کاهش نیروی نامتوازن در فرآیند شکلدهی چرخشی چندغلتکه لوله

با تنظيم موقعيت شعاعي غلتكها

رضا جعفری ندوشن و محمود فرزین ۲ دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان (تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۰ /۹۳/۰۶)

چکیدہ

از مزایای مهم فرآیند شکل دهی چرخشی لوله با چند غلتک، دقت بالای قطعات تولیدی با این فرآیند است. در این فرآیند یکی از عوامل تأثیر گذار بر دقت، تعادل نیرویی بین غلتکها است. درصورتی که نیروی غلتکها در این فرآیند مساوی نباشد مندرل جابهجا شده، باعث کاهش دقت در ضخامت قطعه نهایی می شود. همچنین عدم تساوی نیروی غلتکها باعث کاهش کیفیت سطح محصول می شود. در مقاله حاضر روشی به منظور ایجاد تعادل نیرویی بین غلتکها و افزایش دقت محصول ارائه شده است. به این منظور، در ابتدا نیروی هر غلتک به صورت تابعی از موقعیت شعاعی غلتکها محاسبه می گردد. در ادامه شبیه سازی اجزای محدود این فرآیند در نرمافزار ABAQUS انجام شده و ضرایب لازم در معادلات محاسبه می شوند. سپس موقعیت شعاعی غلتکها به نحوی محاسبه می شود که نیروی غلتکها با هـم مساوی باشد در پاین نیرویی بین غلتکها محاسبه می گردد. در ادامه شبیه سازی اجزای محدود این فرآیند در نرمافزار ABAQUS انجام شده و ضرایب لازم در معادلات محاسبه می شوند. سپس موقعیت شعاعی غلتکها به نحوی محاسبه می شود که نیروی غلتکها با هـم مساوی باشـد و عـدم تعـادل نیرویی بین غلتکها حذف گردد. با حذف نیروی نامتعادل بین غلتکها خیز مندرل و عدم دقت ناشی از آن نیز حذف می شود. در پایان نیـروی اعمالی به مندرل قبل و بعد از اعمال روش بالا مقایسه و نشان داده شده است که با اعمال این روش، میانگین ایـن نیـرو بـه میـزان ۹۲ در کاهش می یابد.

واژههای کلیدی: شکلدهی چرخشی لوله، نامتوازنی نیروی غلتکها، موقعیت شعاعی غلتکها، شبیهسازی اجزای محدود

Reducing Unbalance Force in Multi-Rollers Tube Spinning Process by Adjustment of Rollers Radial Position

R. Jafari Nedoushan and M. Farzin

Department of Mechanical Engineering Isfahan University of Technology (Received: 11 March, 2014; Accepted: 31 May, 2014)

ABSTRACT

An advantage of tube spinning process is high accuracy of products. Balancing forces among rollers is one of the most effective parameters on product accuracy in this process. Unbalance forces cause mandrel deflection that directly reduces product thickness accuracy. Unbalance forces also reduce surface quality of the product. In this paper, a procedure is proposed to omit unbalance forces between rollers and improve product accuracy. For this purpose, rollers forces are calculated as functions of rollers radial positions. Then coefficients of these functions are calculated from FEM simulations by ABAQUS software. Using these functions the radial positions of rollers are obtained such that the unbalance force among rollers is omitted. As a result, the mandrel deflection due to rollers unbalance force is reduced and the accuracy of product is increased. In verifying the method, mandrel force before and after applying the method has been compared and it is observed that this force is reduced by 97 percent.

Keywords: Tube Spinning, Unbalance Force, Rollers Radial Position, Finite Element Simulation

rjafari@cc.iut.ac.ir - استادیار (نویسنده پاسخگو): ۲

۲- استاد: farzin@cc.iut.ac.ir



D	قطر غلتک، m
F	نيرو، N
h	ضخامت ماده ورودی به غلتک، m
t	ضخامت ماده خروجی از غلتک، m
R	شعاع سر غلتک، m
V	سرعت حرکت محوری غلتک، mm/rev
علائم بوناني	

جابهجایی غلتک در جهت شعاعی، m	Δ
ضريب اصطكاك	μ
زاویه حمله غلتک، rad	θ
تنش تسلیم ماده، Pa	σ_y
C	زيرنويس

	سمارہ علیک	i
فبل از تنظیم غلتکها	مربوط به حالت اوليه ف	0
	در جهت شعاعی	r

۱– مقدمه

شکلدهی چرخشی لوله با چند غلتک در تولید اقتصادی قطعات جـدارنازک از اهمیـت زیـادی برخـوردار اسـت. در فرآینـدهای شکلدهی چرخشی، ماده بهصورت موضعی به تسلیم رسیده و ناحیه تسلیم بر روی یک مسیر مارپیچ حرکت کرده و تمام قطعه را شکل میدهد [۱]. برای جلوگیری از خیز مندرل در این فرآیند معمولاً از دو یا سه غلتک بهطور همزمان برای شکل دهـی قطعه استفاده می شود. برای این منظور غلتکها در موقعیت های شعاعی و محوری متفاوتی قرار می گیرند و هر یک از این غلتكها بهطور مجزا بخشى از كاهش ضخامت مطلوب را انجام میدهد. این غلتکها بهنحوی قرار می گیرند که نیروی یکدیگر را خنثی کنند. بنابراین، در شرایطی که نیروی آنها تقریباً مساوی باشد می توان انتظار داشت که نیروی اعمالی به مندرل بسیار کمتر از نیروی هر یک از غلتکها باشد. در فرآیندهایی که از دو غلتک استفادہ می شود ھر یک از غلتک ھا با زاویے ۱۸۰ درجہ روی محیط قطعه قرار می گیرند و زمانی که از سه غلتک استفاده می شود غلتکها با زاویه ۱۲۰ درجه در محیط قطعه قرار می گیرند. شکل ۱ موقعیت غلتکها را در جهات شعاعی و محوری و محیطی در شکلدهی چرخشی با سه غلتک نشان مے دھد.

شکل (۱): موقعیت محیطی، محوری و شعاعی غلتکها در شکلدهی چرخشی سهغلتکه.

در سالهای گذشته تحقیقاتی به منظور محاسبه نیروها و توان در این فرآیند ارائه شده و اثر پارامترهای مختلف فرآیند بر نیرو و توان آن بررسی شده است. در مرجع [۲] حلی بر مبنای خطوط لغزش ارائه شده است ولی تطابق نتایج حل با نتایج تجربی مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیقی [۳] با ارائه یک حل به روش قاچی⁽، نتایج حل با نتایج تجربی مقایسه شده مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز [۴] یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز [۴] یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز [۴] یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز از ای یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز از ای یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز [۴] یک مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز از ای یک مرجع [۲] مقدار بهینه زاویه حمله غلتک نیز برای به حداقل رساندن نیروهای فرایند و همچنین کاهش جمع شدن مواد جلوی غلتک محاسبه شده است [۷].

علاوه بر بررسی نیروها و توان، تلاشهایی برای بیان چگونگی جابهجایی مواد و کرنشهای موجود در فرایند صورت گرفته است. در مرجع [۸] با استفاده از روش خطوط شبکه^۲ به اندازه گیری جابهجایی مواد در جهات مختلف پرداخته شده است. بررسی جابهجایی مواد در این فرایند به کمک روش اجزای محدود نیز انجام شده است [۹]. در مرجع [۱۰] با استفاده از روش اجزای محدود و همچنین انجام آزمایشهای طراحی شده به این منظور کرنشهای موجود در این فرایند بررسی شده است. با اندازه گیری سختی³ نقاط مختلف قطعه نهایی نیز، میزان کرنش معادل در نقاط مختلف محصول نهایی محاسبه شده است. [۱۱]. در مرجع [۲] با فرض ماده به صورت صلب پلاستیک، فرایند به روش اجزای محدود شبیه سازی و میدان تنش و کرنش

- 3- Grid Line
- 4- Hardness

www.SID.ir

¹⁻ Slab Method

²⁻ Stream Function

مسائلی از قبیل رشد قطر داخلی و موجدار شدن سطح قطعه هستند.

گروهی از محققین علاوه بر بررسی نیروها و توان فرایند، به بررسی خصوصیات قطعه نهایی و وابستگی دقت آن به عوامل فرایند پرداختند. در مرجع [۱۳] اثر عوامل مختلف بهویژه نرخ پیشروی، بر قطر داخلی و تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در فلوفرمینگ با چند غلتک بررسی شده است. همچنین عیوب ایجاد شده در قطعه نهایی که ناشی از خصوصیات ماده پیشتولید است، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. گروهی از محققین نیز با اندازه گیری مستقیم عوامل فرایند و بررسی محصول، تأثیر پارامترهای مختلف را بر عیوب ایجاد شده در محصول بررسی نمودند [۱۵]. در پژوهشی عوامل مؤثر بر دقت در قطر داخلی قطعه نهایی بررسی شده و روشی برای تنظیم عوامل فرایند برای رسیدن به دقت در قطر داخلی ارائه شده است [18]. افزایش قطر داخلی با استفاده از روش اجزای محدود نیز بررسی شده است [۱۷]. در مراجع [۱۸ و ۱۹] با استفاده از مدلسازی اجزای محدود و همچنین آزمایش، تأثیر شکل و مسیر غلتکها و نرخ پیشروی بر شکل نهایی قطعه و چگونگی جریان مواد در این فرایند بررسی شده است. در مرجع [۲۰] با آزمایش و با استفاده از روش تاگوچی^۱ تأثیر سرعت چرخش قطعه، نرخ پیشروی و کاهش ضخامت بر حداکثر ازدیاد طول ماده در این فرایند بررسی شده است. اثر امواج آلتراسونیک بر انجام فرآیند و کیفیت قطعات نیز در تحقیقی دیگر بررسی شده است [۲۱].

در تحقیقات گذشته در زمینه دقت محصول، به طور عمده به بررسی رشد قطری قطعات پرداخته شده و در زمینه دقت در ضخامت که یکی از خصوصیات قطعه نهایی است، روش خاصی ارائه نشده است. همچنین در مورد اثر پارامترهای مختلف بر محصول نهایی، اثر تساوی یا عدم تساوی نیروی غلت کها بر خصوصیات قطعه نهایی بررسی نشده است. تنها در مرجع [۲۲] به صورت عملی نیروهای فرآیند اندازه گیری شده است و با تغییر موقعیت غلتکها نیروها متعادل شدهاند.

اگر چه غلتکها در موقعیتهایی قرار می گیرند که نیروی آنها در تعادل باشد، ولی باید در نظر داشت که هر غلتک بهطور کاملاً مجزا عمل می کند و نیروی غلتکها با هم اختلاف دارد. اعمال این نیروی نامتعادل به مندرل سبب خیز آن و خطا

در ضخامت قطعه نهایی میشود. در مرجع [۲۳] روشی ارائه شده است که با استفاده از آن می توان تغییرات ایجاد شده در ضخامت نهایی قطعه را در اثر عدم تساوی نیروی غلتکها محاسبه نمود. در این مرجع همچنین به صورت عملی و نظری نشان داده شده است که عـدم تسـاوی نیـروی غلتـکهـا باعـث تغییرات ضخامت در طول قطعه نهایی میشود. هدف مقاله حاضر حذف کامل نیروی اعمالی به مندرل و تساوی نیروی غلتکهاست. با توجه به اینکه یکی از مزایای مهم این فرآیند تولید قطعات لولهای شکل با دقتی بیش از فرآیندهای معمول است، در مقاله حاضر، مهمترین عامل مؤثر بر دقت این قطعات که خیز مندرل است حذف شده و در نتیجه دقت قطعات افزایش مىيابد. بەمنظور حذف نيروى نامتعادل بين غلتكها موقعيت شعاعی بهینه غلتکها محاسبه می شود. به این منظور، در ابتدا شبیه سازی اجزای محدود فرآیند انجام می گیرد و نیروی هر یک از غلتکها بهعنوان تابعی از موقعیت شعاعی غلتکها محاسبه می گردند. در محاسبه این تابع کلیه پارامترهای فرآیند در نظر گرفته می شود و سیس پارامترهایی که با تغییر موقعیت غلتکها تغییر میکنند بهعنوان متغییرهای تابع در نظر گرفته می شود. با استفاده از این توابع موقعیت شعاعی غلتکها بهنحوی محاسبه می گردد کے نیروی غلت کہا ہا ہم مساوی باشند. تساوی نیروهای اعمالی به غلتکها موجب افزایش عمر اجزای نگهدارنده غلتکها و راهنماهای محوری دستگاه می شود. همچنین تساوی نيروى غلتكها موجب افزايش دقت در قطر داخلي محصول و نيز ايجاد سطحي يكنواخت تر مي شود [٢٢].

۲- تابعیت نیروی اعمالی به غلتکها نسبت به موقعیت شعاعی غلتکها

در این بخش تابعی برای بیان نیروی شعاعی اعمالی به هر غلتک بر حسب موقعیت آن پیشنهاد می شود. با توجه به اینکه برای تساوی نیروهای اعمالی به غلتکها کافی است یکی از مؤلفه های نیرویی غلتکها مساوی باشد [۳]. در مقاله حاضر تنها مؤلف شعاعی بررسی شده است. برای بیان اثر تغییر موقعیت شعاعی غلتکها بر نیروی شعاعی اعمالی به آنها می توان نیروی اعمالی به هر غلتک را به صورت تابعی از جابه جایی غلتکها در راستای شعاع در نظر گرفت. بر اساس تحقیقات گذشته [۵] به طور کلی نیروهای شکل دهی وارد به هر یک از غلتکها به تنش تسلیم قطعه (σ_{y})، سرعت پیشروی (V)، ضخامت ورودی به غلتک نیروی شعاعی اعمالی به غلتک با شماره i، F_{ri} نیروی شعاعی اعمالی به غلتک با شماره i، h_i ضخامت ورودی به غلتک با شماره i و t_i ضخامت خروجی غلتک با شماره i است. چون تغییر در موقعیت شعاعی غلتکها غلتک با شماره i است، میتوان دو جمله اول بسط تیلور تابع بالا را به جای آن در نظر گرفت:

$$\begin{split} F_{ni} &= f\left(h_{oi}, t_{oi}\right) + \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{\left(h_{oi}, t_{oi}\right)} \left(h_{i} - h_{oi}\right) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{\left(h_{oi}, t_{oi}\right)} \left(t_{i} - t_{oi}\right), \end{split}$$
(7)

که در آن، $h_{oi} e_{i} f_{oi}$ ف خامتهای ورودی و خروجی غلت ک شماره i در حالت اولیه بدون درنظر گرفتن جابهجایی غلتکها است. $h_i e_i f_i$ ف خامتهای ورودی و خروجی غلت ک شماره i پس از جابهجایی غلتکها در راستای شعاع بهمنظور رسیدن به موقعیت بهینه است. با جابهجایی هر غلتک در جهت شعاع، ضخامت خروجی از غلتک بههمان مقدار تغییر می کند. بنابراین، اگر غلتک با شماره i بهاندازه Λ_i در جهت شعاع جابهجا شود، می توان نوشت:

$$t_i - t_{oi} = \Delta_i \,. \tag{(f)}$$

با توجه به اینکه ضخامت خروجی از هر غلتک برابـر بـا ضـخامت ورودی به غلتک بعدی است، بـا جابـهجـایی غلتـک بـا شـماره i بهاندازه Δ_i در جهت شعاع ضخامت ورودی به غلتک بعدی نیـز به همین اندازه تغییر میکند:

$$h_{i+1} - h_{oi+1} = \Delta_i \,.$$

با درنظر گرفتن رابطههای (۵- ۳) می توان نیروی اعمالی بـه هـر غلتک را برحسب تغییرات موقعیت شعاعی آن غلتک و همچنـین غلتک قبلی بهصورت زیر نوشت:

$$F_{ri} = f(h_{oi}, t_{oi}) + \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} \Delta_{i-1} + \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} \Delta_{i}.$$
(8)

۳– محاسبه موقعیت بهینه شعاعی غلتکها

(۵)

هدف مقاله حاضر ارائه روشی است که با تنظیم موقعیت غلتکها، نیروی آنها با هم مساوی باشد. به منظور محاسبه موقعیت دقیق غلتکها برای حذف نیروی نامتعادل، در ابتدا کاهش ضخامت توسط غلتکها مساوی قرار داده می شود و نیروی اعمالی به هر غلتک محاسبه می شود. با توجه به تجربیات

$$(\mu)$$
، ضخامت خروجی از غلتک (f) ، ضریب اصطکاک (μ) ،
قطر غلتک (D) ، شعاع سر غلتک (R) و زاویه حمله غلتک
 (θ) وابسته است $[Tee T]$. بنابراین، در رابطه با نیروی شعاعی
اعمالی به هر غلتک میتوان نوشت:
 $F_r = f(h,t, D, R, V, \sigma_y, \theta, \mu)$ (۱)
شکل **۲** عمده پارامترهای بالا را به صورت شماتیک نشان



شکل (۲): پارامترهای مؤثر در شکلدهی چرخشی لوله.

هدف مقاله حاضر ارائـه روشـی در یـک فرآینـد کـه تمـام پارامترهای آن مشخص و ثابت است، موقعیت شعاعی بهینه غلتکها را پیشنهاد دهد. بنابراین، در محاسبه نیروها قطر داخلی و ضخامت پیش تولید، شعاع و زاویه حمله هر یک از غلتکها، اصطکاک بین مندرل و قطعه و سرعت دورانی قطعه ثابت است و تنها با جابهجایی غلتکها در راستای شعاعی، پارامترهای مؤثر بر نیروهای شکلدهی تغییر می کند. با جابهجایی غلتکها در راستای شعاعی، فقط ضخامتهای ورودی به هر غلتک و خروجی از آن و تنش تسلیم متوسط ماده تغییر میکند و بقیه پارامترها ثابت میباشند. در صورتی که از یک موقعیت شعاعی اولیه مناسب بهمنظور شروع محاسبات استفاده شود، باید به هـر غلتـک در راسـتای شـعاع جابـهجـایی کوچکی داد تا به موقعیت بهینه خود برسد. در این حالت تغییر در موقعیت شعاعی غلتکها نسبت به کاهش ضخامت توسط هـر غلتک کوچک است و می توان از تغییر تنش متوسط تسلیم ماده بهدلیل تغییر در کاهش ضخامت توسط هر غلتک صرفنظر نمود. بنابراین، رابطه (۱) را می توان به صورت زیر ساده نموده و برای غلتک با شماره i نوشت:

$$F_{ri} = f(h_i, t_i), \tag{(f)}$$

www.SID.ir

،دهد:

عملی این حالت به حالت تساوی نیرویی بین غلتکها نزدیک است و جابهجاییهای محاسبه شده برای هر غلتک بهمنظ ور رسیدن به تعادل نیرویی کم است. حال برای محاسبه جابهجایی هر غلتک با توجه به کوچک بودن جابهجاییهای مورد نیاز میتوان از رابطه (۶) استفاده نمود. در ادامه، نحوه محاسبه موقعیت بهینه در شکل دهی چرخشی دوغلتکه و سهغلتکه بیان میشود.

۳-۱- شکلدهی چرخشی دوغلتکه

شکل ۳ موقعیت های شعاعی و محوری و محیطی غلتک ها نسبت به مندرل و نیروهای شعاعی اعمالی از طرف غلتک ها به مندرل را در شکل دهی چرخشی دوغلتکه نشان می دهد.



شکل (۳): موقعیت غلتکها و نیروهای اعمالی به مندرل در شکلدهی چرخشی دوغلتکه.

در شکلدهی چرخشی دوغلتکه با در نظر گرفتن اندیس ۱ برای غلتک اول و اندیس ۲ برای غلتک دوم میتوان رابطه (۶) را بهصورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} F_{r1} &= f_1(h_{o1}, t_{o1}) + \frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} \Delta_1 \\ F_{r2} &= f_2(h_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_1. \end{aligned} \tag{Y}$$

در رابطه ذکرشده باید توجه کرد که با توجه به اینکه فاصله شعاعی غلتک آخر تا سطح مندرل بهاندازه ضخامت مطلوب نهایی است، موقعیت غلتک دوم تغییری نمی کند و برای برقراری تساوی بین نیروی غلتکها باید موقعیت غلتک اول را تغییر داد. همچنین ضخامت ورودی به غلتک اول با جابهجایی غلتکها

$$\Delta_{1} = \frac{f_{2}(h_{o2}, t_{o2}) - f_{1}(h_{o1}, t_{o1})}{\frac{\partial f_{1}}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} - \frac{\partial f_{2}}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})}}.$$
(A)

۲-۲- شکلدهی چرخشی سهغلتکه

شکل ۱ موقعیتهای شعاعی و محوری و محیطی غلتکها نسبت به مندرل را در شکلدهی چرخشی سهغلتکه نشان میدهد. در شکلدهی چرخشی سهغلتکه با در نظر گرفتن اندیس ۱ برای غلتک اول، اندیس ۲ برای غلتک دوم و اندیس ۳ برای غلتک سوم می توان رابطه (۶) را به صورت زیر نوشت:

$$F_{r1} = f_1(h_{o1}, t_{o1}) + \frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} \Delta_1$$

$$F_{r2} = f_2(h_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2(h_{o2}, t_{o2})}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_1$$

$$+ \frac{\partial f_2}{\partial t} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_2$$
(9)

$$\partial t |^{(h_{o_2},t_{o_2})\Delta_2}$$

 $F_{r_3} = f_3(h_{o_3},t_{o_3}) + \frac{\partial f_3}{\partial h} |_{(h_{o_3},t_{o_3})} \Delta_2.$
 $F_{r_3} = f_3(h_{o_3},t_{o_3}) + \frac{\partial f_3}{\partial h} |_{(h_{o_3},t_{o_3})} \Delta_2.$
 $F_{r_3} = f_3(h_{o_3},t_{o_3}) + \frac{\partial f_3}{\partial h} |_{(h_{o_3},t_{o_3})} \Delta_2.$
 $F_{r_3} = f_3(h_{o_3},t_{o_3}) + \frac{\partial f_3}{\partial h} |_{(h_{o_3},t_{o_3})} \Delta_2.$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t}\Big|_{(h_{o1},t_{o1})}\Delta_1 - \frac{\partial f_2}{\partial h}\Big|_{(h_{o2},t_{o2})}\Delta_1 - \frac{\partial f_2}{\partial t}\Big|_{(h_{o2},t_{o2})}\Delta_2 = (1 \cdot)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t}\Big|_{(h_{o1},t_{o1})}\Delta_1 - \frac{\partial f_3}{\partial h}\Big|_{(h_{o3},t_{o3})}\Delta_2 = f_3(h_{o3},t_{o3}) - f_1(h_{o1},t_{o1}),$$

۴ – مدلسازی اجزای محدود

در این مقاله برای محاسبه تمامی ضرایب معادلههای (۸ و ۱۰) از شبیهسازی فرآیند در نـرمافـزار ABAQUS اسـتفاده مـی گـردد. کلیه این ضرایب با اندازه گیری عملی نیروها بر روی ماشینهـای شـکلدهـی چرخشـی نیـز قابـل محاسـبهانـد. شـکل ۴ نحـوه شبیهسازی و چگونگی قرار گیری غلتکها نسبت بـه قطعـه را در شبیهسازی نشان میدهد.



برای انجام شبیهسازی از روش حل صریح استفاده شد. قطعه کار در شبیه سازی به صورت جسم قابل تغییر شکل درنظر گرفته شد و از المان سه بعدی هشت گره ای برای شبکه بندی آن استفاده شد [۱۹]. منحنی تنش تسلیم ماده مورد استفاده در شبیه سازی بر حسب کرنش پلاستیک با انجام آزمایش کشش به دست آمد. این منحنی در شکل **۵** نشان داده شده است.



در شبیهسازی، غلتک و مندرل به صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شدهاند و نیاز به شبکه بندی ندارند. به منظور دستیابی به نتایج نزدیک به نتایج تجربی در شبیه سازی، تماس بین غلتک و قطعه بدون اصطکاک در نظر گرفته شد [۱۰ و ۱۸].

در صورتی که تماس بین قطعه و مندرل با اصطکاک مناسب در نظر گرفته شود، تأثیر پدیدههای موجود در فرآیند از جمله جمع شدن مواد جلوی غلتک در محاسبه نیروهای شکلدهی اعمال میشود [۱۵]. مقادیر پارامترهای مؤثر دیگر در فرآیند که در شبیهسازی استفاده شده، در جدول **۱** بیان شده است.

۳۲۰	قطر هر سه غلتک (mm)
۳۰	زاویه حمله هر سه غلتک (Degree)
۴	شعاع سر هر سه غلتک (mm)
۵۴	قطر داخلی قطعه (mm)
24/0	ضخامت پیشتولید (mm)
۱۰/۵	ضخامت قط ع ه نهایی (mm)
87	طول اوليه (mm)
۳۵۰	سرعت چرخش قطعه (rev/min)
•/10	سرعت پیشروی (mm/rev)
۵	کاهش ضخامت اولیه توسط هر غلتک (mm)

جدول (۱): پارامترهای فرآیند در شبیهسازی.

به منظور تحلیل فرآیند از دو گام استفاده گردید. در گام اول قطعه و مندرل به سرعت چرخشی مورد نظر می رسند و در گام بعدی، غلتکها در جهت محوری حرکت داده می شوند. چرخش در قطعه همانند فرآیند واقعی با چرخش مندرل و اصطکاک بین مندرل و قطعه انجام می گیرد. غلتکها نیز به صورت هرز گرد در نظر گرفته شدهاند و با تماس با قطعه شروع به چرخش می کنند.

لازم بهذکر است که صحت نتایج شبیهسازی انجام شده و درستی روش ارتباط نیروها با متغییرهایی مانند ضخامت ورودی به غلتک و خروجی از غلتک توسط نویسندگان به اثبات رسیده است [۲۳ و ۲۵].

شکل ۶ نتیجه شبیهسازی را برای حالتی که کاهش ضخامت توسط هر غلتک ۵ میلیمتر است نشان میدهد. با توجه به این شکل در شبیهسازی مواردی مثل جمع شدن مواد جلوی غلتکها بهوضوح دیده میشود. بنابراین، میتوان گفت که در ضرایب محاسبه شده توسط شبیهسازی پدیدههای تأثیرگذار در مقدار نیروها در نظر گرفته شدهاند. همچنین در شکل ۶ موضعی بودن تنشهای ایجادشده در جسم در حین شکلدهی که از خصوصیات مهم فرآیندهای شکلدهی چرخشی است، بهوضوح دیده میشود.

www.SID.ir



شکل (۶): پیش تولید اولیه و تغییر شکل و میدان تنش در آن پس از پیشروی غلتکها به اندازه ۱۲ میلیمتر در شبیهسازی.

برای بررسی میزان عدم تعادل نیرویی بین غلتکها میتوان نیروی اعمالی به مندرل را در این شبیهسازی بررسی نمود، چرا که با توجه به شکل ۱ میتوان نوشت:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r2} + \vec{F}_{r3}, \tag{11}$$

که در رابطه بالا، \overline{F}_m نیروی شعاعی اعمالی به مندرل در حین فرآیند است. با توجه به این رابط ه، نیروی شعاعی اعمالی به مندرل بیانگر میزان عدم تساوی نیرویی بین غلتکها است. شکل \mathbf{v} نیروی شعاعی اعمالی به مندرل را در شبیهسازی در حالتی که کاهش ضخامت توسط هر سه غلتک مساوی است نشان می دهد. با توجه به این شکل، میانگین نیروی اعمالی به مندرل در حدود ۶۴/۷kN است.



۵- نتایج و بحث لازم بهذکر است که با استفاده از شبیه سازی انجام شده می توان ضرایب لازم در معادلات [۸ و ۱۰] را محاسبه نمود. در این معادلات، برای محاسبه ضرایب (f₁(h₀₁,t₀)، (f₂(h₀₂,t₀) و این معادلات، برای محاسبه ضرایب (f₁(h₀₁,t₀) را محاسبه نمود. در که این معادلات، برای محاسبه ضرایب (f₁(h₀₁,t₀) را محاسبه نمود. در که کاهش ضخامت توسط غلتکها مساوی است در راستای شعاع www.SID.ir

 $\frac{\partial f_2}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}J_{o2})} \Big| \frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}J_{o1})} \Big|_{(h_{o2}J_{o2})} \Big|_{(h_{o2}$

 $\Delta_2 = 0.795 mm$

بنابراین، کاهش ضخامت توسط غلتک اول، دوم و سوم باید به ترتیب ۵/۷۲۹، ۵/۰۶۶ و ۴/۲۰۵ میلیمتر باشد. با قرار دادن غلتکها در این موقعیت نیروی غلتکها با هم مساوی میشود. در شبیهسازی نهایی غلتکها در موقعیت محاسبه شده قرار گرفتند.

محاسبه شده	(1.)	رابطه	در ,	لازم	ضرايب	:(۲)	جدول
	1		. 1	1.			

ب استفاده از سبیدساری.		
مقدار آن	ضريب	
۲۶(kN)	$f_1(h_{o1}, t_{o1})$	
۸۵(kN)	$f_2(h_{o2}, t_{o2})$	
179 (kN)	$f_3(h_{o3}, t_{o3})$	
-۲۵(kN/mm)	$\frac{\partial f_1}{\partial t}\Big _{(h_{o1},t_{o1})}$	
-٣•(kN/mm)	$\frac{\partial f_2}{\partial t}\Big _{(h_{o2},t_{o2})}$	
۲۰(kN/mm)	$\frac{\partial f_2}{\partial h}\Big _{(h_{o2},t_{o2})}$	
۴۰(kN/mm)	$\frac{\partial f_3}{\partial h} _{(h_{o3},t_{o3})}$	

شکل ۸ نیروی شعاعی اعمالی به مندرل را در این حالـت نشـان میدهد. فرآیند خمکاری چرخشی^۲ با چند غلتک نیز استفاده نمود. تساوی نیروهای اعمالی به غلتکها در هر یک از این فرآیندها موجب افزایش عمر اجزای نگهدارنده غلتکها و راهنماهای محوری دستگاه و افزایش کیفیت محصول میشود. همچنین قابل ذکر است که روش ارائه شده در این مقاله به صورتی عملی با اندازه گیری نیرو روی هر یک از محورهای دستگاههای شکل دهی چرخشی (به طور مثال با اندازه گیری فشار هیدرولیک در هر محور) قابل پیاده سازی است. برای پیاده سازی این روش به صورت عملی به یک دستگاه شکل دهی چرخشی با بیش از یک غلتک و استخراج کلیه ضرایب لازم در رابط های (۸ و ۱۰) با انجام آزمایش مورد نیاز است. همچنین می توان تنها نتیجه نهایی روش نظری را در عمل پیاده کرده و دقت قطعات را

۶- نتیجهگیری

در مقاله حاضر روشی ارائه شده که بتوان موقعیت دقیق شعاعی غلتکها را در فرآیندهای شکلدهی چرخشی چندغلتکه به نحوی یافت که نیروی شعاعی اعمالی به هر غلتک با هم مساوی باشد. روابط لازم برای محاسبه موقعیت مناسب غلتکها در شکلدهی با دو و سه غلتک استخراج شد. در ادامه به مدلسازی اجزای محدود فرآیند در نرم افزار ABAQUS پرداخته شده و ضرایب لازم برای معادلات استخراج شده با استفاده از این مدلسازی محاسبه گردید. برای بررسی درستی روش و روابط ارائه شده نیروی اعمالی به مندرل قبل و بعد از اعمال این روش با استفاده از مدلسازی محاسبه گردید. مشاهده اعمالی به مندرل به میزان ۹۷ درصد کاهش خواهد یافت. با دستیابی به تساوی نیروها در این فرآیند علاوه بر افزایش دقت مدر ضخامت و قطر داخلی و افزایش کیفیت سطح محصول، به مر قطعات دستگاه شکلدهی چرخشی نیز افزوده میشود.

۷- مراجع

 Wong, C.C., Dean, T.A. and Lin, J. "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 14, pp. 1419–1435, 2003.

www.SID.ir



Mandrel Force (kN)



با دقت در شکلهای ۷ و ۸ مشاهده می شود که در ۵ ثانیه اول شروع فرآیند، روندی متفاوت در نیروها دیده می شود. دلیل این امر عدم درگیری کامل هر سه غلتک تا این زمان است. پس از گذشت این زمان تا پایان فرآیند که ممکن است تا چند دقیقه طول کشد، نمودارهای نیروها الگوی ثابتی خواهند داشت. نوسانهایی که در این دو شکل پس از زمان ۵ ثانیه دیده می شود نیز به دلیل استفاده از نوع حل صریح در نمودارها مورد توجه قرار گیرد. میانگین نیروی اعمالی به مندرل نمودارها مورد توجه قرار گیرد. میانگین نیروی اعمالی به مندرل در شکل ۷ پس از زمان ۵ ثانیه مقدار kN ۶/۱/ و میانگین این عدد در شکل ۸ مقدار ۸ ا/۱/ – محاسبه گردید. با درنظر گرفتن این اعداد اندازه میانگین نیروی اعمالی به مندرل به

بنابراین با استفاده از روند ارائه شده در این مقاله، نیروی نامتعادلی که بین غلتکها وجود داشت و به مندرل اعمال میشد به میزان زیادی کاهش یافته است. پس با این روش میتوان به دقت بسیار خوبی در ضخامت و قطر داخلی قطعه دست یافت و از طرفی از استهلاک اجزای دستگاه جلوگیری نمود، چرا که نیروی اعمالی به اجزای نگهدارنده مندرل تقریباً به صفر میرسد. همچنین با توجه به اینکه کلیه غلتکها در دستگاه شکلدهی چرخشی بر روی یک میز جابهجا میشوند در صورتی که نیروی غلتکها با هم مساوی باشد به اجزای نگهدارنده این میز نیرویی وارد نمیشود. با توجه به مشابهت زیاد فرآیندهای شکلدهی چرخشی میتوان از روش ارائه شده در اینجا برای خذف خیز مندرل در فرآیند شکلدهی چرخشی برشی' و یا

- Hua, F.A., Yang, Y.S., Zhang, Y.N., Guo, M.H., Tong, W.H., and Hu, Z.Q., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tube Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 168, No. 1, pp. 68–74, 2005.
- Hayama, M. and Kudo, H. "Analysis of Diametrical Growth and Working Forces in Tube Spinning", Bulletin of Japan Society of Mech. Eng., Vol. 22, No.167, pp. 776–784, 1979.
- Kemin, X., Zhen, W., Yan, L., and Xianming, L. "Elasto-Plastic FEM Analysis and Experimental Study of Diametral Growth in Tube Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 69, No's. 1-3, pp. 172-175, 1997.
- Wong, C.C., Lin, J., and Dean, T.A. "Incremental Forming of Solid Cylindrical Components Using Flow Forming Principles", J. Materials Proc. Tech., Vol's. 153-154, No's. 1-3, pp. 153–154, 2004.
- Wong, C.C., Lin, J., and Dean, T.A. "Effects of Roller Path and Geometry on the Flow Forming of Solid Cylindrical Components", J. Materials Proc. Tech., Vol. 167, No's. 2-3, pp. 344-353, 2005.
- Davidson, M.J., Balasubramanianb, K., Tagore, G.R.N. "Experimental Investigation on Flow-Forming of AA6061 Alloy-a Taguchi Approach", j. materials proc. Tech., Vol. 200, No's. 1-3, pp. 283– 287, 2008.
- 21.Rasoli, M.A., Abdullah, A., Farzin, M., Fadaei Tehrania, A., and Taherizadeh, A. "Influence of Ultrasonic Vibrations on Tube Spinning Process", J. Materials Proc. Tech., Vol. 212, No. 2, pp. 1443-1452, 2012.
- 22. Song Zong, H., Le We, M., Chen Shao, C., Gu Wen, b., and Qian Xin, m. "Real Time Deffects Detection in Flow Forming Process", J. Materials Proc. Tech., Vol. 32, pp. 365-370,1992.
- Jafari Nedoushan, R. and Farzin, M. "Effects of Unbalanced Forces on Product Thickness Accuracy in Multi-rollers Flow-Forming", Mechanical & Aero.

J., Vol. 7, No. 2, pp. 22-31, 2012 (In Persian).

- Lee, K.S. and Lu, L. "Experimental Investigation on Flow-Forming of AA6061 Alloy-a Taguchi approach", J. Materials Proc. Tech., Vol. 113, pp. 283–287, 2008.
- Jafari Nedoushan, R. and Farzin, M. "Effects of Pre-Form Thickness Variations on Product Thickness Accuracy in Multi-Rollers Flow-Forming", Amirkabir J. Sci. & Tech., Vol. 44, No. 2, pp. 22-31, 2013 (In Persian).

- Kobayashi, S. and Thomsen, E.G. "Theory of Spin Forging", J. Eng. for Industry, Vol. 81, pp. 485–495, 1961.
- Hayama, M. "Theoretical Study of Tube Spinning", Bulletin of the Faculty of Eng., Yokohama National Univ., Vol. 15, No. 3, pp. 33-48, 1966.
- Park, J.W., Kim, Y.H., and Bae, W.B. "Analysis of Tube Spinning Processes by the Upper Bound Stream Function Method", J. Materials Proc. Tech., Vol. 66, No's 1-3., pp. 195–203, 1997.
- Singhal, R.P., Saxena, P.K., and Prakash, R. "Estimation of Power in the Shear Spinning of Long Tubes in Hard-to-Work Materials", J. Material Proc. Tech., Vol. 23, No. 1, pp. 29-40, 1990.
- Paunoiu, V., Nicoara, D., and Teodorescu, M. "A General Upper Bound Method for Forces Calculation in Tube Spinning Process", Advanced Tech. of Plasticity, vol. 1, No. 1, pp. 19–24, 1999.
- Ma, Z.E. "Optimal Angle of Attack in Tube Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 37, No's. 1-4, pp. 217–280, 1993.
- Mohan, T.R., and Misra, R. "Studies on Power Spinning of Tubes", Int. J. Production Research, Vol. 10, No. 4, pp. 351–364, 1970.
- 9. Kezhi, L., Nanhai, H., Yan, L., and Xue, K. "Research on the Distribution of the Displacement in Backward Tube Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 79, No's. 1-3, pp. 185–188, 1998.
- Mohebbi, M.S. and Akbarzadeh, A. "Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes", J. Materials Proc. Tech., Vol. 210, No. 2, pp. 389-395, 2008.
- Roy, M.J., Klassen, R.J., and Wood, J.T., "Evolution of Plastic Strain During a Flow Forming Process", J. Materials Proc. Tech., Vol. 209, No. 2, pp. 1018– 1025, 2009.
- Xu, Y., Zhang, S.H., Li, P., Yang, K., Shan, D.B., and Lu, Y. "3D Rigid-Plastic FEM Numerical Simulation on Tube Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 113, No's.1-3, pp. 710–713, 2001.
- Kemin, X., Yan, L., Yan, L., and Kezhi, L. "A Study of the Rational Matching Relationships Amongst Technical Parameters in Stagger Spinning", J. Materials Proc. Tech., Vol. 69, No.s. 1-3, pp. 167-171, 1997.
- Rajan, K.M. and Narasimhan, K. "An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes" PFANF8, Vol. 1, No. 5, pp. 69-76, 2001.