تاثير تغييرات ضخامت پيش‌توليد بر ضخامت قطعات نهايي در فلوفرمينگ با چند غلتک

رضا جعفري ندوشن[i] *؛ محمود فرزين[ii]

چکيده

از مزاياي فرايند فلوفرمينگ دقت بالاي محصولات توليد شده با اين نوع فرايند است. بيش‌تر تحقيقات گذشته به بررسي دقت در قطر داخلي محصول در اين فرايند پرداخته‌اند و در زمينه دقت در ضخامت محصول تحقيقات چنداني انجام نشده است. در اين مقاله روشي ارائه شده است که با آن مي‌توان تاثير عواملي مانند ضخامت پيش-توليد را در دقت ضخامت محصول بررسي نمود. در اين راستا نيروي غلتک‌ها به صورت توابعي از تغيير ضخامت پيش‌توليد و خيز مندرل و غلتک شده‌اند. با استفاده از اين توابع، خيز مندرل و ضخامت نهايي قطعه در محيط آن محاسبه شده و نشان داده شده است که تغييرات ضخامت در پيش‌توليد باعث تغييرات ضخامت با همان توزيع در قطعه نهايي مي‌شود ولي دامنه تغييرات ضخامت کاهش مي‌يابد. در اين مورد نتايج تجربي نيز بررسي شدند که نتايج مشابهي را ارائه مي‌دهند. همچنين نيروهاي اعمالي به مندرل با تغيير ضخامت پيش‌توليد بررسي شده و نشان داده شده است که به مندرل نيروهاي متناوبي مشابه توزيع ضخامت در پيش‌توليد وارد مي‌شود. همچنين نشان داده شده است که فلوفرمينگ با سه غلتک نسبت به فلوفرمينگ با دو غلتک، محصولي با ضخامت يکنواخت‌تر توليد مي‌نمايد.

کلمات کليدي : فلوفرمينگ، دقت محصول، تغييرات ضخامت پيش‌توليد، خيز 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

---

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۸/۱۱/۱۳

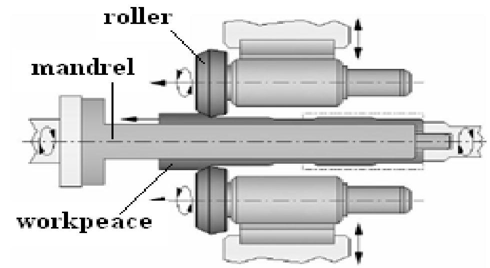
تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۸/٤

[i] * نويسنده مسئول و استاديار، دانشگاه صنعتي اصفهان; دانشكده مهندسي مكانيک: r.jafari@me.iut.ac.ir.

[ii] استاد، دانشگاه صنعتي اصفهان; دانشكده مهندسي مكانيک: farzin@cc.iut.ac.ir.

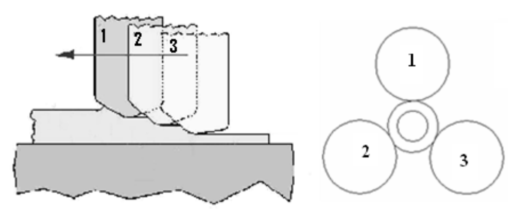
۱- مقدمه

فرايند فلوفرمينگ با چند غلتک در توليد اقتصادي قطعات جدارنازک بسيار اهميت دارد. يکي از مزاياي مهم اين فرايند توليد قطعات لوله‌اي شکل با دقتي بيش از فرايندهاي معمول است. شکل (۱) اجزا و حرکت‌هاي اساسي اين فرايند را نشان مي‌دهد. در اين فرايند، ماده به صورت موضعي به تسليم رسيده و با چرخش قطعه بر روي مندرل و حرکت غلتک، ناحيه تسليم بر روي يک مسير مارپيچ حرکت نموده و تمام قطعه را شکل مي‌دهد.



شکل (۱): اجزاي لازم براي فرايند فلوفرمينگ.

با توجه به اينکه در فرايندهاي فلوفرمينگ نيروي غلتک باعث ايجاد خيز در مندرل و خطا در ضخامت نهايي قطعه مي‌شود به طور معمول از دو يا سه غلتک به طور همزمان براي شکل‌دهي قطعه استفاده مي‌شود. اين غلتک‌ها به نحوي قرار مي‌گيرند که نيروي يکديگر را خنثي نمايند. شکل (۲) موقعيت غلتک‌ها را از نظر شعاعي، محوري و محيطي در فلوفرمينگ با سه غلتک نشان مي‌دهد.



شکل (۲): موقعيت محيطي، محوري و شعاعي غلتک‌ها در فلوفرمينگ سه‌غلتکه

در سال‌هاي گذشته چندين حل تئوري براي محاسبه نيروها و توان در اين فرايند ارائه شده و اثر عوامل مختلف فرايند بر نيرو و توان بررسي گرديده است.

در مرجع [۸] حلي بر مبناي خطوط لغزش ارائه شده است ولي درستي نتايج حل بررسي نشده است. در مرجع [۲] حلي بر اساس روش قاچي[1] ارائه شده است و نتايج حل با نتايج تجربي مقايسه شده و هم‌خواني بهتر بين نتايج حل و نتايج تجربي نسبت به حل مرجع [۸] نشان داده شده است. با استفاده از روش تابع جريان[2]، نيز يک حد کران بالا براي محاسبه توان مورد ني از براي تغييرشکل پيشنهاد شده است [۱۲]. در مرجع [۱۷] يک عبارت عمومي براي توان مورد نياز در فلوفرمينگ با فرض جمع نشدن مواد جلوي غلتک پيشنهاد شده است. همچنين با استفاده از روش کران بالا[3] يک طرح تئوري براي محاسبه نيرو ارائه شده که علاوه بر عوامل در نظر گرفته شده در حل‌هاي قبلي اثر شعاع سر غلتک را نيز در نظر مي‌گيرد [۱۳]. مقدار بهينه زاويه حمله غلتک نيز براي به حداقل رساندن نيروهاي فرايند و همچنين کاهش جمع شدن مواد جلوي غلتک محاسبه شده است[۹].

علاوه بر بررسي نيروها و توان، تلاش‌هايي براي بيان چگونگي جابجايي مواد و کرنش‌هاي موجود در فرايند صورت گرفته است. در مرجع [۱۰] با استفاده از روش خطوط شبکه[4] به اندازه‌گيري جابجايي مواد در جهات مختلف پرداخته شده است و چگونگي جريان مواد و کرنش‌هاي ايجاد شده در فرايند بررسي شده است. بررسي جابجايي مواد در اين فرايند به کمک روش اجزا محدود نيز انجام شده است [۷]. در مرجع [۱۱] با استفاده از روش اجزا محدود و همچنين انجام آزمايش‌هاي طراحي شده به اين منظور کرنش‌هاي موجود در اين فرايند بررسي شده است. با اندازه‌گيري سختي[5] نقاط مختلف قطعه نهايي نيز، ميزان کرنش معادل در نقاط مختلف محصول نهايي محاسبه شده است [۱۵]. در مرجع [۲۰] با فرض ماده به صورت صلب پلاستيک، فرايند به روش اجزا محدود شبيه‌سازي و ميدان تنش و کرنش در قطعه محاسبه شده است. نتايج بدست آمده توجيه کننده مسائلي از قبيل رشد قطر داخلي و موج‌دار شدن سطح قطعه هستند.

گروهي از محققين علاوه بر بررسي نيروها و توان فرايند به بررسي خصوصيات قطعه نهايي و وابستگي دقت آن به عوامل فرايند پرداختند. در مرجع [۵] اثر عوامل مختلف بخصوص نرخ پيشروي، بر قطر داخلي و تغييرات ضخامت در قطعه نهايي در فلوفرمينگ با چند غلتک بررسي شده است و روشي براي بهينه نمودن عوامل فرايند براي دستيابي به دقت بيشتر ارائه شده است. در مرجع [۱۴] عيوب ايجاد شده در قطعه نهايي که ناشي از خصوصيات ماده پيش‌توليد است بررسي شده است. گروهي از محققين نيز با اندازه‌گيري مستقيم عوامل فرايند و بررسي محصول، تاثير پارامترهاي مختلف را بر عيوب ايجاد شده در محصول بررسي نمودند [۴]. در مرجع [۳] عوامل موثر بر دقت در قطر داخلي قطعه نهايي

بررسي شده و روشي براي تنظيم عوامل فرايند براي رسيدن به دقت در قطر داخلي ارائه شده است. افزايش قطر داخلي با استفاده از روش اجزا محدود نيز بررسي شده است [۶]. در مراجع [۱۸]، [۱۹] با استفاده از اجزا محدود و همچنين آزمايش، تاثير شكل و مسير غلتک‌ها و نرخ پيشروي بر شكل نهايي قطعه و چگونگي جريان مواد در اين فرايند بررسي شده است. در مرجع [۱] با آزمايش و با استفاده از روش تاگوچي[۶] تاثير سرعت چرخش قطعه، نرخ پيشروي و كاهش ضخامت بر حداكثر ازدياد طول ماده در اين فرايند بررسي شده است.

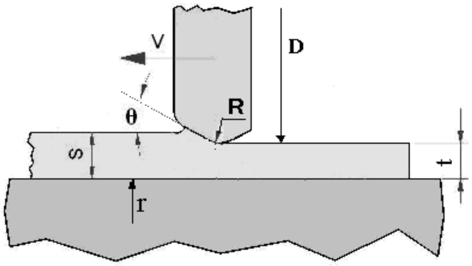
تحقيقات گذشته در زمينه دقت قطعات نهايي و تاثير عوامل فرايند بر آن، بيش‌تر به بررسي رشد قطري قطعات پرداخته‌اند و در زمينه دقت در ضخامت كه يكي از خصوصيات قطعه نهايي است روش خاصي ارائه نشده است.

در اين مقاله روشي ارائه شده است كه خطاي موجود در ضخامت قطعه نهايي را كه ناشي از خيز مندرل و غلتک است پيش‌بيني مي‌نمايد. با استفاده از اين روش يكي از عوامل موثر در دقت محصول كه مشخصات پيش‌توليد است بررسي شده است. پيش‌توليد بنابر روش توليد آن مي‌تواند داراي عيب‌هايي باشد. از عيب‌هاي ممكن در پيش‌توليد، خارج از مركزي و عيوب مشابهي كه موجب يكنواخت نبودن ضخامت در محيط آن مي‌شوند است. اين عيوب در پيش‌توليدهايي كه فرج شده‌اند به شدت وجود دارد و اگرچه اين عيوب با ماشين‌كاري به مقدار زيادي كاهش مي‌يابد اما همچنان وجود دارد. در اين مقاله به بررسي تاثير تغييرات ضخامت پيش‌توليد در محيط آن بر دقت قطعات نهايي و نيروهاي فرايند پرداخته شده است. در بررسي اثر اين پديده از شبيه‌سازي و تقريب نيروها و به موازات آن از نتايج تجربي استفاده شده است و در پايان ضخامت قطعه نهايي محاسبه شده و با مقادير اندازه‌گيري شده مقايسه شده است.

۲- نيروي هر غلتک به صورت تابعي از ضخامت پيش‌توليد

به طور كلي نيروهاي شكل‌دهي وارد به هر يک از غلتک‌ها به جنس قطعه (تنش تسليم قطعه)، سرعت پيشروي، ضخامت ورودي به غلتک، ضخامت خروجي از غلتک، قطر غلتک و زاويه حمله غلتک وابسته است [۸]، [۲]، [۱۷]. اين عوامل در شكل (۳) نشان داده شده است. اصطكاک بين مندرل و قطعه (μ) و سرعت چرخش قطعه (ω) نيز تاثير زيادي در اين فرايند دارند[۱ و ۲]. گروهي از محققين [۲۰]، [۱۳] تاثير شعاع سر غلتک (R) را نيز بر فرايند بررسي نمودند. بنابراين در رابطه با نيروي شعاعي اعمالي به هر غلتک مي‌توان نوشت:

$$F_r = f(s,t,D,V,\sigma,\theta,\mu,\omega,R) \quad (۱)$$



شكل (۳): عوامل موثر در نيروي اعمالي به غلتک در فلوفرمينگ

در اينجا هدف مشخص نمودن تابعيت نيروها به تغيير در ضخامت پيش‌توليد است. بنابراين در محاسبه نيروها قطر داخلي پيش‌توليد، قطر، زاويه حمله و شعاع سر هر يک از غلتک‌ها، اصطكاک و سرعت دوراني قطعه ثابت است. از عواقب تغيير در ضخامت پيش توليد تغيير نيروي غلتک‌ها و در نتيجه تغيير نيروي نامتعادل بين آن‌ها كه به مندرل اعمال مي‌شود است. نتيجه اين امر تغيير در مقدار خيز مندرل و غلتک‌ها است كه تغيير ضخامت‌هاي ورودي و خروجي هر غلتک و تنش تسليم متوسط ماده را به همراه دارد. با در نظر گرفتن حالتي كه تغييرات ضخامت پيش‌توليد و خيز مندرل و غلتک نسبت به كاهش ضخامت توسط هر غلتک كوچک باشد مي‌توان از تغيير تنش متوسط تسليم ماده نيز صرف‌نظر نمود. بنابراين رابطه (۱) را مي‌توان به صورت رابطه (۲) نموده و براي غلتک با شماره i نوشت:

$$F_{ri} = f(s_i,t_i) \quad (۲)$$

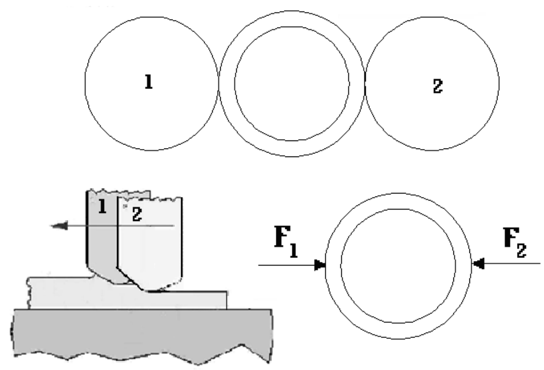
با كوچک در نظر گرفتن تغييرات ضخامت پيش‌توليد و خيز مندرل مي‌توان بسط تيلور تابع فوق را به جاي آن در نظر گرفت:

$$F_{ri} = f(s_{oi},t_{oi}) + \frac{\partial f(s_{oi},t_{oi})}{\partial s}(s_i - s_{oi}) + \frac{\partial f(s_{oi},t_{oi})}{\partial t}(t_i - t_{oi}) \quad (۳)$$

در رابطه فوق s_{oi} و t_{oi} ضخامت‌هاي ورودي و خروجي غلتک شماره i در حالتي هستند كه ضخامت پيش‌توليد ثابت باشد.

۲-۱- فلوفرمينگ دوغلتكه

شكل (۴) موقعيت غلتک‌ها نسبت به مندرل را در حالت فلوفرمينگ دوغلتكه نشان مي‌دهد. در اين شكل نيروهاي اعمالي به مندرل از طرف غلتک‌ها نيز نشان داده شده است.



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

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

$$F_{r1} = f_1(s_{o1},t_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial s}(s_1 - s_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial t}(t_1 - t_{o1}) \quad (۱-٤)$$

$$F_{r2} = f_2(s_{o2},t_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial s}(s_2 - s_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial t}(t_2 - t_{o2}) \quad (۲-٤)$$

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 (δ) در نظر گرفت. تغییر ضخامت ورودی به غلتک اول را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$s_1 - s_{o1} = e_\theta \quad (۵)$$

که در آن e_θ بیانگر تفاوت ضخامت پیش تولید نسبت به ضخامت متوسط آن در موقعیت θ است. با توجه به شکل ۴ تغییر ضخامت خروجی از غلتک اول برابر است با:

$$t_1 - t_{o1} = \delta_{m\theta} + \delta_{r1\theta} \quad (٦)$$

$\delta_{m\theta}$ 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:

$$\delta_r = \frac{K_{roller}}{F_r} \quad (۷)$$

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

$$s_2 - s_{o2} = (t_1 - t_{o1})_{\theta-180} \quad (۸)$$

برای تغییر ضخامت خروجی از غلتک دوم می‌توان نوشت:

$$t_2 - t_{o2} = -\delta_{m\theta} + \delta_{r2\theta} \quad (۹)$$

با جایگذاری روابط ۵ و ۶ و ۷ و ۸ و۹ در روابط ۴ نیروی هر غلتک به صورت تابعی از تغییرات ضخامت پیش‌تولید و خیز مندرل و غلتک‌ها بدست می‌آید.

۲-۲- فلوفرمینگ سه غلتکه

در فلوفرمینگ 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:

$$F_{r1} = f_1(s_{o1},t_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial s}(s_1 - s_{o1}) + \frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial t}(t_1 - t_{o1}) \quad (۱-۱۰)$$

$$F_{r2} = f_2(s_{o2},t_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial s}(s_2 - s_{o2}) + \frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial t}(t_2 - t_{o2}) \quad (۲-۱۰)$$

$$F_{r3} = f_3(s_{o3},t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3},t_{o3})}{\partial t}(t_3 - t_{o3}) + \frac{\partial f_3(s_{o3},t_{o3})}{\partial s}(s_3 - s_{o3}) \quad (۳-۱۰)$$

مشابه فلوفرمینگ دوغلتکه تغییر ضخامت ورودی به غلتک اول را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$s_1 - s_{o1} = e_\theta \quad (۱۱)$$

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

$$\vec{\delta} = a\vec{i} + b\vec{j} \quad (۱۲)$$

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

$$t_1 - t_{o1} = \vec{\delta}_\theta.\vec{n}_1 + \delta_{r1\theta} = (a_\theta\vec{i} + b_\theta\vec{j}).(-\vec{j}) + \delta_r = -b_\theta + \delta_{r1\theta} \quad (۱۳)$$

اندیس θ 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:

$$s_2 - s_{o2} = (t_1 - t_{o1})_{\theta-120} \quad (۱٤)$$

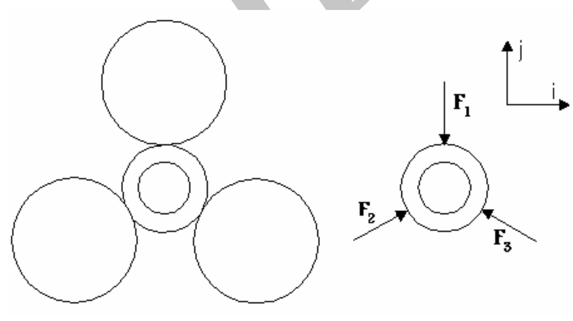
برای تغییر ضخامت خروجی از غلتک دوم و سوم می‌توان نوشت:

$$t_2 - t_{o2} = \vec{\delta}_\theta . \vec{n}_2 + \delta_{r2\theta} = (a_\theta \vec{i} + b_\theta \vec{j}).(0.866\vec{i} + 0.5\vec{j}) + \delta_{r2\theta} = 0.866 a_\theta + 0.5 b_\theta + \delta_{r2\theta} \qquad (۱۵)$$

$$t_3 - t_{o3} = \vec{\delta}_\theta . \vec{n}_3 + \delta_{r3\theta} = (a_\theta \vec{i} + b_\theta \vec{j}).(-0.866\vec{i} + 0.5\vec{j}) + \delta_{r3\theta} = -0.866 a_\theta + 0.5 b_\theta + \delta_{r3\theta} \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق $\vec{n}_2$ بردار يكه در راستاي بردار $\vec{F}_2$ و $\vec{n}_3$ بـردار يكـه در راسـتاي بـردار $\vec{F}_3$ اسـت. $\delta_{r2\theta}$ خيـز غلتـك دوم و $\delta_{r3\theta}$ خيز غلتك سوم است. تغييـر ضـخامت ورودي بـه غلتـك سوم با تغيير ضخامت خروجي از غلتك دوم در ۱۲۰ درجه قبل برابر است:

$$s_3 - s_{o3} = (t_2 - t_{o2})_{\theta - 120} \qquad (۱۷)$$



شكل (۵): نيروهاي شعاعي اعمالي به مندرل از طرف غلتك‌ها در فلوفرمينگ سه‌غلتكه

با استفاده از رابطه (۱۶) مي‌توان خطاي موجود در ضخامت نهايي قطعه، ناشي از جابجايي مندرل و غلتك را نيز محاسبه نمود. با جايگذاري روابط (۱۳)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) در روابط (۱۰) مي‌توان نيروي هر غلتك را به صورت تابعي از ضخامت اوليه پيش‌توليد و خيز مندرل و خيز غلتك‌ها محاسبه نمود.

۳- معادلات تعادل

با توجه به شكل ۴ و با در نظر گرفتن تعادل مندرل، معادله برداري زير را بين نيروي غلتك‌ها و نيروي مندرل مي‌توان نوشت:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_m \qquad (۱۸)$$

در رابطه فوق F_m نيرويي است كه منـدرل تحمـل مـي‌نمايـد و مي‌توان آنرا بر حسب سفتي[۷] و جابجايي مندرل نوشت:

$$\vec{F}_m = K\vec{\delta} \qquad (۱۹)$$

بايد توجه داشت كه خيز مندرل و غلتك‌ها با چرخش مندرل تغيير مي‌نمايد و چون خيز مندرل در هر زمان با خيز آن در ۱۸۰ درجه قبل وابسته است بنابراين براي يافتن خيز مندرل به ازاي زاويه θ روي پيش‌توليد بايد خيز در زاويه $180-\theta$ را نيز يافت. به اين منظور بايد معادله تعادل در هر دو حالت را با هم حل نمود.

به طور مشابه در فلوفرمينگ با سه غلتك معادله تعادل و نيروي اعمالي به مندرل عبارتست از:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F}_m \qquad (۲۰)$$

$$\vec{F}_m = K\vec{\delta} = K(a\vec{i} + b\vec{j}) \qquad (۲۱)$$

در اين حالت نيز خيز مندرل در هر زمان به خيز آن در ۱۲۰ درجه و ۲۴۰ درجه قبل نيز وابسته است بنابراين بايد معادلات تعادل در اين سه حالت با هم حل شوند.

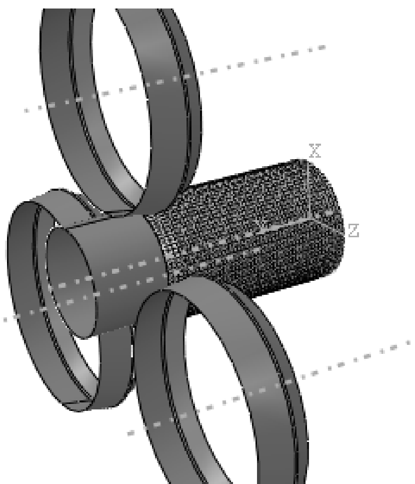
۴- محاسبه ضرايب لازم

در اين مقاله براي محاسبه ضرايب مربوط به نيروي غلتك‌ها در معادلات (۱۸) و (۲۰) از مدل‌سازي فرايند در نرم‌افزار آباكوس استفاده شده است. شكل (۷) نحوه مدلسازي و چگونگي قرارگيري غلتك‌ها نسبت به قطعه را در مدلسازي نشان مي‌دهد. براي حل، از روش حل صريح استفاده شد. قطعه كار در شبيه‌سازي به صورت جسم قابل تغييرشكل در نظر گرفته شد و از المان سه بعدي هشت نودي براي مش‌بندي آن استفاده شد [۸]. در شبيه‌سازي، غلتك و مندرل به صورت صلب تحليلي در نظر گرفته شده‌اند و نياز به مش‌بندي ندارند.

براي محاسبه ضرايب $f_1(s_{o1},t_{o1})$ و $f_2(s_{o2},t_{o2})$ و $f_3(s_{o3},t_{o3})$ مي‌توان نيروي هر يك از غلتك‌ها را در راستاي شعاع محاسبه نمود. براي محاسبه ضريب $\frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial s}$ بايد ضخامت پيش‌توليد را به ميزان كمي تغيير داد و تغيير نيروي غلتك اول نسبت به آن را محاسبه نمود. براي محاسبه ضرايب $\frac{\partial f_1(s_{o1},t_{o1})}{\partial t}$ و $\frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial s}$ بايد به غلتك اول جابجايي كوچكي داد و تغييرات نيروهاي غلتك‌هاي اول و دوم نسبت به آن را محاسبه نمود. در اين حالت نيروي غلتك سوم تغييري نمي‌نمايد. براي محاسبه ضرايب $\frac{\partial f_2(s_{o2},t_{o2})}{\partial t}$ و $\frac{\partial f_3(s_{o3},t_{o3})}{\partial s}$ مي‌توان به غلتك دوم جابجايي كوچكي داده و تغييرات نيروهاي غلتك دوم و سوم نسبت به آن را محاسبه نمود. در اين حالت نيروي غلتك اول تغييري نمي‌نمايد. براي محاسبه ضريب $\frac{\partial f_3(s_{o3},t_{o3})}{\partial t}$ نيز مي‌توان به غلتك سوم جابجايي

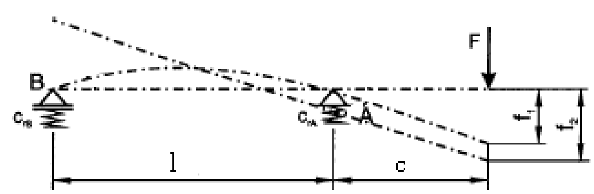
کوچکي داد و تغييرات نيروي آن را محاسبه نمود.

عامل ديگري که براي حل معادلات تعادل بايد محاسبه شود سفتي مندرل و سفتي غلتک است که به طور عملي بر روي دستگاه قابل اندازه‌گيري است و يا مي‌توان آن‌ها را با استفاده از مشخصات مندرل و اسپيندل و اجزاي نگهدارنده غلتک محاسبه نمود.



شکل (۶): موقعيت غلتک‌ها و قطعه در مدلسازي

شکل (۷) طرحي ساده از مندرل و اسپيندل را نشان مي‌دهد. غلتک نيز طرحي کاملا مشابه دارد. براي محاسبه سفتي مندرل و يا غلتک، جابجايي آن به ازاي نيروي معلوم محاسبه مي‌شود. براي ساده‌سازي محاسبه جابجايي، با توجه به شکل (۷) تغيير مکان‌هاي ناشي از تغييرشکل برينگ‌ها (f_2) و ناشي از خمش اسپيندل (f_1) را مي‌توان به طور جداگانه محاسبه نمود و در نهايت f_2 و f_1 را با هم جمع نمود [۱۶]. جزئيات محاسبه هر يک از اين جابجايي‌ها در مرجع [۱۶] بيان شده است.



شکل (۷): نماي ساده شده اسپيندل و تغييرشکل‌هاي آن

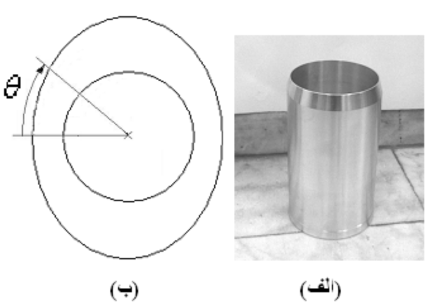
۵- روش آزمايش و اندازه‌گيري ضخامت

براي بررسي درستي روش ارائه شده و بررسي عملي تاثير تغيير ضخامت پيش‌توليد بر ضخامت قطعه نهايي، پيش‌توليدي با ضخامت متغيير در محيط آن توليد شد و ضخامت نقاط مختلف روي محيط پيش‌توليد اندازه‌گيري شد. شکل (۸) پيش‌توليد و چگونگي توزيع ضخامت آنرا نشان مي‌دهد. پيش-توليد از جنس آلومينيوم ۷۰۷۵ توليد شد و براي انجام آزمايش از دستگاه فلوفرمينگ سه غلتکه ST4030 استفاده شد. جدول (۱) عوامل ديگر فرايند را نشان مي‌دهد.

جدول ۱ مقدار هر يک از عوامل فرايند در آزمايش

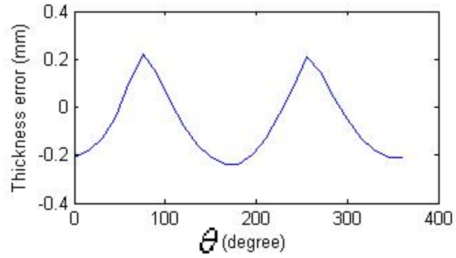
قطر هر سه غلتک (mm)	۲۲۰
زاويه حمله غلتک اول و دوم (degree)	۳۰
زاويه حمله غلتک سوم (degree)	۱۵
شعاع سر هر سه غلتک (mm)	۴
قطر داخلي قطعه (mm)	۱۰۰
ضخامت متوسط اوليه قطعه (mm)	۵/۵۴
ضخامت متوسط نهايي قطعه (mm)	۲/۱۸
طول اوليه (mm)	۱۷/۸
سرعت چرخش قطعه (rev/min)	۳۵۰
سرعت پيشروي (mm/rev)	۰/۱۵

شکل (۹) دستگاهي که براي اندازه‌گيري ضخامت پيش‌توليد استفاده شده است را نشان مي‌دهد. در اين وسيله از ساعت اندازه‌گيري با دقت ۱ ميکرون استفاده شده است. در شکل (۱۰) ضخامت اندازه‌گيري شده در محيط پيش‌توليد نشان داده شده است.

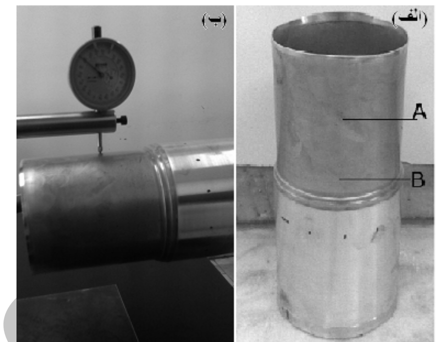


شکل (۸): الف)پيش‌توليد با ضخامت متغيير ب) چگونگي توزيع ضخامت در مقطع پيش‌توليد

شکل (۹): دستگاه استفاده شده براي اندازه‌گيري ضخامت قطعات



شكل (۱۰): تغييرات ضخامت اندازه‌گيري شده در محيط پيش‌توليد



شكل (۱۱): الف) قطعه فرم داده شده ب) روش اندازه‌گيري ضخامت آن

شكل (۱۱) قطعه شكل داده شده و روش اندازه‌گيري ضخامت آن را نشان مي‌دهد. در اين شكل موقعيت‌هايي كه در آن‌ها ضخامت قطعه اندازه‌گيري شده است نيز نشان داده شده است.

۶- نتايج و بحث

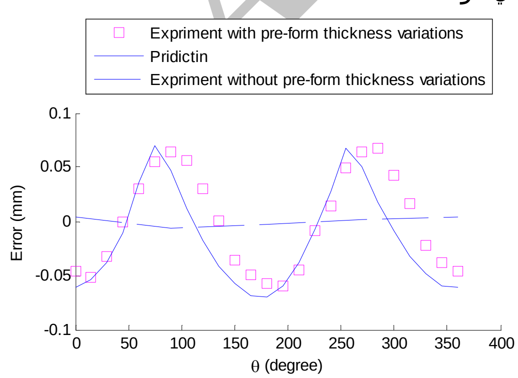
براي بررسي روش ارائه، شده تغييرات ضخامت در طول قطعه‌اي با ضرايب ارائه شده در جدول (۲) بررسي شد. سفتي مندرل و غلتک نيز كه وابسته به قطر آن‌ها و مشخصات دستگاه فلوفرمينگ است محاسبه شده است. شكل (۱۲) تغييرات ضخامت اندازه‌گيري شده در قطعه نهايي در فاصله ۵۰ ميليمتر از انتهاي آن (نقطه A) را همراه با تغييرات ضخامت پيش‌بيني شده نشان مي‌دهد. در اين شكل همچنين براي مقايسه تغييرات ضخامت در قطعه‌اي كه از پيش‌توليد، با ضخامت يكنواخت ساخته شده است نيز نشان داده شده است و ديده مي‌شود كه در چنين قطعه‌اي تغييرات ضخامت بسيار كمتر است. ديده مي‌شود كه بين نتايج پيش‌بيني شده و داده‌هاي اندازه‌گيري شده روي قطعه اختلاف فازي در حدود ۱۵ درجه وجود دارد ولي از نظر محدوده خطا و چگونگي توزيع ضخامت در محيط قطعه، همخواني خوبي بين نتايج وجود دارد. خطاي محاسبات نسبت به داده‌هاي تجربي در نقاطي كه حداكثر خطا را دارند در حدود ۱۵ درصد است.

دليل اين اختلاف فاز بين نتايج، به جابجايي مواد در جهت محيطي مربوط است كه در مراجع [۱۰] و [۱۱] به آن پرداخته شده است. اين جابجايي ناشي از كرنش برشي در جهت محيطي محوري است كه در شكل (۱۳) نشان داده شده است [۱۱].

جدول ۲: ضرايب محاسبه شده براي قطعه آزمايش شده

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

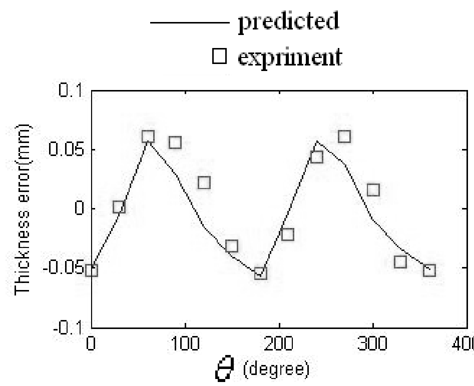
با مقايسه شكل (۱۰) و (۱۲) ديده مي‌شود كه در صورتي كه در محيط قطعه اوليه، تغييرات ضخامت وجود داشته باشد در قطعه نهايي نيز تغييرات ضخامت با همان توزيع وجود خواهد داشت ولي با نسبت كمتر، به عبارت ديگر فرايند فلوفرمينگ با چند غلتک موجب يكنواخت‌تر شدن ضخامت قطعات مي‌شود.



شكل (۱۲): تغييرات ضخامت در قطعه نهايي در نقطه A به همراه تغييرات ضخامت در قطعه‌اي با پيش‌توليد يكنواخت

شكل (۱۴) ضخامت محاسبه شده و اندازه‌گيري شده را در نقطه B، با فاصله ۱۰۰ ميليمتر از انتهاي قطعه نشان مي‌دهد.

شكل (۱۳): جابجايي ماده در جهت محيطي [۱۱].

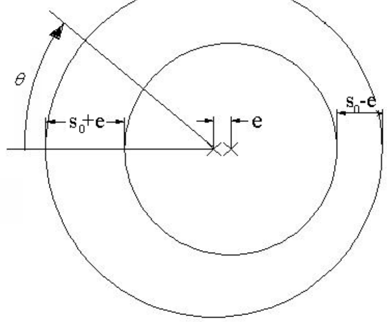


شكل (۱۴): تغييرات ضخامت در قطعه نهايي در نقطه B

ديده مي‌شود كه اختلاف فاز در اينجا نسبت به نقطه A كمتر است دليل اين امر حركت محيطي كمتر ماده در اين نقطه نسبت به نقطه A است. تفاوت ديگر ضخامت نهايي در اين دو نقطه، دامنه كمتر خطا در نقطه B نسبت به A است. دليل اين كاهش خطا افزايش سفتي مندرل در اين نقطه نسبت به نقطه A است. نكته جالب توجه در قطعه نهايي، گوشواره‌اي شدن انتهاي قطعه به دليل يكنواخت نبودن ضخامت اوليه است. شكل (۱۵) انتهاي قطعه را با انتهاي قطعه‌اي كه پيش‌توليد آن داراي ضخامت يكنواخت بوده است مقايسه مي‌نمايد.

شكل (۱۵): انتهاي قطعه توليد شده الف) از پيش‌توليد يكنواخت ب) از پيش‌توليد با ضخامت متغيير

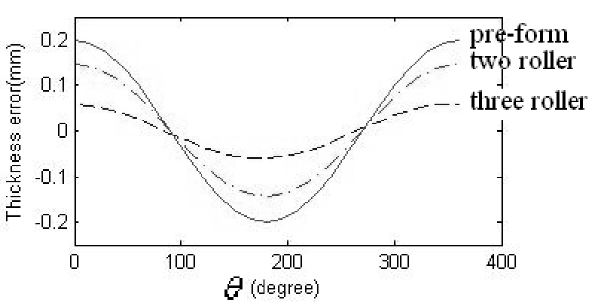
در اين قسمت براي بررسي تاثير شكل توزيع اوليه ضخامت و مقايسه فلوفرمينگ با دو و سه غلتك تغييرات ضخامت در قطعه اوليه را به صورت خارج از محوري به اندازه e در نظر مي‌گيريم. شكل (۱۶) تغييرات ضخامت را به صورت اغراق آميز نشان مي‌دهد.



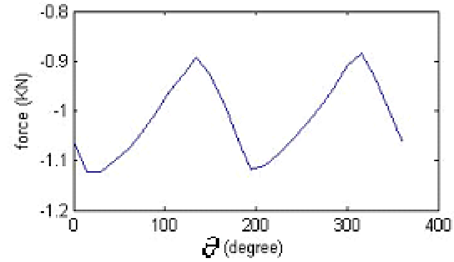
شكل (۱۶): تغييرات ضخامت در نظر گرفته شده براي پيش‌توليد

شكل (۱۷) توزيع ضخامت اوليه و نهايي اين قطعه را در فلوفرمينگ دو و سه غلتكه نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه در هر كدام از اين فرايندها نحوه توزيع ضخامت قطعه نهايي مشابه پيش‌توليد است ولي قطعه توليد شده با فلوفرمينگ سه غلتكه نسبت به فلوفرمينگ دوغلتكه داراي توزيع ضخامت يكنواخت‌تري است.

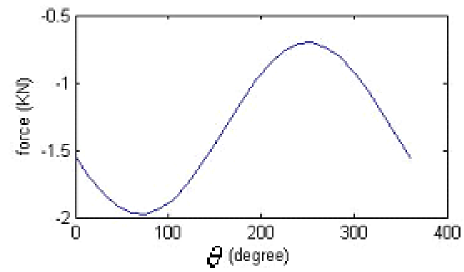
با توجه به اينكه خارج از مركزي پيش‌توليد تعادل نيرويي بين غلتك‌ها را از بين مي‌برد و برآيند نيروي غلتك‌ها به مندرل و اجزاي نگهدارنده غلتك‌ها اعمال مي‌شود در اين قسمت به بررسي نيروي نامتعادل ايجاد شده مي‌پردازيم. شكل (۱۸) مولفه نيروي اعمالي به مندرل در جهت عمودي را براي توزيع ضخامت‌هاي نشان داده شده در شكل‌هاي (۸) و (۱۶) نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه نيروها به صورت متناوب و مشابه توزيع ضخامت اوليه هستند. اعمال اين نيروهاي لرزشي به مندرل و مكانيزم نگهدارنده غلتك‌ها باعث كاهش عمر اجزاي اسپيندل و همچنين اجزاي نگهدارنده غلتك‌ها و راهنماهاي دستگاه مي‌شود.



شكل (۱۷): مقدار خارج از مركزي در پيش‌توليد و قطعه نهايي در فلوفرمينگ دو و سه غلتكه



(الف)



(ب)

شکل ۱۸- مولفه عمودي نيروي اعمالي به مندرل در يک دور چرخش آن الف) توزيع ضخامت نشان داده شده در شکل (۸) ب)توزيع ضخامت نشان داده شده در شکل (۱۶)

گفتني است که در اين مقاله سعي بر بررسي اثر تغييرات ضخامت اوليه پيش‌توليد بر ضخامت نهايي بوده است و از عوامل ديگري که باعث تغيير ضخامت در قطعه مي‌شوند از جمله برگشت بعد از هر غلتک صرف‌نظر شده است. به نظر مي‌رسد که پديده برگشت با توجه به کم بودن تغييرات ضخامت پيش توليد در اين فرايند باعث خطاي تقريبا ثابت در محيط قطعه مي‌شود که در عمل نيز اين خطاي ثابت با تغيير پيش‌روي و در پايان با تغيير موقعيت غلتک به اندازه خطا قابل حذف است.

۷- نتايج

در اين مقاله روشي براي بررسي دقت ضخامت محصول در فلوفرمينگ با چند غلتک ارائه شد که با نتايج تجربي هم‌خواني خوبي دارد. با استفاده از اين روش اثر تغييرات ضخامت پيش‌توليد بررسي شد و نتايج زير بدست آمد:

۱- تغييرات ضخامت در پيش‌توليد در فرايندهاي فلوفرمينگ دو و سه‌غلتکه باعث ايجاد تغييرات ضخامت با همان توزيع در محصول نهايي مي‌شود.

۲- تغييرات ضخامت محصول نهايي از پيش توليد کمتر است. بنابراين مي‌توان انتظار داشت که عيوبي که در توليد پيش‌توليد به صورت تغييرات ضخامت ظاهر مي‌شوند در محصول نهايي به ميزان کمتري وجود داشته باشند.

۳- اختلاف فاز بين نتايج تجربي و توزيع ضخامت محاسبه شده در محيط قطعه بيانگر جابجايي مواد در جهت محيط است و وجود کرنش برشي در جهت محيطي محوري را اثبات مي‌نمايد.

۴- به ازاي پيش‌توليد و محصول نهايي مشابه، فلوفرمينگ با سه غلتک نسبت به فلوفرمينگ با دو غلتک محصولي با ضخامت يکنواخت‌تر توليد مي‌کند.

۵- در اثر وجود تغييرات ضخامت در پيش‌توليد، به مندرل و اجزاي نگهدارنده غلتک‌ها نيروهاي لرزشي وارد مي‌شود که باعث اعمال نيروهاي خستگي به اسپيندل و راهنماهاي دستگاه شده و از عمر اجزاي آنها مي‌کاهد.

۸- مراجع

[۱] Davidson, M. J.; Balasubramanianb, 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.

[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, 2008.

[۱۲] 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

[۱۳] 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.

[۱۴] 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.

[۱۵] 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.

[۱۶] Sarenac, M.; “Stiffness of Machine Tool Spindle as a Main Factor for Treatment Accuracy” The scientific journal FACTA UNIVERSITATIS Series: Mechanical Engineering Vol.1, No 6, p.p. 665 – 674, 1999.

[۱۷] 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.

[۱۸] 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.

[۱۹] 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.

[۲۰] 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.

۹- زیرنویس ها

[۱] Slab method
[۲] Stream function
[۳] Upper bound
[٤] Grid line
[٥] Hardness
[٦] Taguchi
[٧] Stiffness