

کاهش نیروی نامتوازن در فرآیند شکل‌دهی چرخشی چندغلتکه لوله با تنظیم موقعیت شعاعی غلتک‌ها

رضا جعفری ندوشن^۱ و محمود فرزین^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۱۰)

چکیده

از مزایای مهم فرآیند شکل‌دهی چرخشی لوله با چند غلتک، دقت بالای قطعات تولیدی با این فرآیند است. در این فرآیند یکی از عوامل تأثیرگذار بر دقت، تعادل نیرویی بین غلتک‌ها است. در صورتی که نیروی غلتک‌ها در این فرآیند مساوی نباشد مندرل جابه‌جا شده، باعث کاهش دقت در ضخامت قطعه نهایی می‌شود. همچنین عدم تساوی نیروی غلتک‌ها باعث کاهش کیفیت سطح محصول می‌شود. 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 می‌گردد. در ادامه شبیه‌سازی اجزای محدود این فرآیند در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده و ضرایب لازم در معادلات محاسبه می‌شوند. سپس موقعیت شعاعی غلتک‌ها به نحوی محاسبه می‌شود که نیروی غلتک‌ها با هم مساوی باشد و عدم تعادل نیرویی بین غلتک‌ها حذف گردد. با حذف نیروی نامتعادل بین غلتک‌ها خیز مندرل و عدم دقت ناشی از آن نیز حذف می‌شود. در پایان نیروی اعمالی به مندرل قبل و بعد از اعمال روش بالا مقایسه و نشان داده شده است که با اعمال این روش، میانگین این نیرو به میزان ۹۷ درصد کاهش می‌یابد.

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)

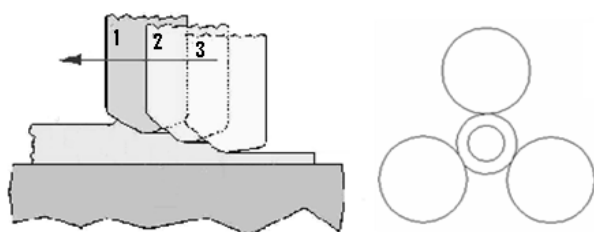
ABSTRACT

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

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

۲- استاد: farzin@cc.iut.ac.ir



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

فهرست علائم

D	قطر غلتک، m
F	نیرو، 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 یونانی

Δ	جابه‌جایی غلتک در جهت شعاعی، m
μ	ضریب اصطکاک
θ	زاویه حمله غلتک، rad
σ_y	تنش تسلیم ماده، Pa

زیرنویس

i	شماره غلتک
o	مربوط به حالت اولیه قبل از تنظیم غلتک‌ها
r	در جهت شعاعی

۱- مقدمه

شکل‌دهی چرخشی لوله با چند غلتک در تولید اقتصادی قطعات جدارنازک از اهمیت زیادی برخوردار است. در فرآیندهای 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 شکل‌دهی قطعه استفاده می‌شود. برای این منظور غلتک‌ها در موقعیت‌های شعاعی و محوری متفاوتی قرار می‌گیرند و هر یک از این غلتک‌ها به‌طور مجزا بخشی از کاهش ضخامت مطلوب را انجام می‌دهد. این غلتک‌ها به‌نحوی قرار می‌گیرند که نیروی یکدیگر را خنثی کنند. بنابراین، در شرایطی که نیروی آنها تقریباً مساوی باشد می‌توان انتظار داشت که نیروی اعمالی به مندرل بسیار کمتر از نیروی هر یک از غلتک‌ها باشد. در فرآیندهایی که از دو غلتک استفاده می‌شود هر یک از غلتک‌ها با زاویه 180° درجه روی محیط قطعه قرار می‌گیرند و زمانی که از سه غلتک استفاده می‌شود غلتک‌ها با زاویه 120° درجه در محیط قطعه قرار می‌گیرند. شکل ۱ موقعیت غلتک‌ها را در جهت شعاعی و محوری و محیطی در شکل‌دهی چرخشی با سه غلتک نشان می‌دهد.

در سال‌های گذشته تحقیقاتی به‌منظور 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 قاجی^۱، نتایج حل با نتایج تجربی مقایسه شده و هم‌خوانی بهتر بین نتایج حل و نتایج تجربی نسبت به حل مرجع [۲] نشان داده شده است. در پژوهش دیگری نیز [۴] یک حد کران بالا با استفاده از روش تابع جریان^۲، پیشنهاد شده است. در مرجع [۵] اثر شعاع سر غلتک نیز در محاسبات در نظر گرفته شده است [۶]. 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^۳ به اندازه‌گیری جابه‌جایی مواد در جهات مختلف پرداخته شده است. بررسی جابه‌جایی مواد در این فرآیند 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 فرآیند بررسی شده است. با اندازه‌گیری سختی^۴ نقاط مختلف قطعه نهایی نیز، میزان کرنش معادل در نقاط مختلف محصول نهایی محاسبه شده است [۱۱]. در مرجع [۱۲] با فرض ماده به‌صورت صلب پلاستیک، فرایند به روش اجزای محدود شبیه‌سازی و میدان تنش و کرنش در قطعه محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده توجیه‌کننده

1- Slab Method
2- Stream Function
3- Grid Line
4- Hardness

در ضخامت قطعه نهایی می‌شود. در مرجع [۲۳] روشی ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان تغییرات ایجاد شده در ضخامت نهایی قطعه را در اثر عدم تساوی نیروی غلتک‌ها محاسبه نمود. در این مرجع همچنین به‌صورت عملی و نظری نشان داده شده است که عدم تساوی نیروی غلتک‌ها باعث 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 می‌یابد. به‌منظور حذف نیروی نامتعادل بین غلتک‌ها موقعیت شعاعی بهینه غلتک‌ها محاسبه می‌شود. به این منظور، در ابتدا شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند انجام می‌گیرد و نیروی هر یک از غلتک‌ها به‌عنوان تابعی از موقعیت شعاعی غلتک‌ها محاسبه می‌گردند. در محاسبه این تابع کلیه پارامترهای فرآیند در نظر گرفته می‌شود و سپس پارامترهایی که با تغییر موقعیت غلتک‌ها تغییر می‌کنند به‌عنوان متغیرهای تابع در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این توابع موقعیت شعاعی غلتک‌ها به‌نحوی محاسبه می‌گردد که نیروی غلتک‌ها با هم مساوی باشند. تساوی نیروهای اعمالی به غلتک‌ها موجب افزایش عمر اجزای نگهدارنده غلتک‌ها و راهنماهای محوری دستگاه می‌شود. همچنین تساوی نیروی غلتک‌ها موجب افزایش دقت در قطر داخلی محصول و نیز ایجاد سطحی یکنواخت‌تر می‌شود [۲۲].

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 می‌شود. با توجه به اینکه برای تساوی نیروهای اعمالی به غلتک‌ها کافی است یکی از مؤلفه‌های نیرویی غلتک‌ها مساوی باشد [۳]. در مقاله حاضر تنها مؤلفه شعاعی بررسی شده است. برای بیان اثر تغییر موقعیت شعاعی غلتک‌ها بر نیروی شعاعی اعمالی به آنها می‌توان نیروی اعمالی به هر غلتک را به‌صورت تابعی از جابه‌جایی غلتک‌ها در راستای شعاع در نظر گرفت. بر اساس تحقیقات گذشته [۵] به‌طور کلی نیروهای شکل‌دهی وارد به هر یک از غلتک‌ها به تنش تسلیم قطعه (σ_p)، سرعت پیشروی (V)، ضخامت ورودی به غلتک

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 پیش تولید است، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. گروهی از محققین نیز با اندازه‌گیری 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 [۱۶]. 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، به‌طور 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 غلتک‌ها بر خصوصیات قطعه نهایی بررسی نشده است. تنها در مرجع [۲۲] به‌صورت عملی نیروهای فرآیند اندازه‌گیری شده است و با تغییر موقعیت غلتک‌ها نیروها متعادل شده‌اند.

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

که در رابطه بالا، 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 کوچک است، می توان دو جمله اول بسط تیلور تابع بالا را به جای آن در نظر گرفت:

$$F_{ri} = f(h_{oi}, t_{oi}) + \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} (h_i - h_{oi}) + \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} (t_i - t_{oi}), \quad (3)$$

که در آن، h_{oi} و t_{oi} ضخامت های ورودی و خروجی غلتک شماره i در حالت اولیه بدون در نظر گرفتن جابه جایی غلتکها است. h_i و t_i ضخامت های ورودی و خروجی غلتک شماره i پس از جابه جایی غلتکها در راستای شعاع به منظور رسیدن به موقعیت بهینه است. با جابه جایی هر غلتک در جهت شعاع، ضخامت خروجی از غلتک به همان مقدار تغییر می کند. بنابراین، اگر غلتک با شماره i به اندازه Δ_i در جهت شعاع جابه جا شود، می توان نوشت:

$$t_i - t_{oi} = \Delta_i. \quad (4)$$

با توجه به اینکه ضخامت خروجی از هر غلتک برابر با ضخامت ورودی به غلتک بعدی است، با جابه جایی غلتک با شماره i به اندازه Δ_i در جهت شعاع ضخامت ورودی به غلتک بعدی نیز به همین اندازه تغییر می کند:

$$h_{i+1} - h_{oi+1} = \Delta_i. \quad (5)$$

با در نظر گرفتن رابطه های (۳-۵) می توان نیروی اعمالی به هر غلتک را بر حسب تغییرات موقعیت شعاعی آن غلتک و همچنین غلتک قبلی به صورت زیر نوشت:

$$F_{ri} = f(h_{oi}, t_{oi}) + \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} \Delta_{i-1} + \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{(h_{oi}, t_{oi})} \Delta_i. \quad (6)$$

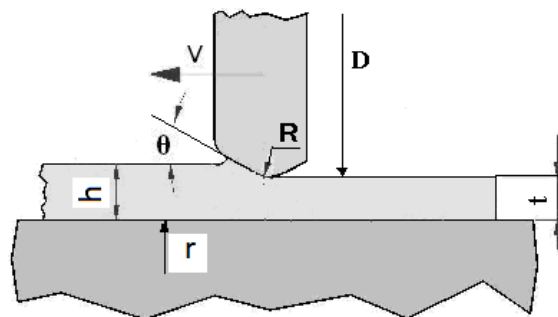
۳- محاسبه موقعیت بهینه شعاعی غلتکها

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

ضخامت خروجی از غلتک (t)، ضریب اصطکاک (μ)، قطر غلتک (D)، شعاع سر غلتک (R) و زاویه حمله غلتک (θ) وابسته است [۳ و ۲۴]. بنابراین، در رابطه با نیروی شعاعی اعمالی به هر غلتک می توان نوشت:

$$F_r = f(h, t, D, R, V, \sigma_y, \theta, \mu) \quad (1)$$

شکل ۲ عمده پارامترهای بالا را به صورت شماتیک نشان می دهد:



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

هدف مقاله حاضر ارائه روشی در یک فرآیند که تمامی 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 جابه جایی غلتکها در راستای شعاعی، پارامترهای مؤثر بر نیروهای شکل دهی تغییر می کند. با جابه جایی غلتکها در راستای شعاعی، فقط ضخامت های ورودی به هر غلتک و خروجی از آن و تنش تسلیم متوسط ماده تغییر می کند و بقیه پارامترها ثابت می باشند. در صورتی که از یک موقعیت شعاعی اولیه مناسب به منظور شروع محاسبات استفاده شود، باید به هر غلتک در راستای شعاع جابه جایی کوچکی داد تا به موقعیت بهینه خود برسد. در این حالت تغییر در موقعیت شعاعی غلتکها نسبت به کاهش ضخامت توسط هر غلتک کوچک است و می توان از تغییر تنش متوسط تسلیم ماده به دلیل تغییر در کاهش ضخامت توسط هر غلتک صرف نظر نمود. بنابراین، رابطه (۱) را می توان به صورت زیر ساده نموده و برای غلتک با شماره i نوشت:

$$F_{ri} = f(h_i, t_i), \quad (2)$$

تغییر نمی‌کند.

با مساوی قرار دادن نیروی هر یک از غلتک‌ها مقدار جابه‌جایی لازم برای غلتک اول به دست می‌آید:

$$\Delta_1 = \frac{f_2(h_{o2}, t_{o2}) - f_1(h_{o1}, t_{o1})}{\frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} - \frac{\partial f_2}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})}} \quad (۸)$$

۳-۲- شکل دهی چرخشی سه غلتکه

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

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

$$F_{r2} = f_2(h_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_1 \quad (۹)$$

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

$$F_{r3} = f_3(h_{o3}, t_{o3}) + \frac{\partial f_3}{\partial h} \Big|_{(h_{o3}, t_{o3})} \Delta_2.$$

با مساوی قرار دادن نیروی هر یک از غلتک‌ها، مقدار جابه‌جایی لازم برای غلتک‌های اول و دوم با حل دو معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} \Delta_1 - \frac{\partial f_2}{\partial h} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_1 - \frac{\partial f_2}{\partial t} \Big|_{(h_{o2}, t_{o2})} \Delta_2 = \quad (۱۰)$$

$$f_2(h_{o2}, t_{o2}) - f_1(h_{o1}, t_{o1})$$

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

$$= f_3(h_{o3}, t_{o3}) - f_1(h_{o1}, t_{o1}),$$

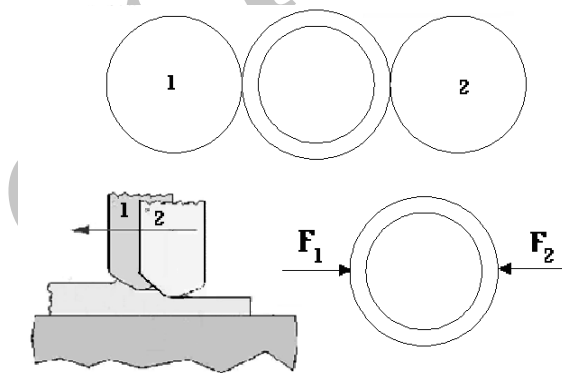
۴- مدل سازی اجزای محدود

در این مقاله برای محاسبه تمامی ضرایب معادله‌های (۸) و (۱۰) از شبیه‌سازی فرآیند در نرم افزار ABAQUS استفاده می‌گردد. کلیه این ضرایب با اندازه‌گیری عملی نیروها بر روی ماشین‌های شکل دهی چرخشی نیز قابل محاسبه‌اند. شکل ۴ نحوه شبیه‌سازی و چگونگی قرارگیری غلتک‌ها نسبت به قطعه را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

عملی این حالت به حالت تساوی نیرویی بین غلتک‌ها نزدیک است و جابه‌جایی‌های محاسبه شده برای هر غلتک به منظور 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 دو غلتکه و سه غلتکه بیان می‌شود.

۳-۱- شکل دهی چرخشی دو غلتکه

شکل ۳ موقعیت‌های شعاعی و محوری و محیطی غلتک‌ها نسبت به مندرل و نیروهای شعاعی اعمالی از طرف غلتک‌ها به مندرل را در شکل دهی چرخشی دو غلتکه نشان می‌دهد.



شکل (۳): موقعیت غلتک‌ها و نیروهای اعمالی به مندرل در شکل دهی چرخشی دو غلتکه.

در شکل دهی چرخشی دو غلتکه با در نظر گرفتن اندیس ۱ برای غلتک اول و اندیس ۲ برای غلتک دوم می‌توان رابطه (۶) را به صورت زیر نوشت:

$$F_{r1} = f_1(h_{o1}, t_{o1}) + \frac{\partial f_1}{\partial t} \Big|_{(h_{o1}, t_{o1})} \Delta_1 \quad (۷)$$

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

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

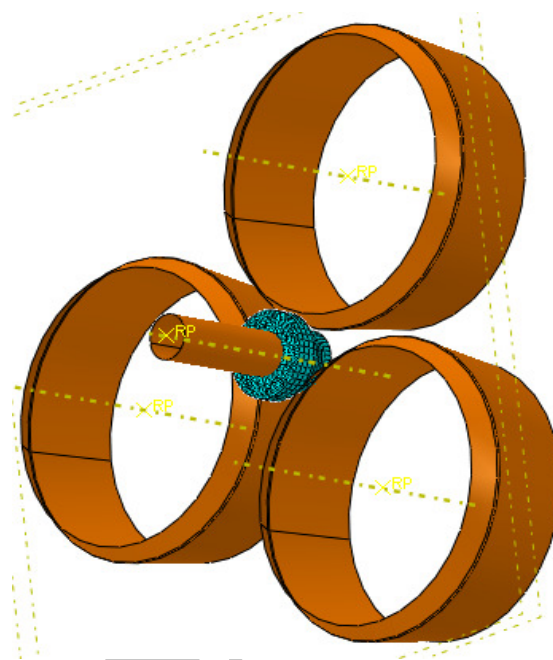
در صورتی که تماس بین قطعه و مندرل با اصطکاک مناسب در نظر گرفته شود، تأثیر پدیده‌های موجود در فرآیند از جمله جمع شدن مواد جلوی غلتک در محاسبه نیروهای شکل‌دهی اعمال می‌شود [۱۵]. مقادیر پارامترهای مؤثر دیگر در فرآیند که در شبیه‌سازی استفاده شده، در جدول ۱ بیان شده است.

جدول (۱): پارامترهای فرآیند در شبیه‌سازی.

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)
۲۴/۵	ضخامت پیش‌تولید (mm)
۱۰/۵	ضخامت قطعه نهایی (mm)
۶۲	طول اولیه (mm)
۳۵۰	سرعت چرخش قطعه (rev/min)
۰/۱۵	سرعت پیشروی (mm/rev)
۵	کاهش ضخامت اولیه توسط هر غلتک (mm)

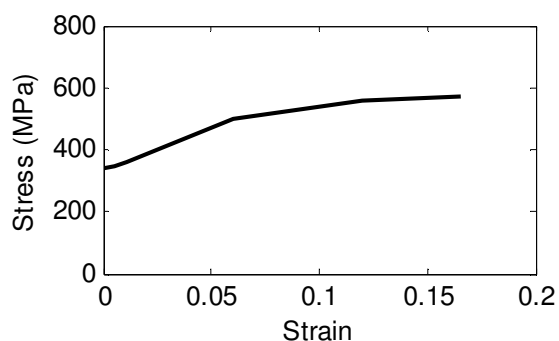
به‌منظور تحلیل فرآیند از دو گام استفاده گردید. در گام اول قطعه و مندرل به سرعت چرخشی مورد نظر می‌رسند و در گام بعدی، غلتک‌ها در جهت محوری حرکت داده می‌شوند. چرخش در قطعه همانند فرآیند واقعی با چرخش مندرل و اصطکاک بین مندرل و قطعه انجام می‌گیرد. غلتک‌ها نیز به‌صورت هرزگرد در نظر گرفته شده‌اند و با تماس با قطعه شروع به چرخش می‌کنند. لازم به‌ذکر است که صحت نتایج شبیه‌سازی انجام شده و درستی روش ارتباط نیروها با متغیرهایی 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 ایجاد شده در جسم در حین شکل‌دهی که از خصوصیات مهم فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی است، به‌وضوح دیده می‌شود.



شکل (۴): موقعیت غلتک‌ها، پیش‌تولید و مندرل و نحوه‌مش‌بندی پیش‌تولید در شبیه‌سازی.

برای انجام شبیه‌سازی از روش حل صریح استفاده شد. قطعه‌کار در شبیه‌سازی به‌صورت جسم قابل تغییر شکل در نظر گرفته شد و از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای برای شبکه‌بندی آن استفاده شد [۱۹]. منحنی تنش تسلیم ماده مورد استفاده در شبیه‌سازی بر حسب کرنش پلاستیک با انجام آزمایش کشش به‌دست آمد. این منحنی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): منحنی تنش تسلیم بر حسب کرنش پلاستیک ماده.

در شبیه‌سازی، غلتک و مندرل به‌صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند و نیاز به شبکه‌بندی ندارند. به‌منظور دستیابی به نتایج نزدیک به نتایج تجربی در شبیه‌سازی، تماس بین غلتک و قطعه بدون اصطکاک در نظر گرفته شد [۱۰ و ۱۸].

محاسبه نمود. برای محاسبه ضرایب $\frac{\partial f_1}{\partial t}|_{(h_{o1}, t_{o1})}$ و $\frac{\partial f_2}{\partial h}|_{(h_{o2}, t_{o2})}$ باید به غلتک اول جابه‌جایی کوچکی داد و با انجام دوباره شبیه‌سازی برای این حالت تغییرات نیروهای غلتک‌های اول و دوم را محاسبه کرد. در این حالت نیروی غلتک سوم تغییری نمی‌کند. برای محاسبه ضرایب $\frac{\partial f_2}{\partial h}|_{(h_{o2}, t_{o2})}$ و $\frac{\partial f_3}{\partial h}|_{(h_{o3}, t_{o3})}$ که فقط در شکل‌دهی چرخشی سه‌غلتکه مورد نیاز می‌باشند، می‌توان به غلتک دوم جابه‌جایی کوچکی داده و تغییرات نیروهای غلتک دوم و سوم نسبت به آن را با شبیه‌سازی مجدد فرآیند محاسبه نمود. در این حالت نیروی غلتک اول تغییری نمی‌کند. ضرایب محاسبه شده برای شکل‌دهی چرخشی سه‌غلتکه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. با جایگذاری این ضرایب در معادله (۱۱) می‌توان میزان جابه‌جایی لازم برای غلتک اول و دوم را برای رسیدن به موقعیت بهینه غلتک‌ها یافت:

$$\Delta_1 = 0.729mm$$

$$\Delta_2 = 0.795mm$$

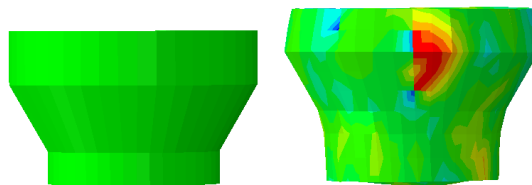
بنابراین، کاهش ضخامت توسط غلتک اول، دوم و سوم باید به ترتیب ۵/۷۲۹، ۵/۰۶۶ و ۴/۲۰۵ میلی‌متر باشد. با قرار دادن غلتک‌ها در این موقعیت نیروی غلتک‌ها با هم مساوی می‌شود. در شبیه‌سازی نهایی غلتک‌ها در موقعیت محاسبه شده قرار گرفتند.

جدول (۲): ضرایب لازم در رابطه (۱۰) محاسبه شده

با استفاده از شبیه‌سازی.

مقدار آن	ضریب
۷۶ (kN)	$f_1(h_{o1}, t_{o1})$
۸۵ (kN)	$f_2(h_{o2}, t_{o2})$
۱۲۶ (kN)	$f_3(h_{o3}, t_{o3})$
-۲۵ (kN/mm)	$\frac{\partial f_1}{\partial t} _{(h_{o1}, t_{o1})}$
-۳۰ (kN/mm)	$\frac{\partial f_2}{\partial h} _{(h_{o2}, t_{o2})}$
۲۰ (kN/mm)	$\frac{\partial f_2}{\partial h} _{(h_{o2}, t_{o2})}$
۴۰ (kN/mm)	$\frac{\partial f_3}{\partial h} _{(h_{o3}, t_{o3})}$

شکل ۸ نیروی شعاعی اعمالی به مندرل را در این حالت نشان می‌دهد.

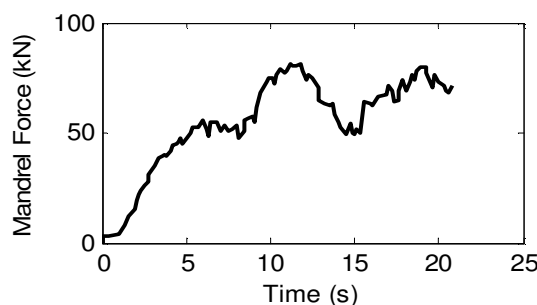


شکل (۶): پیش‌تولید اولیه و تغییر شکل و میدان تنش در آن پس از پیشروی غلتک‌ها به اندازه ۱۲ میلی‌متر در شبیه‌سازی.

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:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r2} + \vec{F}_{r3}, \quad (11)$$

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



شکل (۷): نیروی شعاعی اعمالی به مندرل در طول زمان مدل‌سازی، در حالتی که کاهش ضخامت غلتک‌ها با هم برابر است.

۵- نتایج و بحث

لازم به‌ذکر است که با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده می‌توان ضرایب لازم در معادلات [۸ و ۱۰] را محاسبه نمود. در این معادلات، برای محاسبه ضرایب $f_1(h_{o1}, t_{o1})$ ، $f_2(h_{o2}, t_{o2})$ و $f_3(h_{o3}, t_{o3})$ می‌توان نیروی هر یک از غلتک‌ها را در حالتی که کاهش ضخامت توسط غلتک‌ها مساوی است در راستای شعاع

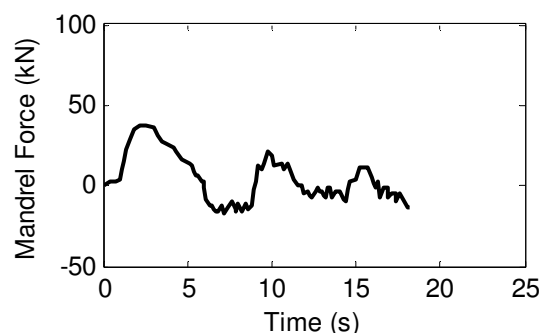
فرآیند خمکاری چرخشی^۲ با چند غلتک نیز استفاده نمود. تساوی نیروهای اعمالی به غلتکها در هر یک از این فرآیندها موجب افزایش عمر اجزای نگهدارنده غلتکها و راهنماهای محوری دستگاه و افزایش کیفیت محصول می‌شود. همچنین قابل ذکر است که روش ارائه شده در این مقاله به صورتی عملی با اندازه‌گیری نیرو روی هر یک از محورهای دستگاه‌های شکل‌دهی چرخشی (به‌طورمثال با اندازه‌گیری فشار هیدرولیک در هر محور) قابل پیاده‌سازی است. برای پیاده‌سازی این روش به صورت عملی به یک دستگاه شکل‌دهی چرخشی با بیش از یک غلتک و استخراج کلیه ضرایب لازم در رابطه‌های (۸ و ۱۰) با انجام آزمایش مورد نیاز است. همچنین می‌توان تنها نتیجه نهایی روش نظری را در عمل پیاده کرده و دقت قطعات را بررسی نمود.

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 شد که با اعمال روش پیشنهادی در این مقاله اندازه نیروی اعمالی به مندرل به میزان ۹۷ درصد کاهش یافت. با دستیابی به تساوی نیروها در این فرآیند علاوه بر افزایش دقت در ضخامت و قطر داخلی و افزایش کیفیت سطح محصول، به عمر قطعات دستگاه شکل‌دهی چرخشی نیز افزوده می‌شود.

۷- مراجع

1. 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.



شکل (۸): نیروی شعاعی اعمالی به مندرل با تنظیم مجدد موقعیت شعاعی غلتکها.

با دقت در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که در ۵ ثانیه اول شروع فرآیند، روندی متفاوت در نیروها دیده می‌شود. 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 می‌شود نیز به دلیل استفاده از نوع حل صریح در ABAQUS است و برای تحلیل بهتر نتایج باید میانگین این نمودارها مورد توجه قرار گیرد. میانگین نیروی اعمالی به مندرل در شکل ۷ پس از زمان ۵ ثانیه مقدار ۶۴/۷ kN و میانگین این عدد در شکل ۸ مقدار ۱/۷ kN- محاسبه گردید. با در نظر گرفتن این اعداد اندازه میانگین نیروی اعمالی به مندرل به میزان ۹۷ درصد کاهش یافته است.

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 حذف خیز مندرل در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی^۱ و یا

15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Davidson, M.J., Balasubramanian, 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 Defects Detection in Flow Forming Process", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 32, pp. 365-370, 1992.
23. 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).
24. 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.
25. 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).
2. Kobayashi, S. and Thomsen, E.G. "Theory of Spin Forging", *J. Eng. for Industry*, Vol. 81, pp. 485-495, 1961.
3. Hayama, M. "Theoretical Study of Tube Spinning", *Bulletin of the Faculty of Eng., Yokohama National Univ.*, Vol. 15, No. 3, pp. 33-48, 1966.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Ma, Z.E. "Optimal Angle of Attack in Tube Spinning", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 37, No's. 1-4, pp. 217-280, 1993.
8. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.