مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 191-198

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

حسن غفوریان نصرتی[1]، سیدمحمدحسین سیدکاشی[2*]، مهدی گردویی[3]

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 97175/376، seyedkashi@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 31 تیر 1395
پذیرش: 19 شهریور 1395
ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:
طراحی آزمایش
شبیه‌سازی اجزای محدود
انبساط‌دهی لوله
الاستومر
فولاد زنگ‌نزن 304

چکیده

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 شکل‌دهی انعطاف‌پذیر به علت انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت مطلوب سطح و کاهش هزینه تمام شده مورد توجه اغلب صنایع اعم از هوافضا و تسلیحاتی می‌باشد. در این پژوهش، شبیه‌سازی اجزای محدود به وسیله نرم‌افزار آباکوس برای بررسی رفتار فرایند انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 با استفاده از ابزار الاستومری اجرا گردیده است. در ابتدا نتایج شبیه‌سازی با مقایسه بین هندسه لوله تغییر شکل یافته با آزمون‌های تجربی مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار گرفت. هدف از تحقیق حاضر تعیین عوامل فرایند و بررسی میزان تاثیر آن‌ها بر ضخامت و متوسط ارتفاع انبساط‌دهی 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 پیش‌بینی این مقادیر ارائه گردید. مشخص شد که از بین عوامل بررسی‌شده، 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.

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

Hasan Ghaforian Nosrati[1], Seyed Mohammad Hossein Seyedkashi[1*], Mahdi Gerdooei[2]

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

Original Research Paper
Received 21 July 2016
Accepted 09 September 2016
Available Online 09 October 2016

Keywords:
Design of experiment
Finite element simulation
Tube bulging
Elastomer
Stainless steel 304

ABSTRACT

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 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.

1- مقدمه

انبساط‌دهی[1]، 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 ضروری است. از این‌رو، محققان و صنعت‌گران به سمت فرایندهای تولید پیشرفته با انعطاف‌پذیری بالا روی آورده‌اند. یکی از روش‌های شکل‌دهی فلزات که به تازگی در صنایع هوافضا و اتومبیل‌سازی مورد توجه قرار گرفته، فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری یا شکل‌دهی با بالشتک کشسان[2] است. انعطاف‌پذیری بالا، کیفیت سطح مطلوب و هزینه‌ی پایین قالب به علت

[1] Bulging

[2] Rubber Pad Forming (RPF)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

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)

ساخت تنها یک نیمه از قالب به‌صورت صلب (نیمه دیگر قالب از لایه‌های انعطاف‌پذیر ساخته می‌شود)، این روش را به عنوان جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم شکل‌دهی معرفی می‌کند [1]. نحوه انبساط‌دهی لوله در این فرایند به این شرح است که ابتدا لوله درون قالب قرار می‌گیرد، سپس لاستیک درون لوله جاگذاری و پس از بستن قالب به صورت کامل، سنبه در درون لوله و بر روی سطح بالایی لاستیک قرار می‌گیرد. در انتها با به حرکت در آوردن رم پرس با سرعت ثابت، نیروی اعمالی موردنیاز برای فشردن لاستیک، توسط سنبه تامین می‌گردد. با ایجاد فشار داخلی در اثر انبساط الاستومر، لوله در ناحیه تغییر شکل انبساط می‌یابد. لازم به ذکر است که سنبه می‌تواند به گونه‌ای 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]. دیریکلو و آکدمیر [3] مدل رایانه‌ای فرایند شکل‌دهی ورق با کمک محیط 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 تی‌شکل با استفاده از میله الاستومری[1] از جنس پلی‌اورتان توسط کلانتری و همکارانش [5،4] اجرا و اثر ضریب اصطکاک، هندسه قالب و قطعه را به کمک تحلیل‌های تجربی و عددی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت لوله، نیروهای شکل‌دهی بزرگتر و همچنین شاخه‌های تی‌شکل 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 نازک‌شدگی سر شاخه می‌شود. تحلیل تجربی و عددی فرایند انبساط‌دهی یک طرفه لوله مسی با استفاده از میله الاستومری از جنس پلی‌اورتان توسط جیراد و همکارانش [6] بررسی شد. نتایج حاصل، بیان‌کننده ارتباط خوب بین داده‌های تجربی و عددی بود. آن‌ها نشان دادند اصطکاک بین لوله و واسط پلی‌اورتان در صورتی که تحت کنترل باشد، می‌تواند 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 انعطاف‌پذیر، توسط رمضانی و ریپین [7] اجرا گردید. از مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق این بود که پلی‌اورتان مناسب‌ترین نوع الاستومر برای فرایند شکل‌دهی با ابزار الاستومری می‌باشد. مطالعه‌ی عددی و تجربی بر روی عوامل موثر شکل‌دهی با استفاده از بالشتک الاستومری در قطعه‌های دارای شعاع انحنا از جنس آلومینیوم توسط مهشیدی‌فر [8] انجام گرفت. نتایج بیان می‌کند که افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق فلزی به خم‌شدن ورق کمک می‌کند؛ بنابراین با ایجاد یک شرایط مناسب برای اصطکاک بین سطح ورق و لاستیک، همچنین ورق و سنبه؛ کیفیت و شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد.

وفایی‌صفت و همکارانش [9] مطالعه‌ای را به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به‌منظور تخمین عوامل مطلوب طراحی در فرایند شکل‌دهی 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 قطعه‌کار پدیدار می‌شود. غفوریان و گردویی [10] تحلیل عددی و تجربی اثر اصطکاک در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله فولادی زنگ‌نزن 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 قطعه‌کار 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 لاستیک، تغذیه محوری لوله و طول ناحیه تغییر شکل بر روی میزان تغییر ضخامت 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 عددی، شبیه‌سازی در مقادیر مختلف عوامل ذکر شده اجرا و نتایج حاصل با استفاده از تحلیل آماری آنالیز واریانس مورد بحث و تفسیر قرار گرفته است.

2- شرح مدل عددی

به‌منظور مدل‌سازی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله از حل‌گر صریح[2] نرم‌افزار المان محدود آباکوس نسخه 6-12 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 جابه‌جایی معین تنظیم شده است.

برای کاهش زمان محاسبات در استفاده از حل‌گر 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 جابه‌جایی به نقطه مرجع سنبه و قالب نسبت داده شده است.

چگالی فولاد $7930\ kg/m^3$، ضریب پواسون 0.29 و مدول یانگ 200 GPa

[1] Elastomers rod

[2] Explicit

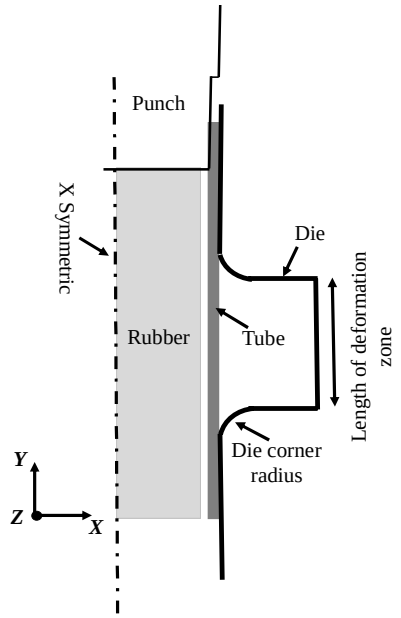

Fig. 1 Schematic of symmetrical free tube bulging with elastomeric rod

شکل 1 طرح‌واره فرایند انبساط‌دهی متقارن آزاد لوله با میله الاستومری

است [11]. از معیار تسلیم ون-میسز[1] 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-ریولین[2] استفاده شد. این مدل رفتاری بر طبق رابطه (1) بیان می‌شود [1].

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

که در آن C_1، C_2 و D ثوابت ماده و J بیان کننده تغییر حجم می‌باشد؛ 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 حل‌گر صریح ماده را نمی‌توان کاملا تراکم‌ناپذیر فرض کرد؛ زیرا در این حالت نرم‌افزار برای حل مسأله هیچ مکانیزمی نخواهد داشت. همچنین امکان انتخاب المان هایبرید[3] برای مواد تراکم‌ناپذیر در این حل‌گر وجود ندارد. در نتیجه برای حل مسأله با استفاده از حل‌گر صریح، باید الاستومر را مقداری تراکم‌پذیر فرض کرد. به همین منظور در شبیه‌سازی‌ها، 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 فرض‌های ساده‌کننده 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

[1] Von-Mises
[2] Mooney-Rivlin
[3] Hybrid

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

Table 1 Mooney-Rivlin constants for polyurethane

ضریب C_1 (MPa)	ضریب C_2 (MPa)	ضریب D (1/MPa)
1.8564	0.3282	10^{-9}

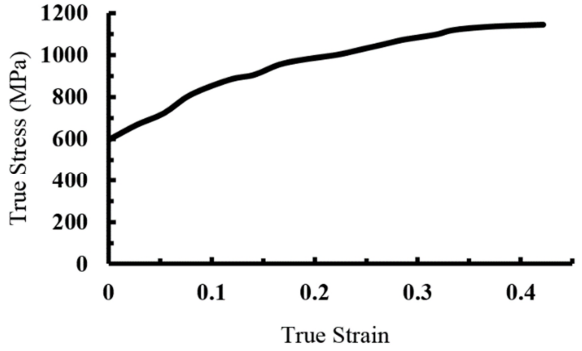

Fig. 2 True stress-strain curve of 304 stainless steel tube

شکل 2 منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد زنگ‌نزن 304

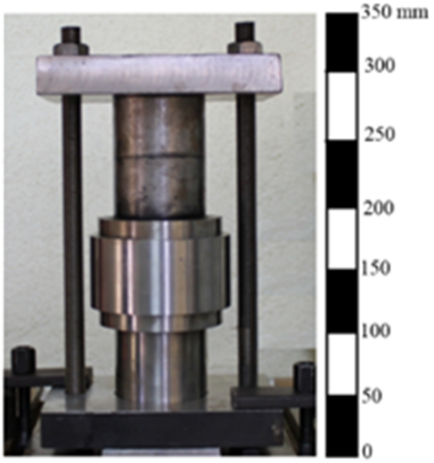

Fig. 3 Set-up of tube bulging [10]

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 اندازه‌گیری کرنش در لوله از کولیس دیجیتال با دقت 0.01 و نوار مایلر استفاده شد. لازم به‌ذکر است اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ها بر روی کمان دایره با استفاده از کولیس به‌صورت مستقیم امکان‌پذیر نبوده و ایجاد خطای انحنا را موجب می‌شود. میزان این خطا در حالت بیشینه مورد محاسبه قرار گرفت که برابر 0.1 درصد می‌باشد. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با نتایج تجربی برای کرنش محیطی 4% و کرنش ضخامتی 6% می‌باشد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (2) استفاده شد. در این رابطه $\varepsilon_{\mathrm{FEM}}$ خروجی المان‌محدود و $\varepsilon_{\mathrm{Exp}}$ خروجی آزمون تجربی است.

$$\text{Error\%} = \left|\frac{\varepsilon_{\mathrm{FEM}} - \varepsilon_{\mathrm{Exp}}}{\varepsilon_{\mathrm{Exp}}}\right| \times 100 \qquad (2)$$

3- طراحی آزمایش‌ها

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

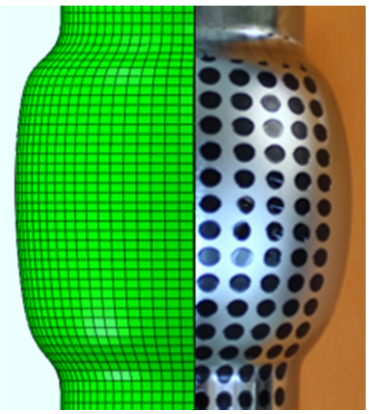

Fig. 4 Comparison of FEM model and actual deformed part [10]

شکل 4 مقایسه هندسه لوله تغییرشکل یافته تجربی و شبیه‌سازی [10]

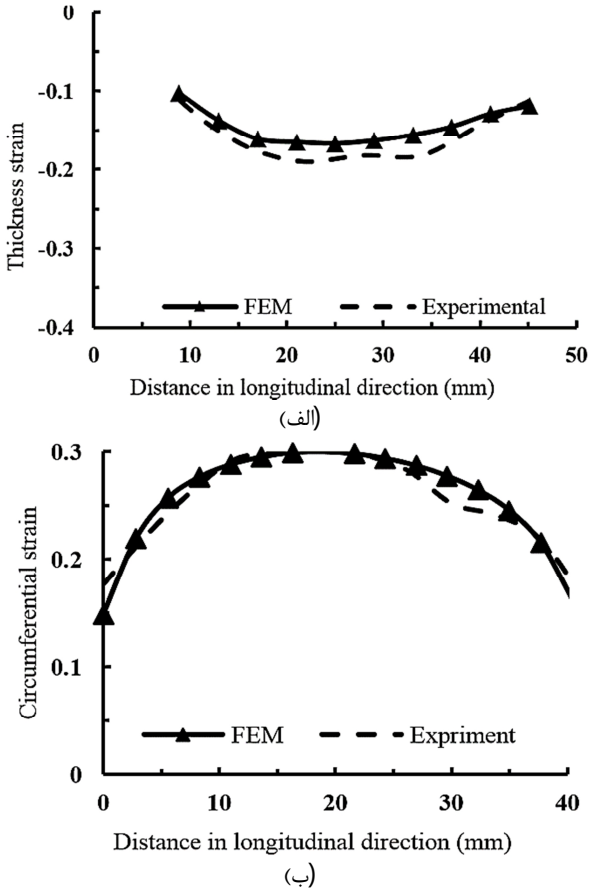

Fig. 5 Comparison of Strain distribution in FEM model and Experimental test in a longitudinal path of tube

شکل 5 مقایسه توزیع کرنش در مسیر طولی لوله شبیه‌سازی شده و آزمون تجربی

ناحیه تغییر شکل بوده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از روش طراحی آزمایش به شیوه عاملی کامل استفاده شده است؛ بنابراین نخستین گام،مشخص کردن تعداد عوامل و سطوح آن‌هاست. عوامل در نظر گرفته شده در این تحقیق و سطوح آن‌ها در جدول 2 آورده شده است. تعداد نقاط طراحی برابر با $n = 2^7 = 128$ آزمایش بود که تمام آن‌ها انجام گرفته است.

به منظور استخراج داده‌های خروجی و بررسی هر یک از عامل‌ها، یک مسیر به طول x بر روی سطح خارجی لوله تعریف شده است. فرض می‌شود 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)).

$$Av\,(u) = \frac{\int_{x_0}^{x_1} u\,dx}{x_1 - x_0} \qquad (3)$$

به‌منظور بررسی توزیع کرنش در راستای ضخامت لوله، مقدار متوسط ضخامت از رابطه (4) بدست می‌آید.

$$t = t_0 e^{-\varepsilon_t} \qquad (4)$$

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 میانی[1] 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 انحنا[2] در جدول تحلیل واریانس اضافه خواهد شد که

جدول 2 سطوح عوامل ورودی

Table 2 Input parameters levels

عامل‌ها	سطح یک	سطح دو
ضریب اصطکاک بین لوله و قالب (A)	0.1	0.3
ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک (B)	0.05	0.66
ارتفاع لاستیک (C) mm	130	150
میزان پیشروی سنبه (D) mm	30	50
شعاع گوشه قالب (E) mm	3	5
تغذیه محوری لوله (F) mm	0	10
طول ناحیه تغییر شکل (G) mm	30	40

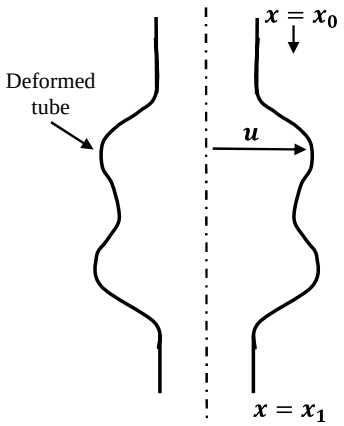

Fig. 6 Schematic view of deformed tube

شکل 6 طرح‌واره تغییر شکل ایجاد شده در لوله

[1] Center point
[2] Curvature

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- تحلیل نتایج

تمامی شبیه‌سازی‌ها برای بررسی تاثیر عوامل مختلف فرایند انبساط‌دهی 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. همان‌طور که پیشتر بیان شد، سختی الاستومر به عنوان پارامتر یا عامل تاثیرگذار در فرایندهای شکل‌دهی با کمک محیط واسط الاستومری به‌شمار نمی‌آید. بر این اساس در پژوهش حاضر، تاثیر عوامل موثر در فرایند شامل سه عامل هندسی (شعاع گوشه قالب، طول ناحیه تغییرشکل و ارتفاع لاستیک)، دو عامل فرایندی (میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله) و عامل ضریب اصطکاک (بین لوله و قالب، بین لوله و لاستیک) بر متوسط ضخامت لوله و ارتفاع انبساط‌دهی بررسی شده است. برای رسیدن به این هدف، تمامی نتایج توسط نرم‌افزار مینی‌تب[1] استخراج و به کمک نمودارهای آماری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

4-1- تحلیل واریانس نتایج

نتیجه‌گیری 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 می‌پردازد؛ بنابراین لازم است پیش از به‌کارگیری این تحلیل، فرضیه‌های این روش در مورد داده-های آزمایش این تحقیق بررسی شود. سطح معناداری در این بررسی برابر 0.05 درنظر گرفته شده است. نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده در "شکل 7" آورده شده است که از روی نمودار آن می‌توان گوسی بودن توزیع خطا را بررسی 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.

همان‌گونه که پیشتر بیان شد در طرح‌های عاملی دو سطحی این شک به وجود می‌آید که آیا بررسی عوامل با حداقل سطوح دقیق می‌باشد 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 می‌شود به طوری که این آزمایش بین سطوح تعریف شده تعیین می‌شوند (یعنی ضریب اصطکاک بین لوله و قالب، و ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک به ترتیب برابر 0.2 و 0.335؛ ارتفاع لاستیک برابر 140

[1] Minitab

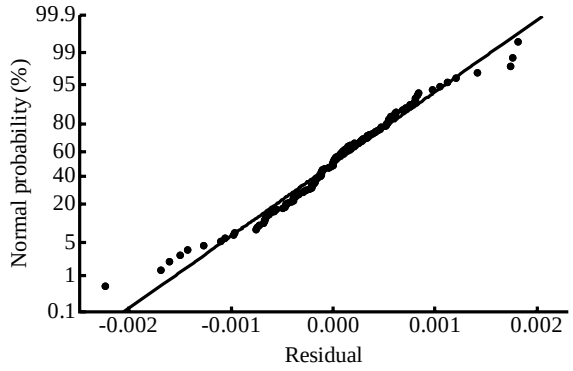

Fig. 7 Normal probability plot of residuals

شکل 7 نمودار احتمال نرمال مقادیر باقیمانده

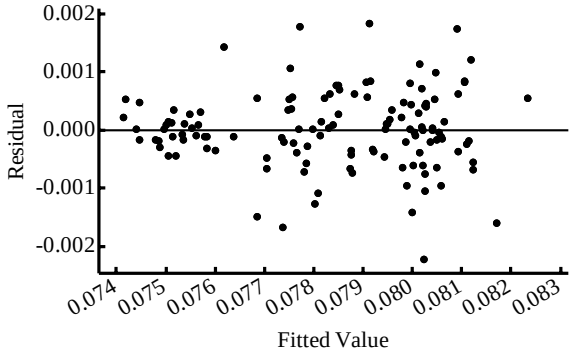

Fig. 8 Residual versus fitted value plot

شکل 8 نمودار مقادیر باقیمانده به مقادیر برازش یافته

میلی‌متر؛ میزان پیشروی سنبه برابر 40 میلی‌متر؛ شعاع گوشه قالب برابر 4 میلی‌متر؛ مقدار تغذیه محوری لوله و طول ناحیه تغییر شکل به ترتیب برابر 5 و 35 میلی‌متر). 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 انبساط[2] لوله نشان دهنده این است که از بین عوامل مورد بررسی، عوامل اصلی و متقابل $A, B,$ $D, F, CD, BEG, BDEG$ عوامل تاثیرگذار در فرایند می‌باشند. بر طبق این 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 می‌گردد.

در این جدول، درجه آزادی و مجموع مربعات ارائه شده است. مقدار P کمتر از 0.05 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 (82%)، سپس اثر متقابل بین میزان پیشروی سنبه و ارتفاع لاستیک (7%) و کمترین تاثیر را تغذیه محوری لوله (1%) دارد. مجموع بقیه عوامل A, B, C نیز کمتر از یک و نیم درصد تاثیر داشتند. همچنین اثر

[2] Average of bulging depth

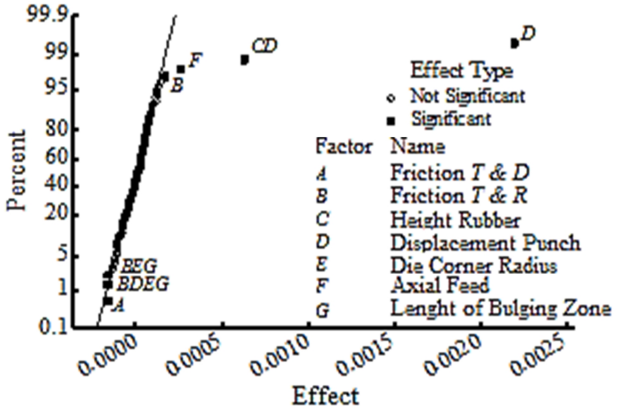

Fig. 9 Normal plot of the effects (response is average of bulging depth)

شکل 9 نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی متوسط ارتفاع انبساط‌دهی لوله

جدول 3 جدول تحلیل واریانس برای میزان متوسط ارتفاع انبساط لوله با نقطه میانی

Table 3 Analysis of variance table for average of bulging depth with center point

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

پارامتر انحنا بر متوسط ارتفاع انبساط لوله معنادار می‌باشد، ولی درصد تاثیر آن زیاد نیست (0.44%). لازم به ذکر است که میزان ضریب تعیین یا ضریب همبستگی[1] (R^2) مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (5) برابر 0.91 است.

$$\begin{aligned}&\text{Average of bulging depth} = \\ &0.002462 - 0.000083A + (0.000084)B \\ &+(0.000069)C + (0.001097)D + (0.000127)F \\ &+(0.000313)C \times D\end{aligned} \tag{5}$$

در "شکل 10" نمودار اثرات نرمال عوامل مورد بررسی را بر روی میزان ضخامت متوسط لوله مشاهده می‌کنید. از بین تمامی عوامل مورد بررسی، عامل‌های *B, C, D, F, BD, CD, DF, BEG, CEG, DEF, ADE, DFG, 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

$$\begin{aligned}&\text{Thickness average} = \\ &0.078402 - (0.000259)B - (0.000328)C \\ &+(0.001726)D - (0.000619)F - (0.000193)B \times D \\ &+(0.000197)C \times D + (0.000657)D \times F\end{aligned} \tag{6}$$

از نتایج بدست آمده مشخص شد که بیشترین تاثیر را بر ضخامت متوسط لوله در این فرایند، ابتدا میزان پیشروی سنبه (62%)، سپس 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. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود پارامتر انحنا برای ضخامت

[1] Determination Coefficient

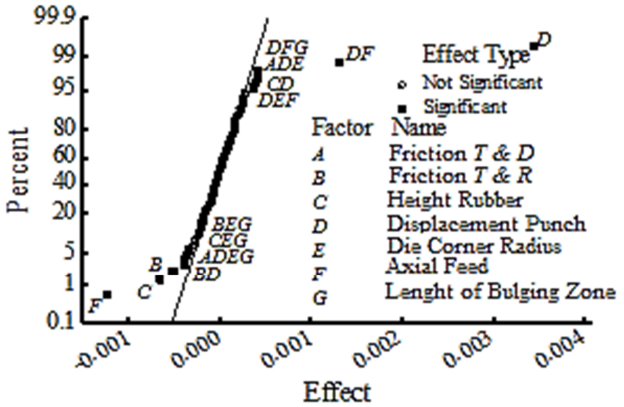

Fig. 10 Normal plot of the effects (response is thickness average)

شکل 10 نمودار اثرات نرمال عوامل بر روی ضخامت متوسط لوله

جدول 4 جدول تحلیل واریانس برای میزان ضخامت متوسط لوله با نقطه میانی

Table 4 Analysis of variance table for thickness average with center point

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

متوسط دارای مقدار P برابر 0.771 می‌باشد و در نتیجه اثر آن معنادار نیست. همچنین میزان ضریب تعیین (R^2) مدل رگرسیونی ارائه شده در رابطه (6) برابر 0.84 است.

برمبنای نتایج به‌دست آمده از پارامتر انحنا در تحلیل واریانس می‌توان عنوان کرد که انتخاب دو سطح برای عوامل بررسی شده در پژوهش حاضر کفایت می‌کند. اگر پارامتر انحنا دارای درصد معناداری بالایی باشد، بررسی 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، تغذیه محوری لوله و اصطکاک بین لوله و قالب؛ و همچنین لوله و الاستومر) بررسی می‌شود.

4-2- تاثیر اصطکاک

در فرایند انبساط‌دهی 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 می‌گردد. از طرفی نیز هر چه مقدار انبساط-دهی لوله افزایش یابد میزان ضخامت متوسط لوله نیز کاهش می‌یابد. "شکل 11" تاثیر اصطکاک بین لوله و لاستیک را بر میزان ارتفاع انبساط‌دهی و ضخامت متوسط نشان می‌دهد.

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 کاهش 6.5% ارتفاع انبساط‌دهی لوله شده است و این افزایش

اصطکاک تاثیر بسیار جزئی بر ضخامت متوسط لوله دارد.

با افزایش ارتفاع پلی‌اورتان، ارتفاع انبساط‌دهی لوله به میزان 6% افزایش یافته و اثر آن بر ضخامت متوسط لوله تقریبا ناچیز بوده و باعث افزایش 0.6% آن شده است. همچنین افزایش میزان جابه‌جایی سنبه افزایش 1.6 برابری ارتفاع انبساط‌دهی لوله و افزایش 6% ضخامت متوسط لوله را درپی داشته است. همان‌طورکه در "شکل 12" مشاهده می‌شود 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 نتیجه‌گیری بدون در نظر داشتن اثرات متقابل فاقد اعتبار علمی خواهد بود. از بررسی مقادیر P و درصد تاثیر عوامل می‌توان نتیجه گرفت که اثرات متقابل بین میزان جابه‌جایی سنبه و تغذیه محوری لوله (بر ضخامت متوسط لوله) و همچنین میزان جابه‌جایی سنبه و ارتفاع لاستیک (بر متوسط ارتفاع انبساط‌دهی) تاثیرگذار هستند و لذا اثرات اصلی آن‌ها اهمیت خود را از دست داده و باید برای درک صحیح فرایند، اثرات متقابل آن‌ها بررسی 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،

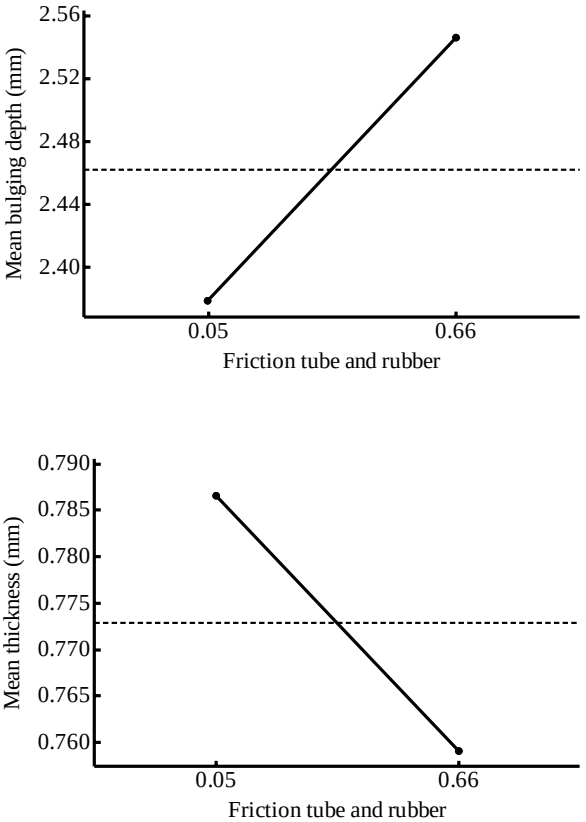

Fig. 11 Effect of friction on average of bulging depth and thickness average

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

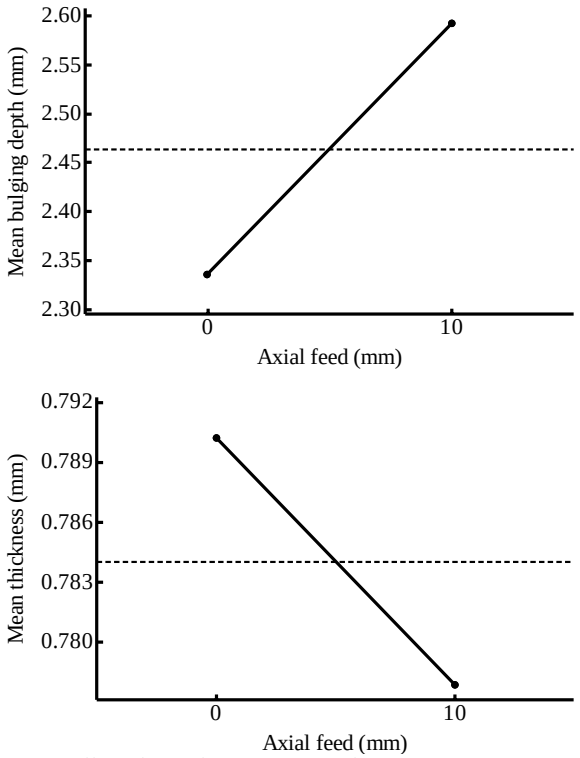

Fig. 12 Effect of axial feed on average of bulging depth and thickness average

شکل 12 تاثیر تغذیه محوری لوله بر متوسط ارتفاع انبساط‌دهی و ضخامت متوسط لوله

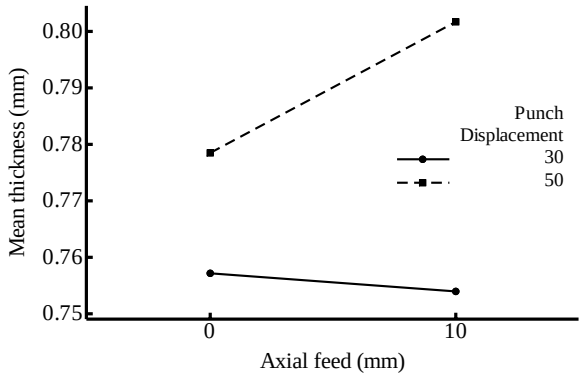

Fig. 13 Interaction plots of parameters on thickness average

شکل 13 اثرات متقابل عوامل D و F بر ضخامت متوسط لوله

ضخامت متوسط لوله به میزان 3 درصد افزایش یافته است. همچنین در "شکل 14" اثر متقابل میزان جابه‌جایی سنبه و ارتفاع پلی‌اورتان 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 می‌یابد. پر واضح است که اگر در این فرایند ارتفاع لاستیک افزایش یابد و همزمان میزان جابه‌جایی کم شود، مقدار متوسط ارتفاع انبساط‌دهی کاهش خواهد یافت.

5-انتخاب حالت بهینه

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

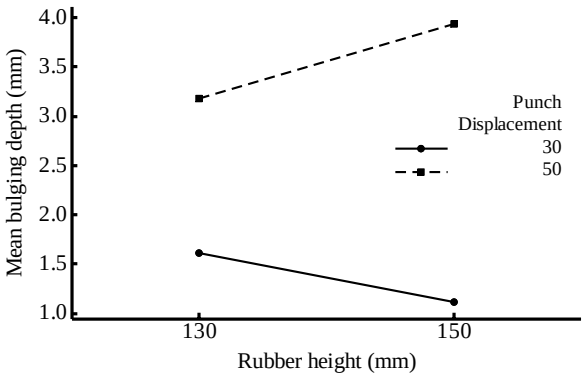

Fig. 14 Interaction plots of parameters on bulging depth

شکل 14 اثرات متقابل عوامل D و C بر متوسط ارتفاع انبساط‌دهی لوله

جدول 5 مقدار بهینه عوامل موثر بر فرایند

Table 5 the optimum of effective factors

عوامل	مقدار بهینه
ضریب اصطکاک بین لوله و قالب (A)	0.1
ضریب اصطکاک بین لوله و لاستیک (B)	0.05
ارتفاع لاستیک (C)	150
میزان پیشروی سنبه (D)	50
شعاع گوشه قالب (E)	5
تغذیه محوری لوله (F)	10
طول ناحیه تغییر شکل (G)	40

بهینه‌ساز پاسخ[1] در نرم‌افزار مینی‌تب 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 این‌که این دو پاسخ اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود، نهایتا باید حالتی را انتخاب نمود که هریک از پاسخ‌ها به سطحی قابل قبول از مطلوبیت دست یابند. براساس این روش که مطلوبیت[2] 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 میلی‌متر به ترتیب برای حداکثر ارتفاع انبساط‌دهی لوله و حداکثر ضخامت متوسط لوله دست خواهد یافت.

6-نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر هفت عامل در فرایند انبساط‌دهی 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 انبساط‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 با شبیه‌سازی 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.
- میزان پیشروی سنبه به عنوان یک عامل موثر بر میزان متوسط ارتفاع انبساط‌دهی (82%) و ضخامت متوسط لوله (62%) شناخته می‌شود. از آن‌جا که اگر بین عوامل اثر متقابل وجود داشته باشد، اثرات اصلی اهمیت خود را از دست می‌دهند و به دلیل این‌که عامل میزان پیشروی سنبه به همراه ارتفاع لاستیک و تغذیه محوری لوله اثرات متقابل تاثیرگذار هستند، لذا باید اثرات متقابل آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.
- 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 19.5% 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.

[1] Response optimizer
[2] Desirability