



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 1, pp.: 130-142  
2024

DOI:  
10.22034/jssta.2024.458496.1165

### Article Info

Received: 2024-05-19

Accepted: 2024-07-13

### Keywords

Flow Forming, Formability,  
High Strength Steel, Attack  
Angle

### How to Cite this article

H. BoroumandPanah, A. Naddaf Oskouei, "Experimental and numerical investigation of the effective parameters on the flow forming process of a special high-strength steel used in the aerospace industry", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (1), p.:130-142, 2024.

## Experimental and numerical investigation of the effective parameters on the flow forming process of a special high-strength steel used in the aerospace industry

Hamid BoroumandPanah<sup>1</sup>, Alireza Naddaf Oskouei<sup>\*2</sup>

1 Department of mechanical engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran,  
hamid.hbp@ihu.ac.ir

2,\* Department of mechanical engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran,  
anadaf@ihu.ac.ir, (Corresponding Author)

### Abstract

Tube flow forming is one of the most economical production methods for simple cylindrical tubes with external and internal protrusions with or without flanges. The purpose of flow forming operation for body production is to use more raw materials and increase mechanical properties due to hard work on the part instead of raw machining of tubes. Due to the high strength of these tubes, it is one of the most important methods of manufacturing cylindrical bodies in the aerospace industry. In this research, the formability of high-strength maraging steel has been experimentally investigated by the three-roller flow forming process and finite element analysis. The effect of changes in flow forming process parameters such as mandrel rotation speed, feed rate and angle of attack on dimensional and geometric accuracy as well as surface quality of the produced product was investigated experimentally and numerically. The results showed that the surface roughness of the final product increases up to 62% as the feed rate increases. Increasing the feed rate also leads to the reduction of out-of-roundness more than 50% and thus improving the geometric quality of the final part. Increasing the rotation speed of the mandrel leads to a decrease in the surface roughness up to 30%. Also, increasing the rotation speed leads to an increase in the non-rotation of the product. Increasing the angle of attack of the roller from 15 to 30 degrees leads to an increase about 30% in surface roughness and a decrease in non-roundness and a decrease in diameter growth.



دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۱،  
صفحه ۱۴۲-۱۳۰  
بهار و تابستان ۱۴۰۳

DOI:  
10.22034/jssta.2024.458496.1165

تاریخچه داوری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

واژه‌های کلیدی

فلوformینگ، شکل پذیری، فولاد  
استحکام بالا، زاویه حمله

نحوه استناد به این مقاله

حمید برومندپناه، علیرضا نداف  
اسکویی، " بررسی تجربی و عددی  
پارامترهای موثر بر فرایند فلوformینگ  
فولاد خاص استحکام بالای مورد  
استفاده در صنایع هوافضا"، دو فصلنامه  
علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد  
چهارم، شماره اول، صفحات  
۱۴۲-۱۳۰، ۱۴۰۳.

مقاله پژوهشی

## بررسی تجربی و عددی پارامترهای موثر بر فرایند فلوformینگ فولاد خاص استحکام بالای مورد استفاده در صنایع هوافضا

حمید برومندپناه\*<sup>۱</sup>، علیرضا نداف اسکویی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران،

Hamid.hbp@ihu.ac.ir

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران،

anadaf@ihu.ac.ir

\* نویسنده مسئول

### چکیده

فلوformینگ لوله یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های تولیدی برای لوله‌های استوانه‌ای ساده با برآمدگی‌های خارجی و داخلی همراه یا بدون فلنج است. استفاده از عملیات فلوformینگ برای تولید بدنه به جای ماشینکاری خام لوله‌ها، منجر به استفاده بیشتر از مواد خام و همچنین افزایش خواص مکانیکی محصول به دلیل ایجاد کارسختی بر روی قطعه است. عملیات فلوformینگ به دلیل استحکام بالای لوله‌های تولیدی، به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های ساخت بدنه‌های استوانه‌ای در صنایع هوافضا شناخته می‌شود. در این پژوهش، شکل‌پذیری یک فولاد خاص استحکام بالای مورد استفاده در صنایع هوافضا توسط فرایند فلوformینگ سه غلتکه بصورت تجربی و تحلیل المان محدود بررسی شده است. اثر تغییرات پارامترهای فرایند فلوformینگ نظیر سرعت چرخش ماندربیل، نرخ پیشروی و زاویه حمله بر روی دقت ابعادی و هندسی و همچنین کیفیت سطح محصول تولیدی بصورت تجربی و تحلیل اجزای محدود بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح محصول نهایی تا ۶۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی همچنین منجر به کاهش عدم‌گردی بیش از ۵۰ درصد و در نتیجه بهبود کیفیت هندسی قطعه نهایی می‌شود. افزایش سرعت دوران ماندربیل منجر به کاهش زبری سطح تا ۳۰ درصد می‌شود. همچنین افزایش سرعت دوران منجر به افزایش عدم‌گردی محصول می‌شود. افزایش زاویه حمله غلتک از ۱۵ تا ۳۰ درجه منجر به افزایش زبری سطح تا حدوداً ۳۰ درصد و کاهش عدم‌گردی و کاهش رشد قطری می‌شود.

## ۱- مقدمه

فلوفرمینگ لوله یکی از روش‌های کاهش ضخامت دیواره قطعاتی به شکل استوانه همراه با افزایش مقاومت و استحکام آن می‌باشد. این روش در شاخه‌های هواپیمایی و هوافضایی یکی از پرکاربردترین فرآیندهای شکل‌دهی لوله‌ها است. تولید قطعاتی با اشکال ویژه از لوله‌ها با این روش امکان‌پذیر است. این روش در مقایسه اقتصادی با دیگر فرآیندها از قبیل ماشینکاری از جهت مصرف مواد اولیه و نیروی کار مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. به دلیل پیچیده بودن این تغییر شکل، روش‌های تحلیلی پیش‌بینی دقیقی از تاثیر تغییر پارامترهای دستگاه فلوفرمینگ بر کیفیت قطعه تولیدی ندارند. اغلب نتایج موجود درباره فلوفرمینگ بر اساس آزمایش‌های تجربی بوده و در حالت‌های خاص قابل استفاده است. اگر بتوان تاثیر پارامترهای تولید را تحلیل و پیش‌بینی کرد، صرفه جویی زیادی در زمان و هزینه تولید خواهد شد.

امروزه با گسترش نرم‌افزارهای اجزای محدود، محققین زیادی به شبیه‌سازی فرایند فلوفرمینگ و بررسی پارامترهای بهینه جهت رسیدن به خواص مطلوب استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به تحلیل فرایند فلوفرمینگ لوله برای جنس فولاد خاص استحکام بالای X35 پرداخته شده است و پارامترهای بهینه جهت رسیدن به خواص مطلوب لوله به دست آمده است. نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج تجربی صحت‌سنجی شده است.

## ۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

پارامترهای مختلفی بر فلوفرمینگ تاثیر دارند. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: نرخ پیشروی، سرعت چرخش ماندریل، هندسه و شعاع غلتک، جنس قطعه کار، روان‌ساز.

تابعی و همکاران [۱] بر روی تاثیر پارامترهای مؤثر بر کیفیت لوله‌های فلوفرمینگ پژوهش کردند. آن‌ها پارامترهایی که بر روی کیفیت لوله‌های جدار نازک از جنس تیتانیوم خالص در فرآیند فلوفرمینگ تاثیر می‌گذارند را بهینه نمودند. کاهش نرخ پیشروی، افزایش سرعت دورانی تا ۶۳۰ دور بر دقیقه و کمتر کردن کاهش ضخامت لوله منجر به کیفیت سطح بهتر در لوله‌های تیتانیومی می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش سرعت دورانی بیشتر

از ۶۳۰ دور بر دقیقه تاثیر عکسی بر روی کیفیت سطح لوله‌های تیتانیومی دارد. حقیقت و همکارش [2] بر روی بهبود خواص مکانیکی و تغییر ساختار فولاد ۴۱۳۰ بر اثر فرآیند فلوفرم در تولید پوسته بدنه موتور راکت کار کردند و بررسی کردند که عملیات ساخت بدنه‌های جدار نازک به ویژه پوسته موتورهای راکت‌ها و به روش فلوفرم می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی، استحکام تسلیم و سختی ماده خام شده و میزان شکل‌پذیری ماده را با در نظر گرفتن مقدار درصد کاهش ضخامت، پایین آورد. در مطالعه حاضر و در مورد فولاد ۴۱۳۰ با ساخت یک لوله به روش فلوفرم و درصد کاهش ضخامت‌های متفاوت این امر به‌وضوح با استناد به آزمایش‌های صورت گرفته اثبات شد. این در حالی است که افزایش و بهبود خواص مکانیکی فولاد، با میزان درصد کاهش ضخامت مرتبط است. عابدینی و همکاران [3] به بررسی تجربی پارامترهایی از قبیل عمق نفوذ، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی بر زبری سطح قطعه فلوفرم شده با روش تاگوچی پرداختند و مقدار کمینه زبری با عمق نفوذ ۰/۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و سرعت چرخشی ۶۳ دور بر دقیقه به دست آمد. زبری سطح حاصل از این مقدار بهینه برابر با ۴ میکرون شد. "بهات" و همکاران [4] به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی حین فرایند فلوفرمینگ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که پیشروی محوری و ضریب اصطکاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نیروهای محوری و محیطی هستند. علاوه بر این، ضریب اصطکاک تاثیر معنی‌داری بر نیروی شعاعی دارد. همچنین عمق شکل‌دهی تاثیر بسزایی بر تنش و کرنش پلاستیک دارد. "بانرجی" و همکاران [5] یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرایند فلوفرمینگ معکوس ایجاد کردند. آن‌ها اثر پارامترهای نسبت سرعت پیشروی، درصد کاهش ضخامت، و هندسه غلتک‌ها بر روی تنش‌ها، توان مصرفی و ابعاد لوله‌ها بررسی کردند. در تحقیق آن‌ها مقایسه بین فرمول‌بندی‌های نظری سنتی و نیروهای شبیه‌سازی شده انجام شده است. آن‌ها تاثیر نسبت‌های سرعت پیشروی و درصد کاهش ضخامت بر گرد بودن لوله‌های تشکیل شده بررسی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. نزدیکی توان تخمینی به توان تجربی موجود در ادبیات نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی شده آن‌ها امیدوارکننده و قوی است. "سینگ" و

برای جنس و ابعاد خودشان انجام شود. در این پژوهش، پارامترها مهم همگی بصورت تجربی و المان محدود برای جنس فولاد استحکام بالای X35 بررسی شد که نتایج آن برای محققین و صنایع مشابه کاملا کاربردی است.

### ۳- روابط کاربردی

با فرض به اینکه حجم ثابت است، با نادیده گرفتن جریان مماسی، طول قطعه نهایی از رابطه زیر به دست می آید [۱۱].

$$L_1 = L_0 \frac{S_0(d_1 + S_0)}{S_1(d_1 + S_1)} \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $L_1$  طول نهایی قطعه،  $L_0$  طول پریفرم،  $S_0$  ضخامت اولیه لوله،  $S_1$  ضخامت نهایی لوله و  $d_1$  قطر داخلی است.

یک مدل تحلیلی تقریبی بر اساس فرآیند آهنگری توسعه داده شده است [۱۲]. در فرآیند شکل دهی فلوفرمینگ، تغییر شکل پریفرم در اثر نیروی فشاری غلتک رخ می دهد. تغییر شکل زمانی اتفاق می افتد که غلتک عبوری تماس لحظه ای با پریفرم داشته باشد که با همان سرعت چرخشی ماندریل می چرخد. مواد پریفرم تحت نیروهای فشاری در جهت شعاعی تغییر شکل داده و لوله در جهت محوری کشیده می شود. بنابراین، فرآیند تشکیل جریان مشابه ترکیبی از فرآیند آهنگری و نورد است. نمای جانبی فرآیند فلوفرمینگ به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

همکاران [6] یک مدل اجزای محدود سه بعدی ترمو مکانیکی از فلوفرمینگ سه غلتکه با استفاده از آباکوس توسعه دادند. شبیه سازی برای نیروهای غلتک و کاهش ضخامت به کمک راه حل های تحلیلی و نتایج تجربی صحت سنجی شدند. نتایج شبیه سازی برای مطالعه متغیرهایی مانند توزیع تنش و کرنش در طول فرآیند فلوفرمینگ مفید بود. "اردوغان" و همکاران [۷] به بررسی شکست نرم اینکونل ۷۱۸ به کمک مدل سازی عددی پرداختند. آن ها اثر دما و پارامترهای فرایندی در شکست نرم را به کمک مدل ایجاد شده بررسی کردند. "ژو" و همکاران به بررسی تأثیر آفست غلتک ها بر فرایند فلوفرمینگ پرداختند. آن ها دریافتند که تغییرات آفست غلتک ها اثر زیادی روی نیروهای فلوفرم دارد [۸]. سلیمانی و همکاران [۹] به صورت تجربی به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد ۴۱۳۰ بعد از فرایند فلوفرمینگ معکوس لوله پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که عملیات فلوفرمینگ در هر مرحله، موجب افزایش سختی و افزایش استحکام تسلیم فولاد می شود. همچنین کارسختی انجام شده موجب ریزتر شدن دانه بندی و کشیدگی دانه ها می شود. "وورال" و همکاران [۱۰] به پیش بینی شکست نرم حین فرایند فلوفرمینگ به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس پرداختند. آن ها سابروتین "VUMAT" را برای وارد کردن رفتار پلاستیک و قوانین تجمیع خرابی توسعه دادند. نتایج آن ها یک ناحیه آسیب دیده در سطوح داخلی و خارجی قطعه کار برای نسبت کاهش ضخامت بیشتر از ۴۰ درصد نشان داد.

در این تحقیق، مدل اجزای محدود در نرم افزار آباکوس به منظور بررسی فرایند فلوفرمینگ ایجاد شد. مدل اجزای محدود ایجاد شده با نتایج تجربی صحت سنجی شد. پس از صحت سنجی مدل اجزای محدود به کمک نتایج تجربی، از شبیه سازی اجزای محدود برای پیش بینی اثر پارامترهای مختلف بر روی کیفیت محصول نهایی استفاده شد. لازم به ذکر است که فرایند فلوفرمینگ بسیار پیچیده بوده و پارامترهای موثر زیادی نظیر سرعت چرخش ماندریل، نرخ پیشروی، جنس فلز، ابعاد هندسی غلتک و ... دارد که تغییرات هر کدام اثر زیادی روی کیفیت قطعات تولیدی دارد. بسیاری از این پارامترها به علت خاص و مهم بودن در مقالات ذکر نمی شوند. لازم است که این کار توسط هر صنعت به ویژه صنایع حساسی نظیر هوافضا و نظامی

نظر گرفته می‌شود. ضریب اصطکاک  $\mu$  بین پریفرم و غلتک به‌عنوان یک ثابت در نظر گرفته می‌شود. حداکثر فشار در یک مسئله آهنگری توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۴]:

$$p_{max} = \sigma_y \exp\left(\frac{2\mu l'}{h_{ave}}\right) \quad (7)$$

که  $\sigma_y$  تنش تسلیم ماده است،  $l'$  نیمه طول تماس،  $p_{max}$  حداکثر فشار اعمال شده در طول تغییرشکل است. فرض بر این است که  $h_{ave} = (t_i + t_f)/2$

حداقل فشار برای تغییرشکل می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$p_{min} = \sigma_y \quad (8)$$

فشار میانگین برابر است با:

$$p_{ave} = \frac{p_{max} + p_{min}}{2} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن سرعت محوری غلتک  $V_f$  و چرخش قطعه کار به صورت  $N$ ، نسبت سرعت تغذیه غلتک  $f$  به صورت  $V_f/N$  به دست می‌آید. بنابراین، مساحت منطقه تماس به‌عنوان زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$A_c = 2l' \frac{V_f}{N} \quad (10)$$

کل نیروی شعاعی به صورت تخمین زده می‌شود:

$$F_r = p_{ave} A_c \quad (11)$$

جایگزینی مقدار  $A_c$  از معادله (۱۰) در معادله (۱۱) یک رابطه به‌عنوان زیر به دست می‌آید:

$$F_r = p_{ave} 2(\sqrt{2\delta D_R}) \frac{V_f}{N} \quad (12)$$

برای تخمین نیروهای محوری، تغییرشکل متوسط در نظر گرفته شده است. برای این منظور، میانگین طول تماس برابر  $l''$  و میانگین تورفتگی  $\delta/2$  در نظر گرفته می‌شود. میانگین طول تماس با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$l'' = \sqrt{2D_R \frac{\delta}{2}} \quad (13)$$

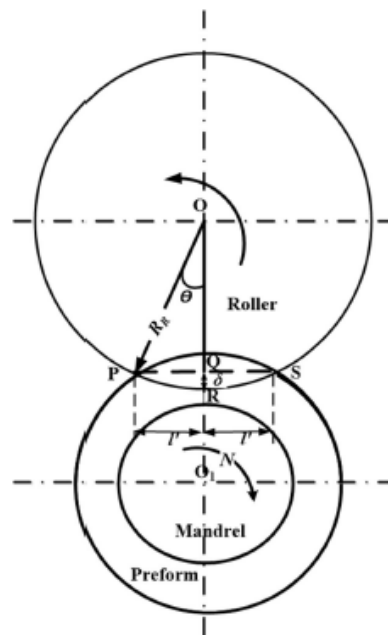
نیروی محوری به‌عنوان حاصل ضرب تنش تسلیم و منطقه تماس عمودی در نظر گرفته می‌شود. از این رو،

$$F_a = \sigma_y l'' \frac{\delta}{2} \quad (14)$$

نیروی مماسی به صورت تخمین زده می‌شود:

$$F_t = \mu F_r \quad (15)$$

که در آن  $\mu$  ضریب اصطکاک و  $F_r$  نیروی شعاعی محاسبه شده است.



شکل ۱: شماتیک فرایند تغییرشکل در فلوفرمینگ [۱۲]

زاویه OPQ زاویه نیش غلتک  $\theta$  است؛ بنابراین، عمق نفوذ را می‌توان به صورت نوشتاری نوشت:

$$R_R(1 - \cos \theta) = \delta \quad (2)$$

که  $\delta$  ضخامت پریفرم است. از گسترش سری مک لورن و نادیده گرفتن جملات مرتبه بالاتر، معادله (۲) منجر می‌شود به:

$$\theta^2 = \frac{2\delta}{R_R} \quad (3)$$

نصف طول تماس با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$l' = R_R \theta \quad (4)$$

با جایگزینی مقدار  $\theta$  از معادله (۳) در معادله (۴) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$l' = \sqrt{2\delta R_R} \quad (5)$$

به دلیل تغییرشکل غلتک و مسطح شدن غلتک، معادله (۵)

به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$l' = \sqrt{\delta D_R} \quad (6)$$

که در آن  $D_R$  قطر غلتک است. این یک تقریب استاندارد است که اغلب در تحلیل ساده شده نورد تخت استفاده می‌شود.

به دلیل فشار از مواد نورد، غلتک‌ها صاف می‌شوند تا کمان تماس افزایش یابد. در این فرآیند، افزایش قابل توجهی در شعاع غلتک مشاهده می‌شود [۱۳]. تخمین نیرو با تشبیه آهنگری قالب باز یک نوار مسطح انجام می‌شود. کل پریفرم در حالت پلاستیک در

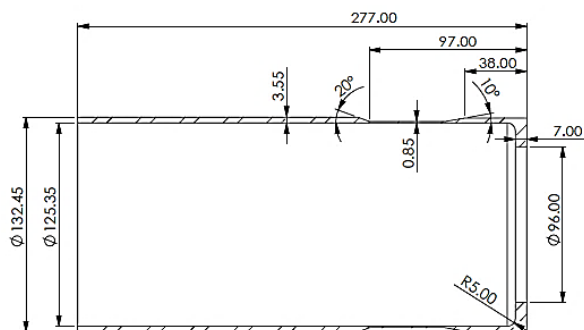
#### ۴- فعالیت‌های تجربی

در ابتدا خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده به کمک تست کشش تعیین می‌شود. نتایج تست کشش برای فولاد خاص استحکام بالای X35 در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات مکانیکی فولاد X35 بعد از عملیات حرارتی

ازدیاد طول نسبی	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
۱۶	۱۲۴۳	۱۱۰۳

با فرایند ماشینکاری، پریفرم به صورت شکل ۲ در می‌آید که آماده عملیات فلورمینگ می‌باشد.



شکل ۲: ابعاد پریفرم جهت شروع فرایند فلورمینگ.

پارامترهایی که در این بخش به منظور تحقیق بر روی کیفیت لوله فولادی مورد بررسی قرار گرفتند شامل نرخ پیشروی غلتک و سرعت چرخش ماندریل بود. برای بررسی اثر نرخ پیشروی، تمامی پارامترهای موجود در دستگاه فلورفرم را ثابت نگه داشته و دستگاه برای چهار نرخ پیشروی متفاوت طبق جدول ۴ آماده می‌شود. برای بررسی اثر سرعت چرخش ماندریل، تمامی پارامترهای موجود در دستگاه فلورفرم را ثابت نگه داشته و دستگاه برای چهار سرعت چرخش متفاوت ۹۰، ۱۱۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ دور بر دقیقه آماده می‌شود.

جدول ۴: ابعاد و شرایط اولیه شکل‌دهی غلتکی پریفرم‌های X35

جنس	X35
قطر داخلی پریفرم (میلیمتر)	۱۲۵/۳۵
ضخامت پریفرم (میلیمتر)	۳/۵۵
طول اولیه پریفرم (میلیمتر)	۲۷۷
سرعت چرخش ماندریل (دور بر دقیقه)	۱۱۰
شعاع نوک غلتک (میلیمتر)	۱/۱
مقدار بار برای هر مرحله شکل‌دهی (میلیمتر)	۱/۰۲

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد X35

درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)
۵/۱	۲۴۳۰	۲۳۶۰

جدول ۲: درصد عناصر آلیاژی فولاد X35

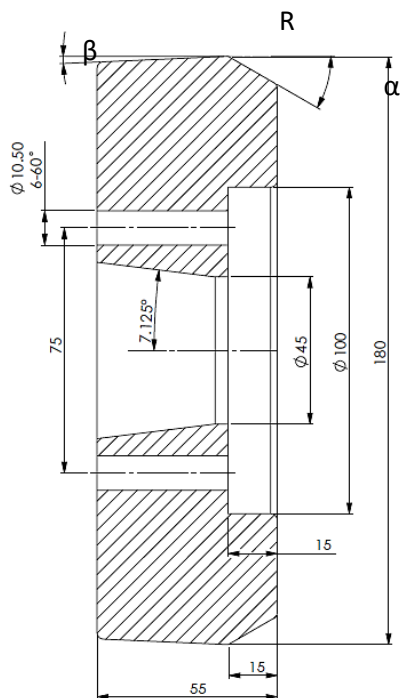
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
۰/۰۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۷	۴/۸	۱۸
Cu	Nb	Ti	V	W	Al	Co	Fe
۰/۰۲	۰/۰۴	۱/۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳	۰/۰۹۲	۱۲/۵	پایه

از آنجایی که استحکام فولاد خاص استحکام بالای X35 زیاد است و شکل‌دهی آن بسیار مشکل است، ابتدا آن را عملیات حرارتی می‌کنیم تا نرم‌تر شود و بتوان آن را شکل‌دهی کرد. ابتدا جنس مورد نظر که دارای سختی ۳۳۰ ویکرز هست، به کمک فرایند آنیل انحلالی و کرووی کردن در دمای ۸۱۰ درجه سانتیگراد در کوره خلا و خنک‌سازی در هوا به سختی ۲۱۰ ویکرز رسانده می‌شود. خواص این فولاد پس از عملیات حرارتی در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که این خواص مکانیکی بصورت ورودی در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود. بعد از عملیات فلورمینگ، برای بالا بردن استحکام محصول نهایی، عملیات پیرسازی در دمای ۵۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۶ ساعت در کوره خلا و حمام نمک صورت می‌گیرد تا به سختی ۶۳۰ ویکرز برسد.

X	۳۰	۲/۵	۱/۱
Y	۳۰	۲/۵	۱/۱
Z	۳۰	۲/۵	۱/۱

(Feed1) ۰/۳	پیشروی‌های متفاوت (میلیمتر بر دور)
(Feed2) ۰/۴	
(Feed3) ۰/۵	
(Feed4) ۰/۶	

در



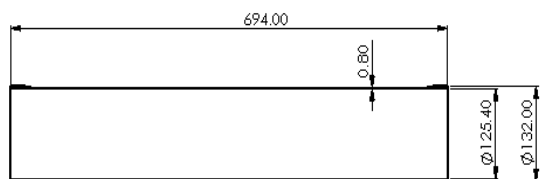
جدول ۵ تنظیمات آفست غلتک‌ها آورده شده است. در شکل ۳ شماتیک تنظیمات و آفست‌ها آورده شده است.

جدول ۵: تنظیمات آفست غلتک‌ها در فلورمینگ برای فولاد X35

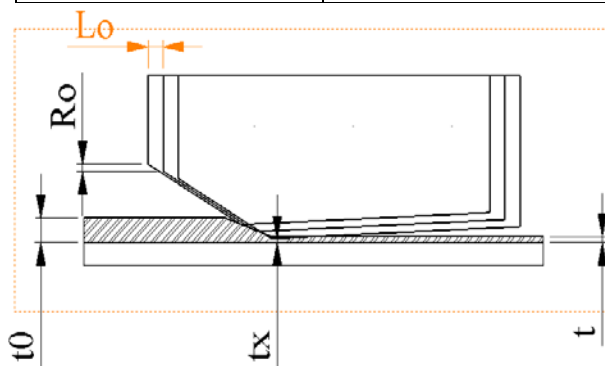
مقدار	پارامتر
۲/۴ میلیمتر	آفست طولی (Lo)
۱/۰۲ میلیمتر	آفست شعاعی (Ro)
۳/۵۵ میلیمتر	ضخامت اولیه پریفرم (t0)
۰/۴۹ میلیمتر	ضخامت تنظیمی لوله در آخرین غلتک (tx)
۰/۸۵ میلیمتر	ضخامت نهایی لوله بعد از بازگشت فنری (t)

شکل ۴: ابعاد هندسی غلتک‌های فلورمینگ از جنس SPK110

ابعاد نهایی محصول مطابق شکل ۵ است. در شکل ۶ نمایی از محصول نهایی پس از فرایند فلورمینگ دیده می‌شود.



شکل ۵: ابعاد نهایی نمونه فولاد X35 بعد از فرایند فلورمینگ.

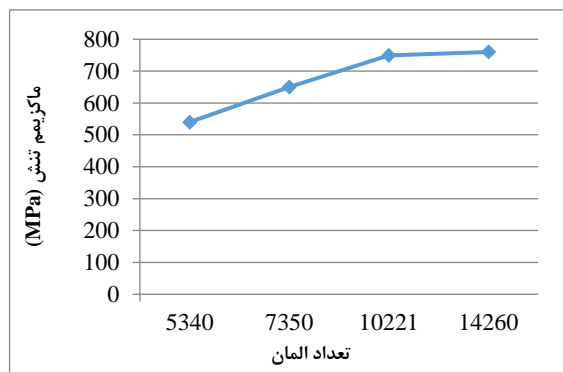


شکل ۳: نمایی از تنظیمات و آفست‌های طولی و شعاعی

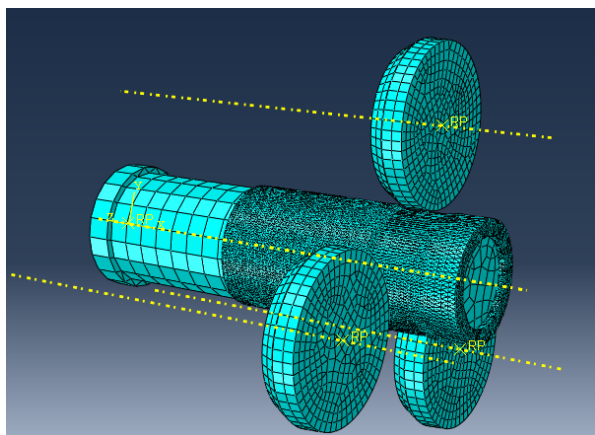
در شکل ۴ نمایی از هندسه غلتک مورد استفاده نشان داده شده است. پارامترهای هندسی غلتک در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: پارامترهای هندسی غلتک  
پارامترهای هندسی غلتک

$\alpha$   $\beta$  R



شکل ۷: آنالیز حساسیت به مش.



شکل ۸: مدل مش خورده در نرم افزار آباکوس.



شکل ۶: محصول نمایی پس از عملیات فلوفرمینگ

## ۵- مدل سازی المان محدود

ابتدا یک مدل در نرم افزار آباکوس ایجاد شد. ابعاد مدل کاملاً مطابق با ابعاد تجربی است. برای اینکه بتوان شرایط مرزی نظیر سرعت چرخش و سرعت حرکت خطی را به راحتی تعریف کرد بایستی برای تمامی اجزای صلب (غلتک ها و ماندریل) یک نقطه مرجع تعریف نمود. المان های پریفورم از نوع C3D10M تعریف شدند. مدل پریفورم شامل ۱۰۲۲۱ المان است. برای رسیدن به این تعداد المان از آنالیز حساسیت به مش استفاده شد. بدین صورت که مش بندی اولیه در چندین مرحله ریز شد. پس از اینکه تغییری در نتایج مشاهده نشد، تعداد المان دیگر تغییر نکرد و همان نحوه مش زنی در تمامی تحلیل ها استفاده شد. در شکل ۷ نتایج تحلیل حساسیت به مش نشان داده شده است. در شکل ۸ نمایی از مدل مش خورده دیده می شود. ضریب اصطکاک بین غلتک و پریفورم ۰/۰۸ در نظر گرفته شده است.

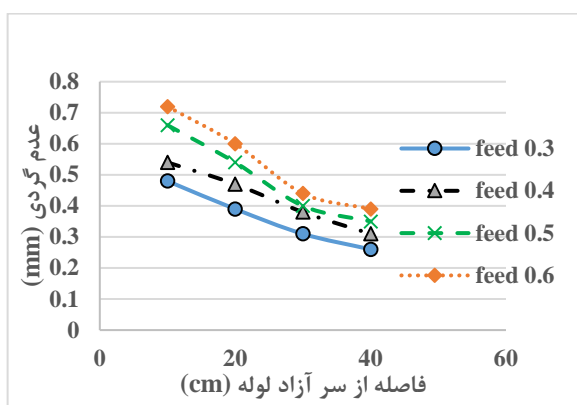
## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- نتایج تجربی

در نمودار شکل ۹ تأثیر نرخ پیشروی بر روی زبری سطح لوله فولاد خاص استحکام بالای X35 مشاهده می شود. با توجه به نمودار مشاهده می شود که با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ تا ۰/۶ میلی متر بر دور، زبری سطح حدوداً ۹۷ درصد افزایش می یابد. مطابق با تعریف پیشروی که بر حسب جابجایی بر دور می باشد، افزایش نرخ پیشروی، در یک دور چرخش قطعه کار، مقدار بیشتری جابجایی طولی غلتک روی لوله را به همراه دارد، در نتیجه سطح بیشتری از ماده در یک دور چرخش لوله با غلتک در تماس است و ناصافی سطح لوله بیشتر می شود.

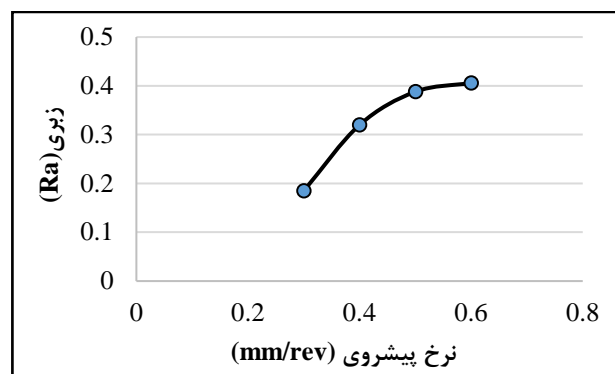
قطعه کار اهمیت بالایی نداشته باشد، می توان با افزایش نرخ پیشروی، از افزایش رشد قطری جلوگیری کرد.

پارامتر عدم گردی (دقت هندسی) از آن جهت حائز اهمیت است که، وجود آن باعث می شود که تمام قسمت های لوله به یک اندازه جرم نداشته باشند و در لوله های دوار باعث عدم تعادل و ارتعاش می شود. همانگونه که از نمودار شکل ۱۱ مشاهده می شود، با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ به ۰/۶ میلیمتر بر دور، مقدار عدم گردی در لوله فلوفرمینگ شده افزایش می یابد. همچنین مقدار عدم گردی در سر آزاد لوله از سمت مقید شده لوله بیشتر می باشد.



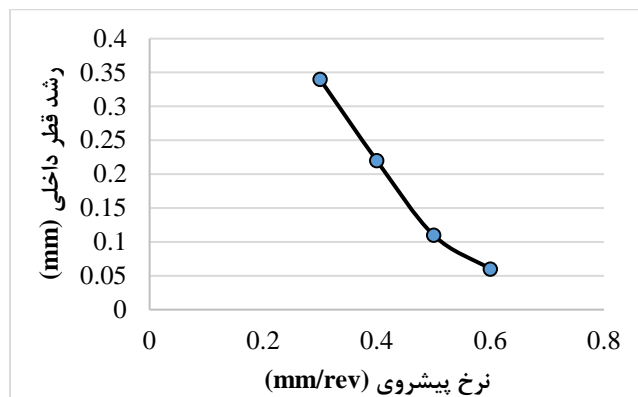
شکل ۱۱: اثر نرخ پیشروی بر روی عدم گردی لوله

نمودار شکل ۱۲ تأثیر سرعت دوران ماندریل را بر روی زبری سطح لوله نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش سرعت دوران تا ۱۱۰ دور بر دقیقه، زبری سطح لوله کاهش و با افزایش بیشتر سرعت دوران افزایش می یابد؛ بنابراین به منظور به دست آوردن کیفیت سطح مشخص باید پارامتر سرعت دوران را نیز در نظر گرفت. سرعت دوران بالا باعث لرزش و ارتعاش در دستگاه می شود، همچنین باعث بالا رفتن دمای فلز می شود و جریان فلز را در فرایند شکل دهی تسهیل می بخشد. در نتیجه با افزایش سرعت دوران ماندریل، جریان فلز راحت تر می شود و کیفیت سطح افزایش می یابد، اما با افزایش سرعت دوران از حد مشخصی لرزش و ارتعاش در دستگاه و ماندریل ایجاد می شود و کیفیت سطح فلز کاهش می یابد. در مواقعی که کیفیت سطح لوله شکل دهی غلتکی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد، باید سرعت دوران بهینه را به دست آورد.



شکل ۹: تأثیر نرخ پیشروی روی زبری سطح لوله

یک شاخص مهم که می توان دقت ابعادی را با آن سنجید، میزان رشد قطر داخل لوله می باشد. قطعات شکل داده شده توسط فرایند فلوفرمینگ اندازه گیری ابعادی شدند و میزان رشد قطر داخلی آن ها نسبت به قطر پریفرم، برای پیشروی های متفاوت در نمودار شکل ۱۰ آورده شده است.

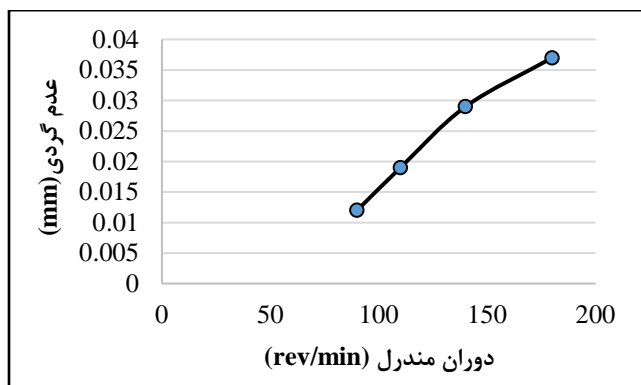


شکل ۱۰: اثر نرخ پیشروی بر روی رشد قطر داخلی لوله

مشخص است با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ به ۰/۶ میلی متر بر دور، رشد قطر داخلی لوله شکل داده شده، ۸/۸۶ درصد کاهش می یابد. تغییر شکل پلاستیک مواد در لوله به وسیله این فرایند در دو جهت طولی و عرضی وجود دارد. با کاهش نرخ پیشروی درصد کاهش مقطع بیشتر می شود و تغییر شکل پلاستیک در جهت عرضی از تغییر شکل پلاستیک در جهت طولی بیشتر می شود. همچنین تغییر شکل به وسیله عمق برش در جهت طولی به تأخیر می افتد. در نتیجه رشد قطری بیشتر می شود. می توان نتیجه گرفت که به وسیله تنظیم کردن مقدار پیشروی می توان رشد قطری را کاهش یا افزایش داد. در مواقعی که کیفیت سطح

دستگاه مقداری از بار اعمال شده به دستگاه کاسته می‌شود و به اصطلاح بار دستگاه پس می‌زند که منجر به کم شدن بار دستگاه می‌شود.

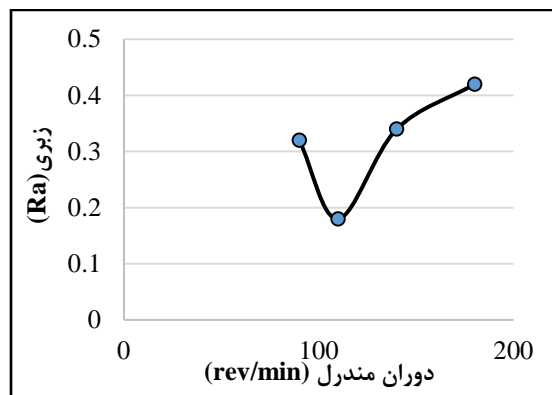
نمودار شکل ۱۴ میزان عدم گردی لوله‌های فلوفرمینگ شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت دوران از ۹۰ به ۱۸۰ دور بر دقیقه مقدار عدم گردی در لوله افزایش می‌یابد؛ که این مقدار در سر لوله بیشتر از قسمت ته آن است. به‌منظور دستیابی به مقدار دقت هندسی مشخص، نمی‌توان مقدار سرعت دوران را از حد خاصی بیشتر کرد.



شکل ۱۴: اثر سرعت دوران بر روی عدم گردی لوله

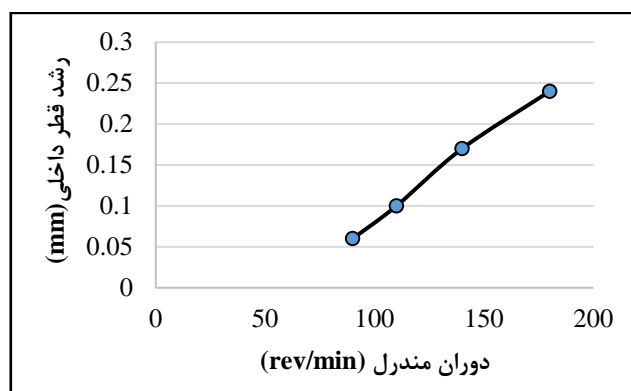
#### ۶-۲- نتایج آلمان محدود

نمودار شکل ۱۵ جابجایی گره‌ها را بر روی مدل شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. با افزایش نرخ پیشروی اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها بیشتر از حالت نرخ پیشروی کمتر می‌باشد. به این منظور برای پیشروی کم، اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها، معادل عدد زبری سطح در حالت کمترین پیشروی آزمایشگاهی و برای پیشروی زیاد، اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها، معادل عدد زبری سطح در حالت بیشترین پیشروی آزمایشگاهی است. با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۳ به ۰/۶ میلی‌متر بر دور، زبری سطح مدل شبیه‌سازی شده ۶۲/۵ درصد افزایش می‌یابد. روند تغییرات نمودار با نمودار تجربی تطابق خوبی دارد ولی از لحاظ مقدار تفاوت دارند. علت اختلاف در مقادیر بدست آمده این است که در مدل‌سازی آلمان محدود، قطر داخلی ثابت در نظر گرفته می‌شود و هیچ گونه عدم گردی و همچنین تغییر قطری در پرفرم لحاظ نمی‌شود، ولی در نمونه



شکل ۱۲: اثر سرعت دوران بر زبری سطح لوله

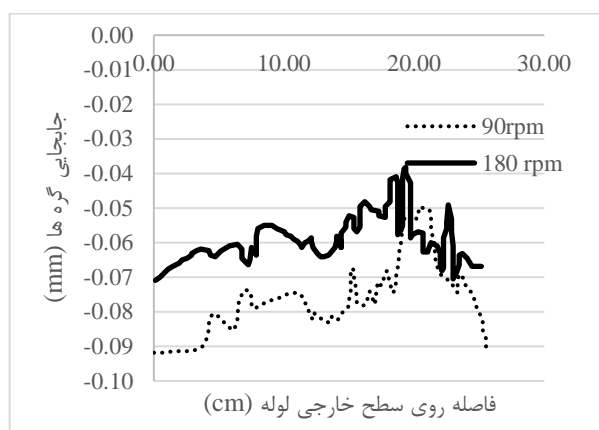
سرعت دورانی ماندریل بر روی تغییرات ابعادی لوله‌های شکل داده شده نیز تأثیر دارد. نمودار شکل ۱۳، تغییرات رشد قطر داخلی لوله‌ها را با تغییرات سرعت دوران ماندریل نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: اثر سرعت دوران بر روی رشد قطری لوله

مشخص است، با افزایش سرعت دوران ماندریل از ۹۰ تا ۱۸۰ دور بر دقیقه، قطر داخلی لوله زیاد می‌شود. سرعت دوران بالاتر علاوه بر تولید حرارت و افزایش فرم‌پذیری، باعث افزایش نیروی شعاعی (نیروی گریز از مرکز) در لوله می‌شود، به همین علت مقدار رشد قطری در لوله با افزایش سرعت دوران، بیشتر خواهد بود. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش سرعت دوران، دقت ابعادی لوله شکل‌دهی غلتکی کاهش می‌یابد. در مواقعی که نیاز به سرعت انجام کار است، باید پارامتر افزایش قطر داخلی را نیز در نظر گرفت و تا حدی سرعت دوران ماندریل را افزایش دهیم که دقت ابعادی مورد نظر ایجاد شود. در عملیات تجربی در سرعت دوران‌های بالا به علت لرزش دستگاه و وجود لقی در

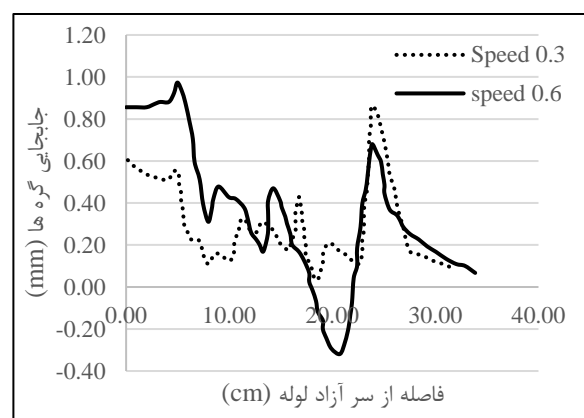
جابجایی گره‌های سطح خارجی لوله نشان می‌دهد. عدد جابجایی گره‌ها منفی است. برای دوران‌های بالاتر جابجایی گره‌ها یا همان رشد قطری بیشتر بوده، همچنین اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها در حالت دوران بالاتر بیشتر از دوران پایین‌تر است. عدد اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها برای سرعت دوران ۱۸۰ دور بر دقیقه برابر ۰/۴۳۱ میلی‌متر و برای سرعت دوران ۹۰ دور بر دقیقه برابر ۰/۳۴۰۱ میلی‌متر می‌باشد. با افزایش ۱۰۰ درصدی سرعت دوران میزان عدم گردی در سطح خارجی لوله فولادی ۲۶/۷ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷: اثر سرعت دوران ماندریل بر روی جابجایی گره‌ها روی قطر خارجی سطح لوله از جنس X35

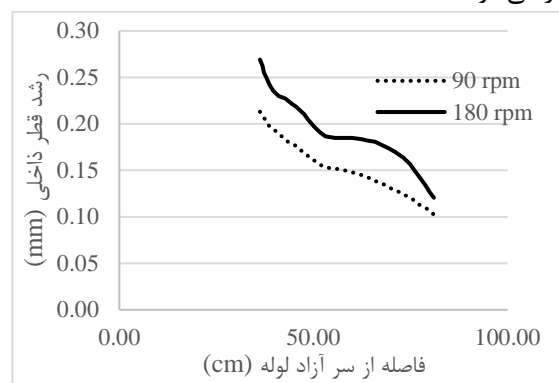
به‌منظور بررسی اثر زاویه حمله در مبحث المان محدود، شبیه‌سازی برای غلتک‌هایی با زاویه حمله متفاوت انجام گرفت. نمودار شکل ۱۸ جابجایی شعاعی گره‌ها را برای مسیر طولی مشخص شده نشان می‌دهد. مقدار اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها را می‌توان با زبری سطح لوله برابر گرفت. با کاهش زاویه حمله، زبری سطح کاهش می‌یابد.

تجربی با توجه به اینکه پریفرم ماشینکاری شده است، مقدار اندکی عدم‌گردی و همچنین تغییر قطر با توجه به تolerانس‌های ساخت وجود دارد.



شکل ۱۵: جابجایی گره‌ها نسبت به هم در مدل شبیه‌سازی برای دو پیشروی متفاوت برای فولاد X35

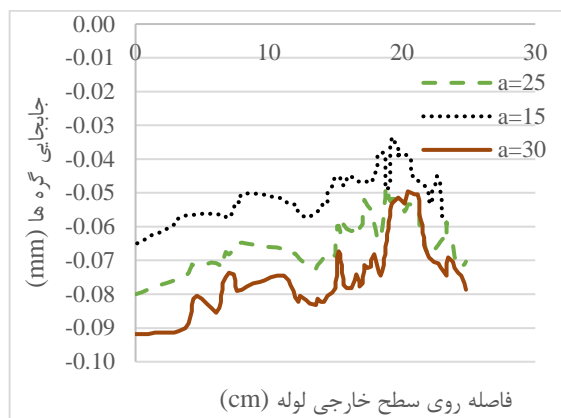
نمودار شکل ۱۶، اثر سرعت دوران ماندریل را بر روی افزایش قطر داخلی لوله نشان می‌دهد. برای بررسی مقدار افزایش قطر داخلی در نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس از جابجایی گره‌ها در راستای شعاعی بر روی مسیر مشخص شده روی قطر داخلی استفاده شده است. با افزایش ۱۰۰ درصدی سرعت دوران در مدل شبیه‌سازی، قطر داخلی ۲۴/۳ درصد افزایش می‌یابد. توجه این مطلب به این صورت است که دوران بالاتر باعث ایجاد نیروی شعاعی بیشتر در لوله می‌شود و در نتیجه افزایش طول شعاعی بیشتر می‌شود.



شکل ۱۶: اثر سرعت دوران بر رشد قطری لوله از جنس فولاد X35 در حالت شبیه‌سازی شده

نمودار شکل ۱۷ اثر سرعت دوران ماندریل را بر روی

فولادی افزایش می‌یابد.



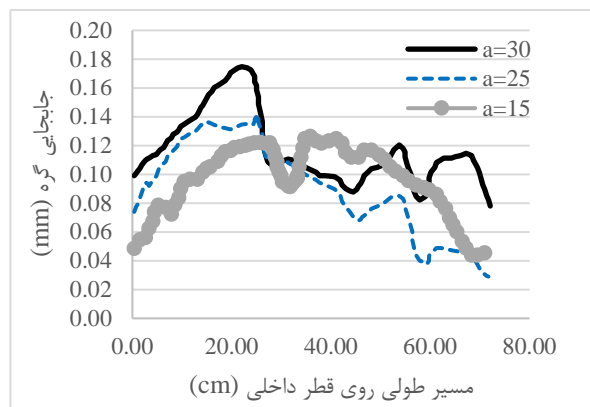
شکل ۲۰: اثر زاویه حمله غلتک بر روی عدم‌گردی، روی مسیر دایره‌ای قطر خارجی لوله شبیه‌سازی شده

## ۷- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، پارامترهای زیادی در فرایند فلوفرمینگ مؤثر هستند که در این تحقیق، اثر ۳ پارامتر مهم شامل نرخ پیشروی، سرعت دوران ماندریل و زاویه حمله غلتک بررسی گردید و اثرات آن‌ها بر کیفیت سطح (زبری سطح) و کیفیت ابعادی (رشد قطری) و کیفیت هندسی (عدم‌گردی) محصول بررسی شد.

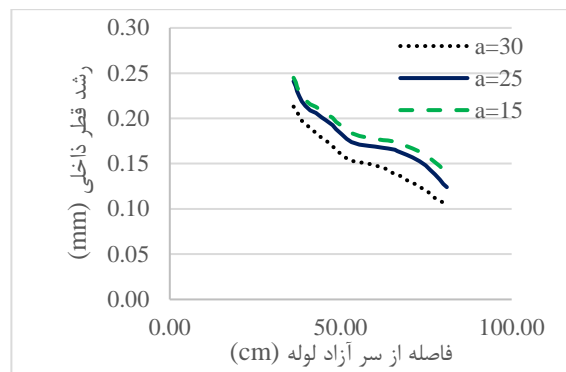
پارامترهای شکل‌دهی نظیر سرعت دوران ماندریل و سرعت پیشروی و همچنین پارامتر هندسی زاویه حمله غلتک، اثر زیادی روی کیفیت سطح و ابعاد قطعه نهایی دارد. نتایج این تحقیق به قرار زیر است:

- با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح محصول نهایی تقریباً ۶۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش نرخ پیشروی همچنین منجر به کاهش عدم‌گردی و در نتیجه بهبود کیفیت هندسی قطعه نهایی می‌شود.
- افزایش سرعت دوران ماندریل منجر به کاهش زبری سطح (افزایش کیفیت سطح) می‌شود. همچنین افزایش سرعت دوران منجر به افزایش حدوداً ۲۷ درصدی عدم‌گردی محصول می‌شود. این امر همچنین باعث افزایش رشد قطری لوله و لذا کاهش کیفیت ابعادی می‌شود.
- افزایش زاویه حمله از ۱۵ درجه تا ۳۰ درجه منجر به افزایش زبری حدوداً ۳۰ درصدی (کاهش کیفیت سطح)



شکل ۱۸: اثر زاویه حمله غلتک بر روی جابجایی گره‌های سطح خارجی لوله در مدل شبیه‌سازی شده

جابجایی شعاعی گره‌ها در مدل شبیه‌سازی شده در نمودار شکل ۱۹ آورده شده است. مشخص است رشد قطری ابتدا به خاطر شرایط ناپایداری در سر لوله افزایش می‌یابد و بعد از ۱۰ میلی‌متر به علت ثابت بودن انتهای لوله شبیه‌سازی شده کاهش می‌یابد. با کاهش زاویه حمله، رشد قطر داخلی افزایش می‌یابد. لذا نتیجه می‌شود برای فولادهای با استحکام بالا، زاویه حمله ۳۰ درجه مناسب‌تر است.



شکل ۱۹: اثر زاویه حمله غلتک بر روی جابجایی شعاعی گره‌های مدل شبیه‌سازی روی سطح داخلی لوله

نمودار شکل ۲۰ اثر زاویه حمله غلتک را بر روی جابجایی گره‌های سطح خارجی لوله نشان می‌دهد. برای زاویه حمله‌های کوچک‌تر، جابجایی گره‌ها یا همان رشد قطری بیشتر می‌باشد، همچنین اختلاف بین بیشترین و کمترین جابجایی گره‌ها در حالت زاویه حمله کوچک‌تر بیشتر از زاویه حمله بزرگ‌تر است. با کاهش زاویه حمله، میزان عدم‌گردی در سطح خارجی لوله

[۱۱] M. Runge, Spinning and flow forming, Verlag Moderne Industrie, 1994.

[۱۲] P. Banerjee and N. Hui, "A Simplified Model for the Estimation of Forces in Flow Forming and Its Comparison with Ideal Deformation and FEM Models," Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, vol. 102, no. 1, pp. 13–26, 2021.

[۱۳] J. Chakrabarty, Theory of Plasticity, Elsevier, 2006.

[۱۴] A. Ghosh and A.K. Mallik, Manufacturing Science (vol. 432), Ellis Horwood Series in Electrical and Electronic Engineering, 1986.

می‌شود. همچنین منجر به کاهش عدم‌گردی و کاهش رشد قطری و در نتیجه بهبود کیفیت هندسی قطعه نهایی می‌شود.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

[۱] ک. تابعی، ف. جوانرودی، "اثر پارامترهای موثر بر کیفیت لوله فلورمینگ"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، تهران، ۱۳۹۰.

[۲] و. حقیقت، م. ریآوری، "بهبود خواص مکانیکی و تغییر ساختار فولاد ۴۱۳۰ بر اثر فرآیند فلورم در تولید پوسته بدنه موتور راکت"، دومین کنفرانس انجمن پیشران‌های فضایی ایران دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۲.

[۳] ا. عابدینی، س. احمدی، ع. دنیوی، ح. دیلمی، "بررسی تجربی بهینه‌سازی فرآیند فلورمینگ به کمک روش تاگوچی"، بیستمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، ۱۳۹۱.

[۴] R. J. Bhatt and H. K. Raval, "Influence of Operating Variables during Flow Forming Process", in Procedia CIRP, Elsevier B.V., vol. 55, pp. 146–151, 2016.

[۵] P. Banerjee, N. B. Hui, M. K. Dikshit, and S. Som, "FE modelling of three dimensional staggered backward metal flow forming process," International Journal of Modern Manufacturing Technologies, vol. 13, no. 1, pp. 15–25, 2021.

[۶] A. K. Singh, K. Narasimhan, and R. Singh, "Finite element modeling of backward flow forming of Ti6Al4V alloy", Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd, vol. 5, no. 11, pp. 24963–24970, 2018.

[۷] C. Erdogan, H. Vural, A. Karakaş, T. O. Fenercioğlu, and T. Yalçinkaya, "Ductile failure of Inconel 718 during flow forming process and its numerical investigation", Engineering Failure Analysis, vol. 152, p. 107424, 2023.

[8] C. Zhu, F. Li, Y. Dong, S. Zhao, J. Lv, and D. Meng, "The Rollers' Offset Position Influence on the Counter-Roller Flow-Forming Process", Metals (Basel), vol. 12, no. 9, p. 1471, Sep. 2022.

[۹] و. سلیمانی، ق. فرجی، "ارزیابی خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد ۴۱۳۰ بعد از فرآیند فلورمینگ معکوس لوله"، ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۲۳، شماره ۳، صفحات ۱۸۴–۱۹۰، ۱۴۰۱.

[۱۰] H. Vural, C. Erdoğan, T.O. Fenercioğlu, and T. Yalçinkaya, "Ductile failure prediction during the flow forming process," Procedia Structural Integrity, vol. 35, pp. 25–33, 2022.



## COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)