاری به تنش کششی برابر با یک شود درنظر گرفته شده که به متغیرهای قطر خارجی و ضخامت لوله وابسته است [9].

3-شرح شبیه سازی عددی

برای مدل سازی فرآیند، لوله به عنوان قطعه شکل پذیر¹ و جامد² در نظر گرفته شد و همچنین قالب به عنوان قطعه صلب³ شبیه سازی شده است. در فرآیند هیدروفرمینگ لوله معمولاً ضریب اصطکاک در حضور روان سازها بین 0.05 تا 0.1 درنظر گرفته می شود [10]. که در شبیه سازی این مقاله 0.1 درنظر گرفته شده است. به دلیل تقارن قطعه و قالب نسبت به صفحات xy و zy و xy تنها یک چهارم مدل سازی انجام شد و از پانچ مقابله جهت کنترل تغییر شکل برآمدگی استفاده شد. از المان C3D8R برای مشینی لوله و از المان صلب R3D4 برای مشینی قالب استفاده شده است. چندین پاسخ از شبیه سازی جهت دقت نتیجه نهایی و استقلال از مشینی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به همگرایی نتایج شود و در نهایت المان مشینی با اندازه مش 0.0005 برگزیده شد. گره لوله از یک سمت در جهت مناسب برای صحیح بودن مدل شبیه سازی مهار شد و در راستای شعاعی و محیطی محدود درنظر گرفته شد. فشار داخلی به عنوان یک بار سطحی در سطح داخلی لوله و بار محوری به عنوان فشار برای جایه جایی محوری در لبه ضخامت، ابتدای لوله در نظر گرفته شد. برای تحلیل تغییر شکل لوله باید ویژگی های عمومی مانند چگالی و خواص مکانیکی ماده تغییر شکل پذیر را معرفی کرد. شکل 10 تصویر شبیه سازی لوله و قالب را نمایش می دهد.

4-بحث و نتایج

در این بخش ابتدا به معرفی نمونه های مورد آزمایش پرداخته شده و سپس با توجه به بارگذاری دینامیکی، شکل دهی لوله ها توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور صحنه سنجی رفتار تغییر شکل لوله ها، نتایج مدل عددی و تجربی مقایسه شده اند.



شکل 10 نمایی از مدل شبیه سازی قالب صلب به صورت یک چهارم

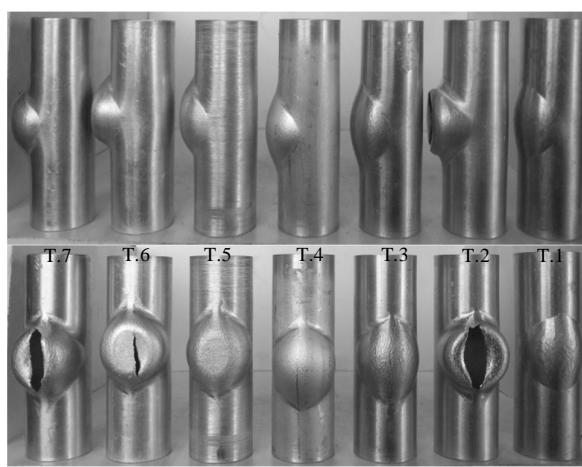
شکل 10 نمایی از مدل شبیه سازی قالب صلب به صورت یک چهارم

¹ Deformable

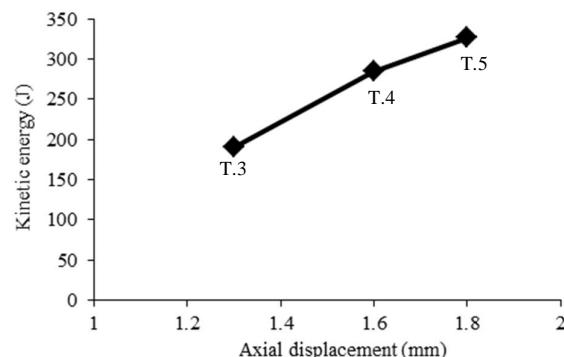
² Solid

³ Rigid body

⁴ SANTAM



شکل 13 نمونه های از روند تغییر شکل لوله های آلومینیومی



شکل 14 نمودار انرژی جنبشی-جانبی محوری براساس آزمایش لوله های آلومینیومی (نمونه های T.3، T.4، T.5 در ستون سیال $w=13\text{mm}$)

نتایج حاصل از آزمایش لوله های مسی مطابق با جدول 3 بررسی می شوند که برای آزمایش های T.1 تا T.10، فاصله پانچ مقابله از لوله در محفظه انساطوی برای رشد برآمدگی 5 میلی متر در نظر گرفته شده است.

در شکل 15 و جدول 3 مشاهده می شود بخشی از برآمدگی لوله به پانچ مقابله مماس شده است. این موضوع کیفیت سطح پذیری را نشان می دهد که به عنوان α معرفی شده است. مقطع پانچ مقابله مسایی با قطر خارجی لوله در نظر گرفته شده و برای نمونه به صورت $\alpha = \frac{18}{25} = 0.72$ به دست می آید.

همان طور که در شکل 15 و جدول 3 مشاهده می شود با ایجاد تناسب بین انرژی جنبشی و مقادیر ستون سیال با افزایش فشار هیدرودینامیکی داخل قالب، برآمدگی بهتری به دست می آید که نشان دهنده تأمین فشار کالیبراسیون¹ بیشتر برای پرشدن گوشه های برآمدگی در قالب است. با مقایسه نمونه های T.1 و T.8 مشاهده می شود که افزایش انرژی جنبشی مشروط به متناسب بودن با مقادیر ستون سیال منجر به افزایش ارتفاع برآمدگی می شود و با دقت به نمونه های T.3 و T.5 در جدول 3 مشاهده می شود که با افزایش مقادیر ستون سیال تغییر طول بیشتری حاصل می شود. در شکل 16 برای نمونه های لوله های T.1، T.9، T.8، T.7، T.6 و T.10 که با مقادیر ستون سیال 14 میلی متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته اند،

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (6)$$

در آن σ_d تنش تسلیم دینامیکی و σ_y تنش تسلیم استاتیکی هستند و ضرایب ثابت برای آلومینیوم $D=6500\text{s}^4$ و $q=4$ [11] و همچنین برای مس $D=390\text{s}^3$ و $q=3$ [12] گزارش شده اند.

با استفاده از تنش تسلیم دینامیکی به دست آمده و روابط (3,2) می توان محدوده های برای تخمین فشار داخلی تعیین کرد.

با توجه به آن چه در آزمایش ها مشاهده شده، مقدار ستون سیال در تغییر شکل مناسب لوله مسی برابر با 14 mm بوده است و با دقت به رابطه $\alpha=v/t$ می توان مدت زمان انجام فرایند شکل دهی لوله مسی در مدل شبیه سازی را به مقدار $t=0.0035\text{s}$ محدود در نظر گرفت. برای مدل شبیه سازی لوله های آلومینیومی با توجه به مقدار ستون سیال (w) می توان $t=0.0038\text{s}$ را انتخاب کرد.

4-2-نتایج تجربی

برای بررسی تجربی شکل دهی لوله های سه راهی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی، تولید محصولی با توزیع ضخامت مناسب و کیفیت بالا سطح پذیری که فاقد ترکیدگی، چروکیدگی و پارگی باشد مورد توجه قرار گرفته است. نتایج ارائه شده شامل اندازه گیری تغییرات طول، ضخامت و کیفیت برآمدگی لوله است. جدول 2 نشان دهنده رفتار مجموعه لوله های آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی است. برای آزمایش نمونه های آلومینیومی T.1 تا T.6 فاصله پانچ مقابله از لوله 5 میلی متر و برای نمونه T.7 شش میلی متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به جدول 2 و شکل 13 مشاهده می شود که تغییر شکل لوله ها با توجه به انرژی جنبشی و مقادیر ستون سیال متفاوت است، برای مثال نمونه T.2 در قیاس با نمونه T.4 تحت انرژی جنبشی یکسان و مقادیر ستون سیال بیشتر دچار ترکیدگی شده که نشان دهنده افزایش فشار داخلی است و نمونه T.5 تناسب بهینه ای از انرژی جنبشی و مقادیر ستون سیال را نشان می دهد.

در شکل 14 نمونه های T.3 و T.4 و T.5 که با مقادیر ستون سیال 13 میلی متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته اند، نمودار انرژی جنبشی نسبت به تغییرات طول برای لوله های آلومینیومی نشان داده شده و بیان می کند که با افزایش انرژی جنبشی تغذیه محوری بیشتری اعمال شده است.

جدول 2 مشخصات آزمایش لوله های آلومینیومی

Table 2 The results of aluminum tubes test

ارتفاع آزاد (cm)	انرژی جنبشی (J)	ستون سیال (mm)	کاهش طول (mm)	تغییر قطر (mm)	شماره آزمایش
2.2	0.4	1.4	12	210	T.1
5.6	0.3	2	18	285	T.2
4.6	0.3	1.3	13	190	T.3
5.3	0.2	1.6	13	285	T.4
5.4	0.4	1.8	13	327	T.5
5.8	0.4	2	14	327	T.6
6.4	0.4	2.2	20	306	T.7

¹ Calibrating pressure

برگشت فشار می شود و با افزایش انرژی جنبشی در مقدار ستون سیال پیکسان تغییر طول بیشتر حاصل خواهد شد.

با دقت به نمودارهای شکل های 17,16 مشاهده می شود که کیفیت سطح پذیری بهتری با تغذیه محوری بیشتر حاصل خواهد شد. در حالی که برآمدگی بیشتری برای نمونه های T.9 و T.10 با ثابت نگه داشتن مقدار ستون سیال و افزایش انرژی جنبشی به دست نیامده که منجر به ایجاد نقطه بحرانی در (نمونه T.8) نمودار شده است. از این رو با دقت بیشتر بر نمونه های 9 و 10 مشخص شد که انرژی جنبشی مازاد منجر به افزایش ضخامت لوله در منطقه آغاز تغییر شکل شده و گزارش آن طبق جدول 4 قابل مشاهده است.

3- مقایسه نتایج عددی و تجربی

جهت بررسی عددی آزمایش لوله های از مدل شبیه سازی المان محدود استفاده شده است که برای تعیین مقدار فشار داخلی می توان تخمین مناسبی را از روابط (3,2) به دست آورد و فشار داخلی بهینه را با مشاهده نتایج متفاوت در بررسی عددی انتخاب و متناسب با رابطه (5) تغذیه محوری کافی را برگزید. برای نمونه در روند دست یابی به تغییر شکل مناسب مشاهده شده است که مدل شبیه سازی معادل نمونه T.1 آزمایش های لوله مسی تحت فشار داخلی قرار گرفته و در شکل 18 نشان داده می شود که رشد برآمدگی برای تکمیل تغییر شکل کامل با توجه به کمبود فشار متوقف شده است.

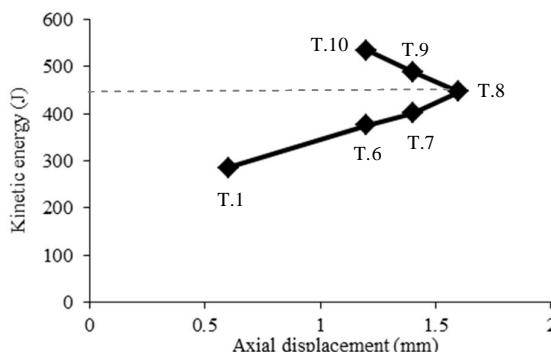


Fig. 16 The experimental diagram of kinetic energy-Axial displacement for copper tubes (T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10) in fluid column W=14mm)

شکل 16 نمودار انرژی جنبشی-جایه جایی محوری براساس آزمایش لوله های مسی (نمونه های T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10 در ستون سیال 14 میلی متر)

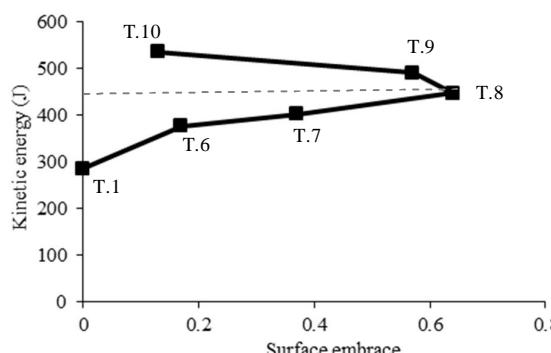


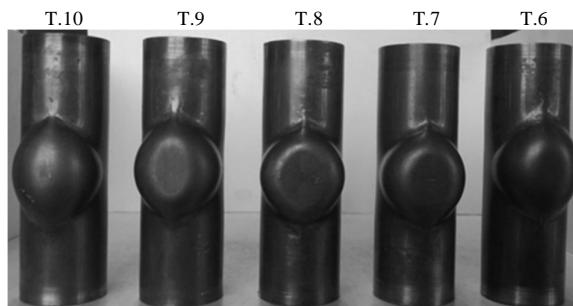
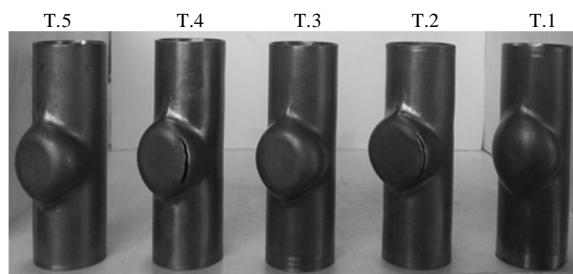
Fig. 17 The experimental diagram of kinetic energy-Axial displacement for copper tubes (T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10) in fluid column W=14mm)

شکل 17 نمودار انرژی جنبشی-سطح پذیری براساس آزمایش لوله های مسی (نمونه های T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10 در ستون سیال 14 میلی متر)

جدول 3 مشخصات آزمایش لوله های مسی

Table 3 The results of copper tubes test

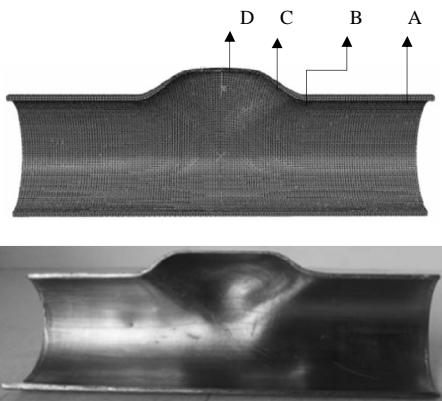
کیفیت پذیری	تغییر قطر سطح	کاهش طول	ستون سیال (mm)	انرژی جنبشی (J)	ارتفاع وزنه (cm)	شماره آزمایش
-	0.5	0.6	14	285	100	T.1
0.72	0.8	1.8	16	368	120	T.2
0.66	0.6	2	16	327	110	T.3
0.68	0.6	1.5	15	347	115	T.4
0.68	0.5	1.8	15	327	110	T.5
0.17	0.4	1.2	14	377	115	T.6
0.37	0.6	1.4	14	402	125	T.7
0.64	0.6	1.6	14	450	140	T.8
0.57	0.6	1.4	14	490	150	T.9
0.14	0.7	1.2	14	535	160	T.10



شکل 15 نمونه های از روند تغییر شکل لوله های مسی

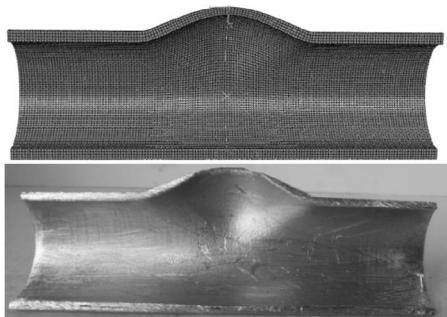
نمودار انرژی جنبشی نسبت به تغییرات طول نشان داده شده است و بیان می کند که با افزایش انرژی جنبشی برای نمونه های T.8, T.7, T.6, T.1, T.9 و T.10 لوله مسی که با مقدار ستون سیال 14 میلی متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته اند را نشان می دهد و بیانگر آن است که کیفیت سطح پذیری تا نقطه بحرانی وجود دارد و مشاهده می شود که در نمونه های T.9 و T.10 علی رغم افزایش انرژی جنبشی تغییرات طول کاهش یافته است.

شکل 17 نمودار انرژی جنبشی نسبت به سطح پذیری برای نمونه های T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10 لوله مسی که با مقدار ستون سیال 14 میلی متر آن است که کیفیت سطح پذیری تا نقطه بحرانی با کاهش طول لوله و افزایش انرژی جنبشی بیشتر می شود. پیش بینی می شود که تغییر قطر سوراخ مرکزی کفشدکها و نفوذ بهتر فشار سیال به داخل لوله منجر به طرف شدن



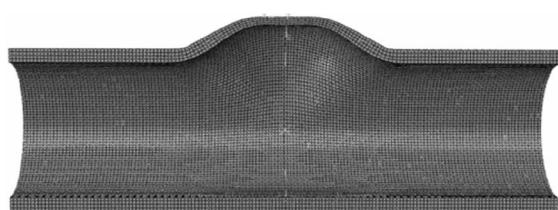
شکل 19 نمایی از مدل شبیه سازی و تجربی لوله مسی تغییر شکل یافته (T.8)

شکل 19 نمایی از مدل شبیه سازی و تجربی لوله مسی تغییر شکل یافته (T.8)



شکل 20 نمایی از مدل شبیه سازی و تجربی لوله آلومینیومی تغییر شکل یافته (T.4)

شکل 20 نمایی از مدل شبیه سازی و تجربی لوله آلومینیومی تغییر شکل یافته (T.4)



شکل 21 نمایی از مدل شبیه سازی لوله آلومینیومی تغییر شکل یافته (T.5)

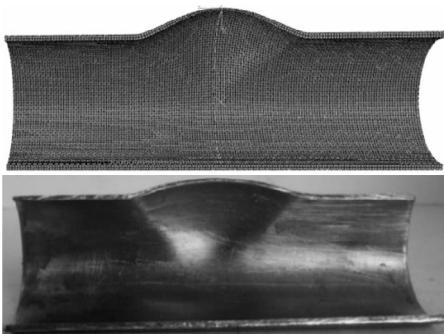
شکل 21 نمایی از مدل شبیه سازی لوله آلومینیومی تغییر شکل یافته (T.5)

جدول 5 توزیع ضخامت نمونه آلومینیومی

Table 5 Thickness distribution for aluminum tubes

نقطه توزیع	ضخامت	تجربی (mm)	عددی (mm)
A		2	2
B		1.78	1.86
C		1.56	1.35
D		0.8	1

جدول 6 نشان دهنده تغییرات طولی برای لوله های آلومینیومی نمونه T.5 و نمونه مسی T.8 است که مقدار کوتاه شدن گرایشی را گزارش می دهد و بیانگر آن است که لوله آلومینیومی با توجه به بیشتر بودن ضخامت تغذیه محوری بیشتری نسبت به نمونه مسی دریافت می کند. نمونه های تجربی دارای تغییر شکل مناسب مورد نظر قرار گرفته و نتایج عددی جدول 6 مجموع تغییر طول لوله را بیان می کند.



شکل 18 نمایی از مدل شبیه سازی و تجربی لوله مسی تغییر شکل یافته (T.1)

جدول 4 توزیع ضخامت برای لوله های مسی (بر حسب میلی متر)

Table 4 Thickness distribution for copper tubes (Dimension in mm)

نقطه	تجربی (T.10)	تجربی (T.1)	تجربی (T.8)	توزیع ضخامت	عددي (T.8)
A	1	1	1	1	1
B	1.18	0.94	0.98	0.86	0.9
C	0.96	0.8	0.64	0.58	0.54
D	0.86	0.76	0.5	0.58	0.42

در جدول 4 علاوه بر گزارش توزیع ضخامت نمونه T.1 که در شکل 18 نشان داده شده است، تغییرات ضخامت لوله ای که برآمدگی مشابهی در شرایط یکسان علی رغم دریافت انرژی جنبشی بیشتر داشته (نمونه T.10)، نیز مشاهده می شود.

همان طور که در شکل 19 نمایش داده شده، برای نمونه T.8 آزمایش های لوله مسی در شرایط $F_a=27600\text{N}$ و $p_i=55\text{MPa}$ تغییر شکل مناسبی در مدل شبیه سازی مشاهده شد و گزارشی از توزیع ضخامت آن در جدول 4 ارائه شده است. فشار داخلی پادشه در محدوده فشار تسلیم و فشار ترکیدگی قرار دارد.

جهت بررسی عددی تغییر شکل لوله های آلومینیومی نیز از روابط تخمین فشار استفاده می شود که شکل 20 مدل شبیه سازی معادل نمونه T.4 لوله آلومینیومی را نشان می دهد و گزارش توزیع ضخامت آن در جدول 5 بیان شده است. با بررسی عددی نمونه T.5 لوله های آلومینیومی که تصویر آن در شکل 21 مشاهده می شود، مشخص شد که تحت شرایط $p_i=32\text{MPa}$ و $F_a=15\text{kN}$ تغییر شکل مناسبی حاصل شده است. فشار داخلی پادشه در محدوده فشار تسلیم و فشار ترکیدگی قرار دارد.

شکل 22 نمودار نیرو زمان برای لوله آلومینیومی T.5 و لوله مسی T.8 را نشان می دهد و مشاهده می شود که در لحظه اول نیرو به حد بیشینه رسیده و سپس تغییر شکل اعمال می شود که علی رغم سطح مقطع (ضخامت) بیشتر لوله آلومینیومی با توجه به خواص ذاتی جنس آن با اعمال نیروی کمتری تغییر شکل انجام شده است.

شکل 23 نمودار تغییرات ارتفاع برآمدگی نمونه آلومینیومی T.5 و لوله مسی T.8 در بازه زمانی معین را نشان می دهد و بیانگر آن است که تا بش از نیمی از فرآیند روند افزایش برآمدگی تا 5 میلی متر در حال انجام است و فشار داخلی در ادامه فرآیند منجر به پر شدن گوشده ها شده است.

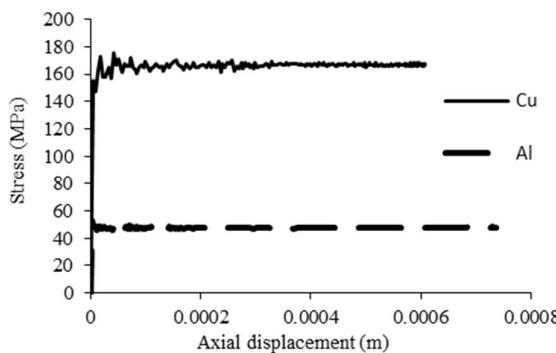


Fig. 24 The Stress–Axial displacement simulation diagram of copper and aluminum deformed tubes (Al T.5 and Cu T.8)

شکل 24 نمودار تنش-تغذیه محوری مدل شبیه‌سازی لوله‌های تغییر شکل یافته آلمینیومی (نمونه T.5) و مسی (نمونه T.8)

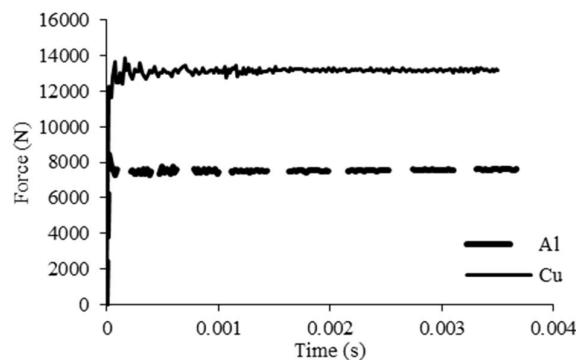


Fig. 22 The simulation diagram of force – time for aluminum tube (Al T.5 and Cu T.8)

شکل 22 نمودار نیرو-زمان در مدل شبیه‌سازی اجزا محدود برای لوله آلمینیومی (نمونه T.5) و مسی (نمونه T.8)

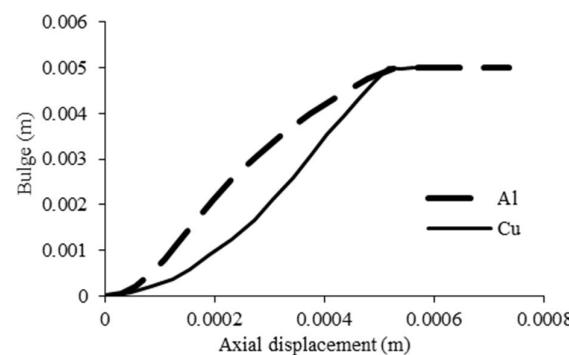


Fig. 25 The Bulge–Axial displacement simulation diagram of copper and aluminum deformed tubes (Al T.5 and Cu T.8)

شکل 25 نمودار برآمدگی-تغذیه محوری مدل شبیه‌سازی لوله‌های تغییر شکل یافته آلمینیومی (نمونه T.5) و مسی (نمونه T.8)

با توجه به بررسی تغییرات محوری مدل شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی در جدول 6 مشاهده می‌شود که در مقدار تغذیه محوری تناوت وجود دارد و دلیل این اختلاف آن است که با خشی از نیروی تغذیه محوری در آزمایش‌ها صرف جبران نازک شدگی‌های حاصل از افزایش قطر لوله در قالب شده است. با توجه به این که مقدار سطح پذیری به عنوان معیاری از کیفیت برآمدگی معرفی شده برای مقایسه نتایج تجربی و عددی مدل شبیه‌سازی، جدول 7 گزارشی از مقدار سطح پذیری سه نمونه مسی T.6، T.7 و T.8 را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده انطباق مناسبی از بررسی عددی در مقایسه با نتیجه تجربی است.

5-نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از سامانه چکش پرتابهای به شکل دهی لوله‌های آلمینیومی و مسی با فرآیند هیدروفرمینگ تحت بارگذاری دینامیکی،

جدول 7 مقایسه تجربی و عددی سطح پذیری لوله مسی (T.8)، T.7 و T.6

Table 7 The experimental and numerical compare of surface embrace for copper tube T.6, T.7 and T.8

عددی	تجربی	نمونه
0.15	0.17	T.6
0.3	0.37	T.7
0.5	0.64	T.8

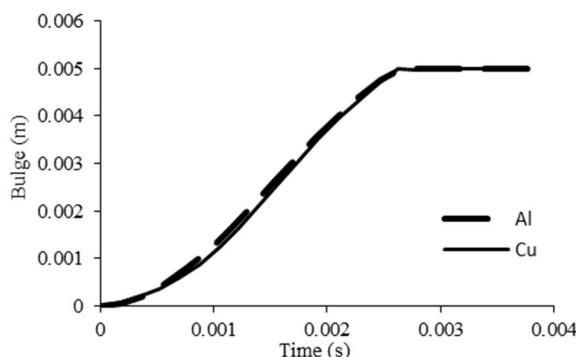


Fig. 23 The simulation diagram of Bulge – Time for aluminum and copper tube (Al T.5 and Cu T.8)

شکل 23 نمودار برآمدگی-زمان در مدل شبیه‌سازی اجزا محدود برای لوله‌های آلمینیومی (نمونه T.5) و مسی (نمونه T.8)

جدول 6 مقایسه تجربی و عددی تغییرات طولی لوله مسی (نمونه T.8) و آلمینیومی (نمونه T.5)

Table 6 The experimental and numerical compare of axial displacement for aluminum (T.5) and copper (T.8) tube

عددی	تجربی	جنس
1.4	0.9	آلومینیوم
1.2	0.8	مس

- [3] P. Ray, B. J. Mac Donald, Experimental study and Finite element Analysis of simple X- and T-branch Tube Hydroforming processes, *Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1498-1518, 2005.
- [4] S. Jirathearanat, C. Hartl, T. Altan, Hydroforming of Y-shapes product and process design using FEA Simulation and Experiments, *Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 124-129, 2004.
- [5] R. D. Lorenzo, G. Ingmaro, F. Chinesta, A gradient-based decomposition approach to optimize pressure path and counterpunch action in Y-shaped tube Hydroforming operations, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 49-60, 2009.
- [6] Y. Lianfaa, G. Cheng, Determination of stress-strain relationship of tubular material with hydraulic bulge test, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, No. 2, pp. 147-154, 2008.
- [7] H. Kashani-Zadeh, M. Mousavi Mashhadi, finite element simulation and experiment in tube hydroforming of aluminum T-shapes, *Faculty of Engineering*, Vol. 40, No. 6, pp. 881-893, 2007. (in Persian)
[فارسی]
- [8] M. Kadkhodayan, A. Erfani Moghadam, An investigation into the optimal load paths for the Pulsating T-Shaped hydroforming of tubes, *Computational Methods in Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 103-120, 2011. (in Persian)
[فارسی]
- [9] S. Thiruvarudchevalan, A. C. Lua, Bulge forming of tubes with axial compressive force proportional to the hydrolic pressure, *Materials Shaping Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 133-142, 1991.
- [10] Y. Hwang, Li. Huang, Friction tests in tube hydroforming, *Engineering Manufacture*, Vol. 219, No. 8, pp. 587-593, 2005.
- [11] N. Jones, *Structural impact*, Second Edition, pp. 340-341, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [12] H. Babaei, A. Darvizeh, Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 39, No. 4, pp. 507-526, 2011.

پرداخته شده است، به طوری که برای تأمین تغذیه محوری و فشار داخلی از یک منبع انرژی استفاده شده و اعمال نیروی محوری با تعییه کفشهای در طرفین لوله تأمین شده است که با عبور سیال از سوراخ مرکزی کفشهای، فشار هیدرودینامیکی داخل لوله نیز افزایش می‌یابد. با بررسی فرآیند هیدروفرمینگ ضربه‌ای مشخص شد که ایجاد تناسب بهینه با توجه به مقدار ستون سیال بیشتر و انرژی جنبشی کمتر علی‌رغم برآمدگی مشابه از تغذیه محوری بیشتری برخوردار است. با دقت به برخی از آزمایش‌ها مشاهده شد که برآمدگی کمتری با ثابت نگهداشت مقدار ستون سیال و افزایش انرژی جنبشی به دست آمده و منجره افزایش ضخامت در منطقه آغاز تغییر شکل (منطقه فیلت محفظه انساطو) شده که بیانگر اهمیت تناسب ستون سیال با انرژی جنبشی است. همچنین مشاهده شد که لوله‌های آلミニومی پس از رسیدن به حد نهایی برآمدگی دچار ترکیدگی می‌شوند، ولی در لوله‌های مسی با افزایش فشار داخلی در بالاترین قسمت برآمدگی بر اثر نازکشدن پارگی رخ می‌دهد؛ بنابراین خاصیت شکل‌پذیری لوله اولیه اثر مستقیم بر کیفیت برآمدگی خواهد داشت.

6- منابع

- [1] M. Koc, Investigation of the effect of loading path and variation in mteiral properties on robustness of the tube hydroforming process, *Materials Processing Technology*, Vol. 133, No. 3, pp. 276-281, 2003.
- [2] S. C. Heo, J. Kim, B. S. Kang, Investigation on determination of loading path to enhance formability in tube hydroforming process using APDL, *Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 653-657, 2006.