



## بررسی تجربی تاثیر پارامترهای فرایند شکل دهی چرخشی بر نیروها و توسعه عیوب در شکل دهی لوله های آلومینیم آلیاژی 6061

محمد علی رسولی<sup>1</sup>، ابوذر طاهری زاده<sup>2\*</sup>، محمود فرزین<sup>3</sup>، امیر عبدالله<sup>4</sup>، محمدرضا نیرومند<sup>5</sup>

- 1- استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر  
 2- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
 3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان  
 4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
 5- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران  
 \* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، a.taheri@cc.iut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرایند شکل دهی چرخشی لوله که گونه‌ای از فرایندهای شکل دهی چرخشی است، یکی از روش‌های ساخت لوله‌های مدور بدون درز در صنایع پیشرفته می‌باشد. در این فرایند موادی که به زیر غلتک وارد می‌شوند باید در جهت محوری به صورت اکستروژن شده جریان پیدا کنند. ماهیت اصلی فرایند، موضعی بودن ناحیه تغییر شکل و مقید بودن این ناحیه به ابزار و مواد اطراف آن است. لذا این فرایند پتانسیل بالایی برای شکل گیری و توسعه عیوب به دلیل جریان‌های ناخواسته دارد. انتخاب نامناسب پارامترهای فرایند موجب شکل گیری و توسعه عیوب هندسی و ابعادی در قطعه می‌گردد. در این تحقیق براساس اصول طراحی آزمایش، چگونگی تاثیر پارامترهای فرایند بر شکل گیری و توسعه عیوب و ارتباط آن با جریان مواد و نیروهای فرایند در شکل دهی آلومینیم آلیاژ شده 6061 بررسی شدند. نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهد با استفاده از نسبت کاهش ضخامت و میزان پیشروی در دور بهینه می‌توان از توسعه عیوب هندسی و ابعادی جلوگیری کرد. همچنین ارزیابی نحوه تغییرات نیروهای اندازه گیری شده نسبت به نیروهای محاسبه شده با استفاده از روابط معیار نشان می‌دهد که میزان انحراف نیروهای اندازه گیری شده نسبت به نیروهای محاسبه شده با استفاده از روابط معیار ناشی از جریان ناخواسته مواد است که عامل اصلی توسعه عیوب هندسی و ابعادی و تغییر ماهیت فرایند نیز می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 21 خرداد 1395  
 پذیرش: 03 آبان 1395  
 ارائه در سایت: 21 آذر 1395  
 کلید واژگان:  
 شکل دهی چرخشی لوله  
 آلیاژ آلومینوم 6061  
 توسعه عیوب  
 نیروی شکل دهی

## Investigating the effects of process parameters on forming forces and defects formation in tube spinning process of AA6061

MohammadAli Rasooli<sup>1</sup>, Aboozar Taherizadeh<sup>2\*</sup>, Mahmood Farzin<sup>3</sup>, Amir Abdolah<sup>4</sup>,  
 Mohammad Reza Niroomand<sup>5</sup>

- 1- Department of Marine Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Iran  
 2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
 3- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran  
 4- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
 5- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, a.taheri@cc.iut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 10 June 2016  
 Accepted 24 October 2016  
 Available Online 11 December 2016

#### Keywords:

Tube spinning  
 Flow forming, AA6061  
 Defects formation  
 Forming forces

### ABSTRACT

Tube spinning or flow forming process is used for manufacturing of seamless tubes widely put into service in advanced industries. The ideal flow for materials entering the deformation zone in this process is extrusion-type flow in axial direction. Very localized deformation zone which is confined by outer materials and forming tools is a very important aspect of this process. Therefore, developments of defects during the deformation process with undesirable flow of materials can easily occur. The main reason of undesirable flow of materials is choosing inappropriate process parameters which results in the occurrence of various geometrical and dimensional defects. In this paper, the effects of process parameters on formation and growth of different defects and their correlations with material flow and forming forces in tube spinning of AA6061 were investigated by using design of experiment (DOE) method. The results of experiments show that by applying the optimized values of reduction and feed rate per revolution, these defects can be controlled. Also, by comparing the experimentally measured and theoretically calculated forming forces it can be shown that the larger the deviation of measured forces from calculated ones the more severe the formation of defects and undesirable materials flow becomes.

Please cite this article using:

M. A. Rasooli, A. Taherizadeh, M. Farzin, A. Abdolah, M. R. Niroomand, Investigating the effects of process parameters on forming forces and defects formation in tube spinning process of AA6061, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 186-194, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

**1- مقدمه**

فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله یا فلوفرمینگ فرایندی است برای ساخت لوله‌های بدون درز در صنایع حساس و پیشرفته از جمله هوافضا، بهداشتی و تجهیزات پزشکی. ماهیت فرایند مذکور، داشتن نیروهای شکل‌دهی کمتر در مقایسه با فرایندهای دیگر برای تولید قطعات مشابه مانند اتوکاری و کشش و نیز اثر چشمگیر پارامترهای فرایند بر کیفیت سطح و بدنه قطعه‌کار می‌باشد. در فرایند فلوفرمینگ، قطعه پیش‌فرم روی مندرل قرار می‌گیرد و پس از آن که ماده زیر نقطه تماس غلتک وارد منطقه تغییر فرم پلاستیک می‌شود غلتک‌ها در جهت محوری ماده را اکستروود کرده و می‌کشند. بنابراین ضخامت دیواره با جریان محوری مواد کاهش پیدا می‌کند و طول قطعه‌کار زیاد می‌شود [1]. نحوه سیلان فلز و کیفیت قطعه نهایی در فرایند فلوفرمینگ به پارامترهای متعددی از قبیل جنس، خواص مکانیکی و متالورژیکی ماده اولیه، ضخامت پیش‌فرم، لقی بین پیش‌فرم و مندرل، مقدار کاهش ضخامت، سرعت پیشروی و پارامترهای هندسی ابزار بستگی دارد.

در دهه‌های گذشته، تحلیل‌های تئوری متعددی به منظور محاسبه نیرو و توان لازم برای شکل‌دهی چرخشی لوله‌ها انجام شده است. اولین تحلیل برای این فرایند توسط کوبایاشی و تامسن [2] در سال 1962 انجام شده است. آن‌ها در تحقیق خود از روش تحلیل قاجی برای به‌دست آوردن نیروها استفاده کردند. بعد از آن، هایاما [3] با استفاده از تئوری کوبایاشی و تامسن و بسط و بهبود آن تلاش کرد تا رابطه‌ای صریح برای تخمین نیروهای فرایند ارائه دهد که نتایج به دست آمده از آن نسبت به نتایج تئوری قبلی تطابق بهتری با آزمون‌ها نشان دادند. در تحقیقی دیگر، هایاما و کودو [4] یک روش تحلیلی با استفاده از روش مینیمم کردن انرژی برای تخمین نیروهای فرایند و دقت ابعادی قطعه ارائه دادند، که طبق گزارش آن‌ها تطابق خوبی بین مقادیر محاسبه شده با این روش و مقادیر به‌دست آمده از آزمون‌ها در محدوده وسیعی از شرایط کاری مثل زوایای مختلف غلتک، سرعت‌های پیشروی مختلف و نسبت‌های کاهش مختلف وجود دارد. سینقال [5] و همکاران تحلیلی برای تخمین توان موردنیاز برای شکل‌دهی چرخشی لوله با فرض عدم انباشتگی، عدم رشد قطری و ضریب اصطکاک ثابت بین غلتک و ماده ارائه کردند و همچنین اثر ضخامت پیش‌فرم و مقدار پیشروی بر دور را روی توان مصرفی فرایند بررسی کردند. در ادامه پارک و همکاران [6] از روش حد بالایی و میدان‌های سرعت دوزنقه ای و کروی برای تحلیل سیلان و نیروی موردنیاز تغییر شکل در این فرایند استفاده کردند. ژو و همکارانش [7] در سال 2001 به منظور درک توزیع تنش و کرنش و تحلیل مکانیزم تغییر شکل لوله، یک مدل اجزاء محدود برای فرایند اسپینینگ لوله‌ها پیشنهاد دادند و عنوان کردند که افزایش مقدار پیشروی بر دور، موجب افزایش نیروهای فرایند می‌شود. پارسا و همکاران [8] فرایند شکل‌دهی چرخشی مستقیم لوله با استفاده از دو غلتک را به روش اجزای محدود صریح شبیه‌سازی کرده و شکل‌پذیری ماده در این فرایند و نیز تأثیرات هندسه تماس بر روی منطقه تغییر فرم در سرعت‌های پیشروی مختلف و دو زاویه حمله متفاوت را بررسی کردند. محبی و اکبرزاده [9] فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را با روش اجزای محدود شبیه‌سازی کردند و چگونگی توسعه کرنش‌های اضافی را در این فرایند بررسی نمودند. ذوقی و همکاران [10] با استفاده از روش اجزاء محدود چگونگی تغییر فرم فلز و توزیع کرنش را در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله از جنس فولاد 42CrMo بررسی کردند.

در مورد اثر پارامترهای فرایند و ابزار بر روی کیفیت قطعات آلومینیومی،

فولادی و دیگر آلیاژهای تولید شده به روش شکل‌دهی چرخشی لوله تحقیقاتی انجام شده که در ادامه مهمترین آن‌ها مرور خواهند شد. پراکش و همکاران [11] اثر سرعت پیشروی، پروفیل غلتک، درصد کاهش ضخامت و نوع روان‌کار مورد استفاده در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر کیفیت سطح لوله تولیدی از جنس فولاد AISI-304 و نیز بر توان موردنیاز فرایند بررسی کردند. چانگ و همکاران [12] قابلیت شکل‌پذیری لوله‌های آلومینیم آلیاژی 2024 و 7075 را تحت پارامترهای مختلف فرایند بررسی کردند. راجان و همکاران [13] ایجاد عیوب مختلف در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله از جمله پوسته شدن، ترکیدگی پیش از موعد، رشد قطری، ریزترک‌ها و ترک‌های درشت را برای فولاد استحکام بالای SAE 4130 بررسی کردند. فاضلی و همکاران [14] تأثیر پارامترهای مختلف شکل‌دهی و ترمومکانیکی (مثل ضخامت پیش‌فرم، درصد کاهش ضخامت، سرعت چرخش مندرل، سرعت پیشروی غلتک، زمان حل‌سازی ذرات و زمان پیر کردن ماده) را بر روی کیفیت سطح لوله شکل‌دهی شده از جنس آلیاژ 2024 بررسی کردند. سانگ و همکاران [15] روشی را برای تشخیص عیوب با استفاده از جمع‌آوری همزمان اطلاعات فرایند مثل نیروهای شکل‌دهی و یا توان مورد مصرف دستگاه ارائه دادند. یائو و مورانا [16] اثرات سرعت پیشروی را بر روی کرنش ضخامت، نیروی شعاعی، دقت ابعادی قطر و صافی سطح برای یک آلیاژ آلومینیوم به‌طور تجربی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش نیروی شکل‌دهی چرخشی، افزایش کرنش ضخامت و افزایش زبری سطح خواهد شد. به علاوه دقت ابعادی در قطر نیز با افزایش سرعت پیشروی کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران [17] اثر فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی شکل‌پذیری و توسعه عیوب لوله‌های آلومینیومی 2024 که تحت فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته‌اند بررسی کردند. اکینویچ و همکاران [18] تأثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر کیفیت سطح قطعات نهایی از جنس AI99.5% بررسی کردند. سرینویاسولو و همکاران [19] تأثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی صافی سطح لوله‌های آلومینیم آلیاژی 6082 بررسی کردند. تسویولاس و همکاران [20] اثر پارامترهای شکل‌دهی چرخشی لوله را بر روی چگونگی تنش پسماند در لوله‌های فولادی Cr-Mo-V بررسی کردند.

با این که بررسی جریان مواد در این فرایند و تأثیر آن در توسعه عیوب و رابطه نحوه توسعه این عیوب با تغییرات نیروها در فرایند در جهت شناخت فرایند بسیار حائز اهمیت است، ولی هنوز هیچ تحقیق جامعی در میان تحقیقات انجام شده روی تمامی این اثرات انجام نشده است. در این مقاله براساس اصول طراحی آزمایش، اثر پارامترهای فرایند بر نیروها و نحوه توسعه عیوب در فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله‌های آلومینیمی آنیل شده بررسی می‌شود. همچنین ارتباط عیوب با نیروهای فرایند و دلایل انحراف نیروهای اندازه‌گیری شده با روابط معیار با توجه به عیوب فرایند مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین حداکثر قابلیت شکل‌پذیری چرخشی بدون عیب توسط فرایند با یک ابزار با مشخصات هندسی و ماده با خواص مکانیکی ثابت تحت تغییر شکل با تغییر پارامترهای فرایند قابل حصول است و می‌توان تمایل به توسعه عیوب را در شرایط حداکثر شکل‌پذیری در یک مرحله با انتخاب پارامترهای مناسب فرایند کنترل نمود.

**2- آزمون‌ها و روش تحقیق**

در این بخش سیستم آزمایشگاهی شکل‌دهی چرخشی لوله مختصراً معرفی

توصیه شده است [20]. با توجه به اهمیت پارامتر نسبت کاهش ضخامت، این پارامتر در 3 سطح مورد مطالعه قرار می گیرد که عبارتند از: 16.7%، 25%، 33%. با در نظر گرفتن ضخامت 3 میلی متری پیش فرم، مقادیر کاهش ضخامت 0.5، 0.75 و 1 میلی متر در شعاع می باشند.

مقدار پیشروی بر دور نیز نقش مهمی در کیفیت قطعه نهایی دارد. کاهش مقدار پیشروی بر دور می تواند موجب انباشتگی، پارگی سطحی یا پوست ماهی<sup>1</sup> شدن شود و افزایش آن موجب اعوجاج در سطح خارجی یا اصطلاحاً روزه زنی و فرار ماده می شود [11]. بنابراین باید محدوده قابل قبولی برای مقدار پیشروی بر دور در نظر گرفت. با توجه به این که محدوده قابل قبول این پارامتر تابع پارامترهای ابزار و میزان کاهش ضخامت در قطعه است، در 3 سطح مورد مطالعه قرار گرفت. با انجام تعدادی آزمون مشخص شد که در بدترین شرایط محدوده قابل قبول مقدار پیشروی بر دور نمی تواند کمتر از 0.08 میلی متر بر دور و بیشتر از 0.35 میلی متر بر دور باشد. بنابراین با توجه به اهمیت این عامل 3 سطح برای آن در نظر گرفته شد که عبارتند از: 0.11، 0.2 و 0.32 میلی متر بر دور.

### 3-2- رویه آزمون های شکل دهی چرخشی لوله

یکی از تکنیک های پر کاربرد برای طراحی آزمایش، شامل ترکیب عوامل متغیر در تمام سطوح آن ها<sup>2</sup> است. دو عامل به عنوان عوامل فرایند برای آزمون ها در نظر گرفته شد. عامل نسبت کاهش ضخامت در سه سطح و مقدار پیشروی بر دور در سه سطح معرفی شدند. عوامل متغیر و سطوح مربوطه در جدول 1 نشان داده شده اند. طرح ترکیب کامل عوامل متغیر در تمام سطوح تغییر، یک ترکیب 3<sup>2</sup> آزمون را شامل می شود که با این ترکیب به 9 آزمون متفاوت شکل دهی نیاز است.

### 3-3- نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا در مورد جریان مواد در فرایند توضیح مختصری ارائه می شود. سپس عیوب ناشی از این جریان ها تشریح می شوند و در نهایت به تحلیل اثرات آن در کیفیت قطعه نهایی و نیروهای فرایند پرداخته می شود.

### 3-1- جریان مواد و تاثیر آن در توسعه عیوب ابعادی

مطالعات نشان می دهند، در شکل دهی چرخشی لوله های آلومینیومی، امکان ایجاد عیوب ابعادی مثل انباشتگی<sup>3</sup> مواد در مقابل غلتک، بادکردگی<sup>4</sup> و رشد قطری<sup>5</sup> وجود دارد. این عیوب به طور شماتیک در "شکل 2" نمایش داده شده اند.

تحلیل جریان مواد در حین فرایند شکل دهی چرخشی لوله اساساً کار پیچیده ای است. نتایج تحقیقات نشان می دهند موادی که به زیر غلتک وارد می شوند، در حین تغییر شکل پلاستیک امکان جریان در 4 جهت را دارند:

جدول 1 عوامل متغیر و سطوح آن ها در آزمون های شکل دهی چرخشی لوله

Table 1 Variant parameters and their levels in the experiments

سطوح عوامل			عوامل	گروه
1	2	3		
16.7	25	33	نسبت کاهش ضخامت (%)	متغیرهای
0.11	0.2	0.32	مقدار پیشروی بر دور (mm/rev)	فرایند

<sup>1</sup> Skin fish

<sup>2</sup> Full factorial

<sup>3</sup> Build up

<sup>4</sup> Bulge

<sup>5</sup> Diameter growth

می گردد. همچنین پارامترهای مختلف فرایند، ابزار و پیش فرم معرفی خواهند شد. سپس چگونگی طراحی آزمون ها و پارامترهای متغیر برای بررسی اثر پارامترهای فرایند و نیرو بر نحوه توسعه عیوب و نیروی مورد نیاز شکل دهی بیان خواهند شد.

### 1-2- سیستم آزمایشگاهی شکل دهی چرخشی لوله

سیستم آزمون به گونه ای طراحی شد که امکان نصب بر روی یک ماشین تراش معمولی را دارا باشد (شکل 1). با توجه به حجم زیاد آزمون ها، این سیستم امکان تعویض سریع پیش فرم به سادگی و در حداقل زمان را دارد. نیروها به وسیله دستگاه دینامومتر اندازه گیری شدند. بنابراین غلتک شکل دهی به گونه ای نصب شد تا امکان اندازه گیری نیروها در 3 جهت مجزا مهیا گردد.

### 2-2- متغیرهای فرایند و مشخصات هندسی ابزار و قطعه کار

هدف از این تحقیق مطالعه اثر پارامترهای مقدار پیشروی و نسبت کاهش ضخامت بر دور در کیفیت یا توسعه عیوب در فرایند و ارتباط آن با نیروهای فرایند است. به منظور ثبات و تکرارپذیری آزمون ها، تمام پیش فرم ها در شرایط یکسان با ماشین تراش CNC ماشین کاری شدند. قطر مندرل 38 میلی متر، ضخامت پیش فرم 3 میلی متر و لقی قطری بین مندرل و پیش فرم 0.05 میلی متر در نظر گرفته شد. در تمام آزمون ها، سطح داخلی پیش فرم ها به دقت تمیزکاری و قبل از نصب بر روی مندرل به روغن آغشته شدند. به دلیل دمای موضعی بالا حین فرایند و کاهش اصطکاک به روان کاری نیاز است که به عنوان یک خنک کار عمل کند [21]. به این منظور از تغذیه روغن خنک کار تراش کاری به طور پیوسته و مستقیم با نسبت 1:10 به ناحیه تماس غلتک و قطعه کار استفاده شد.

آزمون ها با غلتک به قطر 80 میلی متر انجام شدند و شعاع سر ابزار نیز به عنوان پارامتری وابسته به قطر غلتک معادل 1/8 شعاع غلتک انتخاب شد [3]. مقدار انتخاب شده برای قطر غلتک تابع محدودیت های سیستم آزمون است.

سرعت اسپیندل 90 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. نسبت کاهش ضخامت به صورت درصدی از ضخامت اولیه پیش فرم بیان می شود. حداکثر نسبت کاهش ضخامت ممکن در یک مرحله معرف قابلیت شکل پذیری چرخشی می باشد که با استفاده از ابزار با هندسه نامناسب محدودتر می شود و در شرایط ایده آل می تواند تا 35 درصد ضخامت پیش فرم متغیر باشد. حداقل نسبت کاهش ضخامت نیز به گونه ای تعیین می شود که جریان پلاستیک محدود به سطح خارجی قطعه نشود. حداقل این نسبت حدود 15 درصد

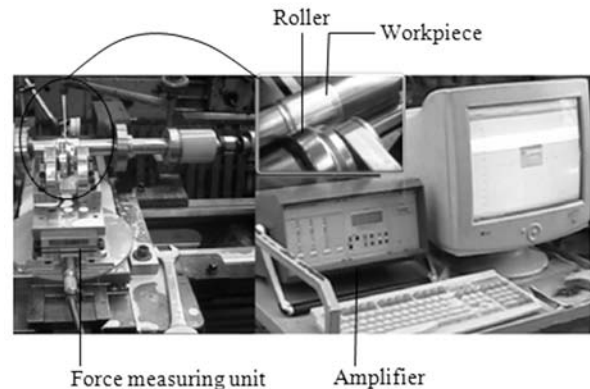


Fig. 1 Experimental tube spinning equipment

شکل 1 تجهیزات سیستم آزمون فرایند شکل دهی چرخشی لوله

سمت انباشتگی در مقابل غلتک و رشد قطری وجود داشته باشد، مواد چاره‌ای جز اکستروود در جهت محوری را ندارد که این عامل با فرار مواد به سمت پشت غلتک همراه است و موجب عدم دستیابی به نسبت کاهش مورد نظر در ضخامت می‌شود.

هر چند موضوع جریان مواد در این فرایند موضوع نسبتا پیچیده‌ای است و در هیچ مقاله‌ای به صورت شفاف همه عیوب و عوامل آن که جریان‌های ناخواسته است به طور جامع بررسی نشده‌اند، منتها تبیین جریان مواد در این فرایند به منظور درک مناسب آن که هدف اصلی این مقاله است می‌تواند به تولید محصولات با کیفیت بالاتر و با ضایعات کمتر کمک کند.

### 2-3- چگونگی ارزیابی قطعات

برای ارزیابی قطعات چهار معیار در پذیرش تolerانس‌های ابعادی و کیفیت سطح قطعه نهایی مدنظر می‌باشند که در زیر تعریف می‌شوند:

1- انباشتگی مواد در مقابل غلتک به حدی که منجر به ناپایداری جریان پلاستیک<sup>1</sup> در مقابل غلتک، ایجاد پلیسه و کاهش کیفیت سطح شود. انباشتگی به شدت نیروهای فرایند را افزایش می‌دهد، زیرا موجب افزایش سطح تماس ابزار و قطعه‌کار می‌شود و بنابراین درصد کاهش ضخامت واقعی بیش از مقدار تنظیم شده در فرایند است.

2- پارامتر  $\Delta$  به عنوان اختلاف نسبت کاهش ضخامت مورد نظر  $R$  و نسبت کاهش ضخامت واقعی پس از فرایند  $R_1$  است. یعنی  $\Delta = R - R_1$  که  $R$  و  $R_1$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{t_0 - t}{t_0} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{t_0 - t_f'}{t_0} \quad (2)$$

که  $t$ ،  $t_f'$  و  $t_0$  به ترتیب ضخامت نهایی واقعی، ضخامت اسمی و ضخامت اولیه هستند. این اختلاف به دلیل فرار مواد از ناحیه تغییر شکل و تغییر شکل الاستیک مندرل و غلتک است.

3- رشد قطری قطعه بعد از فرایند به صورت  $D_G = D_{if} - D_{i0}$  تعریف می‌شود. در این رابطه  $D_{if}$  و  $D_{i0}$  به ترتیب قطر داخلی اولیه و نهایی لوله هستند. این پارامتر می‌تواند دقت ابعادی قطعه نهایی را کاهش دهد.

4- کیفیت سطح خارجی قطعه از دیدگاه‌های مختلف ارزیابی می‌شود. الف) زبری سطح قطعه تغییر شکل یافته که تابعی از کیفیت سطح قطعه پیش فرم، غلتک و نیروی شعاعی است، ب) موجی شدن سطح که حاصل از رد اثر غلتک روی سطح بوده و شبیه رزوه زنی است و ج) ترک‌های سطحی ناشی از جدایش مواد از سطح، به دلیل انباشتگی شدید مواد روی سطح خارجی در مقابل غلتک.

تمام نمونه‌ها در مورد معیارهای دوم و سوم به صورت کمی و در مورد معیارهای اول و چهارم به صورت کیفی ارزیابی و در 3 طبقه دسته‌بندی شدند. جدول 2 نتیجه ارزیابی آزمون‌ها را در مورد معیارهای اول تا سوم نمایش می‌دهد. به منظور بررسی اثرات متقابل نیاز به ارزیابی کمی از نتایج است. لذا معیار اول یا میزان انباشتگی در جدول 2 که مقدار آن به صورت کیفی بیان شده است، برای 3 حالت ایجاد شده انباشتگی شدید (تشکیل براده)، مشاهده ترک‌های سطحی و انباشتگی متداول بدون براده با شماره‌های یک تا سه کدگذاری شد.

نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد در پیشروی‌های پایین، با افزایش درصد

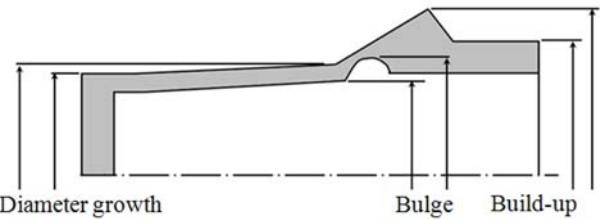


Fig. 2 Schematic presentation of defects: Build-up, Bulge and Diameter growth

شکل 2 نمایش شماتیک عیوب انباشتگی، بادکردگی و رشد قطری

- اکستروود مواد در جهت محوری زیر غلتک که این جریان، جریان مطلوب در فرایند است.
- جریان مواد در جهت مماسی (محیطی) که نورد نامیده می‌شود و عامل رشد قطری در قطعه است.
- جریان مواد در جهت محوری که موجب انباشتگی در مقابل غلتک و ناپایداری جریان پلاستیک می‌گردد.
- جریان مواد در جهت محوری در خلاف جهت اکستروود و شعاعی در جهت انباشتگی در مقابل غلتک که موجب ناپایداری جریان پلاستیک و ایجاد براده در سطح قطعه می‌گردد.
- فرار از ناحیه تغییر شکل به پشت غلتک که موجب عدم دقت در قطر نهایی و کاهش ضخامت می‌شود.

جریان‌های ناخواسته منجر به توسعه عیوب در قطعه می‌شوند. بنابراین به منظور دستیابی به شرایط بهینه، جریان‌های ناخواسته در فرایند باید کنترل شوند. در شرایط بهینه، جریان مواد در جهت انباشتگی و یا رشد قطری تا حدی ادامه می‌یابد و سپس همین مواد در مقابل این جریان‌ها مقاومت کرده و مانع ادامه آن‌ها می‌شوند، زیرا ادامه تشکیل آن‌ها نیاز به انرژی بیشتری دارد. در صورتی که مواد در جهت ایده‌آل به طور کامل اکستروود شوند، در قطعه نباید عیوبی ایجاد شود و تolerانس‌های قطعه نیز حفظ می‌گردند. آنچه در آزمون‌ها مشاهده می‌شود این است که دستیابی به اکستروود کامل مواد زیر غلتک غیرممکن است و در بهترین شرایط دسترسی به درصد کاهش اسمی میسر نیست. ولی می‌توان اختلاف کاهش واقعی و کاهش اسمی را به حداقل رساند.

اگر انباشتگی مواد در مقابل غلتک به حدی باشد که موجب ناپایداری جریان پلاستیک شود، موجب خرابی سطح می‌شود. انباشتگی مواد در مقابل غلتک، خارج از منطقه تغییر شکل و به صورت تدریجی تشکیل می‌شود. در ناحیه انباشتگی مواد مقابل غلتک بیرون از منطقه تغییر شکل تنش‌های هیدرواستاتیک وجود ندارند و حد شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد. زیرا قیدی در مقابل حرکت مواد وجود نداشته و در حقیقت مواد انباشته شده در اثر فشار غلتک از زیر آن فرار کرده‌اند. بنابراین افزایش انباشتگی با ادامه فرایند، منجر به پارگی موضعی مواد و جداشدن ماده یا ایجاد براده در این ناحیه می‌گردد. براده‌های ایجاد شده به ناحیه تغییر شکل وارد می‌شوند و باعث تخریب سطح خارجی و کاهش کیفیت آن می‌گردند. در عمل، در این حالت مواد در زاویه‌های کوچکتر از زاویه حمله غلتک تحت برش داخلی قرار گرفته و اصطکاک چسبنده بین مواد و غلتک وجود دارد.

جریان مواد در جهت مماسی عامل رشد قطری محسوب می‌شود یعنی در این حالت در قطعه کرنش‌های مماسی رخ می‌دهد که باعث افزایش قطر داخلی قطعه می‌گردد. زمانی که قیود کافی برای جلوگیری از حرکت مواد به

<sup>1</sup> Plastic flow instability

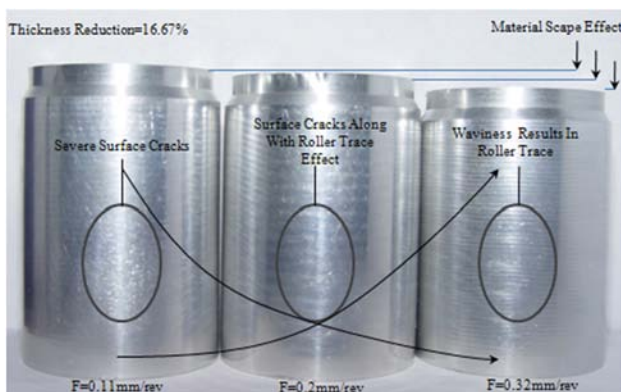


**Fig. 3** Build-up of materials in front of rollers results in plastic instability and materials removing. Experiments conditions: feed rate 0.11 mm/rev, reduction (a) 33%, (b) 16.6% and (c) 33% to 16.6%

شکل 3 انباشتگی شدید مواد در مقابل غلتک که منجر به ناپایداری جریان پلاستیک و براده برداری از سطح شده است. شرایط آزمون ها: مقدار پیشروی 0.11 میلی متر بر دور و نسبت کاهش ضخامت (a) 33% - (b) 16.6% و (c) - متغیر از 33% به 16.6% در حین فرایند

مقدار پیشروی بر دور افزایش می یابد. در حالت پیشروی بر دور خیلی زیاد، بخشی از ماده به صورت برجسته و به شکل هلیکس وارد هیچ گونه درگیری با غلتک نمی شود.

"شکل 4" اثر مقدار پیشروی بر دور را در نسبت کاهش 16.67% نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود در مقدار پیشروی 0.11 میلی متر بر دور ترک های سطحی و تشکیل براده کاملاً مشهود است. در مقدار پیشروی 0.32 میلی متر بر دور، اثر رزوه زنی روی سطح قطعه مشاهده می شود و در مقدار پیشروی 0.2 میلی متر بر دور هم آثار اعوجاج و هم ترک های سطحی دیده می شود که شدت کمتری دارند. اعوجاج حاصل از افزایش مقدار پیشروی بر دور و باقی ماندن اثر رد غلتک در تحقیقات متعددی تایید شده است. افزایش مقدار پیشروی بر دور همچنین باعث کاهش بازدهی فرایند می گردد که دلیل آن افزایش میزان فاصله محوری طی شده توسط غلتک در



**Fig. 4** The effects of feed rate on materials escape and surface quality. Experiments conditions: roller angle 30 deg, roller diameter 80 mm, reduction 16.6%, and feed rate 0.11, 0.2, 0.32 mm/rev

شکل 4 اثر مقدار پیشروی بر دور در فرار مواد و کیفیت سطح، شرایط آزمون: زاویه حمله 30 درجه و قطر 80 میلی متر، نسبت کاهش 16.67% و مقدار پیشروی 0.11، 0.2 و 0.32 میلی متر بر دور

کاهش ضخامت امکان توسعه عیوب بیشتر می گردد و دلیل آن افزایش نسبت حجم موادی که باید اکستروژن شوند به حجم موادی است که به منطقه تغییر شکل وارد می شود. با افزایش نسبت کاهش ضخامت، انباشتگی مواد در مقابل غلتک زیاد می شود که منجر به ناپایداری جریان پلاستیک و تشکیل پلیسه می شود. با افزایش درصد کاهش ضخامت، تشکیل براده تشدید شده و درصد زیادی از مواد به صورت براده از سطح پیش فرم جدا می شوند. در پیشروهای پایین، کم شدن درصد کاهش ضخامت موجب پوست ماهی شدن قطعات می شود که سایر محققین نیز این پدیده را مشاهده کرده اند. با افزایش درصد کاهش ضخامت اثر رد غلتک کمتر می شود، یعنی آثار هلیکس مشابه رزوه زنی روی سطح خارجی نمونه ها کاهش می یابد. با افزایش نسبت کاهش ضخامت، قطر بیرونی قطعه کار که از زیر غلتک خارج می شود به دلیل فرار بیشتر مواد زیادتر است و لذا میزان درگیری سطح صاف زاویه آزاد پشت غلتک با مواد اکستروژن شده پشت غلتک بیشتر شده و در نتیجه سطح قطعه به خاطر لهیدگی ناشی از فشار پشت غلتک دارای حالت موجی کمتری خواهد شد. افزایش درصد کاهش ضخامت به دلیل افزایش انباشتگی موجب رشد قطری نیز می شود. زیرا با افزایش انباشتگی نسبت کاهش واقعی افزایش می یابد و موجب افزایش نیروی شعاعی و در نتیجه رشد قطری می شود.

"شکل 3" انباشتگی شدید مواد و در نهایت براده برداری از سطح را ناشی از پیشروی پایین را نشان می دهد. در "شکل 3-a" به دلیل استفاده از نسبت کاهش 33% براده ها بزرگ هستند و مواد تمایل بیشتری به انباشتگی در مقابل غلتک دارند. در "شکل 3-b" نسبت کاهش 16.6% است و براده ها کوچکتر هستند و امکان وارد شدن به منطقه تغییر شکل و ایجاد خراش های سطحی را دارند. "شکل 3-c" در نسبت کاهش متغیر براده هایی را نشان می دهد که وارد منطقه تغییر شکل شده اند.

با درصد کاهش ضخامت ثابت، افزایش مقدار پیشروی بر دور باعث کاهش انباشتگی شده و امکان ناپایداری جریان پلاستیک را کمتر می کند. مقدار پیشروی بر دور پایین موجب تمایل به انباشتگی شدید می شود و سطح قطعه به شدت دارای بریدگی می شود. با افزایش مقدار پیشروی بر دور، انباشتگی کاهش می یابد. ولی به دلیل نوک تیز غلتک در این زوایا، افزایش مقدار پیشروی بر دور موجب فرار یا جاماندن مواد در پشت غلتک شده و این خود باعث باقی ماندن اثر رد غلتک می شود و سطح خارجی همانند قطعه هلیکس می شود که در این حالت فاصله دو نوار متوالی روی سطح با افزایش

جدول 2 میزان انباشتگی، انحراف قطر نهایی و رشد قطری براساس نتایج آزمون ها

**Table 2** Build-up, deviation of final diameter and diameter growth in experiments

پارامترهای فرایند	میزان عیوب ایجاد شده				
	$R$ (%)	$F$ (mm/rev)	میزان انباشتگی (mm)	انحراف قطر نهایی (mm)	رشد قطری (mm)
16.7	0.11	(3)	انباشتگی شدید (تشکیل براده)	0-0.1	0-0.05
		(2)	مشاهده ترک های سطحی	0-0.1	0-0.05
		(1)	انباشتگی متداول بدون براده	0-0.1	0-0.05
25	0.11	(3)	انباشتگی شدید (تشکیل براده)	0-0.1	0.05-0.1
		(2)	مشاهده ترک های سطحی	0-0.1	0.05-0.1
		(1)	انباشتگی متداول، بدون براده	0.1-0.15	0.05-0.1
33	0.11	(3)	انباشتگی شدید (تشکیل براده)	0.1-0.15	>0.1
		(3)	انباشتگی شدید (تشکیل براده)	0.1-0.15	>0.1
		(3)	انباشتگی شدید (تشکیل براده)	> 0.15	> 0.1



کوتاه به یک ناحیه پایدار رسیدند و با نزدیک شدن به انتهای قطعه به طور تدریجی کاهش پیدا کردند. علت افزایش تدریجی نیروها در ابتدای فرایند، افزایش تدریجی انباشتگی است. در انتهای فرایند نیز علت کاهش تدریجی نیروها کاهش قیود مواد در انتهای قطعه است. بنابراین برای بررسی و مقایسه کمی نیروها از مقادیر متوسط ناحیه پایدار استفاده می شود. یک نمونه منحنی نیروهای اندازه گیری شده در "شکل 6" نشان داده شده است. چنانچه دیده می شود ناحیه پایدار در مقایسه با ابتدا و انتهای نمودار بسیار کوتاه است که دلیل آن ساخت نمونه ها با حداقل طول مورد نیاز که ناحیه پایدار را ایجاد می کند است.

همه روابط تحلیلی ارائه شده برای تخمین نیروهای فرایند، جریان های ناخواسته در فرایند را در نظر نمی گیرند و محاسبه نیروها با فرض اکستروژن کامل مواد زیر غلتک است (یعنی جریان مواد به صورت ایده آل باشد). بنابراین هرچه جریان مواد به حالت ایده آل نزدیک تر باشد، نیروهای پیش بینی شده و اندازه گیری شده تطابق بیشتری دارند. در این تحقیق برای محاسبه نیروها از معادلات هایاما [3] استفاده شده است. این روش بر پایه تحلیل قاجی است که بر اساس بالانس نیروها به دست آمده که در آن تغییر شکل در همه نقاط ماده یکسان در نظر گرفته می شود (نوعی حد پایینی برای نیروها ارائه می دهد). به منظور هم خوانی بیشتر نتایج محاسباتی و تجربی، پیشنهاد شده [3] تا در روابط ارائه شده، ضریب اصطکاک مندرل با پیش فرم و پیش فرم با غلتک برابر با یک در نظر گرفته شود. در ادامه فرمول نهایی محاسبه نیروهای فرایند شکل دهی (نیروی شعاعی  $(p_r)$ ، نیروی محوری  $(p_z)$  و نیروی مماسی  $(p_\theta)$ ) از این روش در معادلات (3-الف) تا (3-ج) ارائه می شود.

$$\frac{p_r}{\sigma'_e t_0 \sqrt{D_R v} \cot \alpha} = \frac{p_z}{\sigma'_e t_0 \sqrt{D_R v} \tan \alpha} = \frac{p_\theta}{\sigma'_e t_0 v} = k_F \text{ OR } k_B \quad (3\text{-الف})$$

$$k_F = \left( \frac{\sigma_{z2}}{\sigma'_e} + 1 \right) \left( 1 - \frac{t}{t_0} \right) - A \left( 1 - \frac{t}{t_0} + \frac{t}{t_0} \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) \right) \quad (3\text{-ب})$$

$$k_B = \left( \frac{\sigma_{z2}}{\sigma'_e} + 1 \right) \left( 1 - \frac{t}{t_0} \right) - A \left( 1 - \frac{t}{t_0} + \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) \right) \quad (3\text{-ج})$$

در این روابط  $\alpha$  زاویه غلتک،  $D_R$  قطر غلتک،  $v$  نرخ پیشروی،  $t_0$  و  $t$  به ترتیب ضخامت اولیه و نهایی لوله تحت تغییر شکل،  $\sigma'_e$  تنش سیلان متوسط کرنش صفحه ای، ضریب  $k$  برای فرایندهای مستقیم  $k_F$  و برای فرایندهای معکوس  $k_B$  هستند که در این مقاله با توجه به این که از فرایند شکل دهی چرخشی نوع مستقیم استفاده شده است،  $k_F$  مدنظر می باشد. پارامترهای  $A$  و دیگر ضرایب در مرجع اصلی [3] قابل مطالعه هستند و به علت رعایت اختصار و خارج بودن از موضوع بحث این مقاله از تعریف آن ها در این جا

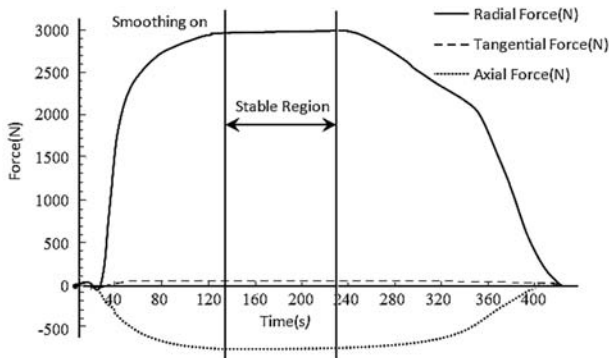


Fig.6 Typical measured forces and stable region: Experiment condition: feed rate 0.2 mm/rev, reduction 25%

شکل 6 نمونه ای از نیروهای اندازه گیری شده و منطقه پایدار که در آن پیشروی 0.2 میلی متر بر دور و نسبت کاهش ضخامت 0.25% است

یک دور با افزایش مقدار پیشروی است که باعث می شود، مقدار موادی که به سمت پشت غلتک فرار می کنند افزایش یابد. این موضوع نیز در "شکل 4" با کاهش طول قطعه کشیده شده در اثر افزایش مقدار پیشروی بر دور نیز نشان داده شده و با نتایج تحقیقات مشابه نیز در تطابق است.

بنابراین افزایش یا کاهش مقدار پیشروی بر دور نقش مهمی در کنترل جریان مواد در فرایند دارد. از آن جایی که اثر رزوه زنی و فرار مواد با اجرای فرایند طی چند مرحله قابل جبران است، می توان با افزایش مقدار پیشروی بر دور عملیات شکل دهی را انجام داد. به طور کلی با تغییر پارامترهای فرایند همچون نسبت کاهش و مقدار پیشروی بر دور می توان صحت فرایند را بدون در نظر گرفتن فرار مواد تضمین نمود، هر چند ممکن است مجبور به استفاده از نسبت کاهش مجاز کمتر و در عوض تکرار فرایند با کاهش های پی در پی باشیم.

برای درک بهتر تاثیر پارامترهای فرایند بر روی توسعه عیوب ذکر شده در این مقاله، در کنار بررسی اثرات اصلی پارامترها، اثرات متقابل آن ها نیز محاسبه و ارزیابی شدند. شایان ذکر است که این کار با استفاده از نرم افزار مینی تب صورت گرفت.

تحلیل اثر متقابل پارامترهای فرایند بر عیوب نشان داد که اثرات متقابل در بین این دو پارمتر بر میزان انباشتگی قابل توجه است. این اثرات در "شکل 5" قابل مشاهده است. با توجه به این که نمودارهای مربوط به درصد کاهش ضخامت های 16.7 و 25 درصد کاملاً برهم منطبق هستند، ولی نمودار مربوط به کاهش ضخامت 33 درصد دارای شیب متفاوتی است می توان این گونه بیان کرد که اثر نرخ پیشروی وابسته به میزان درصد کاهش ضخامت است. اگر میزان کاهش ضخامت 16.7 یا 25 باشد، افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش انباشتگی می شود. ولی اگر درصد کاهش ضخامت 33 درصد باشد، اصلاً نرخ پیشروی اثری بر میزان انباشتگی ندارد. بنابراین نمودار اثرات متقابل حاوی اطلاعات صحیح تر و دقیق تری از اثرات اصلی است. تحلیل اثرات متقابل نرخ پیشروی و درصد کاهش ضخامت بر انحراف از قطر نهایی و رشد قطری نشان داد که این اثرات در عیب انحراف از قطر نهایی بسیار کم و در توسعه عیب رشد قطری بی اثر است و بنابراین نمودارهای آن ها لزومی برای ارائه در مقاله ندارند تا از طولانی شدن متن مقاله جلوگیری گردد.

### 3-3- بررسی نیروهای شکل دهی و جریان مواد

برای تمام نمونه ها نیروی شکل دهی اندازه گیری شد. در همه آزمون ها نیروی شعاعی بیشترین مقدار و نیروی مماسی کمترین مقدار را دارا بودند و تمام منحنی های نیرو رفتاری مشابه را از خود نشان دادند. نیروها پس از یک گذر

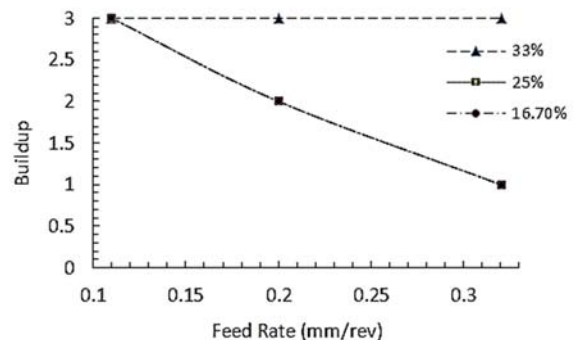


Fig.5 Interaction of process parameters on buildup

شکل 5 اثرات متقابل پارامترهای فرایند بر میزان انباشتگی

خودداری می گردد.

با بررسی نیروها در حالات مختلف و عیوب بررسی شده در جدول 2 مشاهده می شود که نیروهای شعاعی و محوری بیش از انتظار، افزایش انباشتگی را نشان می دهند. در واقع افزایش نسبت نیروهای شعاعی و محوری می تواند به دلیل افزایش سطح تماس بین غلتک و پیش فرم در اثر وقوع انباشتگی در فرایند باشد.

هر چند مقادیر جدول 4 نشان دهنده افزایش نیروهای اندازه گیری شده و محاسبه شده با مقدار پیشروی بر دور در فرایند است، با مقایسه نمودارهای "شکل 7" و "شکل 8" ملاحظه می شود که با افزایش مقدار پیشروی بر دور مقدار نیروهای شعاعی اندازه گیری شده و محاسبه شده به هم نزدیک می شوند. علت آن، کاهش تمایل به انباشتگی و در نتیجه کاهش سطح تماس ابزار و قطعه کار با افزایش مقدار پیشروی بر دور است. با افزایش مقدار پیشروی بر دور تمایل مواد به فرار به سمت پشت غلتک بیشتر می شود که موجب کاهش نسبت نیروهای محوری می گردد. در این حالت دو نیروی محوری اندازه گیری شده و محاسبه شده از هم دور می شوند. این موضوع در نمودارهای "شکل 8" به وضوح قابل مشاهده است.

بررسی مقادیر نیروهای محوری در جدول 4 نشان می دهد که نیروهای محوری اندازه گیری شده از نیروهای محوری محاسبه شده کمتر است و میزان افزایش نیروهای اندازه گیری شده با افزایش مقدار پیشروی بر دور نسبت به میزان افزایش نیروهای محاسبه شده کمتر است که تاثیر آن در نمودارهای "شکل 8" مشاهده می شود. همان طور که گفته شد علت آن کاهش انباشتگی و افزایش فرار ماده به پشت غلتک با افزایش پیشروی بر دور است.

بررسی مقادیر جدول 4 نشان می دهد که افزایش نسبت کاهش نیز موجب افزایش نیروهای اندازه گیری و محاسبه شده فرایند می شود. ولی میزان این افزایش در نیروهای شعاعی محاسبه شده بیشتر از میزان افزایش در نیروهای شعاعی اندازه گیری شده است. در مورد نیروهای محوری نیز با افزایش نسبت کاهش ضخامت افزایش این نیروها مشاهده می شود. اما میزان این افزایش در نیروهای محوری محاسبه شده بیشتر از میزان افزایش در نیروهای محوری اندازه گیری شده است. به عبارت دیگر در اثر افزایش نسبت کاهش، نیروهای اندازه گیری شده و محاسبه شده به هم نزدیک می شوند. علت این موضوع کاهش میزان انباشتگی به دلیل تسریع تمایل به تشکیل براده است که در "شکل 3" نیز قابل مشاهده است که منجر به عدم افزایش

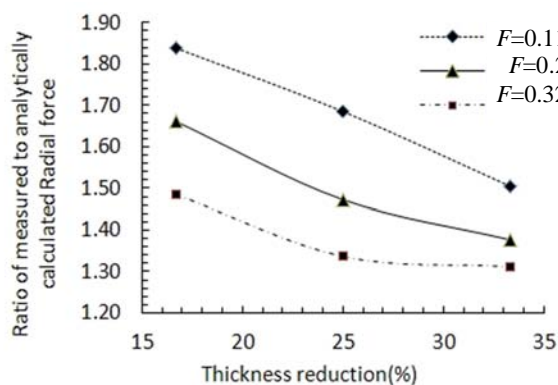


Fig. 7 Ratio of radial forces vs. thickness reduction in different feed rate

شکل 7 تغییرات نسبت نیروی شعاعی در مقابل درصد کاهش ضخامت در مقادیر پیشروی مختلف

در آزمون ها ضخامت پیش فرم  $t_0$  یکسان و معادل 3 میلی متر بود. در محاسبه نیروها، از تنش تسلیم میانگین اندازه گیری شده معادل 113 مگاپاسکال برای ماده تحت تغییر شکل استفاده شد. بقیه پارامترها برای محاسبه نیروهای فرایند مطابق با جدول 3 می باشند که در این جدول  $t$  ضخامت نهایی قطعه بعد از شکل دهی و  $t'_0$  ضخامت قطعه با در نظر گرفتن انباشتگی است.

جدول 4 نیروهای اندازه گیری شده و نیروهای محاسبه شده را در آزمون های مختلف نشان می دهد. با مقایسه این دو نیرو اختلاف های قابل ملاحظه ای مشاهده می شود که دلیل آن در نظر نگرفتن شعاع سر غلتک در محاسبات، مناسب نبودن مدل اصطکاکی در نظر گرفته شده برای سطوح تماس ابزار و قطعه کار، در نظر نگرفتن تغییر شکل های غیریکسان و کار سختی و همچنین در نظر نگرفتن جریان های ناخواسته مواد می باشد. در نظر نگرفتن جریان های ناخواسته می تواند مهمترین دلیل تغییرات اختلاف نیروهای اندازه گیری شده و نیروهای محاسبه شده باشد، زیرا محاسبه نیروها با فرض اکستروژن کامل مواد زیر غلتک یا جریان ایده آل مواد بوده است. همان طور که گفته شد، جریان های ناخواسته منجر به ایجاد و توسعه عیوب در قطعه و نیز تاثیر روی نیروهای فرایند می شوند. بنابراین باید رابطه ای میان توسعه عیوب و نیروهای فرایند وجود داشته باشد. "شکل 7" تغییرات نسبت نیروی شعاعی اندازه گیری شده به نیروی شعاعی محاسبه شده با در نظر گرفتن درصد کاهش ضخامت و در مقادیر پیشروی بر دور مختلف را نشان می دهد. "شکل 8" نیز همین نسبت تغییرات را برای نیروی محوری نشان می دهد.

جدول 3 پارامترهای آزمون های مختلف برای محاسبه نیروها به کمک معادلات هایاما Table 3 Process parameters in calculating the forces by Hayama's equation

$F$ (mm/rev)	$t$ (mm)	$t/t_0$	$R=1-t/t_0$	$R'$	$t'_0$	$t/t'_0$	$A$	$K_F$
0.11	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38
0.2	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38
0.32	2.5	0.83	0.17	0.14	2.91	0.86	-1.02	0.63
	2.25	0.75	0.25	0.21	2.86	0.79	-1.02	0.99
	2	0.67	0.33	0.28	2.79	0.72	-1.02	1.38

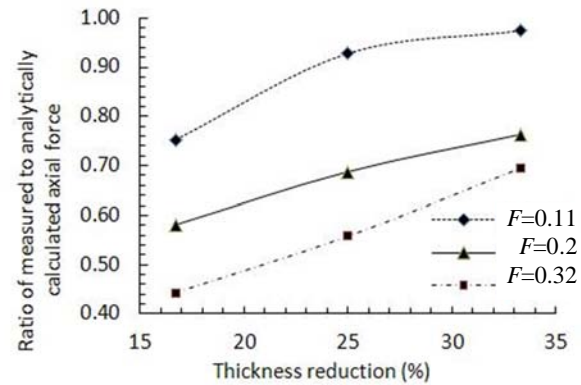
جدول 4 نیروهای اندازه گیری شده و نیروهای محاسبه شده برای آزمون های مختلف Table 4 Measured and calculated forces in different experiments

پارامترها	نیروهای اندازه گیری شده (N)			نیروهای محاسبه شده (N)				
	$F$ (mm/rev)	$R$ (%)	$F_{rE}$	$F_{aE}$	$F_{tE}$	$F_{rC}$	$F_{aC}$	$F_{tC}$
0.11	27		554	959	40	417	1763	17
	42		865	1498	39	803	2525	25
	59		1206	2090	60	1175	3146	33
0.2	49		747	1293	43	434	2148	17
	77		1166	2020	48	802	2975	25
	107		1627	2818	100	1242	3881	33
0.32	79		945	1636	59	419	2430	17
	123		1475	2556	80	823	3417	25
	171		2058	3564	153	1430	4677	33

- افزایش درصد کاهش ضخامت، نیروهای شکل‌دهی را افزایش می‌دهد و موجب انباشتگی شدید و پارگی سطح قطعه در زاویه حمله 30 درجه در پیشروی‌های پایین می‌شود که دلیل آن برش داخلی مواد در زاویه حمله‌ای کوچکتر از زاویه حمله ابزار ذکر شد.
- مطالعه پارامتر پیشروی بر دور نشان داد، که افزایش مقدار پیشروی از 0.11 میلی‌متر به 0.2 و سپس 0.32 بر دور نیروهای فرایند را افزایش می‌دهد و همچنین به دلیل فرار مواد موجب کاهش دقت ابعادی در قطر خارجی می‌شود.
- افزایش مقدار پیشروی بر دور با ابزار استفاده شده (زاویه حمله 30 درجه) می‌تواند به جلوگیری از انباشتگی شدید کمک کند و موجب محو شدن ترک‌های سطحی شود. ولی موجب کاهش دقت ابعادی و مشهود شدن آثار رزوه‌زنی در سطح خارجی قطعه می‌شود.
- همچنین نتیجه مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده فرایند با نیروهای محاسباتی تئوری هایاما نشان داد که در کلیه شرایط مقدار نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده بیش از نیروهای شعاعی محاسبه شده می‌باشند و مقدار نیروهای محوری اندازه‌گیری شده کمتر از نیروهای محوری محاسبه شده می‌باشند.
- افزایش درصد کاهش ضخامت و افزایش مقدار پیشروی غلتک بر دور، نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده و محاسباتی را به هم نزدیک می‌نمایند.
- افزایش درصد کاهش ضخامت و کاهش مقدار پیشروی غلتک بر دور، نیروهای محوری اندازه‌گیری شده و محاسباتی را به هم نزدیک می‌نماید.

## 6- مراجع

- [1] S. Kalpakcioglu, A Study of Shear-Spin Ability of Metals, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 83, No. 4, pp. 478-483, 1961.
- [2] S. Kobayashi, E. G. Thomsen, Theory of Spin Forging, *CIRP Annals*, Vol. 10, No.2, pp. 114-123, 1962.
- [3] M. Hayama, Theoretical Study of Tube Spinning, *Bulletin of the Faculty of Engineering, Yokohama National University*, Vol. 15, No.3, pp. 33-48, 1966.
- [4] M. Hayama, H. Kudo, Analysis of Diametrical Growth and Working Forces in Tube Spinning, *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 22, No. 167, pp. 776-784, 1979.
- [5] R. P. Singhal, P. K. Saxena, R. Prakash, Estimation of Power in the Shear Spinning of Long Tubes in Hard-to-Work Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 29-40, 1990.
- [6] J. W. Park, Y. H. Kim, W. B. Bae, Analysis of Tube-Spinning Processes by the Upper-Bound Stream-Function Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 66, No. 3, pp. 195-203, 1997.
- [7] Y. Xu, S. H. Zhang, P. Li, K. Yang, D. B. Shan, Y. Lu, 3d Rigid-Plastic Fem Numerical Simulation on Tube Spinning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 3, pp. 710-713, 2001.
- [8] M. H. Parsa, A. M. A. Pazooki, M. Nili, Flow-forming and flow formability simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 5, pp. 463-473, 2009.
- [9] M. S. Mohebbi, A. Akbarzadeh, Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 2, pp. 389-395, 2010.
- [10] H. Zoghi, A. F. Arezoodar, M. Sayeafabi, Enhanced finite element analysis of material deformation and strain distribution in spinning of 42CrMo steel tubes at elevated temperature, *Materials and Design*, Vol. 47, No. 5, pp. 234-242, 2013.
- [11] R. Prakash, R. P. Singhal, Shear Spinning Technology for Manufacture of Long Thin Wall Tubes of Small Bore, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, No.4, pp. 186-192, 1995.
- [12] S. C. Chang, C. A. Huang, S. Y. Yu, Y. Chang, W. C. Han, T. S. Shieh, H. C. Chung, H. T. Yao, G. D. Shyu, H. Y. Hou, C. C. Wang, W. S. Wang, Tube Spinnability of AA 2024 and 7075 Aluminum Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80, No.1, pp. 676-682, 1998.
- [13] K. M. Rajan, K. Narasimhan, An Investigation of the Development of Defects During Flow Forming of High Strength Thin Wall Steel Tubes, *Practical Failure Analysis*, Vol. 1, No. 5, pp. 69-76, 2001.
- [14] A. R. Fazeli, M. Ghoreishi, Investigation of effective parameters on surface roughness in thermomechanical tube spinning process, *International Journal*



**Fig. 8** Ratio of axial forces vs. thickness reduction in different feed rate  
**شکل 8** تغییرات نسبت نیروی محوری در مقابل درصد کاهش ضخامت در مقادیر پیشروی مختلف

سطح تماس ابزار و قطعه کار می‌شود. به همین دلیل نسبت نیروها که در "شکل 7" و "شکل 8" نشان داده شده با افزایش نسبت کاهش ضخامت به یک نزدیک می‌شوند.

در کلیه شرایط مقدار اکثر نیروهای شعاعی اندازه‌گیری شده بیش از نیروهای شعاعی محاسبه شده می‌باشند و مقدار نیروهای محوری اندازه‌گیری شده کمتر از نیروهای محوری محاسبه شده می‌باشند. بنابراین باید توجه داشت که نیروهای شکل‌دهی مستقیماً فقط تابعی از پارامترهای فرایند نیستند، بلکه به‌طور غیرمستقیم از میزان انباشتگی، فرار مواد و رشد قطری به‌عنوان تابعی از پارامترهای ابزار و فرایند تبعیت می‌کنند. عکس این موضوع نیز صادق است. هر عاملی که موجب تغییر نیروها از مقدار ایده‌آل شود، می‌تواند عاملی برای تغییر جریان مواد باشد. یعنی جریان مواد و نیروها اثر متقابل روی یکدیگر دارند. البته می‌توان گفت که در تحقیق حاضر با ثابت نگاه داشتن کلیه پارامترها و تغییر فقط یک پارامتر نتایج معناداری برای آن پارامتر بدست آمده و اثرات متقابل به حداقل رسیده است.

## 4- پیشنهادات

در این تحقیق از بررسی پارامترهای هندسی ابزار بر جریان مواد، نیروها و توسعه عیوب صرف نظر شده است. با توجه به اثر مهم پارامترهای ابزار پیشنهاد می‌گردد در آینده ادامه تحقیقات بر نحوه تاثیر پارامترهای ابزار بر شکل‌دهی این آلیاژ متمرکز گردد و شرایط بهینه و حداکثر قابلیت اسپینینگ با ابزارهایی با زاویه حمله‌ها و قطرهای مختلف ابزار بررسی گردد.

## 5- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر پارامترهای فرایند بر روی نحوه توسعه عیوب و نیروهای فرایند شکل‌دهی چرخشی لوله بررسی شدند. آزمون‌هایی به‌منظور تحلیل جریان مواد در شکل‌دهی چرخشی آلیاژ آلومینیوم 6061 انجام شدند. مهمترین پارامترهای فرایند شامل نسبت کاهش ضخامت در 3 سطح و مقدار پیشروی بر دور در 3 سطح بررسی شدند. حالت‌های مختلف جریان مواد تحلیل شد و براساس معیارهای کیفیت قطعات در خصوص عوامل تاثیرگذار بر خروج جریان مواد از جریان ایده‌آل مواد و نیروهای فرایند بحث شد. نتایج بررسی نحوه تغییر شکل قطعات نشان می‌دهد که در شکل‌دهی این آلیاژ، عیوبی مثل انباشتگی و رشد قطری را با استفاده از نسبت کاهش ضخامت و مقدار پیشروی بر دور مناسب می‌توان کنترل نمود. به طور کلی می‌توان نتایج زیر را برای تحلیل بیشتر فرایند ارائه داد:



- technology, *Procedia Engineering*, Vol. 132, No.12, pp. 389-396, 2015.
- [19] M. Srinivasulu1, M. Komaraiah, C. S. Krishna Prasada Rao, Prediction of the surface roughness of AA6082 flow-formed tubes by design of experiments, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 1835-1842, 2013.
- [20] D. Tsivoulas, J. Quinta da Fonseca, M. Tuffs, M. Preuss, Effects of flow forming parameters on the development of residual stresses in Cr–Mo–V steel tubes, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 624, No. 29, pp. 193-202, 2015.
- [21] H. N. Nagarajan, H. Kotrappa, C. Mallanna, V. C. Venkatesh, Mechanics of Flow Forming, *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Vol. 30, No.1, pp. 159-162, 1981.
- of Material Forming*, Vol. 2, No. 4, pp. 261-270, 2009.
- [15] Z. H. Song, W. M. Le, S. C. Chen, W. B. Gu, X. M. Qian, Real time defects detection in flow forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 365-370, 1992.
- [16] J. Yao, M. Murata, An experimental study on paraxial spinning of one tube end, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 66, pp 1-6, 2002.
- [17] X. S. Wang, Z. L. Hu, S. J. Yuan, L. Hua, Influence of tube spinning on formability of friction stir welded Aluminum alloy tubes for hydroforming application, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 607, No. 23, pp. 245-252, 2014.
- [18] S. Ekinovic, H. Đukic, I. Plancic, E. Begovic, Assessment of the surface topography of Al 99.5% tubular products formed by cold flow forming