ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر عوامل انبساطدهی آزاد لوله فولادی زنگنزن 304 با استفاده از ابزار الاستومری

 3 حسن غفوريان نصرتى 1 ، سيدمحمدحسين سيدكاشى $^{2^{*}}$ ، مهدى گردويى

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* بیرجند، صندوق پستی seyedkashi@birjand.ac.ir ،97175/376

چکیدہ	اطلاعات مقاله
روش انبساطدهی با ابزار الاستومری به عنوان یکی از روشهای انعطافپذیر در تولید قطعات تو خالی یکپارچه مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه، استفاده از روشهای شکل دهی انعطافپذیر به علت انعطافپذیری بالا، کیفیت مطلوب سطح و کاهش هزینه تمام شده مورد توجه اغلب صنایع اعم از هوافضا و تسلیحاتی می باشد. در این پژوهش، شبیه سازی اجزای محدود به وسیله نرمافزار آباکوس برای بررسی رفتار فرایند از ماده می از می زندی بنده بینی 200 مار تفاده از از الار تیری اول گرده از تر در اترانیت می مراد می برای بررسی رفتار فرایند	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 31 تیر 1395 پذیرش: 19 شهریور 1395 ارائه در سایت: 18 مهر 1395
ابساطرهی تونه فولادی رنگارن ۲۵۰۹ با اسفاده از ابراز الا سومری اجرا کردیده است. در ابتدا تایج سییفساری با مفایسه بین هندسه تونه تعییر شکل یافته با آزمون های تجربی مورد بررسی و صحتسنجی قرار گرفت. هدف از تحقیق حاضر تعیین عوامل فرایند و بررسی میزان تاثیر آن ها بر ضخامت و متوسط ارتفاع انبساطرهی لوله میباشد. در این راستا، طراحی آزمایش با روش عاملی کامل صورت گرفت و نتایج با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس تفسیر، و مدلی رگرسیونی برای پیش بینی این مقادیر ارائه گردید. مشخص شد که از بین عوامل بررسی شده، اصطکاک (بین لوله و لاستیک)، ارتفاع لاستیک، میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله اثر معناداری بر روی فرایند دارند. در نهایت مقدار بهینه عوامل موثر در شرایط مورد بررسی این پژوهش ارائه گردیده است.	<i>کلید واژگان:</i> طراحی آزمایش انبساطدهی لوله الاستومر فولاد زنگنزن 304

Investigation of Effective Parameters in Free Bulging of Stainless Steel 304 Tube Using Elastomer Tool

Hasan Ghaforian Nosrati¹, Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi^{1*}, Mahdi Gerdooei²

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, seyedkashi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 21 July 2016 Accepted 09 September 2016 Available Online 09 October 2016	Bulging with elastomer tool has been used in the production of integrated hollow parts as one of the flexible forming methods. Nowadays, most industries such as Aerospace and military are using flexible die forming methods due to their flexibility, high quality and lower cost. In this research, finite element simulation has been implemented by ABAQUS software to investigate the behavior of stainless steel
Keywords: Design of experiment Finite element simulation Tube bulging Elastomer Stainless steel 304	304 tube bulging process using elastomer tool. By comparing the geometry of deformed tubes in experimental tests and simulation results, the FEM model was verified. The aim of this study is to determine the process factors and their effects on the average thickness and depth of bulged tube. In this regard, design of experiment (DOE) was performed using a full factorial method and the results were interpreted using analysis of variance (ANOVA). Also, a regression model was presented to predict these responses. Results showed that among the studied factors, friction (between tube and rubber), rubber height, punch displacement and tube axial feeding have significant effects on the process. Finally, the optimal values for significant factors were presented.

ضروری است. از اینرو، محققان و صنعتگران به سمت فرایندهای تولید پیشرفته با انعطاف پذیری بالا روی آوردهاند. یکی از روشهای شکل دهی فلزات که به تازگی در صنایع هوافضا و اتومبیل سازی مورد توجه قرار گرفته، فرایند شکل دهی با ابزار الاستومری یا شکل دهی با بالشتک کشسان² است. انعطاف پذیری بالا، کیفیت سطح مطلوب و هزینه یپایین قالب به علت

انبساطدهی¹، فرایندی است که عموما به طور وسیع برای تولید قطعات پیچیده با مقاطع لولهای شکل استفاده میشود. بسیاری از این قطعات صنعتی را میتوان با استفاده از فرایند انبساطدهی متقارن و نامتقارن تولید کرد. از طرفی استفاده از مواد جدید و توسعه فرایندهای پیشرفته تولید، امری لازم و

1 Bulging

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

H. Ghaforian Nosrati, S. M. H. Seyedkashi, M. Gerdooei, Investigation of Effective Parameters in Free Bulging of Stainless Steel 304 Tube Using Elastomer Tool, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 191-198, 2016 (in Persian)

² Rubber Pad Forming (RPF) Please cite this article using:

ساخت تنها یک نیمه از قالب بهصورت صلب (نیمه دیگر قالب از لایههای انعطاف پذیر ساخته می شود)، این روش را به عنوان جایگزین مناسبی برای روش های مرسوم شکل دهی معرفی می کند [1]. نحوه انبساط دهی لوله در این فرایند به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می گیرد، سپس لاستیک درون لوله جاگذاری و پس از بستن قالب به صورت کامل، سنبه در درون لوله و بر روی سطح بالایی لاستیک قرار می گیرد. در انتها با به حرکت لاستیک، توسط سنبه تامین می گردد. با ایجاد فشار داخلی در اثر انبساط الاستیک، توسط سنبه تامین می گردد. با ایجاد فشار داخلی در اثر انبساط سنبه می تواند به گونه ای طراحی شود تا در حین حرکت به سمت پایین، تغذیه محوری را نیز به لوله اعمال کند.

در سالهای اخیر فعالیتهای پژوهشی قابل توجهی پیرامون فرایندهای شکلدهی با کمک ابزار الاستومری با هدف دستیابی به یک قطعه بدون نقص صورت گرفته است. اکثر تحقیقات انجام شده به استفاده از این فرایند در شکلدهی ورقهای فلزی به منظور خمکاری، دوربری، شکلدهی و دوربری ورق بهطور همزمان، و همچنین تولید صفحات فلزی صنعتی معطوف شده است؛ شکلدهی لوله سهم اندکی را در میان تحقیقات انجام شده دارد [2]. است؛ شکلدهی لوله سهم اندکی را در میان تحقیقات انجام شده دارد [2]. واسط الاستومری به منظور بررسی اثر عوامل سختی الاستومر، جنس ورق و شرایط اصطکاکی ارائه نمودند. ایشان از دو بالشتک الاستومری با سختیهای متفاوت و ورقهای فولادی و آلومینیومی استفاده کردند. نتایج نشان داد که بالشتک پلیاورتان میتواند به عنوان واسط شکلدهی استفاده شود. همچنین مقادیر مختلف سختی الاستومر باعث تغییر در مقدار تنشهای وارده نشده و روند توزیع تنش برای ورق به صورت مشابه میباشد.

فرایند انبساطدهی لولههای مسی تی شکل با استفاده از میله الاستومری از جنس پلی اورتان توسط کلانتری و همکارانش [5،4] اجرا و اثر ضریب اصطکاک، هندسه قالب و قطعه را به کمک تحلیل های تجربی و عددی بررسی کردهاند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لوله، نیروهای شکل-دهی بزرگتر و همچنین شاخههای تی شکل بلندتری تولید خواهد شد؛ اما میزان افزایش ضخامت آن در انتهای لوله نیز بیشتر است. از طرفی افزایش شعاع قالب در افزایش طول شاخه موثر بوده و باعث کاهش میزان نازک-شعاع قالب در افزایش طول شاخه موثر بوده و باعث کاهش میزان نازک-طرفه لوله مسی با استفاده از میله الاستومری از جنس پلی اورتان توسط جیراد و همکارانش [6] بررسی شد. نتایج حاصل، بیان کنده ارتباط خوب بین دادهای تجربی و عددی بود. آنها نشان دادند اصطکاک بین لوله و واسط پلی اورتان در صورتی که تحت کنترل باشد، می تواند سودمند واقع شود.

به منظور بررسی اثر سرعت سنبه و جنس الاستومر بر روی نیروی فرایند، شبیهسازی المان محدود و آزمون تجربی فرایند RPF با استفاده از سه نوع لاستیک طبیعی، مصنوعی و پلیاورتان به عنوان سنبه انعطاف پذیر، توسط رمضانی و ریپین [7] اجرا گردید. از مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق این بود که پلیاورتان مناسب ترین نوع الاستومر برای فرایند شکل دهی با ابزار الاستومری می باشد. مطالعه ی عددی و تجربی بر روی عوامل موثر شکل دهی با استفاده از بالشتک الاستومری در قطعه های دارای شعاع انحنا از جنس آلومینیوم توسط مهشیدی فر [8] انجام گرفت. نتایج بیان می کند که افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق فلزی به خم شدن ورق کمک می کند؛ بنابراین با

1 Elastomers rod

وفاییصفت و همکارانش [9] مطالعهای را بهصورت تجربی و شبیهسازی اجزای محدود بهمنظور تخمین عوامل مطلوب طراحی در فرایند شکل دهی چند نقطهای انجام دادند. در این پژوهش تاثیر عوامل فرایندی از جمله قطر پین و ضخامت لایه الاستومر بر روی دقت ابعادی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده بررسی شده است. نتایج بهدست آمده نشان داد که شکل هندسی و قطر پینهای مورد استفاده تاثیر بسیار بالایی بر دقت ابعادی و کیفیت سطح قطعات تولید شده دارد. همچنین در حالت عدم استفاده از لایه الاستومر، عیب تورفتگی در سطح قطعه کار پدیدار می شود. غفوریان و گردویی وفولادی زنگ زن 304 با استفاده از میله الاستومری را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان دادند که سیستم روانکاری مورد استفاده نقش بهسزایی را در کنترل فرایند خواهد داشت.

تحقیقهای صورت گرفته توسط محققین در خصوص مطالعه تجربی و عددی اثر عوامل موثر بر روی یکی از روشهای شکلدهی با بالشتک الاستومری بوده است. عوامل مورد بررسی در این تحقیقات از قبیل جنس یا سختی بالشتک الاستومری، جنس قطعه کار و شرایط اصطکاکی بوده و تاکنون به صورت منسجم در انبساطدهی متقارن آزاد لولهها، یافتن شرایط بهینهی عوامل فرایند و چگونگی تاثیر آنها گزارش نشده است. از اینرو در تحقیق حاضر با استفاده از روش طراحی آزمایش علمی به روش عاملی کامل، تاثیر عواملی از قبیل اصطکاک، میزان پیشروی سنبه، شعاع گوشه قالب، ارتفاع نخامت و متوسط ارتفاع انبساط ایجاد شده در فرایند انبساطدهی متقارن آزاد لوله فولادی زنگنزن 304 بررسی شده است. مقایسه نتایج شبیهسازی و آزمون تجربی تطابق خوبی را نشان میدهد؛ لذا پس از صحتسنجی مدل امتفاده از تعلیل آماری آنایز واریانس مورد بحث و تفسیر قرار گرفته است.

2- شرح مدل عددی

بهمنظور مدلسازی فرایند انبساطدهی آزاد لوله از حل گر صریح² نرمافزار المان محدود آباکوس نسخه 12-6 استفاده شد. لولهی فولادی زنگنزن 304 دارای ضخامت 0.75 میلیمتر، قطر و ارتفاع به ترتیب 38 و 150 میلیمتر جهت انجام شبیهسازی است. در "شکل 1" شماتیک مدل المان محدود نشان داده شده است. در این پژوهش، حرکت سنبه براساس سرعت ثابت و جابه-جایی معین تنظیم شده است.

برای کاهش زمان محاسبات در استفاده از حل گر صریح، زمان تحلیل به میزان کسری از زمان واقعی فرایند، برابر 0.01 ثانیه در نظر گرفته شد. این کاهش بازه زمانی موجب افزایش غیر واقعی انرژی جنبشی فرایند نشده است. همچنین نیمی از مدل، طراحی و از قید تقارن صفحهای استفاده گردید. برای تعریف شرایط تماسی از تماس سطح به سطح با مدل اصطکاک کولمبی استفاده شده است. در راستای اعمال شرایط مرزی، برای محدود کردن درجات آزادی قالب و همچنین به منظور تأمین نیروی موردنیاز فرایند، قید جابه جایی به نقطه مرجع سنبه و قالب نسبت داده شده است.

چگالی فولاد 7930 kg/m³، ضریب پواسون 0.29 و مدول یانگ 200 GPa

ایجاد یک شرایط مناسب برای اصطکاک بین سطح ورق و لاستیک، همچنین ورق و سنبه؛ کیفیت و شکلپذیری ورق افزایش مییابد.

² Explicit

Table 1 Mooney-Rivlin constants for polyurethane



Fig. 1 Schematic of symmetrical free tube bulging with elastomeric rod شکل 1 طرحواره فرایند انبساط دهی متقارن آزاد لوله با میله الاستومری

است [11]. از معیار تسلیم ون-میسز¹ برای توصیف تسلیم لولهی همسانگرد استفاده میشود. بهمنظور تعیین خواص مکانیکی آن، از منحنی تنش-کرنش حقیقی که در "شکل 2" نشان داده شده است، استفاده شد.

در این پژوهش برای بیان رفتار تغییرشکل هایپرالاستیک میله پلیاورتان از مدل مونی-ریولین² استفاده شد. این مدل رفتاری بر طبق رابطه (1) بیان میشود [1].

$$W = C_1 J_1 + C_2 J_2 + \frac{1}{D} J_3^2$$
 (1)

که در آن $_{1}^{2}$ ، $_{2}^{2}$ و D ثوابت ماده و I بیان کننده تغییر حجم می،اشد؛ همچنین D نشان دهنده ضریب تراکم پذیری ماده است. نحوه استخراج این ثوابت در مقاله قبلی نویسندگان مرجع شماره [10] به تفصیل توضیح داده شده است. الاستومر مورد استفاده در این پژوهش از جنس پلیاورتان با سختی 85 شور A است. در حل گر صریح ماده را نمی توان کاملا تراکم،ناپذیر فرض کرد؛ زیرا در این حالت نرمافزار برای حل مسأله هیچ مکانیزمی نخواهد داشت. همچنین امکان انتخاب المان هایبرید³ برای مواد تراکم،ناپذیر در این حل گر وجود ندارد. در نتیجه برای حل مسأله با استفاده از حل گر صریح، باید الاستومر را مقداری تراکمپذیر فرض کرد. به همین منظور در شبیه سازیها، باید برای ضریب ثابت D مقدار خیلی کوچکی در نظر گرفته شود. ثوابت مدل رفتاری مونی -ریولین برای پلیاورتان مورد استفاده در جدول 1 قابل مشاهده است.

بهعلت وجود فرض های ساده کننده در مسائل المان محدود، اعتبارسنجی نتایج عددی امری ضروری است. در این پژوهش با مقایسه هندسه محصول شبیهسازی با آزمون تجربی، این امر محقق شده است. در "شکل 3" مجموعه قالب مورد استفاده در این پژوهش قابل مشاهده میباشد. در "شکل 4" تصویر لوله تغییر شکل یافته در آزمون تجربی و شبیهسازی را در کنار یکدیگر مشخص شده است. مقایسه هندسه تغییر شکل یافته محصول با نتایج شبیهسازی و همچنین مقایسه توزیع کرنش بهدست آمده در مسیر طولی

مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دورہ 16، شمارہ 10

¹ Von-Mises ² Mooney-Rivlin ³ Hybrid

جدول 1 ثوابت مدل رفتاری مونی-ریولین برای پلیاورتان مورد استفاده [10]

True Strain Fig. 2 True stress-strain curve of 304 stainless steel tube شکل 2 منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد زنگنزن 304



شکل 3 مجموعه قالب انبساطدهی لوله [10]

نمونه در آزمون تجربی و شبیهسازی حاکی از دقت مطلوب مدلسازی المان محدود در نرمافزار دارد (شکل 5).

در این پژوهش برای اندازه گیری کرنش در لوله از کولیس دیجیتال با دقت 0.01 و نوار مایلر استفاده شد. لازم بهذکر است اندازه گیری فواصل شبکهها بر روی کمان دایره با استفاده از کولیس بهصورت مستقیم امکان پذیر نبوده و ایجاد خطای انحنا را موجب می شود. میزان این خطا در حالت بیشینه مورد محاسبه قرار گرفت که برابر 0.1 درصد می باشد. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با نتایج تجربی برای کرنش محیطی %4 و کرنش ضخامتی 6% می باشد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (2) استفاده شد. در این رابطه $\epsilon_{\rm FEM}$ خروجی المان محدود و محیح خروجی آزمون تجربی است.

Error% =
$$\left| \frac{\varepsilon_{\text{FEM}} - \varepsilon_{\text{Exp}}}{\varepsilon_{\text{Exp}}} \right|$$
 × 100

3- طراحي آزمايشها

(2)

عواملی که در این آزمایشها تاثیر آن بر روی میزان تغییر ضخامت و متوسط ارتفاع انبساطدهی بررسی شد؛ شامل 7 عامل دو سطحی اصطکاک، میزان پیشروی سنبه، شعاع گوشه قالب، ارتفاع لاستیک، تغذیه محوری لوله و طول

193

ضريب D (1/MPa) فريب ضريب (MPa) C₁ (MPa) C₂ ضريب 0.3282 1.8564 10^{-9} 1200 1000 True Stress (MPa) 800 600 400 200 0 0.2 0.3 0.1 0.4 0



Fig. 4 Comparison of FEM model and actual deformed part [10] (10] شكل 4 مقايسه هندسه لوله تغييرشكل يافته تجربي و شبيهسازي



Fig. 5 Comparison of Strain distribution in FEM model and Experimental test in a longitudinal path of tube شکل 5 مقایسه توزیع کرنش در مسیر طولی لوله شبیهسازی شده و آزمون تجربی

ناحیه تغییر شکل بوده است. در شبیه سازی های انجام شده، از روش طراحی آزمایش به شیوه عاملی کامل استفاده شده است؛ بنابراین نخستین گام، مشخص کردن تعداد عوامل و سطوح آن هاست. عوامل در نظر گرفته شده در این تحقیق و سطوح آن ها در جدول 2 آورده شده است. تعداد نقاط طراحی برابر با **128 = 2⁷ = n** آزمایش بود که تمام آن ها انجام گرفته است. به منظور استخراج داده های خروجی و بررسی هر یک از عامل ها، یک

. مسیر به طول *x* بر روی سطح خارجی لوله تعریف شده است. فرض می شود

که تغییرشکلی در لوله همانند "شکل 6" ایجاد شده است. در این شکل با توجه به چین خوردگی بهوجود آمده در لوله میتوان میانگین دادهها را برای بهدست آوردن مقدار متوسط ارتفاع انبساطدهی لوله حساب کرد (رابطه (3)). (3) (3) (4) بهمنظور بررسی توزیع کرنش در راستای ضخامت لوله، مقدار متوسط ضخامت از رابطه (4) بدست میآید.

 $t = t_0 e^{-\varepsilon_t}$

که در آن t_0 ضخامت اولیه لوله است. دادههای خروجی شامل متوسط ارتفاع انبساط لوله (u) و متوسط تغییر ضخامت لوله (t_{av}) هستند. هر یک از دادهها، به صورت مجزا یک متغیر پاسخ، در نظر گرفته شده و نحوهی تاثیرگذاری عوامل مستقل هفتگانه بر آنها به دست آمده است.

در مواردی که از عوامل دو سطحی در طراحی آزمایش استفاده میشود، تاثیرات به صورت خطی تعیین میشوند. مادامی که در خطی بودن اثرات شک وجود داشته باشد میتوان تعداد سطوح را افزایش داد که در این صورت تعداد آزمایشها بیشتر خواهد شد، اما در طراحی آزمایش علمی هدف دستیابی به حداکثر دقت با کمترین تعداد آزمایشهاست. روش مناسبتر استفاده از قابلیت نقطه میانی¹ میباشد. در طرحهای عاملی براساس تعداد نقاط میانی تعریف شده به تعداد آزمایشات اضافه خواهد شد، به صورتی که آزمایشات اضافه شده بین سطوح تعریف شده تعیین میشوند. با تعریف نقطه میانی یک پارامتر به نام انحنا² در جدول تحلیل واریانس اضافه خواهد شد که

جدول 2 سطوح عوامل ورودی

(4)

Table 2 input parameters levels		
سطح دو	سطح یک	عاملها
0.3	0.1	ضریب اصطکاک بین لوله و قالب (A)
0.66	0.05	ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک (B)
150	130	ارتفاع لاستیک (mm (<i>C</i>
50	30	میزان پیشروی سنبه (<i>D</i>) mm
5	3	شعاع گوشه قالب (E) mm
10	0	تغذیه محوری لوله (F) mm
40	30	طول ناحيه تغيير شكل (mm (G





¹ Center point ² Curvature

194

چنانچه پارامتر انحنا معنادار باشد، نشاندهنده اینست که اثر پارامترهای مورد بررسی به صورت دو سطحی نمیتواند دقیق باشد و باید تعداد سطوح افزایش یابد. در این پژوهش نیز ابتدا با کمترین تعداد سطوح (2 سطح) و با استفاده از قابلیت نقطه میانی، آزمایش ها طراحی و اجرا شد.

4- تحليل نتايج

تمامی شبیهسازی ها برای بررسی تاثیر عوامل مختلف فرایند انبساط دهی لوله با کمک ابزار الاستومری براساس طراحی آزمایش به روش عاملی کامل انجام شد. به طور کلی دانستن تاثیر عوامل مختلف بر روی یک فرایند و بهینه سازی این عوامل برای بدست آوردن محصولی سالم از اهمیت زیادی برخوردار است. همان طور که پیشتر بیان شد، سختی الاستومر به عنوان پارامتر یا عامل تاثیر گذار در فرایندهای شکل دهی با کمک محیط واسط الاستومری به شمار نمی آید. بر این اساس در پژوهش حاضر، تاثیر عوامل موثر و ارتفاع لاستیک)، دو عامل فرایندی (میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله) و عامل ضریب اصطکاک (بین لوله و قالب، طول ناحیه تغییر شکل متوسط ضخامت لوله و ارتفاع انبساط دهی بررسی شده است. برای رسیدن به این هدف، تمامی نتایج توسط نرم افزار مینی تب¹ استخراج و به کمک نمودارهای آماری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

4-1- تحليل واريانس نتايج

نتیجه گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده در بخش بعد مستلزم تایید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض نرمال بودن توزیع دادهها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P می پردازد؛ بنابراین لازم است پیش از به کارگیری این تحلیل، فرضیههای این روش در مورد داده-های آزمایش این تحقیق بررسی شود. سطح معناداری در این بررسی برابر مای آزمایش این تحقیق برسی شود. اطح معناداری در این بررسی برابر سای آزمایش این تحقیق بررسی شود. سطح معناداری در این بررسی برابر سای آزمایش این تحقیق برسی شود. است میناداری در این بررسی برابر مادی این بررسی بردن خونیع از می می از برسی کرد.

پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب، پیروی نتایج طراحی آزمایش صورت گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان میدهد. نمودار مقادیر باقیمانده در برابر نقاط برازش یافته نیز در "شکل 8" مشخص شده است. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم در نقاط این نمودار، نشان دهنده برابری واریانسهاست.

این دو شکل صحت فرضهای نخستین تحلیل واریانس و در نتیجه صحت نتایج آن را تایید میکنند. با اثبات صحت فرضهای یادشده، میتوان به نتایج تحلیل واریانس که در جدولها و شکلهای ادامه آورده شده، اعتماد کرد.

همان گونه که پیشتر بیان شد در طرحهای عاملی دو سطحی این شک به وجود می آید که آیا بررسی عوامل با حداقل سطوح دقیق می باشد یا خیر. به همین منظور از قابلیت نقطه میانی در طراحی آزمایش استفاده شده است. با تعریف یک نقطه میانی در پژوهش حاضر یک آزمایش به 128 آزمایش طراحی شده اضافه می شود به طوری که این آزمایش بین سطوح تعریف شده تعیین می شوند (یعنی ضریب اصطکاک بین لوله و قالب، و ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک به ترتیب برابر 2.0 و 0.335، ارتفاع لاستیک برابر 140

1 Minitab

Fig. 7 Normal probability plot of residuals

شكل 7 نمودار احتمال نرمال مقادير باقيمانده



Fig. 8 Residual versus fitted value plot شکل 8 نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته

میلی متر؛ میزان پیشروی سنبه برابر 40 میلی متر؛ شعاع گوشه قالب برابر 4 میلی متر؛ مقدار تغذیه محوری لوله و طول ناحیه تغییر شکل به ترتیب برابر 5 و 35 میلی متر). لازم به ذکر است که در این حالت یک پارامتر به نام انحنا (curvature) به جدول تحلیل واریانس اضافه خواهد شد.

بررسی نمودار اثرات نرمال عوامل در فرایند انبساطدهی متقارن آزاد لوله به کمک میله الاستومری بر روی میزان متوسط ارتفاع انبساط² لوله نشان دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی و متقابل *A*, *B*, معنادار هرچه فاصله عامل از خط مورب بیشتر باشد تاثیر آن بر روی فرایند نمودار هرچه فاصله عامل از خط مورب بیشتر باشد تاثیر آن بر روی فرایند معنادارتر خواهد بود (شکل 9). حال با در نظر گرفتن عواملی که بیشترین اثر را دارا میباشند تحلیل واریانس را اجرا و جدول تحلیل واریانس (جدول 3) و مدل رگرسیونی (رابطه 5) برای میزان ارتفاع انبساط لوله ارائه می گردد.

P در این جدول، درجه آزادی و مجموع مربعات ارائه شده است. مقدار P کمتر از 50.0 نشان دهنده آن است که عامل متناظر تاثیری معنادار بر میزان متوسط ارتفاع انبساط لوله دارد. از نتایج بدست آمده مشخص شد که بیشترین تاثیر بر متوسط ارتفاع انبساط لوله با ابزار الاستومری را ابتدا میزان پیشروی سنبه (828)، سپس اثر متقابل بین میزان پیشروی سنبه و ارتفاع لاستیک (70) و کمترین تاثیر را تغذیه محوری لوله (81) دارد. مجموع بقیه عامل متراک (70) متراک (70) و کمترین تاثیر از یک و نیم درصد تاثیر داشت.

^{99.9} (%) fulligequid (%) fulli

² Average of bulging depth



Fig. 10 Normal plot of the effects (response is thickness average) شكل 10 نمودار اثرات نرمال عوامل بر روى ضخامت متوسط لوله

جدول 4 جدول تحليل واريانس براى ميزان ضخامت متوسط لوله با نقطه ميانى Table 4 Analysis of variance table for thickness average with center point

درصد	D		درجه	
تاثير	مقدار P	مجموع مربعات	آزادی	منابع
1.38	0.002	9 × 10 ⁻⁶	1	В
2.22	0.000	14 × 10 ⁻⁶	1	С
61.62	0.000	3.81 × 10 ⁻⁴	1	D
7.92	0.000	49 × 10 ⁻⁶	1	F
0.77	0.019	5 × 10 ⁻⁶	1	$B \times D$
0.80	0.017	5 × 10 ⁻⁶	1	$C \times D$
8.93	0.000	55 × 10 ⁻⁶	1	$D \times F$
0.01	0.771	7 × 10 ^{−6}	1	Curvatur e

متوسط دارای مقدار P برابر 0.771 میباشد و در نتیجه اثر آن معنادار نیست. همچنین میزان ضریب تعیین (R²) مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (6) برابر 0.84 است.

برمبنای نتایج بهدست آمده از پارامتر انحنا در تحلیل واریانس می توان عنوان کرد که انتخاب دو سطح برای عوامل بررسی شده در پژوهش حاضر كفايت مىكند. اگر پارامتر انحنا داراى درصد معنادارى بالايى باشد، بررسى با حداقل تعداد سطوح (دو سطح) دقت لازم را نداشته و باید سطوح عوامل را افزایش داد.

در ادامه به صورت منفرد اثر عواملی که بیشترین تاثیر را بر روی فرایند انبساطدهی آزاد لوله با ابزار الاستومری دارند (اعم از عامل میزان پیشروی سنبه، تغذيه محوري لوله و اصطكاك بين لوله و قالب؛ و همچنين لوله و الاستومر) بررسي مي شود.

4-2- تاثیر اصطکاک

در فرایند انبساط دهی با ابزار الاستومری اصطکاک بین لوله و الاستومر خود سبب پیشروی لوله در راستای طولی آن خواهد شد که این امر موجب افزایش ارتفاع انبساطدهی لوله می گردد. از طرفی نیز هر چه مقدار انبساط-دهی لوله افزایش یابد میزان ضخامت متوسط لوله نیز کاهش می یابد. "شکل 11" تاثير اصطكاك بين لوله و لاستيك را بر ميزان ارتفاع انبساطدهي و ضخامت متوسط نشان مىدهد.

با توجه به تحلیل نتایج بهدست آمده مشخص شد که با افزایش اصطکاک بین لوله و لاستیک، ارتفاع انبساطدهی به مقدار 7% افزایش و ضخامت متوسط لوله به میزان %1 کاهش مییابد. از طرفی افزایش اصطکاک بین لوله و قالب باعث كاهش 6.5% ارتفاع انبساطدهي لوله شده است و اين افزايش



Fig. 9 Normal plot of the effects (response is average of bulging depth) شكل 9 نمودار اثرات نرمال عوامل بر روى متوسط ارتفاع انبساط دهى لوله

Effect

جدول 3 جدول تحليل واريانس براي ميزان متوسط ارتفاع انبساط لوله با نقطه مياني Table 3 Analysis of variance table for average of bulging depth with center point

1					
درصد			درجه		
تاثير	مقدار P	مجموع مربعات	آزادی	منابع	
0.46	0.013	1 × 10 ⁻⁶	1	Α	
0.48	0.011	1 × 10 ⁻⁶	1	В	
0.33	0.036	1 × 10 ⁻⁶	1	С	
81.79	0.000	1.54 × 10 ⁻⁴	1	D	
1.10	0.000	2 × 10 ⁻⁶	1	F	
6.65	0.000	1.3 × 10 ^{−5}	1	$C \times D$	
0.44	0.015	1 × 10 ⁻⁶	1	Curvature	

يارامتر انحنا بر متوسط ارتفاع انبساط لوله معنادار مى باشد، ولى درصد تاثير آن زیاد نیست (%0.44). لازم به ذکر است که میزان ضریب تعیین یا ضریب همبستگی¹ (R²) مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (5) برابر 0.91 است. Average of bulging depth

Average of bulging depth =	
0.002462 -0.000083A + (0.000084)B	~
+(0.000069)C + (0.001097)D + (0.000127)F	(5)
+(0.000313)C × D	

در "شكل 10" نمودار اثرات نرمال عوامل مورد بررسى را بر روى ميزان ضخامت متوسط لوله مشاهده میکنید. از بین تمامی عوامل مورد بررسی، B, C, D, F, BD, CD, DF, BEG, CEG, DEF, ADE, DFG, عامل هاي الماري الماري الماري الماري الماري الماري الماري الم ADEG عوامل تاثیر گذار در فرایند میباشد.

جدول 4، جدول تحلیل واریانس را که از اجرای تحلیل واریانس (با در نظر گرفتن عواملی که اثر معنادار دارند) بدست آمده، نشان میدهد. مدل رگرسیونی برای میزان متوسط ضخامت لوله به صورت رابطه (6) میباشد Thickness average =

```
0.078402 - (0.000259)B - (0.000328)C
   +(0.001726)D - (0.000619)F - (0.000193)B × D
+(0.000197)C × D + (0.000657)D × F
                                                        (6)
```

از نتایج بدست آمده مشخص شد که بیشترین تاثیر را بر ضخامت متوسط لوله در این فرایند، ابتدا میزان پیشروی سنبه (62%)، سیس اثر متقابل بین میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله (9%) و در نهایت میزان تغذیه محوری لوله (8%) دارد. دیگر عوامل C, B, BD, CD نیز حدود 5 درصد تاثیر دارند. همان طور که در جدول 4 مشاهده می شود پارامتر انحنا برای ضخامت

¹ Determination Coefficient



Fig. 12 Effect of axial feed on average of bulging depth and thickness average





Axial feed (mm)

ضخامت متوسط لوله به ميزان 3 درصد افزايش يافته است. همچنين در "شكل 14" اثر متقابل ميزان جابهجايي سنبه و ارتفاع پلياورتان بر متوسط ارتفاع انبساط لوله نشان داده شده است. در این شکل با افزایش ارتفاع لاستیک از 130 به 150 میلیمتر میزان متوسط ارتفاع انبساطدهی در جابه-جایی 30 میلیمتر سنبه کاهش مییابد؛ در صورتی که با افزایش ارتفاع آن و در جابهجایی 50 میلیمتری سنبه میزان متوسط ارتفاع انبساطدهی به مقدار 19.5 درصد افزایش می یابد. پر واضح است که اگر در این فرایند ارتفاع لاستیک افزایش یابد و همزمان میزان جابهجایی کم شود، مقدار متوسط ارتفاع انبساطدهي كاهش خواهد يافت.

5-انتخاب حالت بهينه

10

با توجه به تحلیلهای واریانس انجام شده در مراحل ذکر شده قبلی، حالت بهینه اجرای فرایند انبساطدهی آزاد لوله با ابزار الاستومری با استفاده از اصطکاک تاثیر بسیار جزئی بر ضخامت متوسط لوله دارد.

با افزایش ارتفاع پلی اورتان، ارتفاع انبساط دهی لوله به میزان %6 افزایش يافته و اثر آن بر ضخامت متوسط لوله تقريبا ناچيز بوده و باعث افزايش %0.6 آن شده است. همچنین افزایش میزان جابهجایی سنبه افزایش 1.6 برابری ارتفاع انبساطدهی لوله و افزایش %6 ضخامت متوسط لوله را در پی داشته است. همان طور که در "شکل 12" مشاهده می شود افزایش تغذیه محوری لوله موجب افزایش انبساطدهی لوله به میزان %11 و همچنین کاهش ضخامت متوسط لوله برابر 1.6% گردیده است.

در صورتی که بین عوامل اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست میدهند و نتیجه گیری بدون در نظر داشتن اثرات متقابل فاقد اعتبار علمي خواهد بود. از بررسي مقادير P و درصد تاثير عوامل مىتوان نتيجه گرفت كه اثرات متقابل بين ميزان جابهجايى سنبه و تغذيه محوری لوله (بر ضخامت متوسط لوله) و همچنین میزان جابهجایی سنبه و ارتفاع لاستیک (بر متوسط ارتفاع انبساطدهی) تاثیر گذار هستند و لذا اثرات اصلی آنها اهمیت خود را از دست داده و باید برای درک صحیح فرایند، اثرات متقابل آنها بررسي شود.

4-3- اثرات متقابل

همانطور که در "شکل 13" مشخص شده است با افزایش میزان تغذیه محوری لوله در جابهجایی 30 میلیمتری سنبه، در ضخامت متوسط لوله تغییر قابل توجهی رخ نخواهد داد ولی در جابهجایی 50 میلیمتری سنبه،



Fig. 11 Effect of friction on average of bulging depth and thickness average

شکل 11 تاثیر اصطکاک بر متوسط ارتفاع انبساطدهی و ضخامت متوسط لوله

0.76

0.75





Fig. 14 Interaction plots of parameters on bulging depth شكل 14 أثرات متقابل عوامل D و D بر متوسط ارتفاع انبساطدهی لوله

جدول 5 مقدار بهينه عوامل موثر بر فرايند

Table 5 the optimum of effective factors		
مقدار بهينه	عوامل	
0.1	ضریب اصطکاک بین لوله و قالب (A)	
0.05	ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک (B)	
150	ارتفاع لاستیک (C)	
50	میزان پیشروی سنبه (D)	
5	شعاع گوشه قالب (E)	
10	تغذیه محوری لوله (F)	
40	طول ناحيه تغيير شكل (G)	

بهینهساز پاسخ¹ در نرمافزار مینی تب بررسی گردیده است. بر این اساس؛ هدف این تحلیل، رسیدن به ترکیبی از تنظیمات برای بهینهسازی هر دو پاسخ تا حد امکان است؛ یعنی بیشینه ارتفاع انبساطدهی لوله و همچنین داشتن بیشینه ضخامت لوله تعریف شده است. با توجه به این که این دو پاسخ اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می-شود، نهایتا باید حالتی را انتخاب نمود که هریک از پاسخها به سطحی قابل قبول از مطلوبیت دست یابند. براساس این روش که مطلوبیت² نام دارد، در نهایت سطوح برای هر یک از عوامل برای رسیدن به حالت بهینه تعیین شده و در جدول 5 قابل مشاهده میباشد. با در نظر گرفتن پارامترهای بهینه جدول 5، مقادیر 4 و 0.8 میلی متر به ترتیب برای حداکثر ارتفاع انبساطدهی لوله و حداکثر ضخامت متوسط لوله دست خواهد یافت.

6-نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر هفت عامل در فرایند انبساط دهی متقارن آزاد لوله شامل اصطکاک بین لوله و قالب، اصطکاک بین لوله و لاستیک، ارتفاع لاستیک، میزان پیشروی سنبه، شعاع گوشه قالب، تغذیه محوری لوله و طول ناحیه تغییر شکل بر ضخامت متوسط و متوسط ارتفاع انبساط دهی لوله فولادی زنگنزن 304 با شبیه سازی به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس نتایج زیر حاصل شده است.

 مشاهده گردید که از بین عوامل مذکور اثر چهار عامل ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک (B)، ارتفاع لاستیک (C)، میزان پیشروی سنبه (D) و تغذیه محوری لوله (F) معنادارتر میباشند.

- با افزایش ارتفاع لاستیک در پیشروی 30 میلیمتری سنبه میزان عمق متوسط کاهش یافته؛ این در حالی است که در پیشروی 50 میلیمتری سنبه میزان متوسط ارتفاع انبساطدهی به مقدار %19.55 افزایش می یابد.
- در ضخامت متوسط لوله با افزایش تغذیه محوری لوله در پیشروی 30 میلیمتری سنبه، تغییر قابل توجهی رخ نمیدهد؛ ولی در پیشروی 50 میلیمتری سنبه با افزایش تغذیه محوری لوله، ضخامت متوسط به میزان 3% افزایش مییابد.
- با استفاده از قابلیت نقطه میانی در طراحی آزمایش عاملی، نتایج نشان دهنده این است که اثر عوامل مورد بررسی در پژوهش حاضر بر روی پاسخها خطی بوده و دارای انحنا نمیباشد، لذا انتخاب حداقل سطوح تاثیر قابل توجهی بر دقت نتایج ندارد.

7- مراجع

- [1] M. Ramezani and Z. Mohd Ripin, *Rubber-pad forming processes*. 2012.
- [2] M. H. Dirikolu and E. Akdemir, "Computer aided modelling of flexible forming process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 148, no. 3, pp. 376–381, 2004.
- [3] M. Ramezani, Z. M. Ripin, and R. Ahmad, "Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process," J. Mater. Process. Technol., vol. 209, no. 10, pp. 4925–4934, Jun. 2009.
- [4] M. Kalantari and H. Bisadi, "Numerical and experimental analysis of the effect of die and workpiece geometry in Bulg-Forming process of T-shape tube," in *International Conference on Manufacturing*, 2010.
- [5] M. Kalantari and H. Bisadi, "Numerical and experimental investigation of friction in Bulg-Forming process of T-shape tubes," in *International Conference on Manufacturing*, 2010.
- [6] A. C. Girard, Y. J. Grenier, and B. J. Mac Donald, "Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod," J. Mater. Process. Technol., vol. 172, no. 3, pp. 346–355, Mar. 2006.
- [7] M. Ramezani, Z. M. Ripin, and R. Ahmad, "Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 196–203, 2010.
- [8] A. Mahshidifar, "Numerical and Experimental Study of Parameters Affecting Metal Forming Using Rubber Pads, on Parts with Radius of Curvature," *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.*, 2013.
- [9] A. Vafaeesefat, B. Davoodi, and B. Zareh-Desari, "Experimental Investigation and Finite Element Simulation of Effect of Mechanical Properties of Elastic Cushion on Spring-Back in Multi-Point Forming Process," *Mech. Period.*, vol. 11, no. 2, pp. 63–73, 2015.
- [10] H. Ghaforian Nosrati and M. Gerdooei, "Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad," *Modares Mech. Eng.*, 2015.
- [11]M. F. Naghibi, M. Gerdooei, M. B. Jooybari, and A. Gorji, "Experimental and numerical study of formability in stainless steel 304 tube by hydroforming process," *Modares Mech. Eng.*, vol. 14, no. 13, 2015.

میزان پیشروی سنبه به عنوان یک عامل موثر بر میزان متوسط ارتفاع انبساطدهی (82%) و ضخامت متوسط لوله (62%) شناخته می شود. از آنجا که اگر بین عوامل اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست می دهند و به دلیل این که عامل میزان پیشروی سنبه به همراه ارتفاع لاستیک و تغذیه محوری لوله اثرات متقابل تاثیر گذار هستند، لذا باید اثرات متقابل آن ها مورد بررسی قرار گیرد.

² Desirability