



# Experimental and Numerical Investigation of Cold Drawing Process of 410 Stainless Steel Tube

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Niazi M.M.<sup>1</sup>,  
Vafaei R.<sup>1</sup>,  
Mohammad Sharifi E.<sup>1</sup>,  
Mahdian A.<sup>2\*</sup>

### How to cite this article

Niazi M.M., Vafaei R., Mohammad Sharifi E., Mahdian A., Experimental and numerical investigation of cold drawing process of 410 stainless steel tube. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(07):387-394.

<sup>1</sup> Faculty of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr Campus. Isfahan. Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr Campus. Isfahan. Iran

### \*Correspondence

Address: Malek Ashtar University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Shahin Shahr Campus. Isfahan Iran  
a.mahdian@mut-es.ac.ir

### Article History

Received: March 25, 2023

Accepted: June 12, 2023

ePublished: August 16, 2023

## ABSTRACT

In this research, the drawing force was evaluated in the cold drawing process of 410 stainless steel tubes. By FEM simulation, upper limit solving methods, slab analysis, and the experimental process of drawing force and optimal angle of the die was obtained. The practical drawing was done with an industrial drawing device using a fixed plug method. Abaqus/Explicit software was used to simulate the process. Determining the required drawing force and predicting it was calculated using the methods of horizontal analysis and the upper limit of its range. According to the results, the lowest value of the coefficient of friction was 0.15 and the lowest drawing force was obtained at the die angle of 32 degrees. In addition, by simulating the process in Abaqus, the force was calculated and the validation of the results was done to predict the required force. After conducting the practical tests, the difference between the experimental and simulation predicted force was determined to be less than 7%.

**Keywords** Cold drawing of tube, 410 stainless steel, drawing force, FEM simulation, die angle.

## CITATION LINKS

1- Handbook of workability and process design. 2- Miniaturized tube fixed plug drawing: Determination of the friction coefficients and drawing limit of 316 LVM stainless steel. 3- A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria. 4- Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis. 5- Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. 6- Determination of the coefficient of friction under cold tube drawing using FEM simulation and drawing force measurement. 7- Effects of the semi die/plug angles on cold tube drawing with a fixed plug by FEM for AISI 1010 steel tube. 8- Optimization on the cold drawing process of 6063 aluminium tubes. 9- Fracture toughness of alumina and ZTA ceramics: microstructural coarsening effects. 10- A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. 11- Development of Johnson cook model for Zircaloy-4 with low oxygen content. 12- Metal forming: mechanics and metallurgy. 13- Ring forming: An upper bound approach.

## بررسی تجربی و عددی فرآیند کشش سرد لوله فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰

محمد مهدی نیازی<sup>۱</sup>، رضا وفايي<sup>۱</sup>، احسان محمد شریفی<sup>۱</sup>، اصغر مهدیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مجتمع علم مواد و مواد پیشرفته الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

### چکیده

در این پژوهش، ارزیابی نیروی کشش در فرآیند کشش سرد لوله فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰ انجام گرفت. با استفاده از شبیه‌سازی FEM، روش‌های حل کران بالا، آنالیز تختال و فرآیند تجربی نیروی کشش و زاویه بهینه قالب بدست آمد. کشش عملی با دستگاه کشش صنعتی به روش توپی ثابت انجام شد. از نرم افزار آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شد. تعیین محدوده نیروی کشش مورد نیاز و پیش بینی آن با استفاده از روش‌های آنالیز تختال و کران بالا محاسبه شد. با توجه به نتایج، کمترین مقدار ضریب اصطکاک ۰/۱۵ مشخص و در زاویه قالب ۳۲ درجه کم‌ترین نیروی کشش بدست آمد. با شبیه‌سازی فرآیند در آباکوس نیرو محاسبه شده و صحت سنجی نتایج برای پیش‌بینی نیروی مورد نیاز با نتایج قبلی صورت گرفت. پس از انجام آزمون‌های عملی، اختلاف نیروی پیش‌بینی شده تجربی و شبیه‌سازی کمتر از ۷٪ تعیین گردید.

**کلیدواژه‌ها:** کشش سرد لوله، فولاد زنگ‌نزن ۴۱۰، نیروی کشش، شبیه‌سازی FEM، زاویه قالب.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

\*نویسنده مسئول: A.mahdian@mut-es.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه بدلیل خواص و ویژگی‌های لوله‌های فولاد زنگ‌نزن به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله پتروشیمی و نفت و گاز استفاده می‌شوند. نوع آستنیتی و مارتنزیتی این فولادها در ساخت مبدل‌های حرارتی و بویلرها به طور وسیع‌تر کاربرد دارند. با توجه به خواص ویژه لوله‌های بدون درز فولاد مارتنزیتی مانند، سختی و استحکام بالا، مقاومت به سایش، مقاومت به خستگی، مقاومت در مقابل دمای بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون و مقاومت به خوردگی مناسب، در ساخت اتصالات مبدل‌های حرارتی به کار می‌روند. کشش سرد یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تولید لوله‌های بدون درز فولادی است. لوله‌های تولید شده طی این فرآیند دارای ابعاد دقیق، کیفیت سطح نهایی خوب، زبری سطح پایین و خواص مکانیکی مناسب هستند. در این فرآیند لوله اولیه از یک قالب با یا بدون ابزار داخلی، عبور داده می‌شود. استفاده از ابزار داخلی جهت کنترل قطر داخلی و کیفیت سطح داخلی بسیار مهم است. با توجه به اندازه نهایی محصول این عمل ممکن است به صورت چند مرحله تکرار شود. در این‌صورت انجام آنیل میانی ضروری است. محلول صابون و روغن مهم‌ترین روانکارهای فرآیند کشش سرد هستند که نقش موثری بر مقدار نیرو، تنش‌های پسماند و کرنش

اضافی ماده دارد<sup>[۱]</sup>. با توجه به جنس لوله اولیه، مقدار کاهش در سطح مقطع، شرایط روانکاری و مقدار ضریب اصطکاک، تعیین مقدار نیروی لازم برای کشش برای تعیین ظرفیت دستگاه بسیار مهم است. استفاده از روش‌های صحیح و خطا جهت بدست آوردن نیروی بهینه کشش نیازمند صرف زمان و هزینه می‌باشد، در این راستا با استفاده از روش‌های کران بالا و آنالیز تختال می‌توان حدود نیروی لازم را محاسبه و مقدار تقریبی آن را پیش‌بینی نمود، بدنبال آن با کمک روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نیروی واقعی طی کشش نمونه از موثرترین راهکارها در راستای تخمین دقیق‌تر نیرو می‌باشد. مطالعات و آزمایشات بسیاری بر تعیین پارامترهای موثر و تاثیر آن‌ها انجام گرفته شده است. از جمله آن‌ها، طی مطالعه درزت (Drezet) و همکاران<sup>[۲]</sup> جهت تعیین ضریب اصطکاک و حد کشش فولاد ۳۱۶ با مدل‌سازی المان محدود، نشان دادند تغییر نوع روانکار و پیش گرم قالب موجب کاهش ضریب اصطکاک و نیرو در کشش لوله با پلاگ ثابت می‌شود. لینادرون<sup>[۳]</sup> و پالنگات<sup>[۴]</sup> نیروی کشش و حد شکست را در کشش با ماندل تعیین کردند. بوتنل (Boutenel) و همکاران<sup>[۵]</sup> در مدل شبیه‌سازی شده، اثر ضریب اصطکاک و نسبت ضخامت را بر نیروی کشش بررسی کرده‌اند. محققان دیگر همچون نکپال و همکاران<sup>[۶]</sup>، جول و همکاران و گاتماه و همکاران<sup>[۷]</sup> و بلند (Blend) و همکاران<sup>[۸]</sup> با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و مقایسه با آزمون عملی نیرو و پارامترهای کشش را تخمین و پیش بینی کردند. کیونگ کن<sup>[۹]</sup> از روش حل کران بالا برای محاسبه تنش کششی لازم در فرآیند کشش لوله کمک گرفت.

در مقایسه با لوله‌های فولادی زنگ‌نزن آستنیتی، تاثیر فرآیند کشش سرد بر لوله‌های فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی کمتر مورد توجه بوده و داده‌های محدودی در این حوزه وجود دارد به طوریکه مقالات و پژوهش برجسته‌ای در این رابطه موجود نیست. لذا در پژوهش حاضر سعی شده داده‌ها و نتایج کاربردی در زمینه تاثیر فرآیند کشش سرد بر لوله‌های فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ارائه شود. در این پژوهش حد بالایی نیرو با استفاده از معادله کران بالا و حد پایینی آن با استفاده از روابط آنالیز تختال در فرآیند کشش سرد لوله فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ محاسبه شده و با نیروی واقعی بدست آمده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. تخمین و پیش‌بینی نیروی کشش واقعی به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود و روش‌های حل کران بالا و پایین نیز انجام شده است. به دنبال آن با استفاده از آزمایش عملی نمونه‌ها نتایج مورد صحت سنجی شده‌اند. همچنین ضریب اصطکاک (بین ابزار و لوله) و اندازه زاویه قالب بهینه برای کاهش نیروی کشش ارائه شده است.

با توجه به نکات فوق می‌توان نوآوری‌های تحقیق پیش رو را به صورت زیر برشمرد:

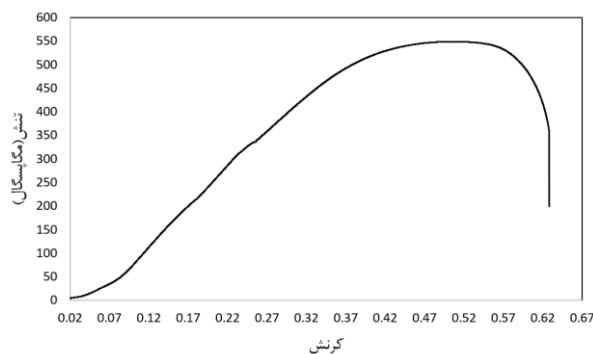
۱- در مراجع موجود بررسی کشش لوله با ماده فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۱۰ گزارش نشده است. در این تحقیق ضمن تست‌های

جدول ۲) خواص مکانیکی لوله مورد استفاده

| خواص      | چگالی<br>(کیلوگرم بر متر مکعب) | ضریب<br>پواسون <sup>۱</sup> | مدول<br>یانگ<br>(گیگا پاسکال) | تنش<br>سختی<br>(ویکرز) | تنش<br>تسلیم<br>(مگا پاسکال) | استحکام<br>کششی<br>(مگاپاسکال) |
|-----------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| فولاد ۴۱۰ | ۷۷۰۰                           | ۰/۳                         | ۲۰۰                           | ۱۴۲                    | ۴۶۹                          | ۵۲۴                            |



شکل ۱) قالب و توپی استفاده شده در فرآیند کشش سرد لوله (الف) سطح مقطع لوله اولیه، (ب) لوله و ابزار نصب شده بر روی دستگاه، (ج) قالب، (د) توپی.



شکل ۲) نمودار تنش-کرنش ماده اولیه

انجام شده نمودار تنش-کرنش ماده فوق استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است. تنش تسلیم نتیجه شده از تست‌ها با نتایج مدل جانسون-کوک مطابقت دارد.

۲- برای دستیابی به نیروی کشش عموماً از لودسل استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از جریان مصرفی الکتروموتور میز کشش، نیروی مورد نظر به دست آمده است.

۳- جهت تعیین ضریب اصطکاک قالب و توپی با لوله از تست فشار حلقه و نمودارهای استاندارد آن استفاده شده است که طی توضیح و تفسیر آنها در این مقاله نمیگنجد. در بعضی مراجع دیگر ضمن معلوم فرض کردن ضریب اصطکاک از محاسبه آن خودداری شده [4] و در برخی دیگر نیز از روش معکوس استفاده شده است [5].

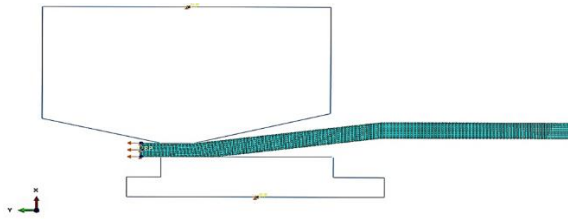
## ۲- روش حل مسئله

### ۲-۱- آزمایش تجربی

در این آزمایش از فولاد ۴۱۰ در حالت آنیل با ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مطابق جدول ۱ و ۲ استفاده شد. لوله اولیه مطابق شکل ۱ به ابعاد قطر خارجی ۳۴ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر توسط دستگاه کشش ۳۰ تن در دمای محیط تحت کشش با پلاگ ثابت قرار گرفت. قبل از هر چیز، لوله در مرحله اسیدشویی تمیزکاری شده و روانکاری سطح لوله توسط صابون و اگزالات انجام می‌شود. در ادامه با توجه به شکل ۱ لوله وارد دستگاه کشش، که انتهای آن (توسط راد) ثابت شده و طرف دیگر متصل به توپی ثابت است، می‌گردد. سرلوله که قبلاً قالب زنی شده است، پس از عبور از قالب توسط گاری مجهز به دو فک گرفته می‌شود. موتور دستگاه با اعمال نیرو به زنجیر متصل به گاری کشش سرلوله را گرفته، لوله را به عقب می‌کشد. فرآیند کشش به صورت دو مرحله‌ای صورت می‌گیرد، به طوریکه در مرحله اول با کاهش سطح مقطع ۲۶٪ لوله با قطر خارج و ضخامت ۳\*۳۴ به ۲۹\*۲۶ میلی‌متر می‌رسد و پس از اعمال آنیل میانی، طی کاهش سطح مقطع ۲۸/۴٪ ابعاد نهایی لوله به ۲۵/۴\*۲۱/۱ می‌انجامد. نمونه‌ها با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفتند. مرحله اول با سه قالب با زوایای ۲۴ و ۲۸ و ۳۲ درجه انجام شد. در شکل ۲ نمودار تنش کرنش ماده اولیه ناشی از آزمون کشش تک محوره نشان داده شده است. جهت تعیین ضریب اصطکاک از آزمون فشار حلقه با نمونه‌هایی با نسبت ابعاد استاندارد اولیه  $R_0: r_0: t_0 = 6:3:2$  در دو کاهش ارتفاع استفاده گردید.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی لوله مورد استفاده در این تحقیق (بر حسب درصد وزنی)

| عنصر      | مولیبدن | نیکل | کرم  | فسفر  | گوگرد | منگنز | سیلیسیم | کربن |
|-----------|---------|------|------|-------|-------|-------|---------|------|
| فولاد ۴۱۰ | ۰/۰۲    | ۰/۲۷ | ۱۳/۱ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۰۵ | ۰/۳۹  | ۰/۳۳    | ۰/۰۷ |



شکل ۳) شماتیک فرآیند کشش سرد.

می‌آیند. با توجه به نتایج آزمون کشش و رسم نمودار نمایی تنش حقیقی برحسب کرنش حقیقی در سرعت‌های مختلف (۵ و ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر در دقیقه) و نرخ کرنش‌های متفاوت (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴) این پارامترها استخراج گردید. آزمون‌های کشش تحت سرعت ثابت انجام گرفت با توجه به روابط بین سرعت و کرنش، نرخ کرنش مطابق رابطه ۶ محاسبه شد. پارامترهای جانسون کوک نیز مطابق با مرجع [11] استفاده گردید. در جدول ۳ پارامترهای جانسون کوک ارائه شده اند. در شبیه سازی بدلیل تاثیر ناچیز تغییرات دما، از این پارامتر صرف نظر شد.

$$\varepsilon^0 = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dl}{dt} = \frac{V}{L} \quad (6)$$

V سرعت بر حسب میلی‌متر بر ثانیه و L طول گیج نمونه کشش بر حسب میلی‌متر ۵۰ می‌باشد.

شبیه‌سازی برای قالب با زوایای ۲۸، ۳۲ و ۳۴ درجه انجام و نیروی کشش پیش‌بینی شد.

### ۳-۱- تخمین نیرو با روش‌های تحلیلی

با محاسبه نیرو به روش کران بالا با استفاده از رابطه (۷) صحت حدود نیرو بدست آمده از روش اجزای محدود بررسی می‌شود. رابطه کران بالا به صورت زیر بیان قابل بیان است [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \frac{2\sigma_y}{\sqrt{3}} (1+x+x^2)^{1/2} \ln \frac{A_0}{A_f} \\ &+ \frac{2\sigma_y}{3\sqrt{3}} \tan \alpha \left[ \frac{R_0^2 + R_0 r_0 + r_0^2}{R_0(R_0 + r_0)} + \frac{R_f^2 + R_f r_f + r_f^2}{R_f(R_f + r_f)} \right] \\ &+ \frac{2\tau_i^\alpha}{\sin 2\alpha} \left[ \frac{1}{1+t} \ln \frac{R_0 + R_0 t - R_f t + r_f}{R_f - r_f} \right. \\ &\left. + \frac{1}{1-t} \ln \frac{R_0 + R_0 t - R_f t + r_f}{R_f - r_f} \right] \\ &+ \frac{2\tau_i^\beta}{\sin 2\beta} \left[ \frac{-1}{1+t} \ln \frac{R_f t - r_f + r_0 + r_0 t}{(R_f - r_f)t} \right. \\ &\left. + \frac{1}{1-t} \ln \frac{R_f t - r_f + r_0 + r_0 t}{(R_f - r_f)t} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$x = \frac{d\varepsilon_\theta}{d\varepsilon_1} = \ln \frac{R_f + r_f}{R_0 + r_0} / \ln \frac{R_0^2 - r_0^2}{R_f^2 - r_f^2} \quad (8)$$

جدول ۳) پارامترهای جانسون کوک.

| خواص      | B   | n    | C    | A   |
|-----------|-----|------|------|-----|
| فولاد ۴۱۰ | ۷۵۰ | ۰/۳۹ | ۰/۰۲ | ۴۶۹ |

### ۲-۲- تعیین نیروی کشش

برای اندازه‌گیری نیروی کشش واقعی از روابط حاکم بر راندمان خروجی جعبه‌دنده موتور دستگاه استفاده شد. به طوریکه:

$$P = F \cdot \dot{\theta} \quad (1)$$

$$P = V \cdot I \cos \varphi \quad F \cdot \dot{\theta} = V \cdot I \cos \varphi \quad F_n = \frac{V \cdot I \cos \varphi}{\dot{\theta}}$$

در اینجا  $F_n$  نیروی نامی کشش، توان موتور بر حسب وات، F نیرو بر حسب نیوتن،  $\dot{\theta}$  سرعت بر حسب متر بر ثانیه، V ولتاژ اعمالی به موتور بر حسب ولت، I شدت جریان بر حسب آمپر است. مطابق پلاک موتور ضریب توان آن ( $\cos \varphi$ ) نیز برابر با ۰/۸ می‌باشد. با توجه به کاهش گشتاور موتور بدلیل اصطکاک موجود بین a زوج چرخنده در جعبه دنده کاهنده، نیروی کشش در خروجی جعبه دنده (جایی که فک‌ها را به حرکت درمی‌آورد) برابر است با:

$$F_T = 0.97^a F_n \quad (2)$$

در رابطه بالا a تعداد جفت چرخنده‌های درگیر در جعبه‌دنده و ۰/۹۷ بازده انتقال گشتاور در یک زوج چرخنده است. مطابق رابطه ۱ با داشتن شدت جریان I و ولتاژ موتور V حین کشش و  $\dot{\theta}$  سرعت حرکت فک‌ها، نیروی کشش نامی  $F_n$  محاسبه خواهد شد. رابطه ۲ نیز مقدار نهایی نیرو  $F_T$  را خواهد داد.

### ۳- شبیه‌سازی المان محدود

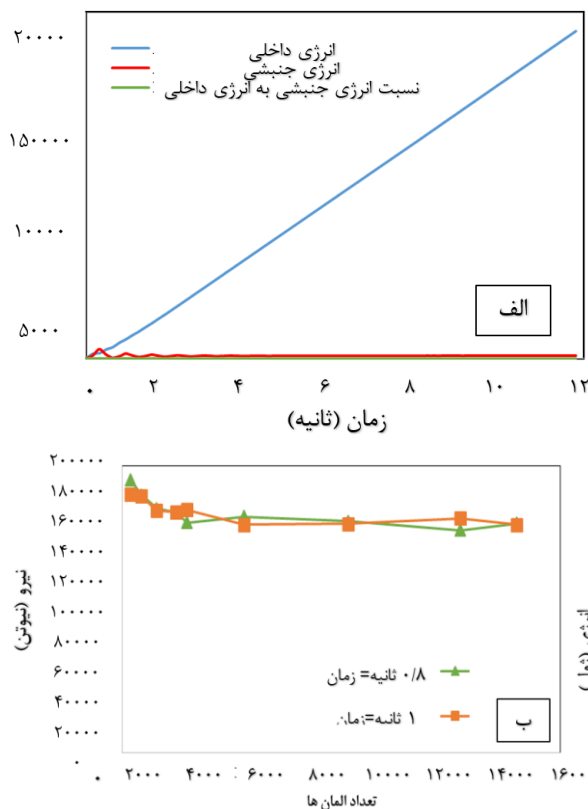
شبیه‌سازی فرآیند کشش لوله با نرم افزار آباکوس انجام شد. لوله مطابق نمونه واقعی با طول ۲۰۰ میلی‌متر به صورت انعطاف پذیر با المان ۴XRT مدل‌سازی شد. قالب و پلاگ به صورت صلب فرض شدند. قالب با زوایای ۲۴، ۲۸ و ۳۲ درجه و طول ناحیه درگیر ۵ میلی‌متر و پلاگ بطور استوانه‌ای مدل گردید. در شکل ۳ مدل طراحی شده نشان داده شده است. در شبیه‌سازی، رفتار مواد از نوع همسانگرد انتخاب شد. سر لوله از میان قالب عبور داده شد و تویی در وسط لوله قرار گرفت. برای کاهش زمان حل این پدیده شبه استاتیکی با حلگر اکیلیسیپت مقیاس دهی به جرم برابر با ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. طی شبیه‌سازی با شروع فرآیند کشش، فک‌ها به اندازه ۰/۲ متر جابجا شدند. جهت تعیین خواص ماده از نتایج تست کشش استفاده شد و با توجه به تایید خواص اصلی تست، رفتار ماده حین فرآیند کشش مطابق با رابطه جانسون کوک تعریف گردید [10].

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = [A + B(\varepsilon_p)^n][1 + C \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)][1 - (T^*)^m] \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_p^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

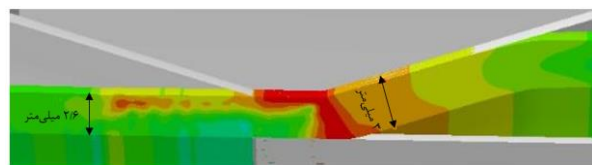
در این رابطه  $\varepsilon_p$  کرنش معادل پلاستیک،  $\dot{\varepsilon}_p$  نرخ کرنش پلاستیک، A، B، C، n و m نیز ثوابت ماده هستند.  $\dot{\varepsilon}_p^*$  و  $T^*$  به ترتیب نرخ کرنش و دمای همگن شده هستند که از رابطه ۴ و ۵ به دست



شکل ۴ (الف) نمودار تغییرات انرژی مدل جهت اعتبارسنجی مدل ارایه شده. (ب) تغییرات نیرو بر حسب تعداد المان‌ها.

در شکل ۵ همان‌گونه که ملاحظه می‌شود قطر خارجی و داخلی و ضخامت لوله پس از کشش کاهش یافته است. به طوریکه قبل از کشش ضخامت اولیه ۳ میلی‌متر پس از عبور لوله از قالب به ۲/۶ میلی‌متر رسیده‌است. نوع تغییر شکل ایجاد شده باعث اعمال تنش‌های کششی در سطح خارجی لوله و تنش‌های فشاری در سطح داخلی لوله شده است. بیشترین تنش کششی در ناحیه تکیه‌گاه قالب، که بیشترین اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک را به لوله اعمال می‌کند، اتفاق افتاده است.

در زاویه‌های متفاوت قالب ۲۴، ۲۸، ۳۲ درجه نیروی کشش با روش آنالیز تختال، FEM و تحلیل کران بالا بدست آمده و مقایسه شدند. نمودار ۶ (الف) و (ب) به ترتیب با استفاده از روش آنالیز تختال (رابطه ۹) و کران بالا (رابطه ۷) نیم زاویه بهینه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار کمترین کشش متناظر با زاویه حدود ۳۲ درجه بدست آمد که مقدار بهینه اصطکاک و تغییر شکل اضافی را فرآیند کشش نشان می‌دهد. بدلیل شکل استوانه‌ای توپی



شکل ۵ ضخامت قبل و بعد از کشش مرحله اول

در اینجا  $x$  تغییرات کرنش محیطی به کرنش محوری است.  $R_0$  شعاع خارجی اولیه،  $R_f$  شعاع خارجی نهایی،  $r_0$  شعاع داخلی اولیه،  $r_f$  شعاع داخلی نهایی است.  $\tau_i^a = m^a k$  و  $\tau_i^b = m^b k$  به علاوه  $t = \tan \beta / \tan \alpha$  می‌باشد. با توجه به استوانه‌ای بودن توپی از اثر توپی چشم‌پوشی می‌شود  $\tau_i^b = 0$ . با استفاده از آنالیز تختال (رابطه ۹) به عنوان یک روش کران پایین، کمترین تنش کششی مورد نیاز پیش‌بینی شد. در حالت آنالیز تختال  $B$  با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۱۰) بدلیل استفاده از پلاگ استوانه‌ای نیز  $\beta = 0$  در نظر گرفته می‌شود.

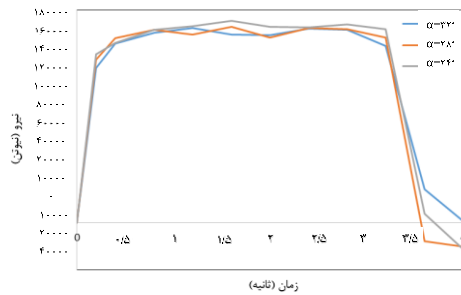
$$\frac{\sigma_d}{2k} = \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{t_f}{t_0} \right)^B \right] \quad (9)$$

$$B = \frac{\mu_1 + \mu_2}{t g \alpha - t g \beta} \quad (10)$$

در رابطه ۹ و ۱۰،  $\sigma_d$  تنش کششی است و مقدار  $k$  از رابطه  $2k = 10/1 \sigma_y$  به دست می‌آید.  $B$  اثر ضریب اصطکاک نیم زاویه قالب و توپی،  $t_f$  ضخامت لوله پس از کشش،  $t_0$  ضخامت اولیه لوله هستند.  $\mu_1$  ضریب اصطکاک بین قالب و لوله،  $\mu_2$  ضریب اصطکاک بین توپی و لوله است.  $\alpha$  نیز نیم زاویه قالب و  $\beta$  نیم زاویه توپی می‌باشد [12].

### ۳-۲- شبیه سازی

نمای کلی مدل شبیه‌سازی شده از مرحله اول فرآیند کشش سرد در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این چیدمان سر لوله درون قالب و توپی درون لوله قرار گرفته و جانمایی شده و برای حل از حلگر اکسپلیسیت دینامیکی استفاده شده است. توپی در محل خود حرکت طولی نداشته و ثابت می‌ماند. لوله در بازه زمانی تحت سرعت ثابت ۵ متر بر دقیقه به سمت جلو کشیده می‌شود. به منظور اطمینان از روند مقیاس دهی جرمی در شبیه‌سازی‌ها از روند پیشنهاد شده توسط نرم افزار استفاده شده است. شکل ۴ (الف) نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی را برای مدل مذکور نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که نسبت (انرژی داخلی/ انرژی جنبشی) پس از گذشت مدت زمان بسیار کمی تقریباً برابر با صفر می‌شود. از طرفی این مقدار در طول مدت زمان باقیمانده فرآیند نیز ثابت و پایدار باقی مانده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار انرژی جنبشی بسیار کمتر از انرژی داخلی (کمتر از ۱ درصد) است. بنابراین نتایج حاصل مقیاس دهی جرمی دارای اعتبار کافی است. شکل ۴ (ب) تغییرات نیرو نسبت به تعداد المان‌های به کار رفته در مدل را نشان می‌دهد، با افزایش تعداد المان‌ها نیرو به تدریج کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد المان از حدود ۴۰۰۰ المان شبکه بندی شده در مدل نیرو همگرا شده که نشان می‌دهد می‌توان دقت مدل ارایه شده را قابل قبول دانست. اگرچه به منظور اعتبارسنجی مدل ارایه شده از مقایسه نتایج با آزمون‌های عملی نیز استفاده شده است.



شکل ۷) تغییرات نیرو حین فرآیند کشش سرد در سه زاویه مختلف.

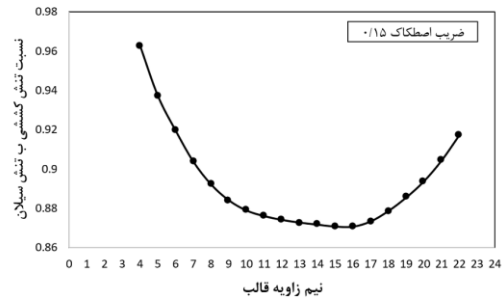
پایان کاهش میابد. در زاویه ۳۲ درجه نیرو صرف غلبه بر اصطکاک و تغییر شکل اضافی می‌گردد. در این حالت کمترین مقدار نیرو برای تغییر شکل لازم است، همانطور که در بررسی‌های صورت گرفته توسط درزت و همکاران [2] پالنگات و همکاران [4] و بوتنل و همکاران [5] نتایج مشابهی به دست آمده است. در قالب با زاویه کمتر با افزایش اصطکاک بین سطح خارجی لوله با قالب و سطح داخلی با توپی نیروی کشش افزایش می‌یابد به طوریکه در زاویه قالب ۲۴ درجه به بیشترین نیرو برای کشش نیاز است. از طرفی با افزایش زاویه قالب به دلیل افزایش میزان کار اضافی و تغییر شکل برشی ماده نیروی کشش افزایش می‌یابد. در این حالت اثر اصطکاک روی نیروی کشش کمتر است. با توجه به نتایج بدست آمده در زاویه قالب ۳۲ درجه روش FEM پیش‌بینی خوبی از نیروی کشش را نشان می‌دهد. نیروی بدست آمده از شبیه‌سازی مقداری بالاتر از آنالیز تختال و پابینتر از روش است که نشان می‌دهد حدود نیرو درست پیش‌بینی شده است. آنالیز تختال بدلیل در نظر نگرفتن پارامترهای کارسختی نیروی کمتری را پیش‌بینی کرده است.

شکل ۸ لوله‌های کشش شده را نشان می‌دهد. نیروی عملی با استفاده از میانگین شدت جریان عبوری حین کشش (شکل ۹) و همچنین استفاده از رابطه ۱ و ۲ بدست می‌آید، به طوریکه به ازای زاویه ۳۲ درجه، و میانگین شدت جریان عبوری حین کشش برابر ۴۹ آمپر، ولتاژ ۳۸۰ ولت، سرعت عملی کشش لوله ۰/۸ متر بر ثانیه به دست می‌آید. در نهایت با توجه به دو جفت چرخ دنده درگیر در جعبه دنده نیروی کشش حدود ۱۷۵۱۹۵ نیوتن بدست آمد.

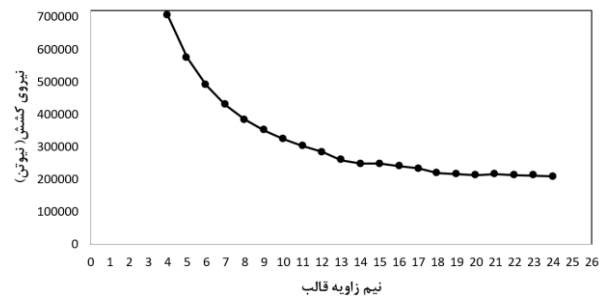
$$F_T = \frac{380 \cdot (49) \cdot (8/0)}{0.8/0} \cdot (97/0)^2 = 175195 \text{ نیوتن}$$



شکل ۸) لوله‌های کشش شده



شکل ۶) (الف) تغییرات نسبت تنش کششی به مقدار متوسط تنش سیلان بر حسب زاویه قالب در تحلیل آنالیز تختال (تأثیر اصطکاک و کار اضافی)



شکل ۶) (ب) تغییرات نسبت تنش کششی به مقدار متوسط تنش سیلان بر حسب نیم زاویه قالب در تحلیل کران بالا.

در  $\beta=0$  در نظر گرفته شد. کمترین مقدار نیروی کشش را در زاویه ۳۲ درجه برای فرآیند پیش‌بینی می‌کند. نیروی کشش مطابق آنالیز تختال برای زاویه ۲۴ و ۲۸ و ۳۲ به ترتیب ۷۶۰۷۷ و ۷۱۵۹۳ و ۶۸۰۰۴ نیوتن محاسبه شد. در زاویه قالب کمتر از ۳۲ درجه به دلیل سطح تماس بیشتر قالب با لوله اصطکاک بیشتری ایجاد شده است که عامل افزایش نیروی کشش است.

در رابطه کران بالا  $\tau_1^0 = 0$  در نظر گرفته شد. با استفاده از تحلیل کران بالا رابطه (۷) مقدار نیرو برای زاویه ۳۲ درجه نیرو حدود ۲۴۵۰۰۰ نیوتن بدست آمد. در این زاویه کمترین مقدار نیروی کشش بدست آمده است. اختلاف نیروی بدست آمده در تحلیل کران بالا و آنالیز تختال بدلیل در نظر گرفتن اثر تنش‌های برشی در تحلیل کران بالا است، در حالیکه در تحلیل آنالیز تختال از این تنش‌ها صرف نظر شده است.

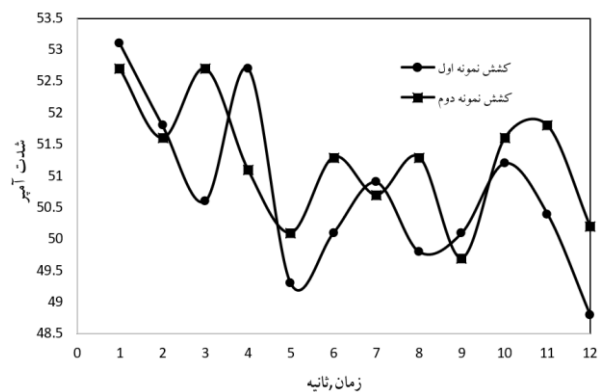
شکل ۷ نیروی کشش پیش‌بینی شده توسط FEM در سه نیم‌زاویه قالب مختلف را نشان می‌دهد. در ابتدا کشش نیرو افزایش پیدا کرده سپس در حین فرآیند به صورت پایدار نوسان می‌کند و در پایان فرآیند نیرو کاهش میابد. مطابق انتظار با توجه به نتایج بدست آمده از محاسبات روش کران بالا و آنالیز تختال، کمترین نیروی کشش در زاویه قالب ۳۲ درجه حدود ۱۶۴۵۹۳ نیوتن بدست آمد. برای زاویه‌های ۲۴ و ۲۸ درجه نیرو به ترتیب ۱۶۸۸۲۲ و ۱۶۵۰۱۰ نیوتن بدست آمد. تغییرات نیروی کشش نشان داد در ابتدا شروع تغییر شکل به دلیل اثر اصطکاک و کار سختی اولیه ماده، نیرو افزایش یافته در ادامه به یک حالت پایدار رسیده و در

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده مسئول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

- 1- Dieter GE, Kuhn HA, Semiatin SL, editors. Handbook of workability and process design. ASM international; 2003.
- 2- Chobaut N, Drezet JM, Mischler S, Nguyen V, De Marco B, Dobler S, Rosset E. Miniaturized tube fixed plug drawing: Determination of the friction coefficients and drawing limit of 316 LVM stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 2019; 263:396-407.
- 3- Linardon C, Favier D, Chagnon G, Gruez B. A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria. Journal of Materials Processing Technology. 2014;214(2):347-57.
- 4- Palengat M, Chagnon G, Favier D, Louche H, Linardon C, Plaideau C. Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis. International Journal of Mechanical Sciences. 2013; 70:69-78.
- 5- Boutenel F, Delhomme M, Velay V, Boman R. Finite element modelling of cold drawing for high-precision tubes. Comptes rendus mécanique. 2018 ;346(8):665-77.
- 6- Necpal M, Martinkovič M, Václav Š. Determination of the coefficient of friction under cold tube drawing using FEM simulation and drawing force measurement. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. 2018 ;26(42):29-34.
- 7- Gattmah J, Ozturk F, Orhan S. Effects of the semi die/plug angles on cold tube drawing with a fixed plug by FEM for AISI 1010 steel tube. In4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Turkey 2016 (Vol. 1065, p. 1074).
- 8- Béland JF, Fafard M, Rahem A, D'Amours G, Cote T. Optimization on the cold drawing process of 6063 aluminium tubes. Applied Mathematical Modelling. 2011;35(11):5302-13.
- 9- Casellas D, Nagl MM, Llanes L, Anglada M. Fracture toughness of alumina and ZTA ceramics: microstructural coarsening effects. Journal of materials processing technology. 2003;143:148-52.
- 10- Johnson GR. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics. 1983:541-7.
- 11- Limbadri K, Krishnamurthy HN, Ram AM, Saibaba N, Rao VK, Murthy JN, Gupta AK, Singh SK. Development of Johnson cook model for Zircaloy-4 with low oxygen content. Materials Today: Proceedings. 2017;4(2):966-74.
- 12- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge university press; 2011.



شکل ۹) تغییرات شدت جریان حین کشش لوله.

نیروی کشش پیش بینی شده مطابقت خوبی با نیروی کشش واقعی نشان می‌دهد. اختلاف نیروی کشش پیش بینی شده در تحلیل با نیروی واقعی کمتر از ۷ درصد می‌باشد. با توجه به تغییر پارامترهای نیرو در حالت عملی این اختلاف قابل قبول می‌باشد. بدین ترتیب FEM پیش بینی مناسبی از نیروی کشش مورد نیاز انجام داده است. با تغییر نوع روانکار به اگزالات و صابون، لوله‌ها بدون هیچ مشکلی کشیده شدند. ولی در حالت کشش با روغن اصطکاک شدیدی ایجاد گردید که موجب پاره شدن نمونه‌ها گردید.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی و پیش‌بینی نیروی کشش در فرآیند کشش لوله‌های فولاد زنگ نزن ۴۱۰ با تویی ثابت به کمک شبیه‌سازی، تحلیل‌های کران بالا و آنالیز تختال و آزمایش عملی انجام شد. همچنین پارامترهای مهم فرآیند مانند ضریب اصطکاک و زاویه قالب بهینه تعیین شدند. با توجه به آن نتایج زیر به طور خلاصه بدست آمد:

- فرآیند کشش نمونه‌ها با روانکار اگزالات و صابون با موفقیت انجام شد، به طوریکه با تغییر روانکار فرآیند با افزایش اصطکاک همراه بود. کمترین مقدار ضریب اصطکاک فرآیند با روانکار اگزالات و صابون به کمک تست فشار حلقه ۰/۱۵ بدست آمد.
- کمترین مقدار نیروی مورد نیاز کشش در نیم زاویه قالب ۳۲ بدست آمد. هر گونه انحراف از این زاویه افزایش مقدار نیرو را نشان می‌دهد. با توجه به آن مقدار نیروی پیش‌بینی شده در تحلیل‌های آنالیز تختال برابر ۶۸۰۰۴ نیوتن و کران بالا ۲۴۵۰۰۰ نیوتن محاسبه شد. پیش‌بینی نیرو با شبیه‌سازی با موفقیت انجام شد و مقدار آن ۱۶۴۵۹۳ نیوتن بدست آمد. در آزمایش عملی ۱۷۵۱۹۵ نیوتن بدست آمد. نیروی کشش پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی مطابقت خوبی با نیروی کشش واقعی نشان می‌دهد. به طوریکه نیروی شبیه‌سازی و عملی اختلاف کمتر از ۷٪ را نشان دادند.

- 13- Avitzur, B., Van Tyne, C.J., 1982. Ring forming: An upper bound approach, J. Eng. Ind. Trans. ASME, 104, 231-252.