



# بررسی فرایند شکل دهی تدریجی لوله و تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند بر کیفیت محصول نهایی

حامد خانی پور<sup>1</sup>، علی باستی<sup>2\*</sup>

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

شکل دهی 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 خم کاری شده در سازه‌ها رو به افزایش است. در این مقاله روش شکل دهی تدریجی لوله، برای خم کاری لوله بررسی شده است. در این روش استفاده از ترکیب شکل دهی چرخشی و خم کاری لوله بطور هم‌زمان، باعث بهبود فرایند خم کاری برای فلزات با استحکام بالا می‌شود. در ابتدا مدلی تحلیلی برای فرایند شکل دهی تدریجی لوله ارائه شده است. از این مدل برای آشنایی با فیزیک فرایند و برای تعیین میزان گشتاور خم کاری مورد نیاز استفاده شده است. در ادامه مدل سازی عددی فرایند شکل دهی تدریجی لوله برای پیش بینی عیوب ناشی از خم کاری نیز انجام گرفته است. از مدل سازی عددی نیز برای بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند شکل دهی تدریجی لوله، نظیر سرعت تغذیه‌ی مرحله دوم، سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی، سرعت تغذیه محوری لوله در کل فرایند و اثر زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل دهی 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

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

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

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SJIR.ir

فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله با ترکیب دو روش شکل‌دهی چرخشی<sup>۲</sup> 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 برگشت‌فتری و کاهش نیروی خم‌کاری می‌شود. این فرایند برای خم‌کاری‌های 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 ۱، تغییر قطر لوله با یک ابزار چرخشی که باعث ایجاد تنش‌های 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 ساده‌سازی 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. با توجه به شکل ۲، لوله به دو ناحیه‌ی ۱ و ۲ تقسیم می‌شود. همچنین تنش در ناحیه‌ی ۱، صفحاتی 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 ۱، با توجه به تغییر شکل لوله در بررسی‌های تجربی و عددی انجام شده، به صورت معادلات (۱) و (۲) بدست آمده و کرنش شعاعی نیز با توجه به ثبات حجم در تغییر شکل‌های پلاستیک

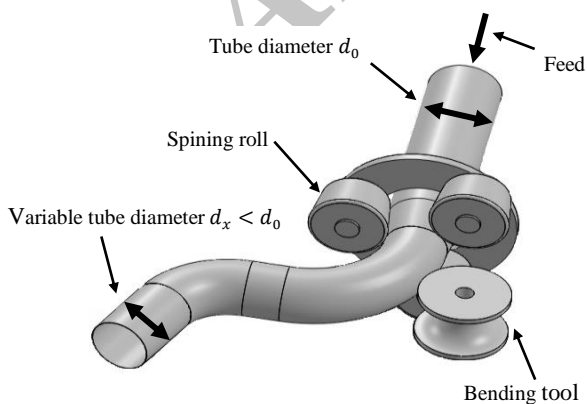


Fig. 1 Process principle of the incremental tube forming process

شکل ۱ فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله

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 برگشت‌فتری 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[۱]. خم‌کاری فلزات با استحکام بالا به علت برگشت‌فتری بالا به‌عنوان یک چالش برای تکنولوژی محسوب می‌شود[۲]. برای کاهش برگشت‌فتری، تعدادی روش خم‌کاری به روش شکل‌دهی گرم ارائه شده است[۳]. برای اولین بار توژاوا[۴] روش خم‌کاری - نورد را ارائه کرد که در آن کاهش قطر لوله در مرحله اول فرایند توسط نورد باعث کاهش گشتاور خمشی و برگشت‌فتری می‌شود. همچنین فرایند نورد برای کاهش قطر نیازمند نیروی بالایی خواهد بود و فرایند نیازمند توسعه و اصلاح می‌باشد. تکایا [۵] روشی برای خم‌کاری پروفیل‌ها بر پایه نورد ارائه کرد که باعث کاهش نیروی خم‌کاری و برگشت‌فتری می‌شود و همچنین موفق به طراحی دستگاهی برای خم‌کاری پروفیل‌ها بر این اساس و تولید سازه‌های سبک وزن شد.

پس از آن، تکایا [۶] 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 [۷] در بررسی دیگری، به بررسی زبری سطح 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 زبری سطح محصول نهایی بررسی نمود. تکایا [۸] در مطالعه‌ی 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 برگشت‌فتری 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 برگشت‌فتری 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

<sup>2</sup> Spinning

<sup>1</sup> Surface roughness

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

لازم به ذکر است که این معادلات برحسب معادله تنش سیلان<sup>۴</sup> که متناسب با جنس لوله به کار رفته در خم کاری است و نسبت نرخ کرنش که تابعی از فاصله تا تار خنثی در مقطعی از لوله که خم کاری بر روی آن در حال انجام است، می باشد.

برای لوله های مورد استفاده در این فرایند، معادله تنش سیلان به صورت رابطه ی (10) در نظر گرفته می شود.

$$\sigma_f = c(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (10)$$

در رابطه ی (10)،  $c$  ضریب استحکام ماده،  $\varepsilon_0$  مقدار کار سرد انجام شده قبل از تغییر شکل در فرایند شکل دهی تدریجی در تولید لوله و  $n$  نمای کار سختی در محدوده پلاستیک است. حال با استفاده از رابطه ی (10) و جاگذاری آن در روابط (8) و (9) به ترتیب معادلات تنش طولی و تنش محیطی برای فرایند شکل دهی تدریجی لوله به صورت روابط (11) و (12) حاصل می شود.

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

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

### 3-2- محاسبه گشتاور خمشی در فرایند شکل دهی تدریجی لوله

برای به دست آوردن گشتاور خمشی مورد نیاز فرایند شکل دهی تدریجی لوله می بایست از تنش طولی وارد بر لوله در انتهای ناحیه ی 1، انتگرال گیری حول مقطع لوله انجام شود. شکل 3، المانی از لوله را نشان می دهد که پارامترهای مورد نیاز در انتگرال گیری در آن مشخص شده است. پارامتر  $t$  ضخامت لوله می باشد.

گشتاور خمشی خم کاری با فرایند شکل دهی چرخشی با نماد  $M_B^{B+\delta}$  نشان داده می شود و با جاگذاری پارامترهای شکل 4 به صورت رابطه ی (13) حاصل می شود.

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

در انتگرال معادله ی (13) باید توجه داشت که  $\sigma_z$  برحسب  $\eta$  می باشد که نیز خود تابعی از  $y$  است. با توجه به اینکه محاسبه ی انتگرال این تابع دشوار خواهد بود، برای  $\eta$  یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده و انتگرال معادله ی (13) با جاگذاری این مقدار در آن محاسبه می شود [8]. معادله ی (14) جهت محاسبه گشتاور خمشی مورد نیاز برای خم کاری در فرایند شکل دهی تدریجی لوله با شکل دهی چرخشی به کار می رود.

$$M_B^{B+\delta} \approx \frac{\sigma_f \cdot t \cdot (d_1 - t)^2}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \left( \frac{1 - 2\bar{\eta}}{\sqrt{1 - \bar{\eta} + \bar{\eta}^2}} - \frac{1 + 2\bar{\eta}}{\sqrt{1 + \bar{\eta} + \bar{\eta}^2}} \right) \quad (14)$$

$$\bar{\eta} = \eta \left( y = \frac{d_0}{4} \right)$$

در ادامه به بررسی نسبت گشتاور خمشی خم کاری در حالتی که فرایند با شکل دهی چرخشی همراه است به گشتاور خمشی خم کاری خالص یعنی هنگامی که در خم کاری لوله از شکل دهی چرخشی استفاده نمی شود، پرداخته می شود.

با توجه به روابط (1) و (4)، اگر فرایند بدون شکل دهی 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،

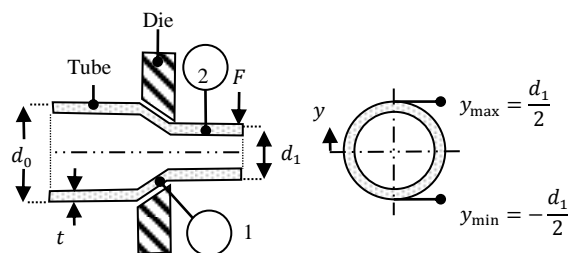


Fig. 2 Parameters of bent tube

شکل 2 پارامترهای خم کاری لوله

به صورت معادله (3) محاسبه می شود [8].

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_z = \ln\left(1 + \frac{y}{R}\right) \quad (2)$$

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

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

در ناحیه ی 1 فرض می شود نسبت کرنش برای شکل دهی چرخشی و همچنین خم کاری، یک مسیر خطی را تا رسیدن به کرنش نهایی طی می کند. بنابراین نسبت نرخ کرنش  $\eta$  مانند نرخ کرنش نهایی ثابت خواهد بود (معادله 4).

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

### 3-1- محاسبه تنش ها در تغییر شکل پلاستیک

یکی از روابط بسط داده شده برای تنش و کرنش پلاستیک توسط لوی-میسز<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> است.

$$\frac{d\varepsilon_z}{\sigma_z} = \frac{d\varepsilon_\theta}{\sigma_\theta} \quad (5)$$

فرض می شود  $\alpha' = \sigma_\theta / \sigma_z$  و با استفاده از معادله ی (4) و با توجه به صفحه-ای بودن تنش ها می توان رابطه ی (6) را به دست آورد.

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

با استفاده از معادله ی (6)،  $\alpha'$  بر حسب  $\eta(y)$  به صورت رابطه ی (7) محاسبه می شود.

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

اکنون با استفاده از معیار تسلیم ون میسز<sup>۳</sup> و جاگذاری معادله ی (7) در آن، تنش های طولی و محیطی در فرایند شکل دهی تدریجی لوله به ترتیب به صورت روابط (8) و (9) محاسبه می شود [8].

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

<sup>1</sup> Levy - Mises

<sup>2</sup> Strain Increment

<sup>3</sup> Von Mises

<sup>4</sup> Flow Stress

$$f = \frac{t_b}{t_a} \quad (17)$$

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].

$$f = f_0 e^{\varepsilon_{3b} - \varepsilon_{3a}} \quad (18)$$

جنس لوله‌ی انتخاب شده فولاد آلیاژی E235 است که مشخصات مکانیکی آن در جدول 1 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.

$$F_{1a} = F_{1b} \quad (19)$$

همچنین فرض شده کرنش‌های موازی با شیار ( $\varepsilon_2$ ) در هر دو منطقه طبق رابطه (20) یکسان باشند.

$$d\varepsilon_{2a} = d\varepsilon_{2b} \quad (20)$$

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

$$\varphi = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} \quad (21)$$

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

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

پارامترهای  $\alpha$ ،  $\varphi$  و  $\rho$  برای معیار تسلیم درجه 2 هیل از روابط (23) الی (28) به دست می‌آید.

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

مقدار  $\varphi$  برای معیار تسلیم درجه 2 هیل، مطابق رابطه‌ی (24) به دست خواهد آمد.

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

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

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (25)$$

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

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

با استفاده از روابط (26) و (27) و در نظر گرفتن  $\alpha$  به‌عنوان نسبت تنش‌ها، نسبت کرنش‌ها برابر با رابطه‌ی (28) می‌باشد.

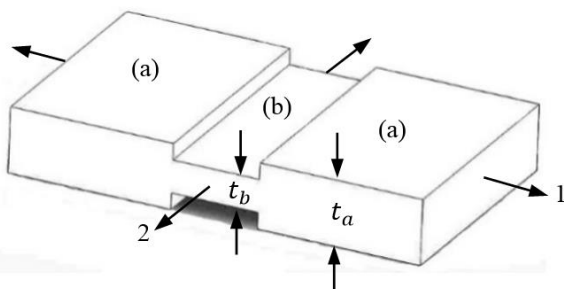


Fig. 4 Schematic of M-K model

شکل 4 شماتیکی از مدل M-K

مقدار  $\eta$  به منفی بینهایت میل خواهد کرد. حال اگر فرایند با نهایت شکل-دهی 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 خم کاری لوله بدون شکل-دهی چرخشی به صورت معادله‌ی (15) به دست می‌آید.

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

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

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

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

#### 4- استفاده از نمودار حد شکل دهی 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 حد شکل‌دهی به صورت تجربی وجود ندارد، از روش‌های عددی برای به دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی این آلیاژ استفاده می‌شود.

#### 1-4- رسم نمودار حد شکل دهی 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.

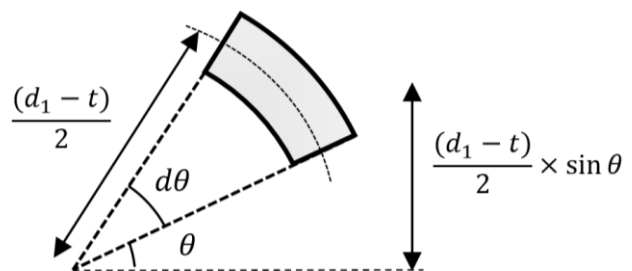


Fig. 3 Pipe element of integration

شکل 3 المانی از لوله برای انتگرال‌گیری

جدول 1 خواص مکانیکی E235 [8]

Table 1 E235 Mechanical properties [8]				
E (GPa)	c (MPa)	$\epsilon_0$	n	پارامتر
210	622.4	$7.7 \times 10^{-5}$	0.0191	مقدار

$$\rho = \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} = \frac{\alpha - R(1 - \alpha)}{1 + R(1 - \alpha)} \quad (28)$$

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

$$d\epsilon_{2a} = \frac{d\bar{\epsilon}_b(\alpha_b - R(1 - \alpha_b))}{(1 + R)} \left\{ \frac{(1 + R)}{1 + \alpha_b^2 + R(1 - \alpha_b)^2} \right\}^{0.5} \quad (29)$$

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

$$d\bar{\epsilon}_b = \frac{d\epsilon_{2a}(1 + R)}{(\alpha_b - R(1 - \alpha_b))} \left\{ \frac{1 + \alpha_b^2 + R(1 - \alpha_b)^2}{(1 + R)} \right\}^{0.5} \quad (30)$$

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

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

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.

$$d\epsilon_3 = -d\epsilon_1 - d\epsilon_2 \quad (32)$$

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

$$d\epsilon_{3a} = -\varphi_a \frac{d\bar{\epsilon}_a(1 + \alpha_a)}{1 + R} \quad (33)$$

$$d\epsilon_{3b} = -\varphi_b \frac{d\bar{\epsilon}_b(1 + \alpha_b)}{1 + R} \quad (34)$$

برای محاسبه کرنش‌های حدی ابتدا یک مسیر بارگذاری در منطقه سالم ورق ( $\varphi_a$ ) در نظر گرفته می‌شود. با اعمال یک جزء کرنش برای نمونه ( $d\bar{\epsilon}_a = 0.001$ ) در منطقه  $a$  و جای‌گذاری روابط در معادله تراز نیرو (22) و انجام محاسبات به کمک نرم‌افزار متلب و به روش عددی،  $d\bar{\epsilon}_b$  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 گلوبی به جزء کرنش اعمالی در منطقه سالم ورق ( $d\bar{\epsilon}_b/d\bar{\epsilon}_a$ ) 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 حد شکل‌دهی رسم شده برای آلیاژ E235 می‌باشد.

### 5- مدل‌سازی عددی

مدل شبیه‌سازی شده فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله در شکل 6 نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی از تحلیل اجزای محدود به روش صریح<sup>1</sup> 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<sup>2</sup> 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 نظر گرفته شده است، المان پوسته‌ای دارای دو انحنای 4 گره‌ای S4R<sup>3</sup> انتخاب می‌شود. ابزارهای صلب نیز به صورت اجسام صلب گسسته<sup>4</sup> و با المان‌های 4 گره‌ای صلب R3D4<sup>5</sup> مدل شده است. ماده بکار رفته به صورت همسانگرد<sup>6</sup> و همگن<sup>7</sup> بوده و کار سختی آن همسانگرد فرض می‌شود. ماده الاستیک-پلاستیک لوله نیز از معیار تسلیم ون میسر 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.

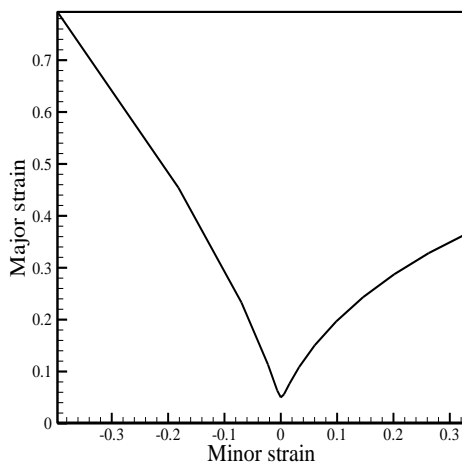


Fig. 5 Forming limit diagram for steels E235

شکل 5 نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد آلیاژی E235

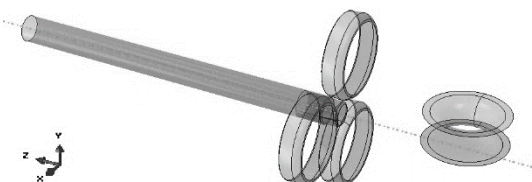


Fig. 6 Numerical model in Abaqus

شکل 6 نمایی از مدل‌سازی عددی در آباکس

<sup>2</sup> Deformable body

<sup>3</sup> 4-node general-purpose shell, reduction integration, hourglass control, finite membrane strain

<sup>4</sup> Discrete rigid body

<sup>5</sup> 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral

<sup>6</sup> Isotropic

<sup>7</sup> Homogeneous

<sup>1</sup> Explicit

مقدار انرژی مصنوعی<sup>۷</sup> باقیمانده در فرایند بسیار کم می باشد. به دلیل کم بودن این انرژی مشکل ساعت شنی<sup>۸</sup> در شبیه سازی به وجود نخواهد آمد [10]. به این نکته نیز می توان اشاره نمود که مقدار انرژی مصنوعی در شبیه سازی انجام شده با مقدار انرژی مصنوعی به وجود آمده در شبیه سازی انجام شده توسط تکایا و همکارانش [10] مقایسه شده است. مقدار این انرژی در شبیه سازی انجام شده کمتر از شبیه سازی انجام شده توسط تکایا و همکارانش می باشد، که می تواند نشان دهنده بهبود شبیه سازی باشد.

برای اطمینان کامل از صحت شبیه سازی انجام شده، به مقایسه نتایج شبیه سازی با کار تجربی تکایا و همکارانش [8]، مربوط به بررسی نمودار نسبت گشتاور خمشی در خم کاری با شکل دهی چرخشی به خم کاری بدون شکل دهی چرخشی پرداخته می شود. برای این امر ابتدا باید پارامتر بی بعد  $v^*$  به عنوان سرعت فرایند به صورت رابطه ی (35) تعریف شود.

$$v^* = \pi \cdot d_0 \cdot \frac{U}{v_f} \quad (35)$$

در رابطه ی (35)،  $U$  سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی بر حسب (rad/s) و  $v_f$  سرعت تغذیه محوری لوله بر حسب (mm/s) می باشد. جنس لوله فولاد آلیاژی E235، شعاع خم کاری 1000 میلی متر، قطر اولیه لوله 40 میلی متر و قطر لوله ی خروجی فرایند 38 میلی متر می باشد. در شکل 7 به مقایسه کار تجربی با نتایج حاصل از کار تحلیلی و شبیه سازی پرداخته شده است.

برای محاسبه نسبت گشتاور خمشی خم کاری به روش تحلیلی از معادله- ی (16) استفاده می شود. در معادلات تحلیلی به دلیل آن که سرعت فرایند در نظر گرفته نشده است، نسبت گشتاور خمشی خم کاری به سرعت وابسته نبوده و همواره ثابت می باشد. اما باید توجه نمود که نتایج تجربی، به سرعت فرایند وابسته بوده و با افزایش سرعت فرایند نسبت گشتاور خم کاری کاهش می یابد. همچنین مقادیر به دست آمده برای نسبت گشتاور خم کاری در حالت تجربی و تحلیلی در سرعت های بالای فرایند تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند.

نتایج حاصل از شبیه سازی به افزایش سرعت واکنش نشان داده و نسبت گشتاور خم کاری کاهش می یابد. مقادیر حاصل از شبیه سازی نیز با نسبت مطلوبی به نتایج تجربی نزدیک می باشند؛ از این رو می توان بیان نمود نتایج مدل سازی عددی قابل اطمینان است.

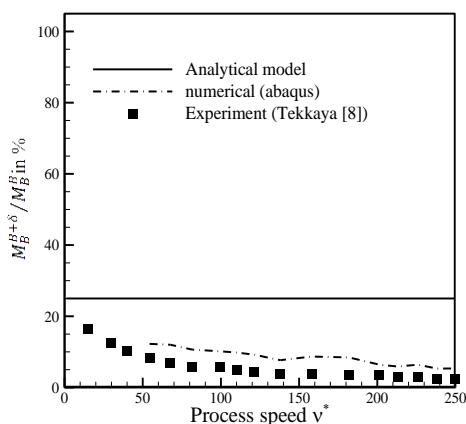


Fig. 7 Comparison of numerical and analytical results with experiment

شکل 7 مقایسه کار تجربی با نتایج حاصل از کار تحلیلی و شبیه سازی

سطح تماس بین لوله و ابزار با استفاده از خصوصیت تماس سطح به سطح<sup>۱</sup> تعریف می شود. همچنین از قیود سینماتیکی<sup>۲</sup> برای توصیف قیدهای مکانیکی به همراه روش پنالتی<sup>۳</sup> برای بهبود محاسبات و افزایش دقت استفاده شده است. رفتار تماسی سطوح در راستای عمودی به صورت تماس سخت<sup>۴</sup> تعریف می شود. مفهوم این نوع تماس این است که سطوحی که در ابتدا از هم جدا هستند، در هنگامی که لقی بین آنها به صفر می رسد با یکدیگر تماس پیدا خواهند کرد و به محض برداشته شدن نیروی تماسی، از یکدیگر جدا می شوند و بدین ترتیب گره موجود در یک سطح نمی تواند در سطح دیگر فرو رود. به منظور شبیه سازی حرکت نسبی سطوح بر روی یکدیگر، از مدل اصطکاک کلمب<sup>۵</sup> برای توصیف رفتار مماسی بین آن ها استفاده می شود.

مختصات نقطه مرجع<sup>۶</sup> برای غلتک های 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 می آید. مختصات نقطه مرجع برای ابزار خم کاری بر روی محور تقارن قطعه واقع شده است. با سرعت دادن به آن در راستای محور x به میزان دلخواه جابه جا 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 می تواند باعث تغییر در نتایج شبیه سازی شود و در فرایند اصلی نیز لوله به وسیله یک پیش برنده به طرف ابزار چرخشی هدایت می شود، برای مقطع انتهایی لوله، سرعتی در راستای محور z- قرار داده شده است. تمام جابه جایی قطعات با این نوع قیود و بارگذاری امکان پذیر می باشد.

فرایند شکل دهی تدریجی لوله با توجه به اینکه برای خم کاری لوله از دو فرایند شکل دهی چرخشی لوله و خم کاری به طور همزمان استفاده می کند، در شبیه سازی مراحل این فرایند به چند قسمت تقسیم شده است. لوله در ابتدای فرایند خارج از غلتک های ابزار چرخشی قرار دارد. هنگامی که فرایند شروع می شود لوله به سمت غلتک های چرخشی حرکت کرده و مرحله ی کاهش قطر اولیه انجام شده تا لوله کاهش قطر داده شده، مقابل ابزار خم کاری قرار گیرد. در مرحله دوم ابزار خم کاری شروع به حرکت می کند. شعاع خم کاری با میزان حرکت ابزار خم کاری تعیین می شود. در این مرحله لوله می تواند ساکن بماند و ابزار خم کاری حرکت خود را انجام دهد و یا لوله نیز در هنگام حرکت ابزار، مقداری پیش روی داشته باشد. مرحله سوم مربوط به میزان زاویه خم کاری می باشد؛ در این مرحله ابزار خم کاری ثابت و بدون حرکت بوده و لوله با پیش روی خود زاویه خم کاری مناسب را تولید می کند. در مراحل دوم و سوم، ابزار شکل دهی با سرعت مورد نظر چرخش دورانی خود را برای کاهش قطر لوله ادامه می دهد.

### 1-5- اعتبار سنجی مدل سازی عددی

برای اینکه بتوان به نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده اطمینان پیدا نمود، باید مواردی را در ابتدا مورد بررسی قرار داد. با توجه به توازن انرژی در نرم افزار آباکس، می بایست مجموع انرژی های فرایند که برابر انرژی کل است، برابر صفر یا مقدار ثابتی شود تا نتایج حاصل از شبیه سازی قابل اعتماد باشد. مقدار انرژی کل در شبیه سازی انجام شده برابر صفر شده است. همچنین

<sup>1</sup> Surface-to-surface contact

<sup>2</sup> Kinematic constraint

<sup>3</sup> Penalty method

<sup>4</sup> Hard contact

<sup>5</sup> Coulomb friction model

<sup>6</sup> Reference point

<sup>7</sup> Artificial Energy

<sup>8</sup> Hourglass

### 6- نتایج و بحث

در مطالعه‌ی حاضر اثر پارامترهای مختلف فرایند شکل دهی 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 شکل دهی چرخشی، سرعت تغذیه محوری در کل فرایند و زاویه‌ی حمله‌ی غلتک‌های ابزار شکل دهی چرخشی بر کیفیت محصول نهایی فرایند شکل دهی تدریجی لوله بررسی می‌شود.

#### 1-6- تأثیر تغذیه محوری در مرحله دوم فرایند

مرحله دوم فرایند، مرحله تعیین میزان شعاع خم کاری است. در این مرحله ابزار خم کاری 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 خم کاری می‌باشد. پارامترهای خم کاری در این بررسی شامل شعاع خم کاری 1000 میلی‌متر، قطر اولیه لوله 40 میلی‌متر، قطر لوله‌ی خروجی فرایند 38 میلی‌متر و سرعت دورانی ابزار شکل دهی 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 خم کاری 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 شکل دهی 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 به وجود می‌آیند، بیان نمود که در معادلات (36) و (37) آورده شده است.

$$\Delta t_t = \frac{t - t'}{t} \quad (36)$$

$$\Delta t_c = \frac{t' - t}{t} \quad (37)$$

در روابط (36) و (37)،  $\Delta t_t$  نسبت نازک‌شدگی،  $\Delta t_c$  نسبت ضخیم‌شدگی،  $t$  ضخامت اولیه لوله و  $t'$  ضخامت لوله بعد از عملیات خم کاری 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.

$$I'_{w0} = |\Delta t_c| - |\Delta t_t| \quad (38)$$

با توجه به شکل 10، ضخامت لایه داخلی لوله با افزایش مقدار  $f_{ss}$  کاهش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که میزان ضخیم‌شدگی در خم کاری 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 خم کاری بدون چروکیدگی را می‌توان انجام داد.

در خم کاری 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 به صورت معادله‌ی (39) بیان می‌شود [12].

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

در معادله‌ی (39)،  $d_{11}$  قطر بزرگ سطح مقطع لوله خم کاری 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 خم کاری، 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 خم کاری شده کاهش می‌یابد.

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

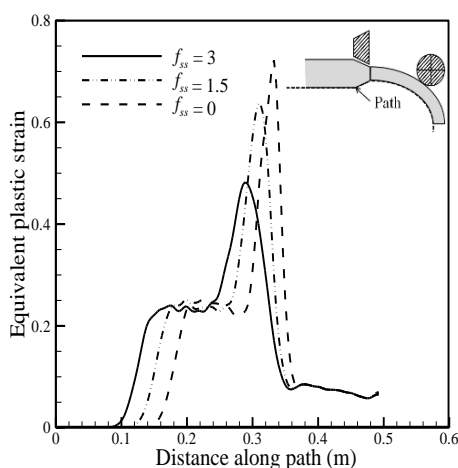


Fig. 8 Comparisons of equivalent plastic strain with different feeds in second step

شکل 8 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با تغذیه‌های مرحله دوم متفاوت



Fig. 9 Sample bending tube with wrinkling

شکل 9 نمونه لوله خم کاری شده با چروکیدگی

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. به عبارتی 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.

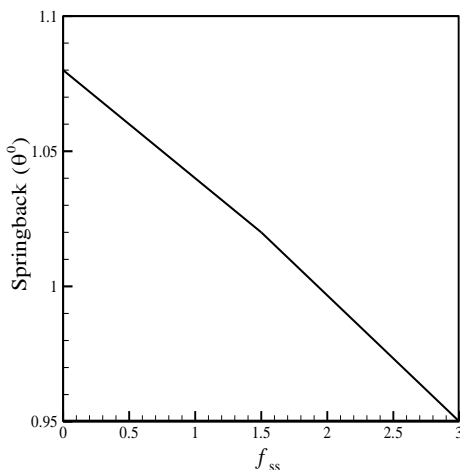


Fig. 12 Effect of feed in second step on springback

شکل 12 تأثیر تغذیه مرحله دوم بر برگشت‌فتری

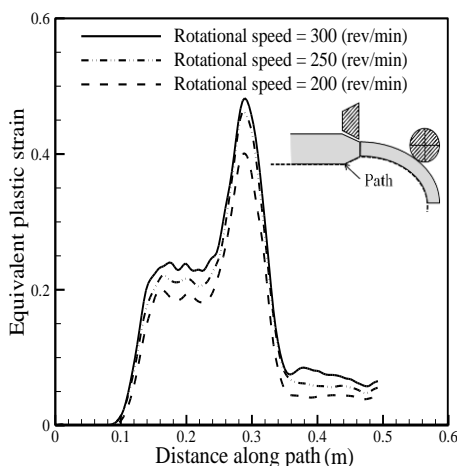


Fig. 13 Comparisons of equivalent plastic strain with different rotational speed

شکل 13 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با سرعت‌های دورانی مختلف

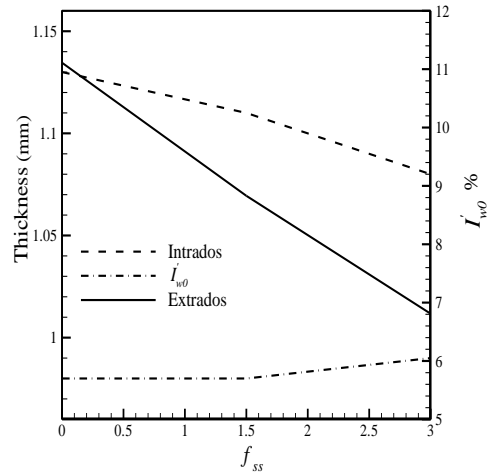


Fig. 10 Comparisons of tube thickness and  $I'_{w0}$  with different feeds in second step

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

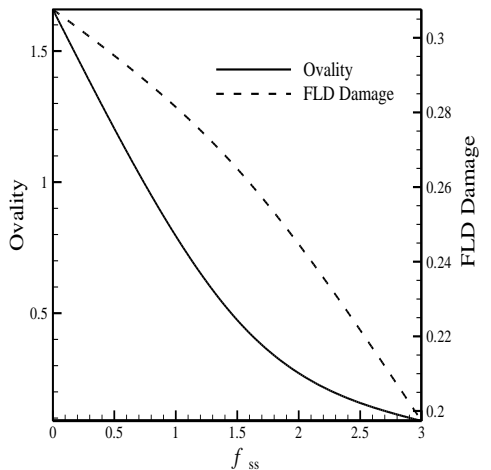


Fig. 11 Effect of feed in second step on Ovality and damage parameters

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 برگشت‌فتری در مرحله باربرداری خواهد شد. این تأثیر  $f_{ss}$  بر روی برگشت‌فتری در شکل 12 قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش مقدار تغذیه در مرحله دوم فرایند خم‌کاری، میزان برگشت‌فتری در مرحله باربرداری فرایند شکل‌دهی تدریجی لوله، کاهش می‌یابد.

## 2-6- 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



می شود با کاهش تغذیه محوری درصد دو پهنی مقطع لوله افزایش می یابد. همچنین با افزایش تغذیه محوری، مقدار پارامتر آسیب افزایش می یابد. با افزایش تغذیه محوری لوله و ثابت ماندن سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی، میزان سطح جاروب شده توسط ابزار شکل دهی چرخشی بر سطح لوله کاهش می یابد و مقطع لوله کاهش قطر یکنواختی پیدا نخواهد کرد. این غیریکنواختی در سطح لوله سبب کرنش های متفاوت در مقاطع مختلف لوله خواهد شد که باعث افزایش پارامتر آسیب در لوله می شود.

با توجه به شکل 20، کاهش تغذیه محوری در فرایند شکل دهی تدریجی لوله، باعث افزایش برگشت فنی 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 خم کاری کاهش می یابد. از آنجا که میزان برگشت فنی رابطه مستقیم با گشتاور خم کاری دارد، میزان برگشت فنی نیز کاهش می یابد. با توجه به بررسی های انجام شده که بیان شد، در انتخاب تغذیه محوری مناسب برای فرایند شکل دهی 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.

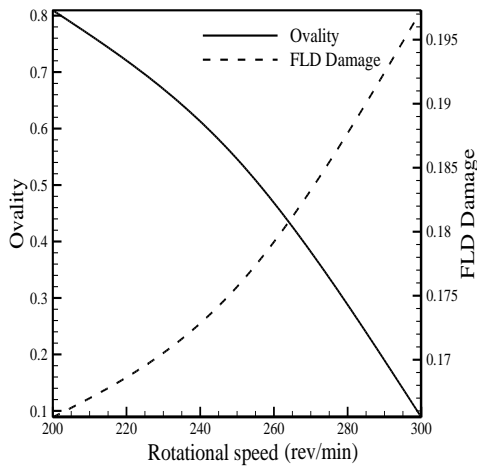


Fig. 15 Effect of the rotational speed on Ovality and damage parameters

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

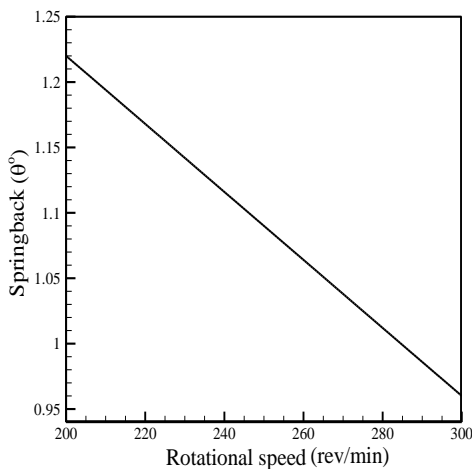


Fig. 16 Effect of the rotational speed on springback

شکل 16 تأثیر سرعت دورانی بر برگشت فنی

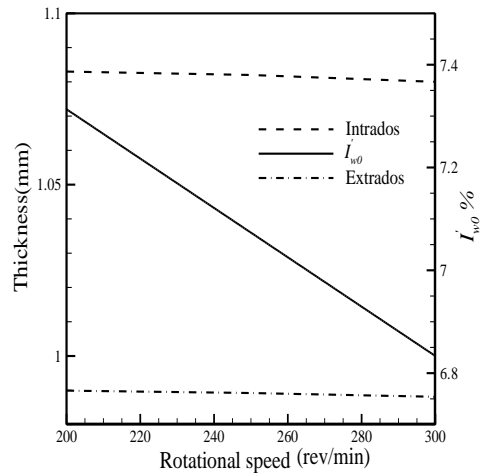


Fig. 14 Comparisons of tube thickness and  $I'_{w0}$  with different rotational speed

شکل 14 مقایسه ضخامت لوله و  $I'_{w0}$  با سرعت های دورانی مختلف

همچنین با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی، مقدار پارامتر آسیب افزایش می یابد. با افزایش سرعت ابزار شکل دهی چرخشی، تعداد برخورد های غلتک های ابزار شکل دهی چرخشی با سطح لوله افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش برخورد موجب تغییر شکل بیشتری در لوله شده و احتمال پارگی در لایه ی خارجی لوله را افزایش می دهد. بنابراین افزایش سرعت دورانی باعث کاهش گشتاور خم کاری مورد نیاز خواهد شد. از آنجایی که میزان برگشت فنی با کاهش گشتاور خم کاری رابطه مستقیم دارد، می توان نتیجه گرفت با کاهش گشتاور خم کاری، برگشت فنی کاهش می یابد. همان طور که در شکل 16 می توان مشاهده نمود، با افزایش سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی، مقدار برگشت فنی بعد از مرحله باربرداری کاهش می یابد.

### 3-6- تأثیر تغذیه محوری لوله

سرعت تغذیه محوری لوله به سمت غلتک های ابزار چرخشی پارامتری تأثیر گذار در کیفیت محصول نهایی است. در هر سه مرحله از فرایند شکل دهی تدریجی لوله، تغذیه محوری وجود دارد.

در این بررسی، سرعت در هر سه مرحله یکسان در نظر گرفته شده است. پارامترهای خم کاری در این بررسی شامل 1000 میلی متر شعاع خم کاری لوله، قطر اولیه لوله 40 میلی متر، قطر لوله ی خروجی فرایند 38 میلی متر، تغذیه مرحله دوم برابر 2 و سرعت دورانی ابزار شکل دهی چرخشی برابر 300 دور در دقیقه، می باشند.

با کاهش سرعت تغذیه محوری لوله، کرنش پلاستیک معادل که در شکل 17 نشان داده شده است، افزایش می یابد. کاهش تغذیه محوری و ثابت ماندن سرعت دورانی ابزار چرخشی باعث افزایش برخورد غلتک ها با لوله می شود که افزایش برخورد باعث افزایش کرنش پلاستیک معادل لوله خواهد شد.

با توجه به بررسی  $I'_{w0}$  در شکل 18 می توان مشاهده نمود با کاهش تغذیه محوری مقدار  $I'_{w0}$  افزایش می یابد. اگرچه افزایش مقدار  $I'_{w0}$  زیاد نبوده، ولی می توان بیان نمود کاهش تغذیه محوری همواره مفید نمی باشد و باید به افزایش احتمال چروکیدگی در کاهش آن توجه نمود. کاهش تغذیه محوری باعث ضخیم شدن لایه داخلی لوله می شود، اما در مقابل از نازک شدن لایه خارجی لوله جلوگیری خواهد کرد. با توجه به افزایش  $I'_{w0}$  افزایش درصد دو پهنی مقطع قابل پیش بینی می باشد. در شکل 19 نیز همین تأثیر مشاهده

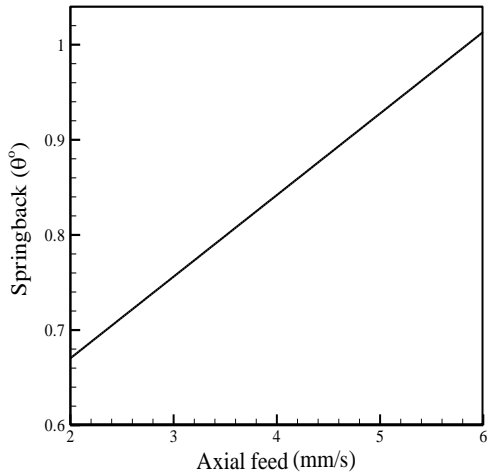


Fig. 20 Effect of axial feed on springback

شکل 20 تأثیر تغذیه محوری بر برگشت‌فتری

#### 4-6- 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 می‌تواند 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

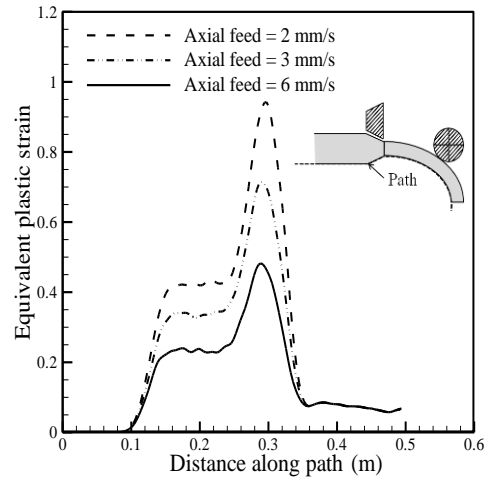


Fig. 17 Comparisons of equivalent plastic strain with different axial feed

شکل 17 مقایسه کرنش پلاستیک معادل با تغذیه‌های محوری مختلف

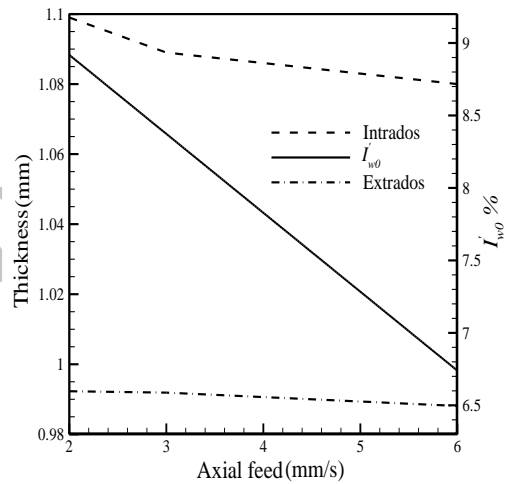


Fig. 18 Comparisons of tube thickness and  $I'_{w0}$  with different axial feed

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

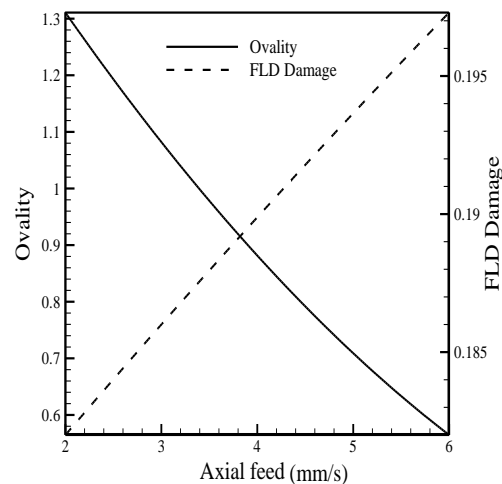


Fig. 19 Effect of axial feed on Ovality and damage parameters

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

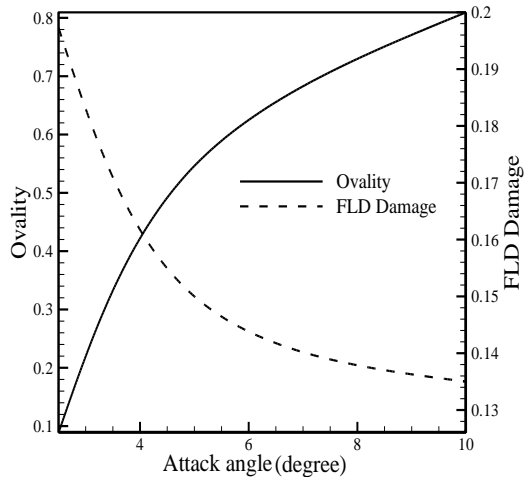


Fig. 23 Effect of attack angle of rollers on the cross-section distortion and damage parameters

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، برگشت‌فتری 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 برگشت‌فتری 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 برگشت‌فتری 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 علائم

$c$  ضریب استحکام ماده (MPa)

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.

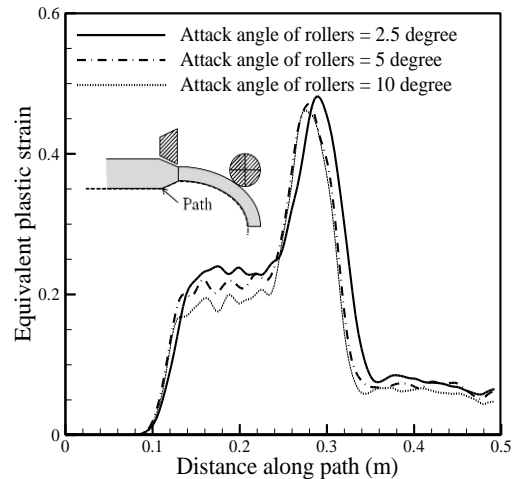


Fig. 21 Comparisons of equivalent plastic strain with different attack angle of rollers

شکل 21 مقایسه‌ی کرنش پلاستیک معادل با زوایای متفاوت حمله غلتک‌ها

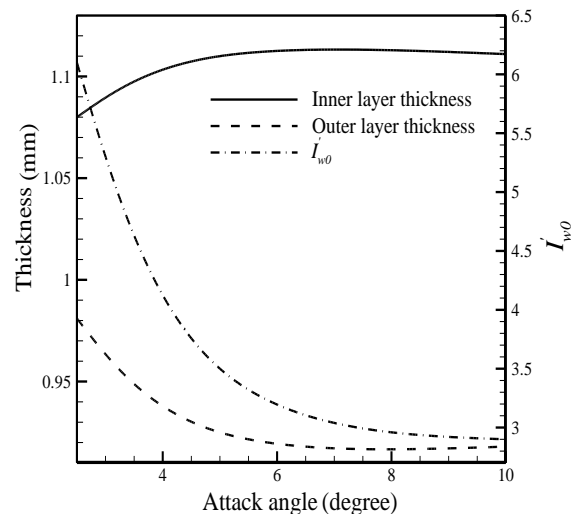


Fig. 22 Comparisons of tube thickness and  $I_{w0}$  with different attack angle of rollers

شکل 22 مقایسه‌ی ضخامت لوله و  $I_{w0}$  با زوایای متفاوت حمله‌ی غلتک‌ها

- 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 Technololog*, 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)
- [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.

$d_0$	قطر اولیه لوله (mm)
$d_1$	قطر لوله پس از کاهش قطر (mm)
$f$	فاکتور نقص
$f_{ss}$	تغذیه مرحله دوم فرایند
$I'_{w0}$	تفاضل بیشترین نسبت نازک‌شدگی و بیشترین نسبت ضخیم‌شدگی
$n$	نمای کار سختی
$M_B^B$	گشتاور خم کاری بدون کاهش قطر لوله (MPa)
$M_B^{B+\delta}$	گشتاور خم کاری با کاهش قطر لوله (MPa)
$R$	شعاع خم کاری (mm)
$t$	ضخامت لوله (mm)
$t'$	ضخامت لوله بعد از خم کاری (mm)
$\gamma$	فاصله از تار خنثی (mm)

علائم یونانی

$\epsilon_\theta$	کرنش محیطی
$\epsilon_z$	کرنش طولی
$\epsilon_r$	کرنش شعاعی
$\eta$	نسبت نرخ کرنش
$\bar{\eta}$	نسبت نرخ کرنش متوسط
$\alpha'$	نسبت تنش محیطی به تنش طولی
$\sigma_\theta$	تنش محیطی (MPa)
$\sigma_z$	تنش طولی (MPa)
$\sigma_f$	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,