

تأثیر عدم توازن نیروی غلتک‌ها بر دقت ضخامت محصول در فلوفرمینگ با چند غلتک

رضا جعفری ندوشن^۱ و محمود فرزین^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۳۱)

چکیده

از مزایای فرآیند فلوفرمینگ دقت بالای محصولات تولید شده با این نوع فرآیند است. اغلب تحقیقات گذشته به بررسی دقت در قطر محصول در این فرآیند پرداخته‌اند، ولی در زمینه دقت در ضخامت محصول تحقیقات چندانی انجام نشده است. در این مقاله روشی ارائه شده که به بررسی اثر عدم تعادل نیروی غلتک‌ها در دقت در ضخامت محصول می‌پردازد. به این منظور، در ابتدا پارامترهای مؤثر در نیروی هر غلتک شناسایی شده و نیروی غلتک به صورت تابعی از این پارامترها در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه عامل تغییردهنده این پارامترها در حین انجام فرآیند خیز مندرل است، پارامترهای مشخص شده و در نتیجه نیروی غلتک‌ها به صورت تابعی از خیز مندرل محاسبه شده‌اند. در ادامه، چگونگی محاسبه هر یک از ضرائب لازم در این توابع با مدل‌سازی اجزای محدود بیان شده است. با استفاده از این توابع و در نظر گرفتن معادله تعادل بین غلتک‌ها و مندرل، میزان خیز مندرل محاسبه شده است. با معلوم بودن خیز مندرل، خطای ایجاد شده در محصول ناشی از آن نیز محاسبه شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده که بین آن‌ها هم‌خوانی خوبی مشاهده شده است. با استفاده از روش نشان داده شده عدم تعادل نیرویی بین غلتک‌ها موجب تغییرات ضخامت در طول قطعه نهایی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فلوفرمینگ، دقت محصول، نیروی نامتعادل بین غلتک‌ها، سفتی مندرل

Effects of Unbalanced Forces on Product Thickness Accuracy in Multi-rollers Flow-Forming

R. Jafari Nedoushan and M. Farzin

Dep't. of Mech. Eng.

Isfahan Univ. of Tech.

(Received: 26 April, 2010 ; Accepted: 21 May, 2011)

ABSTRACT

An advantage of the flow-forming process is high accuracy of products. Most researches have studied product diametric accuracy, but they have rarely investigated thickness accuracy. In this paper, a procedure is proposed to predict the effects of unbalanced forces on the product thickness accuracy. For this purpose, affecting parameters on roller forces were distinguished and roller forces were assumed as functions of these parameters. Noting that during the process, affecting parameters only change with mandrel deflection, these parameters (and consequently rollers forces) were calculated as functions of mandrel deflections. Functions' coefficients were calculated using finite element method. Considering the force equilibrium of rollers and mandrel and using the above-mentioned functions, the mandrel deflection was calculated. Consequently, product thickness error due to mandrel deflection was calculated. Experiments were also performed to validate the proposed theory. Theoretical and experimental thickness variations follow similar trends. Finally, it was demonstrated that unbalanced forces cause non-uniform thickness along the product's length.

Keywords: Flow-Forming, Product Accuracy, Unbalance Force, Mandrel Stiffness

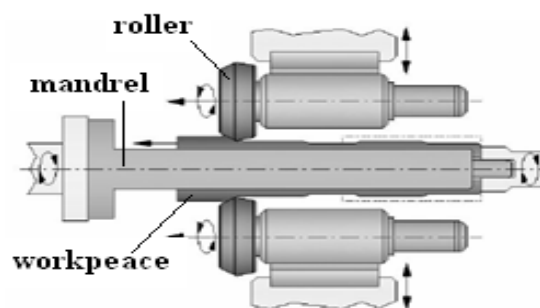
^۱ - دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): r.jafari@me.iut.ac.ir

^۲ - دانشیار: farzin@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

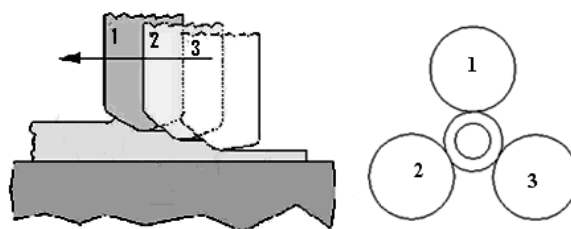
در سال‌های گذشته چندین حل تئوری به‌منظور محاسبه نیروها و توان در این فرآیند ارائه شده و اثر پارامترهای مختلف فرآیند بر نیرو و توان آن بررسی گردیده است. کبایاشی^۲ و تامسون^۳ [۲] حلی را بر مبنای خطوط لغزش^۴ ارائه دادند ولی صحت نتایج حل خود را بررسی نکردند. هایاما^۵ [۳] حلی بر اساس روش قاچی^۶ ارائه داد و نتایج حل را با نتایج تجربی مقایسه نمود و هم‌خوانی بهتری بین نتایج حل خود و نتایج تجربی نسبت به حل کبایاشی مشاهده نمود. پارک^۷ و همکارانش [۴] با استفاده از روش تابع جریان^۸، یک حد کران بالا برای محاسبه توان مورد نیاز برای تغییر شکل و نیروی مماسی مرتبط پیشنهاد دادند. سینگال^۹ و همکارانش [۵] یک عبارت عام برای توان مورد نیاز در فلوفرمینگ با فرض عدم جمع شدن مواد جلوی غلتک پیشنهاد دادند. آنها ضریب اصطکاک بین غلتک و ماده را ثابت فرض کردند که از فرضیات دیگر آنها عدم افزایش قطر بود. پیونیو^{۱۰} و همکارانش [۶] با استفاده از روش کران بالا یک مدل تئوری برای محاسبه نیرو بدست آوردند که علاوه بر پارامترهای در نظر گرفته شده در حل‌های قبلی، اثر شعاع سر غلتک نیز در نظر گرفته شده بود. بر اساس نتایج این مدل تئوری، ایشان نتیجه گرفتند که غلتک‌های تخت نیروی بیشتری نسبت به غلتک‌های گرد تولید می‌کنند. ما^{۱۱} [۷] مقدار بهینه زاویه حمله غلتک را به‌منظور به حداقل رساندن نیروهای فرآیند و همچنین کاهش تجمع مواد جلوی غلتک محاسبه نمود. وی با بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای فرآیند بر زاویه حمله بهینه غلتک، نتیجه گرفت که افزایش قطر غلتک و ضریب اصطکاک، موجب کاهش زاویه حمله بهینه می‌شود و افزایش نرخ پیش‌روی، کاهش ضخامت و ضخامت اولیه، موجب افزایش زاویه حمله بهینه می‌شود.

فرآیند فلوفرمینگ با چند غلتک در تولید اقتصادی قطعات جدارنازک بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از مزیت‌های مهم این فرآیند، تولید قطعات لوله‌ای شکل با دقتی بیش از فرآیندهای معمول است. شکل ۱ اجزاء و حرکت‌های اساسی این فرآیند را نشان می‌دهد. در فرآیندهای فلوفرمینگ، ماده به‌صورت موضعی به تسلیم رسیده و با چرخش قطعه بر روی مندرل و حرکت غلتک، ناحیه تسلیم بر روی یک مسیر مارپیچ^۱ حرکت کرده و تمام قطعه را شکل می‌دهد [۱].



شکل (۱): اجزای لازم برای فرآیند فلوفرمینگ.

با توجه به اینکه در فرآیندهای فلوفرمینگ نیروی غلتک باعث ایجاد خیز در مندرل و تأثیر بر ضخامت نهایی قطعه می‌گردد معمولاً از دو یا سه غلتک به‌طور هم‌زمان برای شکل‌دهی قطعه استفاده می‌شود [۱]. این غلتک‌ها به‌نحوی قرار می‌گیرند که نیروی شعاعی یکدیگر را خنثی کنند. شکل ۲ موقعیت غلتک‌ها را از نظر شعاعی و محوری و محیطی در فلوفرمینگ با سه غلتک نشان می‌دهد.



شکل (۲): موقعیت محیطی، محوری و شعاعی غلتک‌ها در فلوفرمینگ سه‌غلتکه.

- 2- Kobayashi
- 3- Thomsen
- 4- Slip Line
- 5- Hayama
- 6- Slab Method
- 7- Park
- 8- Stream Function
- 9- Singhal
- 10- Paunoiu
- 11- Ma

بررسی نمودند و روشی را برای بهینه کردن پارامترهای فرآیند برای دستیابی به دقت بیشتر ارائه نمودند. راجان^۸ و ناراسیمهان^۹ [۱۴] عیوب ایجاد شده در قطعه نهایی را که ناشی از خصوصیات ماده پیش‌تولید است بررسی کردند. هوآ^{۱۰} و همکارانش [۱۵] با اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای فرآیند و بررسی قطعات نهایی تأثیر پارامترهای مختلف را بر عیوب ایجاد شده در قطعات نهایی بررسی نمودند. هایاما و کادو^{۱۱} [۱۶] عوامل مؤثر بر دقت در قطر داخلی قطعه نهایی را بررسی نموده و روشی برای تنظیم پارامترهای فرآیند به‌منظور رسیدن به دقت در قطر داخلی ارائه دادند. کمین و همکارانش [۱۷] نیز با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی افزایش قطر داخلی در این فرآیند پرداختند. ونگ^{۱۲} و همکارانش [۱۸-۱۹] با استفاده از روش اجزای محدود و هم‌چنین آزمایش، تأثیر شکل، مسیر حرکت غلتک‌ها و نرخ پیش‌روی را بر شکل نهایی قطعه و چگونگی جریان مواد در این فرآیند بررسی کردند. دیویدسن^{۱۳} و همکارانش [۲۰] با آزمایش و با استفاده از روش تاگوچی^{۱۴}، تأثیر سرعت چرخش قطعه، نرخ پیش‌روی و کاهش ضخامت را بر حداکثر ازدیاد طول ماده در این فرآیند بررسی نمودند. در سال‌های اخیر از فرآیند شکل‌دهی چرخشی لوله به‌منظور تولید چرخنده داخلی نیز استفاده شده است و با مدل‌سازی اجزای محدود این فرآیند سعی در بهینه‌سازی آن شده است [۲۱]. هم‌چنین از این فرآیند برای تولید قطعات غیر متقارن محوری نیز استفاده شده است و در این حالت نیز فرآیند مدل‌سازی شده و تأثیر پارامترهای مختلف در انجام فرآیند بررسی گردیده است [۲۲]. در این مرجع دقت ابعادی قطعه تولید شده با انجام آزمایش و هم‌چنین با مدل‌سازی فرآیند بررسی شده است.

تحقیقات گذشته در زمینه دقت محصول نهایی و تأثیر پارامترهای فرآیند بر آن، عمدتاً به بررسی رشد قطری قطعات پرداخته‌اند و در زمینه دقت در ضخامت که یکی از

علاوه بر بررسی نیروها و توان، تلاش‌هایی برای بیان چگونگی جابه‌جایی مواد و کرنش‌های موجود در فرآیند صورت گرفته است. موهان^۱ و میسرا^۲ [۸] با استفاده از روش روش خطوط شبکه^۳ به اندازه‌گیری جابه‌جایی مواد در جهات مختلف پرداخته و چگونگی جریان مواد و کرنش‌های ایجاد شده در فرآیند را بررسی نمودند. سپس کرنش‌های مؤثر و نیروی اعمالی به غلتک را با استفاده از کار تغییرشکل پلاستیک محاسبه کرده و اجزای کرنش را در سه جهت اصلی ارزیابی کردند. آنها عنوان کردند که مقادیر نیروهای شعاعی، محوری و مماسی برای مس خالص تجاری با آزمایش‌هایشان مطابقت داشته است. کزهی^۴ و همکارانش [۹] نیز به بررسی جابه‌جایی مواد در این فرآیند به‌کمک روش اجزای محدود پرداختند. محبی و اکبرزاده [۱۰] با استفاده از روش اجزای محدود و هم‌چنین انجام آزمایش‌های طراحی شده به این منظور به بررسی کرنش‌های موجود در این فرآیند پرداختند. در این آزمایش‌ها با استفاده از یک پین اضافی که مندرل و قطعه را نسبت به هم ثابت می‌کند جهت جریان مواد در این فرآیند بررسی شده و وجود کرنش محیطی محوری در این فرآیند به اثبات رسیده است. روی^۵ و همکارانش [۱۱] با اندازه‌گیری سختی نقاط مختلف قطعه نهایی، به بررسی میزان کرنش معادل در نقاط مختلف قطعه پرداختند. سو^۶ و همکارانش [۱۲] با فرض ماده به صورت صلب پلاستیک، فرآیند را به روش اجزای محدود مدل‌سازی و میدان تنش و کرنش در قطعه را محاسبه نمودند. نتایج بدست آمده توسط ایشان توجیه‌کننده مسائلی از قبیل رشد قطر داخلی و موج‌دار شدن سطح قطعه است.

گروهی از محققین علاوه بر بررسی نیروها و توان فرآیند به بررسی خصوصیات قطعه نهایی و وابستگی دقت آن به پارامترهای فرآیند پرداختند. کمین^۷ و همکارانش [۱۳] اثر پارامترهای مختلف بخصوص نرخ پیش‌روی را بر قطر داخلی و تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در فلو فرمینگ با چند غلتک

8- Rajan
9- Narasimhan
10- Hoa
11- Kudo
12- Wong
13- Davidson
14- Taguchi

1- Mohan
2- Misra
3- Grid Line
4- Kezhi
5- Roy
6- Xu
7- Kemin

مندرل محاسبه شده سپس با استفاده از معادله تعادل بین نیروی غلتک‌ها و مندرل، خیز مندرل و در نتیجه خطای موجود در محصول نهایی محاسبه شده است. با استفاده از روش جدیدی که در این مقاله بیان شده است می‌توان تاثیر عوامل مختلف فرآیند را بر دقت نهایی در ضخامت قطعات بررسی نمود. همچنین این روش قابلیت محاسبه نیروهای اعمالی به مندرل دستگاه شکل‌دهی چرخشی را داراست.

۲- محاسبه تابعیت نیروی هر غلتک به جابه‌جایی

مندرل

به‌طور کلی نیروهای شکل‌دهی وارد به هر یک از غلتک‌ها به جنس قطعه (تنش تسلیم قطعه)، سرعت پیش‌روی (V)، ضخامت ورودی به غلتک (s)، ضخامت خروجی از غلتک (t)، قطر غلتک (D) و زاویه حمله غلتک (θ) وابسته است [۲-۳] و [۵]. این پارامترها در شکل ۳ نشان داده شده است. اصطکاک بین مندرل و قطعه (μ) نیز تأثیر زیادی در پارامترهای مؤثر در این فرآیند دارد [۳]. سرعت چرخش قطعه (ω) نیز تأثیر زیادی در چگونگی انجام این فرآیند دارد [۲۰]. گروهی از محققین [۶ و ۱۲] تأثیر شعاع سر غلتک (R) را نیز بر فرآیند بررسی نمودند. بنابراین در رابطه با نیروی شعاعی اعمالی به هر غلتک می‌توان نوشت:

$$F_r = f(s, t, D, V, \sigma, \theta, \mu, \omega, R). \quad (1)$$

هدف در این مقاله، مشخص کردن تابعیت نیروها به جابه‌جایی مندرل است. بنابراین در محاسبه نیروها، قطر داخلی، ضخامت پیش‌تولید، قطر، زاویه حمله و شعاع سر هر یک از غلتک‌ها، اصطکاک بین مندرل و قطعه و سرعت دورانی قطعه ثابت است و با خیز مندرل، فقط ضخامت‌های ورودی و خروجی هر غلتک و تنش تسلیم متوسط ماده تغییر می‌کند و بقیه پارامترها ثابت‌اند. تنش تسلیم متوسط ماده نیز تابعی از کرنش پلاستیک انجام شده در فرآیند است که به ضخامت‌های خروجی و ورودی هر غلتک بستگی دارد. با توجه به اینکه خیز الاستیک مندرل بسیار کوچک است می‌توان گفت تغییر ضخامت‌های ورودی و خروجی به هر غلتک نیز بسیار کم است. در این مقاله از تغییرات کرنش پلاستیک و به

خصوصیات قطعه نهایی است روش خاصی ارائه نشده است. در عمل در ابتدا قطعات آزمایشی اولیه تولید شده و با اندازه‌گیری ابعاد آن‌ها پارامترهای فرآیند اصلاح می‌گردند. در مورد ضخامت نیز با اندازه‌گیری ضخامت قطعات آزمایشی، موقعیت غلتک‌ها مجدداً به نحوی تنظیم می‌گردد که خطای موجود در ضخامت قطعه به حداقل ممکن کاهش یابد. به‌عنوان مثال در صورتی که در ضخامت قطعه آزمایشی 0.05 میلی‌متر خطا وجود داشته باشد با جابه‌جایی غلتک سوم در جهت شعاعی به اندازه 0.05 میلی‌متر این خطا به میزان زیادی کاهش می‌یابد. در صورتی که خطای موجود در ضخامت قطعات در تمام طول قطعه یکسان باشد می‌توان با تنظیم مجدد موقعیت شعاعی غلتک‌ها دقت کل قطعه را بهبود بخشید ولی در عمل خطای موجود در ضخامت قطعه در طول آن متغیر است. در این مقاله، با بررسی دقت در ضخامت در طول قطعات، علاوه بر فهم بهتر تأثیر پارامترهای قطعه و مندرل بر تغییرات ضخامت در طول، روش بهبود آن نیز پیشنهاد شده است. به این منظور روشی ارائه شده که عدم دقت در ضخامت قطعه نهایی را که ناشی از خیز مندرل به دلیل عدم توازن نیروی غلتک‌ها است پیش‌بینی می‌نماید. با استفاده از این روش جدید می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند بر دقت در ضخامت محصول را پیش‌بینی نمود. همچنین با این روش می‌توان اثرات جابه‌جایی الاستیک مندرل بر فرآیند را بررسی نمود.

چون هر غلتک به طور کاملاً مجزا عمل می‌کند معمولاً نیروی غلتک‌ها با هم اختلاف دارد. اگرچه با تنظیم صحیح پارامترهای فرآیند می‌توان این اختلاف را تا حد زیادی کاهش داد ولی همچنان اختلاف کمی بین نیروی غلتک‌ها وجود دارد. هر چه این اختلاف بیشتر باشد عدم تعادل نیرویی بین غلتک‌ها بیشتر بوده و اعمال این نیروی نامتعادل به مندرل سبب جابه‌جایی بیشتر آن و خطا در قطعه نهایی می‌شود. در بررسی اثر نیروی غلتک‌ها در خطای نهایی در محصول، از مدل‌سازی و تقریب نیروها و به موازات آن از نتایج تجربی استفاده شده و در نهایت ضخامت قطعه نهایی محاسبه شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. چون اعمال نیروی نامتعادل به مندرل، موجب خیز مندرل و تغییر نیروها می‌شود در ادامه ابتدا نیروی هر غلتک به صورت تابعی از خیز

$$F_{r2} = f_2(s_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s} (s_2 - s_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t} (t_2 - t_{o2}), \quad (2-4)$$

$$F_{r3} = f_3(s_{o3}, t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t} (t_3 - t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s} (s_3 - s_{o3}). \quad (3-4)$$

چون جهت و مقدار جابجایی مندرل مشخص نیست می‌توان جابه‌جایی مندرل را به‌صورت برداری نامعین در صفحه به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\vec{\delta} = a\vec{i} + b\vec{j}. \quad (5)$$

با توجه به شکل ۲ تغییر ضخامت خروجی از غلتک اول همان تغییر ضخامت ورودی به غلتک دوم است از طرفی با توجه به شکل ۴ این تغییر ضخامت با تصویر بردار جابه‌جایی مندرل بر بردار \vec{F}_1 برابر است بنابراین می‌توان نوشت:

$$(t_1 - t_{o1}) = (s_2 - s_{o2}) = \vec{\delta} \cdot \vec{n}_1 = (ai + bj) \cdot (-j) = -b. \quad (6)$$

در رابطه فوق، \vec{n}_1 بردار یکه در راستای \vec{F}_1 است. به همین ترتیب می‌توان نوشت:

$$(t_2 - t_{o2}) = (s_3 - s_{o3}) = \vec{\delta} \cdot \vec{n}_2 = (ai + bj) \cdot (0.866i + 0.5j) = 0.866a + 0.5b, \quad (7)$$

$$(t_3 - t_{o3}) = \vec{\delta} \cdot \vec{n}_3 = (ai + bj) \cdot (-0.866i + 0.5j) = -0.866a + 0.5b. \quad (8)$$

در روابط فوق \vec{n}_2 بردار یکه در راستای بردار \vec{F}_2 و \vec{n}_3 بردار یکه در راستای بردار \vec{F}_3 است. با استفاده از رابطه (۸) می‌توان خطای موجود در ضخامت نهایی قطعه، ناشی از جابجایی مندرل را نیز محاسبه نمود. با جای‌گذاری روابط (۶-۸) در روابط (۴) می‌توان نیروی هر غلتک را به‌صورت تابعی از جابه‌جایی مندرل محاسبه نمود.

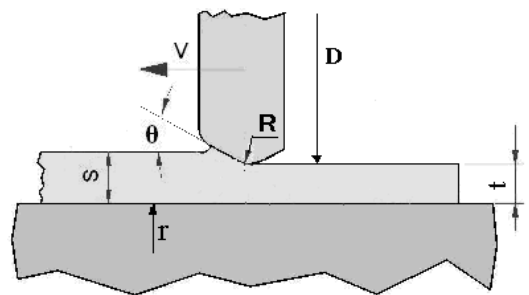
تبع آن تغییرات تنش تسلیم متوسط ماده در زیر هر غلتک به دلیل این جابه‌جایی صرف‌نظر می‌شود. پس می‌توان گفت که تنش تسلیم نیز تابعی از جابه‌جایی الاستیک مندرل نیست. بنابراین، رابطه (۱) را می‌توان به‌صورت زیر ساده نموده و برای غلتک با شماره i نوشت:

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

چون برای رسیدن به دقت منطقی در ضخامت قطعات نهایی جابه‌جایی الاستیک مندرل باید به اندازه کافی کوچک باشد می‌توان بسط تیلور تابع فوق را به‌جای آن به صورت زیر در نظر گرفت:

$$F_{ri} = f(s_{oi}, t_{oi}) + \frac{\partial f(s_{oi}, t_{oi})}{\partial s} (s_i - s_{oi}) + \frac{\partial f(s_{oi}, t_{oi})}{\partial t} (t_i - t_{oi}). \quad (3)$$

در رابطه فوق، s_{oi} و t_{oi} ضخامت‌های ورودی و خروجی غلتک شماره i بدون در نظر گرفتن جابه‌جایی مندرل است.



شکل (۳): پارامترهای مؤثر در نیروی اعمالی به غلتک در شکل‌دهی چرخشی.

در فلوفرمینگ سه غلتک با در نظر گرفتن اندیس ۱ برای غلتک اول، اندیس ۲ برای غلتک دوم و اندیس ۳ برای غلتک سوم، می‌توان رابطه (۳) را به صورت زیر نوشت:

$$F_{r1} = f_1(s_{o1}, t_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial s} (s_1 - s_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t} (t_1 - t_{o1}), \quad (1-4)$$

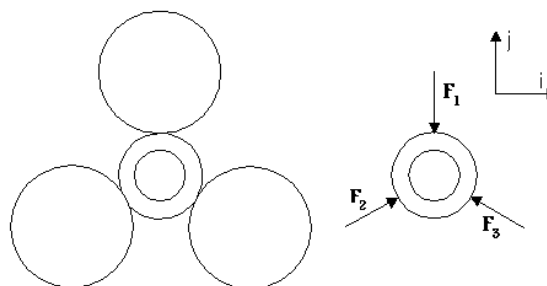
۳- نیروی اعمالی به مندرل

با توجه به شکل ۴ با در نظر گرفتن تعادل مندرل، معادله برداری زیر را بین نیروی سه غلتک و نیروی مندرل می‌توان نوشت:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F}_m \quad (۹)$$

در رابطه فوق \vec{F}_m نیرویی است که به مندرل اعمال می‌شود و می‌توان آن را بر حسب سفتی^۱ و جابه‌جایی مندرل نوشت:

$$\vec{F}_m = K\vec{\delta} = K(a\vec{i} + b\vec{j}) \quad (۱۰)$$



شکل (۴): نیروهای شعاعی اعمالی به مندرل از طرف غلتک‌ها.

با جای‌گذاری معادلات (۴) و (۱۰) در رابطه (۹) یک معادله برداری بدست می‌آید. مولفه‌های این معادله برداری را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned} & -Kb - f_1(s_{o1}, t_{o1}) - \frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t} (t_1 - t_{o1}) \\ & + 0.5(f_2(s_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s} (s_2 - s_{o2}) \\ & + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t} (t_2 - t_{o2}) + f_3(s_{o3}, t_{o3}) \\ & + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t} (t_3 - t_{o3}) + \\ & + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s} (s_3 - s_{o3})) = 0, \end{aligned} \quad (۱-۱۱)$$

$$\begin{aligned} & -Ka + 0.866(f_2(s_{o2}, t_{o2}) \\ & + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s} (s_2 - s_{o2}) \\ & + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t} (t_2 - t_{o2}) - f_3(s_{o3}, t_{o3}) \\ & - \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t} (t_3 - t_{o3}) \\ & - \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s} (s_3 - s_{o3})) = 0. \end{aligned} \quad (۲-۱۱)$$

با حل هم‌زمان معادلات (۱۱) جابه‌جایی مندرل و ضخامت نهایی قطعه به دست می‌آید.

۴- محاسبه ضرایب لازم

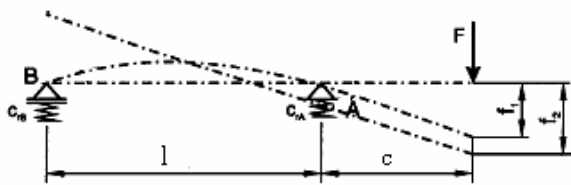
در این مقاله برای محاسبه ضرایب مربوط به نیروی غلتک‌ها در معادلات (۱۱)، از مدل‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. شکل ۵ نحوه مدل‌سازی و چگونگی قرارگیری غلتک‌ها نسبت به قطعه را در مدل‌سازی نشان می‌دهد. برای حل از روش حل صریح استفاده شد. قطعه کار در مدل‌سازی به صورت جسم قابل تغییر فرم در نظر گرفته شده و از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای برای مش‌بندی آن استفاده شد [۹]. غلتک‌ها و مندرل به صورت اجسام صلب تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند و نیاز به مش‌بندی ندارند. در مدل‌سازی، مقدار هر یک از پارامترهای فرآیند مطابق با مقدار آن در آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مقدار پارامترهای فرآیند در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای فرآیند در آزمایش و مدل‌سازی.

۲۲۰	قطر هر سه غلتک (mm)
۳۰	زاویه حمله غلتک اول و دوم (degree)
۱۵	زاویه حمله غلتک سوم (degree)
۴	شعاع سر هر سه غلتک (mm)
۱۰۰	قطر داخلی قطعه (mm)
۵/۸۵	ضخامت اولیه قطعه (mm)
۴/۶	ضخامت ورودی به غلتک دوم (mm)
۳/۳۵	ضخامت ورودی به غلتک سوم (mm)
۲/۱۸	ضخامت نهایی قطعه (mm)
۱۷/۸	طول اولیه (mm)
۴۶/۷	طول نهایی (mm)
۳۵۰	سرعت چرخش قطعه (rev/min)
۰/۱۵	سرعت پیش‌روی (mm/rev)

1 - Stiffness

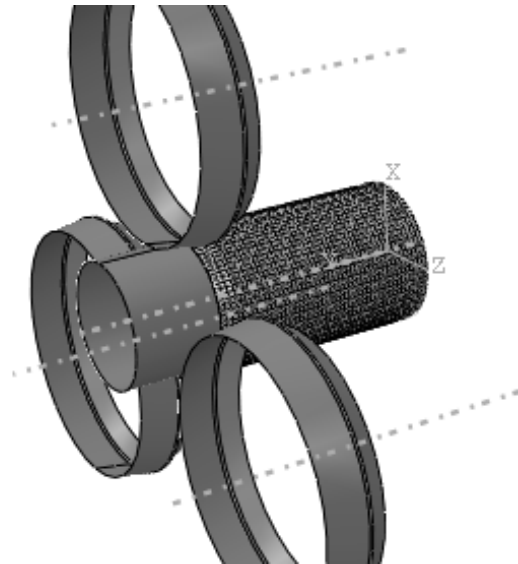
می‌توان به غلتک دوم جابه‌جایی کوچکی داده $\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s}$ تغییرات نیروهای غلتک دوم و سوم نسبت به آن را محاسبه نمود. در این حالت نیروی غلتک اول تغییری نمی‌کند. برای محاسبه ضریب $\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t}$ نیز می‌توان به غلتک سوم جابه‌جایی کوچکی داده تغییرات نیروی آن را محاسبه نمود. پارامتر دیگری که برای حل معادلات (۱۱) باید محاسبه شود سفتی مندرل است که باید در هر نقطه از مندرل محاسبه گردد. شکل ۷ طرحی ساده از مندرل و اسپیندل را نشان می‌دهد. به منظور محاسبه سفتی مندرل جابه‌جایی آن به ازای نیروی معلوم محاسبه می‌شود. برای ساده‌سازی محاسبه جابه‌جایی مندرل با توجه به شکل ۷ تغییر مکان‌های ناشی از تغییر شکل یاتاقان‌های غلتشی (f_2) و ناشی از خمش اسپیندل (f_1) را می‌توان به‌طور جداگانه محاسبه کرد و در نهایت f_1 و f_2 را با هم جمع کرد [۲۳]. جزئیات محاسبه هر یک از این تغییر شکل‌ها در مرجع [۲۳] بیان شده است.



شکل (۷): نمای ساده شده اسپیندل و تغییر شکل‌های آن [۲۳].

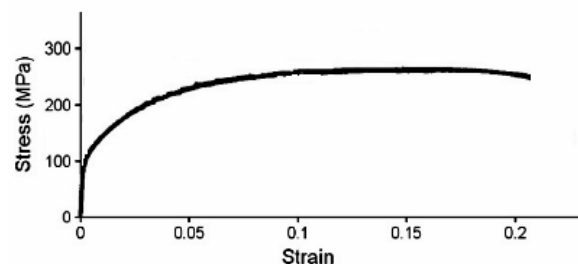
۵- روش آزمایش و اندازه‌گیری ضخامت

به منظور بررسی عملی تأثیر عدم تساوی نیروی غلتک‌ها بر ضخامت قطعه نهایی، کاهش ضخامت در هر غلتک طبق داده‌های جدول ۱ در نظر گرفته شد. در این حالت نیروی غلتک‌ها با هم مساوی نیست. پس از انجام آزمایش، ضخامت نقاط مختلف در طول قطعه نهایی اندازه‌گیری شد. چون سفتی مندرل در طول آن تغییر می‌کند با اندازه‌گیری ضخامت در طول محصول می‌توان تأثیر سفتی مندرل بر ضخامت نهایی را نیز بررسی نمود. شکل ۸ پیش‌تولید و محصول نهایی را نشان می‌دهد.



شکل (۵): موقعیت غلتک‌ها و قطعه در مدل‌سازی.

همچنین، معادله رفتاری ماده مورد استفاده در آزمایش که آلومینیوم ۷۰۷۵ است با استفاده از داده‌های آزمایش کشش در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ منحنی تنش-کرنش این ماده را در دمای محیط نشان می‌دهد.



شکل (۶): منحنی تنش-کرنش ماده مورد استفاده در آزمایش در دمای محیط.

برای محاسبه ضرایب $f_1(s_{o1}, t_{o1})$ ، $f_2(s_{o2}, t_{o2})$ و $f_3(s_{o3}, t_{o3})$ در معادلات (۱۱) می‌توان نیروی هر یک از غلتک‌ها را در راستای شعاع محاسبه نمود. برای محاسبه ضرایب $\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t}$ و $\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s}$ باید به غلتک اول جابه‌جایی کوچکی داده و تغییرات نیروهای غلتک‌های اول و دوم نسبت به آن را محاسبه کرد. در این حالت، نیروی غلتک سوم تغییری نمی‌کند. برای محاسبه ضرایب $\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t}$ و



شکل (۱۰): نحوه اندازه‌گیری ضخامت در نقاط مختلف قطعه با استفاده از دستگاه نشان داده شده در شکل ۹.



شکل (۸): نمونه‌ای از پیش‌تولید و قطعه نهایی تولید شده.

شکل ۹ دستگاهی که برای اندازه‌گیری ضخامت محصول نهایی استفاده شده است را نشان می‌دهد. در این وسیله از ساعت اندازه‌گیری با دقت ۱ میکرون استفاده شده است. شکل ۱۰ چگونگی استفاده از این دستگاه به منظور اندازه‌گیری ضخامت در نقاط مختلف قطعه نشان داده شده است.

۶- نتایج و بحث

برای بررسی روش ارائه شده، تغییرات ضخامت در طول قطعه آزمایش شده با استفاده از این روش محاسبه گردید. کلیه ضرایب لازم برای حل معادلات (۱۱) با مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه شده و در جدول ۲ بیان گردیده است.

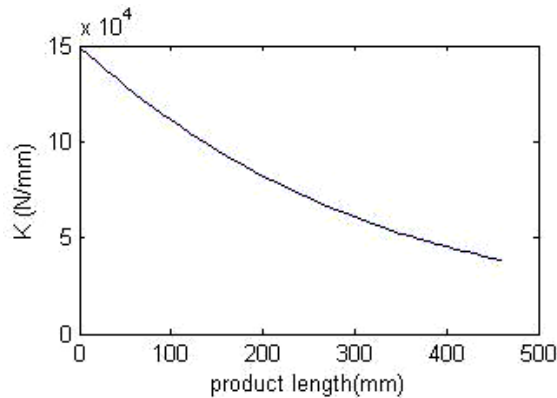
جدول (۲): ضرایب محاسبه شده در معادله (۱۱).

مقدار آن	ضریب
۱۳/۳۵۳ (KN)	$f_1(s_{o1}, t_{o1})$
۱۶/۵۰۹ (KN)	$f_2(s_{o2}, t_{o2})$
۳۵/۳۸۳ (KN)	$f_3(s_{o3}, t_{o3})$
-۱۹/۲۰۸ (KN/mm)	$\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t}$
-۲۵/۹۵۱ (KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t}$
-۷۰/۱۷۶ (KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t}$
۲۲/۶۸۰ (KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s}$
۵۵/۳۱۲ (KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s}$



شکل (۹): دستگاه استفاده شده برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات.

غلتک دیگر است نیز در اینجا بررسی می‌شود. به این منظور فرآیندی مورد بررسی قرار می‌گیرد که کلیه پارامترهای آن مشابه جدول ۱ است ولی ضخامت ورودی به غلتک دوم ۴/۸۵ میلیمتر و ضخامت ورودی به غلتک سوم ۳/۲ میلیمتر است.



شکل (۱۱): سفتی محاسبه شده برای مندرل در طول قطعه.

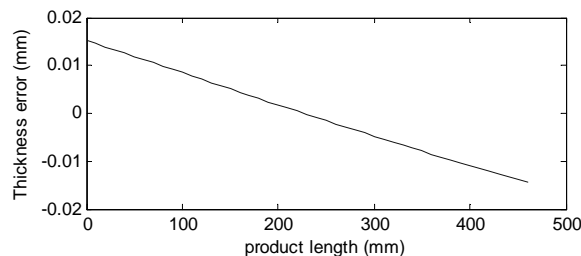
جدول ۳ ضرایب معادلات (۱۱) را که با مدل‌سازی فرآیند در نرم‌افزار آباکوس در این حالت محاسبه شده است نشان می‌دهد. همچنین سفتی محاسبه شده در شکل ۱۱ در این مورد نیز استفاده می‌شود. شکل ۱۳ توزیع ضخامت در طول محصول را در این حالت نشان می‌دهد. چنانچه انتظار می‌رفت در این حالت نیز ضخامت محصول در طول آن متغیر است. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود که در این مورد با افزایش سفتی مندرل ضخامت قطعه کاهش می‌یابد. در این مورد چون برآیند نیروی شعاعی غلتک‌ها به نحوی است که مندرل را به غلتک سوم نزدیک می‌کند با افزایش سفتی مندرل، خیز آن کمتر شده، ضخامت افزایش می‌یابد.

در شکل‌های (۱۲-۱۳) تغییرات ضخامت در طول محصول نشان داده شده است. در شرایطی که در طول محصول ضخامت ثابت باشد ولی نسبت به ضخامت مطلوب خطا داشته باشد می‌توان با جابه‌جایی غلتک آخر به میزان خطا، خطا را به میزان زیادی کاهش داد. ولی در شرایطی که در طول محصول تغییرات ضخامت وجود داشته باشد خطای قطعه با این روش قابل حذف نیست. در این شرایط برای کاهش خطا باید در حد امکان موقعیت شعاعی غلتک‌ها را به نحوی تنظیم کرد که نیروی غلتک‌ها با هم مساوی باشد. با

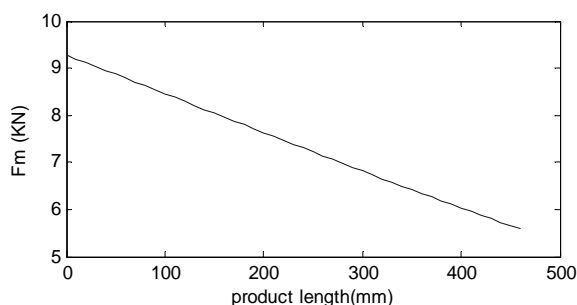
سفتی مندرل نیز که وابسته به قطر آن و مشخصات اسپیندل دستگاه فلوفرمینگ است برای دستگامی که آزمایش با آن انجام گرفته است در نقاط مختلف قطعه محاسبه گردید و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با استفاده از ضرایب محاسبه شده و سفتی محاسبه شده برای مندرل می‌توان خطای موجود در هر نقطه از قطعه را با استفاده از روابط (۱۱) محاسبه نمود. شکل ۱۲ تغییرات ضخامت اندازه‌گیری شده در طول قطعه نهایی را به همراه تغییرات ضخامت پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده در طول قطعه، از نظر محدوده خطا و چگونگی توزیع ضخامت در طول، هم‌خوانی خوبی وجود دارد. در بعضی از نقاط در شکل ۱۲ پراکندگی در حدود ۰/۰۱ میلیمتر در داده‌های آزمایش مشاهده می‌شود. این پراکندگی ناشی از عدم یکنواختی در ضخامت پیش‌تولید در طول آن است. با توجه به شکل ۱۲ با نزدیک شدن به اسپیندل، ضخامت قطعه کمتر می‌شود. دلیل این امر افزایش سفتی مندرل و کاهش جابه‌جایی آن در اثر اعمال نیروی نامتعادل بین سه غلتک است. با در نظر گرفتن ضرایب موجود در جدول ۲ چون در این مورد نیروی غلتک سوم بیش از نیروی دو غلتک دیگر است نیروی برآیند اعمالی به مندرل به نحوی است که فاصله آن را از غلتک سوم افزایش می‌دهد ولی با افزایش سفتی مندرل خیز مندرل کاهش می‌یابد و فاصله بین مندرل و غلتک سوم کاهش یافته و ضخامت محصول نیز کاهش می‌یابد. اگرچه در مواردی که نیروی غلتک سوم از دو غلتک دیگر بیشتر نیست شکل تغییرات ضخامت در طول قطعه نهایی با شکل ۱۰ متفاوت است ولی همواره تغییرات ضخامت در طول قطعاتی که در تولید آن‌ها نیروی سه غلتک با هم برابر نیست وجود دارد.

چون در اکثر مواردی که فلوفرمینگ انجام می‌گیرد نیروی غلتک سوم بیش از دو غلتک دیگر است توزیع ضخامتی مشابه توزیع نشان داده شده در شکل ۱۲ در طول محصول وجود دارد. به‌عنوان نمونه می‌توان از ضخامت‌های اندازه‌گیری شده در مرجع [۱۳] نام برد. به‌عنوان مثالی از حالت‌های دیگر، عدم تعادل نیرویی بین غلتک‌ها و نتیجه آن بر ضخامت محصول، حالتی که نیروی غلتک دوم بیشتر از دو



شکل (۱۳): تغییرات ضخامت در طول محصول نهایی در حالتی که نیروی غلتک سوم از دو غلتک دیگر کمتر است.



شکل (۱۴): نیروی اعمالی به مندرل در طول قطعه.

نیروی اعمالی به مندرل همان نیروی نامتعادل بین غلتکها است. افزایش این نیرو موجب کاهش عمر مفید قسمت‌های مختلف دستگاه فلو فرمینگ می‌شود. به منظور کاهش تغییرات ضخامت و همچنین نیروی اعمالی به مندرل موثرترین راه، تنظیم موقعیت شعاعی غلتکها به نحوی است که نیروی غلتکها حداقل اختلاف را داشته باشد.

۷- نتیجه‌گیری

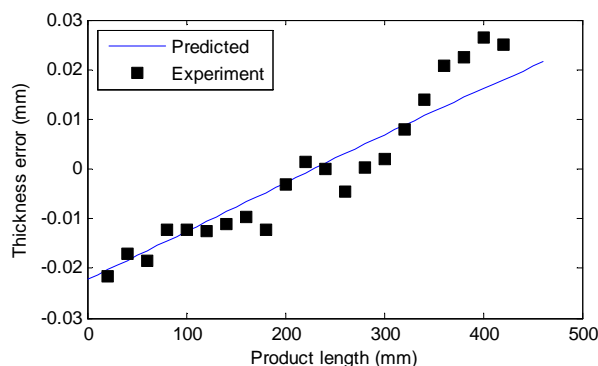
در این مقاله روشی برای بررسی دقت در ضخامت محصول در فرآیند فلو فرمینگ با چند غلتک در شرایطی که نیروی غلتکها با هم برابر نباشد ارائه شد. نتایج این روش با ضخامت اندازه‌گیری شده از قطعه مورد آزمایش در این شرایط همخوانی خوبی دارد. عدم تعادل نیرویی بین غلتکها با این روش بررسی گردید و نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- عدم تعادل نیرویی بین غلتکها موجب تغییرات ضخامت در طول محصول می‌شود،
- ۲- نحوه توزیع ضخامت در طول قطعه بستگی به نیروی غلتک آخر دارد. در صورتی که نیروی غلتک آخر بیش از دو

مساوی بودن نیروی غلتکها خیز مندرل و خطای ناشی از آن به حداقل می‌رسد بنابراین با تغییر سفتی مندرل در طول آن ضخامت قطعه تغییر نمی‌کند.

جدول (۳): ضرایب محاسبه شده در معادله (۱۱) در حالتی که نیروی غلتک دوم از دو غلتک دیگر بیشتر است.

مقدار آن	ضریب
۹/۰۲ (KN)	$f_1(s_{o1}, t_{o1})$
۳۲/۱ (KN)	$f_2(s_{o2}, t_{o2})$
۲۳/۳ (KN)	$f_3(s_{o3}, t_{o3})$
-۱۵/۴ (KN/mm)	$\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t}$
-۴۴/۰۶ (KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t}$
-۵۰/۶ (KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t}$
۳۵/۱ (KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s}$
۴۲/۳۵ (KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s}$



شکل (۱۲): تغییرات ضخامت در طول محصول نهایی.

پس از حل معادلات (۱۱) خیز مندرل محاسبه می‌شود. با استفاده از خیز محاسبه شده و معادله (۱۰) می‌توان نیروی اعمالی به مندرل را نیز محاسبه نمود. شکل ۱۴ نیروی اعمالی به مندرل را در طول قطعه برای ضرایب بیان شده در جدول ۲ نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سفتی مندرل بیشتر باشد نیروی اعمالی به آن بیشتر است.

10. Mohebbi, M.S. and Akbarzadeh, A., "Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes", *J. Mat. Processing 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. Mat. Processing 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. Mat. Processing 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. Mat. Processing 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" *J. Failure Analysis and Prevention*, Vol. 1, No. 5, pp. 69-76, 2001.
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. Mat. Processing 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. Mat. Processing 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. Mat. Processing Tech.*, Vol's. 153-154, No's. 1-3, pp. 60-66, 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. Mat. Processing Tech.*, Vol. 167, No's. 2-3, pp. 344-353, 2005.
20. Davidson, M.J., Balasubramanian, K., and Tagore, G.R.N., "Experimental Investigation on Flow-Forming of AA6061 Alloy-a Taguchi Approach", *J. Mat. Processing Tech.*, Vol. 200, No's.1-3, pp. 283-287, 2008.
21. Groche, p. and Fritsche, D., "Application and Modeling of Flow Forming Manufacturing

غلتک دیگر باشد، در نواحی نزدیک به اسپیندل، که سفتی مندرل بیشتر است ضخامت محصول کمتر است و بالعکس،
 ۳- به مندرل متناسب با سفتی آن نیرو اعمال می‌شود که باعث کاهش عمر اجزاء دستگاه می‌شود و
 ۴- مناسب‌ترین راه به‌منظور کاهش خطا در قطعات و افزایش عمر اجزاء دستگاه فلورمینگ، تنظیم موقعیت شعاعی غلتک‌ها به نحوی است که نیروی آن‌ها با هم برابر باشد.

۸- 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.
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. Mat. Processing 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. Mat. Processing 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, pp. 19-24, 1999.
7. Ma, Z. E., "Optimal Angle of Attack in Tube Spinning", *J. Mat. Processing Tech.*, Vol. 37, No's. 1-4, pp. 217-224, 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. Mat. Processing Tech.*, Vol. 79, No's. 1-3, pp. 185-188, 1998.

- Processes for Internally Geared Wheels”, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No.11, (The 1st Int. Conf. on New Forming Tech.), pp. 1261–1265, 2006.
22. Xia, Q. X., Xie, Sh. W., Huo, Y. L., and Ruan, F., “Numerical Simulation and Experimental Research on the Multi-pass Neck-Spinning of Non-axisymmetric Offset Tube”, *J. Mat. Processing Tech.*, Vol. 206, No’s. 1-3, pp. 500–508, 2008.
23. Sarenac, M., “Stiffness of Machine Tool Spindle as a Main Factor for Treatment Accuracy” *The Scientific J. FACTA UNIVERSITATIS Series: Mech. Eng.* Vol. 1, No. 6, pp. 665 – 674, 1999.