مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1395، دوره 16، شماره 9، ص‌ص 223-232

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شکل‌دهی تجربی و عددی لوله‌های T شکل فلزی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی

مجید علی‌طاولی[1*]، هاشم بابایی[2]، آرمان محسنی[3]، رضا رجبیه‌فرد[4]

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، صندوق‌پستی 3756-41635، tavoli@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 تیر 1395
پذیرش: 23 مرداد 1395
ارائه در سایت: 24 شهریور 1395

کلید واژگان:
هیدروفرمینگ
تجربی
چکش پرتابه‌ای
لوله T شکل
ستون سیال

چکیده

در این مقاله به منظور ساخت لوله‌های T شکل با روش هیدروفرمینگ از سامانه چکش پرتابه‌ای استفاده شده است که منجربه بارگذاری هیدرودینامیکی می‌شود. برای شکل‌دهی 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 جنشی چکش پرتابه‌ای، قالبی با توجه به مسیر بارگذاری مذکور طراحی شده است که از طریق سنبه‌های تعبیه‌شده بر قالب، ضربه حاصل از سقوط آزاد وزنه را دریافت کرده و ایجاد فشار هیدرولیکی می‌نماید، تغذیه محوری با قرار دادن کفشک‌هایی در طرفین لوله با دریافت فشار از سیال واسط صورت می‌گیرد، همچنین با عبور سیال از سوراخ میانی کفشک‌ها فشار داخلی برای تغییر شکل تأمین می‌شود. لوله‌های مسی و آلومینیومی در آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای بررسی عددی قطعات نهایی و بهبود کیفیت شکل‌دهی استفاده شده است. مدل شبیه‌سازی تشکیل لوله T شکل با درنظر گرفتن اثر نرخ کرنش و خواص مکانیکی مواد به صورت دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهند که برای تغییر شکل مطلوب باید تمام عوامل ورودی مانند ارتفاع سقوط وزنه، مقدار ستون سیال داخل قالب پیش از اعمال ضربه، آب‌بندی، روان‌کاری، جنس و ضخامت لوله با هم متناسب باشند، همچنین کیفیت ارتفاع برآمدگی با توجه به توزیع ضخامت، تغییرات محوری و سطح مماس با پانچ مقابل مورد بررسی قرار گرفت.

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

Majid Alitavoli[1*], Hashem Babaei[1], Arman Mohseni[2], Reza Rajabiehfard[1]

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

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 شکل‌دهی به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده و ساده با شکل‌های مستقیم یا خمیده با استفاده از اعمال فشار داخلی هیدرولیکی و نیروی محوری صورت می‌گیرد. فرآیند هیدروفرمینگ با نیاز به قطعه‌ای با هندسه و طرح محصول متفاوت و محدودیت شکل و ابعاد قطعه در بخشی از تولید یک محصول پدید آمد.

باتوجه به این‌که در این روش انعطاف‌پذیری بیشتری از قطعه مشاهده می‌شود، استفاده از مواد با استحکام بالا و ضخامت کم می‌تواند به کاهش وزن

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
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)

محصول کمک ویژه‌ای نماید. فرآیند هیدروفرمینگ برای کاهش اتصالات و به حداکثر رساندن یک‌پارچگی مورد استفاده قرار می‌گیرد و از مزایای آن در مقایسه با سایر روش‌ها می‌توان به افزایش مقاومت، حداقل‌شدن تغییرات ضخامت، صافی سطوح، کاهش عملیات ثانویه، یک‌پارچگی قطعه تولیدشده، کاهش دورریز، دقت ابعادی بالا، کاهش سایش ابزار مصرفی، عدم نیاز به قالب‌های متعدد، کاهش زمان تولید، کاهش وزن قطعات تولیدشده 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 می‌شود که تنظیم مناسب شرایط مسیر بارگذاری از جمله پارامترهای مؤثر بر کیفیت قطعات است و پارامترهای مؤثر در این فرآیند شامل فشار داخلی، جابه‌جایی پانچ‌های محوری و پانچ مقابل است. از کاربردهایی که این روش در صنعت دارد می‌توان به خودروسازی، 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 Y شکل و T شکل در لوله‌کشی‌های ساختمانی و صنایع نفت و گاز از این فناوری استفاده می‌شود. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه شکل‌دهی توسط فرآیند هیدروفرمینگ صورت گرفته است که از جمله می‌توان مواردی را تحت بررسی قرار داد:

کوک [1] با مطالعه تأثیر مسیرهای بارگذاری متفاوت بر چند قطعه کیفیت محصول نهایی را بررسی کرد و به این جهت نتایج حاصل برای مقدار نازک‌شدگی و ارتفاع برآمدگی را مورد مقایسه قرار داد، همچنین مسیرهای پیشنهادی به‌طور دلخواه معرفی شد و با استفاده از روش المان محدود تأثیر مسیرهای بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌دهی لوله‌ها 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 به‌دست آمد، که البته به جنس لوله و حد معینی از نیروی محوری وابسته است. برای تغذیه محوری سه متغیر در طراحی مسیر جابه‌جایی پانچ محوری حائز اهمیت هستند که به‌عنوان جابه‌جایی پانچ‌ها، مدت زمان مربوط به آن و موقعیت نهایی پانچ‌های محوری می‌توان بیان کرد.

هیو و همکاران [2] برای طراحی تعیین مسیرهای بارگذاری پارامتریک از نرم‌افزار انسیس[1] به‌منظور بهبود قابلیت شکل‌پذیری در فرآیند هیدروفرمینگ استفاده کردند. در تحقیق آن‌ها برای طراحی مسیرهای بارگذاری بهینه دو مسیر بارگذاری برحسب زمان برای فشار داخلی و پانچ محوری پیشنهاد شد. سپس تأثیر این مسیرها را بر مقدار نازک‌شدگی در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود مطالعه کرده و مسیر بارگذاری بهینه از 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 مدل‌سازی ال‌اس‌داینا[2] را به‌کار بردند و نتایج آزمایش‌ها را با شبیه‌سازی المان محدود مقایسه کردند. در نتایج به‌دست‌آمده انطباق مناسبی از مدل‌سازی و بررسی‌های تجربی مشاهده شد.

ژیراتیرانات و همکاران [4] با بررسی تحلیلی و عددی تخمینی برای تغذیه محوری و فشار داخلی جهت تولید اتصالات Y شکل به‌دست آوردند و 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 شکل‌دهی اتصالات Y شکل پرداختند و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به منظور تعیین بهینه‌ترین مسیر بارگذاری، ترتیب‌دهی عوامل وابسته مؤثر فرآیند را مورد بررسی قرار دادند.

لیانفا و چنگ [6] با توجه به در اختیار داشتن منحنی تنش-کرنش لوله استیل کم کربن توسط آزمایش بالج هیدرولیکی و با مقایسه آن با مدل شبیه‌سازی، به معرفی روابطی براساس معادلات تعادل نیرو، نتایج تجربی و معادلات حاکم برای تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک پرداختند. جهت بهبود کیفیت شکل‌پذیری لوله‌ها با جنس‌ها و ضخامت‌های متفاوت در روش هیدروفرمینگ استفاده می‌شود.

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

کدخدایان و عرفانی‌مقدم [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 می‌شود، نتیجه گرفتند که فشار نوسانی بر استحکام لوله می‌افزاید و منجر به تأخیر در روند کاهش ضخامت لوله می‌شود. آن‌ها با طراحی مسیرهای بارگذاری متفاوت اقدام به استفاده از سیستم بهینه‌سازی برای مطالعه ساخت لوله‌های T شکل کردند که کمترین تغییرات ضخامت و حداکثر ارتفاع برآمدگی را به همراه داشته باشد و آن را به‌عنوان معیار شکل‌پذیری در نظر گرفتند و با بهره‌مندشدن از مدل‌سازی و تحلیل رگرسیونی برای بهینه‌سازی، رابطه‌ای را جهت ایجاد ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی معرفی کردند.

در این مقاله به بررسی عددی و تجربی برای ساخت لوله‌های سه راهی T شکل تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداخته شده و شکل‌دهی توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت اصلی روش هیدروفرمینگ دینامیکی نسبت به سایر روش‌های استاتیکی در اعمال مسیر بارگذاری است. با توجه به نوع مسیر بارگذاری طراحی‌شده باید هر دو عامل فشار داخلی و نیروی محوری با یک ضربه اعمال شود. در این روش مسیر بارگذاری متفاوتی در نظر گرفته شده که تأمین تغذیه محوری و فشار داخلی از طریق سیال واسط به طور هم‌زمان و از یک منبع انرژی صورت می‌گیرد و مقدار فشار تولید شده برای شکل‌دهی براساس انرژی جنبشی و مقدار ستون سیال در قالب تأمین می‌شود، همچنین در این تحقیق مقدار برآمدگی با توجه به کیفیت سطح‌پذیری و تغییرات طول مورد بررسی قرار گرفته است.

2-معرفی سامانه انجام آزمایش‌ها

2-1- بررسی تجهیزات

یکی از دستگاه‌هایی که برای شکل‌دهی فلزات به روش هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد چکش پرتابه‌ای نام دارد که این سیستم روشی براساس نرخ بارگذاری کم است. در این مقاله برای طراحی مسیر بارگذاری شکل‌دهی

[1] ANSYS
[2] LS-DYNA

لوله‌ها از سامانه چکش پرتابه‌ای 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 مورد نظر بالا برده می‌شود و فرآیند سقوط آزاد با رهاسازی وزنه در راستای کاملاً عمودی انجام می‌گردد. در شکل 1 تصویر شماتیک سامانه چکش پرتابه‌ای نمایش داده شده است. تصویر دستگاه چکش پرتابه‌ای واقع در موسسه آموزش عالی احرار رشت در شکل 2 قابل مشاهده است.

انرژی جنبشی حاصل از رهاسازی وزنه به‌صورت بار ضربه‌ای به سنبه تعبیه شده بر قالب وارد می‌شود و سیال (آب و روغن) موجود در قالب به‌عنوان عامل واسط انتقال‌دهنده 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 کفشک‌هایی در طرفین لوله، تغذیه محوری صورت می‌گیرد و فشار داخلی با عبور سیال از سوراخ مرکزی کفشک‌ها تأمین می‌شود؛ بنابراین تغییر شکل در لوله صورت می‌گیرد. این فرآیند یک روش مکانیکی و دارای نرخ تغییر شکل در محدوده میلی ثانیه است، به معنی که شکل‌دهی با انتقال فشار حاصل از ضربه به نمونه انجام می‌پذیرد.

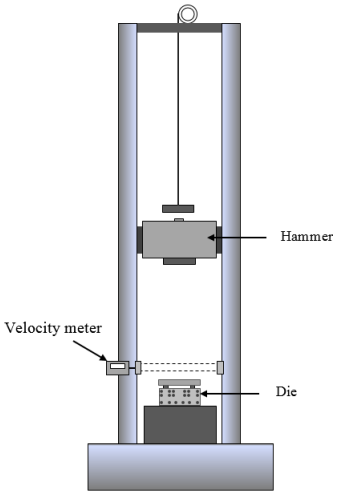

Fig. 1 Schematic of drop hammer

شکل 1 تصویر شماتیک چکش پرتابه‌ای

Fig. 2 Drop hammer system

شکل 2 دستگاه چکش پرتابه‌ای

شکل‌های 3،4 تصویر شماتیکی از روند تغییر شکل لوله در قالب ساخت اتصالات T شکل تحت بارگذاری هیدرودینامیکی را نمایش می‌دهند. تصویر قالب همراه با تجهیزات مربوطه (سنبه، پانچ مقابل و کفشک‌ها) و لوله تغییر شکل یافته از جنس مس در شکل 5 مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود برای ایجاد برآمدگی مناسب از پانچ مقابل استفاده شده است که مقدار برآمدگی را با تعبیه آن برای تعیین ارتفاع برآمدگی با توجه به جنس و ضخامت لوله می‌توان مشخص کرد. شعاع فیلت قالب برای آغاز تغییر شکل در محفظه انبساطی (منطقه رشد برآمدگی) 3 میلی‌متر است. اثر شعاع فیلت بدین شرح است که اگر شعاع فیلت کم باشد تغذیه محوری پوسته برای افزایش برآمدگی به سختی انجام می‌شود و در نتیجه احتمال بروز معایب در تغییر شکل بیشتر شده و شکل‌دهی مطلوب اتفاق نمی‌افتد. اگر شعاع فیلت زیاد درنظر گرفته شود با حرکت آزادنه پوسته احتمال بروز پارگی لوله در منطقه آغاز رشد برآمدگی بیشتر می‌شود.

جهت یکسان و هماهنگ بودن تغذیه محوری از سنبه‌هایی که توسط تسمه آهنی به هم متصل شده‌اند استفاده می‌شود که در شکل 6 نمایش داده

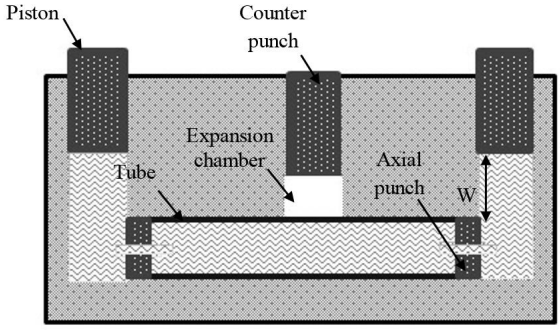

Fig. 3 Schematic view of the die before the deformation process (W is showing the fluid column)

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

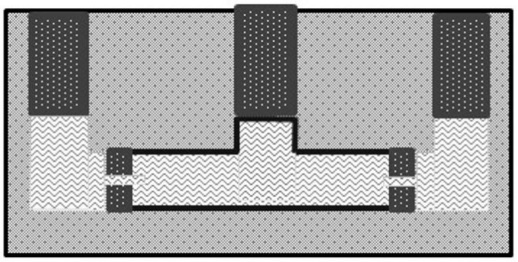

Fig. 4 Schematic view of the die after the deformation process

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

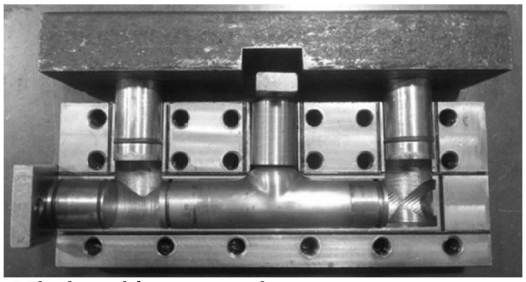

Fig. 5 The die used for experimental tests

شکل 5 قالب مورد استفاده برای آزمایش‌ها

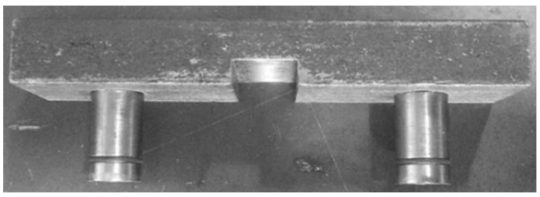

Fig. 6 View of the connected pistons

شکل 6 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 7 مشاهده می‌شود. تأمین فشار داخلی توسط ایجاد سوراخی در مرکز کفشک‌ها انجام می‌پذیرد که با عبور سیال از سوراخ کفشک به داخل و افزایش مقدار سیال در لوله و با توجه به تراکم‌ناپذیربودن سیال، لوله تحت فشار داخلی قرار می‌گیرد و منجر به تغییر شکل می‌شود.

2-2-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 800 صیقل‌کاری شده و سپس با استفاده از گریس‌های موجود در بازار سطح داخلی قالب و سطح خارجی لوله روان‌کاری می‌شود. با اتصال کفشک‌ها به طرفین لوله و اعمال آب‌بندی 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 8 قابل مشاهده است. علاوه‌بر انرژی 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 تعبیه‌شده و اعمال هواگیری آماده ضربه نهایی است.

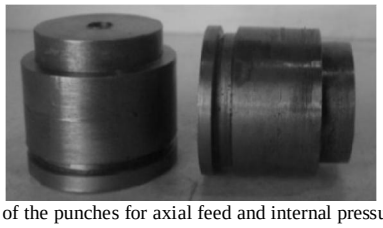

Fig. 7 View of the punches for axial feed and internal pressure

شکل 7 نمایی از کفشک‌ها برای تغذیه محوری و فشار داخلی

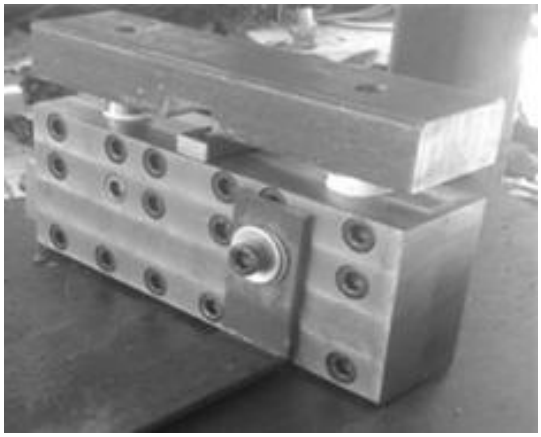

Fig. 8 The die ready to hit

شکل 8 قالب بسته‌شده آماده ضربه

تمام آزمایش‌ها در حالتی که وزنه چکش پرتابه‌ای 55 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 9 قابل مشاهده است.

3-مدل‌سازی

در این مقاله جهت شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی اتصالات T شکل، از روش صریح دینامیکی[1] نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. معمولاً هدف از شبیه‌سازی فرآیند جهت بررسی جزئیات بیشتر و دقت بر انطباق با نتایج تجربی است.

با توجه به این‌که برای بررسی و پیش‌بینی نتیجه آزمایش‌ها، از فرآیند مدل‌سازی 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.

1-3-مبانی تئوری در تخمین فشار

با توجه به این‌که به حداقلی از فشار داخلی برای آغاز تغییر شکل لوله نیاز است و در اثر فشار داخلی با افزایش قطر اولیه لوله ضخامت لوله به‌طور طبیعی کم خواهد شد؛ بنابراین برای یکنواخت نگه‌داشتن ضخامت باید پوسته را در جهت طول به حرکت درآورده و به ناحیه انبساطی هدایت کرد. برای این منظور از رابطه (1) با عنوان نیروی تغذیه محوری استفاده می‌شود.

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

F_a حداکثر نیروی تغذیه محوری است که در جهت محوری بر جداره لوله وارد می‌شود [7]. هنگامی که لوله در حال حرکت به سوی محفظه انبساطی است با حفظ فشار داخلی در حداقل معینی می‌توان مانع از پدیدآمدن چروکیدگی و ضخیم‌شدن قطعه شد. فشار تسلیم حداقل فشاری است که برای آغاز تغییر شکل باید اعمال شود و تخمین اولیه مناسبی مانند رابطه (2) برای یک لوله با تقارن محوری در اختیار است [4].

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

P_{iy} فشار تسلیم، S_y تنش تسلیم مواد، t 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 (3) تخمین زده می‌شود [4].

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

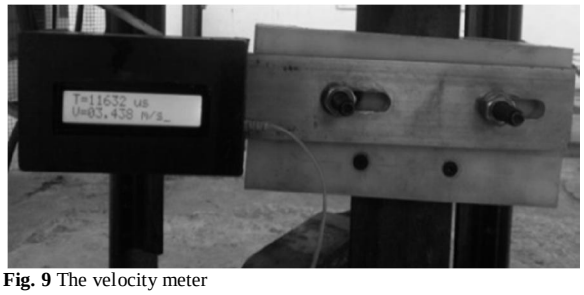

Fig. 9 The velocity meter

شکل 9 سرعت‌سنج

[1] Dynamic explicit

بنابراین برای تغییر شکل مناسب باید فشار داخلی بیشتر از فشار تسلیم و کمتر از فشار ترکیدگی درنظر گرفته شود. با درنظر گرفتن نسبت نیروی محوری به فشارداخلی، ضریبی به نام k به‌دست می‌آید [9].

$$k = \frac{F_a}{P_{ib}} \tag{4}$$

$$k = 0.785(D-t)^2 \tag{5}$$

همان‌طور که در رابطه (5) مشاهده می‌شود 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].

3-2-شرح شبیه‌سازی عددی

برای مدل‌سازی فرآیند، لوله به‌عنوان قطعه شکل‌پذیر[1] و جامد[2] در نظر گرفته شد و همچنین قالب به‌عنوان قطعه صلب[3] شبیه‌سازی شده است. در فرآیند هیدروفرمینگ لوله معمولاً ضریب اصطکاک در حضور روان‌سازها بین 0.05 تا 0.1 درنظر گرفته می‌شود [10]. که در شبیه‌سازی این مقاله 0.1 درنظر گرفته شده است. به دلیل تقارن قطعه و قالب نسبت به صفحات zy و xy تنها یک چهارم مدل‌سازی انجام شد و از پانچ مقابل جهت کنترل تغییر شکل برآمدگی استفاده شد. از المانC3D8R برای مش‌بندی لوله و از المان صلب R3D4 برای مش‌بندی قالب استفاده شده است. چندین پاسخ از شبیه‌سازی جهت دقت نتیجه نهایی و استقلال از مش‌بندی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به همگرایی نتایج شود و در نهایت المان‌بندی با اندازه مش 0.0005 برگزیده شد. گره لوله از یک سمت در جهت مناسب برای صحیح‌بودن مدل شبیه‌سازی مهار شد و در راستای شعاعی و محیطی محدود درنظر گرفته شد. فشار داخلی به‌عنوان یک بار سطحی در سطح داخلی لوله و بار محوری به‌عنوان فشار برای جابه‌جایی محوری در لبه ضخامت، ابتدای لوله در نظر گرفته شد. برای تحلیل تغییر شکل لوله باید ویژگی‌های عمومی مانند چگالی و خواص مکانیکی ماده تغییر شکل‌پذیر را معرفی کرد. شکل 10 تصویر شبیه‌سازی لوله و قالب را نمایش می‌دهد.

4-بحث و نتایج

در این بخش ابتدا به معرفی نمونه‌های مورد آزمایش پرداخته شده و سپس با توجه به بارگذاری دینامیکی، شکل‌دهی لوله‌ها توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور صحه‌سنجی رفتار تغییر شکل لوله‌ها، نتایج مدل عددی و تجربی مقایسه شده‌اند.

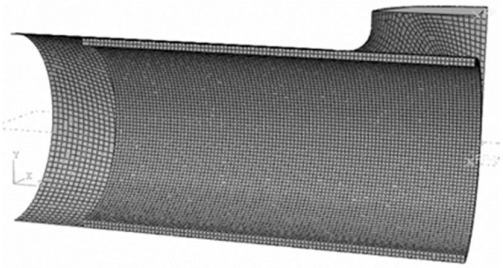

Fig. 10 Quarter view of the simulation model of a rigid die

شکل 10 نمایی از مدل شبیه‌سازی قالب صلب به‌صورت یک چهارم

[1] Deformable
[2] Solid
[3] Rigid body

4-1-معرفی نمونه‌ها

برای تعیین خواص مکانیکی نمونه لوله‌های مورد آزمایش که از دو جنس متفاوت آلومینیوم و مس موجود در بازار استفاده شده‌اند، آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM E8 با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام[4] در دانشگاه آزاد اسلامی مرکز لشت نشاء انجام شده و منحنی تنش حقیقی بر حسب کرنش پلاستیک حقیقی ماده در شکل‌های 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 بررسی‌های عددی، نرخ کرنش در شکل‌دهی نمونه‌ها درنظر گرفته شده است که با استفاده از رابطه $\frac{V}{L}$ می‌توان نرخ کرنش را در مدل شبیه‌سازی اعمال کرد که بدین منظور باید تنش تسلیم دینامیکی را مطابق رابطه (6) به‌دست آورد و برای بررسی عددی در نظر گرفت [11].

جدول 1 مشخصات لوله مسی و آلومینیومی

Table 1 The property of copper and aluminum tubes

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

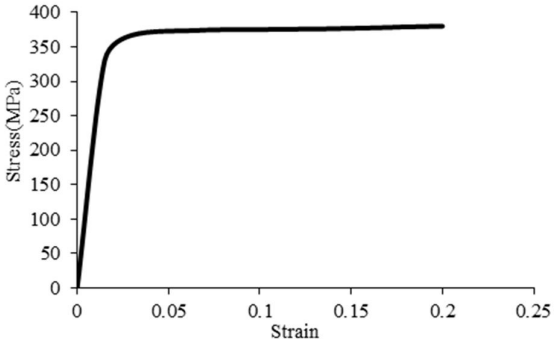

Fig. 11 The stress - strain curve for copper

شکل 11 منحنی تنش-کرنش لوله مس

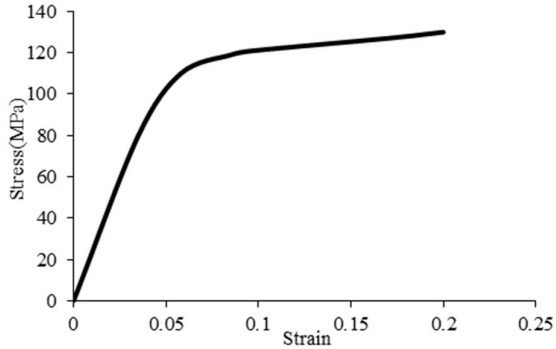

Fig. 12 The stress - strain curve for aluminum

شکل 12 منحنی تنش-کرنش لوله آلومینیوم

[4] SANTAM

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

در آن σ_d تنش تسلیم دینامیکی و σ_y تنش تسلیم استاتیکی هستند و ضرایب ثابت برای آلومینیوم D=6500 s^{-1} و q=4 [11] و همچنین برای مس D=390 s^{-1} و q=3 گزارش شده‌اند [12].

با استفاده از تنش تسلیم دینامیکی به‌دست‌آمده و روابط (3,2) می‌توان محدوده‌ای برای تخمین فشار داخلی تعیین کرد.

با توجه به آن‌چه در آزمایش‌ها مشاهده شده، مقدار ستون سیال در تغییر شکل مناسب لوله مسی برابر با 14 mm بوده است و با دقت به رابطه $x=v.t$ می‌توان مدت زمان انجام فرآیند شکل‌دهی لوله مسی در مدل شبیه‌سازی را به مقدار t=0.0035s محدود درنظر گرفت. برای مدل شبیه‌سازی لوله‌های آلومینیومی با توجه به مقدار ستون سیال (w) می‌توان t=0.0038s را انتخاب کرد.

4-2-نتایج تجربی

برای بررسی تجربی شکل‌دهی لوله‌های سه‌راهی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی، تولید محصولی با توزیع ضخامت مناسب و کیفیت بالای سطح‌پذیری که فاقد ترکیدگی، چروکیدگی و پارگی باشد مورد توجه قرار گرفته است. نتایج ارائه‌شده شامل اندازه‌گیری تغییرات طول، ضخامت و کیفیت برآمدگی لوله است. جدول 2 نشان‌دهنده رفتار مجموعه لوله‌های آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی است. برای آزمایش نمونه‌های آلومینیومی T.1تا T.6 فاصله پانچ مقابل از لوله 5 میلی‌متر و برای نمونه T.7 شش میلی‌متر درنظر گرفته شده است.

با توجه به جدول 2 و شکل 13 مشاهده می‌شود که تغییر شکل لوله‌ها با توجه به انرژی جنبشی و مقدار ستون سیال متفاوت است، برای مثال نمونه T.2 در قیاس با نمونه T.4 تحت انرژی جنبشی یکسان و مقدار ستون سیال بیشتر دچار ترکیدگی شده که نشان‌دهنده افزایش فشار داخلی است و نمونه T.5 تناسب بهینه‌ای از انرژی جنبشی و مقدار ستون سیال را نشان می‌دهد.

در شکل 14 نمونه‌های T.3، T.4 و T.5 که با مقدار ستون سیال 13 میلی‌متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته‌اند، نمودار انرژی جنبشی نسبت به تغییرات طول برای لوله‌های آلومینیومی نشان داده شده و بیان می‌کند که با افزایش انرژی جنبشی تغذیه محوری بیشتری اعمال شده است.

جدول 2 مشخصات آزمایش لوله‌های آلومینیومی

Table 2 The results of aluminum tubes test

شماره آزمایش	ارتفاع سقوط آزاد (cm)	انرژی جنبشی (J)	ستون سیال (mm)	کاهش طول (mm)	تغییر قطر (mm)	برآمدگی (mm)
T.1	80	210	12	1.4	0.4	2.2
T.2	100	285	18	2	0.3	5.6
T.3	75	190	13	1.3	0.3	4.6
T.4	100	285	13	1.6	0.2	5.3
T.5	110	327	13	1.8	0.4	5.4
T.6	110	327	14	2	0.4	5.8
T.7	105	306	20	2.2	0.4	6.4

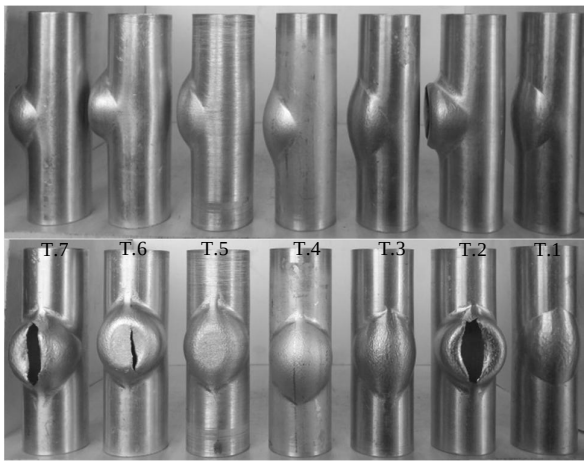

Fig. 13 Examples of tube deformation process

شکل 13 نمونه‌هایی از روند تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی

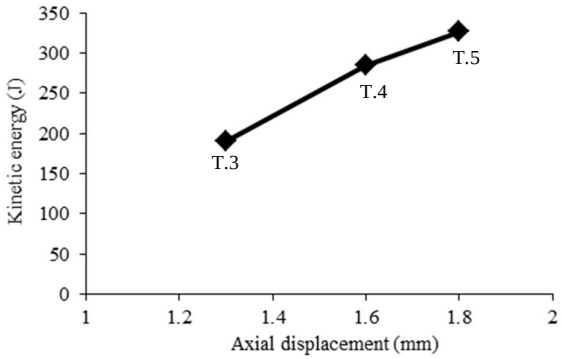

Fig. 14 The experimental diagram of kinetic energy–Axial displacement for aluminum tubes (T.3, T.4 and T.5 in fluid column w=13mm)

شکل 14 نمودار انرژی جنبشی-جابه‌جایی محوری براساس آزمایش لوله‌های آلومینیومی (نمونه‌های T.3،T.4 و T.5 در ستون سیال w=13mm)

نتایج حاصل از آزمایش لوله‌های مسی مطابق با جدول 3 بررسی می‌شوند که برای آزمایش‌های T.1الی T.10، فاصله پانچ مقابل از لوله در محفظه انبساطی برای رشد برآمدگی 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در شکل 15 و جدول 3 مشاهده می‌شود بخشی از برآمدگی لوله به پانچ مقابل مماس شده است. این موضوع کیفیت سطح‌پذیری را نشان می‌دهد که به‌عنوان α معرفی شده است. مقطع پانچ مقابل مساوی با قطر خارجی لوله درنظر گرفته شده و برای نمونه به‌صورت $\alpha = \frac{18}{25} = 0.72$ به‌دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل 15 و جدول 3 مشاهده می‌شود با ایجاد تناسب بین انرژی جنبشی و مقدار ستون سیال با افزایش فشار هیدرودینامیکی داخل قالب، برآمدگی بهتری به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده تأمین فشار کالیبراسیون[1] بیشتر برای پرشدن گوشه‌های برآمدگی در قالب است. با مقایسه نمونه‌های T.1 و T.8 مشاهده می‌شود که افزایش انرژی جنبشی مشروط به متناسب بودن با مقدار ستون سیال منجربه افزایش ارتفاع برآمدگی می‌شود و با دقت به نمونه‌های T.3 و T.5 در جدول 3 مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ستون سیال تغییر طول بیشتری حاصل می‌شود. در شکل 16 برای نمونه لوله‌های مسی T.1، T.6، T.7، T.8، T.9 و T.10 که با مقدار ستون سیال 14 میلی‌متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته‌اند،

[1] Calibrating pressure

جدول 3 مشخصات آزمایش لوله‌های مسی

Table 3 The results of copper tubes test

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

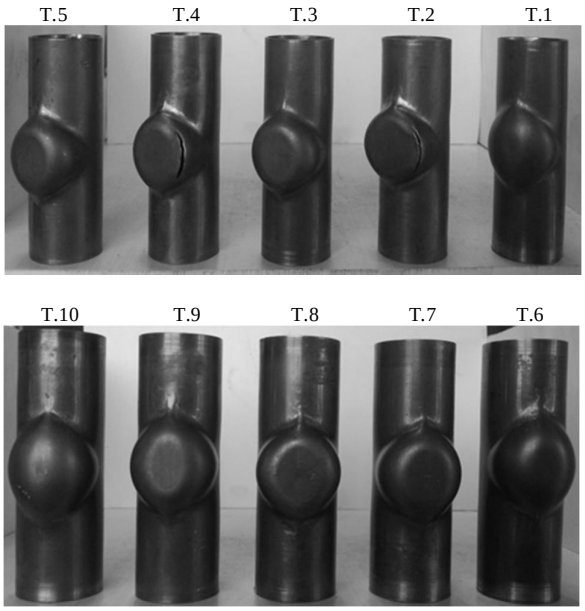

Fig. 15 Examples of tube deformation process

شکل 15 نمونه‌هایی از روند تغییر شکل لوله‌های مسی

نمودار انرژی جنبشی نسبت به تغییرات طول نشان داده شده است و بیان می‌کند که با افزایش انرژی جنبشی برای نمونه‌های T.1، T.6، T.7 وT.8 تغذیه محوری بیشتری به‌دست می‌آید. همان‌طور که در جدول 3 و شکل‌های 17,16 با خط‌چین نشان داده شده است با اعمال انرژی جنبشی 450 ژول در مقدار ستون سیال 14 میلی‌متر نقطه بحرانی وجود دارد و مشاهده می‌شود که در نمونه‌های T.9 و T.10 علی‌رغم افزایش انرژی جنبشی تغییرات طول کاهش یافته است.

شکل 17 نمودار انرژی جنبشی نسبت به سطح‌پذیری برای نمونه‌های T.1، T.6، T.7، T.8، T.9 و T.10 لوله مسی که با مقدار ستون سیال 14 میلی‌متر تحت بارگذاری هیدرودینامیکی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که کیفیت سطح‌پذیری تا نقطه بحرانی با کاهش طول لوله و افزایش انرژی جنبشی بیشتر می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که تغییر قطر سوراخ مرکزی کفشک‌ها و نفوذ بهتر فشار سیال به داخل لوله منجربه بر طرف‌شدن برگشت فشار می‌شود و با افزایش انرژی جنبشی در مقدار ستون سیال یکسان تغییر طول بیشتر حاصل خواهد شد.

با دقت به نمودارهای شکل‌های 17,16 مشاهده می‌شود که کیفیت سطح‌پذیری بهتری با تغذیه محوری بیشتر حاصل خواهد شد. در حالی که برآمدگی بیشتری برای نمونه‌های T.9 و T.10 با ثابت نگه داشتن مقدار ستون سیال و افزایش انرژی جنبشی به‌دست نیامده که منجر به ایجاد نقطه بحرانی در (نمونه T.8) نمودار شده است. از این‌رو با دقت بیشتر بر نمونه‌های T.9و T.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.

3-4- مقایسه نتایج عددی و تجربی

جهت بررسی عددی آزمایش‌ها از مدل شبیه‌سازی المان محدود استفاده شده است که برای تعیین مقدار فشار داخلی می‌توان تخمین مناسبی را از روابط (3,2) به‌دست 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 دست‌یابی به تغییر شکل مناسب مشاهده شده است که مدل شبیه‌سازی معادل نمونه T.1 آزمایش‌های لوله مسی تحت فشار داخلی p_i=53MPa قرار گرفته و در شکل 18 نشان داده می‌شود که رشد برآمدگی برای تکمیل تغییر شکل کامل با توجه به کمبود فشار متوقف شده است.

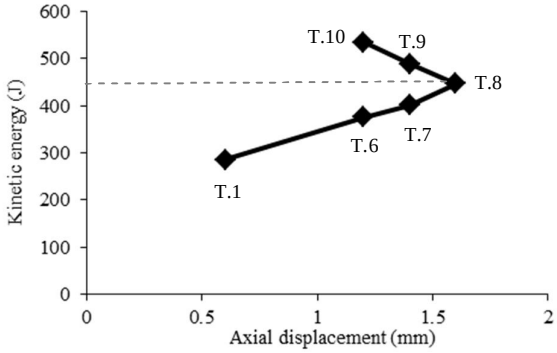

Fig. 16 The experimental diagram of kinetic energy–Axial displacement for copper tubes (T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10 in fluid column W=14mm)

شکل 16 نمودار انرژی جنبشی-جابه‌جایی محوری براساس آزمایش لوله‌های مسی (نمونه‌هایT.1، T.6، T.7، T.8، T.9 و T.10 در ستون سیال 14 میلی‌متر)

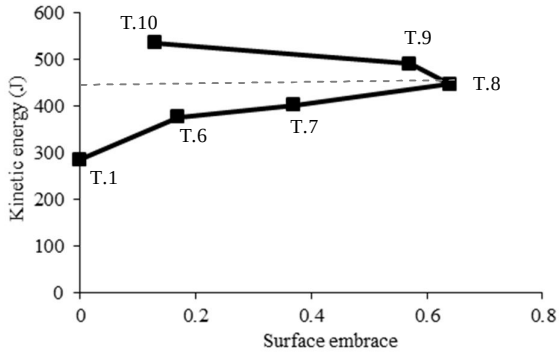

Fig. 17 The experimental diagram of kinetic energy–Axial displacement for copper tubes (T.1, T.6, T.7, T.8, T.9, T.10 in fluid column W=14mm)

شکل 17 نمودار انرژی جنبشی-سطح‌پذیری براساس آزمایش لوله‌های مسی (نمونه‌های T.1، T.6، T.7، T.8، T.9 و T.10 در ستون سیال 14 میلی‌متر)

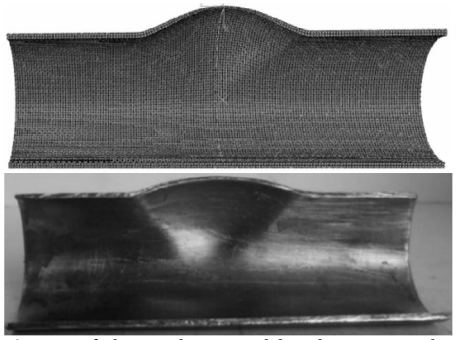

Fig. 18 A view of the simulation model and experimental test of a deformed copper tube (T.1)

شکل 18 نمایی از مدل شبیه‌سازی و تجربی لوله مسی تغییر شکل‌یافته (T.1)

جدول 4 توزیع ضخامت برای لوله‌های مسی (برحسب میلی‌متر)

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

نقاط توزیع ضخامت	تجربی (T.10)	تجربی (T.1)	عددی (T.1)	تجربی (T.8)	عددی (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	0.7	0.54
D	0.86	0.76	0.5	0.58	0.42

در جدول 4 علاوه‌بر گزارش توزیع ضخامت نمونه T.1 که در شکل 18 نشان داده شده است، تغییرات ضخامت لوله‌ای که برآمدگی مشابهی در شرایط یکسان علی‌رغم دریافت انرژی جنبشی بیشتر داشته (نمونه T.10)، نیز مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 19 نمایش داده شده، برای نمونه T.8 آزمایش‌های لوله مسی در شرایط p_i=55MPa و F_a=27600N تغییر شکل مناسبی در مدل شبیه‌سازی مشاهده شد و گزارشی از توزیع ضخامت آن در جدول 4 ارائه شده است. فشار داخلی یادشده در محدوده فشار تسلیم و فشار ترکیدگی قرار دارد.

جهت بررسی عددی تغییر شکل لوله‌های آلومینیومی نیز از روابط تخمین فشار استفاده می‌شود که شکل 20 مدل شبیه‌سازی معادل نمونه T.4 لوله آلومینیومی را نشان می‌دهد و گزارش توزیع ضخامت آن در جدول 5 بیان شده است. با بررسی عددی نمونه T.5 لوله‌های آلومینیومی که تصویر آن در شکل 21 مشاهده می‌شود، مشخص شد که تحت شرایط p_i=32MPa و F_a=15kN تغییر شکل مناسبی حاصل شده است. فشار داخلی یادشده 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 می‌دهد و مشاهده می‌شود که در لحظه اول نیرو به حد بیشینه رسیده و سپس تغییر شکل اعمال می‌شود که علی‌رغم 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 می‌دهد و بیانگر آن است که تا بیش از نیمی از فرآیند روند افزایش برآمدگی تا 5 میلی‌متر در حال انجام است و فشار داخلی در ادامه فرآیند منجر به پر شدن گوشه‌ها شده است.

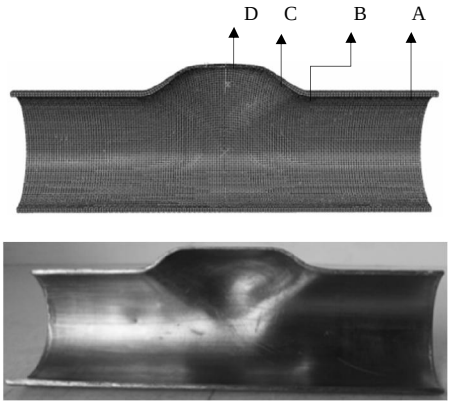

Fig. 19 A view of the simulation model and experimental test of a deformed copper tube (T.8)

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

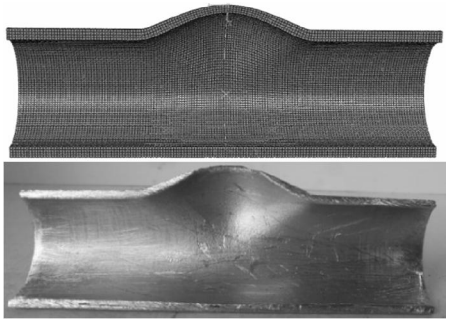

Fig. 20 A view of the simulation and experimental test of a deformed aluminum tube (T.4)

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

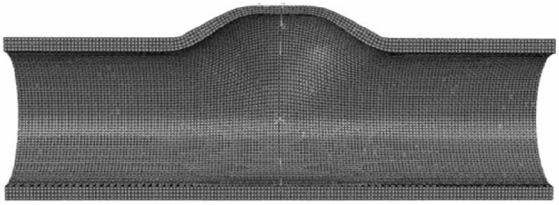

Fig. 21 A view of the simulation result of a deformed aluminum tube (T.5)

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

جدول 5 توزیع ضخامت نمونه آلومینیومی

Table 5 Thickness distribution for aluminum tubes

نقاط توزیع ضخامت	تجربی (T.4) (mm)	عددی (T.4) (mm)
A	2	2
B	1.78	1.86
C	1.56	1.35
D	0.8	1

جدول 6 نشان‌دهنده تغییرات طولی برای لوله‌های آلومینیومی نمونه T.5 و نمونه مسی T.8 است که مقدار کوتاه‌شدگی را گزارش می‌دهد و بیانگر آن است که لوله آلومینیومی با توجه به بیشتر بودن ضخامت تغذیه محوری بیشتری نسبت به نمونه مسی دریافت می‌کند. نمونه‌های تجربی دارای تغییر شکل مناسب مورد نظر قرار گرفته و نتایج عددی جدول 6 مجموع تغییر طول لوله را بیان می‌کند.

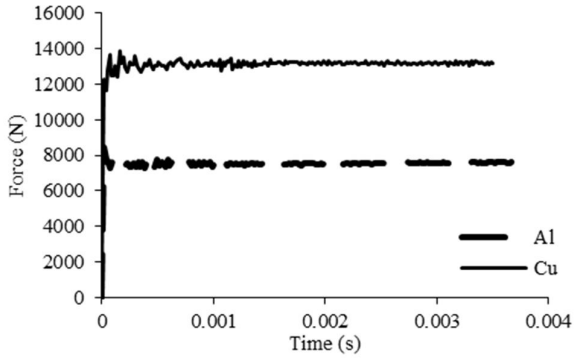

Fig. 22 The simulation diagram of force – time for aluminum tube (Al T.5 and Cu T.8)

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

در شکل 24 برای نمونه‌های آلومینیومی T.5 و لوله مسی T.8 نمودار تنش برحسب تغییرات محوری مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد برای لوله آلومینیومی تنش کمتری اعمال شده و بیانگر آن است که با توجه به تنش تسلیم لوله‌های آلومینیومی و مسی برای تغذیه محوری لوله‌های آلومینیومی نیروی کمتری مورد نیاز است. نمودارهایی که نشان‌گر تغییرات محوری در مدل شبیه‌سازی هستند کوتاه‌شدگی طولی از یک سمت را گزارش می‌دهند.

شکل 25 نشان‌گر نمودار برآمدگی برحسب تغییرات طولی است که برای لوله‌های آلومینیومی T.5 و نمونه مسی T.8 حد برآمدگی با توجه به تغذیه محوری را نمایش می‌دهد و مشاهده می‌شود که پیش از کامل‌شدن برآمدگی، در مقدار یکسانی از تغذیه محوری لوله آلومینیومی برآمدگی بیشتری نسبت به لوله مسی داشته و گویای آن است که با توجه به خاصیت ذاتی لوله آلومینیومی فشار داخلی اثر بیشتری در رشد برآمدگی دارد.

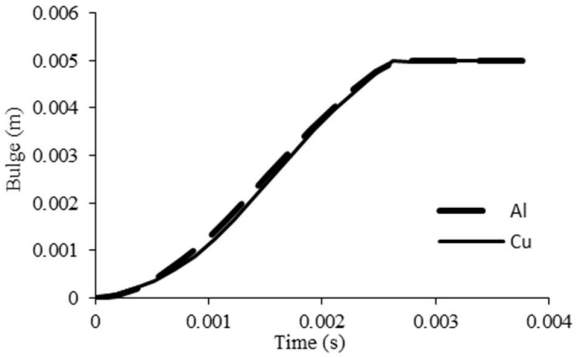

Fig. 23 The simulation diagram of Bulge – Time for aluminum and copper tube (Al T.5 and Cu T.8)

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

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

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

جنس	تجربی(mm)	عددی(mm)
آلومینیوم	0.9	1.4
مس	0.8	1.2

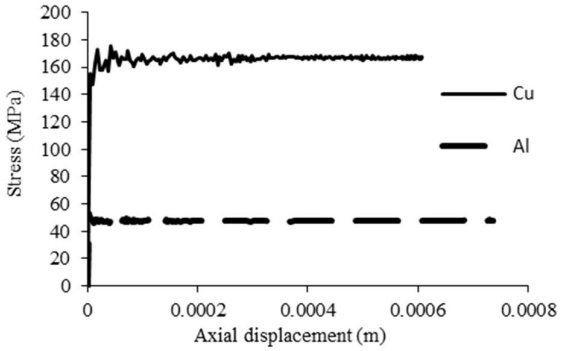

Fig. 24 The Stress–Axial displacement simulation diagram of copper and aluminum deformed tubes (Al T.5 and Cu T.8)

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

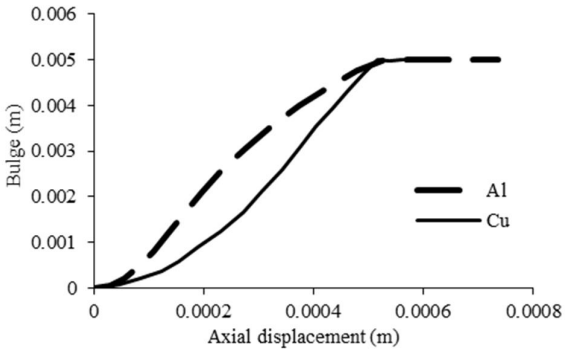

Fig. 25 The Bulge–Axial displacement simulation diagram of copper and aluminum deformed tubes (Al T.5 and Cu T.8)

شکل 25 نمودار برآمدگی-تغذیه محوری مدل شبیه‌سازی لوله‌های تغییر شکل یافته آلومینیومی (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 تفاوت وجود دارد و دلیل این اختلاف آن است که بخشی از نیروی تغذیه محوری در آزمایش‌ها صرف جبران نازک شدگی‌های حاصل از افزایش قطر لوله در قالب شده است.

با توجه به این‌که مقدار سطح‌پذیری به‌عنوان معیاری از کیفیت برآمدگی معرفی شده برای مقایسه نتایج تجربی و عددی مدل شبیه‌سازی، جدول 7 گزارشی از مقدار سطح‌پذیری 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-نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای به شکل‌دهی لوله‌های آلومینیومی و مسی با فرآیند هیدروفرمینگ تحت بارگذاری دینامیکی،

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

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

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

پرداخته شده است، به طوری‌که برای تأمین تغذیه محوری و فشار داخلی از یک منبع انرژی استفاده شده و اعمال نیروی محوری با تعبیه کفشک‌هایی در طرفین لوله تأمین شده است که با عبور سیال از سوراخ مرکزی کفشک‌ها، 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 نگه‌داشتن مقدار ستون سیال و افزایش انرژی جنبشی به‌دست‌آمده و منجربه افزایش ضخامت در منطقه آغاز تغییر شکل (منطقه فیلت محفظه انبساطی) شده که بیانگر اهمیت تناسب ستون سیال با انرژی جنبشی است. همچنین مشاهده شد که لوله‌های آلمینیومی 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.

[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. Ingarao, 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 Pulsationg 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 coppresive 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 Edittion, 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.