مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1394، دوره 15، شماره 4، ص‌ص 30-40

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی و عددی اثر اصطکاک در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله فولادی زنگ‌نزن 304 با استفاده از بالشتک کشسان

حسن غفوریان نصرتی[1]، مهدی گردویی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی 316، gerdooei@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 آبان 1393

پذیرش: 24 دی 1393

ارائه در سایت: 28 بهمن 1393

کلید واژگان:

شکل¬دهی با بالشتک کشسان

انبساط¬دهی آزاد لوله

اصطکاک

شبیه¬سازی المان¬محدود

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان به علت انعطاف‌پذیری بالای این فرایند در تولید قطعات یکپارچه توخالی از ورق و لوله، کیفیت مطلوب سطح و کاهش هزینه تمام‌شده مورد توجه صنایع خودروسازی، هوافضا و تسلیحاتی قرار گرفته است. در این پژوهش تحلیل عددی و تجربی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله درزدار فولادی زنگ‌نزن 304، با استفاده از بالشتک کشسان از جنس پلی‌اورتان انجام گردید. در شبیه‌سازی عددی به روش المان محدود از حل‌گر صریح نرم‌افزار آباکوس 6.12 برای مدل‌سازی سه‌بعدی فرایند استفاده و اثر شرایط اصطکاکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. رفتار بالشتک به صورت یک ماده هایپرالاستیک تراکم‌ناپذیر با معادله ساختاری مونی-ریولین و لوله فولادی با رفتار الاستیک-پلاستیک و معیار شکست نرم پیشرونده از نوع منحنی حد شکل‌دهی تحلیل شد. در بخش تجربی از این تحقیق، آزمون فشار لاستیک بر اساس استاندارد ASTM D575-91 انجام و منحنی تنش-کرنش و ثوابت معادله ساختاری پلی‌اورتان تعیین گردید. شکل‌دهی لوله‌های مدرج فولادی، با استفاده از بالشتک کشسان در شرایط مختلف روانکاری تا رسیدن به آستانه پارگی انجام؛ توزیع کرنش‌های طولی، محیطی و ضخامتی بدست آمد. نتایج نشان داد سیستم روانکاری مورد استفاده –به‌ویژه بین لاستیک و لوله- نقش به‌سزایی در کنترل چروکیدگی، افزایش عمق بالج، کاهش نیروی شکل‌دهی و انرژی تلف‌شده‌ی اصطکاکی فرایند خواهد داشت. همچنین مشخص شد که، قطعات سالم بدون چین‌خوردگی با استفاده از روانکار نایلون بین لاستیک و لوله، و روانکار روغن کشش بین لوله و قالب شکل داده می‌شود.

Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad

Hasan Ghaforian Nosrati, Mahdi Gerdooei*

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.
* P.O.B. 316 Shahrood, Iran, gerdooei@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 November 2014
Accepted 14 January 2015
Available Online 17 February 2015

Keywords:
Rubber Pad Forming
Tube Free Bulging
Friction
FEM Simulation

ABSTRACT

In recent years, rubber pad forming process has conferred many advantages, such as high flexibility, good surface quality and lower manufacturing costs. RPF has been widely used in automotive, aerospace and military industries. In the present research, numerical and experimental analysis of free bulging 304 stainless steel seamed tube, using a polyurethane elastic pad has been studied. First, 3D simulation of seamed tube bulging using the finite element ABAQUS/Explicit 6.12 software by several frictional conditions has been performed. An incompressible hyperelastic pad has been modeled by Mooney-Rivlin constitutive equation and the elastic-plastic behavior as a more progressive ductile damage criterion FLD for steel tube were assumed. In the experimental activity, compression test of rubber was carried out according to ASTM D575-91 standard and compressive stress-strain curve and the Mooney-Rivlin constants were determined. Forming of meshed tubes by using elastic pad with different lubricating systems has been conducted up to onset of bursting in the seam weld and longitudinal, hoop and thickness strains were measured. Results showed that friction, especially between rubber and tube plays the main role in controlling wrinkles, increasing the bulge depth, reducing the forming load and friction dissipation energy of the process. Also, it was observed that the intact parts without any wrinkles were formed using nylon lubricant between tube and rubber and drawing oil between tubes and die.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر با تحقیقات به عمل آمده در زمینه شکل‌دهی، توسعه شگرفی در این صنعت حاصل شده است. از این رو بیشتر صنایع مانند صنایع نظامی، فضایی، خودروسازی، پتروشیمی و تاسیساتی به سمت روش‌های توأم با کاهش هزینه و زمان تولید؛ سوق داده شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به شکل‌دهی با بالشتک کشسان[1] اشاره کرد. شکل‌دهی به کمک لایه‌های انعطاف‌پذیر به عنوان یکی از روش‌های کم‌هزینه نسبت به سایر روش‌های

1- Rubber Pad Forming (RPF)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Ghaforian Nosrati, M. Gerdooei, Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 30-40, 2015 (In Persian)

سنتی، امروزه به طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش بر خلاف روش‌های سنتی که هر دو نیمه قالب از جنس فلز ساخته می‌شود، تنها یکی از نیمه‌های قالب صلب در نظر گرفته می‌شود و نیمه‌ی دیگر قالب از لایه های انعطاف‌پذیر ساخته می‌شود [1]. همچنین تولید قطعات صنعتی از لوله‌های فلزی با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌ها و خصوصاً کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه، تولید قطعات یکپارچه و افزایش کیفیت سطح باعث شده تا محققان و صنعتگران به سمت فرایندهای شکل‌دهی پیشرفته با کمک قالب‌های انعطاف‌پذیر (سیال و یا لاستیک) روی آورند.

تحقیق و مطالعه در خصوص روش شکل‌دهی با بالشتک کشسان یکی از موضوعات مورد علاقه محققان در دهه اخیر بوده است. بیشتر 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 [3،2]. کلانتری و همکارانش به کمک تحلیل‌های تجربی و عددی اثر ضریب اصطکاک، هندسه قالب و قطعه را بر روی فرایند انبساط‌دهی لوله‌های مسی T شکل به کمک واسطه‌ی پلی‌اورتان بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش شعاع قالب در افزایش طول شاخه T شکل لوله مؤثر بوده و همچنین باعث کاهش میزان نازک‌شدگی سر شاخه می‌شود. همچنین شکل‌دهی لوله‌هایی که دارای ضخامت اولیه‌ی بیشتری است به نیروی بیشتری نیاز دارد که البته شاخه‌های بلندتری را تولید خواهد کرد، اما میزان افزایش ضخامت آن در انتهای لوله نیز بیشتر خواهد بود [5،4]. انقباض قطر موضعی لوله فولادی St37 توسط یک حلقه کشسان از جنس تایر تراکتور با سختی 70 شور A[1]، به صورت عددی و تجربی توسط درویشی و همکارانش بررسی شد. با توجه به نتایج استخراج شده، این روش را می‌توان به عنوان یک روش کاربردی در زمینه مونتاژ لوله‌ها و به طور خاص برای اتصال لوله‌هایی از جنس‌های مختلف که امکان اتصال آن‌ها توسط سایر فرایندها مقدور نیست، معرفی کرد. علاوه بر حفظ کیفیت سطوح، این فرایند موجب ایجاد تغییرات متالورژیکی در ساختار لوله مثل فرایند جوشکاری نمی‌شود [6]. تحلیل تجربی و عددی فرایند بالجینگ یک طرفه لوله مسی با استفاده از بالشتک کشسان از جنس پلی‌اورتان توسط مک‌دونالد و همکارانش بررسی شد. نتایج بیان‌کننده ارتباط خوب بین داده‌های تجربی و عددی بدست آمده است؛ همچنین اصطکاک بین لوله و واسط پلی‌اورتان در صورتی که تحت کنترل باشد، می‌تواند سودمند واقع شود [7]. مقایسه دو مدل اصطکاکی و اثر آن بر شکل‌پذیری لوله در مدل‌سازی رایانه‌ای فرایند انبساط‌دهی لوله‌ی آلومینیومی AA6061-T4 به کمک بالشتک کشسان توسط قادری و همکارانش بررسی شده است. بر طبق نتایج بدست‌آمده، حداکثر نیروی فرایند قبل از شکست و همچنین کرنش در راستای ضخامت لوله با استفاده از هر دو مدل اصطکاکی تفاوت چشم‌گیری با هم نداشته و میزان افزایش قطر لوله با استفاده از مدل اصطکاک جنبشی نسبت به مدل اصطکاک کولمبی بیشتر است. همچنین با استفاده از مدل اصطکاک جنبشی، شکست در لوله زودتر اتفاق می‌افتد [8].

مطالعات انجام شده در خصوص فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان از اهمیت شرایط اصطکاکی در کنترل هندسه محصول حکایت دارد. تاکنون به صورت منسجم در انبساط‌دهی متقارن آزاد لوله‌ها، بررسی شرایط اصطکاکی (لوله-بالشتک و لوله-قالب) صورت نگرفته است. لذا در این تحقیق با هدف دستیابی به یک محصول سالم (بدون چین و پارگی) شرایط مختلف اصطکاکی داخلی و خارجی لوله با استفاده/عدم استفاده از روانکار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل‌سازی کامل مکانیزم تغییرشکل لوله در تماس با لاستیک تحت فشار به کمک روش المان محدود انجام و به منظور تخمین پارگی از مدل شکست نرم پیش‌رونده[2] استفاده می‌شود. در ادامه آزمون‌های تجربی مدل‌های شبیه‌سازی شده به اجرا گذاشته شده و نتایج عددی با آزمون‌های تجربی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

2- بالشتک کشسان و معادله ساختاری آن

نزدیک به 150 سال است که الاستومرها (یا مواد لاستیکی) به عنوان مواد مهندسی استفاده می‌شود. ماده اولیه برای تولید الاستومرها، کائوچو است. خاصیت مهم الاستومرها، رفتار الاستیکی آن‌ها بعد از تغییرشکل در مقابل فشار یا کشش می‌باشد. ممکن است یک الاستومر 10 برابر طول اولیه خود کشیده شود ولی بعد از حذف کشش، تحت شرایط محیطی ایده‌آل، به شکل و طول اولیه خود باز گردد. علاوه بر این، الاستومرها با ویژگی‌هایی مانند استحکام و سفتی بالا تحت تنش‌های دینامیکی یا استاتیکی، مقاومت بسیار خوب در مقابل سایش، نفوذناپذیری در مقابل هوا و آب و همچنین مقاوم بودن در برابر مواد شیمیایی مشخص می‌شوند. لاستیک طبیعی، لاستیک استایرن-بوتادین، لاستیک سیلیکون و پلی‌اورتان‌ها، الاستومرهای مورد استفاده در فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان می‌باشد. مزایای بسیاری برای پلی‌اورتان وجود دارد؛ مقاومت به سایش بالای آن، خواص میرائی خوب، همچنین ظرفیت تحمل بار بالا در مقایسه با سایر لاستیک‌ها باعث شده تا پلی‌اورتان به‌طور گسترده‌ای در فرایند شکل‌دهی با بالشتک کشسان استفاده شود [9].

برای مسائلی که مقدار کشش یا به‌طور کلی تغییرشکل در آن کوچک است، رفتار تنش و کرنش توسط قانون هوک که بیان کننده ارتباطی متناسب بین تنش و کرنش می‌باشد؛ بیان می‌شود. اما در تغییرشکل‌های بزرگ در الاستومرها از مدل‌های غیرخطی هایپرالاستیک برای تقریب رابطه بین تنش و کرنش استفاده می‌شود. زمانی که الاستومر تغییرشکل پیدا می‌کند؛ می‌توان انرژی الاستیک ذخیره شده را با حالت‌هایی از کرنش، توسط سه نسبت کشش/یا فشار اصلی[3] λ_1، λ_2 و λ_3 شرح داد.

تابع پتانسیل یا چگالی انرژی کرنش (که بیان کننده انرژی کرنشی ذخیره شده در واحد حجم است) معمولاً با ترم‌هایی از ثوابت تانسور تغییرشکل نوشته می‌شود. برای نشان دادن این تابع از مدل‌هایی مانند آرودا-بویس، مونی-ریولین، نئو-هوکن، اوگدن، چندجمله‌ای، چندجمله‌ای کاهش یافته، یئو و واندروالس استفاده می‌شود [10]. به صورت عمومی رفتار یک ماده هایپرالاستیک را می‌توان به صورت تابع انرژی کرنشی به فرم چندجمله-ای رابطه (1) بیان کرد [9].

$$W = \sum_{i+j=1}^{N} c_{ij} J_1^i J_2^i + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i} J_3^{2i} \qquad (1)$$

که در آن c_{ij} و D_i ثوابت ماده و J ثوابت تانسور تغییرشکل است. تعیین مدل مورد استفاده به عواملی مانند نوع کاربرد، نرخ کرنش، در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز و غیره بستگی دارد. براساس داده‌های حاصل از آزمون‌هایی مانند فشار تک‌محوری؛ استفاده از مدل‌های رفتاری آرودا-بویس، وندروالس و یا مدل‌هایی از چندجمله‌ای کاهش‌یافته، با نتایج تجربی ارتباط

1- Shore A

2- Progressive Ductile Damage

3- Principal Stretch Ratios

بهتری خواهد داشت. با در دسترس بودن داده‌های هر دو آزمون تک‌محوره و دومحوره، مدل‌های اوگدن و واندروالس دقیق‌تر خواهند بود. مدل‌های هایپرالاستیک که در بالا ذکر شد به طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی المان محدود لاستیک و فرایندهای شکل‌دهی با بالشتک کشسان استفاده می‌شود. در این پژوهش برای بیان رفتار تغییرشکل هایپرالاستیک بالشتک پلی‌اورتان از مدل مونی-ریولین استفاده شد. در رابطه (1) مقدار پارامتر N می‌تواند تا عدد شش باشد که به ازای N=1، مدل مونی-ریولین به صورت رابطه (2) بدست می‌آید.

$$W = c_1 J_1 + c_2 J_2 + \frac{1}{D_1} J_3^2 \qquad (2)$$

همچنین معادله ساختاری برای مواد هایپرالاستیک تراکم‌ناپذیر را می‌توان به صورت رابطه (3) تعریف کرد؛ که در آن σ تانسور تنش کوشی، p فشار هایدرواستاتیک می‌باشد [11].

$$\sigma = -pI + 2(c_1 C - c_2 C^{-1}) \qquad (3)$$

اگر جهات سیستم مختصات در جهت اصلی تغییرشکل فرض شود، می‌توان تانسور کرنش کوشی-گرین را به صورت رابطه (4) بیان کرد.

$$C = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

از طرفی در کشش یا فشار تک محوره می‌توان رابطه (5) را نوشت:

$$\lambda_1 = \lambda, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}, \quad \sigma_{11} = \sigma, \ \sigma_{11} = \sigma_{22} = 0 \qquad (5)$$

از ترکیب روابط (3)، (4) و (5) معادله ساختاری در کشش/فشار تک محوری به صورت (6) بدست می‌آید.

$$\sigma = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})(c_1 + c_2 \lambda^{-1}) \qquad (6)$$

به‌منظور دستیابی به یک رابطه خطی، رابطه (6) به صورت زیر نوشته می‌شود که در آن c_2 شیب خط و c_1 عرض از مبدا آن می‌باشد.

$$B = \frac{\sigma}{2(\lambda^2 - \lambda^{-1})} = c_1 + c_2 \lambda^{-1} \qquad (7)$$

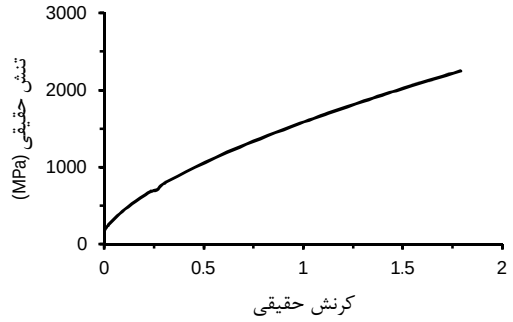
3- شرح فعالیت تجربی

لوله مورد استفاده در آزمایش‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن 304 است. قطر خارجی لوله 38 mm، طول آن 150 mm و ضخامت آن 0/75 mm است. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی آن، از منحنی تنش-کرنش حقیقی که در شکل 1 نشان داده شده است؛ استفاده شد. خواص لوله فولادی شامل چگالی، مدول کشسان، تنش تسلیم و ضریب پواسون در جدول 1 درج شده است.

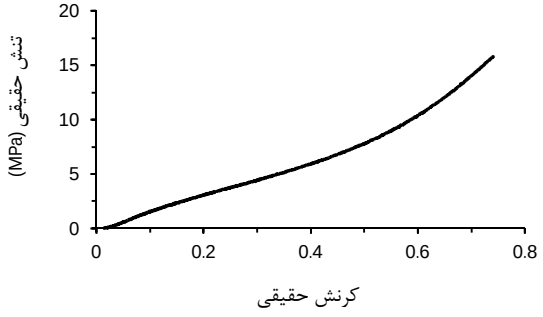
به منظور اندازه‌گیری کرنش پس از شکل‌دهی، بر اساس استاندارد ASTM E-2218 از دایره‌هایی به قطر 3 mm و فاصله مرکز تا مرکز 3/5 mm برای شبکه‌بندی لوله‌ها استفاده شد. پس از انجام آزمایش، برای اندازه‌گیری دایره‌های تغییرشکل یافته از نوار مایلر و کولیس دیجیتال استفاده شد. لاستیک مورد استفاده از جنس پلی‌اورتان، با طولی برابر 140 mm، قطر 34 mm و سختی 85 شور A است. به منظور بدست آوردن منحنی تنش-کرنش پلی‌اورتان، آزمون فشار لاستیک براساس استاندارد ASTM D 575-91 انجام شد؛ نتیجه آن در شکل 2 قابل مشاهده است.

جدول 1 خواص لوله فولادی مورد استفاده [12]

چگالی (kg/m³)	7930
مدول یانگ (GPa)	200
تنش تسلیم (MPa)	215
ضریب پواسون	0/29

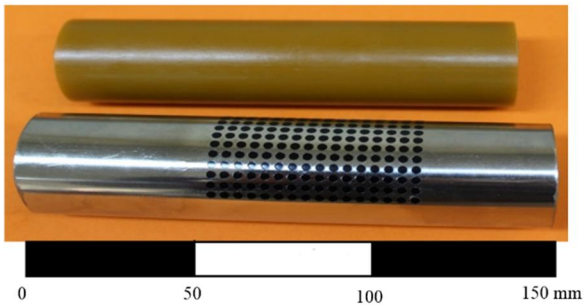


شکل 1 منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 [12]



شکل 2 منحنی تنش-کرنش فشاری لاستیک

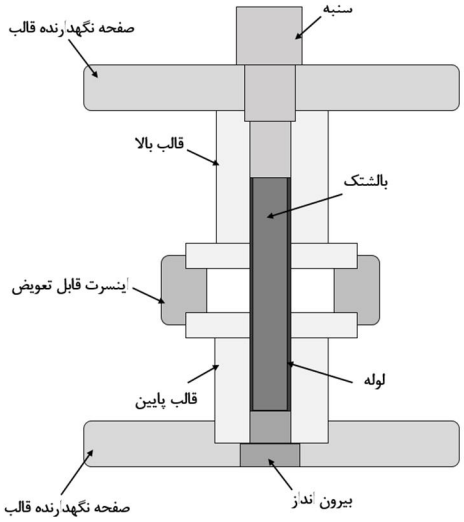
برای محاسبه ضرایب مدل رفتاری مونی-ریولین با ایجاد برازش خطی بر طبق رابطه 7 و با استفاده از منحنی شکل 2 ثوابت c_1 و c_2 مطابق جدول 2 بدست آمد که در بخش تعریف خواص لاستیک در تحلیل عددی از این مقادیر استفاده شد. همچنین ضریب D_1 که معرف میزان تراکم‌ناپذیری لاستیک است می‌بایست عددی بسیار کوچک در نظر گرفته شود [10]. نمونه‌ای از لاستیک و لوله‌ی شبکه‌بندی شده در شکل 3 نشان داده شده است. در شکل‌های 4 و 5 به ترتیب طرح‌واره و مجموعه قالب مورد استفاده در این پژوهش قابل مشاهده است. نحوه عملکرد مجموعه قالب انبساط‌دهی لوله 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 محور پرس با سرعت ثابت 6 mm/min، نیروی اعمالی مورد نیاز برای فشردن لاستیک توسط سنبه تامین می‌شود. با ایجاد فشار داخلی، لوله در ناحیه شبکه‌بندی شده انبساط می‌یابد. لازم به ذکر است که سنبه هیچ‌گونه تغذیه محوری به لوله نمی‌دهد.



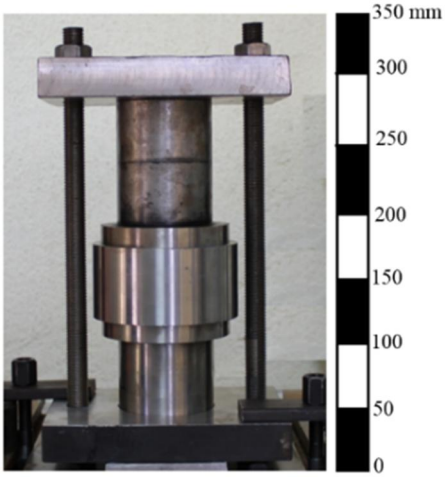
شکل 3 لوله شبکه‌بندی شده و لاستیک مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

جدول 2 ثوابت مدل رفتاری مونی-ریولین برای پلی‌اورتان مورد استفاده

ضریب D_1 (1/MPa)	ضریب c_2 (MPa)	ضریب c_1 (MPa)
10^{-9}	0/3282	1/8564



شکل 4 طرح‌واره قالب انبساط‌دهی لوله به صورت آزاد



شکل 5 مجموعه قالب انبساط‌دهی آزاد لوله

به‌منظور فشردن لاستیک در درون قالب، تمامی آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی ژاو آریا با تناژ نامی 100 تن؛ انجام شده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کنترل می‌باشد، به‌طوری که امکان تنظیم سرعت حرکت رم و ثبت نیرو و جابه‌جایی پرس در هر لحظه را میسر می‌سازد. لازم به ذکر است که نتایج تحقیقات تجربی و عددی نشان می‌دهد که از بین پارامترهای دخیل در فرایند شکل‌دهی با لاستیک (مانند سختی و ابعاد لاستیک، هندسه قالب، سرعت شکل‌دهی و غیره) شرایط اصطکاکی در لایه داخلی و خارجی لوله و میزان پیشروی سنبه نقش بسزایی در تولید محصول سالم دارد [۵،7،4]. لذا در این پژوهش اثر میزان پیشروی سنبه و شرایط روانکاری بر هندسه محصول با اجرای آزمون‌های تجربی مطابق جدول 3 مورد بررسی قرار گرفت. از چند لایه نازک نایلون به ضخامت 1 mm به عنوان روانکار بین لوله و لاستیک و از روغن کشش برای روانکاری بین لوله و قالب استفاده شد.

جدول 3 شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده

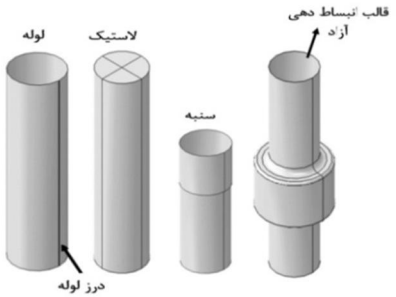
شماره آزمون	جابه‌جایی سنبه (mm)	شرایط روانکاری: بین لوله و قالب	شرایط روانکاری: بین لوله و لاستیک
T1	30	خشک	خشک
T2	50	خشک	خشک
T3	30	خشک	نایلون
T4	50	خشک	نایلون
T5	30	روغن کشش	نایلون
T6	50	روغن کشش	نایلون
T7	55	روغن کشش	نایلون

4- شرح فعالیت عددی

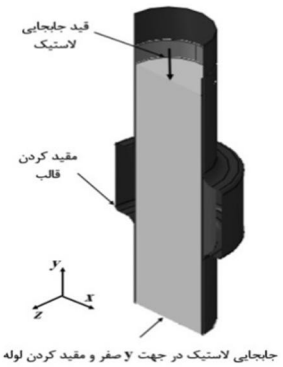
به‌منظور مدل‌سازی فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله درزدار از حل‌گر صریح نرم‌افزار المان‌محدود ABAQUS 6.12 استفاده شد. مجموعه قالب، لوله و لاستیک به صورت سه‌بعدی مدل شد. مدل لوله و لاستیک از نوع شکل‌پذیر و مدل سایر قطعات قالب، از نوع صلب و پوسته‌ای انتخاب شد. در شکل 6 مدل ترسیم‌شده اجزای قالب، لوله و لاستیک نشان داده شده است. همچنین چگونگی استقرار اجزای قالب و شرایط مرزی اعمال شده نیز در شکل 7 قابل مشاهده است.

در این پژوهش، حرکت سنبه بر اساس 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. در استفاده از حل‌گر صریح دینامیکی برای مسائل شبه استاتیکی می‌توان سرعت فرایند را مادامی که انرژی جنبشی کمتر از 5 تا 10 درصد انرژی کل باشد، افزایش داد [10]. در شکل 8 انرژی جنبشی و انرژی کل فرایند از شبیه‌سازی بدست آمده است که این مقایسه نشان دهنده این است که این کاهش بازه زمانی موجب افزایش غیر واقعی انرژی جنبشی فرایند نشده است. همچنین از تماس سطح به سطح با مدل اصطکاک کولمبی برای تعریف شرایط تماسی استفاده شده است. به‌منظور ایجاد شرایط روانکاری مناسب ضریب‌های اصطکاک 0/66 و 0/05 برای تماس سطح لوله با لاستیک؛ 0/3 و 0/1 برای تماس لوله و قالب به ترتیب برای حالت‌های بدون روانکار (خشک) و در حضور روانکار تعریف شده است [13].

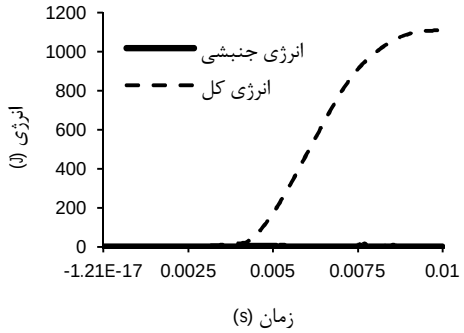
در بخش اعمال شرایط مرزی (مطابق شکل 7)، قید اول مربوط به صفر کردن جابه‌جایی سطح پایینی بالشتک در جهت y است. نوع دوم قید جابه‌جایی است که برای محدود کردن درجات آزادی قالب و مقید کردن لبه پایینی لوله اعمال می‌شود. همچنین به منظور تأمین نیروی مورد نیاز فرایند، قید جابه‌جایی به نقطه مرجع سنبه نسبت داده شده است.



شکل 6 هندسه اجزای قالب در شبیه‌سازی



شکل 7 مونتاژ اجزای قالب و شرایط مرزی اعمال شده



شکل 8 مقایسه انرژی جنبشی ایجاد شده با انرژی کل در شبیه‌سازی فرایند

المان بکار رفته در مدل لوله از نوع S4R است که یک المان پوسته‌ای چهار گره‌ای از نوع انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است. برای شبکه‌بندی لاستیک از المان نوع C3D8R (المان هشت گره‌ای انتگرال‌گیری کاهش یافته) استفاده شد. یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل المان‌محدود، اندازه المان‌ها است. برای بدست آوردن اندازه بهینه المان، از آنالیز حساسیت مش استفاده شد. بدین منظور، مدل‌هایی با اندازه المان‌های مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر تعداد المان‌ها، بر زمان تحلیل فرایند در حالت‌های مختلف مقایسه و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار mm 1/5 برای طول المان لوله و mm 3 برای طول المان لاستیک انتخاب شد.

خصوصیات مکانیکی لوله و لاستیک مطابق جدول‌های 1 و 2 و همچنین شکل‌های 1 و 2 در نرم‌افزار وارد گردید. در این تحلیل از خاصیت ناهمسان‌گردی پلاستیک لوله صرف‌نظر شد. ناحیه درز جوش به عنوان یک نقص مکانیکی و به صورت نوار نازک به عرض mm 1 مدل‌سازی شد و ضریب نقص که به صورت رابطه (8) تعریف می‌شود، برابر 0/9 تعیین گردید [14]. در رابطه (8)، بالانویس a و b به ترتیب مربوط به ناحیهٔ لوله فولادی و ناحیهٔ درز جوش می‌باشد.

$$f = \frac{\bar{\sigma}^b}{\bar{\sigma}^a} \tag{8}$$

4-1- مدل‌سازی ایجاد و رشد شکست نرم

به منظور پیش‌بینی شروع شکست[1] از معیار شکست نرم پیشرونده با مدل نمودار حد شکل‌دهی[2] و الگوی خطی رشد شکست[3] بر طبق تابع جابه‌جایی پلاستیک مؤثر استفاده شد. معیار شروع شکست FLD نیاز به مشخصات منحنی حد شکل‌دهی دارد، که به منظور تعریف منحنی حد شکل‌دهی می‌توان کرنش اصلی بزرگتر را بر حسب کرنش اصلی کوچکتر، دمای فرایند و دیگر متغیرهای فرایند وارد کرد. در این روش متغیر شکل‌پذیری تحت عنوان W_{FLD} طبق رابطه (9) بیان می‌شود. این متغیر یک تابعی از حالت تغییرشکل فعلی می‌باشد و به عنوان نسبت کرنش اصلی در حال حاضر به کرنش اصلی بر روی منحنی حد شکل‌دهی تعریف می‌شود [10].

$$W_{FLD} = \frac{\varepsilon_{\text{major}}}{\varepsilon_{\text{major}}^{FLD}} \tag{9}$$

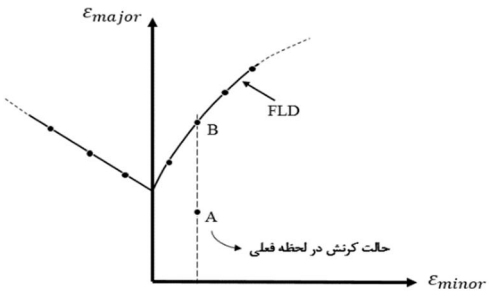
به عنوان مثال، در شکل 9 برای حالت تغییر شکل داده شده در نقطه A متغیر شکل‌پذیری به صورت رابطه (10) محاسبه می‌شود. در لحظه رسیدن حالت کرنش فعلی (نقطه A) به حد شکل‌دهی (نقطه B)؛ پارامتر شکل‌پذیری $W_{FLD} = 1$ خواهد شد و لحظه شروع شکست خواهد بود.

$$W_{FLD} = \frac{\varepsilon_{\text{major}}^{A}}{\varepsilon_{\text{major}}^{B}} \tag{10}$$

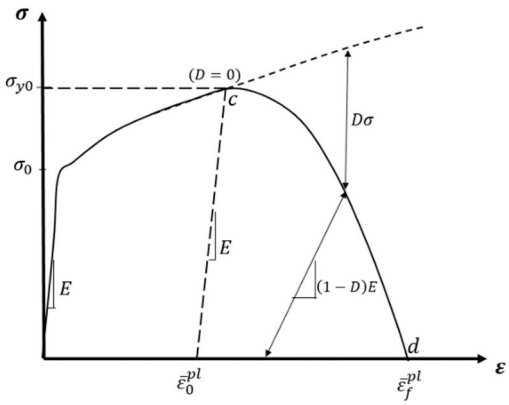
شکل 10 مشخصه رفتار تنش و کرنش یک ماده را تحت شکست نشان می‌دهد. منحنی خط‌چین در شکل نشان داده شده مربوط به رفتار تنش و کرنش ماده در غیاب شکست و منحنی خط‌پر مربوط به رفتار ماده در حالت شکست است. مقادیر σ_{Y0} و $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ به ترتیب تنش تسلیم و کرنش پلاستیک مؤثر در شروع شکست می‌باشند؛ $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ کرنش پلاستیک مؤثر در لحظه شکست می‌باشد، یعنی هنگامی که متغیر شکست D به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.

در حالت کلی قانون رشد شکست را می‌توان با استفاده از توابع جابه‌جایی پلاستیک مؤثر ($\bar{u}^{pl}$)، بر حسب طول مؤثر المان بیان کرد. جابه‌جایی پلاستیک مؤثر در هر لحظه از تحلیل، بر حسب طول مشخصه المان (L) به صورت رابطه (11) تعریف می‌شود [10].

$$\bar{u}^{pl} = L\bar{\varepsilon}^{pl} \tag{11}$$



شکل 9 نمودار حد شکل‌دهی



شکل 10 رفتار تنش و کرنش ماده تحت شکست

1- Damage Initiation
2- Forming Limit Diagram (FLD)
3- Damage Evolution

در این صورت متغیر شکست D به صورت تابعی از جابه‌جایی پلاستیک مؤثر المان تعریف می‌شود. در شکل 11 به صورت شماتیک برای یک المان خطی روند تغییرات D در لحظه‌های مختلف با افزایش $\bar{u}^{pl}$ نمایش داده شده است. با افزایش جابه‌جایی پلاستیک مؤثر متغیر شکست افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که وقتی جابه‌جایی به مقدار بحرانی $\bar{u}_f^{pl}$ می‌رسد شکست کامل شده و با صفر شدن استحکام حقیقی، المان از تحلیل حذف می‌شود.

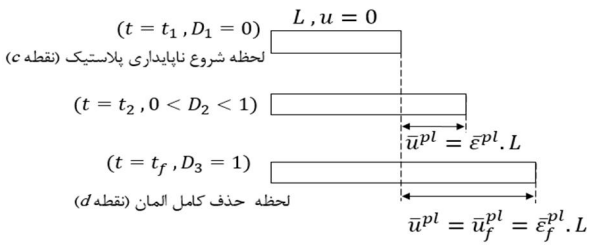
رابطه رشد متغیر شکست با جابه‌جایی پلاستیک مؤثر را می‌توان به صورت جدولی[1]، خطی[2]، و یا به صورت نمایی[3] مشخص کرد. روند افزایشی متغیر آسیب در حالت خطی با استفاده از رابطه (12) قابل بیان است [10].

$$D = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} = \frac{L\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} \qquad (12)$$

هنگامی که جابه‌جایی پلاستیک مؤثر برابر با مقدار آن در هنگام شکست باشد، ماده به طور کامل تخریب خواهد شد. یا به عبارتی پس از شروع شکست با افزایش کرنش براساس مدل رشد شکست، متغیر D افزایش می‌یابد تا شکست کامل شود. با توجه به مطالب بیان شده و بر طبق نتایج بدست آمده از مرجع [14] مقدار بهینه متغیر جابه‌جایی پلاستیک مؤثر برابر 0/05 در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی‌های ابتدایی، از FLD ورق فولادی زنگ‌نزن (مستخرج از مرجع [15]) برای پیش‌بینی شکست استفاده شد. مقایسه حالت کرنش نقاط سالم از محصولات شکل داده شده بر روی صفحه کرنش، نشان داد که این نقاط به مقدار قابل توجهی بالاتر از منحنی FLD ورق می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که حد شکل‌دهی در فرایند RPF افزایش یافته است و استفاده از منحنی حد شکل‌دهی ورق در انبساط‌دهی لوله با بالشتک کشسان معتبر نمی‌باشد؛ به منظور اعمال این بهبود شکل‌پذیری منحنی حد شکل‌دهی اصلاح شده فرایند RPF از بالاترین سطح کرنش نقاط ایمن در محصولات تجربی گذرانده شد و شبیه‌سازی‌ها با منحنی اصلاح شده حاصل از نتایج تجربی انجام گرفته است (شکل 12). این افزایش شکل‌پذیری در فرایند RPF را می‌توان به افزایش فشار تماسی در این فرایند در مقایسه با شکل‌دهی سنتی ورق‌های فلزی نسبت داد.

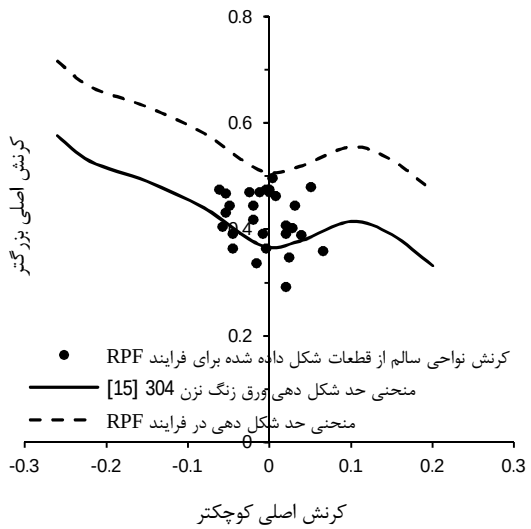
5- نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به انبساط‌دهی لوله طبق شرایط مندرج در جدول 3، نخست برای حالت کاملاً خشک و سپس برای حالت با روانکار ارائه شده است. در هر بخش ابتدا نتایج تجربی و سپس مقایسه نتایج با روش عددی ذکر شده است. آزمایش‌های تجربی (با شرایط مندرج در جدول 3)، پس از ساخت قالب انجام شد. در شکل 13 تعدادی از لوله‌های شکل داده شده در آزمایشگاه به روش تجربی مشاهده می‌شود.



شکل 11 تعریف متغیر جابه‌جایی پلاستیک مؤثر

1- Tabular
2- Linear
3- Exponential



شکل 12 منحنی حد شکل‌دهی لوله فولادی زنگ‌نزن 304 در فرایند RPF

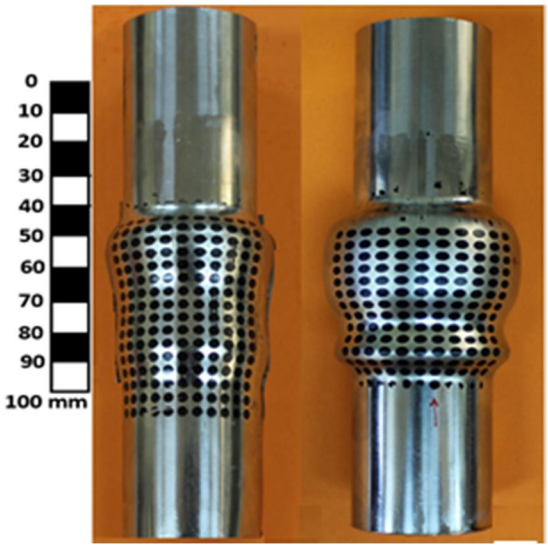
شکل 13 تعدادی از لوله‌های شکل داده شده به روش تجربی

5-1- انبساط‌دهی لوله بدون روانکار

در ابتدا فرایند انبساط‌دهی با اعمال جابه‌جایی متفاوت سنبه و در شرایط بدون روانکار مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، پس از قرار دادن لوله در داخل قالب، سنبه با اعمال فشار بر روی لاستیک باعث انبساط شعاعی لاستیک در ناحیه شبکه‌بندی شده لوله می‌شود. با توجه به اصطکاک بالا، همان‌طور که در شکل 14 قابل مشاهده است؛ لاستیک لوله را در راستای حرکت خود پیش می‌راند و از ابتدای فرایند، روند چین‌خوردگی آغاز و تا انتها کامل می‌شود. به علت پیشروی یک طرفه سنبه از بالای قطعه، روند چین‌خوردگی نسبت به صفحهٔ وسط لوله کاملاً نامتقارن است. انبساط نامتقارن و پدیدآمدن چین‌خوردگی به دلیل حضور اصطکاک بالا بین اجزای قالب، بخصوص بین لوله و پلی‌اورتان می‌باشد.

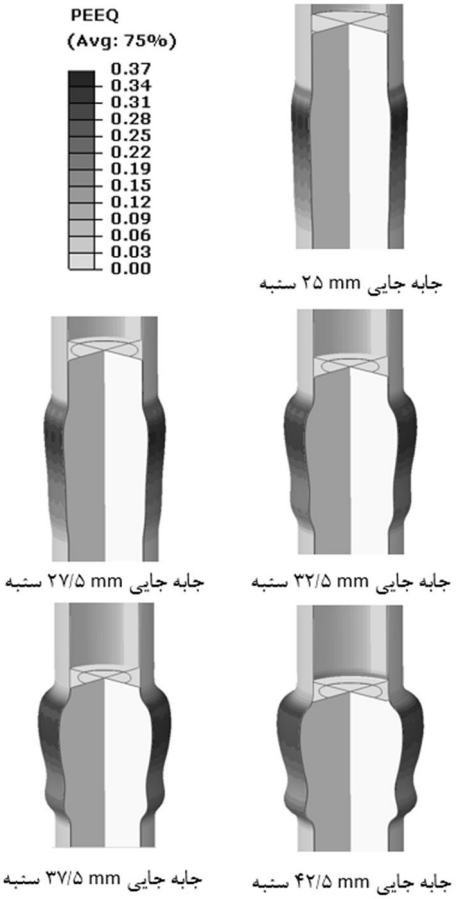
شبیه‌سازی فرایند انبساط‌دهی با اعمال جابه‌جایی متفاوت سنبه و در شرایط بدون روانکار نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت ضرایب اصطکاک بین لوله و قالب، لوله و لاستیک به ترتیب برابر 0/3 و 0/66 در نظر گرفته شده است. در شکل 15 توزیع کرنش مؤثر حاصل از جابه‌جایی مختلف سنبه در آزمون T2، در 5 مرحله مشاهده می‌شود.

به علت وجود عوامل متعدد خطاساز (نویز) در پاسخ مسأله المان محدود، اعتبارسنجی نتایج عددی امری ضروری است. در این تحقیق با مقایسه هندسه محصول شبیه‌سازی با آزمون تجربی، این امر محقق شده است. در شکل 16 هندسه لوله تغییرشکل یافته از آزمون T2، حاصل از روش تجربی (نیمه راست) و عددی (نیمه چپ) مقایسه شده است.



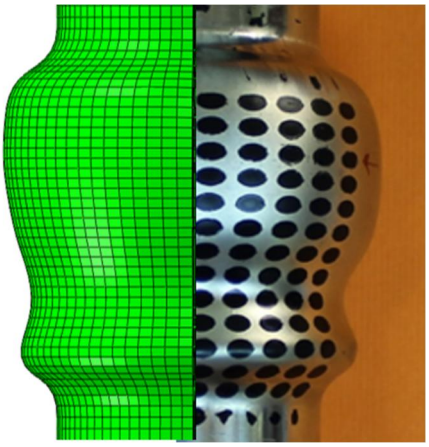
(الف) (ب)

شکل 14 تغییرشکل لوله در شرایط بدون روانکار؛ الف) آزمون T1 ، ب) آزمون T2



شکل 15 توزیع کرنش پلاستیک مؤثر از شبیه‌سازی آزمون T2 در جابه‌جایی مختلف سنبه (برش 270 درجه از مقطع)

ضمن مقایسه هندسه لوله تغییرشکل یافته؛ توزیع مؤلفه‌های کرنش قطعه در جهت محیطی، طولی و ضخامتی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، با یکدیگر مقایسه شد. اندازه‌گیری کرنش در نقاط نزدیک به درز لوله انجام شد. در شکل 17 توزیع کرنش در جهت محیطی و طولی لوله بر روی



شکل 16 مقایسه هندسه لوله تغییرشکل یافته آزمون T2 (راست: تجربی، چپ: شبیه‌سازی)

مسیر طولی در شرایط بدون روانکاری با جابه‌جایی 50 mm سنبه قابل مشاهده است. مطابق شکل نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی با دقت قابل توجهی بر هم انطباق دارد.

همان‌طورکه قابل پیش‌بینی است به علت وجود اصطکاک بالا بین لاستیک و لوله، پیشروی قابل توجه در راستای طولی لوله رخ می‌دهد که این امر موجب نیروهای فشاری در طول و چین‌خوردگی در لوله خواهد شد. این پدیده خود را به صورت فراز و فرود در منحنی کرنش محیطی و طولی، و همچنین کرنش‌های قابل توجه با علامت منفی خصوصاً در راستای طولی لوله آشکار می‌شود.

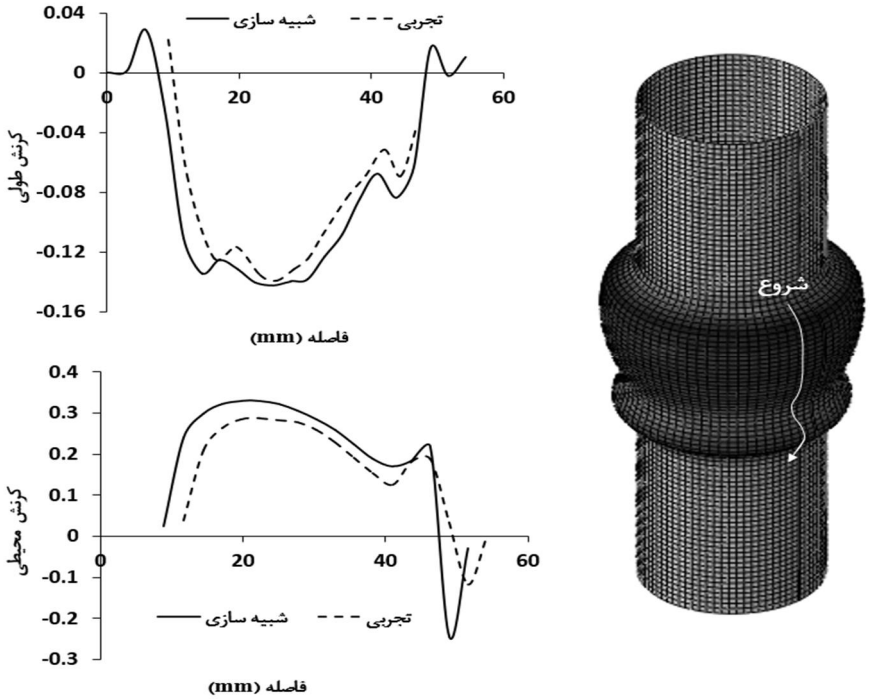
5-2- انبساط‌دهی لوله با روانکار

پس از مشاهده اثر اصطکاک بر روی فرایند، با هدف دست‌یابی به قطعه‌ای سالم و انبساط‌دهی متقارن لوله؛ با اعمال شرایط روانکاری مختلف طبق جدول 3 آزمایش‌ها ادامه داده شد. با در نظر گرفتن این شرایط افزایش قطر لوله به صورت متقارن و فرایند انبساط‌دهی بدون حضور چین‌خوردگی انجام گرفته است. قطر لوله در شبیه‌سازی آزمون T4 برابر 51/5 mm می‌باشد. در ادامه با اعمال شرایط روانکاری کامل (با فیلم جامد نایلون بین لوله و پلی اورتان، و روانکاری با لایه مرزی روغن کشش بین لوله و قالب) منطبق بر آزمون T6 با هدف رسیدن به افزایش قطر بیشتر، شبیه‌سازی انجام گرفت. با استفاده از شرایط روانکاری در دو طرف لوله؛ باوجود آنکه توزیع کرنش پلاستیک در لوله یکنواخت‌تر شده است، اما افزایش قطر بحرانی نسبت به حالت قبل در لوله ملاحظه نشد.

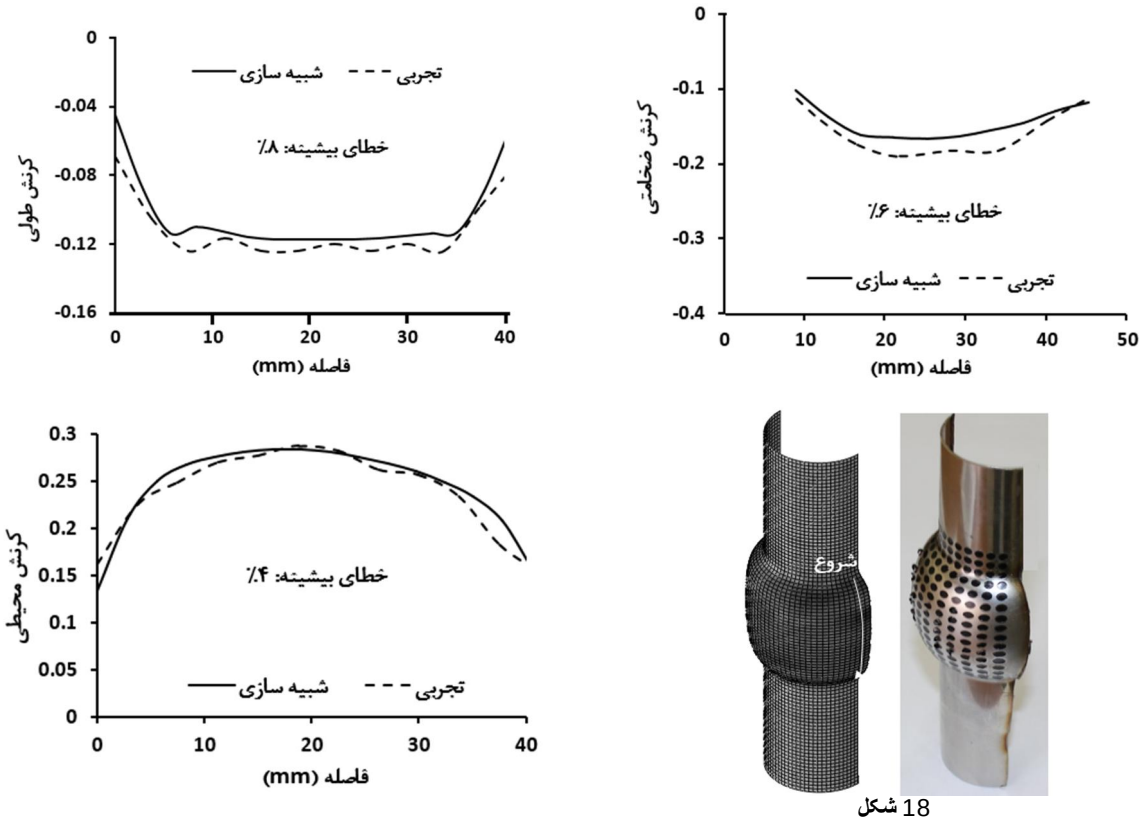
در شکل 18 مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مربوط به آزمون T6 نشان داده شده است. میزان خطای تحلیل عددی در مقایسه با تحلیل تجربی برای کرنش طولی 8%، کرنش محیطی 4% و کرنش ضخامتی 6% می‌باشد. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (13) استفاده شد. در این رابطه φ_{FEM} خروجی المان‌محدود و φ_{Exp} خروجی تحلیل تجربی است.

$$\text{خطا}\% = \left|\frac{\varphi_{\mathrm{FEM}} - \varphi_{\mathrm{Exp}}}{\varphi_{\mathrm{Exp}}}\right| \times 100 \qquad (13)$$

در شکل 19 چگونگی تغییرشکل ایجاد شده در لوله فولادی درزدار قابل مشاهده است. تغییرشکل لوله‌ها نشان داد که کنترل اصطکاک اصلی‌ترین عامل در حذف چروکیدگی و انبساط‌دهی نامتقارن ایجاد شده در مراحل قبل است. با این شرایط اعمالی، قطر لوله برای جابه‌جایی 30 و 50 میلی‌متری



شکل 17 مقایسه توزیع کرنش محیطی و طولی آزمون T2 حاصل از شبیه‌سازی و آزمون تجربی



شکل 18

شکل 18 مقایسه توزیع کرنش بدست آمده در مسیر طولی نمونه آزمون T6، از شبیه‌سازی و آزمون تجربی

سنبه به ترتیب 48 mm و 56 mm می‌باشد.

شکل 20 تصویر لوله تغییرشکل یافته برای آزمون T6 در آزمون تجربی و شبیه‌سازی را در کنار یکدیگر نمایش می‌دهد؛ که نتایج دقت مطلوب پیش بینی شکل محصول را در مدل المان‌محدود نشان می‌دهد. به منظور رسیدن به قطر پارگی لوله و با اعمال روانکاری در دو طرف آن، میزان جابه‌جایی سنبه را افزایش داده و شبیه‌سازی‌ها تکرار شد. طبق نتایج شبیه‌سازی با اعمال جابه‌جایی 55 mm به سنبه، پارامتر شکل‌پذیری (نسبت کرنش اصلی در حال حاضر، به کرنش اصلی بر روی منحنی حد شکل‌دهی) به میزان حداکثر یک رسیده و لوله در آستانه ترکیدگی قرار می‌گیرد. در نتیجه با اعمال جابه‌جایی بیشتر از این مقدار پارگی در لوله رخ خواهد داد. لازم به

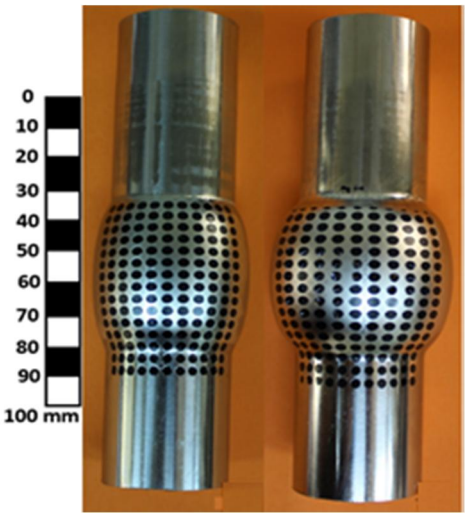
ذکر است که قطر نهایی لوله در لحظه ترکیدگی برابر 57/5 mm می‌باشد.

در شکل 21 لوله‌ی منبسط شده با روش RPF در لحظه ترکیدگی مشخص شده است. مقایسه هندسه تغییرشکل یافته محصول با نتایج شبیه‌سازی، حاکی از دقت مطلوب مدل‌سازی شکست در نرم‌افزار است.

در شکل 22 تاریخچه کرنش یک نقطه از لوله در وسط ناحیه بالج و در مجاورت درز جوش بر روی صفحه کرنش برای آزمون‌های T2، T4 و T7 نمایش داده شده است. مطابق شکل در صورت استفاده از روانکاری کامل (آزمون T7) یا به‌طور کلی بهبود شرایط روانکاری، پیشروی ناخواسته لوله در جهت محوری کاهش و مسیر بارگذاری به مرکز منحنی FLD نزدیک می‌شود.

در این شرایط عامل شکست، نازک شدن ضخامتی و گلویی موضعی است که در شکل 22 با برخورد مسیر کرنش حاصل از این آزمون با منحنی FLD مشخص شده است. مشاهده می‌شود که در شرایط خشک یا بدون روانکار (آزمون T2)، با افزایش پیشروی طولی لوله در اثر اصطکاک و انحراف مسیر کرنش به سمت چپ منحنی FLD، عامل اصلی شکست در فرایند؛ چروکیدگی لوله است.

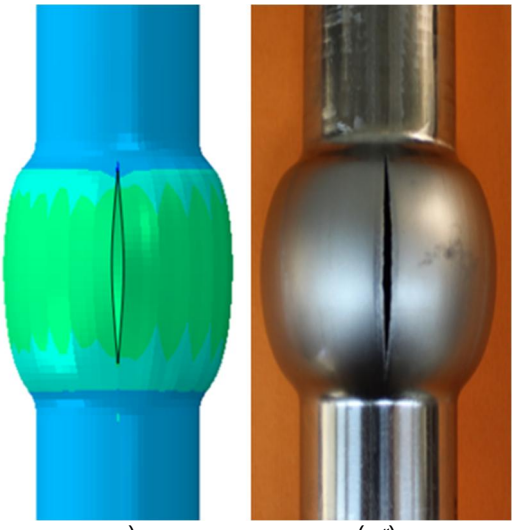
در شکل 23 اثر شرایط روانکاری مختلف حاصل از آزمون‌های T2، T4 و T6 بر روی منحنی نیروی فرایند، بر حسب جابه‌جایی سنبه نمایش داده شده است. پس از جابه‌جایی 15 mm با کامل شدن تماس بین بالشتک و لوله روند صعودی نیرو شدت می‌گیرد که در آزمون T2 به علت وجود چین‌خوردگی در



(الف) (ب)

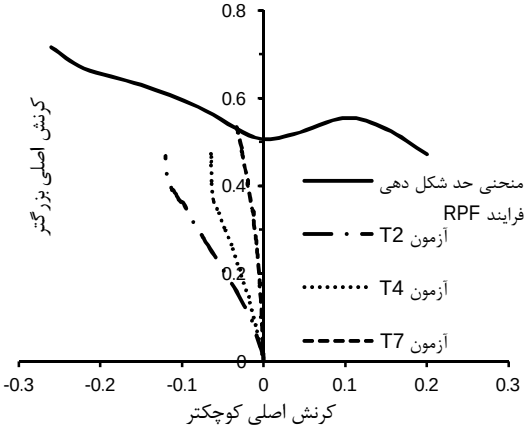
شکل 19 تغییرشکل لوله در شرایط روانکاری کامل الف) آزمون T5، ب) آزمون T6

شکل 20 مقایسه هندسه لوله تغییر شکل یافته آزمون T6 (راست: تجربی، چپ: شبیه‌سازی)



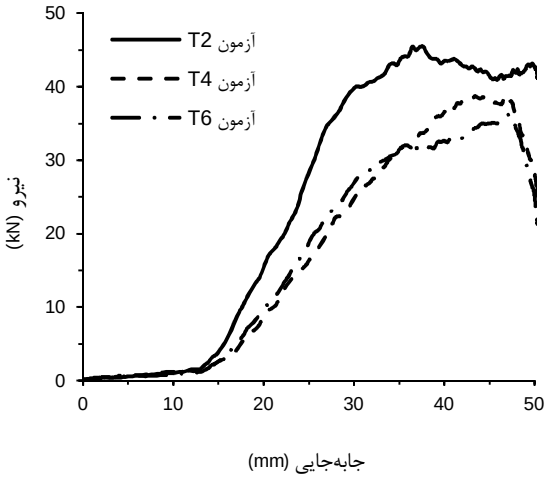
(ب) (الف)

شکل 21 مقایسه ترکیدگی لوله با روش RPF در آزمون T7 الف) آزمون تجربی، ب) شبیه‌سازی



شکل 22 مسیر کرنش نقطه مجاور درزجوش در شبیه‌سازی آزمون T2، T4 و T7

لوله، منحنی نیرو دارای فراز و فرود بیشتر خواهد بود. مقدار نیروی بیشینه فرایند در آزمون‌های T2، T4 و T6 به ترتیب برابر 46 kN، 39 kN و 36 kN می‌باشد. بر این اساس با استفاده از روانکاری یک طرفه از داخل لوله به وسیله



شکل 23 تغییرات نیروی فرایند RPF در آزمون T2، T4 و T6

لایه‌های نایلون، 15 درصد کاهش نیرو و با استفاده از روانکاری کامل (داخل لوله لایه‌های نایلون و خارج لوله روغن کشش)، 22 درصد کاهش نیرو در مقایسه با حالت بدون روانکار مشاهده می‌شود.

برای بررسی اثر نوع روانکار بر بازدهی فرایند شکل‌دهی با روش RPF، منحنی کل کار مصرفی و کار صرف شده برای غلبه بر اصطکاک برای آزمون‌های T2، T4 و T6 در شکل 24 ترسیم شد. برای محاسبه راندمان فرایند از رابطه (14) استفاده شده است. در این رابطه W_E کار کل و W_F کار اصطکاکی فرایند می‌باشد.

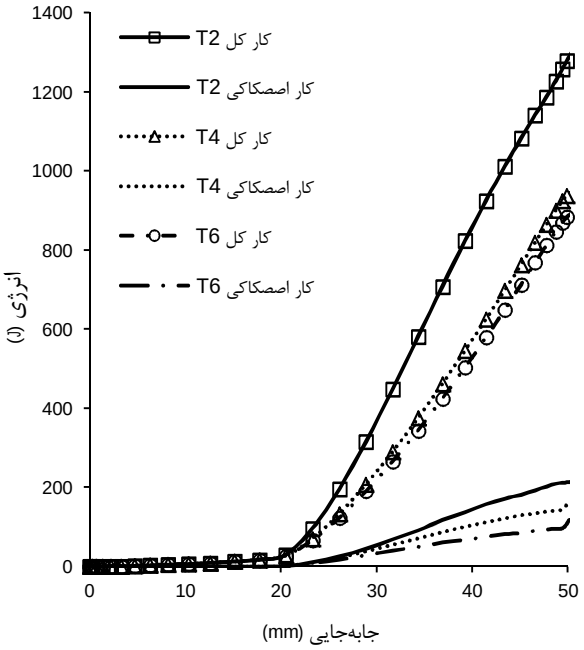
$$\eta = \left(\frac{W_E - W_F}{W_E}\right) \times 100 \qquad (14)$$

نتایج نشان داد با استفاده از روانکاری کامل (داخل لوله لایه‌های نایلون و خارج لوله روغن کشش)، کل کار صرف شده برای شکل‌دهی به میزان 30 درصد کاهش و راندمان فرایند نیز به میزان 4 درصد، در مقایسه با حالت بدون روانکار افزایش می‌یابد؛ همچنین تأثیر روانکاری با روغن کشش در دیواره خارجی لوله (بین لوله و قالب) نسبت به تأثیر روانکاری داخلی (بین لوله و لاستیک) بر روی راندمان فرایند و کار مصرفی ناچیز است.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انبساط‌دهی لوله فولادی درزدار زنگ‌نزن 304 با استفاده از بالشتک کشسان از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و اثر اصطکاک در این فرایند بررسی شد. آزمون فشار لاستیک براساس استاندارد ASTM D575-91 انجام و منحنی تنش-کرنش و ثوابت معادله ساختاری پلی‌اورتان تعیین شد. در تحلیل الاستیک-پلاستیک لوله در فرایند RPF از معیار شکست نرم پیش‌رونده FLD و الگوی خطی رشد شکست بر طبق تابع جابه‌جایی پلاستیک استفاده شد. از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- مقایسه حالت کرنش نقاط سالم از محصولات شکل داده شده بر روی صفحه کرنش با منحنی FLD ورق فولادی زنگ‌نزن (مرجع [15]) نشان داد که حد شکل‌دهی لوله در فرایند RPF به مقدار چشم‌گیری افزایش یافته است و لذا استفاده از منحنی حد شکل‌دهی ورق (عموماً بدست آمده در شرایط تنش صفحه‌ای) در انبساط‌دهی لوله با بالشتک کشسان (تحت فشار نرمال قابل توجه بر روی لوله) معتبر نمی‌باشد.
- در شبیه‌سازی عددی، با بکارگیری معیار FLD اصلاح شده بر اساس نتایج تجربی، همچنین به‌ازای جابه‌جایی پلاستیک مؤثر 0/05 برای معیار رشد واماندگی و ضریب نقص مکانیکی 0/9 برای ناحیه درز لوله دقیق‌ترین نتایج در خصوص قطر بحرانی لحظه ترکیدگی لوله و شکل نهایی محصول به‌دست آمد. مقایسه پروفیل هندسه لوله در ناحیه بالج و نحوه ترکیدگی و رشد آن در دو حالت عددی و تجربی نشان از دقت مطلوب مدل عددی در شبیه‌سازی روند شکل‌دهی و پیش‌بینی عمق بحرانی ترکیدگی دارد.
- به منظور بررسی دقت تحلیل، توزیع کرنش طولی، محیطی و ضخامتی لوله پس از شکل‌دهی در شرایط مختلف اصطکاکی به دو روش عددی و تجربی به دست آمد و مورد مقایسه قرار گرفت؛ که نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است.
- در انبساط‌دهی لوله با روش RPF در شرایط کاملاً خشک، با توجه به اصطکاک بالا بین بالشتک و لوله و درنتیجه جابه‌جایی ناخواسته لوله در راستای حرکت بالشتک، با ایجاد نیروی فشاری در جهت طولی، ایجاد چین‌خوردگی کنترل نشده در محصول اجتناب ناپذیر است. این پدیده خود را به صورت فراز و فرود در منحنی کرنش محیطی و طولی و همچنین کرنش‌های قابل توجه با علامت منفی آشکار می‌شود. همچنین در صورت پیشروی یک طرفه‌ی سنبه، روند چین‌خوردگی نسبت به صفحه‌ی وسط لوله کاملاً نامتقارن خواهد بود.
- نتایج نشان داد سیستم روانکاری بین سطح داخلی لوله و بالشتک اثر چشم‌گیری در کنترل چروکیدگی لوله و عدم تقارن پروفیل بالج دارد. در نتیجه آزمون‌های تجربی متعدد با تغییر شرایط روانکاری مشخص شد که با استفاده از روغن کشش و لایه‌های نایلون در سطح داخلی لوله و لاستیک، و استفاده از روغن کشش بین سطح خارجی لوله و قالب می‌توان به بیشترین عمق بالج در فرایند RPF لوله دست‌یافت. در این تحقیق به‌ازای شرایط بهینه مذکور، لوله از قطر اولیه 38 mm به قطر بحرانی 57/5 mm منبسط می‌شود.
- در صورت استفاده از شرایط روانکاری بهینه، پیشروی ناخواسته لوله در جهت محوری کاهش و مسیر بارگذاری به مرکز منحنی FLD نزدیک می‌شود. در این شرایط عامل شکست، گلویی موضعی و نازک شدن ضخامتی است که با برخورد مسیر کرنش با دماغه منحنی FLD مشخص خواهد شد. این درحالی است که در شرایط بدون روانکاری، با افزایش پیشروی طولی لوله در اثر اصطکاک و انحراف مسیر کرنش به سمت چپ منحنی FLD، عامل اصلی معیوب‌شدن محصول، چروکیدگی لوله می‌باشد.
- مقدار نیروی بیشینه فرایند در آزمون‌های بدون روانکار، روانکاری یک‌طرفه از داخل و روانکاری دوطرفه به ترتیب برابر 46 kN، 39 kN و 36 kN می‌باشد. بر این اساس با استفاده از روانکاری یک طرفه از داخل لوله، 15 درصد کاهش نیرو و با استفاده از روانکاری کامل، 22 درصد کاهش نیرو در مقایسه با حالت بدون روانکار مشاهده می‌شود. همچنین با استفاده از روانکاری کامل، ضمن کاهش 30 درصدی در کار صرف شده، راندمان فرایند به میزان 4 درصد، در مقایسه با حالت بدون روانکار افزایش می‌یابد.



شکل 24 تغییرات انرژی فرایند RPF نسبت به زمان در آزمون T2، T4 و T6

7- مراجع

[1] A. H. Committee, *Metals Handbook: Forming and forging*: American Society for Metals, 1978.

[2] M. H. Dirikolu, E. Akdemir, Computer aided modelling of flexible forming process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 148, No. 3, pp. 376-381, 5/30/, 2004.

[3] M. Ramezani, Z. M. Ripin, R. Ahmad, Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 10, pp. 4925-4934, 6/1/, 2009.

[4] K. M. Bisadi H., Numerical and experimental analysis of the effect of die and workpiece geometry in Bulg-Forming process of T-shape tube, *International Conference on Manufacturing,* Babol University of Technology, 2010. (In Persian)

[5] K. M. Bisadi H., Numerical and experimental investigation of friction in Bulg-Forming process of T-shape tubes, *International Conference on Manufacturing,* Babol University of Technology, 2010. (In Persian)

[6] S. M. Hossieni M., Khandaei M., Using Rubber Pad Forming of local contraction in order to assemble tubes in automotive structures, *Islamic Azad University of Najafabad,* Vol. 3, 2011. (In Persian)

[7] A. C. Girard, Y. J. Grenier, B. J. Mac Donald, Numerical simulation of axisymmetric tube bulging using a urethane rod, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 172, No. 3, pp. 346-355, 3/10/, 2006.

[8] G. S. H. Ghaforian Nosrati H., Computer aided modeling of free tube bulging process using elastic pad; friction and formability, in *National Conference on Mechanical Enginering,* Shiraz, 2014. (In Persian)

[9] M. Ramezani, Z. M. Ripin, *Rubber-pad Forming Processes: Technology and Applications*: Woodhead Publishing, 2012.

[10] *Abaqus Reference Manual,* Accessed.

[11] Y.-S. Yu, Y.-P. Zhao, Deformation of PDMS membrane and microcantilever by a water droplet: Comparison between Mooney–Rivlin and linear elastic constitutive models, *Journal of Colloid and Interface Science,* Vol. 332, No. 2, pp. 467-476, 4/15/, 2009.

[12] m. g. Mahdi falahati naghibi, mohammad bakhshi jooybari, abdolhamid gorji valokola, Experimental and numerical study of formability in stainless steel 304 tube by hydroforming process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 13, pp. 224-232, 2015. (In persian)

[13] K. Lange, K. Pöhlandt, *Handbook of metal forming*: McGraw-Hill, 1985.

[14] G. M. Ghaforian Nosrati H., *Experimental and Numerical Study of Metallic Tubes Bulging Using Elastic Pad in Comparison with Tubes Hydro-Bulging,* M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, 2014. (In Persian)

[15] R. Makkouk, N. Bourgeois, J. Serri, B. Bolle, M. Martiny, M. Teaca, G. Ferron, Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet, *European Journal of Mechanics - A/Solids,* Vol. 27, No. 2, pp. 181-194, 3/1/, 2008.