مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 203-209

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی پارامترهای فرآیند کشش لوله با توپی ثابت برمبنای ارائه روش قاچی اصلاح‌شده و صحه‌گذاری به روش المان‌محدود

ابراهیم پناه‌پوری[1]، علی پرویزی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 4563-11155، aliparvizi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 مهر 1395

پذیرش: 16 آذر 1395

ارائه در سایت: 19 دی 1395

کلید واژگان:

کشش لوله

روش قاچی

کرنش صفحه‌ای

روش المان‌محدود

توزیع خطی تنش

چکیده

کاربردهای فراوان فرآیند کشش لوله از جمله ساخت ابزارهای پزشکی، باعث شده که مطالعه‌ی جنبه‌های مختلف این فرآیند در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، با در نظر گرفتن تنش‌های برشی و توزیع خطی تنش کششی در المان‌های ناحیه‌ی تغییر شکل برای اولین بار، حل تحلیلی برمبنای روش قاچی، برای فرآیند کشش لوله‌ی جدارنازک با وجود توپی ثابت، ارائه شده است. در استخراج معادلات، فشار خارجی درسطح قالب، با فشار داخلی در سطح توپی، متفاوت لحاظ شده است. با توجه به جدار نازک بودن لوله، شرایط کرنش صفحه‌ای برای مسئله در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور ارزیابی دقت نتایج تحلیلی، تحلیل المان محدود فرآیند کشش لوله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهند که میزان تنش کششی مورد نیاز برای کشش لوله با افزایش زاویه‌ی قالب کاهش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن توزیع خطی تنش در جداره‌ی لوله، میزان تنش کششی از سطح داخلی تا سطح خارجی لوله کاهش می‌یابد. به‌علاوه مشاهده می‌شود که فشار در سطح تماس لوله و قالب، بیشتر از فشار در سطح تماس لوله و توپی بوده و اختلاف فشار در این دو سطح، با افزایش زاویه‌ی قالب، افزایش می‌یابد. حل بسته‌ی ارائه شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سودمند در صنایع، جهت محاسبه‌ی تنش کششی لازم برای انجام فرآیند کشش لوله با توپی ثابت، مورد استفاده قرار گیرد.

Investigation of tube drawing with fixed plug process parameters through presenting a modified slab analysis with finite element verification

Ebrahim Panahpoori, Ali Parvizi*

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 11155-4563, Tehran, Iran, aliparvizi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 October 2016
Accepted 06 December 2016
Available Online 08 January 2017

Keywords:
Tube drawing
Slab method
Plane strain
FEM
Linear stress distribution

ABSTRACT

Different applications of thin-walled tube drawing process, especially in case of manufacturing the medical apparatuses has caused different aspects of this process to be investigated by many researchers. In this paper, considering the shear stress as well as the linear variation of normal stress in elements located in the deforming zone, an analytical solution based on the slab method is presented for tube drawing process with a fixed plug. The pressure on the die surface is assumed to be different from that on the plug surface. Moreover, taking into account a thin-walled pipe, the plain strain condition is applied to the process. In order to verify the accuracy of analytical solution, the process is wholly simulated using ABAQUS/Explicit software. The results show that the drawing stress can be decreased through increasing the die angle or decreasing the plug angle. Moreover, the drawing stress decreases from inner surface of the wall toward the outer surface. In addition, the pressure on die-tube interface is more than that on the plug-tube interface, while the difference of these pressures is increased for greater die angle. The present closed form solution can be utilized as an efficient tool in the related industries to calculate the required tension stress in tube drawing process.

1- مقدمه

یکی از فرآیندهای تولید لوله، کشش لوله است که به‌صورت گسترده، برای تولید لوله‌های بدون درز مورد استفاده قرار می‌گیرد. عموما تولید لوله برای کاربردهای حساس و دقیق، از طریق کشش سرد انجام می‌شود. این فرآیند در ساخت ابزارهای پزشکی نظیر لوله‌های آنژیوگرافی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت ابعادی بالا و کیفیت بالای سطوح داخلی و خارجی لوله که در ابزارهای پزشکی موردنیاز است، با این روش برآورده می‌شوند. روش‌های اصلی و متداول کشش لوله، شامل کشش لوله بدون توپی، با توپی ثابت، با توپی شناور و کشش لوله با ماندرل متحرک است. در کشش لوله با توپی ثابت، که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، لوله‌ی اولیه با قرارگیری روی سمبه‌ی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Panahpoori, A. Parvizi, Investigation of tube drawing with fixed plug process parameters through presenting a modified slab analysis with finite element verification, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 203-209, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

ثابت، از داخل یک قالب کشیده شده و موجب کاهش قطر و ضخامت جداره‌ی لوله می‌شود.

برای مطالعه‌ی فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک، از روش‌هایی نظیر قاچی[1]، روش کران بالا[2] و روش اجزای محدود[3] استفاده می‌شود. اولین تحقیقات در مورد فرآیند کشش لوله، با بررسی توزیع تنش و سیلان ماده، توسط زیبل و وبر [1] در سال 1935 میلادی انجام شد. سویاتکوفسکی و همکاران [2] به مطالعه‌ی فرآیند کشش لوله‌ی جدار نازک با توپی شناور پرداختند. بررسی فرآیند کشش لوله‌های آلومینیومی با ضخامت متغیر در جداره، توسط بوی و همکاران [3] انجام شد. کوان [4] به تحلیل و بررسی میدان سرعت در فرآیند کشش لوله در قالب و توپی‌هایی با شکل دلخواه پرداخت. رابیو و همکاران [5] در سال 2006، از طریق روش انرژی، فرآیند کشش را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نوس و همکارانش [6]، مطالعه‌ی عددی و تجربی فرآیند کشش لوله با توپی ثابت را انجام دادند. ارزیابی فرآیند کشش لوله‌های جدارنازک فولادی از طریق آزمایش و روش اجزای محدود توسط پالنگات و همکاران [7] انجام شد. رابیو و همکاران [8] تحلیل فرآیند کشش لوله با توپی ثابت مخروطی را انجام دادند. فانگ و همکاران [9] و یوشیدا و همکاران [10] به تحلیل فرآیند کشش لوله‌های ظریف با کاربردهای پزشکی پرداختند. لی [11] شبیه‌سازی کشش محوری لوله را از طریق روش اجزای محدود انجام داد. شئو و همکاران [12] طراحی بهینه‌ی قالب، برای فرآیند کشش لوله‌ی یک مرحله‌ای را انجام دادند. لیناردون و همکاران [13] معیارهای شکست در کشش لوله را مورد ارزیابی قرار دادند.

در این مقاله، فرآیند کشش لوله‌ی جدارنازک ($h_i \ll D_{Ii}$)، در یک قالب مخروطی با توپی ثابت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای حل تحلیلی به روش قاچی، برای اولین بار توزیع تنش در جداره‌ی لوله را خطی و فشار درسطح قالب و توپی متفاوت در نظر گرفته شده که نوآوری این پژوهش می‌باشد. در طول فرآیند، ضرایب اصطکاک در سطح تماس با قالب و توپی متفاوت و از نوع Coulomb لحاظ شده است. به‌منظور بررسی صحت و دقت مدل و تحلیل قاچی ارائه شده، فرآیند با استفاده از نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس به‌صورت کامل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

2- حل تحلیلی با روش قاچی

2-1- هندسه‌ی مسئله

نمای کلی قالب، قطعه و توپی در "شکل 1" نمایش داده شده است. فرآیند کشش سرد بر روی یک لوله‌ی جدار نازک با توپی مخروطی شکل ثابت، صورت می‌گیرد. در این تحلیل، شکل قالب و توپی به صورت مخروطی بوده و در طی فرآیند کشش، قطر لوله تقریبا ثابت می‌ماند، اما ضخامت دیواره‌ی لوله کاهش می‌یابد. پارامترهای به‌کار رفته در تحلیل شامل موارد زیر هستند:

α زاویه‌ی قالب

β زاویه‌ی توپی

D_{Ii} قطر داخلی لوله در ابتدای فرآیند

D_{If} قطر داخلی لوله در انتهای فرآیند

μ_1 ضریب اصطکاک بین لوله و قالب

μ_2 ضریب اصطکاک بین لوله و توپی

h_i ضخامت ابتدایی جداره‌ی لوله

h_f ضخامت نهایی جداره‌ی لوله

r کاهش سطح مقطع

A_i مساحت اولیه‌ی سطح مقطع لوله

A_f مساحت نهایی سطح مقطع لوله

Y تنش تسلیم

P_1 فشار در سطح قالب

P_2 فشار درسطح توپی

S تنش تسلیم تحت شرایط کرنش صفحه‌ای

h ضخامت المان

$d\lambda$ ثابت قانون Levy-Mises

$d\varepsilon_\theta$ نمو کرنش محیطی

$d\varepsilon_1$ نمو کرنش در راستای x

$d\varepsilon_2$ نمو کرنش در راستای z

σ_1 تنش محوری در راستای z در جداره‌ی خارجی لوله

σ_2 تنش محوری در راستای z در جداره‌ی داخلی لوله

σ_{1P} تنش اصلی در راستای x

σ_{2P} تنش اصلی در راستای z

σ_{3P} تنش اصلی در راستای y

σ_{d1} تنش کششی در جداره‌ی خارجی لوله

σ_{d2} تنش کششی در جداره‌ی داخلی لوله

σ_d تنش کششی متوسط

برای کاهش سطح مقطع، رابطه‌ی (1) برقرار است:

$$r = \frac{A_i - A_f}{A_i} \tag{1}$$

با فرض این‌که ضخامت جداره در مقایسه با قطر لوله کم است، می‌توان رابطه‌ی کاهش سطح مقطع را ساده کرد:

$$h_i, h_f \ll D_{Ii} \approx D_{If} \approx D \tag{2}$$

رابطه‌ی کاهش سطح مقطع، پس از ساده‌سازی به‌صورت رابطه‌ی (3) در می‌آید.

$$r = \frac{h_i - h_f}{h_i} \tag{3}$$

رابطه‌ی (3) با فرض ضخامت کم جداره در مقایسه با قطر لوله به‌دست آمده است و برای لوله‌های جدار ضخیم صحیح نمی‌باشد.

2-2- شرایط حل مسئله

در این فرایند کشش لوله‌ی جدارنازک با فرض $h_i \ll D_{Ii}$ و $h_f \ll D_{If}$ انجام

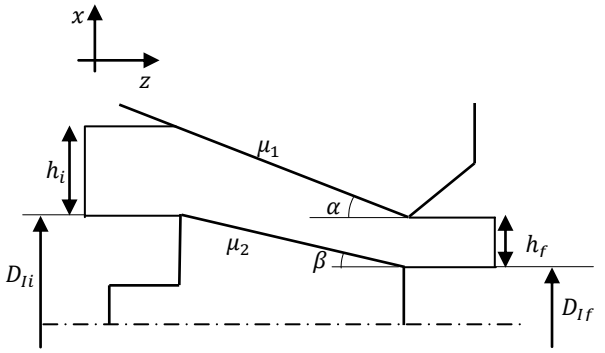


Fig. 1 Geometrical parameters of die, tube and plug

شکل 1 پارامترهای هندسی قالب، لوله و توپی

[1] Slab method
[2] Upper bound method
[3] Finite element method (FEM)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

می‌شود. با توجه به ناچیز بودن ضخامت جداره‌ی لوله در مقابل قطر آن و تغییر ناچیز در قطر لوله، ماده‌ای که بین قالب و توپی قرار گرفته در جهت طولی و شعاعی حرکت کرده و در جهت محیطی حرکت نمی‌کند. مطابق "شکل 1"، ماده در صفحه‌ی x-z باقی می‌ماند. بنابراین می‌توان شرایط تحلیل را به صورت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفت. در واقع کرنش در جهت محیطی ناچیز بوده و کرنش‌های موجود در دو جهت دیگر، در معیار تسلیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین مقدار کرنش در راستای محیطی برابر صفر در نظر گرفته شده و طبق قانون تراکم ناپذیری، که بیان‌کننده‌ی حجم ثابت در طول فرآیند تغییر شکل است، مقدار کرنش در دو راستای دیگر برابر و با علامت مخالف می‌باشند. این مطلب در روابط (4) و (5) نشان داده شده است:

$$d\varepsilon_\theta = 0 \tag{4}$$

$$d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 \tag{5}$$

تحت شرایط کرنش صفحه‌ای، طبق قانون Levy-Mises، می‌توان کرنش در راستای محیطی را به صورت رابطه‌ی (6) نوشت:

$$d\varepsilon_\theta = \frac{2}{3}d\lambda(\sigma_{3P} - \frac{1}{2}(\sigma_{1P} + \sigma_{2P})) \tag{6}$$

با صفر قرار دادن مقدار کرنش محیطی، مقدار تنش در راستای محیطی به صورت رابطه‌ی (7) حاصل می‌شود:

$$\sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_{1P} + \sigma_{2P}) \tag{7}$$

2-3- معادلات حاکم

برای حل تحلیلی مسئله به کمک روش قاچی، المانی در ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک در نظر گرفته و تحلیل نیرویی بر روی المان انجام می‌شود. سپس برای حل معادلات، با نوشتن روابط حاصل از معیارهای تسلیم برای المان مورد نظر، معادلات موردنیاز برای یافتن مجهولات به دست می‌آیند. المان مورد نظر در روش قاچی، در ناحیه‌ی تغییر شکل یافته به صورت "شکل 2" در نظر گرفته می‌شود. در این روش، ابتدا تعادل نیروها در دو راستای z و x نوشته می‌شوند. جهت محورهای x و z در "شکل 1" مشخص شده‌اند. فشار در سطح قالب و میزان تنش کششی در جداره‌ی داخلی لوله σ_2 و در جداره‌ی خارجی لوله σ_1 گرفته می‌شوند. بنابراین توزیع تنش در جداره به صورت خطی و از مقدار σ_1 تا σ_2 تغییر می‌کند. با توجه به وجود چهار مجهول P_1، P_2، σ_1 و σ_2، نیاز به چهار معادله‌ی مستقل وجود دارد. علاوه بر دو معادله‌ی تعادل، دو معادله‌ی دیگر از طریق نوشتن تسلیم در سطح خارجی و داخلی لوله به‌دست می‌آیند. نقاطی که تسلیم برای آن‌ها نوشته می‌شود، در "شکل 2" مشخص شده‌اند.

معیار Von Mises برای تسلیم در یک نقطه مطابق رابطه‌ی زیر است:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

شرایط بارگذاری در نقطه‌ی تسلیم یک در "شکل 3" نشان داده شده است.

با فرض ناچیز بودن تنش‌های برشی در مقایسه با فشار وارد بر قطعه و تنش کششی لوله، می‌توان فشار وارد بر قطعه را به‌عنوان تنش اصلی در راستای تنش دوم در نظر گرفت. در واقع به خاطر ناچیز بودن تنش‌های برشی، دایره Mohr در نقطه‌ی یک دچار تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌شود. بنابراین رابطه‌ی تسلیم فون مایزز در نقطه‌ی یک به صورت رابطه‌ی (9) ارائه می‌شود:

$$\sigma_1 + P_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = S \tag{9}$$

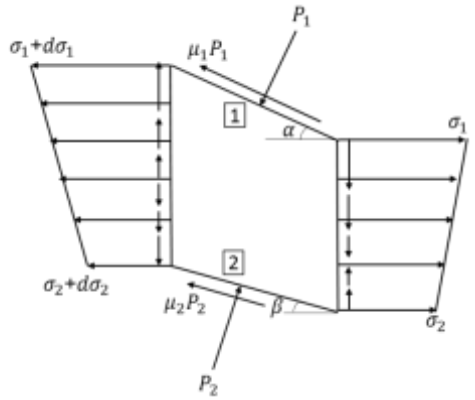


Fig. 2 The element in the slab method

شکل 2 المان در نظر گرفته شده در تحلیل قاچی

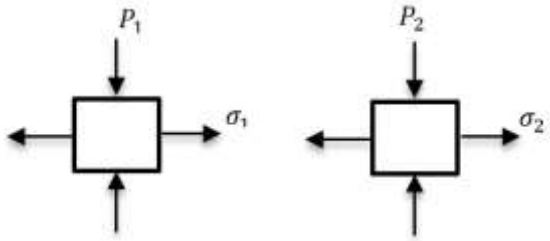


Fig. 3 Stress states at points 1 and 2

شکل 3 توزیع تنش بر روی المان‌های مستقر در نقاط 1 و 2

مشابه نقطه‌ی یک، تسلیم در نقطه‌ی دو از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_2 + P_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}Y = S \tag{10}$$

در پژوهش‌های قبلی، المان تحلیل قاچی، بدون در نظر گرفتن تنش‌های برشی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. مطابق "شکل 2" در این مقاله، تنش‌های برشی نیز در المان روش قاچی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به جهت نیروی اصطکاک در جداره‌ی خارجی و داخلی لوله، تنش برشی از گوشه‌ی بالایی المان تا گوشه‌ی پایینی آن از مقدار نیروی اصطکاک در سطح خارجی لوله، ابتدا کاهش یافته و به صفر رسیده و سپس تغییر علامت داده و با افزایش به مقدار نیروی اصطکاک در سطح داخلی لوله می‌رسد. برای نوشتن معادله‌ی تعادل نیروها در راستای عمودی باید توزیع تنش‌های برشی مشخص شوند. توزیع تنش برشی در جداره به صورت خطی در نظر گرفته شده که در نقطه‌ای روی جداره، تنش برشی به مقدار صفر رسیده و تغییر علامت می‌دهد.

برای نمایش بهتر، تنش برشی اعمال شده بر المان روش قاچی، در "شکل 4" در راستای افقی ترسیم شده است. مقدار تنش برشی از مقدار μ_1P_1 درسطح خارجی تا مقدار μ_2P_2 در سطح داخلی، در جهت ضخامت لوله تغییر می‌کند. این موضوع در "شکل 4" نشان داده شده است. دو توزیع نشان داده شده در "شکل 4" برای سمت‌های راست و چپ المان موجود در "شکل 2" ترسیم شده‌اند. بنابراین برای بدست آوردن توزیع خطی تنش برشی، با توجه به تشابه مثلث‌ها در هر یک از توزیع‌های تنش برشی در سمت راست و چپ المان قاچی مطابق "شکل 4"، توزیع تنش برشی بر حسب فشارهای P_1 و P_2 به‌دست می‌آید. در واقع با مشخص بودن مقدار تنش برشی در بالای توزیع که برابر μ_1P_1 و در پایین آن برابر μ_2P_2 است، توزیع خطی تنش برشی به‌دست می‌آید. ضخامتی از لوله که تنش برشی در آن به مقدار صفر رسیده و تغییر علامت می‌دهد، با مقادیر x و x' مشخص

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

شده‌اند:

$$x = \frac{\mu_2 P_2 h}{\mu_1 P_1 + \mu_2 P_2} \tag{11}$$

$$x' = \frac{\mu_2 P_2 (h + dh)}{\mu_1 P_1 + \mu_2 P_2} \tag{12}$$

معادله‌ی تعادل نیروها در راستای عمودی به‌صورت رابطه‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow -P_1 dz + P_2 dz + \mu_1 P_1 \tan\alpha\, dz + \mu_2 P_2 \tan\beta\, dz - \frac{1}{2}\mu_1 P_1 (h - x) + \frac{1}{2}\mu_2 P_2 x + \frac{1}{2}\mu_1 P_1 (h + dh - x') - \frac{1}{2}\mu_2 P_2 x' = 0 \tag{13}$$

با جایگذاری x و x' در رابطه‌ی (13) و ساده‌سازی، رابطه‌ی (14) حاصل می‌شود:

$$[(1 + \mu_2 \tan\beta) P_2 + (1 - \mu_1 \tan\alpha) P_1] dz = \frac{1}{2}(\mu_2 P_2 - \mu_1 P_1) \tag{14}$$

از طرفی با توجه به هندسه‌ی المان در نظر گرفته شده، رابطه‌ی (15) برقرار است.

$$dh = (\tan\alpha - \tan\beta) dz \tag{15}$$

با ساده‌سازی روابط (14) و (15)، رابطه‌ی بین فشار در سطح قالب و لوله با فشار در سطح توپی و لوله مطابق زیر به دست می‌آید:

$$P_2 = B P_1 \;\rightarrow\; B = \frac{1 - \frac{3}{2}\mu_1 \tan\alpha + \frac{1}{2}\mu_1 \tan\beta}{1 + \frac{3}{2}\mu_2 \tan\beta - \frac{1}{2}\mu_2 \tan\alpha} \tag{16}$$

با نوشتن تعادل در راستای افقی، رابطه‌ی (17) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right) h - \left(\frac{\sigma_1 + d\sigma_1 + \sigma_2 + d\sigma_2}{2}\right)(h + dh) - \mu_1 P_1 dz - \mu_2 P_2 dz - (P_1 \tan\alpha + P_2 \tan\beta) dz = 0 \tag{17}$$

با جایگذاری رابطه‌ی (16) در رابطه‌ی (10)، رابطه‌ی (18) حاصل می‌شود:

$$\sigma_2 + B P_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} Y = S \tag{18}$$

با قرار دادن رابطه‌ی (9) در (18)، ارتباط بین تنش کششی در سطح داخلی و خارجی لوله به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\sigma_2 = (1 - B) S + B \sigma_1 \tag{19}$$

با دیفرانسیل گرفتن از رابطه‌ی (19)، $d\sigma_2 = B d\sigma_1$، و با قرار دادن روابط (15)، (16) و (19) در رابطه‌ی (17)، معادله‌ی دیفرانسیل زیر به دست می‌آید.

$$(1 + B) \frac{d\sigma_1}{M\sigma_1 - NY} = \frac{dh}{h} \tag{20}$$

که در آن B از رابطه‌ی (16)، M و N برابر هستند با:

$$M = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} B + \frac{\mu_1 + \tan\alpha + B(\mu_2 - \tan\beta)}{\tan\alpha - \tan\beta} \tag{21}$$

$$N = M + 1 \tag{22}$$

در ورودی لوله به قالب، σ_1 برابر صفر و در خروجی لوله از قالب، σ_1 برابر σ_{d1} است. بنابراین شرایط مرزی برای حل معادله دیفرانسیل به صورت روابط (23) و (24) نوشته می‌شود:

$$h = h_i \;\rightarrow\; \sigma_1 = 0 \tag{23}$$

$$h = h_f \;\rightarrow\; \sigma_1 = \sigma_{d1} \tag{24}$$

با حل بسته‌ی انتگرال، تنش σ_{d1} در جداره‌ی لوله برابر است با:

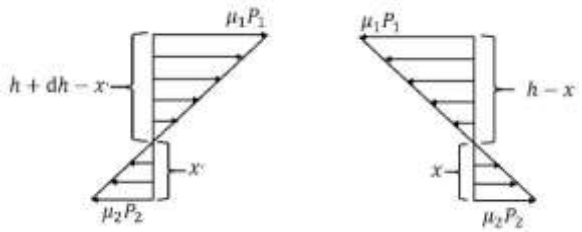


Fig. 4 Distribution of shear stress in the wall of tube

شکل 4 توزیع تنش برشی در جداره‌ی لوله

$$\frac{\sigma_{d1}}{S} = \frac{M + 1}{M}\left[1 - \left(\frac{h_f}{h_i}\right)^{\frac{M}{1+B}}\right] \tag{25}$$

همچنین بر اساس رابطه‌ی (20)، σ_{d2} برابر است با:

$$\frac{\sigma_{d2}}{S} = 1 - B + \frac{B(M + 1)}{M}\left[1 - \left(\frac{h_f}{h_i}\right)^{\frac{M}{1+B}}\right] \tag{26}$$

با توجه به خطی بودن توزیع تنش کششی در جداره لوله، تنش کششی متوسط در خروجی ناحیه تغییر شکل برابر می‌شود با:

$$\frac{\sigma_d}{S} = \frac{\sigma_{d1} + \sigma_{d2}}{2S} \tag{27}$$

لذا، میزان تنش کششی لازم برای انجام فرآیند کشش لوله با توپی ثابت برابر است با:

$$\frac{\sigma_d}{S} = \frac{1}{2}\left[1 - B + (B + 1)\frac{(M + 1)}{M}\left[1 - \left(\frac{h_f}{h_i}\right)^{\frac{M}{1+B}}\right]\right] \tag{28}$$

که B و M به ترتیب از روابط (18) و (21) به‌دست می‌آیند.

3- شبیه‌سازی المان محدود

برای بررسی نتایج حاصل از روش تحلیلی قاچی، مطابق "شکل 5"، شبیه‌سازی فرآیند کشش لوله در نرم‌افزار المان‌محدود آباکوس انجام شده است. شکل قالب، قطعه و توپی به‌صورت تقارن محوری در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی، قالب و توپی به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این‌که برای حل به روش قاچی، کار سختی در رفتار مواد در نظر گرفته نشده، برای امکان مقایسه‌ی صحیح نتایج تحلیلی و عددی، خواص ماده در نرم‌افزار آباکوس، بصورت الاستیک–پلاستیک ایده‌آل تعریف شده است. جنس ماده‌ی شبیه‌سازی شده فولاد S275 با تنش تسلیم 275 MPa در دمای 20 درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. از المان CAX4RT برای مش‌بندی لوله استفاده شده است. با فرض این‌که روان‌کاری در طول فرآیند دچار تغییر نمی‌شود، ضریب اصطکاک از نوع Coulomb و ثابت در نظر گرفته شده است.

در شبیه‌سازی برای هدایت صحیح ماده به داخل قالب، در ورودی و

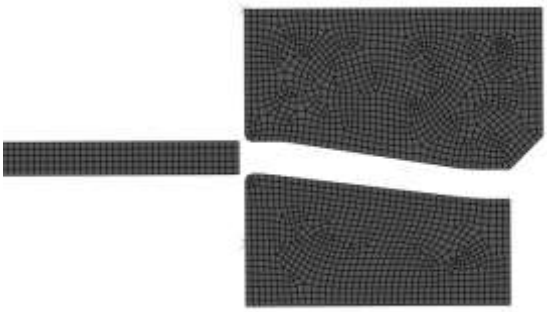


Fig. 5 Schematic of tube, die and plug in Abaqus

شکل 5 شکل کلی قالب، توپی و قطعه در آباکوس

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

خروجی قالب و توپی قسمت‌های با طول کوتاه در نظر گرفته شده‌اند. در روش قاچی، به‌علت طول کم این قسمت‌ها نسبت به طول کل قالب، در محاسبات لحاظ نشده‌اند. در قسمت شرایط مرزی، توپی و قالب ثابت نگه داشته می‌شوند و لوله با سرعت ثابت 5 میلی‌متر بر ثانیه از داخل قالب حرکت می‌کند. از آن‌جایی‌که با افزایش دما، خواص مکانیکی و بخصوص تنش تسلیم در فولاد کاهش می‌یابد، جهت لحاظ نمودن این اثر در محاسبات نرم‌افزار، از طریق گزینه‌ی اطلاعات وابسته به دما[1] در قسمت مشخصات[2] نرم‌افزار آباکوس[3]، خواص پلاستیک فولاد، وابسته به دما تعریف می‌شوند.

4- بحث و بررسی نتایج

4-1- نتایج تحلیل به روش قاچی

در این قسمت مجموعه‌ی نمودارهای حاصل از حل تحلیلی ارائه شده‌اند. نمودارهای مربوط به تنش کششی مطابق رابطه‌ی (28) رسم شده‌اند. در "شکل 6"، تنش‌های کششی درجداره‌ی داخلی و خارجی لوله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان تنش کششی در جداره‌ی داخلی لوله تا جداره‌ی خارجی، کاهش یافته و از مقدار σ_{d2} به σ_{d1} می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که با ثابت بودن اصطکاک در سطح قالب-لوله و توپی-لوله، با افزایش زاویه‌ی توپی، میزان نیروی مورد نیاز برای کشش افزایش می‌یابد. می‌توان گفت که با افزایش زاویه‌ی توپی، میزان اختلاف تنش کششی در جداره‌ی داخلی و خارجی لوله کاهش یافته و نیروی کشش با آهنگ بیشتری، افزایش خواهد یافت.

"شکل 7" نمودار تنش کششی را برحسب زاویه‌ی قالب نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی قالب، میزان تنش کششی کاهش می‌یابد. کاهش سطح تماس لوله و قالب یکی از دلایل این موضوع می‌باشد. در واقع با افزایش زاویه‌ی قالب و کاهش سطح تماس لوله و قالب، میزان کار نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد و منجربه کاهش نیروی کشش موردنیاز برای این فرآیند می‌شود.

نمودار "شکل 8" نشان‌دهنده‌ی میزان اختلاف فشار در سطح قالب و توپی است که مطابق رابطه‌ی (16) رسم شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش زاویه‌ی قالب و توپی، اختلاف فشار در دو سطح داخلی و

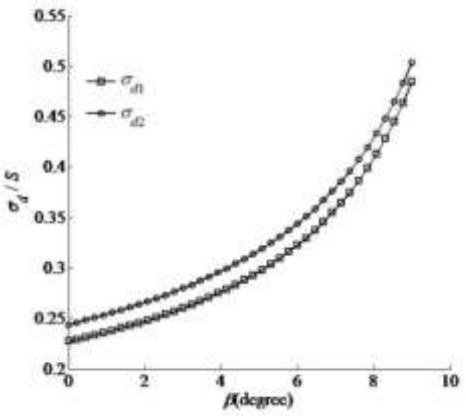


Fig. 6 Drawing stress at the inner and outer wall of the tube versus β, for $\alpha = 12°, r = 0.1,\ \mu_1 = \mu_2 = 0.1$

شکل 6 میزان تنش کششی در جداره‌ی داخلی و خارجی لوله برحسب زاویه‌ی توپی برای شرایط $\alpha = 12°,\ r = 0.1,\ \mu_1 = \mu_2 = 0.1$

[1] Temperature dependent data
[2] Property
[3] Abaqus

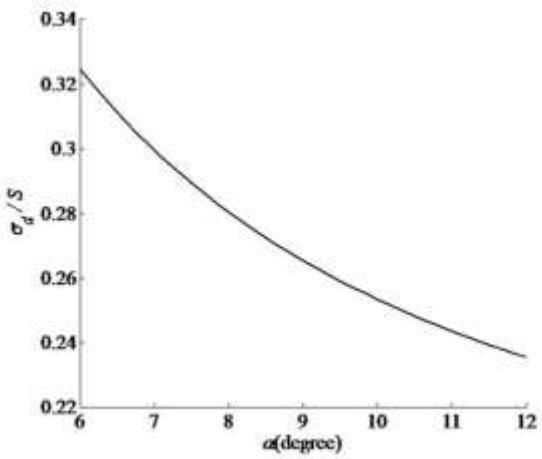


Fig. 7 Mean drawing stress in the tube versus α for $\beta = 0°, r = 0.1,$ $\mu_1 = \mu_2 = 0.1$

شکل 7 تنش کششی متوسط مورد نیاز برحسب زاویه‌ی قالب برای شرایط $\beta = 0°$، $r = 0.1,\ \mu_1 = \mu_2 = 0.1$

خارجی لوله کاهش می‌یابد. در واقع، با ثابت بودن زاویه‌ی توپی و افزایش زاویه‌ی قالب، افزایش شرایط عدم تقارن موجب افزایش فشار در سطح قالب شده و با افزایش P_1، کسر P_2/P_1 کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان فشار در سطح توپی و لوله کمتر از فشار در سطح قالب و لوله است.

نمودار تنش کششی برحسب زاویه‌ی قالب و به‌ازای کاهش سطح مقطع‌های مختلف در "شکل 9" رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی توپی، میزان کشش افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش زاویه‌ی توپی میزان تغییر شکل و در نتیجه میزان کرنش افزایش یافته و موجب می‌شود که نیروی بیشتری برای کشش لازم باشد. همچنین در این حالت، میزان کار اضافی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش میزان کاهش سطح مقطع نیز، میزان کشش افزایش یافته، که بدلیل افزایش میزان تغییر شکل در ماده، قابل انتظار است.

4-2- نتایج تحلیل به روش المان محدود

نمای دو بعدی و سه‌بعدی تغییر شکل پلاستیک لوله حاصل از شبیه‌سازی

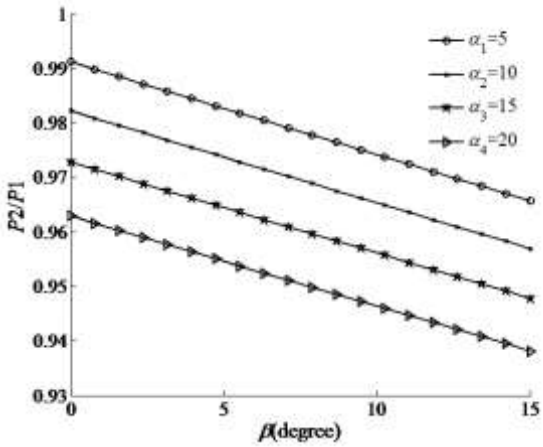


Fig. 8 Relationship between the pressures in the plug and in the die versus β for some of the die angle

شکل 8 نسبت فشار در سطح قالب و فشار در سطح توپی برحسب زاویه‌ی توپی به ازای 4 زاویه‌ی قالب

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

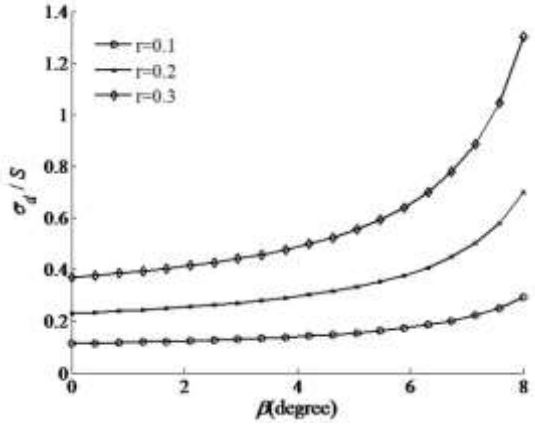
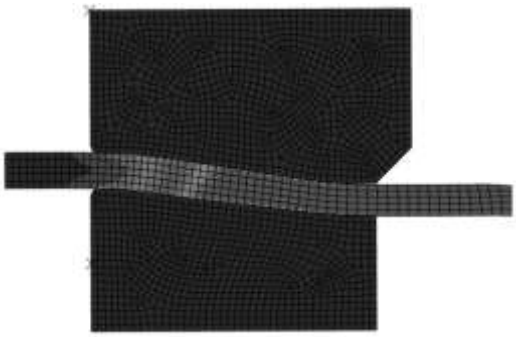


Fig. 9 Drawing stress in the tube versus plug angle for $\alpha = 10°, \mu_1 = 0.1, \mu_2 = 0.01$

شکل 9 تنش کششی لازم در خروجی لوله از قالب برحسب زاویه‌ی توپی برای شرایط $\alpha = 10°,\ \mu_1 = 0.1, \mu_2 = 0.01$

المان‌محدود فرآیند کشش لوله در نرم‌افزار آباکوس در "شکل 10" نشان داده شده است.

برای مقایسه‌ی نتایج حل تحلیلی و شبیه‌سازی، سه حالت مختلف در



(a) (الف)

(b) (ب)

Fig. 10 Plastic deformation contour of tube (a) 2D (b) 3D demonstration

شکل 10 تغییر شکل پلاستیک لوله در حین فرآیند کشش، نمایش (الف) دوبعدی (ب) سه بعدی

جدول 1 پارامترهای شبیه‌سازی

Table 1 Parameters in simulation

r	α	β	μ_1	μ_2	شماره شبیه‌سازی
0.2	7	9	0.15	0.15	1
0.125	7	9	0.08	0.08	2
0.33	7	9	0.08	0.08	3

جدول 2 مقایسه‌ی نتایج روش قاچی و المان‌محدود

Table 2 Comparison of results from slab and FEM methods

$\sigma_{d-\mathrm{slab}}$(MPa)	$\sigma_{d-\mathrm{FEM}}$(MPa)	شماره شبیه‌سازی
297	251.47	1
175.311	180.25	2
319.383	282.51	3

نظر گرفته شده است. شرایط انجام شبیه‌سازی در جدول 1 و مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و المان محدود در جدول 2 ارائه شده است. براساس نتایج به دست آمده، تطابق مناسبی بین نتایج تحلیلی و المان‌محدود وجود دارد. لذا، حل تحلیلی بسته ارائه شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب در صنایع مرتبط، در سریع‌ترین زمان ممکن میزان تنش کششی موردنیاز برای انجام فرآیند کشش لوله با توپی ثابت را مشخص نماید.

5- نتیجه‌گیری

نتایج کلی تحلیلی و عددی مرتبط با فرآیند کشش لوله‌ی جدار نازک با توپی ثابت به شرح زیر می‌باشند:

- میزان تنش کششی موردنیاز در فرآیند کشش لوله با افزایش زاویه‌ی قالب، کاهش می‌یابد.
- میزان تنش کششی موردنیاز در فرآیند کشش لوله با افزایش زاویه‌ی توپی و افزایش میزان کاهش سطح مقطع، افزایش می‌یابد.
- توزیع تنش کششی در جداره‌ی لوله از سطح داخلی تا سطح خارجی لوله کاهش می‌یابد.
- فشار در سطح قالب و لوله بیشتر از فشار در سطح توپی و لوله بوده و با افزایش زاویه‌ی قالب و توپی، میزان اختلاف فشار در این سطوح افزایش می‌یابد.
- تنش برشی در جداره‌ی لوله از سطح داخلی لوله تا سطح خارجی آن، به مقدار صفر رسیده و تغییر علامت می‌دهد.

6- مراجع

[1] E. Siebel, E. Weber, Stresses and metal flow in drawing tube, *Stahl Eisen* 55, 1935.

[2] K. Światkowski, R. Hatalak, Study of the new floating-plug drawing process of thin-walled tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1 pp. 105-114, 2004.

[3] Q. H. Bui, R. Bihamta, M. Guillot, G. D'Amours, A. Rahem, M. Fafard Investigation of the formability limit of aluminum tubes drawn with variable wall thickness, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 3, pp.402-414, 2011.

[4] C.T. Kwan, A generalized velocity field for axisymmetric tube drawing through an arbitrarily curved die with an arbitrarily curved plug, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, No. 2 pp. 213-219, 2002.

[5] E. M. Rubio, C. González, M. Marcos, M.A. Sebastián, Energetic analysis of tube drawing processes with fixed plug by upper bound method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 175-178, 2006.

[6] F. O. Neves, S. T. Button, C. Caminaga, F. C. Gentile, Numerical and experimental analysis of tube drawing with fixed plug, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 27, No. 4 pp. 426-431, 2005.

[7] M. Palengat, G. Chagnon, D. Favier, H. Louche, C. Linardon, C. Plaideau. Cold drawing of 316l stainless steel thin-walled tubes: experiments and finite element analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.70, pp. 69-78, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]

[8] E. M. Rubio, Analytical methods application to the study of tube drawing processes with fixed conical inner plug: Slab and upper bound methods, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 14, No. 1-2, pp. 119-130, 2006.

[9] G. Fang, W.J. Ai, S. Leeflang, J. Duszczyk, J. Zhou, Multipass cold drawing of magnesium alloy minitubes for biodegradable vascular stents, *Materials Science and Engineering*, Vol. 33, No. 6 pp. 3481-3488, 2013.

[10] K. Yoshida, M. Watanabe, H. Ishikawa, Drawing of Ni–Ti shape-memory-alloy fine tubes used in medical tests, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, No. 1 pp. 251-255, 2001.

[11] M. Li, Z. Sunb, M. Lia, H. Yangb, FEM numerical simulation of tube axial drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160, No. 3 pp. 396-400, 2005.

[12] J.J. Sheu, S.Y. Lin, C.H. Yu, Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 688-693, 2014.

[13] C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez, A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 347-357, 2014.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.11.1]