

# تأثیر تغییرات ضخامت پیش‌تولید بر ضخامت قطعات نهایی در فلوفرمینگ با چند غلتک

رضا جعفری ندوشن<sup>۱\*</sup>; محمود فرزین<sup>۲</sup>

## چکیده

از مزایای فرایند فلوفرمینگ دقت بالای محصولات تولید شده با این نوع فرایند است. بیشتر تحقیقات گذشته به بررسی دقت در قطر داخلی محصول در این فرایند پرداخته‌اند و در زمینه دقت در ضخامت محصول تحقیقات چندانی انجام نشده است. در این مقاله روشی ارائه شده است که با آن می‌توان تأثیر عواملی مانند ضخامت پیش‌تولید را در دقت ضخامت محصول بررسی نمود. در این راستا نیروی غلتک‌ها به صورت تابعی از تغییر ضخامت پیش‌تولید و خیز مندرل و غلتک شده‌اند. با استفاده از این توابع، خیز مندرل و ضخامت نهایی قطعه در محیط آن محاسبه شده و نشان داده شده است که تغییرات ضخامت در پیش‌تولید باعث تغییرات ضخامت با همان توزیع در قطعه نهایی می‌شود ولی دامنه تغییرات ضخامت کاهش می‌یابد. در این مورد نتایج تجربی نیز بررسی شدند که نتایج مشابهی را ارائه می‌دهند. همچنین نیروهای اعمالی به مندرل با تغییر ضخامت پیش‌تولید بررسی شده و نشان داده شده است که به مندرل نیروهای متناوبی مشابه توزیع ضخامت در پیش‌تولید وارد می‌شود. همچنین نشان داده شده است که فلوفرمینگ با سه غلتک نسبت به فلوفرمینگ با دو غلتک، محصولی با ضخامت یکنواخت‌تر تولید می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** فلوفرمینگ، دقت محصول، تغییرات ضخامت پیش‌تولید، خیز مندرل و غلتک

## *Effects of Pre-Form Thickness Variations on Product Thickness Accuracy in Multi-Rollers Flow-Forming*

R.Jafari Nedoushan and M.Farzin

### ABSTRACT

An advantage of the flow-forming process is high accuracy of products. Most researches in the past decades studied product diametric accuracy but to the authors' knowledge, they investigated rarely thickness accuracy. In this paper, a procedure is proposed to predict effects of the process parameters such as pre-form thickness variation and mandrel and rollers stiffness on product thickness accuracy. For this purpose, rollers forces are calculated as a function of pre-form thickness variation and mandrel and rollers deflections. Using this function, product thickness variation and mandrel deflection are calculated and it is concluded that pre-form thickness variation causes product thickness variation with similar distribution but the amount of variation largely decreases. The experiments also verify this prediction.

In addition, the applied force to the mandrel is investigated and it is also concluded that a periodic force with similar distribution to the pre-form thickness is applied to the mandrel. Finally, it is shown that flow-forming with three rollers produce more accurate products than a two rollers case.

**KEYWORDS:** flow-forming, product accuracy, pre-form thickness variation, mandrel and roller deflection

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۱۳

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/۴

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول و استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده مهندسی مکانیک: r.jafari@me.iut.ac.ir

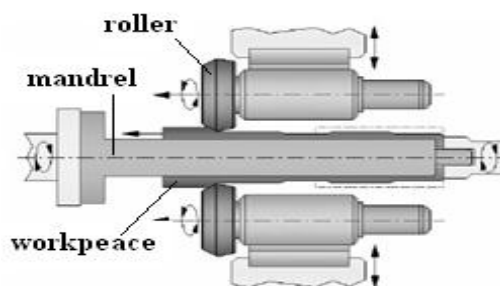
<sup>۲</sup> استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده مهندسی مکانیک: farzin@cc.iut.ac.ir

تجربی مقایسه شده و همخوانی بهتر بین نتایج حل و نتایج تجربی نسبت به حل مرجع [۸] نشان داده شده است. با استفاده از روش تابع جریان<sup>۲</sup>، نیز یک حد کران بالا برای محاسبه توان مورد نی از برای تغییرشکل پیشنهاد شده است [۱۲]. در مرجع [۱۷] یک عبارت عمومی برای توان مورد نیاز در فلوفرمینگ با فرض جمع نشدن مواد جلوی غلتک پیشنهاد شده است. همچنین با استفاده از روش کران بالا<sup>۲</sup> یک طرح تئوری برای محاسبه نیرو ارائه شده که علاوه بر عوامل در نظر گرفته شده در حل‌های قبلی اثر شعاع سر غلتک را نیز در نظر می‌گیرد [۱۳]. مقدار بهینه زاویه حمله غلتک نیز برای به حداقل رساندن نیروهای فرایند و همچنین کاهش جمع شدن مواد جلوی غلتک محاسبه شده است [۹].

علاوه بر بررسی نیروها و توان، تلاش‌هایی برای بیان چگونگی جابجایی مواد و کرنش‌های موجود در فرایند صورت گرفته است. در مرجع [۱۰] با استفاده از روش خطوط شبکه<sup>۴</sup> به اندازه‌گیری جابجایی مواد در جهات مختلف پرداخته شده است و چگونگی جریان مواد و کرنش‌های ایجاد شده در فرایند بررسی شده است. بررسی جابجایی مواد در این فرایند به کمک روش اجزا محدود نیز انجام شده است [۷]. در مرجع [۱۱] با استفاده از روش اجزا محدود و همچنین انجام آزمایش‌های طراحی شده به این منظور کرنش‌های موجود در این فرایند بررسی شده است. با اندازه‌گیری سختی<sup>۵</sup> نقاط مختلف قطعه نهایی نیز، میزان کرنش معادل در نقاط مختلف محصول نهایی محاسبه شده است [۱۵]. در مرجع [۲۰] با فرض ماده به صورت صلب پلاستیک، فرایند به روش اجزا محدود شبیه‌سازی و میدان تنش و کرنش در قطعه محاسبه شده است. نتایج بدست آمده توجیه‌کننده مسائلی از قبیل رشد قطر داخلی و موج‌دار شدن سطح قطعه هستند.

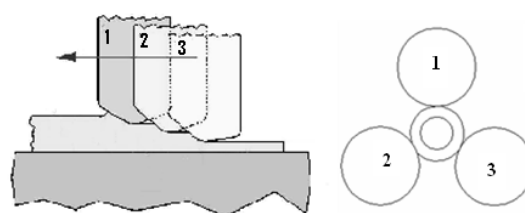
گروهی از محققین علاوه بر بررسی نیروها و توان فرایند به بررسی خصوصیات قطعه نهایی و وابستگی دقت آن به عوامل فرایند پرداختند. در مرجع [۵] اثر عوامل مختلف بخصوص نرخ پیشروی، بر قطر داخلی و تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در فلوفرمینگ با چند غلتک بررسی شده است و روشی برای بهینه نمودن عوامل فرایند برای دستیابی به دقت بیشتر ارائه شده است. در مرجع [۱۴] عیوب ایجاد شده در قطعه نهایی که ناشی از خصوصیات ماده پیش‌تولید است بررسی شده است. گروهی از محققین نیز با اندازه‌گیری مستقیم عوامل فرایند و بررسی محصول، تاثیر پارامترهای مختلف را بر عیوب ایجاد شده در محصول بررسی نمودند [۴]. در مرجع [۳] عوامل موثر بر دقت در قطر داخلی قطعه نهایی

فرایند فلوفرمینگ با چند غلتک در تولید اقتصادی قطعات جدارنازک بسیار اهمیت دارد. یکی از مزایای مهم این فرایند تولید قطعات لوله‌ای شکل با دقتی بیش از فرایندهای معمول است. شکل (۱) اجزا و حرکت‌های اساسی این فرایند را نشان می‌دهد. در این فرایند، ماده به صورت موضعی به تسلیم رسیده و با چرخش قطعه بر روی مندرل و حرکت غلتک، ناحیه تسلیم بر روی یک مسیر مارپیچ حرکت نموده و تمام قطعه را شکل می‌دهد.



شکل (۱): اجزای لازم برای فرایند فلوفرمینگ.

با توجه به اینکه در فرایندهای فلوفرمینگ نیروی غلتک باعث ایجاد خیز در مندرل و خطا در ضخامت نهایی قطعه می‌شود به طور معمول از دو یا سه غلتک به طور همزمان برای شکل‌دهی قطعه استفاده می‌شود. این غلتک‌ها به نحوی قرار می‌گیرند که نیروی یکدیگر را خنثی نمایند. شکل (۲) موقعیت غلتک‌ها را از نظر شعاعی، محوری و محیطی در فلوفرمینگ با سه غلتک نشان می‌دهد.



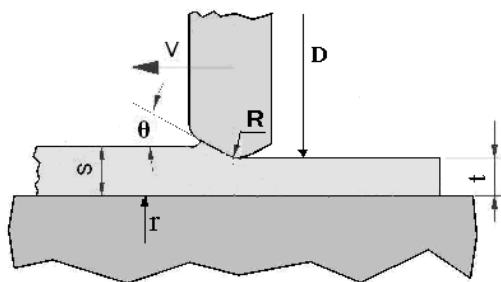
شکل (۲): موقعیت محیطی، محوری و شعاعی غلتک‌ها در فلوفرمینگ سه‌غلتکه

در سال‌های گذشته چندین حل تئوری برای محاسبه نیروها و توان در این فرایند ارائه شده و اثر عوامل مختلف فرایند بر نیرو و توان بررسی گردیده است.

در مرجع [۸] حلی بر مبنای خطوط لغزش ارائه شده است ولی درستی نتایج حل بررسی نشده است. در مرجع [۲] حلی بر اساس روش قاچی<sup>۱</sup> ارائه شده است و نتایج حل با نتایج

نیروی شعاعی اعمالی به هر غلتک می‌توان نوشت:

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



شکل (۳): عوامل موثر در نیروی اعمالی به غلتک در فلورمینگ

در اینجا هدف مشخص نمودن تابعیت نیروها به تغییر در ضخامت پیش‌تولید است. بنابراین در محاسبه نیروها قطر داخلی پیش‌تولید، قطر، زاویه حمله و شعاع سر هر یک از غلتک‌ها، اصطکاک و سرعت دورانی قطعه ثابت است. از عواقب تغییر در ضخامت پیش‌تولید تغییر نیروی غلتک‌ها و در نتیجه تغییر نیروی نامتعادل بین آن‌ها که به مندرل اعمال می‌شود است. نتیجه این امر تغییر در مقدار خیز مندرل و غلتک‌ها است که تغییر ضخامت‌های ورودی و خروجی هر غلتک و تنش تسلیم متوسط ماده را به همراه دارد. با در نظر گرفتن حالتی که تغییرات ضخامت پیش‌تولید و خیز مندرل و غلتک نسبت به کاهش ضخامت توسط هر غلتک کوچک باشد می‌توان از تغییر تنش متوسط تسلیم ماده نیز صرف‌نظر نمود. بنابراین رابطه (۱) را می‌توان به صورت رابطه (۲) نموده و برای غلتک با شماره  $i$  نوشت:

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

با کوچک در نظر گرفتن تغییرات ضخامت پیش‌تولید و خیز مندرل می‌توان بسط تیلور تابع فوق را به جای آن 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  $i$  در حالتی هستند که ضخامت پیش‌تولید ثابت باشد.

## ۲-۱- فلورمینگ دو غلتک

شکل (۴) موقعیت غلتک‌ها نسبت به مندرل را در حالت فلورمینگ دو غلتک نشان می‌دهد. در این شکل نیروهای اعمالی به مندرل از طرف غلتک‌ها نیز نشان داده شده است.

بررسی شده و روشی برای تنظیم عوامل فرایند برای رسیدن به دقت در قطر داخلی ارائه شده است. افزایش قطر داخلی با استفاده از روش اجزا محدود نیز بررسی شده است [۶]. در مراجع [۱۸]، [۱۹] با استفاده از اجزا محدود و همچنین آزمایش، تاثیر شکل و مسیر غلتک‌ها و نرخ پیشروی بر شکل نهایی قطعه و چگونگی جریان مواد در این فرایند بررسی شده است. در مرجع [۱] با آزمایش و با استفاده از روش تاگوچی<sup>۶</sup> تاثیر سرعت چرخش قطعه، نرخ پیشروی و کاهش ضخامت بر حداکثر ازدیاد طول ماده در این فرایند بررسی شده است.

تحقیقات گذشته در زمینه دقت قطعات نهایی و تاثیر عوامل فرایند بر آن، بیش‌تر به بررسی رشد قطری قطعات پرداخته‌اند و در زمینه دقت در ضخامت که یکی از خصوصیات قطعه نهایی است روش خاصی ارائه نشده است.

در این مقاله روشی ارائه شده است که خطای موجود در ضخامت قطعه نهایی را که ناشی از خیز مندرل و غلتک است پیش‌بینی می‌نماید. با استفاده از این روش یکی از عوامل موثر در دقت محصول که مشخصات پیش‌تولید است بررسی شده است. پیش‌تولید بنابر روش تولید آن می‌تواند دارای عیب‌هایی باشد. از عیب‌های ممکن در پیش‌تولید، خارج از مرکزی و عیوب مشابهی که موجب یکنواخت نبودن ضخامت در محیط آن می‌شوند است. این عیوب در پیش‌تولیدهایی که فرج شده‌اند به شدت وجود دارد و اگرچه این عیوب با ماشین‌کاری به مقدار زیادی کاهش می‌یابد اما همچنان وجود دارد. در این مقاله به بررسی تاثیر تغییرات ضخامت پیش‌تولید در محیط آن بر دقت قطعات نهایی و نیروهای فرایند پرداخته شده است. در بررسی اثر این پدیده از شبیه‌سازی و تقریب نیروها و به موازات آن از نتایج تجربی استفاده شده است و در پایان ضخامت قطعه نهایی محاسبه شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است.

## ۲- نیروی هر غلتک به صورت تابعی از ضخامت

### پیش‌تولید

به طور کلی نیروهای شکل‌دهی وارد به هر یک از غلتک‌ها به جنس قطعه (تنش تسلیم قطعه)، سرعت پیشروی، ضخامت ورودی به غلتک، ضخامت خروجی از غلتک، قطر غلتک و زاویه حمله غلتک وابسته است [۸]، [۲]، [۱۷]. این عوامل در شکل (۳) نشان داده شده است. اصطکاک بین مندرل و قطعه ( $\mu$ ) و سرعت چرخش قطعه ( $\omega$ ) نیز تاثیر زیادی در این فرایند دارند [۱ و ۲]. گروهی از محققان [۲۰]، [۱۳] تاثیر شعاع سر غلتک ( $R$ ) را نیز بر فرایند بررسی نمودند. بنابراین در رابطه با

برای تغییر ضخامت خروجی از غلتک دوم می‌توان نوشت:

$$t_2 - t_{o2} = -\delta_{m\theta} + \delta_{r2\theta} \quad (9)$$

با جایگذاری روابط ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و ۹ در روابط ۴ نیروی هر غلتک به صورت تابعی از تغییرات ضخامت پیش‌تولید و خیز مندرل و غلتک‌ها بدست می‌آید.

### ۲-۲- فلورمینگ سه غلتکه

در فلورمینگ سه غلتکه 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:

$$F_{r1} = f_1(s_{o1}, t_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial s} (s_1 - s_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t} (t_1 - t_{o1}) \quad (1-10)$$

$$F_{r2} = f_2(s_{o2}, t_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s} (s_2 - s_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t} (t_2 - t_{o2}) \quad (2-10)$$

$$F_{r3} = f_3(s_{o3}, t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t} (t_3 - t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s} (s_3 - s_{o3}) \quad (3-10)$$

مشابه فلورمینگ دوغلتکه تغییر ضخامت ورودی به غلتک

اول را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$s_1 - s_{o1} = e_\theta \quad (11)$$

در فلورمینگ با سه غلتک چون جهت و مقدار جابجایی مندرل مشخص نیست می‌توان جابجایی مندرل را به صورت برداری نامعین در صفحه در نظر گرفت:

$$\vec{\delta} = a\vec{i} + b\vec{j} \quad (12)$$

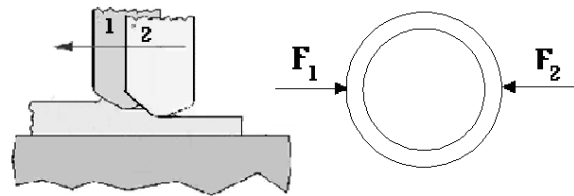
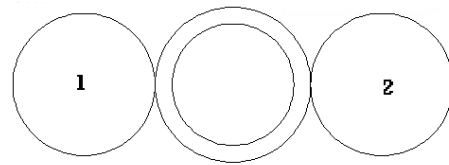
با توجه به شکل (۵) تغییر ضخامت خروجی از غلتک اول برابر است با:

$$t_1 - t_{o1} = \vec{\delta}_\theta \cdot \vec{n}_1 + \delta_{r1\theta} = (a\vec{i} + b\vec{j}) \cdot (-\vec{j}) + \delta_{r1\theta} = -b + \delta_{r1\theta} \quad (13)$$

اندیس  $\theta$  در رابطه فوق بیانگر جابجایی مندرل در زمان حاضر است و  $\vec{n}_1$  بردار یکه در راستای  $\vec{F}_1$  است. تغییر ضخامت ورودی به غلتک دوم با تغییرات ضخامت خروجی از غلتک اول در ۱۲۰ درجه قبل برابر است:

$$s_2 - s_{o2} = (t_1 - t_{o1})_{\theta-120} \quad (14)$$

برای تغییر ضخامت خروجی از غلتک دوم و سوم می‌توان نوشت:



شکل (۴): موقعیت غلتک‌ها و نیروهای اعمالی به مندرل در فلورمینگ دوغلتکه

در فلورمینگ دوغلتکه با در نظر گرفتن اندیس ۱ برای غلتک اول و اندیس ۲ برای غلتک دوم می‌توان رابطه ۴ را به صورت زیر نوشت:

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

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

چون جابجایی مندرل ناشی از نبود تعادل بین نیروهای نشان داده شده در شکل ۴ است جابجایی مندرل را می‌توان به صورت برداری همراستا با نیروهای نشان داده شده و با اندازه نامعین ( $\delta$ ) در نظر گرفت. تغییر ضخامت ورودی به غلتک اول را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$s_1 - s_{o1} = e_\theta \quad (5)$$

که در آن  $e_\theta$  بیانگر تفاوت ضخامت پیش‌تولید نسبت به ضخامت متوسط آن در موقعیت  $\theta$  است. با توجه به شکل ۴ تغییر ضخامت خروجی از غلتک اول برابر است با:

$$t_1 - t_{o1} = \delta_{m\theta} + \delta_{r1\theta} \quad (6)$$

$\delta_{m\theta}$  در رابطه فوق میزان جابجایی مندرل و  $\delta_{r1\theta}$  میزان خیز غلتک اول است. میزان خیز هر یک از غلتک‌ها را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\delta_r = \frac{K_{roller}}{F_r} \quad (7)$$

همچنین تغییر ضخامت ورودی به غلتک دوم با تغییرات ضخامت خروجی از غلتک اول در ۱۸۰ درجه قبل برابر است:

$$s_2 - s_{o2} = (t_1 - t_{o1})_{\theta-180} \quad (8)$$

باید توجه داشت که خیز مندرل و غلتکها با چرخش مندرل تغییر می‌نماید و چون خیز مندرل در هر زمان با خیز آن در ۱۸۰ درجه قبل وابسته است بنابراین برای یافتن خیز مندرل به ازای زاویه  $\theta$  روی پیش‌تولید باید خیز در زاویه  $\theta - 180$  را نیز یافت. به این منظور باید معادله تعادل در هر دو حالت را با هم حل نمود.

به طور مشابه در فلوفرینگ با سه غلتک معادله تعادل و نیروی اعمالی به مندرل عبارتست از:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F}_m \quad (20)$$

$$\vec{F}_m = K\vec{\delta} = K(a\vec{i} + b\vec{j}) \quad (21)$$

در این حالت نیز خیز مندرل در هر زمان به خیز آن در ۱۲۰ درجه و ۲۴۰ درجه قبل نیز وابسته است بنابراین باید معادلات تعادل در این سه حالت با هم حل شوند.

### ۴- محاسبه ضرایب لازم

در این مقاله برای محاسبه ضرایب مربوط به نیروی غلتکها در معادلات (۱۸) و (۲۰) از مدل‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. شکل (۷) 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 شبیه‌سازی به صورت جسم قابل تغییرشکل در نظر گرفته شد و از المان سه بعدی هشت نودی برای مش‌بندی آن استفاده شد [۸]. در شبیه‌سازی، غلتک و مندرل به صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند و نیاز به مش‌بندی ندارند.

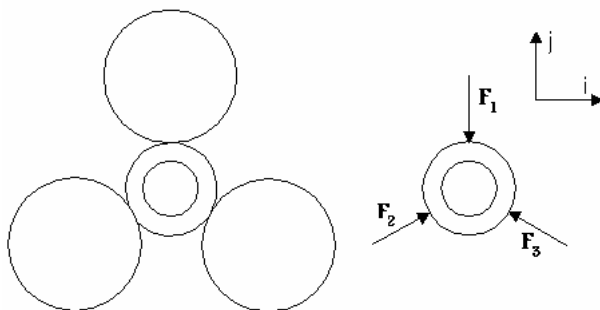
برای محاسبه ضرایب  $f_1(s_{o1}, t_{o1})$  و  $f_2(s_{o2}, t_{o2})$  و  $f_3(s_{o3}, t_{o3})$  می‌توان نیروی هر یک از غلتکها را در راستای شعاع محاسبه نمود. برای محاسبه ضریب  $\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial s}$  باید ضخامت پیش‌تولید را به میزان کمی تغییر داد و تغییر نیروی غلتک اول نسبت به آن را 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 جابجایی کوچکی داد و تغییرات نیروهای غلتکهای اول و دوم نسبت به آن را محاسبه نمود. در این حالت نیروی غلتک سوم تغییری نمی‌نماید. برای محاسبه ضرایب  $\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s}$  و  $\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t}$  می‌توان به غلتک دوم جابجایی کوچکی داده و تغییرات نیروهای غلتک دوم و سوم نسبت به آن را محاسبه نمود. در این حالت نیروی غلتک اول تغییری نمی‌نماید. برای محاسبه ضریب  $\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t}$  نیز می‌توان به غلتک سوم جابجایی

$$\begin{aligned} t_2 - t_{o2} &= \vec{\delta}_\theta \cdot \vec{n}_2 + \delta_{r2\theta} = \\ &= (a_\theta \vec{i} + b_\theta \vec{j}) \cdot (0.866\vec{i} + 0.5\vec{j}) + \delta_{r2\theta} \\ &= 0.866a_\theta + 0.5b_\theta + \delta_{r2\theta} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} t_3 - t_{o3} &= \vec{\delta}_\theta \cdot \vec{n}_3 + \delta_{r3\theta} = \\ &= (a_\theta \vec{i} + b_\theta \vec{j}) \cdot (-0.866\vec{i} + 0.5\vec{j}) + \delta_{r3\theta} \\ &= -0.866a_\theta + 0.5b_\theta + \delta_{r3\theta} \end{aligned} \quad (16)$$

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.  $\delta_{r2\theta}$  خیز غلتک دوم و  $\delta_{r3\theta}$  خیز غلتک سوم است. تغییر ضخامت ورودی به غلتک سوم با تغییر ضخامت خروجی از غلتک دوم در ۱۲۰ درجه قبل برابر است:

$$s_3 - s_{o3} = (t_2 - t_{o2})_{\theta-120} \quad (17)$$



شکل (۵): نیروهای شعاعی اعمالی به مندرل از طرف غلتکها در فلوفرینگ سه‌غلتکه

با استفاده از رابطه (۱۶) می‌توان خطای موجود در ضخامت نهایی قطعه، ناشی از جابجایی مندرل و غلتک را نیز محاسبه نمود. با جایگذاری روابط (۱۳)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) در روابط (۱۰) می‌توان نیروی هر غلتک را به صورت تابعی از ضخامت اولیه پیش‌تولید و خیز مندرل و خیز غلتکها محاسبه نمود.

### ۳- معادلات تعادل

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

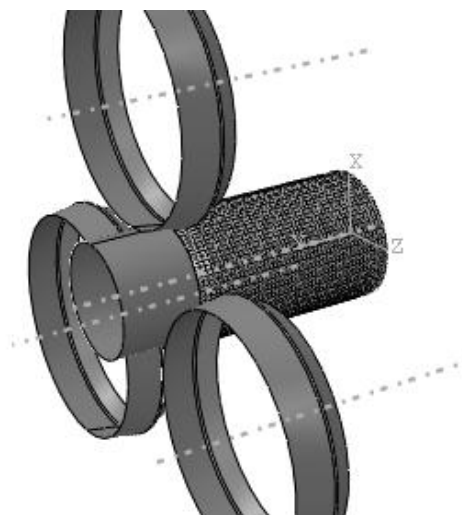
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_m \quad (18)$$

در رابطه فوق  $F_m$  نیرویی است که مندرل تحمل می‌نماید و می‌توان آنرا بر حسب سفتی<sup>۷</sup> و جابجایی مندرل نوشت:

$$\vec{F}_m = K\vec{\delta} \quad (19)$$

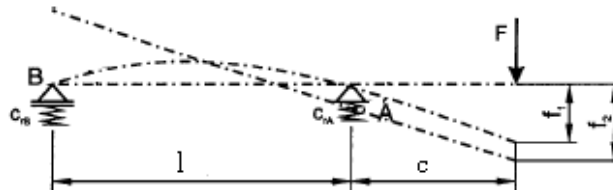
کوچکی داد و تغییرات نیروی آن را محاسبه نمود.

عامل دیگری که برای حل معادلات تعادل باید محاسبه شود سفتی مندرل و سفتی غلتک است که به طور عملی بر روی دستگاه قابل اندازه‌گیری است و یا می‌توان آن‌ها را با استفاده از مشخصات مندرل و اسپیندل و اجزای نگهدارنده غلتک محاسبه نمود.



شکل (۶): موقعیت غلتک‌ها و قطعه در مدل‌سازی

شکل (۷) طرحی ساده از مندرل و اسپیندل را نشان می‌دهد. غلتک نیز طرحی کاملاً مشابه دارد. برای محاسبه سفتی مندرل و یا غلتک، جابجایی آن به ازای نیروی معلوم محاسبه می‌شود. برای ساده‌سازی محاسبه جابجایی، با توجه به شکل (۷) تغییر مکان‌های ناشی از تغییر شکل برینگ‌ها ( $f_2$ ) و ناشی از خمش اسپیندل ( $f_1$ ) را می‌توان به طور جداگانه محاسبه نمود و در نهایت  $f_1$  و  $f_2$  را با هم جمع نمود [۱۶]. جزئیات محاسبه هر یک از این جابجایی‌ها در مرجع [۱۶] بیان شده است.



شکل (۷): نمای ساده شده اسپیندل و تغییر شکل‌های آن

## ۵- روش آزمایش و اندازه‌گیری ضخامت

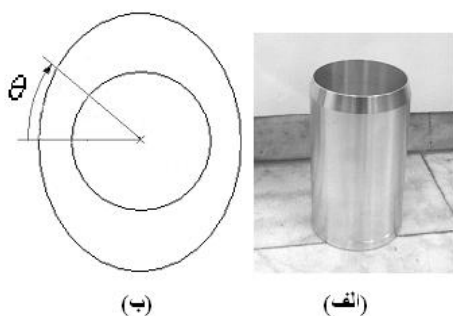
برای بررسی درستی روش ارائه شده و بررسی عملی تاثیر تغییر ضخامت پیش‌تولید بر ضخامت قطعه نهایی، پیش‌تولیدی با ضخامت متغییر در محیط آن تولید شد و ضخامت نقاط مختلف روی محیط پیش‌تولید اندازه‌گیری شد. شکل (۸)

پیش‌تولید و چگونگی توزیع ضخامت آنرا نشان می‌دهد. پیش‌تولید از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ تولید شد و برای انجام آزمایش از دستگاه فلورفرمینگ سه غلتک ST4030 استفاده شد. جدول (۱) عوامل دیگر فرایند را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مقدار هر یک از عوامل فرایند در آزمایش

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)
۵/۵۴	ضخامت متوسط اولیه قطعه (mm)
۲/۱۸	ضخامت متوسط نهایی قطعه (mm)
۱۷/۸	طول اولیه (mm)
۳۵۰	سرعت چرخش قطعه (rev/min)
۰/۱۵	سرعت پیشروی (mm/rev)

شکل (۹) دستگاهی که برای اندازه‌گیری ضخامت پیش‌تولید استفاده شده است را نشان می‌دهد. در این وسیله از ساعت اندازه‌گیری با دقت ۱ میکرون استفاده شده است. در شکل (۱۰) ضخامت اندازه‌گیری شده در محیط پیش‌تولید نشان داده شده است.



شکل (۸): (الف) پیش‌تولید با ضخامت متغییر (ب) چگونگی توزیع ضخامت در مقطع پیش‌تولید



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

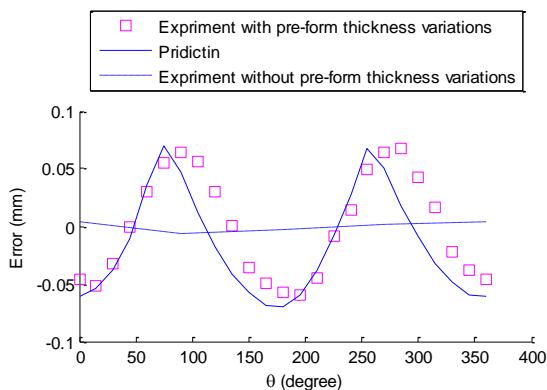
نسبت به داده‌های تجربی در نقاطی که حداکثر خطا را دارند در حدود ۱۵ درصد است.

دلیل این اختلاف فاز بین نتایج، به جابجایی مواد در جهت محیطی مربوط است که در مراجع [۱۰] و [۱۱] به آن پرداخته شده است. این جابجایی ناشی از کرنش برشی در جهت محیطی محوری است که در شکل (۱۳) نشان داده شده است [۱۱].

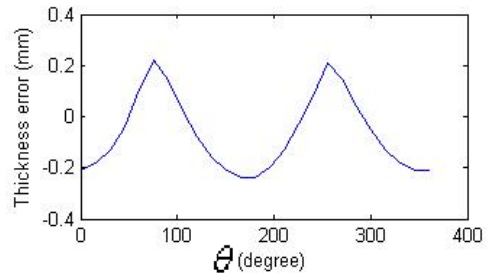
جدول ۲: ضرایب محاسبه شده برای قطعه آزمایش شده

مقدار آن	ضریب
۹/۳۵(KN)	$f_1(s_{o1}, t_{o1})$
۱۱/۳(KN)	$f_2(s_{o2}, t_{o2})$
۲۲/۷ (KN)	$f_3(s_{o3}, t_{o3})$
۱۳/۵۸(KN/mm)	$\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial s}$
-۱۴/۷۸(KN/mm)	$\frac{\partial f_1(s_{o1}, t_{o1})}{\partial t}$
-۱۹/۲۲(KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial t}$
-۴۵/۸۱(KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial t}$
۱۷/۰۶(KN/mm)	$\frac{\partial f_2(s_{o2}, t_{o2})}{\partial s}$
۳۷/۶۲(KN/mm)	$\frac{\partial f_3(s_{o3}, t_{o3})}{\partial s}$
۴۱/۷(KN/mm)	سفتی مندرل در نقطه A
۵۱/۶ (KN/mm)	سفتی مندرل در نقطه B
۲۱/۱(KN/mm)	سفتی غلتک‌ها

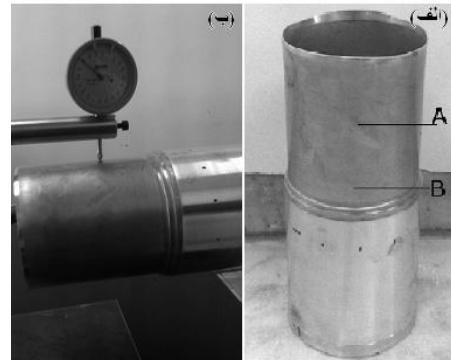
با مقایسه شکل (۱۰) و (۱۲) دیده می‌شود که در صورتی که در محیط قطعه اولیه، تغییرات ضخامت وجود داشته باشد در قطعه نهایی نیز تغییرات ضخامت با همان توزیع وجود خواهد داشت ولی با نسبت کمتر، به عبارت دیگر فرایند فلورفرمینگ با چند غلتک موجب یکنواخت‌تر شدن ضخامت قطعات می‌شود.



شکل (۱۲): تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در نقطه A به همراه تغییرات ضخامت در قطعه‌ای با پیش تولید یکنواخت



شکل (۱۰): تغییرات ضخامت اندازه‌گیری شده در محیط پیش‌تولید

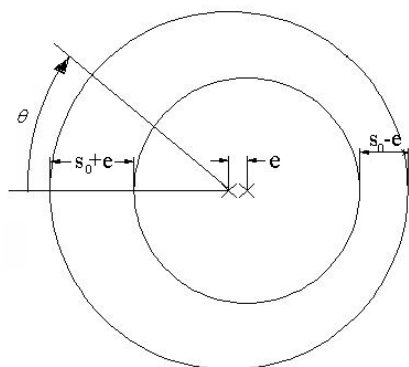


شکل (۱۱): (الف) قطعه فرم داده شده (ب) روش اندازه‌گیری ضخامت آن

شکل (۱۱) قطعه شکل داده شده و روش اندازه‌گیری ضخامت آن را نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت‌هایی که در آن‌ها ضخامت قطعه اندازه‌گیری شده است نیز نشان داده شده است.

## ۶- نتایج و بحث

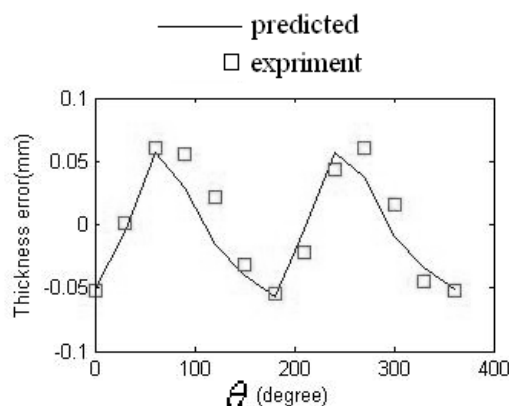
برای بررسی روش ارائه شده تغییرات ضخامت در طول قطعه‌ای با ضرایب ارائه شده در جدول (۲) بررسی شد. سفتی مندرل و غلتک نیز که وابسته به قطر آن‌ها و مشخصات دستگاه فلورفرمینگ است محاسبه شده است. شکل (۱۲) تغییرات ضخامت اندازه‌گیری شده در قطعه نهایی در فاصله ۵۰ میلیمتر از انتهای آن (نقطه A) را همراه با تغییرات ضخامت پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. در این شکل همچنین برای مقایسه تغییرات ضخامت در قطعه‌ای که از پیش‌تولید، با ضخامت یکنواخت ساخته شده است نیز نشان داده شده است و دیده می‌شود که در چنین قطعه‌ای تغییرات ضخامت بسیار کمتر است. دیده می‌شود که بین نتایج پیش‌بینی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده روی قطعه اختلاف فازی در حدود ۱۵ درجه وجود دارد ولی از نظر محدوده خطا و چگونگی توزیع ضخامت در محیط قطعه، همخوانی خوبی بین نتایج وجود دارد. خطای محاسبات



شکل (۱۴) ضخامت محاسبه شده و اندازه‌گیری شده را در نقطه B، با فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از انتهای قطعه نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): جابجایی ماده در جهت محیطی [۱۱].

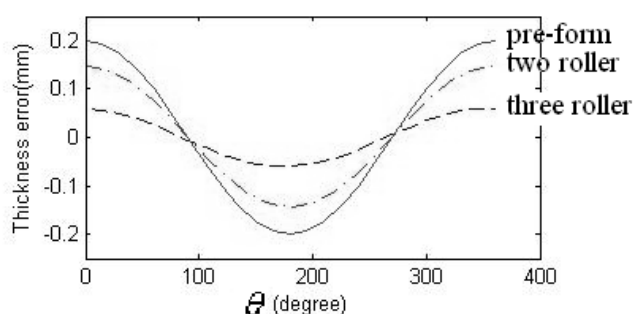


شکل (۱۶): تغییرات ضخامت در نظر گرفته شده برای پیش‌تولید شکل (۱۷) توزیع ضخامت اولیه و نهایی این قطعه را در فلورمینگ دو و سه غلتکه نشان می‌دهد. دیده می‌شود که در هر کدام از این فرایندها نحوه توزیع ضخامت قطعه نهایی مشابه پیش‌تولید است ولی قطعه تولید شده با فلورمینگ سه غلتکه نسبت به فلورمینگ دو غلتکه دارای توزیع ضخامت یکنواخت‌تری است.

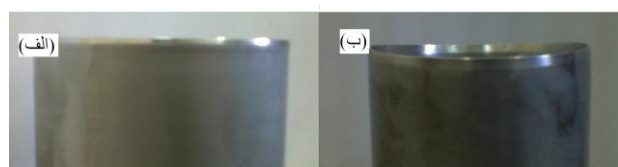
با توجه به اینکه خارج از مرکزی پیش‌تولید تعادل نیرویی بین غلتک‌ها را از بین می‌برد و برآیند نیروی غلتک‌ها به مندرل و اجزای نگهدارنده غلتک‌ها اعمال می‌شود در این قسمت به بررسی نیروی نامتعادل ایجاد شده می‌پردازیم. شکل (۱۸) مولفه نیروی اعمالی به مندرل در جهت عمودی را برای توزیع ضخامت‌های نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۱۶) نشان می‌دهد. دیده می‌شود که نیروها به صورت متناوب و مشابه توزیع ضخامت اولیه هستند. اعمال این نیروهای لرزشی به مندرل و مکانیزم نگهدارنده غلتک‌ها باعث کاهش عمر اجزای اسپیندل و همچنین اجزای نگهدارنده غلتک‌ها و راهنماهای دستگاه می‌شود.

شکل (۱۴): تغییرات ضخامت در قطعه نهایی در نقطه B

دیده می‌شود که اختلاف فاز در اینجا نسبت به نقطه A کمتر است دلیل این امر حرکت محیطی کمتر ماده در این نقطه نسبت به نقطه A است. تفاوت دیگر ضخامت نهایی در این دو نقطه، دامنه کمتر خطا در نقطه B نسبت به A است. دلیل این کاهش خطا افزایش سفتی مندرل در این نقطه نسبت به نقطه A است. نکته جالب توجه در قطعه نهایی، گوشواره‌ای شدن انتهای قطعه به دلیل یکنواخت نبودن ضخامت اولیه است. شکل (۱۵) انتهای قطعه را با انتهای قطعه‌ای که پیش‌تولید آن دارای ضخامت یکنواخت بوده است مقایسه می‌نماید.



شکل (۱۷): مقدار خارج از مرکزی در پیش‌تولید و قطعه نهایی در فلورمینگ دو و سه غلتکه



شکل (۱۵): انتهای قطعه تولید شده (الف) از پیش‌تولید یکنواخت (ب) از پیش‌تولید با ضخامت متغییر

در این قسمت برای بررسی تاثیر شکل توزیع اولیه ضخامت و مقایسه فلورمینگ با دو و سه غلتک تغییرات ضخامت در قطعه اولیه را به صورت خارج از محوری به اندازه  $e$  در نظر می‌گیریم. شکل (۱۶) تغییرات ضخامت را به صورت اغراق آمیز نشان می‌دهد.



حذف است.

## ۷- نتایج

در این مقاله روشی برای بررسی دقت ضخامت محصول در فلورفرمینگ با چند غلتک ارائه شد که با نتایج تجربی هم-خوانی خوبی دارد. با استفاده از این روش اثر تغییرات ضخامت پیش‌تولید بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

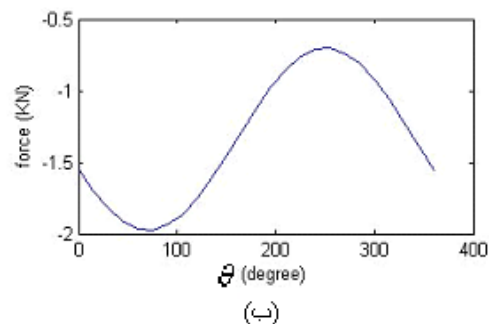
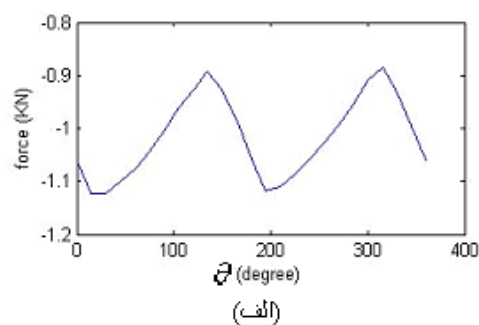
۱- تغییرات ضخامت در پیش‌تولید در فرایندهای فلورفرمینگ دو و سه‌غلتکه باعث ایجاد تغییرات ضخامت با همان توزیع در محصول نهایی می‌شود.

۲- تغییرات ضخامت محصول نهایی از پیش‌تولید کمتر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که عیوبی که در تولید پیش‌تولید به صورت تغییرات ضخامت ظاهر می‌شوند در محصول نهایی به میزان کمتری وجود داشته باشند.

۳- اختلاف فاز بین نتایج تجربی و توزیع ضخامت محاسبه شده در محیط قطعه بیانگر جابجایی مواد در جهت محیط است و وجود کرنش برشی در جهت محیطی محوری را اثبات می‌نماید.

۴- به ازای پیش‌تولید و محصول نهایی مشابه، فلورفرمینگ با سه غلتک نسبت به فلورفرمینگ با دو غلتک محصولی با ضخامت یکنواخت‌تر تولید می‌کند.

۵- در اثر وجود تغییرات ضخامت در پیش‌تولید، به مندرل و اجزای نگهدارنده غلتک‌ها نیروهای لرزشی وارد می‌شود که باعث اعمال نیروهای خستگی به اسپیندل و راهنماهای دستگاه شده و از عمر اجزای آنها می‌کاهد.



شکل ۱۸- مولفه عمودی نیروی اعمالی به مندرل در یک دور چرخش آن الف ( توزیع ضخامت نشان داده شده در شکل ۸) ب) توزیع ضخامت نشان داده شده در شکل (۱۶)

گفتنی است که در این مقاله سعی بر بررسی اثر تغییرات ضخامت اولیه پیش‌تولید بر ضخامت نهایی بوده است و از عوامل دیگری که باعث تغییر ضخامت در قطعه می‌شوند از جمله برگشت بعد از هر غلتک صرف‌نظر شده است. به نظر می‌رسد که پدیده برگشت با توجه به کم بودن تغییرات ضخامت پیش‌تولید در این فرایند باعث خطای تقریباً ثابت در محیط قطعه می‌شود که در عمل نیز این خطای ثابت با تغییر پیش‌روی و در پایان با تغییر موقعیت غلتک به اندازه خطا قابل

## ۸- مراجع

- [۶] Kemin, X.; Zhen, W.; Yan, L.; Xianming, L.; "Elasto-Plastic FEM Analysis and Experimental Study of Diametral Growth in Tube Spinning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, p.p. 172-175, 1997.
- [۷] Kezhi, L.; Nanhai, H.; Yan, L.; Kemin, Xue.; "Research on the Distribution of the Displacement in Backward Tube Spinning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 79, p.p. 185-188, 1998.
- [۸] Kobayashi, S.; Thomsen, E.G.; "Theory of Spin Forging", Journal of Engineering for Industry, vol. 81 p.p. 485-495, 1961.
- [۹] Ma, Z. E.; "Optimal Angle of Attack in Tube Spinning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, p.p. 217-280, 1993.
- [۱۰] Mohan, T. R.; Misra, R.; "Studies on Power Spinning of Tubes", International Journal of Production Research, Vol. 10, p.p. 351-364, 1970.
- [۱۱] Mohebbi, M.S.; Akbarzadeh, A.; "Experimental Study and FEM Analysis of Redundant Strains in Flow Forming of Tubes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, p.p. 167-171, 1997.
- [۱] Davidson, M. J.; Balasubramanian, K.; Tagore, G.R.N.; "Experimental Investigation on Flow-Forming of AA6061 Alloy-a Taguchi Approach", journal of materials processing technology, Vol. 113, p.p. 283-287, 2008.
- [۲] Hayama, M.; "Theoretical Study of Tube Spinning" Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National Univ., Vol. 15, p.p. 33-48, 1966.
- [۳] Hayama, M.; Kudo, H.; "Analysis of diametrical growth and working forces in tube spinning", Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 22, p.p. 776-784, 1979.
- [۴] Hua, F.A.; Yang, Y.S.; Zhang, Y.N.; Guo, M.H.; Tong, W.H.; Hu, Z.Q.; "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tube Spinning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 168, p.p. 68-74, 2005.
- [۵] Kemin, X.; Yan, L.; Yan, L.; Kezhi, L.; "A Study of the Rational Matching Relationships Amongst Technical Parameters in Stagger Spinning", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, p.p. 167-171, 1997.

Engineering Vol.1, No 6, p.p. 665 – 674, 1999.

Singhal, R.P.; Saxena, P.K.; Prakash, R.; “Estimation of Power in the Shear Spinning of Long Tubes in Hard-to-Work Materials”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 23, p.p. 29-40, 1990.

Wong, C.C.; Lin, J.; Dean, T.A.; “Effects of Roller Path and Geometry on the Flow Forming of Solid Cylindrical Components”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, p.p. 344-353, 2005.

Wong, C.C.; Lin, J.; Dean, T.A.; “Incremental Forming of Solid Cylindrical Components Using Flow Forming Principles”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, p.p. 153–154, 2004.

Xu, Y.; Zhang, S.H.; Li, P.; Yang, K.; Shan, D.B.; Lu, Y.; “3D Rigid-Plastic FEM Numerical Simulation on Tube Spinning”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, p.p. 710–713, 2001.

Technology, 2008.

[۱۷] Park, J. W.; Kim, Y.H.; Bae, W.B.; “Analysis of tube spinning processes by the upper bound stream function method”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 66, p.p. 195–203., 1997

[۱۸] Paunoiu, V.; Nicoara, D.; Teodorescu, M.; “A General Upper Bound Method for Forces Calculation in Tube Spinning Process”, Advanced Technology of Plasticity, vol. 1, p.p. 19–24, 1999.

[۱۹] Rajan, K.M.; Narasimhan, K.; “An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes” PFANF8, Vol. 5, p.p. 69-76., 2001.

[۲۰] Roy, M.J.; Klassen, R.J.; Wood, J.T.; “Evolution of Plastic Strain During a Flow Forming Process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, p.p. 1018–1025, 2009.

Sarenac, M.; “Stiffness of Machine Tool Spindle as a Main Factor for Treatment Accuracy” The scientific journal FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical

## ۹- زیر نویس ها

- ∩ Slab method
- ∪ Stream function
- ∪ Upper bound
- ⊕ Grid line
- ° Hardness
- ∩ Taguchi
- ∪ Stiffness