Archive of SID

مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر 1398، دوره 6، شماره 4، ص‌ص. 14-22

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی عیب تورفتگی ایجاد شده در شکل‌دهی غلتکی مجدد لوله‌های گرد به چهارگوش

علی تاجیار

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هنر اصفهان، گروه طراحی صنعتی، اصفهان

اصفهان، صندوق پستی 1744، a.tajyar@aui.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آذر 1397

پذیرش: 27 بهمن 1397

ارائه در سایت: شهریور 1398

کلیدواژگان:

شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد

عیب تورفتگی

روش اجزاء محدود

لوله چهارگوش

چکیده

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای تولید لوله‌های چهارگوش بوسیله فرایندهای شکل‌دهی مجدد ارائه گردیده است. به طور عمده انتظار می‌رود که شکل دادن یک لوله مربعی برای استفاده صنعتی بدون عیب باشد، که این موضوع باید در مرحله طراحی و قبل از شروع آزمایشات عملی، بررسی شود. در این مقاله تغییر شکل الاستیک-پلاستیک یک لوله گرد فلزی طی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد و تبدیل آن به لوله بدون عیب با مقطع مربعی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود اباکوس بررسی شده است. میزان شکل‌گیری عیب تورفتگی (پارامتر C) در قسمت تخت لوله چهارگوش در طول فرایند شکل‌دهی یکی از موارد مؤثر در کیفیت نهایی این لوله‌ها به حساب می‌آید. بر این اساس، در این تحلیل اثر پارامترهای مختلف فرایند مانند نسبت هندسی، مقدار کاهش ارتفاع، ضریب اصطکاک، شعاع غلتک و جنس لوله‌ها بر روی میزان رخ دادن عیب تورفتگی در فرایند چهارگوش کردن مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کاهش ارتفاع، مقدار پارامتر C برای نسبت‌های هندسی ثابت افزایش می‌یابد. نسبت هندسی به عنوان یک عامل مهم در میزان شکل‌گیری پارامتر C می‌تواند نقش مهمی را در فرایند چهارگوش کردن لوله داشته باشد. به منظور تأیید نتایج حاصل از شبیه سازی یکسری آزمایش‌های تجربی انجام گرفت که تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی و آزمایش‌های تجربی مشاهده گردید.

Investigating the effect of different parameters on the occurrence of collapse defect in re-shape rolling of circular pipe into a square tube

Ali Tajyar

Department of Industrial Design, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

P.O.B. 1744, Isfahan, Iran, a.tajyar@aui.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 13 December 2018

Accepted 16 February 2019

Available August 2019

Keywords:

Cold Re-Shape Rolling

Collapse Defect

Finite Element Method

Square Tube

Abstract

In recent years, various ways have been used for productions of square tube by reshaping processes. Mainly, it is expected that forming of a square tube that does not have any defects for using in industrial application, should be investigated during the design stage, before trials begin. In this paper, the elasto-plastic deformation of a circular pipe into a square tube without any defects, during the cold re-shape rolling process, is examined by Abaqus finite element software. The occurrence of collapse defect (parameter *C*) in the flat part of square tube during the forming process is one of the influential negative factors in the final quality of these tubes. Accordingly, the effects of various process parameters such as geometric ratio, roll gap reduction, friction coefficient, roll radius and the material of the pipe, on the occurrence of collapse defect in the squaring process are discussed. The findings show that with increasing the roll gap reduction, the amount of parameter C increases for constant geometric ratios. The geometric ratio is a major factor on the occurrence of collapse defect in the process of squaring circular tubes. In order to verify the simulation results, several experimental tests were performed. Obtained results of simulation showed good agreements with the experiment results.

1- مقدمه

با توجه به خصوصیات لوله‌های چهارگوش و مزایای آنها نسبت به لوله‌های دایره‌ای، این لوله‌ها به طور وسیعی در زمینه‌های مختلف صنعتی از سازه‌های ساختمانی گرفته تا صنعت خودروسازی، لوازم خانگی و انتقال گاز یا مایعات شیمیایی استفاده می‌شوند. علاوه بر این می‌توان از سطح داخلی این لوله‌ها به‌عنوان قالب انجماد استفاده نمود.

روش‌های مختلفی شامل اکستروژن، کشش، فشار سرد و گرم برای تهیه این لوله‌ها به کار می‌رود. یکی از این روش‌ها، شکل‌دهی غلتکی مجدد سرد لوله مدور و تبدیل آن به لوله‌های چهارگوش است. به‌وسیله این فرایند می‌توان به محصولی با دقت ابعادی، خواص مکانیکی مانند سختی و استحکام بهتر دست یافت. بعلاوه محصولات بدست آمده توسط این روش لوله‌های چهارگوش بدون درز است که از لوله‌های گرد ریخته‌گری شده یا

Please cite this article using:

A. Tajyar, Investigating the effect of different parameters on the occurrence of collapse defect in re-shape rolling of circular pipe into a square tube, Iranian Journal of Manufacturing Engineering,Vol. 6, No. 4, pp. 14-22, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

Archive of SID

اکسترود شده بدست می‌آیند.

باوجود قدمت و کاربرد روز افزون شکل‌دهی غلتکی سرد، تعداد کارهای علمی و تحقیقاتی انجام شده در این زمینه، خصوصاً شکل‌دهی مجدد لوله‌های گرد به غیر گرد، در مقایسه با سایر فرایندهای شکل دهی فلزات کم است. اما در تحقیقات انجام شده، روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی متنوعی جهت بررسی فرایند شکل‌دهی مجدد ارائه گردیده است. کیوچی تأثیر متغیرهای فرایند و برنامه عبور لوله برای حالتی که در آن لوله دایروی اولیه با جداره نازک به لوله‌ای با مقطع مربعی/ مستطیلی تبدیل می‌شود را در مورد فرایند نورد غلتکی سرد لوله‌ها مورد بررسی قرار داده است [1]. توزیع تغییر ضخامت دیواره در سطح مقطع لوله برای هر مرحله از فرایند شکل‌دهی، تأثیرات نحوه عبور لوله از غلتک‌ها بر روی شعاع گوشه‌های سطح مقطع مربعی/ مستطیلی محصول و بدست آمدن حداقل شعاع گوشه‌ها بررسی شده است. ون [2] در مورد استفاده از طراحی‌های پیشرفته ابزار برای شکل‌دهی لوله‌های گرد به لوله‌های مربعی و مستطیلی بحث کرده است. با استفاده از یک روش شبیه‌سازی عددی، مثل روش اجزاء محدود، مقدار انقباض محیطی لوله را در این فرایند محاسبه نموده و ابعاد لوله گرد اولیه را به دست آورده است. وی تأثیر پارامترهایی مانند ابعاد لوله نهایی، مقدار تغییر شکل در هر مرحله، تعداد مراحل و ... را بر روی شکل گوشه‌های لوله محصول بررسی کرده است.

بایومی و اتیا [3] به بررسی و تعیین نیروهای شکل‌دهی و کشش در تبدیل لوله‌های گرد به لوله‌های چهارگوش به وسیله چهار صفحه تخت پرداخته‌اند. این تحقیق به کمک یک روش تحلیلی و به کمک روش اجزاء محدود در نرم‌افزارهای اباکوس و ال-اس دینا انجام شده و به منظور تایید و مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی یک سری آزمایشات تجربی انجام گرفته است. ابری‌نیا و فرهمند [4] یک روش تحلیلی مبتنی بر تئوری حد بالا برای نورد لوله گرد و تبدیل آن به لوله‌ای با سطح مقطع غیر گرد ارائه نموده‌اند. تأثیر پارامترهای فرایند مانند شعاع غلتک، قطر لوله اولیه و مقدار کاهش ارتفاع غلتک‌ها بر روی محصول نورد شده مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مقایسه و تایید نتایج شبیه‌سازی یک سری آزمایشات تجربی انجام شده است.

تاجیار و ابری‌نیا [5] تغییر شکل الاستیک-پلاستیک یک لوله گرد فلزی تک لایه طی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد و تبدیل آن به لوله با مقطع مربعی، طی مراحل مختلف گذر توسط نرم‌افزار اجزاء محدود اباکوس را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایش‌های تجربی انجام گرفته مقایسه شده که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل و آزمایش‌های تجربی مشاهده گردیده است. تاجیار و همکاران [6] تأثیر پارامترهای مختلف فرایندی مانند قطر اولیه لوله، مقدار کاهش ارتفاع، شعاع غلتک‌ها، جنس و ضخامت لایه‌ها بر روی ابعاد محصول نهایی در شکل‌دهی مجدد لوله گرد دو لایه به چهارگوش را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در حین فرایند شکل‌دهی لوله‌های چهارگوش، ممکن است عیوبی مانند تورفتگی در قسمت دیواره تخت لوله و عدم تقارن در این لوله‌ها رخ دهد. علی‌رغم اهمیت تولید لوله‌های چهارگوش بدون عیب، موضوع رخ دادن این عیوب در فرایند شکل‌دهی لوله‌های چهارگوش در تعداد کمی از مقالات مورد بررسی قرار گرفته است. لئو و وئو [7] بر اساس آنالیز اجزا محدود الاستو-پلاستیک تحت حالت کرنش صفحه‌ای به بررسی تبدیل لوله‌های گرد به چهارگوش با قرار دادن بین دو قالب V شکل پرداخته‌اند. تأثیر پارامترهای مختلف فرایند مانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و نسبت هندسی بر روی رخ دادن حالت خرابی تورفتگی و میزان عدم تقارن در فرایند چهارگوش کردن و تعیین نیروی شکل‌دهی در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته شده است. یانگ مینگ [8] در تحقیقی دیگر بوسیله روش اجزاء محدود به بررسی تأثیر پارامترهایی همچون اصطکاک، نسبت هندسی، جنس لوله‌ها و میزان کاهش ارتفاع بر روی نیروی شکل‌دهی و حالت‌های عیوب پیش آمده در تبدیل لوله‌های چهارگوش از لوله گرد اولیه با استفاده از قالب‌های V شکل پرداخته است.

لئو [9] فرایند شکل‌دهی مجدد لوله‌های مربعی را با استفاده از چهار صفحه تخت انجام داده است. در این روش لوله گرد اولیه ابتدا گیره بندی شده و سپس چهار صفحه تخت به صورت تدریجی باعث تغییر شکل لوله گرد به حالت چهارگوش می‌گردد. وی با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی پارامترهای مؤثر بر روی این فرایند مانند ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و نسبت هندسی بر روی عیب تورفتگی دیواره‌ها در فرایند چهارگوش کردن و تعیین نیروی شکل‌دهی پرداخته است.

چن و یه [10] فرایند چهارگوش کردن یک لوله گرد دو لایه را به لوله‌ای مربعی شکل با استفاده از تحلیل اجزا محدود سه بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، فرایند چهارگوش کردن لوله با استفاده از چهار صفحه تخت انجام شده است. تأثیر پارامترهای فرایندی مختلف مانند ضریب اصطکاک، ضریب

www.SID.ir

Archive of SID

کرنش سختی، نسبت هندسی و طول لوله بر روی رخ دادن عیوب در فرایند چهارگوش کردن لوله‌های دو لایه در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

2- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

در این تحقیق به بررسی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی لوله های گرد به منظور تولید لوله‌های چهارگوش با حداقل عیب تورفتگی (پارامتر C) پرداخته شده است (شکل‌های 1 و 2). با توجه به شکل 1 پارامتر C میزان تورفتگی ایجاد شده در قسمت تخت لوله چهارگوش می‌باشد. به عبارت دیگر پارامتر C بیشترین فاصله جدایش ایجاد شده بین سطح تخت لوله و غلتک در پایان فرایند شکل‌دهی می‌باشد. در این فرایند، لوله گرد پس از درگیری با غلتک‌ها به واسطه اصطکاک موجود بین غلتک و دیواره لوله به درون خط شکل‌دهی کشیده می‌شود و لوله مربعی پس از عبور از بین غلتک‌ها شکل می‌گیرد. یک لوله چهارگوش مناسب به این معنی است که در طول فرایند شکل‌دهی، دیواره لوله در مناطق تماس با غلتک‌ها بدون جدایش شکل بگیرد. این موضوع به میزان رخ دادن عیب تورفتگی در این ناحیه و چگونگی حفاظت از رخ دادن این عیب بستگی دارد، زیرا در صورت وقوع این عیوب، حذف آنها بسیار مشکل است. با توجه به اینکه تحقیقی در مورد بررسی عیوب ایجاد شده در فرایند چهارگوش کردن لوله بوسیله فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی گزارش نشده است، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای فرایندی بر روی رخ دادن میزان عیب تورفتگی در این فرایند می‌باشد. بدین منظور تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی از قبیل مقدار کاهش ارتفاع، نسبت هندسی، جنس لوله‌ها، ضریب اصطکاک و شعاع غلتک در شکل گیری این عیب مورد بررسی قرار گرفته است.

3- روش تحقیق

در این تحقیق لوله گرد اولیه با شعاع اولیه R و ضخامت اولیه t_0 با عبور از بین چهار غلتک به لوله‌ای چهارگوش با شعاع گوشه r_0 و قسمت تخت $2b_e$ تبدیل می‌شود (شکل 1). این فرایند در نرم‌افزار اباکوس شبیه‌سازی شده است. در این فرایند غلتک‌ها مقید شده است و امکان حرکت دورانی فقط در راستای محور غلتک‌ها می‌باشد. غلتک‌ها با سرعت 20rpm حرکت می‌کنند. لوله بطور کاملاً آزاد می‌باشد و با یک فشار اولیه توسط بیلت نشان داده شده در شکل 3 به فضای بین غلتک‌ها فرستاده می‌شود و از این زمان به بعد توسط غلتک‌ها به داخل کشیده می‌شود. لازم به ذکر است که فشار اولیه فقط به اندازه‌ای است که باعث درگیر شدن لوله و غلتک شود. المانها برای لوله تغییر شکل‌پذیر، از نوع هشت نقطه‌ای C3D8R انتخاب شده است و اندازه مش‌ها بر اساس آنالیز حساسیت توصیه شده توسط نرم‌افزار انتخاب گردیده‌اند. غلتک‌ها از نوع صلب تحلیلی[1] در نظر گرفته شده است. تماس سطح بیرونی لوله با غلتک‌ها از نوع تماس سطح به سطح[2] انتخاب شده است و مدل تئوریک انتخاب شده برای مدل کردن اصطکاک بین دو سطح، قانون کولمب می‌باشد. با توجه به تقارن، تنها یک چهارم لوله و غلتک‌ها مدل گردیده است (شکل 3). همچنین به منظور تایید نتایج حاصل از شبیه سازی ابتدا چندین حالت به صورت تجربی آزمایش گردید که نتایج حاصل در بخش بعد آورده شده است. شکل 2 دستگاه نورد و لوله آلومینومی را قبل و بعد از فرایند شکل‌دهی مجدد نشان می‌دهد. لوله‌ها از جنس آلومینیوم آنیل شده و آنیل نشده انتخاب شده‌اند (چگالی $2770\ Kg/m^3$). شکل 4 نمونه‌های آزمون کشش را نشان می دهد. آماده سازی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM-E8M انجام شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه نمونه‌ها دارای انحنا می‌باشند این نمونه ها با رعایت نسبت اندازه‌های استاندارد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها بوسیله دستگاه کشش با سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفته‌اند. مشخصات آلومینیوم آنیل شده و آنیل نشده در جدول 1 و نمودارهای تنش-کرنش نشان داده شده در شکل 5 که از آزمون کشش و آزمون سختی سنجی ویکرز بدست آمده است، آورده شده است.

4- ارائه نتایج و بحث

شکل 6 تأثیر کاهش ارتفاع را بر روی پارامتر C برای لوله آلومینیومی آنیل شده با شعاع اولیه 40 میلی‌متر، ضخامت 6 میلی‌متر نشان می‌دهد.

جدول 1 مشخصات جنس لوله‌ها

Table 1 Material properties of pipes

ماده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	سختی (Hv)
آلومینیوم آنیل نشده	172	212	0/32	69	83
آلومینیوم آنیل شده	48	92	0/32	69	26

[1] Analytical Rigid
[2] Surface-to- surface contact

www.SID.ir

Archive of SID

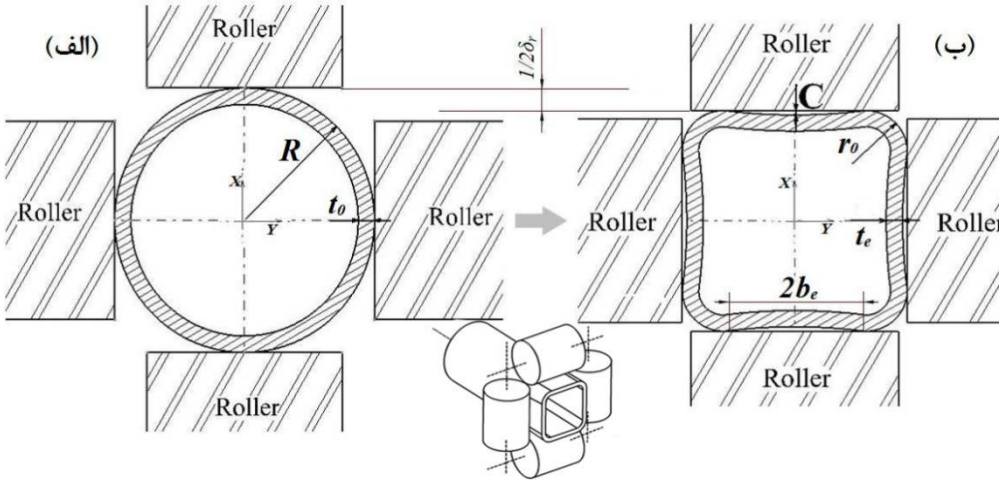

Fig. 1 Schematic representations of reshaping process showing a: before reshaping process and b: after reshaping process

شکل 1 نمایی شماتیک از فرایند شکل‌دهی مجدد (الف) قبل از شکل‌دهی، (ب) بعد از شکل‌دهی

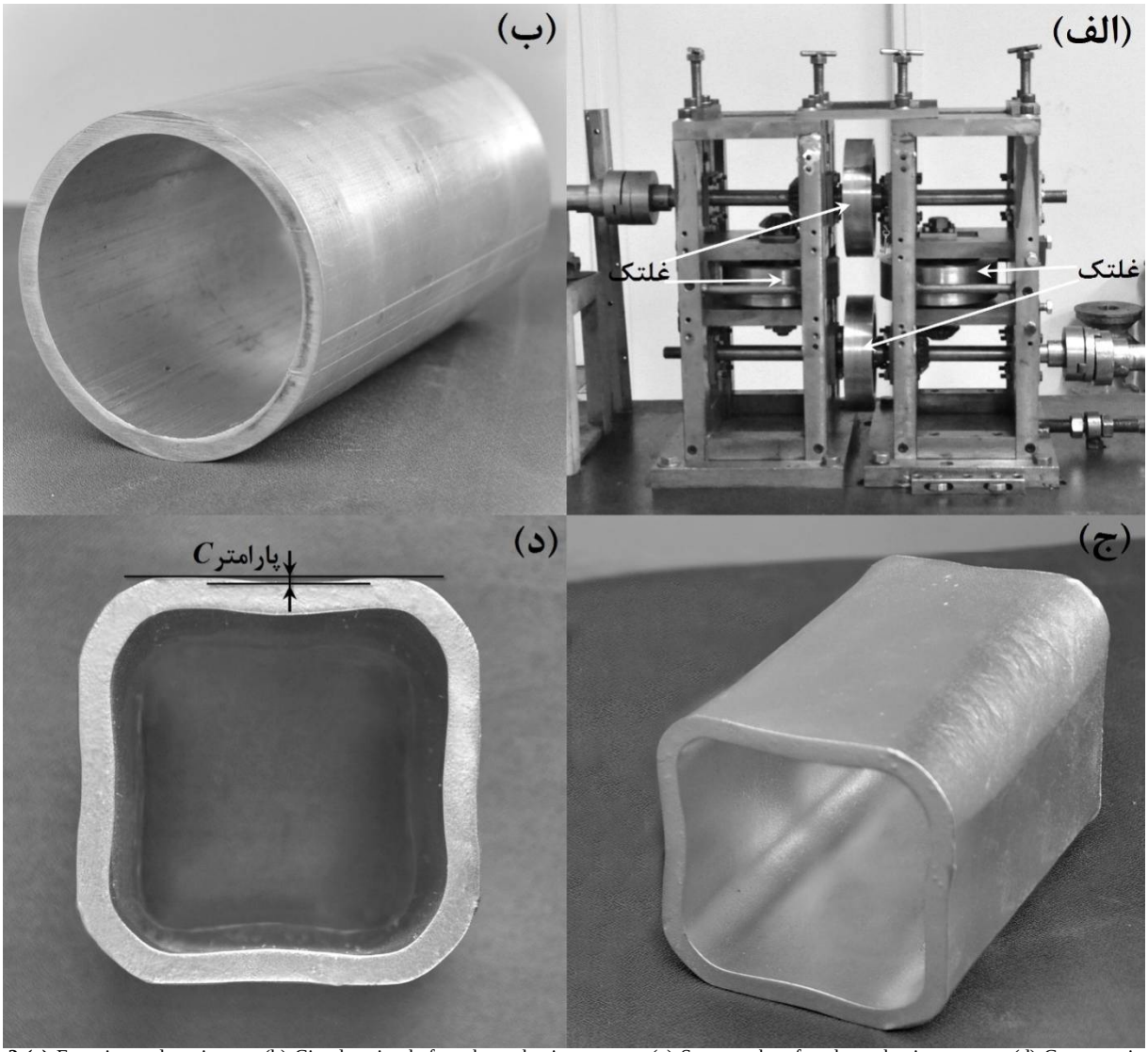

Fig. 2 (a) Experimental equipment (b) Circular pipe before the reshaping process (c) Square tube after the reshaping process (d) Cross section of aluminum squared tube

شکل 2 (الف) دستگاه نورد چهار غلتکی(ب) لوله گرد آلومینیومی قبل از فرایند شکل دهی مجدد (ج) لوله چهار گوش آلومینیومی بعد از فرایند شکل دهی مجدد (د) سطح مقطع لوله چهارگوش شده

www.SID.ir

Archive of SID

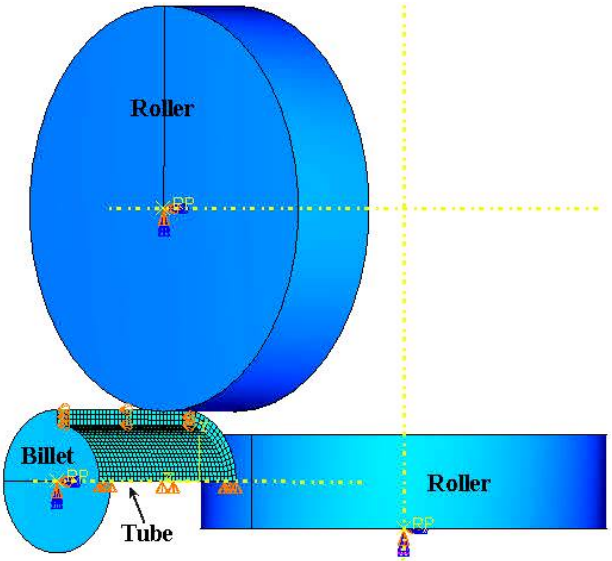

Fig. 3 Schematic of simulation model before reshaping process

شکل 3 نمایی از مدل شبیه‌سازی شده قبل از فرایند شکل‌دهی

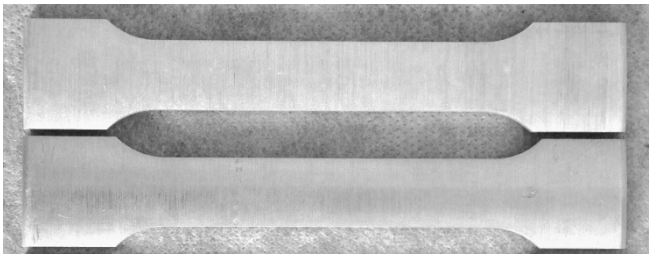

Fig. 4 Tensile test samples of Al tubes before and after annealing

شکل 4 نمونه‌های کشش از لوله‌های آلومینیومی قبل و بعد از عملیات حرارتی آنیل

مشاهده می‌شود با افزایش مقدار کاهش ارتفاع، مقدار پارامتر C نیز افزایش می‌یابد. در مقادیر کوچک کاهش ارتفاع دیده می‌شود که مقدار C منفی می‌باشد. این حالت می‌تواند به خاطر وجود پدیده برگشت فنری باشد که خود را در مقادیر کوچک کاهش ارتفاع بیشتر نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود و آزمایش‌های تجربی، تطابق خوبی مشاهده می‌شود که این موضوع صحت نتایج حاصل از شبیه سازی اجزاء محدود را تایید می‌کنند. همچنین در شکل 2 (د) عیب تورفتگی (پارامتر C) در قسمت تخت لوله چهارگوش شده در آزمایش تجربی نشان داده شده است که رخ دادن عیب تورفتگی را تایید می‌کند.

شکل‌های 7 و 8 تأثیر نسبت هندسی را بر روی پارامتر C برای حالت‌های مختلف کاهش ارتفاع برای لوله با جنس‌های آلومینیوم آنیل شده و آنیل نشده نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار کاهش ارتفاع مقدار پارامتر C برای نسبت های هندسی ثابت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر دیده می‌شود که نمودارهای مربوطه با افزایش مقدار کاهش ارتفاع به سمت بالا شیفت پیدا می‌کنند.

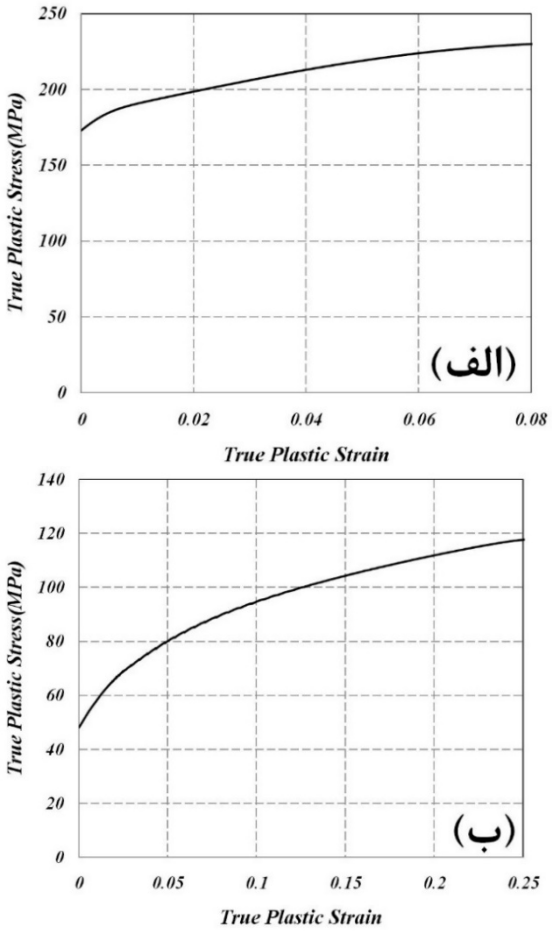

Fig. 5 True stress-true plastic strain diagram, (a) Non-Annealed Aluminum, (b) Annealed Aluminum

شکل 5 نمودار تنش- کرنش پلاستیک (الف) آلومینیوم آنیل نشده (ب) آلومینیوم آنیل شده

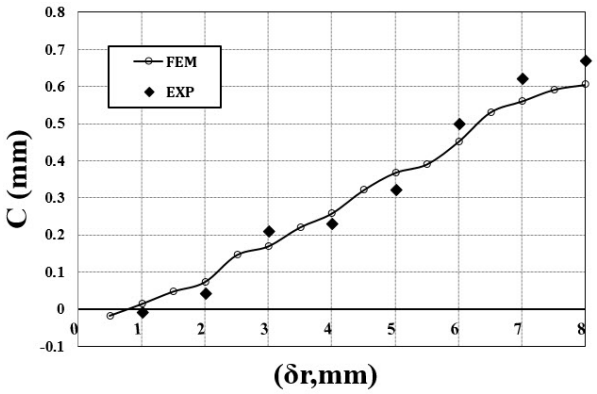

Fig. 6 The effect of roll gap reduction on the collapse (C parameter)

شکل 6 اثر کاهش ارتفاع بر روی پارامتر C

با توجه به نسبت $t/R=1/10$ که محدوده جدار نازک و جدار ضخیم را نشان می‌دهد، با افزایش نسبت هندسی در

www.SID.ir

Archive of SID

محدوده جدار ضخیم مقدار پارامتر C افزایش می‌یابد اما تقریباً در تمامی حالات بیشترین مقدار برای پارامتر C در محدوده نسبت هندسی 10-8 می‌باشد و پس از آن با وارد شدن در منطقه جدار نازک این مقدار کاهش می‌یابد. این حالت می‌تواند به خاطر وجود پدیده برگشت فنری باشد که در لوله‌هایی با جداره نازک خود را بیشتر نشان می‌دهد. تأثیر پدیده برگشت فنری بر روی میزان عیب تورفتگی و شکل نهایی لوله چهارگوش بعد از فرایند چهارگوش کردن بوسیله دو قالب V شکل و یا توسط چهار صفحه تخت، توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [7- 9]. لازم به ذکر است که مقدار C برای حالتی که جداره لوله ضخیم باشد، در مقابل ضخامت لوله ناچیز است و بیشتر می‌تواند در اثر حالت لهیدگی که در قسمت تخت لوله ایجاد شده، پیش آید.

شکل‌های 9 و 10 تأثیر نسبت هندسی را بر روی پارامتر C برای حالت‌های مختلف جنس و ضرب اصطکاک و مقدار کاهش ارتفاع 2 و 4 میلی‌متر نشان می‌دهند. در مورد حالت مقدار کاهش ارتفاع برابر 2 میلی‌متر و جنس آلومینیوم آنیل نشده برای هر دو مقدار ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که پارامتر C منفی است این بدان معنا است که لوله پس از عبور از غلتک‌ها به خاطر وجود پدیده برگشت فنری بازتر شده است (شکل 9).

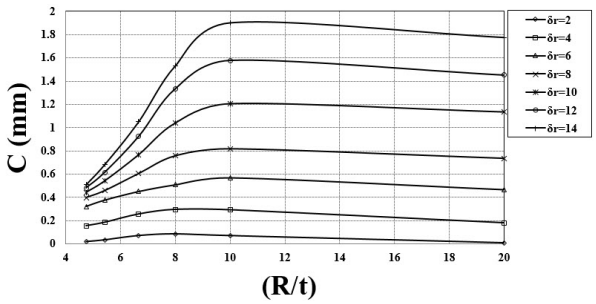

Fig. 7 The effect of geometric ratio on the collapse (C parameter)-(annealed Al pipe)

شکل 7 اثر نسبت هندسی بر روی پارامتر C - (لوله آلومینیوم آنیل شده)

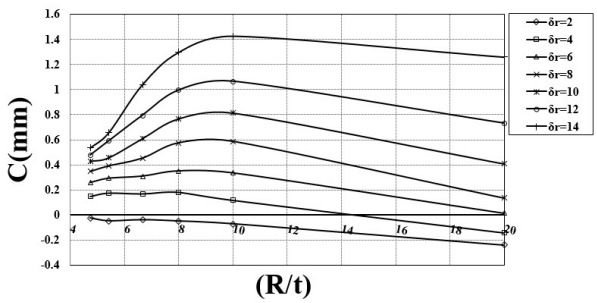

Fig. 8 The effect of geometric ratio on the collapse (C parameter)-(non-annealed Al pipe)

شکل 8 اثر نسبت هندسی بر روی پارامتر C (لوله آلومینیوم آنیل نشده)

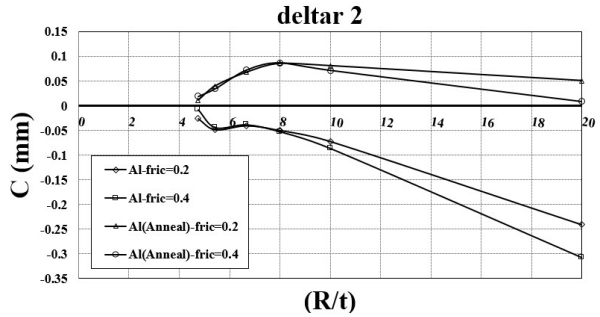

Fig. 9 The effect of geometric ratio on the collapse (C parameter)-($\delta_r = 2mm$)-(under various μ and material conditions)

شکل 9 اثر نسبت هندسی بر روی پارامتر C ($\delta_r = 2mm$)-(حالت‌های مختلف ضریب اصطکاک و جنس لوله)

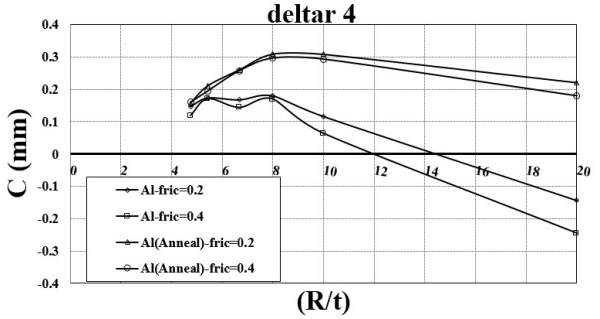

Fig. 10 The effect of geometric ratio on the collapse (C parameter)-($\delta_r = 4mm$)- (under various μ and material conditions)

شکل 10 اثر نسبت هندسی بر روی پارامتر C ($\delta_r = 4mm$)- (حالت‌های مختلف ضریب اصطکاک و جنس لوله)

این مقدار منفی پارامتر C می‌تواند با دادن مقدار کاهش ارتفاع بیشتر و جبران میزان برگشت فنری کمتر یا حذف شود (شکل 10).

با توجه به شکل‌های 7 تا 10 می‌توان مشاهده نمود که جنس لوله‌ها نیز در رخ دادن پارامتر C تأثیرگذار می‌باشد. با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها هر چه لوله از استحکام بیشتری برخوردار باشد، مقدار پارامتر C کمتر است. پارامتر C برای نسبت هندسی بالا و مقادیر کوچک کاهش ارتفاع منفی می‌باشد که همان‌طور که در بالا اشاره شد به خاطر پدیده برگشت فنری است. با کاهش استحکام لوله مقدار پارامتر C خصوصاً در مقادیر بالای کاهش ارتفاع و نسبت هندسی 10-8 افزایش قابل توجهی می‌یابد. همچنین با توجه به شکل‌های 9 و 10 تأثیر اصطکاک را می‌توان مشاهده نمود. مقدار اصطکاک در محدوده جدار ضخیم تأثیر قابل توجهی را ندارد ولی در محدوده جدار نازک تأثیر خود را نشان می‌دهد، به عبارت دیگر برای مقادیر کوچک نسبت هندسی تغییرات اصطکاک تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار C ندارد. این در حالی است که مقادیر C

www.SID.ir

Archive of SID

در مقایسه با ضخامت در این موارد ناچیز می‌باشد. اما در مورد مقادیر بیشتر نسبت هندسی تأثیرات بیشتری را بر روی پارامتر C می‌توان مشاهده نمود. با توجه به اینکه مقدار ضریب اصطکاک برای درگیری لوله و غلتک‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است، برای مقادیر بیشتر نسبت هندسی (محدوده جدار نازک) اگر مقدار ضریب اصطکاک کم انتخاب شود، احتمال جدایش بین سطح لوله و غلتک در حین فرایند بیشتر بوده که نهایتاً این موضوع احتمال رخ دادن پارامتر C را افزایش می‌دهد. لذا انتخاب شرایط اصطکاکی مناسب برای لوله‌های جدار نازک از اهمیت بیشتری برخوردار است. اما وابستگی تأثیراش به بزرگی دیگر پارامترها نمی‌باشد. همچنین موارد بالا نشان می‌دهد که نسبت هندسی نقش مهمی را در چهارگوش کردن لوله‌های گرد دارد. در تحقیقات دیگر نیز که فرایند چهارگوش کردن لوله توسط دو قالب V شکل و یا چهار صفحه تخت انجام شده است، نتایج مشابهی مبنی بر اینکه نسبت هندسی به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در میزان وقوع عیب تورفتگی در قسمت تخت لوله چهارگوش می‌باشد، گزارش شده است [7- 10].

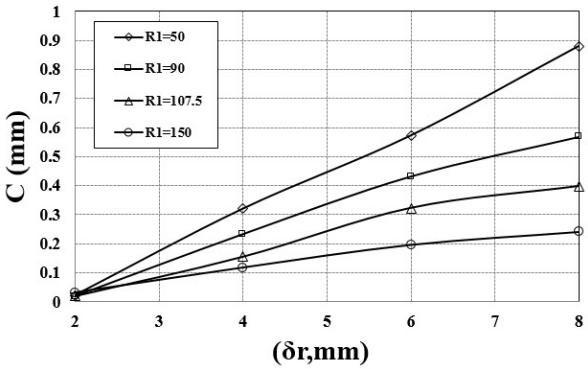

Fig. 11 The effect of roll radius on the collapse (C parameter)- (under various roll gap reductions conditions)

شکل 11 اثر شعاع غلتک بر روی پارامتر C (کاهش ارتفاع‌های مختلف)

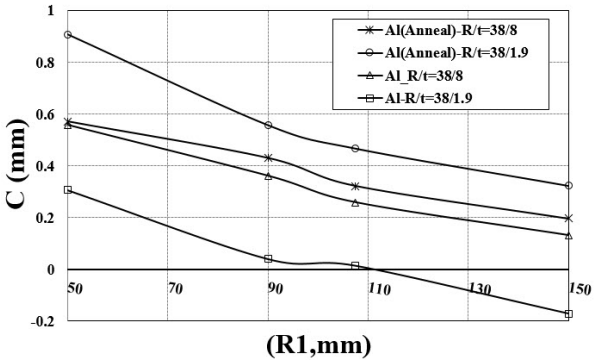

Fig. 12 The effect of roll radius on the collapse (C parameter)- (under various geometric ratio and material conditions)

شکل 12 اثر شعاع غلتک بر روی پارامتر C (حالت‌های مختلف نسبت هندسی و جنس لوله)

شکل 11 تأثیر مقدار شعاع غلتک را بر روی پارامتر C برای لوله جدار ضخیم آلومینیوم آنیل شده با شعاع اولیه 38 میلی‌متر، ضخامت 8 میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع غلتک مقدار پارامتر C کاهش می‌یابد که این حالت با افزایش مقدار کاهش ارتفاع خود را بیشتر نشان می دهد به عبارتی می‌توان گفت که با افزایش شعاع غلتک سطح تماس لوله و غلتک در حین شکل‌دهی بیشتر شده که این موضوع می تواند مانع جدایش لوله از غلتک‌ها شده و نهایتاً میزان رخ دادن پارامتر C را کاهش دهد. شکل 12 تأثیر شعاع غلتک را بر روی پارامتر C برای حالت‌های مختلف نسبت هندسی و جنس و کاهش ارتفاع برابر 6 میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمامی حالات با افزایش شعاع غلتک مقدار C کاهش می‌یابد.

شکل 13 کانتور تنش و جابجایی را برای دو حالت نسبت هندسی 5 و 20 تحت کاهش ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. مناطق تیره رنگ نشان دهنده منطقه تغییر شکل پلاستیک است که بیشتر در مناطقی است که لوله با غلتک در تماس است و بیشترین جابجایی را داشته اند که با افزایش، کاهش ارتفاع، افزایش می‌یابند.

مشاهده می‌شود که در ناحیه گوشه لوله چهارگوش برای کاهش ارتفاع‌های کم، جابجایی تقریبا صفر می‌باشد (شبیه یک تیر دوسرگیردار) که نشان دهنده یک قید هندسی است. با افزایش مقدار کاهش ارتفاع گوشه‌ها نیز مقداری جابجایی دارند که این حالت برای لوله‌های ضخیم‌تر نسبت به لوله‌های نازک‌تر کمتر می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف فرایند شکل‌دهی مجدد لوله بر روی رخ دادن عیب تورفتگی در تولید لوله‌های چهارگوش به وسیله روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی از هماهنگی خوبی برخوردارند که این امر می‌تواند راهگشایی برای پیش بینی پارامترهای مختلف فرایند باشد.

- با افزایش نسبت هندسی (به عنوان مهمترین پارامتر در رخ دادن عیب تورفتگی) در محدوده جدار ضخیم مقدار پارامتر C افزایش می‌یابد ولی تقریباً برای همه حالات بیشترین مقدار در نسبت هندسی 10-8 مشاهده شده است و پس از آن با وارد شدن در منطقه جدار نازک این مقدار کاهش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

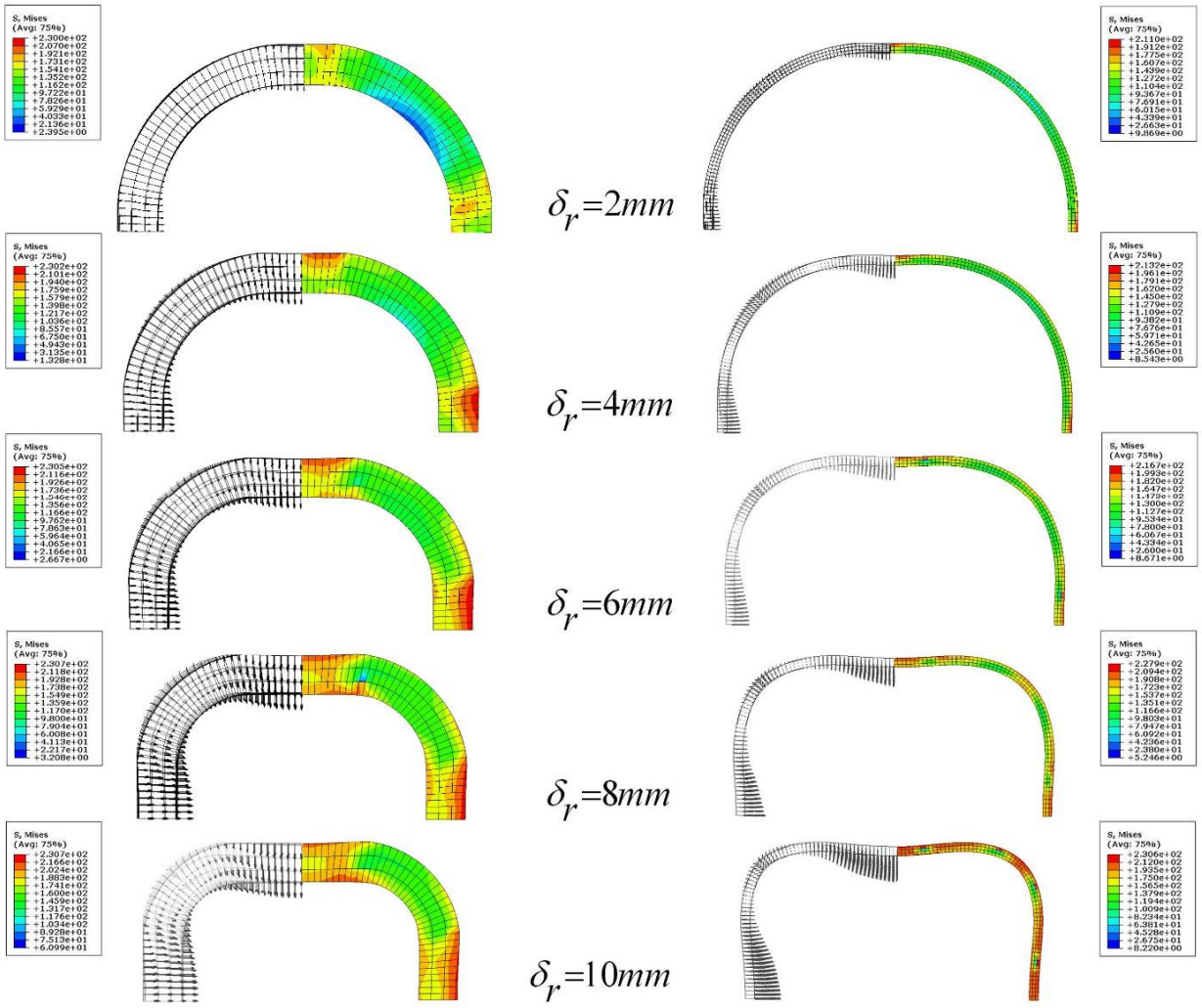

Fig. 13 Tension contour and nodal displacement contour of squaring processes under the conditions of R/t = 5 & 20

شکل 13 کانتور تنش (سمت راست) وکانتور جابجایی (سمت چپ)، (5 و R/t=20)

این حالت می‌تواند به خاطر وجود پدیده برگشت فنری باشد که در لوله‌هایی با جداره نازک خود را بیشتر نشان می‌دهد. مقدار پارامتر C برای حالتی که جداره لوله ضخیم باشد، در مقابل ضخامت لوله مقداری ناچیز می‌باشد و بیشتر می‌تواند در اثر حالت لهیدگی که در قسمت تخت لوله ایجاد شده پیش آید.

- با افزایش کاهش ارتفاع، مقدار پارامتر C برای نسبت های هندسی ثابت افزایش می‌یابد. در مقادیرکوچک کاهش ارتفاع، مقدار C منفی می‌باشد که این حالت به خاطر وجود پدیده برگشت فنری است که خود را در مقادیر کوچک کاهش ارتفاع، بیشتر نشان می‌دهد. البته این حالت متأثر از جنس لوله مورد نظر نیز می‌باشد.

- برای مقادیر کوچک نسبت هندسی، تغییرات اصطکاک تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار C ندارد، اما در مورد مقادیر بزرگ نسبت هندسی تأثیرات بیشتری را نسبت به تغییر ضریب اصطکاک بر روی پارامتر C می توان مشاهده نمود.

- با افزایش شعاع غلتک مقدار C کاهش می‌یابد که این حالت با افزایش مقدار کاهش ارتفاع خود را بیشتر نشان می‌دهد.

- در ناحیه گوشه لوله چهارگوش برای کاهش ارتفاع‌های کم جابجایی تقریباً صفر می‌باشد، که نشان دهنده یک قید هندسی است. با افزایش مقدار کاهش ارتفاع گوشه‌ها نیز مقداری جابجایی دارند که این حالت برای لوله‌های جدار ضخیم‌تر نسبت به لوله‌های جدار نازک‌تر کمتر می‌باشد.

6- فهرست علایم

R	شعاع اولیه لوله گرد (mm)
$R1$	شعاع غلتک (mm)
r_0	شعاع گوشه لوله چهارگوش (mm)
t_0	ضخامت اولیه لوله گرد (mm)

www.SID.ir

Archive of SID

μ ضریب اصطکاک

C عیب تورفتگی (mm)

$2b_e$ قسمت تخت لوله چهارگوش (mm)

δr مقدار کاهش ارتفاع (mm)

R/t نسبت هندسی

7- مراجع

[1] M. Kiuchi, Overall study on roll forming process of square and rectangular pipes, *In: Proceedings of the second international conference on rotary metalworking process, Straford-Upon_Avon*, pp. 213–226, 1982.

[2] B. Wen, Using advanced tooling designs to reshape round tube into square and rectangular tubes, *OH, USA: Roll-Kraft, Inc*, 1998.

[3] L.S. Bayoumi and A.S. Attia, Determination of the forming tool load in plastic shaping of a round tube into a square tubular section, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No.4, Feb, pp.1835-1842, 2009.

[4] K. Abrinia and H.R. Farahmand, An upper bound analysis for the reshaping of thick tubes with experimental verification, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 2, pp. 342-358, 2007.

[5] A. Tajyar and K. Abrinia, FEM simulation and experimental investigation of reshaping of thick tubes in different passes, *In ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference.*, January, pp. 577-581, 2009. American Society of Mechanical Engineers.

[6] A. Tajyar, A. Maesomi and Gh.H. Liaghat, Investigation of the effect of process parameters on the dimensions of the final product in the re-shaping of the two-layer square tube, *13th Annual Conference on Manufacturing Engineering, Hormozgan, Iran*, November 9-11, 2016 (in Persian فارسی).

[7] D.K. Leu and J.Y. Wu, Finite element simulation of the squaring of circular tube, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 7-8, pp.691–699, 2005.

[8] Y.M. Hwang, Elasto-plastic finite element analysis of squaring circular tube, *Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 18, No 3, pp. 665-673, 2008.

[9] D.K. Leu, The shaping of a circular tube into a symmetric square-tube by finite-element modeling, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 178, No. 1-3 pp. 287–296, 2006.

[10] T.C. Chen and J.M. Ye, Finite-element analysis of the double lateral compression of clad tube into a symmetric square-tube, *Advanced Materials Research*, Vol. 337, pp. 332-335, 2011.

www.SID.ir