مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 295-306

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله و تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند بر کیفیت محصول نهایی

حامد خانی‌پور[1]، علی باستی[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 41996-13769، basti@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 بهمن 1395

پذیرش: 11 خرداد 1396

ارائه در سایت: 06 مرداد 1396

کلید واژگان:

لوله

شکل‌دهی تدریجی لوله

مدل تحلیلی

مدل عددی

چکیده

تولید سازه‌هایی با وزن کم و استحکام بالا در صنایع رو به گسترش می‌باشد. از این رو استفاده از پروفیل‌ها و لوله‌های خم‌کاری شده در سازه‌ها رو به افزایش است. در این مقاله روش شکل‌دهی تدریجی لوله، برای خم‌کاری لوله بررسی شده است. در این روش استفاده از ترکیب شکل‌دهی چرخشی و خم‌کاری لوله بطور هم‌زمان، باعث بهبود فرایند خم‌کاری برای فلزات با استحکام بالا می‌شود. در ابتدا مدلی تحلیلی برای فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله ارائه شده است. از این مدل برای آشنایی با فیزیک فرایند و برای تعیین میزان گشتاور خم‌کاری مورد نیاز استفاده شده است. در ادامه مدل‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله برای پیش‌بینی عیوب ناشی از خم‌کاری نیز انجام گرفته است. از مدل‌سازی عددی نیز برای بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، نظیر سرعت تغذیه‌ی مرحله دوم، سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، سرعت تغذیه محوری لوله در کل فرایند و اثر زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی، استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی آن است که می‌توان از مدل عددی عیب‌های وابسته به سرعت فرایند را مورد بررسی قرار داد و پیش از تولید محصول، پارامترهای مناسب را برای تولید محصول نهایی با کیفیت بالاتر انتخاب نمود.

Investigation of the incremental tube forming process and the influence of the vital process parameters on the quality of final product

Hamed Khanipoor, Ali Basti*

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rash, Iran
* P.O.B. 41996-13769, Rasht, Iran, basti@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 January 2017
Accepted 06 June 2017
Available Online 28 July 2017

Keywords:
Bending tube
Incremental tube forming
Analytical model
Numerical model

ABSTRACT

Manufacturing structures with light weight and high strength are growing in the industry. Therefore, use of bent profiles and tubes is increasing in structures. In this paper, the method of the incremental tube forming for bending tube is investigated. In this method using a combination of spinning and bending tube simultaneously improves the bending process for high-strength metals. At first, the analytical model is provided for incremental tube forming process. Then this model is used for understanding the process and determining the amount of the required bending moment. In addition, numerical modeling of the incremental tube forming process is performed for forecasting failures which are caused by bending. The numerical modeling has been used to evaluate the effective parameters on the incremental tube forming process such as feeding the second step, the rotational speed of spinning tool, feeding tube axis in the whole process and the effect of the spinning rolls attack angle. The results show the numerical model can be used to examine the related defects of the process speed and to select the appropriate parameters for producing the final product with higher quality before production.

1- مقدمه

نوآوری در تکنولوژی ساخت سازه‌های سبک وزن اهمیت بیشتری نسبت به گذشته پیدا کرده است. دلایل اقتصادی مانند انرژی و هزینه‌ی مواد خام اهمیت بسزایی برای سازه‌های سبک که هدف اصلی آن‌ها ایمنی و وزن کمتر می‌باشد، پدید آورده است. همچنین در ماشین آلات صنعتی استفاده از این سازه‌ها با استحکام بالا، وزن کم و اتصالات ایمن، ضرورت پیدا خواهد کرد.

هنگامی که هدف تولید سازه‌های سبک باشد، اولین انتخاب استفاده از موادی نظیر آلومینیوم و منیزیم است که استحکام نسبتاً بالایی دارند، اما استفاده از این مواد نیاز به سرمایه بالایی خواهد داشت. استفاده از فولادهایی با استحکام بالا در مقایسه با فلزات معمولی می‌تواند باعث تولید سازه‌های سبک بدون نگرانی در مورد استحکام آن‌ها شود و همچنین تهیه مواد خام آن‌ها قیمت مناسب‌تری نسبت به آلومینیوم خواهد داشت. اصلی‌ترین روش برای ساخت سازه‌های سبک استفاده از پروفیل‌ها و لوله‌ها در ساخت این نوع سازه‌ها می‌باشد که توانایی تحمل نیروی‌های وارد بر سازه را داشته باشند. در این نوع سازه با توجه به اینکه از مواد کمتری استفاده می‌شود، تحمل نیروی کمتری را نیز دارد، بنابراین می‌توان برای افزایش استحکام این سازه‌ها از

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Khanipoor, A. Basti, Investigation of the incremental tube forming process and the influence of the vital process parameters on the quality of final product, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 295-306, 2017 (in Persian)

موادی با استحکام بالا استفاده نمود. با وجود مزایای فولادهای با استحکام بالا باید توجه داشت که این مواد دارای تکنولوژی پیچیده تولید و شکل‌پذیری سخت می‌باشند. مشکل اصلی استفاده از مواد با استحکام بالا شیوه خاص شکل‌دهی آن‌ها برای تولید صنعتی است. خم‌کاری لوله‌هایی که با مواد با استحکام بالا ساخته شده‌اند، نیازمند گشتاور خم‌کاری بالا در نتیجه نیازمند تجهیزات با انرژی شکل‌دهی بالا است که باعث برگشت‌فنری بالا هنگام باربرداری می‌شود. برای کاهش گشتاور خم‌کاری از یک روش ترکیبی خم‌کاری می‌توان استفاده کرد. سازه‌هایی که با لوله‌ی خم‌کاری شده ساخته می‌شوند، اغلب برای دستیابی به طراحی نسبت وزن به استحکام پایین به طور وسیعی کاربرد دارند. سازه‌های سبک به دلیل کارایی بالاتر، کلید موفقیت در بخش‌های مختلف صنعتی هستند؛ به‌عنوان مثال در بخش‌هایی از اتومبیل‌ها و بخش‌هایی که نیاز به فلزات با استحکام است، مورد استفاده قرار می‌گیرند[1]. خم‌کاری فلزات با استحکام بالا به علت برگشت‌فنری بالا به‌عنوان یک چالش برای تکنولوژی محسوب می‌شود[2]. برای کاهش برگشت‌فنری، تعدادی روش خم‌کاری به روش شکل‌دهی گرم ارائه شده است[3]. برای اولین بار توزاوا [4] روش خم‌کاری- نورد را ارائه کرد که در آن کاهش قطر لوله در مرحله اول فرایند توسط نورد باعث کاهش گشتاور خمشی و برگشت‌فنری می‌شود. همچنین فرایند نورد برای کاهش قطر نیازمند نیروی بالایی خواهد بود و فرایند نیازمند توسعه و اصلاح می‌باشد. تکایا [5] روشی برای خم‌کاری پروفیل‌ها بر پایه نورد ارائه کرد که باعث کاهش نیروی خم‌کاری و برگشت‌فنری می‌شود و همچنین موفق به طراحی دستگاهی برای خم‌کاری پروفیل‌ها بر این اساس و تولید سازه‌های سبک وزن شد.

پس از آن، تکایا [6] موفق به نوآوری و ابداع در زمینه طراحی ماشین‌هایی برای خم‌کاری پروفیل و لوله و ارائه مدل اولیه ماشین‌ها بر پایه شکل‌دهی چرخشی و خم‌کاری به طور همزمان شد. تکایا [7] در بررسی دیگری، به بررسی زبری سطح[1] لوله بر اثر شکل‌دهی چرخشی در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله پرداخت و تأثیر پارامترهای سطحی در محصول نهایی را مورد بررسی قرار داد. همچنین تأثیر ابزار شکل‌دهی چرخشی را بر زبری‌سطح محصول نهایی بررسی نمود. تکایا [8] در مطالعه‌ای دیگر، مدلی تحلیلی نیز برای فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله ارائه نمود و بیان کرد که شکل‌دهی تدریجی لوله برتری مهمی از نظر کاهش گشتاور خمشی دارد و همچنین کاهش برگشت‌فنری را در مقایسه با دیگر فرایندهای خم‌کاری لوله نشان می‌دهد. افزایش سرعت فرایند باعث کاهش گشتاور خمشی می‌شود. مدل تحلیلی ارائه شده برای فرایند مناسب بوده و با موفقیت تأثیر پارامترهای فرایند را بر روی کاهش گشتاور خمشی برای فرایند با سرعت پایین نشان می‌دهد. همچنین در این بررسی تأثیر سرعت فرایند در مدل، یک عامل مؤثر برای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله معرفی شد و وابستگی خطی گشتاور خمشی با این عامل در مقیاس لگاریتمی دو محوری به دست آمد. هرچند در مقالات گذشته بررسی زبری سطح، مقایسه گشتاور خمشی و برگشت‌فنری فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با دیگر فرایندهای خم‌کاری وجود دارد، اما در مقابل در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله بر کیفیت محصول نهایی پرداخته می‌شود.

2- آشنایی با فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله

فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با ترکیب دو روش شکل‌دهی چرخشی[2] و خم‌کاری لوله به وجود آمده است. اصل برهم نهی با توجه به تنش‌های فشاری ایجاد شده توسط ابزار چرخشی در هنگام فرایند خم‌کاری، باعث کاهش برگشت‌فنری و کاهش نیروی خم‌کاری می‌شود. این فرایند برای خم‌کاری های دو بعدی و سه بعدی مناسب و بدون قالب خواهد بود.

این روش توانایی خم‌کاری لوله در هر مقطع دلخواه و همچنین تغییر سطح مقطع لوله (کاهش قطر) را دارد. با توجه به شکل 1، تغییر قطر لوله با یک ابزار چرخشی که باعث ایجاد تنش های فشاری در ناحیه‌ی خم‌کاری لوله می‌شود به دست می‌آید.

در این مرحله از شکل‌دهی، لوله تغییر شکل پلاستیک داده و قطر لوله کاهش می‌یابد. همچنین ابزار خم‌کاری در این فرایند، توانایی خم‌کاری در مقاطع مختلف را فراهم می‌کند. خم‌کاری سه بعدی نیز با چرخش لوله حول محور طولی لوله امکان‌پذیر است.

3- مدل‌سازی تحلیلی

با توجه به اینکه فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله روشی جدید در خم‌کاری لوله محسوب می‌شود، بنابراین لازم است در ابتدا به مدل‌سازی تحلیلی این فرایند پرداخته شود. باید توجه داشت که فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله یک فرایند دو مرحله‌ای بوده که ابتدا لوله با ابزار چرخشی، کاهش قطر مورد نظر را پیدا کرده و در همین حالت ابزار خم‌کاری نیز با حرکت به اندازه‌ی دلخواه که متناسب با شعاع خم‌کاری خواهد بود، نیروی مورد نیاز خم‌کاری بر روی لوله را به وجود می‌آورد. برای مدل‌سازی تحلیلی این فرایند، ساده‌سازی و فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود. کاهش قطر لوله با سه غلتک در فرایند شکل‌دهی چرخشی انجام می‌شود که برای ساده سازی به صورت یک قالب یک تکه فرض می‌شود. در این قسمت از تئوری اویلر-برنولی استفاده شده است و لوله به عنوان تیر تحت خمش و جداره نازک فرض می‌شود. باتوجه به شکل 2، لوله به دو ناحیه‌ی 1 و 2 تقسیم می‌شود. همچنین تنش در ناحیه‌ی 1، صفحه‌ای و از تنش در راستای شعاعی و تنش‌های برشی صرف‌نظر می‌شود؛ همچنین کرنش‌ها و تنش‌ها نیز اصلی هستند. کرنش‌های اصلی در راستای محیطی و طولی در ناحیه‌ی 1، با توجه به تغییر شکل لوله در بررسی‌های تجربی و عددی انجام شده، به صورت معادلات (1) و (2) بدست آمده و کرنش شعاعی نیز با توجه به ثبات حجم در تغییر شکل‌های پلاستیک

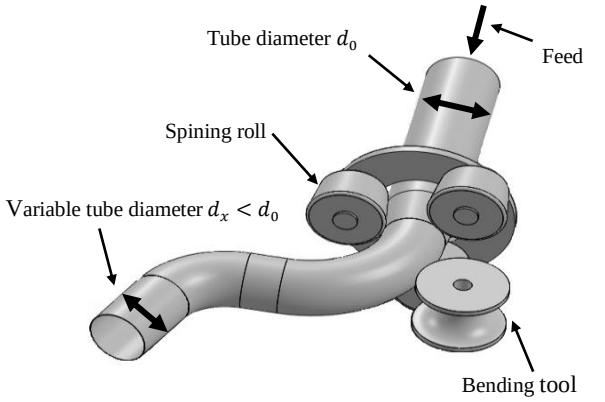

Fig. 1 Process principle of the incremental tube forming process

شکل 1 فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله

[1] Surface roughness

[2] Spinning

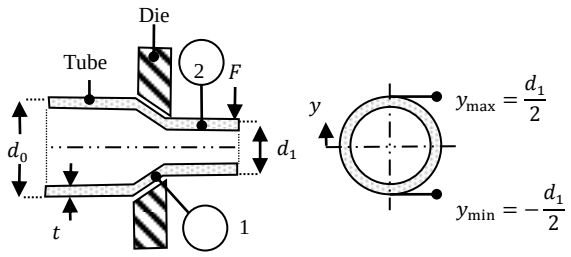

Fig. 2 Parameters of bent tube

شکل 2 پارامترهای خم‌کاری لوله

به صورت معادله (3) محاسبه می‌شود [8].

$$\varepsilon_\theta = \ln(\frac{d_1}{d_0}) \tag{1}$$

$$\varepsilon_z = \ln(1+\frac{y}{R}) \tag{2}$$

$$\varepsilon_r = -\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - \ln(1+\frac{y}{R}) \tag{3}$$

در معادلات (1) تا (3)، d_0 قطر لوله اولیه قبل از انجام فرایند، d_1 قطر لوله بعد از کاهش قطر، R شعاع خم‌کاری و y فاصله از تار خنثی در صفحه‌ی خم‌کاری است که در شکل 2 نشان داده شده است.

در ناحیه‌ی 1 فرض می‌شود نسبت کرنش برای شکل‌دهی چرخشی و همچنین خم‌کاری، یک مسیر خطی را تا رسیدن به کرنش نهایی طی می‌کند. بنابراین نسبت نرخ کرنش η مانند نرخ کرنش نهایی ثابت خواهد بود(معادله 4).

$$\eta(y) = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{\varepsilon_{z(y)}}{\varepsilon_\theta} \tag{4}$$

3-1- محاسبه تنش ها در تغییر شکل پلاستیک

یکی از روابط بسط داده شده برای تنش و کرنش پلاستیک توسط لوی-میسز[1] ارائه گردید. بر مبنای این تئوری، حالت تغییر شکل پلاستیک را می-توان به نواحی بسیار کوچک که به صورت خطی به یکدیگر ارتباط دارند، تبدیل نمود. بر مبنای این تئوری نمو کرنش پلاستیک مطابق معادله (5) در هر لحظه متناسب با تنش انحرافی[2] است.

$$\frac{d\varepsilon_z}{\acute{\sigma}_z} = \frac{d\varepsilon_\theta}{\sigma'_\theta} \tag{5}$$

فرض می‌شود $\alpha' = \sigma_\theta/\sigma_z$ و با استفاده از معادله‌ی (4) و با توجه به صفحه-ای بودن تنش‌ها می‌توان رابطه‌ی (6) را به دست آورد.

$$\eta(y) = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{\frac{2}{3}\,d\lambda\,\left[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_\theta+\sigma_r)\right]}{\frac{2}{3}\,d\lambda\,\left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_z+\sigma_r)\right]} = \frac{2\sigma_z-\sigma_\theta}{2\sigma_\theta-\sigma_z} = \frac{2-\alpha'}{2\alpha'-1} \tag{6}$$

با استفاده از معادله‌ی (6)، α' بر حسب η(y) به صورت رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود.

$$\alpha' = \frac{2+\eta(y)}{2\eta(y)+1} \tag{7}$$

اکنون با استفاده از معیار تسلیم ون‌میسز[3] و جاگذاری معادله‌ی (7) در آن، تنش‌های طولی و محیطی در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله به ترتیب به صورت روابط (8) و (9) محاسبه می‌شود[8].

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_f} = -\frac{2\eta(y)+1}{\sqrt{3}\sqrt{1+\eta(y)+\eta(y)^2}} \tag{8}$$

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_f} = \frac{2+\eta(y)}{\sqrt{3}\sqrt{1+\eta(y)+\eta(y)^2}} \tag{9}$$

لازم به ذکر است که این معادلات برحسب معادله تنش سیلان[4] که متناسب با جنس لوله به کار رفته در خم‌کاری است و نسبت نرخ کرنش که تابعی از فاصله تا تار خنثی در مقطعی از لوله که خم‌کاری بر روی آن در حال انجام است، می‌باشد.

برای لوله‌های مورد استفاده در این فرایند، معادله تنش سیلان به صورت رابطه‌ی (10) در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma_f = c(\varepsilon_0+\varepsilon)^n \tag{10}$$

در رابطه‌ی (10)، c ضریب استحکام ماده، ε_0 مقدار کارسرد انجام شده قبل از تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی تدریجی در تولید لوله و n نمای کار سختی در محدوده پلاستیک است. حال با استفاده از رابطه‌ی (10) و جاگذاری آن در روابط (8) و (9) به ترتیب معادلات تنش طولی و تنش محیطی برای فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله به صورت روابط (11) و (12) حاصل می‌شود.

$$\sigma_z = -c\frac{2\eta(y)+1}{\sqrt{3}\sqrt{1+\eta(y)+\eta(y)^2}}\,(\varepsilon_0+\varepsilon)^n \tag{11}$$

$$\sigma_\theta = c\frac{2+\eta(y)}{\sqrt{3}\sqrt{1+\eta(y)+\eta(y)^2}}\,(\varepsilon_0+\varepsilon)^n \tag{12}$$

3-2- محاسبه گشتاور خمشی در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله

برای به دست آوردن گشتاور خمشی مورد نیاز فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله می‌بایست از تنش طولی وارد بر لوله در انتهای ناحیه‌ی 1، انتگرال‌گیری حول مقطع لوله انجام شود. شکل 3، المانی از لوله را نشان می‌دهد که پارامترهای مورد نیاز در انتگرال‌گیری در آن مشخص شده است. پارامتر t ضخامت لوله می‌باشد.

گشتاور خمشی خم‌کاری با فرایند شکل‌دهی چرخشی با نماد $M_B^{B+\delta}$ نشان داده می‌شود و با جاگذاری پارامترهای شکل 4 به صورت رابطه‌ی (13) حاصل می‌شود.

$$M_B^{B+\delta} = \frac{t(d_1-t)^2}{4}\int_0^{2\pi}\sigma_z\,.\sin(\theta)\,.\,d\theta \tag{13}$$

در انتگرال معادله‌ی (13) باید توجه داشت که σ_z برحسب η می‌باشد که η نیز خود تابعی از y است. با توجه به اینکه محاسبه‌ی انتگرال این تابع دشوار خواهد بود، برای η یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده و انتگرال معادله‌ی (13) با جاگذاری این مقدار در آن محاسبه می‌شود[8]. معادله‌ی (14) جهت محاسبه گشتاور خمشی مورد نیاز برای خم‌کاری در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با شکل‌دهی چرخشی به کار می‌رود.

$$M_B^{B+\delta} \approx \frac{\sigma_f.t.(d_1-t)^2}{2.\sqrt{3}}.\left(\frac{1-2\overline{\eta}}{\sqrt{1-\overline{\eta}+\overline{\eta}^2}} - \frac{1+2\overline{\eta}}{\sqrt{1+\overline{\eta}+\overline{\eta}^2}}\right)$$

$$\overline{\eta} = \eta\left(y=\frac{d_0}{4}\right) \tag{14}$$

در ادامه به بررسی نسبت گشتاور خمشی خم‌کاری در حالتی که فرایند با شکل‌دهی چرخشی همراه است به گشتاور خمشی خم‌کاری خالص یعنی هنگامی که در خم‌کاری لوله از شکل‌دهی چرخشی استفاده نمی‌شود، پرداخته می‌شود.

با توجه به روابط (1) و (4)، اگر فرایند بدون شکل‌دهی چرخشی انجام شود با توجه به اینکه لوله کاهش قطر ندارد، بنابراین مقدار کرنش محیطی صفر خواهد بود و با قرارگیری این مقدار در مخرج معادله نسبت نرخ کرنش،

[1] Levy - Mises
[2] Strain Increment
[3] Von Mises
[4] Flow Stress

مقدار η به منفی بینهایت میل خواهد کرد. حال اگر فرایند با نهایت شکل‌دهی چرخشی انجام شود، در این شرایط قطر لوله بعد از کاهش قطر به صفر رسیده که باعث می‌شود کرنش محیطی به بینهایت میل کرده که این مقدار اگر در مخرج معادله نسبت نرخ کرنش قرار داده شود، نسبت نرخ کرنش صفر می‌شود.

با توجه به موارد بیان شده، گشتاور خمشی خم‌کاری لوله بدون شکل‌دهی چرخشی به صورت معادله‌ی (15) به دست می‌آید.

$$M_B^B \approx \frac{2.\sigma_f.t.(d_1-t)^2}{\sqrt{3}} \tag{15}$$

برای به دست آوردن نسبت خم‌کاری در این دو حالت، معادله‌ی (14) بر معادله‌ی (15) تقسیم می‌شود که حاصل معادله‌ی (16) خواهد بود[8].

$$\frac{M_B^{B+\delta}}{M_B^B} = \frac{1}{4}\cdot\left(\frac{1-2\bar{\eta}}{\sqrt{1-\bar{\eta}+\bar{\eta}^2}} - \frac{1+2\bar{\eta}}{\sqrt{1+\bar{\eta}+\bar{\eta}^2}}\right) \tag{16}$$

نسبت گشتاور خمشی خم‌کاری لوله با شکل‌دهی چرخشی به گشتاور خمشی خم‌کاری لوله بدون شکل‌دهی چرخشی با توجه به معادله‌ی (16) بین صفر و یک حاصل می‌شود.

4- استفاده از نمودار حدشکل‌دهی برای پیش‌بینی پارگی در لوله

نمودار حد شکل‌دهی ابزاری توانمند برای بررسی میزان شکل‌دهی یک فلز در فرایندهای شکل‌دهی است. برای بررسی آسیب و پارگی در فرایندهای مختلف شکل‌دهی که حالت تنش صفحه‌ای در آن‌ها برقرار است، می‌توان از این نمودار استفاده نمود. با توجه به اینکه وضعیت‌های مختلف بارگذاری مانند کرنش صفحه‌ای، تنش تک محوره و تنش دو محوره در این نمودار تعریف شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که این معیار قدرت بسیار زیادی در پیش‌بینی آسیب خواهد داشت. با انجام فرایندهای مختلف شکل‌دهی می‌توان کرنش‌های اصلی متناسب با آن را به دست آورد، در نتیجه با قراردادن آن در نمودار حد شکل‌دهی می‌توان پیش‌بینی لازم جهت امکان وقوع شکست را انجام داد. در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله نیز می‌توان از این معیار برای پیش‌بینی احتمال وقوع پارگی در سطح خارجی لوله استفاده شود. با توجه به اینکه برای آلیاژ مورد استفاده در این بررسی نمودار حدشکل‌دهی به صورت تجربی وجود ندارد، از روش‌های عددی برای به دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی این آلیاژ استفاده می‌شود.

4-1- رسم نمودارحد شکل‌دهی با استفاده از مدل (M-K)

ضخامت ورق و به شکل یک شیار عمود در جهت کرنش اصلی در نظر گرفته شده است[9].

فاکتور نقص f به صورت رابطه (17) تعریف می‌شود.

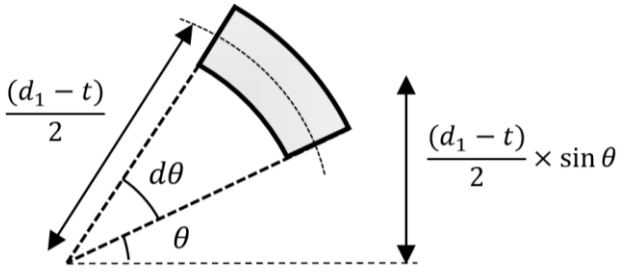

Fig. 3 Pipe element of integration

شکل 3 المانی از لوله برای انتگرال‌گیری

$$f = \frac{t_b}{t_a} \tag{17}$$

در رابطه‌ی (17) t_a و t_b به ترتیب ضخامت در مناطق یکنواخت و دارای نقص است. نسبت ضخامت در داخل و خارج نقص قبل از اعمال تنش نیز ضریب ناهمگنی نخستین f_0 است. درحین تغییر شکل ورق فاکتور نقص بر اساس رابطه (18) تغییر می‌کند[9].

$$f = f_0\, e^{\varepsilon_{3b}-\varepsilon_{3a}} \tag{18}$$

جنس لوله‌ی انتخاب شده فولاد آلیاژی E235 است که مشخصات مکانیکی آن در جدول1 آورده شده است. با توجه به شکل 4، نیروی F_1 یعنی نیرو در راستای طولی، باید در بیرون شیار و درون آن با هم برابر باشد، در نتیجه معادله تعادل نیرو در مناطق a و b به صورت رابطه‌ی (19) خواهد بود.

$$F_{1a} = F_{1b} \tag{19}$$

همچنین فرض شده کرنش‌های موازی با شیار (ε_2) در هر دو منطقه طبق رابطه (20) یکسان باشند.

$$d\varepsilon_{2a} = d\varepsilon_{2b} \tag{20}$$

پارامتر کمکی φ به‌عنوان نسبت تنش اصلی بزرگتر به تنش مؤثر به صورت رابطه‌ی (21) تعریف می‌شود.

$$\varphi = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \tag{21}$$

رابطه تراز نیرو را به صورت رابطه‌ی (22) می‌توان نوشت.

$$\varphi_a(\bar{\varepsilon}_a + d\bar{\varepsilon}_a)^n = f\varphi_b(\bar{\varepsilon}_b + d\bar{\varepsilon}_b)^n \tag{22}$$

پارامترهای α، φ و ρ برای معیار تسلیم درجه 2 هیل از روابط (23) الی (28) به دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{\left[\frac{(1+2R)(1+\rho)}{(1-\rho)}\right]-1}{\left[\frac{(1+2R)(1+\rho)}{(1-\rho)}\right]+1} \tag{23}$$

مقدار φ برای معیار تسلیم درجه2 هیل، مطابق رابطه‌ی (24) به دست خواهد آمد.

$$\varphi = \left\{\frac{(1+R)}{1+\alpha^2+R(1-\alpha)^2}\right\}^{0.5} \tag{24}$$

کرنش‌های ضخامتی با استفاده از قانون جریان در رابطه‌ی (25) به صورت روابط (26) و (27) می‌باشند.

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma_{ij}} \tag{25}$$

$$d\varepsilon_{1a} = \frac{\varphi_a d\bar{\varepsilon}_a(1+R(1-\alpha_a))}{(1+R)} \tag{26}$$

$$d\varepsilon_{2a} = \frac{\varphi_a d\bar{\varepsilon}_a(\alpha_a-R(1-\alpha_a))}{(1+R)} \tag{27}$$

با استفاده از روابط (26) و (27) و در نظر گرفتن α به عنوان نسبت تنش‌ها، نسبت کرنش‌ها برابر با رابطه‌ی (28) می‌باشد.

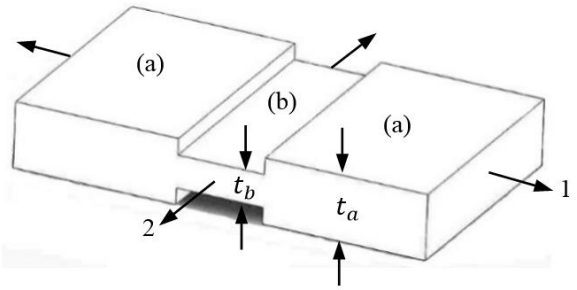

Fig. 4 Schematic of M-K model

شکل 4 شماتیکی از مدل M-K

جدول 1 خواص مکانیکی E235 [8]

Table 1 E235 Mechanical properties [8]

پارامتر	n	ε_0	c (MPa)	E (GPa)
مقدار	0.0191	7.7×10^{-5}	622.4	210

$$\rho=\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}=\frac{\alpha-R(1-\alpha)}{1+R(1-\alpha)} \tag{28}$$

با استفاده از روابط (20) و (27) جزء کرنش حدی $d\varepsilon_{2b}$ برای منطقه b برابر با رابطه‌ی (29) می‌باشد

$$d\varepsilon_{2a}=\frac{d\bar{\varepsilon}_b(\alpha_b-R(1-\alpha_b))}{(1+R)}\left\{\frac{(1+R)}{1+{\alpha_b}^2+R(1-\alpha_b)^2}\right\}^{0.5} \tag{29}$$

با استفاده از رابطه(29) کرنش مؤثر در منطقه b از رابطه (30) به دست می‌آید.

$$d\bar{\varepsilon}_b=\frac{d\varepsilon_{2a}(1+R)}{(\alpha_b-R(1-\alpha_b))}\left\{\frac{1+{\alpha_b}^2+R(1-\alpha_b)^2}{(1+R)}\right\}^{0.5} \tag{30}$$

با جای‌گذاری رابطه (30) در رابطه (22)، رابطه تراز نیرو، برای معیار تسلیم درجه 2 هیل به صورت رابطه (31) به دست می‌آید.

$$\varphi_a(\bar{\varepsilon}_a+d\bar{\varepsilon}_a)^n=f\varphi_b\left(\bar{\varepsilon}_b+\frac{d\varepsilon_{2a}(1+R)}{(\alpha_b-R(1-\alpha_b))}\left\{\frac{1+{\alpha_b}^2+R(1-\alpha_b)^2}{(1+R)}\right\}^{0.5}\right)^n \tag{31}$$

محاسبه ضریب f در هر مرحله، نیاز به کرنش‌های جزئی در راستای ضخامت دارد که با فرض غیر قابل تراکم بودن، از رابطه (32) قابل محاسبه است.

$$d\varepsilon_3=-d\varepsilon_1-d\varepsilon_2 \tag{32}$$

کرنش‌های ضخامتی نیز از روابط (33) و (34) قابل محاسبه است.

$$d\varepsilon_{3a}=-\varphi_a\frac{d\bar{\varepsilon}_a(1+\alpha_a)}{1+R} \tag{33}$$

$$d\varepsilon_{3b}=-\varphi_b\frac{d\bar{\varepsilon}_b(1+\alpha_b)}{1+R} \tag{34}$$

برای محاسبه کرنش های حدی ابتدا یک مسیر بارگذاری در منطقه سالم ورق (φ_a) در نظر گرفته می‌شود. با اعمال یک جزء کرنش برای نمونه ($d\bar{\varepsilon}_a=0.001$) در منطقه a و جای‌گذاری روابط در معادله تراز نیرو (22) و انجام محاسبات به کمک نرم‌افزار متلب و به روش عددی، $d\bar{\varepsilon}_b$ به دست می‌آید. سپس جزء کرنش در مسیر در نظر گرفته شده افزایش و مراحل یاد شده تکرار می‌شود تا آن جا که نسبت جزء کرنش ایجاد شده در منطقه گلویی به جزء کرنش اعمالی در منطقه سالم ورق ($d\bar{\varepsilon}_b/d\bar{\varepsilon}_a$) بسیار بزرگ و از یک عدد بحرانی مثلاً 10 عبور کند. این مرز بحرانی نشان‌دهنده آغاز پارگی است. برای تعیین معیار آسیب پارگی لایه‌ی خارجی لوله در فرایند شکل‌دهی تدریجی، از نمودار حد شکل‌دهی مطابق شکل 5 برای آلیاژ مورد استفاده در فرایند استفاده شده است. در این حالت کرنش‌های حدی ورق در مسیر در نظر گرفته شده، به دست می‌آیند. روند محاسبه کرنش‌های حدی در مسیرهای مختلف $\rho=-0.5$ تا $\rho=1$ تکرار می‌شود[9]. شکل 5 نشان‌دهنده نمودار حدشکل‌دهی رسم شده برای آلیاژ E235 می‌باشد.

5- مدل‌سازی عددی

مدل شبیه‌سازی شده فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله در شکل 6 نشان داده شده است. برای شبیه سازی از تحلیل اجزای محدود به روش صریح[1] در نرم‌افزار آباکس استفاده شده است. در ادامه به بررسی شرایط اعمال شده در شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

در مدل ارائه شده، لوله به صورت جسم انعطاف پذیر[2] در نظر گرفته شده است. غلتک‌های شکل‌دهی چرخشی، ابزار خم‌کاری و سنبه برای بهبود دقت و کارایی و همچنین کاهش زمان محاسبات برنامه به صورت اجسام صلب در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که برای لوله تنش‌ها به صورت صفحه‌ای در نظرگرفته شده است، المان پوسته‌ای دارای دو انحنای 4 گره‌ای S4R[3] انتخاب می‌شود. ابزارهای صلب نیز به صورت اجسام صلب گسسته[4] و با المان‌های 4 گره‌ای صلب R3D4[5] مدل شده است. ماده بکار رفته به صورت همسانگرد[6] و همگن[7] بوده و کار سختی آن همسانگرد فرض می‌شود. ماده الاستیک-پلاستیک لوله نیز از معیار تسلیم ون میسز پیروی می‌کند.

در فرایند شکل‌دهی تدریجی، لوله با یک تغذیه‌ی محوری به سمت ابزار شکل‌دهی چرخشی حرکت کرده و با غلتک‌های آن برخورد می‌کند و در ادامه پس از کاهش قطر لوله توسط ابزار چرخشی، لوله به کمک ابزار خم‌کاری، خم مورد نظر را به خود می‌گیرد. بنابراین فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، فرایندی شامل تماس دینامیکی پیچیده بین سطوح مختلف و تأثیر این تماس‌ها بر شکل‌دهی لوله می‌باشد. سطوحی که با لوله در تماس هستند به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند؛ سطوحی که با سطح خارجی لوله در تماس می‌باشند که شامل غلتک‌های چرخشی و ابزار خم‌کاری بوده و سطح داخلی لوله که با سنبه مقید شده است.

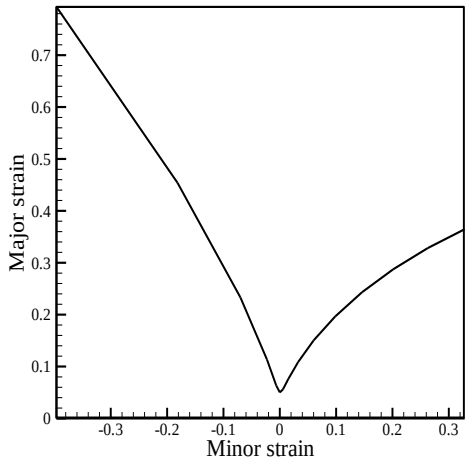

Fig. 5 Forming limit diagram for steels E235

شکل 5 نمودار حد شکل دهی برای فولاد آلیاژی E235

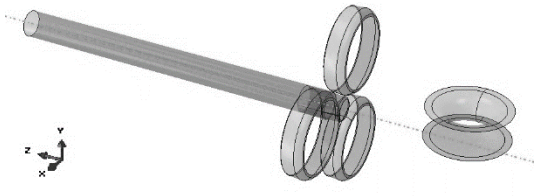

Fig. 6 Numerical model in Abaqus

شکل 6 نمایی از مدل‌سازی عددی در آباکس

[1] Explicit

[2] Deformable body

[3] 4-node general-purpose shell, reduction integration, hourglass control, finite membrane strain

[4] Discrete rigid body

[5] 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

[6] Isotropic

[7] Homogeneous

سطح تماس بین لوله و ابزار با استفاده از خصوصیت تماس سطح به سطح[1] تعریف می‌شود. همچنین از قیود سینماتیکی[2] برای توصیف قیدهای مکانیکی به همراه روش پنالتی[3] برای بهبود محاسبات و افزایش دقت استفاده شده است. رفتار تماسی سطوح در راستای عمودی به صورت تماس سخت[4] تعریف می‌شود. مفهوم این نوع تماس این است که سطوحی که در ابتدا از هم جدا هستند، در هنگامی که لقی بین آنها به صفر می‌رسد با یکدیگر تماس پیدا خواهند کرد و به محض برداشته شدن نیروی تماسی، از یکدیگر جدا می‌شوند و بدین ترتیب گره موجود در یک سطح نمی‌تواند در سطح دیگر فرو رود. به منظور شبیه‌سازی حرکت نسبی سطوح بر روی یکدیگر، از مدل اصطکاک کلمب[5] برای توصیف رفتار مماسی بین آن‌ها استفاده می‌شود.

مختصات نقطه مرجع[6] برای غلتک‌های ابزار چرخشی بر روی مرکز مختصات قرار دارد و حرکت دورانی با سرعت دادن به این نقطه حول محور طولی یا محور z به وجود می‌آید. مختصات نقطه مرجع برای ابزار خم‌کاری بر روی محور تقارن قطعه واقع شده است. با سرعت دادن به آن در راستای محور x به میزان دلخواه جابه‌جا خواهد شد. نقطه مرجع سنبه نیز بر روی محور تقارن خود قطعه قرار گرفته است که با توجه به اینکه در طول فرایند باید بدون حرکت در جای خود باقی بماند، قیود برای عدم تغییر مختصات آن اعمال شده است. به دلیل اینکه گذاشتن قیود برای لوله می‌تواند باعث تغییر در نتایج شبیه‌سازی شود و در فرایند اصلی نیز لوله به وسیله یک پیش‌برنده به طرف ابزار چرخشی هدایت می‌شود، برای مقطع انتهای لوله، سرعتی در راستای محور-z قرار داده شده است. تمام جابه‌جایی قطعات با این نوع قیود و بارگذاری امکان‌پذیر می‌باشد.

فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با توجه به اینکه برای خم‌کاری لوله از دو فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله و خم‌کاری به طور همزمان استفاده می‌کند، در شبیه‌سازی مراحل این فرایند به چند قسمت تقسیم شده است. لوله در ابتدای فرایند خارج از غلتک‌های ابزار چرخشی قرار دارد. هنگامی که فرایند شروع می‌شود لوله به سمت غلتک‌های چرخشی حرکت کرده و مرحله‌ی کاهش قطر اولیه انجام شده تا لوله کاهش قطر داده شده، مقابل ابزار خم‌کاری قرار گیرد. در مرحله دوم ابزار خم‌کاری شروع به حرکت می‌کند. شعاع خم‌کاری با میزان حرکت ابزار خم‌کاری تعیین می‌شود. در این مرحله لوله می‌تواند ساکن بماند و ابزار خم‌کاری حرکت خود را انجام دهد و یا لوله نیز در هنگام حرکت ابزار، مقداری پیش‌روی داشته باشد. مرحله سوم مربوط به میزان زاویه خم‌کاری می‌باشد؛ در این مرحله ابزار خم‌کاری ثابت و بدون حرکت بوده و لوله با پیش‌روی خود زاویه خم‌کاری مناسب را تولید می‌کند. در مراحل دوم و سوم، ابزار شکل‌دهی با سرعت مورد نظر چرخش دورانی خود را برای کاهش قطر لوله ادامه می‌دهد.

5-1- اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی

برای اینکه بتوان به نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده اطمینان پیدا نمود، باید مواردی را در ابتدا مورد بررسی قرار داد. با توجه به توازن انرژی در نرم‌افزار آباکس، می‌بایست مجموع انرژی‌های فرایند که برابر انرژی کل است، برابر صفر یا مقدار ثابتی شود تا نتایج حاصل از شبیه‌سازی قابل اعتماد باشد. مقدار انرژی کل در شبیه‌سازی انجام شده برابر صفر شده است. همچنین مقدار انرژی مصنوعی[7] باقیمانده در فرایند بسیار کم می‌باشد. به دلیل کم بودن این انرژی مشکل ساعت شنی[8] در شبیه‌سازی به‌وجود نخواهد آمد[10]. به این نکته نیز می‌توان اشاره نمود که مقدار انرژی مصنوعی در شبیه‌سازی انجام شده با مقدار انرژی مصنوعی به وجود آمده در شبیه‌سازی انجام شده توسط تکایا و همکارانش[10] مقایسه شده است. مقدار این انرژی در شبیه‌سازی انجام شده کمتر از شبیه‌سازی انجام شده توسط تکایا و همکارانش می‌باشد، که می‌تواند نشان دهنده بهبود شبیه‌سازی باشد.

برای اطمینان کامل از صحت شبیه‌سازی انجام شده، به مقایسه نتایج شبیه‌سازی با کار تجربی تکایا و همکارانش[8]، مربوط به بررسی نمودار نسبت گشتاور خمشی در خم‌کاری با شکل‌دهی چرخشی به خم‌کاری بدون شکل‌دهی چرخشی پرداخته می‌شود. برای این امر ابتدا باید پارامتر بی‌بعد v^* به‌عنوان سرعت فرایند به‌صورت رابطه‌ی (35) تعریف شود.

$$v^* = \pi . d_0 . \frac{U}{v_f} \tag{35}$$

در رابطه‌ی (35)، U سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی بر حسب (rad/s) و v_f سرعت تغذیه محوری لوله بر حسب (mm/s) می‌باشد. جنس لوله فولاد آلیاژی E235، شعاع خم‌کاری 1000 میلی‌متر، قطر اولیه لوله 40 میلی‌متر و قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر می‌باشد.

در شکل 7 به مقایسه کار تجربی با نتایج حاصل از کار تحلیلی و شبیه‌سازی پرداخته شده است.

برای محاسبه نسبت گشتاور خمشی خم‌کاری به روش تحلیلی از معادله‌ی (16) استفاده می‌شود. در معادلات تحلیلی به‌دلیل آن که سرعت فرایند در نظر گرفته نشده است، نسبت گشتاور خمشی خم‌کاری به سرعت وابسته نبوده و همواره ثابت می‌باشد. اما باید توجه نمود که نتایج تجربی، به سرعت فرایند وابسته بوده و با افزایش سرعت فرایند نسبت گشتاور خم‌کاری کاهش می‌یابد. همچنین مقادیر به دست آمده برای نسبت گشتاور خم‌کاری در حالت تجربی و تحلیلی در سرعت‌های بالای فرایند تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به افزایش سرعت واکنش نشان داده و نسبت گشتاور خم‌کاری کاهش می‌یابد. مقادیر حاصل از شبیه‌سازی نیز با نسبت مطلوبی به نتایج تجربی نزدیک می‌باشند؛ از این رو می‌توان بیان نمود نتایج مدل‌سازی عددی قابل اطمینان است.

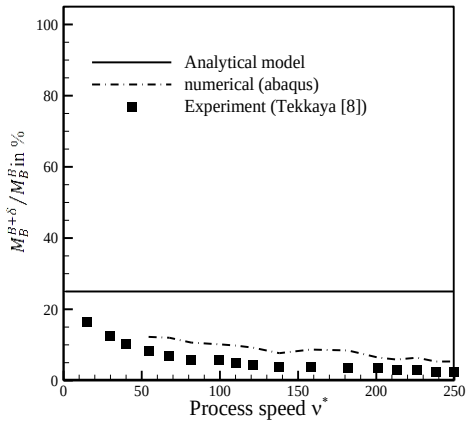

Fig. 7 Comparison of numerical and analytical results with experiment

شکل 7 مقایسه کار تجربی با نتایج حاصل از کار تحلیلی و شبیه‌سازی

[1] Surface-to-surface contact
[2] Kinematic constraint
[3] Penalty method
[4] Hard contact
[5] Coulomb friction model
[6] Reference point
[7] Artificial Energy
[8] Hourglass

6- نتایج و بحث

در مطالعه‌ی حاضر اثر پارامترهای مختلف فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله بر محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی صورت گرفته جنس لوله، فولاد آلیاژی E235 می‌باشد. در ادامه تأثیر پارامترهای تغذیه محوری در مرحله دوم فرایند، سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، سرعت تغذیه محوری در کل فرایند و زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی بر کیفیت محصول نهایی فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله بررسی می‌شود.

6-1- تأثیر تغذیه محوری در مرحله دوم فرایند

مرحله دوم فرایند، مرحله تعیین میزان شعاع خم‌کاری است. در این مرحله ابزار خم‌کاری به مقدار مورد نیاز جابه‌جا می‌شود. نکته‌ای که می‌بایست به آن توجه شود تغذیه محوری لوله در این مرحله است. برای بررسی این تغذیه در مرحله دوم فرایند، f_{ss} پارامتر تغذیه مرحله دوم است که بیانگر نسبت مقدار تغذیه لوله به جابه‌جایی ابزار خم‌کاری می‌باشد. پارامترهای خم‌کاری در این بررسی شامل شعاع خم‌کاری 1000 میلی‌متر، قطر اولیه لوله 40 میلی‌متر، قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر و سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی 300 دور در دقیقه، می‌باشند.

در شکل 8 به بررسی کرنش پلاستیک معادل در سطح داخلی لوله که در معرض تنش‌های فشاری قرار دارد و از شبیه‌سازی عددی به دست آمده، پرداخته شده است. هنگامی که تغذیه مرحله دوم صفر است، لوله در این مرحله حرکتی نداشته و تنها ابزار خم‌کاری حرکت خود را انجام خواهد داد. این امر موجب به وجود آمدن کرنش پلاستیک معادل بالا در مقطعی از لوله می‌شود که ناشی از تمرکز تنش‌های فشاری در این مقطع می‌باشد. افزایش کرنش پلاستیک معادل، موجب به وجود آمدن عیب‌های سطحی در محصول نهایی خواهد شد. با افزایش f_{ss}، همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود به علت توزیع تنش‌های فشاری در سطح داخلی لوله، مقدار کرنش پلاستیک معادل کاهش می‌یابد.

برای بررسی ضخامت لوله در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله ابتدا باید معادله‌ای را برای تعیین میزان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله که به ترتیب در ناحیه کششی و فشاری لوله در مقطع بحرانی در مرحله دوم فرایند به‌وجود می‌آیند، بیان نمود که در معادلات (36) و (37) آورده شده است.

$$\Delta t_t = \frac{t - t'}{t} \tag{36}$$

$$\Delta t_c = \frac{t' - t}{t} \tag{37}$$

در روابط (36) و (37)، Δt_t نسبت نازک‌شدگی، Δt_c نسبت ضخیم‌شدگی، t ضخامت اولیه لوله و t' ضخامت لوله بعد از عملیات خم‌کاری می‌باشد. حال تفاوت بین بیشترین نسبت نازک‌شدگی و بیشترین نسبت ضخیم‌شدگی در معادله‌ی (38) با I'_{w0} نشان داده می‌شود. هنگامی که I'_{w0} بزرگتر از 8 درصد و یا کوچکتر از 19- باشد احتمال وقوع چروکیدگی بیشتر خواهد بود[11]. نمونه‌ای از چروکیدگی شبیه سازی در شکل 9 نشان داده شده است.

$$I'_{w0} = |\Delta t_c| - |\Delta t_t| \tag{38}$$

با توجه به شکل 10، ضخامت لایه داخلی لوله با افزایش مقدار f_{ss} کاهش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که که میزان ضخیم شوندگی در خم‌کاری کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل 10 می‌توان بیان کرد مقدار نازک‌شدگی نیز کاهش یافته است و لایه خارجی لوله ضخیم‌تر شده است. از طرفی مقدار I'_{w0} کاهش یافته است، پس می‌توان نتیجه گرفت با افزایش مقدار f_{ss} تمایل به چروک نیز کاهش می‌یابد. همچنین در شکل 10 می‌توان مشاهده کرد برای f_{ss} بزرگ‌تر از 2 مقدار I'_{w0} کمتر از 8 می‌باشد که در نتیجه خم‌کاری بدون چروکیدگی را می‌توان انجام داد.

در خم‌کاری لوله، ثبات سطح مقطع لوله در محصول نهایی بسیار با اهمیت می‌باشد. محصول نهایی نباید هندسه مقطع اولیه خود را از دست بدهد. برای بررسی این امر پارامتری به عنوان بررسی دو پهنی مقطع به‌صورت معادله‌ی (39) بیان می‌شود[12].

$$Ovality = 2\frac{d_{11} - d_{12}}{d_{11} + d_{12}} \times 100\ \% \tag{39}$$

در معادله‌ی (39)، d_{11} قطر بزرگ سطح مقطع لوله خم‌کاری شده و d_{12} قطر کوچک سطح مقطع لوله می‌باشد. در شکل 11 به بررسی دو پهنی مقطع لوله و پارامتر آسیب پرداخته شده است. با توجه به بررسی انجام شده، از آنجایی که افزایش مقدار f_{ss} احتمال چروکیدگی را کاهش می‌دهد، پس می‌توان انتظار داشت سطح مقطع لوله نیز دچار دو پهنی کمتری شود.

با توجه به شکل 11 نیز دو پهنی مقطع با افزایش f_{ss} کاهش می‌یابد و لوله مقطع دایره‌ای شکل خود را حفظ می‌کند. همچنین با افزایش نسبت حرکت لوله به ابزار خم‌کاری، مقدار پارامتر آسیب کاهش می‌یابد. مقدار این پارامتر اگر به یک برسد، پارگی در لایه‌ی خارجی لوله که در عرض تنش‌های کششی قرار دارد، رخ خواهد داد. علت کاهش پارامتر آسیب با افزایش f_{ss}، کاهش تمرکز تنش ایجاد شده در یک مقطع از لوله می‌باشد. با افزایش میزان f_{ss} تنش‌های کششی در سطح بیشتری از لوله توزیع شده و احتمال پارگی در لوله‌ی خم‌کاری شده کاهش می‌یابد.

در شکل 12 برگشت‌فنری پس از اتمام فرایند و مرحله باربرداری مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار برگشت‌فنری فرایند در شبیه‌سازی عددی محاسبه شده است. در ابتدا زاویه خم‌کاری قبل از باربرداری به دست آمده و

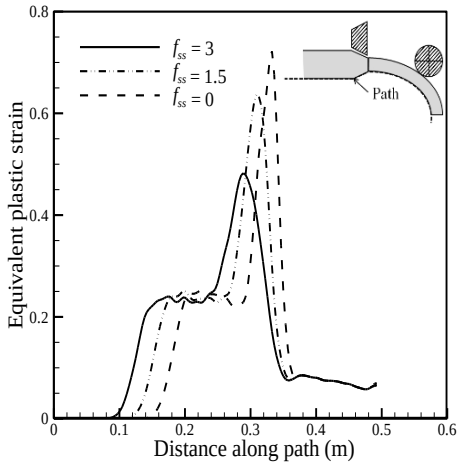

Fig. 8 Comparisons of equivalent plastic strain with different feeds in second step

شکل 8 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با تغذیه‌های مرحله دوم متفاوت

Fig. 9 Sample bending tube with wrinkling

شکل 9 نمونه لوله خم‌کاری شده با چروکیدگی

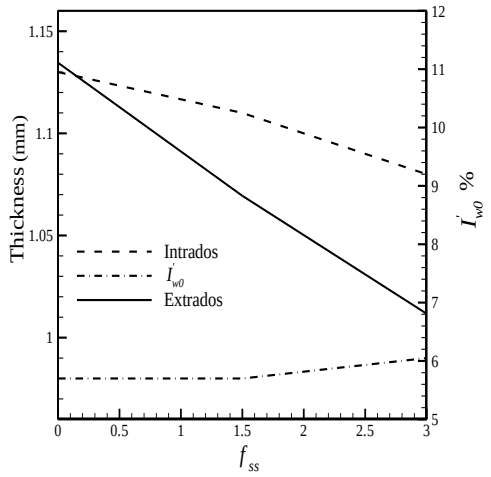

Fig. 10 Comparisons of tube thickness and I'_{w0} with different feeds in second step

شکل 10 مقایسه ضخامت لوله و I'_{w0} با تغذیه‌های مرحله دوم

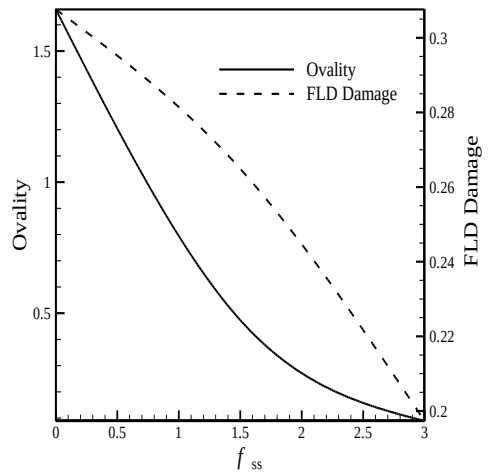

Fig. 11 Effect of feed in second step on Ovality and damage parameters

شکل 11 تأثیر تغذیه مرحله دوم بر دو پهنی مقطع و پارامتر آسیب

اختلاف آن با زاویه خم‌کاری بعد از باربرداری محاسبه می‌شود. با توجه به این نکته که با کاهش مقدار f_{ss} تمرکز تنش در مقطع لوله زیاد شده، در نتیجه تنش‌های پسماند بیشتری در لوله باقی خواهند ماند که موجب افزایش برگشت‌فنری در مرحله باربرداری خواهد شد. این تأثیر f_{ss} بر روی برگشت-فنری در شکل 12 قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش مقدار تغذیه در مرحله دوم فرایند خم‌کاری، میزان برگشت‌فنری در مرحله باربرداری فرایند شکل-دهی تدریجی لوله، کاهش می‌یابد.

6-2- تأثیر سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی

سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی در تمام مراحل فرایند ثابت می‌باشد. تعداد غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی 3 عدد می‌باشد. پارامترهای خم‌کاری در این بررسی شامل شعاع خم‌کاری 1000 میلی‌متر، قطر اولیه لوله 40 میلی‌متر، قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر و تغذیه مرحله دوم برابر با 2 می‌باشند.

همان‌طور که در شکل 13 می‌توان مشاهده کرد، با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، کرنش پلاستیک معادل افزایش می‌یابد. این افزایش، امکان بروز عیب در قطعه را افزایش خواهد داد. با افزایش سرعت دورانی تعداد برخوردها بین غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی و لوله افزایش می‌یابد. این افزایش برخورد بین سطوح باعث ایجاد کرنش پلاستیک معادل بیشتر خواهد شد.

با توجه به شکل 14، ضخامت لایه داخلی لوله با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی به میزان کمی کاهش می‌یابد. پس افزایش سرعت دورانی روی ضخامت لایه داخلی لوله تأثیر مطلوب می‌گذارد. اما در لایه خارجی لوله، تأثیر افزایش سرعت دورانی بر ضخامت لوله نامطلوب است؛ زیرا با افزایش سرعت دورانی نازک‌شدگی لوله در لایه خارجی افزایش می‌یابد. در مورد پارامتر I'_{w0} که تأثیر همزمان نازک‌شدگی و ضخیم‌شدگی لوله می‌باشد، مشاهده می‌شود افزایش سرعت دورانی باعث کاهش I'_{w0} خواهد شد.

بنابراین با افزایش سرعت دورانی احتمال بروز چروکیدگی در لوله کاهش می‌یابد. با توجه به شکل 15 می‌توان بیان کرد با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، میزان دو پهنی مقطع لوله کاهش پیدا خواهد کرد.

با توجه به افزایش برخورد غلتک‌ها با لوله در یک تغذیه محوری یکسان برای لوله، هر چه سرعت دورانی زیادتر شود، هندسه‌ی سطح مقطع لوله منظم‌تر خواهد شد. به‌عبارتی دیگر گام حرکت پیچشی غلتک‌ها به دور لوله کاهش می‌یابد. این کاهش گام موجب می‌شود غلتک‌ها مسیر طولانی‌تری را در تماس با لوله قرار گیرند و سطح مقطع منظم‌تری برای لوله به‌وجود آورند.

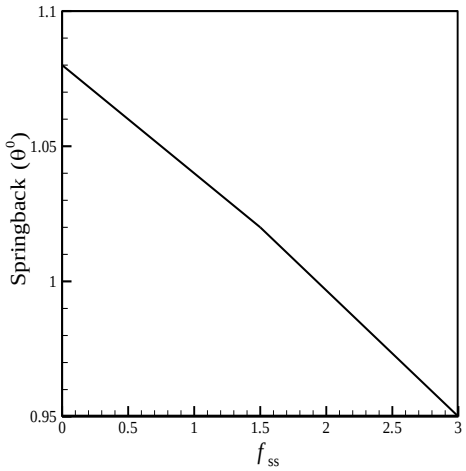

Fig. 12 Effect of feed in second step on springback

شکل 12 تأثیر تغذیه مرحله دوم بر برگشت‌فنری

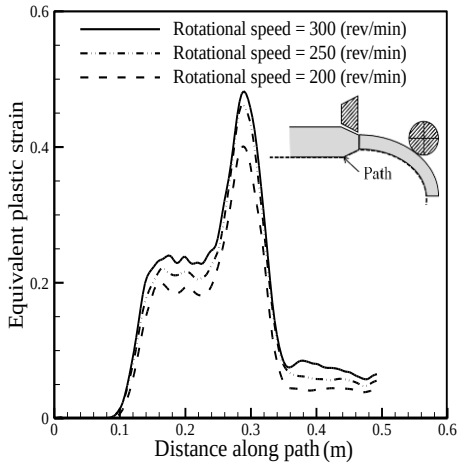

Fig. 13 Comparisons of equivalent plastic strain with different rotational speed

شکل 13 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با سرعت‌های دورانی مختلف

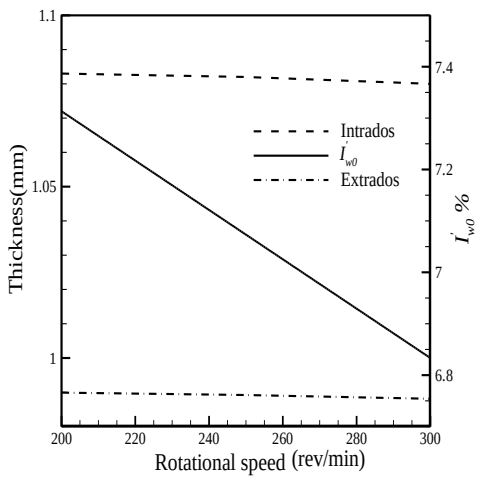

Fig. 14 Comparisons of tube thickness and I'_{w0} with different rotational speed

شکل 14 مقایسه ضخامت لوله و I'_{w0} با سرعت‌های دورانی مختلف

همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، مقدار پارامتر آسیب افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت ابزار شکل‌دهی چرخشی، تعداد برخوردهای غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی با سطح لوله افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش برخورد موجب تغییر شکل بیشتری در لوله شده و احتمال پارگی در لایه‌ی خارجی لوله را افزایش می‌دهد. بنابراین افزایش سرعت دورانی باعث کاهش گشتاور خم‌کاری مورد نیاز خواهد شد.

از آنجایی که میزان برگشت‌فنری با گشتاور خم‌کاری رابطه مستقیم دارد، می‌توان نتیجه گرفت با کاهش گشتاور خم‌کاری، برگشت فنری کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 16 می‌توان مشاهده نمود، با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، مقدار برگشت‌فنری بعد از مرحله باربرداری کاهش می‌یابد.

6-3-تأثیر تغذیه محوری لوله

سرعت تغذیه محوری لوله به سمت غلتک‌های ابزار چرخشی پارامتری تأثیرگذار در کیفیت محصول نهایی است. در هر سه مرحله از فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، تغذیه محوری وجود دارد.

در این بررسی، سرعت در هر سه مرحله یکسان در نظر گرفته شده است. پارامترهای خم‌کاری در این بررسی شامل 1000 میلی‌متر شعاع خم‌کاری لوله، قطر اولیه لوله 40 میلی‌متر، قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر، تغذیه مرحله دوم برابر 2 و سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی برابر 300 دور در دقیقه، می‌باشند.

با کاهش سرعت تغذیه محوری لوله، کرنش پلاستیک معادل که در شکل 17 نشان داده شده است، افزایش می‌یابد. کاهش تغذیه محوری و ثابت ماندن سرعت دورانی ابزار چرخشی باعث افزایش برخورد غلتک‌ها با لوله می‌شود که افزایش برخورد باعث افزایش کرنش پلاستیک معادل لوله خواهد شد.

با توجه به بررسی I'_{w0} در شکل 18 می‌توان مشاهده نمود با کاهش تغذیه محوری مقدار I'_{w0} افزایش می‌یابد. اگرچه افزایش مقدار I'_{w0} زیاد نبوده، ولی می‌توان بیان نمود کاهش تغذیه محوری همواره مفید نمی‌باشد و باید به افزایش احتمال چروکیدگی در کاهش آن توجه نمود. کاهش تغذیه محوری باعث ضخیم‌شدگی لایه داخلی لوله می‌شود، اما در مقابل از نازک‌شدگی لایه خارجی لوله جلوگیری خواهدکرد. با توجه به افزایش I'_{w0}، افزایش درصد دو پهنی مقطع قابل پیش‌بینی می‌باشد. در شکل 19 نیز همین تأثیر مشاهده می‌شود با کاهش تغذیه محوری درصد دو پهنی مقطع لوله افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تغذیه محوری، مقدار پارامتر آسیب افزایش می‌یابد. با افزایش تغذیه محوری لوله و ثابت ماندن سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی، میزان سطح جاروب شده توسط ابزار شکل‌دهی چرخشی بر سطح لوله کاهش می‌یابد و مقطع لوله کاهش قطر یکنواختی پیدا نخواهد کرد. این غیریکنواختی در سطح لوله سبب کرنش‌های متفاوت در مقاطع مختلف لوله خواهد شد که باعث افزایش پارامتر آسیب در لوله می‌شود.

با توجه به شکل 20، کاهش تغذیه محوری در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، باعث افزایش برگشت‌فنری در مرحله باربرداری خواهد شد. با توجه به معادله (20)، با کاهش تغذیه محوری، سرعت فرایند افزایش خواهد یافت که به دنبال این افزایش سرعت، گشتاور مورد نیاز برای خم‌کاری کاهش می‌یابد. از آنجا که میزان برگشت‌فنری رابطه مستقیم با گشتاور خم‌کاری دارد، میزان برگشت‌فنری نیز کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی‌های انجام شده که بیان شد، در انتخاب تغذیه محوری مناسب برای فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله باید دقت بیشتری لحاظ شود. تغییرات این پارامتر هم باعث ایجاد اثرات مطلوب و هم موجب اثرات نامطلوب در محصول نهایی خواهد شد.

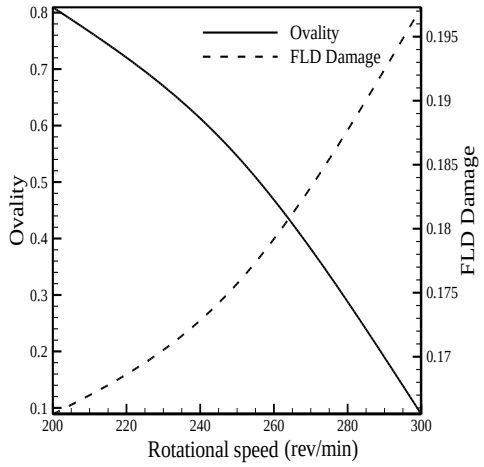

Fig. 15 Effect of the rotational speed on Ovality and damage parameters

شکل 15 تأثیر سرعت دورانی بر دو پهنی مقطع و پارامتر آسیب

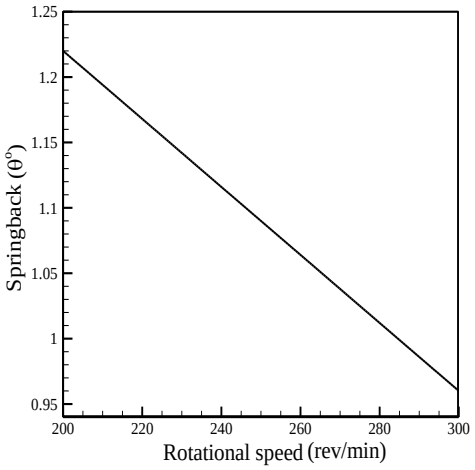

Fig. 16 Effect of the rotational speed on springback

شکل 16 تأثیر سرعت دورانی بر برگشت‌فنری

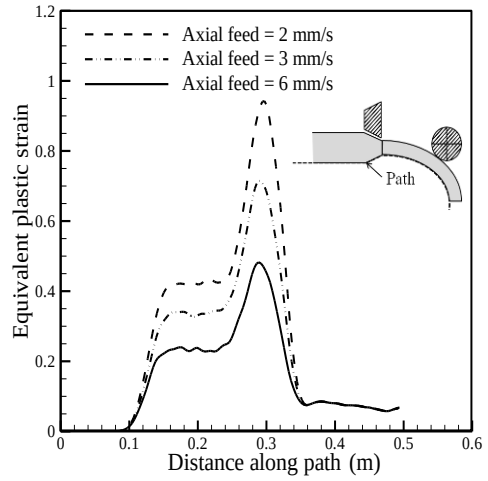

Fig. 17 Comparisons of equivalent plastic strain with different axial feed

شکل 17 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با تغذیه‌های محوری مختلف

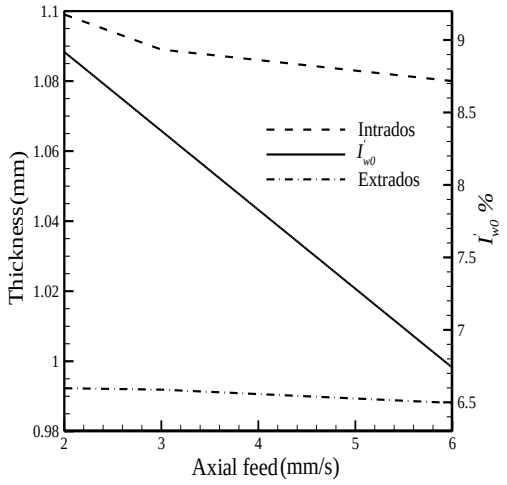

Fig. 18 Comparisons of tube thickness and I'_{w0} with different axial feed

شکل 18 مقایسه ضخامت لوله و I'_{w0} با تغذیه‌های محوری متفاوت

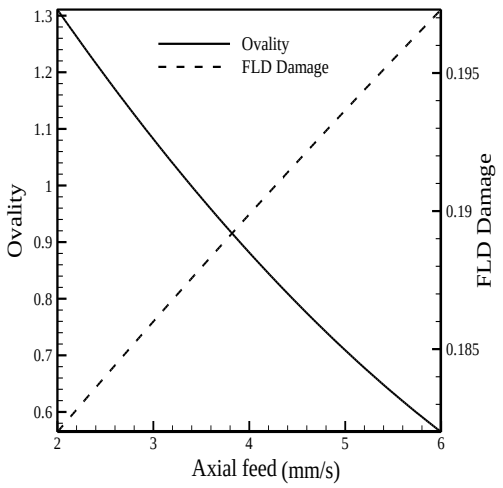

Fig. 19 Effect of axial feed on Ovality and damage parameters

شکل 19 تأثیر تغذیه محوری بر دو پهنی مقطع و پارامتر آسیب

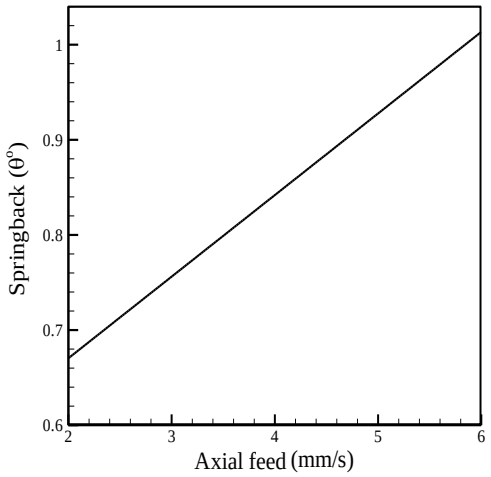

Fig. 20 Effect of axial feed on springback

شکل 20 تأثیر تغذیه محوری بر برگشت‌فنری

6-4- تأثیر زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی

غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی برای کاهش قطر در لوله به صورت شیب‌دار طراحی می‌شوند. زاویه‌ی طراحی این غلتک‌ها می تواند عامل مؤثری بر روی محصول نهایی فرایند داشته باشد. در این بخش به بررسی این زاویه بر کیفیت محصول نهایی پرداخته می‌شود. پارامترهای خم‌کاری در این بررسی شامل 1000 میلی‌متر شعاع خم‌کاری لوله، قطر اولیه لوله 40 میلی-متر، قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر، تغذیه مرحله دوم برابر 2 و سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی برابر 300 دور در دقیقه، می‌باشند.

با توجه به شکل 21 افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های شکل‌دهی چرخشی در مرحله‌ی اولیه‌ی خم‌کاری باعث ایجاد نوسان در کرنش پلاستیک معادل لوله شده است. از این نوسانات می‌توان نتیجه گرفت که افزایش زاویه‌ی حمله، باعث ایجاد سطوحی با کیفیت پایین‌تر خواهد شد. این افت کیفیت سطوح در اثر افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی ناشی از کاهش طول غلتک‌ها (همان سطح در تماس با لوله) می‌باشد. لوله در یک کاهش قطر ثابت، با افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌ها، با سرعت بیشتری کاهش قطر پیدا کرده و فرصت یکنواخت شدن سطح لوله توسط سطح غلتک‌ها کمتر خواهد بود. این نوسانات در تمام طول فرایند قابل مشاهده است؛ در مرحله‌ی آخر خم‌کاری که در آن لوله با تغذیه‌ی محوری، زاویه‌ی مورد نظر خم‌کاری را به خود می‌گیرد، نوسانات در کرنش پلاستیک معادل بیشتر می‌شود. در این مرحله سطوح تماس غلتک‌های در حال دوران، نقش تکیه‌گاه را برای لوله خواهند داشت. در نتیجه کاهش این سطح تماس میان لوله و غلتک‌ها می‌تواند منجر به نامطلوب شدن مرحله‌ی آخر فرایند خم‌کاری شود.

در شکل 22 مشاهده می‌شود ضخامت لایه‌ی داخلی لوله با افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌ها افزایش می‌یابد و لوله در معرض ضخیم‌شدگی بیشتری قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش زاویه‌ی حمله غلتک‌ها ضخامت لایه‌ی خارجی لوله کاهش می‌یابد و نازک‌شدگی در لوله افزایش می‌یابد. اما با توجه به این ضخیم‌شدگی و نازک‌شدگی در لوله با افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار چرخشی، میزان I'_{w0} کاهش می‌یابد و طبق معیار ضخامت لوله، خم‌کاری از لحاظ احتمال بروز چروکیدگی در فرایند خم‌کاری، ایمن‌تر پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این نکته که افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌ها

می‌تواند باعث کاهش احتمال چروکیدگی در خم‌کاری شوند، بنابراین انتخاب زاویه‌ی حمله مناسب غلتک‌ها برای خم‌کاری نیازمند توجه بیشتری می‌باشد.

به علت کاهش طول غلتک‌ها و سطح تماس آن‌ها با لوله، با افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی سطح لوله هنگام کاهش قطر، سطح مناسبی پیدا نکرده و این عیب در هنگام خم‌کاری باعث افزایش ایجاد دو پهنی در سطح مقطع لوله خواهد شد. همان‌گونه که در شکل 23 نیز مشاهده می‌شود با افزایش زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی میزان دو پهنی در سطح مقطع لوله افزایش و مقدار پارامتر آسیب کاهش می‌یابد. کاهش معیار آسیب بار دیگر اهمیت توجه به تعیین زاویه‌ی حمله مناسب برای غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی را در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله نشان می‌دهد. افزایش این پارامتر در فرایند، احتمال چروکیدگی در لایه‌ی داخلی لوله و پارگی در لایه‌ی خارجی لوله را کاهش می‌دهد؛ اما باید توجه داشت کیفیت سطح کمتر شده و دو پهنی مقطع لوله خم‌کاری شده بیشتر خواهد شد.

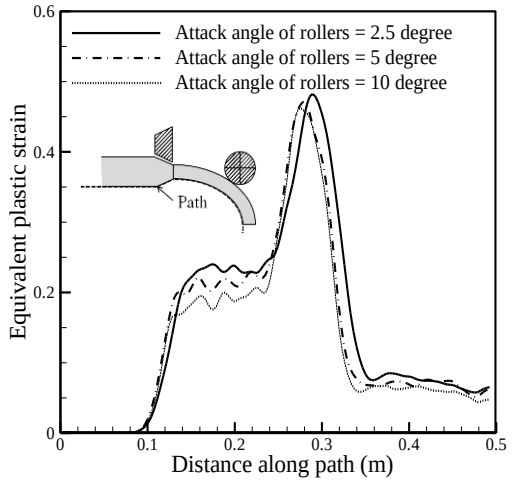

Fig. 21 Comparisons of equivalent plastic strain with different attack angle of rollers

شکل 21 مقایسه‌ی کرنش پلاستیک معادل با زوایای متفاوت حمله غلتک‌ها

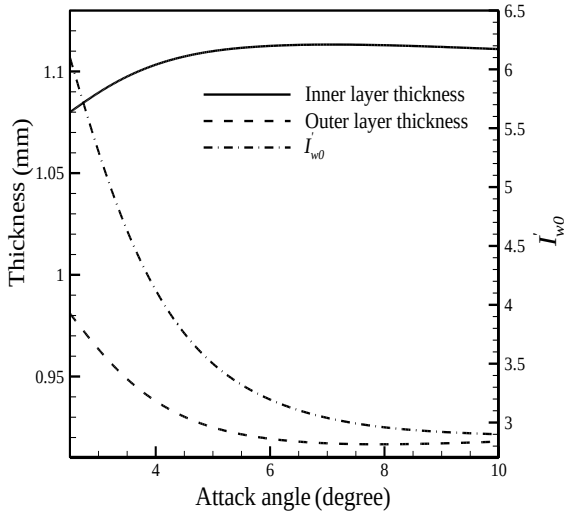

Fig. 22 Comparisons of tube thickness and l'_{w0} with different attack angle of rollers

شکل 22 مقایسه‌ی ضخامت لوله و l'_{w0} با زوایای متفاوت حمله‌ی غلتک‌ها

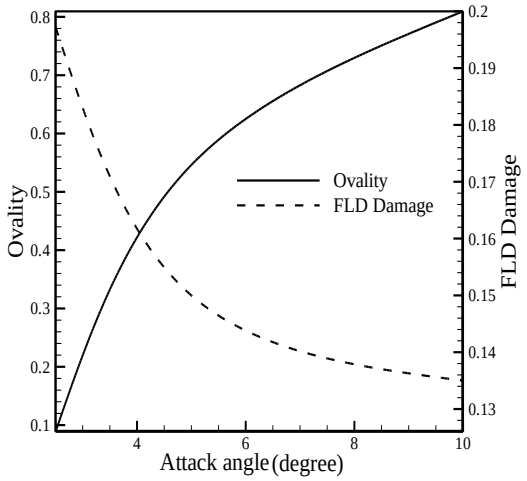

Fig. 23 Effect of attack angle of rollers on the cross-section distortion and damage parameters

شکل 23 تأثیر زاویه‌ی حمله‌ی خم‌کاری بر دو پهنی مقطع و پارامتر آسیب

7- نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته ملاحظه می‌شود که در مدل تحلیلی ارائه شده برای فرایند شکل‌دهی تدریجی به علت در نظر نگرفتن سرعت‌های فرایند، نتایج با مدل‌سازی عددی و نتایج تجربی که به سرعت واکنش وابسته هستند، تفاوت خواهد داشت.

نتایج مدل‌سازی عددی به نتایج تجربی نزدیک بوده و قابل اعتماد می‌باشد. طبق تحلیل‌های انجام شده با افزایش تغذیه محوری مرحله دوم فرایند که با پارامتر f_{ss} معرفی گردید، عیب‌های سطحی، چروکیدگی، دو پهنی مقطع لوله، برگشت‌فنری در مرحله باربرداری و پارامتر آسیب کاهش یافته و به تبع آن، احتمال پارگی در لوله خم‌کاری شده کاهش می‌یابد. افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با وجود اینکه احتمال بروز عیب‌های سطحی اندکی افزایش پیدا خواهد کرد، اما درمقابل احتمال بروز چروکیدگی، دو پهنی مقطع لوله و برگشت‌فنری در محصول نهایی کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی چرخشی میزان پارامتر آسیب افزایش می‌یابد و احتمال پارگی در سطح خارجی لوله نیز افزایش می‌یابد.

برای انتخاب تغذیه محوری مناسب در فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله باید دقت بیشتری انجام گیرد؛ زیرا با کاهش بیش از حد تغذیه محوری لوله در فرایند، احتمال وقوع عیب‌های سطحی، چروکیدگی و دو پهنی مقطع لوله بیشتر خواهد شد. اما با کاهش این پارامتر برگشت فنری در مرحله باربرداری از محصول کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش سرعت تغذیه محوری لوله میزان پارامتر آسیب افزایش می‌یابد و احتمال پارگی در سطح خارجی لوله نیز افزایش خواهد یافت. همچنین در طراحی غلتک‌های فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، می‌بایست به زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل‌دهی چرخشی برای کاهش قطر لوله دقت نمود. زیرا افزایش این زاویه باعث افت کیفیت سطح خارجی لوله، افزایش دو پهنی مقطع، کاهش احتمال چروکیدگی در لایه‌ی داخلی لوله و کاهش احتمال پارگی در لایه‌ی خارجی لوله خواهد شد.

8- فهرست علایم

c ضریب استحکام ماده (MPa)

d_0 قطر اولیه لوله (mm)

d_1 قطر لوله پس از کاهش قطر (mm)

f فاکتور نقص

f_{ss} تغذیه مرحله دوم فرایند

l'_{w0} تفاضل بیشترین نسبت نازک‌شدگی و بیشترین نسبت ضخیم شدگی

n نمای کار سختی

M_B^B گشتاور خم‌کاری بدون کاهش قطر لوله (MPa)

$M_B^{B+\delta}$ گشتاور خم‌کاری با کاهش قطر لوله (MPa)

R شعاع خم‌کاری (mm)

t ضخامت لوله (mm)

t' ضخامت لوله بعد از خم‌کاری (mm)

y فاصله از تار خنثی (mm)

علائم یونانی

ε_θ کرنش محیطی

ε_z کرنش طولی

ε_r کرنش شعاعی

η نسبت نرخ کرنش

$\bar{\eta}$ نسبت نرخ کرنش متوسط

α' نسبت تنش محیطی به تنش طولی

σ_θ تنش محیطی (MPa)

σ_z تنش طولی (MPa)

σ_f تنش سیلان (MPa)

v^* پارامتر بی‌بعد سرعت فرایند

9- مراجع

[1] M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus, Manufacturing of lightweight components by metal forming, *Annals of the CIRP*, Vol. 52, No. 2, pp. 521-542, 2003.

[2] R. H. Wagoner, H. Lim, M. G. Lee, Advanced Issues in springback, *International Journal of Plasticity*, Vol. 45, No. 1, pp. 3-20, 2013.

[3] J. Yanagimoto, K. Oyamada, Mechanism of springback free bending of high strength steel sheets under warm forming conditions, *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 265-268, 2007.

[4] Y. Tozawa, T. Ishikawa, A new tube bending method application of bend rolling process, *Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 1, pp. 285-288, 1988.

[5] S. Chatti, M. Hermes, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, The new TSS bending process: 3D bending of profiles with arbitrary cross sections, *Annals of the CIRP*, Vol. 59, No. 1, pp. 315-318, 2010.

[6] M. Hermes, D. Staupendahl, C. Becker, A. E. Tekkaya, Innovative machine concepts for 3D bending of tubes and profiles, *Key Engineering Materials*, Vol. 437, No. 1, pp. 37-42, 2011.

[7] C. Becker, G. Quintana, M. Hermes, B. Cavallini, A. E. Tekkaya, Prediction of surface roughness due to spinning in the incremental tube forming process, *Production Engineering Research and Development*, Vol. 7, No. 1, pp. 153-166, 2013.

[8] C. Becker, A. E. Tekkaya, M. Kleiner, Fundamentals of the incremental tube forming process, *Manufacturing Technolog*, Vol. 63, No. 1, pp. 253-256, 2014.

[9] M. Hosseinpour Gollo, S. M. H. Seyedkashi, N. Valian Iraj, The effects of Hosford, Hill's quadratic and non-quadratic yield criteria on prediction of forming limit diagrams based on M-K Model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 137-146, 2014. (in Persian فارسی)

[10] D. Staupendahl, C. Becker, M. Hermes, A. Erman Tekkaya, *Flexible and cost-effective innovative manufacturing of complex 3D-bent tubes and profiles made of high-strength steels for automotive lightweight structures*, European Commission, Germany, pp. 64-71, 2014.

[11] Z. Y. Zhang, H. Yang, H. Li, N. Ren, Y. L. Tian, Bending behaviors of large diameter thin-walled CP-Ti tube in rotary draw bending, *Materials International*, Vol. 21, No. 1, pp. 401-412, 2011.

[12] D. Staupendahl, C. Becker, M. Hermes, A. Erman Tekkaya, *Flexible and cost-effective innovative manufacturing of complex 3D-bent tubes and profiles made of high-strength steels for automotive lightweight structures*, European Commission, Germany, pp. 64-71, 2014.