



# Experimental and Numerical Study of Rotational Draw Bending Process of SS-304 Thin-walled Pipes Using Polyurethane and NBR Mandrels

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Ghahreman HR,<sup>1</sup>  
Honarpisheh M,<sup>1\*</sup>  
Sarafrazi MB<sup>1</sup>

### How to cite this article

Ghahreman HR, Honarpisheh M, Sarafrazi MB. Experimental and Numerical Study of Rotational Draw Bending Process of SS-304 Thin-walled Pipes Using Polyurethane and NBR Mandrels. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):303-310.

<sup>1</sup>Manufacturing Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

### \*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran  
honarpisheh@kashanu.ac.ir

### Article History

Received: September 09, 2021  
Accepted: November 10, 2021  
ePublished: March 20, 2022

## ABSTRACT

One of the methods of forming pipes is the rotary draw bending process. Today, the bending of thin-walled pipes with a low radius of curvature is widely used in the automotive, military, and aerospace industries. This process is used to bend high-strength pipes. In this paper, at first, the necessary models were created to simulate the bending process of the rotary pipe. Then, the mechanical and physical properties of stainless steel 304 and elastomers were determined. Then, the forming force and changes in pipe wall thickness were experimentally and numerically measured. The process simulation was analytically performed by polyurethane elastomeric and nitrile rubber mandrels in ABAQUS finite element software. The results show a good agreement between simulation and experimental results. Finally, the effects of process parameters including mandrel type, pipe diameter, and bending radius were analyzed on the maximum forming force by factorial analysis. The results showed that the maximum forming force for both types of mandrel materials obtain for pipes with small diameter and high curvature radius. Also, the bending forces increase 5 times by 30% increasing the bending radius, for pipes with smaller diameters. In addition, in equal diameter and radius of bending, the bending forces in the case of using polyurethane mandrel are 25% more than nitrile mandrel.

**Keywords** Rotary Draw Bending, FEM, SS-304 Pipe, Forming Force, Thickness Distribution

## CITATION LINKS

[1] Finite element simulation of the tube hydroforming process—bending, preforming and hydroforming. [2] Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube. [3] Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process. [4] Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube. [5] 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints. [6] Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube... [7] Plastic-deformation analysis in tube bending. [8] Tube bending under axial force and internal pressure. [9] Three-dimensional finite element model of high strength... [10] Insights on tube rotary draw bending with superimposed localized thermal field. [11] Forming mechanism and characteristics of a process... [12] An upper bound analysis for reshaping thick tubes to polygonal cross-section tubes through multistage roll forming process. [13] Experimental and numerical investigation of a short, thin-walled steel tube incremental forming process. [14] Crashworthiness of foam-filled thin-walled circular tubes under dynamic bending. [15] Advances and trends on tube bending forming technologies. [16] Bending behaviors of large diameter thin-walled CP-Ti tube in rotary draw bending. [17] In-process measurement of springback in tube rotary draw bending. [18] Analysis of wrinkling limit of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube. [19] Three-dimensional finite element modeling of rotary-draw bending of copper-titanium composite tube. [20] Investigation of tube fracture in the rotary draw bending... [21] Springback angle prediction of circular metal tube considering the interference of cross-sectional distortion in mandrel-less rotary draw bending. [22] Analysis of the Rotary-draw Bending Process for Thin-walled Rectangular Aluminum Tube. [23] Modelling of springback in tube bending: A generalized analytical approach. [24] In-line springback measurement for tube bending using a laser system. [25] Tube forming processes: a comprehensive guide. [26] <http://www.hineshending.com> [27] Tube and pipe bending: principles, methods, tooling, techniques, developments.

## مطالعه تجربی و عددی فرآیند خم کاری کششی-دورانی لوله‌های جدار نازک SS-304 با استفاده از مندرل‌های پلی‌یورتان و نیتریل

حمیدرضا قهرمان

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمد هنرپیشه\*

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمد باقر سرافرازی

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

### چکیده

یکی از روش‌های شکل‌دهی لوله‌ها، روش خم کاری کششی-دورانی است. امروزه خم کاری لوله‌های جدارنازک با شعاع انحنای کم یک فرآیند تولیدی پرکاربرد در صنایع خودروسازی، نظامی و هوافضا به شمار می‌رود که برای خم کاری قطعات با استحکام بالا، استفاده می‌شود. در این مقاله ابتدا مدل‌های لازم برای انجام شبیه‌سازی فرآیند خم لوله، ایجاد شد و در ادامه خصوصیات مکانیکی لازم برای فولاد ۳۰۴ و الاستومرها تعیین گردید. در ادامه به بررسی تجربی و عددی نیروی شکل‌دهی و تغییرات ضخامت دیواره‌ی لوله پرداخته شد. شبیه‌سازی فرآیند با استفاده از مندرلهای الاستومری پلی‌یورتان و نیتریل با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بر روی فولاد ۳۰۴ انجام گرفت که با مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی، انطباق خوبی بین نتایج مشاهده شد. همچنین اثرات عوامل فرآیند شامل جنس مندرل، قطر لوله و شعاع خم بر حداکثر نیروی شکل‌دهی توسط تحلیل فاکتوریال مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر نیروی شکل‌دهی برای هر دو نوع جنس مندرل برای لوله‌هایی با قطر کم و شعاع انحنای بالا حاصل می‌گردد. همچنین، با افزایش ۳۰ درصدی شعاع خم برای لوله‌های با قطر کمتر، نیروهای خم کاری ۵ برابر می‌شوند. ضمناً، در قطر و شعاع خم برابر، نیروهای خم کاری در حالت استفاده از مندرل پلی‌یورتان ۲۵ درصد بیشتر از مندرل نیتریل می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** خم کاری کششی-دورانی، شبیه‌سازی اجزای محدود، لوله SS-304، نیروی شکل‌دهی، توزیع ضخامت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹

\*نویسنده مسئول: honarpishe@kashanu.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی خم کاری لوله‌های جدارنازک نقش بسیار مهمی در صنعت هوافضا، نفت، سیستم‌های قدرت و صنایع نظامی ایفا می‌کند. انتخاب روش خم کاری تابع دو پارامتر مهم یعنی نسبت شعاع خم به قطر لوله ( $R/D$ ) و نسبت قطر لوله به ضخامت لوله ( $D/t$ ) می‌باشد. همچنین انتخاب روش خم کاری به عوامل دیگری نظیر دقت، تیراژ، نرخ تولید و غیره بستگی دارد.

در حین انجام فرآیند خم کاری این نوع لوله‌ها، با شعاع خم بسیار کوچک ( $R/D=1-1.5$ ) با روش معمولی خم کاری سرد، بسیار مشکل و یا حتی می‌توان گفت غیرممکن است. انجام فرآیند

موفقیت‌آمیز خم کاری این نوع لوله‌ها، نیازمند ارائه فناوری جدید و پیشرفته است.

کریسترفرانا در سال ۲۰۰۲ فرآیند خم کاری لوله به روش کششی-چرخشی و هیدروفورمینگ را با استفاده از نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی نموده است<sup>[1]</sup>. هنگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی نقش مندرل‌ها در فرآیند خم کاری لوله‌های جدارنازک پرداختند و فرآیند خم کاری لوله‌های جدارنازک را با استفاده از مندرل مرسوم و در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی نمودند<sup>[2]</sup>. گو و همکاران در سال ۲۰۰۷ به شبیه‌سازی لوله‌های جدارنازک و محاسبه برگشت فنی لوله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند<sup>[3]</sup>. ژاو و همکاران در سال ۲۰۰۹ به شبیه‌سازی لوله جدارنازک با مقطع مربع با استفاده از مندرل و با روش کششی-دورانی پرداختند<sup>[4]</sup>. هی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به شبیه‌سازی فرآیند خم کاری لوله‌ی جدارنازک آلومینیومی در نرم‌افزار آباکوس پرداختند و پدیده‌های چروکیدگی در دیواره داخلی و تخت‌شدگی در دیواره‌ی خارجی لوله و همچنین نازک‌شدگی دیواره‌ی خارجی لوله را بررسی نمودند<sup>[5]</sup>. لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ به شبیه‌سازی فرآیند خم کاری لوله کششی-دورانی برای لوله‌های جدارنازک با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و بررسی تنش‌ها و ایجاد چروکیدگی در لوله پرداختند<sup>[6]</sup>. یانگ در سال ۲۰۰۰ در مورد تنش‌ها در ناحیه خم، تغییر ضخامت دیواره، نرخ چروک در مقطع لوله، انحراف تار خنثی، طول خم در دیواره داخلی و خارجی، ممان خم و تخت‌شدگی در دیواره خارجی تحقیق نمود<sup>[7]</sup>. آگاروال و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی تنش‌ها، تغییر ضخامت دیواره، نرخ چروکیدگی در دیواره داخلی لوله و ممان خم، در فرآیند خم کاری لوله با استفاده از نیروی محوری کششی و فشار داخلی پرداختند<sup>[8]</sup>. جان و همکاران در سال ۲۰۱۵ شبیه‌سازی و رابطه محاسباتی الاستیک-پلاستیک خم کاری دورانی لوله‌های فولاد زنگ‌نزن با استحکام بالا را بررسی نمودند<sup>[9]</sup>. حرارت دهی موضعی یکی از اقداماتی است که توسط قیوتی و همکارانش به انجام رسیده است<sup>[10]</sup>. آنها در پژوهش خود با بکارگیری روشی تحلیلی به پیش‌بینی توزیع تنش و کرنش در مقطع و اثرات آن بر برگشت فنی بواسطه حرارت موضعی داده شده به قطعه پرداخته‌اند. هونگ وی لینگ و همکارانش به بررسی سازوکار فرم دهی و مشخصات فرآیند شکل‌دهی خم یک لوله با ضخامت جداره ضخیم با استفاده از یک جفت غلتک مخروطی پرداختند<sup>[11]</sup>. فرهمند و همکارانش در مقاله‌ای به عنوان تحلیل کران بالایی لوله‌های شکل‌پذیر مجدد با ضخامت دیواره ضخیم و سطح مقطع چندضلعی در فرآیند شکل‌دهی لوله چند مرحله‌ای پرداختند<sup>[12]</sup>. جرارد ویشر و همکارانش در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی عددی و تجربی لوله‌های فولادی با دیواره‌ی نازک و بررسی و شبیه‌سازی لوله‌های فولادی جدار نازک پرداختند<sup>[13]</sup>. ریچلر و همکارانش به بررسی فرم دهی لوله‌هایی با آلیاژ منیزیم پرداختند. آن‌ها از آزمایش‌های تجربی و روابط تحلیلی برای بررسی فرآیند استفاده نمودند<sup>[14]</sup>. هونگ لی و

لوله‌ها با یکدیگر مقایسه شوند. اهمیت این موضوع در این است که با انتخاب جنس مناسب برای قالب خم کاری لوله، علاوه بر این که می‌توان باعث کاهش مقدار نیروی وارد شده به لوله‌ها شد می‌توان مقدار چروکیدگی و نازک شدگی بیش از حد را نیز کاهش داد.

## ۲- روش تحقیق

این روش شامل ابزارهای کلی نشان داده شده در شکل ۱ می‌باشد که با توجه به شرایط خم کاری همه یا بعضی از این ابزارها استفاده می‌شوند. روش خم کاری به این صورت می‌باشد که مندرل در داخل لوله قرار می‌گیرد و ابزارهای دیگر حرکت کرده و اطراف لوله را احاطه می‌کنند. سپس قالب خم و گیره حول مرکز قالب خم به چرخش درمی‌آیند و لوله بر روی قالب خم کشیده می‌شود و خم کاری صورت می‌گیرد [25]. در این پژوهش از قالب خم کاری کششی دورانی شامل ابزارهای کمکی زیر استفاده شده است:

۱- قالب خم کاری که با استفاده از آن و قطر ایجاد شده بر روی این قالب، شعاع خم مورد نظر بر روی لوله ایجاد می‌گردد. لوله بر روی شیار به وجود آمده، روی این قالب کشیده می‌شود.

۲- قالب گیره که عمل گرفتن لوله را به وسیله قالب خم کاری انجام می‌دهد و مانع از لغزش و بازگشت لوله به موقعیت اولیه در حین فرآیند خم کاری لوله می‌شود. بر روی سطح داخلی قالب گیره و همچنین بر روی سطح داخلی بخش گیره قالب خمکاری، با استفاده از روش سند بلاست و یا با ایجاد شیارهایی بر روی سطوح آن‌ها مانع از لغزش لوله در حین فرآیند خم کاری لوله می‌شوند.

۳- قالب فشار جهت اعمال فشار به لوله و جلوگیری از چرخش لوله همراه قالب خم و قالب گیره عمل می‌کند. به بیان ساده می‌توان گفت که قالب فشار نیروی عکس‌العمل خم را به لوله وارد می‌کند.

۴- قالب لغزنده: این قالب در نقطه مقابل لوله، نقطه تماس مندرل در دیواره خارجی لوله قرار گرفته است و مانع از چروک شدگی لوله در هنگام خم کاری می‌گردد. مندرل در سطح داخلی و لغزنده در سطح خارجی لوله و هر دو در نقطه تماس مندرل به قالب خم، مانع از چروک شدن لوله می‌گردند.

به منظور تعیین ابعاد ابزارهای مورد استفاده در خم کاری لوله به روش کششی-دورانی از جدول ۱ استفاده می‌شود.



شکل ۱) دستگاه و تجهیزات خمش لوله مورد استفاده در این پژوهش

همکارانش تأثیر قطر لوله و ضخامت لوله را بر چروکیدگی، نازک شدن جداره و تغییر شکل سطح مقطع لوله با استفاده از آزمایش، روابط تحلیلی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار بررسی کردند [15]. زانگ زی ژونگ و همکارانش چروکیدگی و نازک شدن جداره‌ی لوله از جنس CP-Ti با استفاده از آزمایش و روش تحلیلی و با شبیه‌سازی در نرم‌افزار برای خمش لوله را مورد بررسی قرار دادند [16]. اندازه-گیری برگشت فنری در حین فرآیند یکی از اقداماتی است که اخیراً توسط سیمونتو و همکارانش به انجام رسیده است [17]. کنترل بر خط برگشت فنری باعث می‌شود تا با انجام تنظیمات عوامل فرآیند مقدار برگشت فنری جبران گردد. ژایو و همکارانش حدود چروکیدگی و شعاع خمش مینیمم که در آن چروکیدگی وجود نداشته باشد را برای لوله‌ی جدارنازک با سطح مقطع مربعی شکل در فرایند خمش دورانی مورد بررسی قرار دادند [18]. در زمینه مدل‌سازی اجزا محدود فرآیند خم کاری کششی-دورانی لوله‌ها، ژو و همکارانش [19] به مدل‌سازی سه بعدی لوله‌های دو جنسی تیتانیوم-مس پرداخته‌اند. آنها در مدل‌سازی خود دو نوع مدل پوسته‌ای و حجمی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. صفدریان [20] به بررسی تجربی و عددی شکست لوله‌ها در فرآیند خم کاری کششی-دورانی پرداخته است. به منظور اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی، تغییرات ضخامت دیواره‌ی خارجی خم مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیش‌بینی برگشت فنری لوله در خم کاری کششی-دورانی بدون مندرل پژوهشی است که توسط ژاوو و همکارانش [21] در سال ۲۰۲۱ به انجام رسیده است. سیدحاتمی و لکسیان [22] به آنالیز خم کاری کششی-دورانی لوله‌های نازک آلومینیومی پرداخته‌اند. آنها تحلیل خود را در نرم‌افزار آباکوس به انجام رسانده‌اند. ارائه‌ی یک راه حل تحلیلی در مورد برگشت فنری برای خم کاری لوله‌ها توسط ما و همکارانش [23] در سال ۲۰۲۱ ارائه شده است. آنها در تحلیل خود از لوله‌های استحکام بالای تیتانیومی استفاده کرده‌اند. مدل ارائه شده توسط آنها خطای تقریبی ۶٪ را دارا است. ها و همکارانش [24] اندازه‌گیری برگشت فنری در حین فرآیند را در سال ۲۰۲۰ به انجام رسانده‌اند. برای این منظور از یک سیستم لیزری استفاده کرده‌اند.

با بررسی مقالات و تحقیقات انجام شده مشخص گردیده است که محققان بیشتر روی مواردی مانند زاویه خم، برگشت فنری، شعاع خم، تغییر شکل سطح مقطع لوله و نازک‌شدگی با توجه به این که چروکیدگی و گسیختگی نباید در لوله به وجود بیاید تمرکز دارند. زیرا این موارد جزو مهمترین عوامل مورد بررسی در خم لوله هستند. راهکارهایی برای جلوگیری از چروکیدگی لوله مانند کاهش فشار داخلی لوله و کاهش لقی بین قالب و لوله نیز پیشنهاد شده است.

در راستای کامل کردن تحقیقات، به دلیل اهمیتی که جنس مندرل در نیروها و چروکیدگی دارد سعی بر این شده است تا با استفاده از دو جنس مندرل پلی‌بورتان و نیتریل، نتایج حاصل از خم کاری

جدول (۱) ابعاد و ابزارهای قالب خم کاری کششی - دورانی

نام قالب	ابعاد
خم	قطر قالب = 2R [26]
گیره	طول قالب گیره = 90D [25]
فشار(بوستر ۱۳)	طول قالب فشار = Rα + 20D [13]
واپپر	فاصله بین لغزنده و قالب خم = 3/048 الی ۴/۵۷۲ میلی‌متر زاویه قالب لغزنده با محور لوله = ۰/۵ تا ۱ درجه [27]

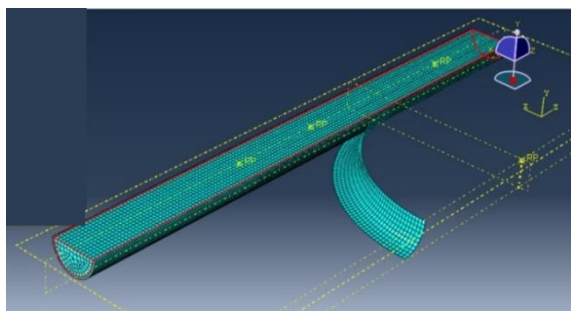
همچنین جهت به دست آوردن خواص مکانیکی فولاد ۳۰۴ نمونه- ای لوله‌ای شکل با طول معین مطابق با استاندارد ASTM-E8 تحت تست کشش قرار گرفت. مدول یانگ فولاد ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۳۳ استخراج گردید. همچنین مدول یانگ الاستومر ۵/۵۱۷ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۴۹ لحاظ گردید.

### ۳- مدل سازی اجزا محدود فرآیند خم کاری کششی-دورانی لوله

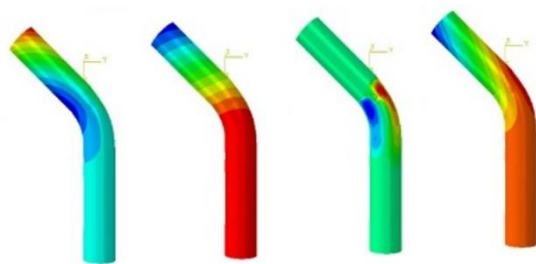
در ادامه، اجزای قالب خمش با استفاده از نرم افزار آباکوس به صورت سه بعدی مدل سازی شده و با تعریف خواص، بارگذاری‌ها و شرایط مرزی برای حالات و شرایط مختلف فرآیند مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در فرآیند شبیه سازی قالب‌ها جسم صلب و لوله نیز جسم شکل پذیر مدل شده و اجزای مربوط به هرکدام اعمال گردید. مش بندی قالب‌ها تأثیری در فرآیند حل شبیه سازی ندارند اما هم گرایی مش در تحلیل لوله و خروجی نتایج درست حائز اهمیت است که به آن پرداخته شده است. در این پژوهش بمنظور بررسی اثرات جنس مندرل، قطر لوله و شعاع خم بر نیروی خم کاری و توزیع ضخامت لوله‌های فولاد ضد زنگ ۳۰۴، از نرم افزار المان محدود آباکوس و بر اساس جدول ۲ استفاده شد. در شکل ۳ نمایی از محیط شبیه سازی فرآیند خم کاری کششی-دورانی به همراه نتایج از شبیه سازی فرآیند خم کاری کششی-دورانی قابل مشاهده می‌باشد.

### ۴- نتایج و بحث

قبل از آغاز شبیه سازی فرآیند تحت تحت مختلف، به اعتبارسنجی نتایج عددی پرداخته شد. برای این منظور توزیع ضخامت لوله به



(الف)



(ب)

شکل (۳) نمایی از شبیه سازی فرآیند خم کاری کششی-دورانی (ب) نمایی از نتایج شبیه سازی فرآیند خم کاری کششی-دورانی

که در آن R شعاع خم، OD شعاع خارجی لوله، α زاویه خم می‌باشند. همچنین رابطه تنظیم سرعت بوستر به صورت معادله ۱ نوشته می‌شود.

$$(۱) \quad \text{محیط کمان} = \frac{2 \times \pi \times R \times \alpha}{360}$$

میزان حرکت قالب فشار باید حداقل به میزان محیط کمان باشد. در این تحقیق بعد از مونتاژ قالب‌هایی که اجزاء آن معرفی شد، لوله‌هایی به ابعادی که در جدول ۲ معرفی گردیده با مندرل‌های پلی-یورتان و نیتریل مورد خم کاری قرار گرفتند که برای این منظور ابتدا داخل لوله و روی مندرل و سطح داخلی واپپر را با گریس مخصوص آغشته کرده و مندرل داخل لوله قرار داده شده است. سپس از طریق کنترلر دستگاه CNC و به صورت دستی مندرل به داخل لوله هدایت شده و سپس قالب گیره و قالب فشار بسته شده و با کنترل قالب‌های لغزنده و خم کاری به صورت خودکار قطعه خم شده است.

در شکل ۲ نمونه‌ای از لوله‌های خم شده با دو مندرل پلی‌یورتان و نیتریل قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۲) متغیرهای آزمایش

شعاع خم (mm)	قطر لوله (mm)	جنس مندرل	حالات آزمایش
۶۲/۵	۲۵/۴	نیتریل	۱
۶۵	۲۵/۴	نیتریل	۲
۵۷	۳۸	نیتریل	۳
۸۰	۳۸	نیتریل	۴
۶۲/۵	۲۵/۴	پلی‌یورتان	۵
۶۵	۲۵/۴	پلی‌یورتان	۶
۵۷	۳۸	پلی‌یورتان	۷
۸۰	۳۸	پلی‌یورتان	۸



(الف)

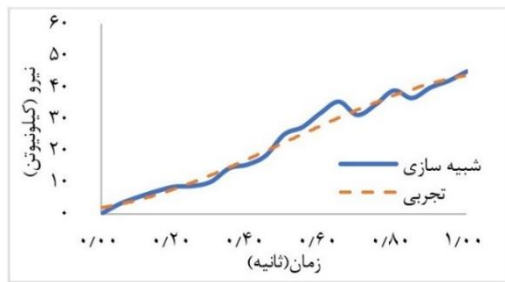


(ب)

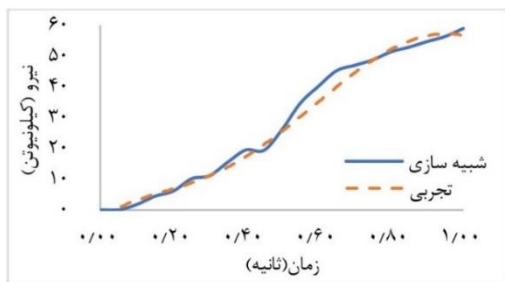
شکل (۲) نمونه لوله خم شده با استفاده از مندرل (الف) نیتریل (ب) پلی-یورتان

کششی-دورانی استفاده شود. در حین فرآیند خم کاری، دیواره خارجی لوله مسافت بیشتری نسبت به محور لوله طی می کند و ماده به ناچار کشیده می شود؛ و از سوی دیگر، مسافتی که دیواره داخلی لوله طی می کند کمتر از محور لوله بوده بنابراین مواد اضافی در این ناحیه متراکم می شوند و دیواره در این ناحیه ضخیم می گردد. به چنین پدیده ای در مرجع راهنمای خم کاری لوله ها نیز اشاره شده است [26].

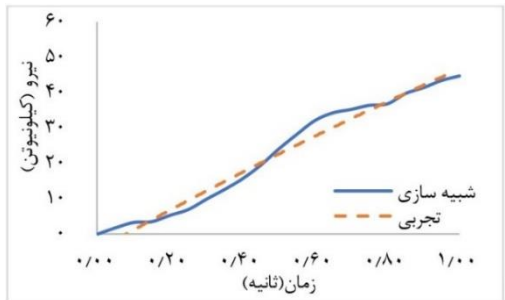
در شکل ۶ و ۷ نتایج حاصل از نیروی خم کاری حالات مختلف برای شبیه سازی و تست تجربی مندرل نیتریل و پلی یورتان قابل مشاهده است.



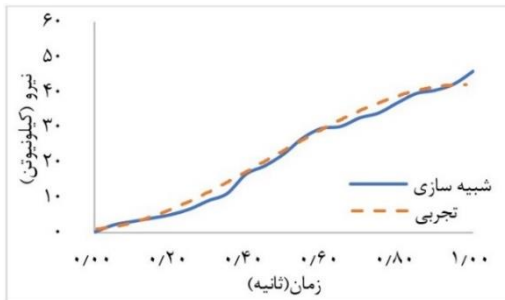
(الف)



(ب)



(ج)



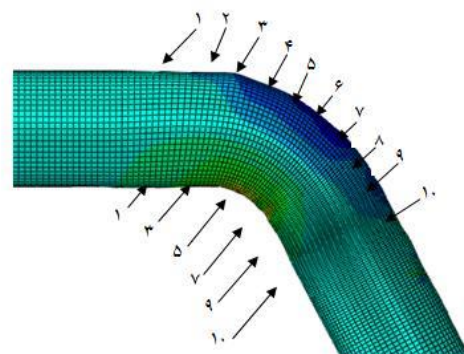
(د)

**شکل ۶** نیروی شکل دهی با استفاده از مندرل نیتریل برای (الف) قطر لوله ۲۵/۴ و شعاع خم ۶۲/۵ (ب) قطر لوله ۲۵/۴ و شعاع خم ۶۵ (ج) قطر لوله ۳۸ و شعاع خم ۵۷ (د) قطر لوله ۳۸ و شعاع خم ۸۰

روش تجربی و شبیه سازی مقایسه گردید. در تحلیل المان محدود، خم کاری لوله با زاویه ۴۵ درجه صورت پذیرفت. نمودار توزیع ضخامت در ناحیه داخلی خم کاری لوله ۲۵/۴ میلی متر با زاویه ۴۵ درجه در ده نقطه نمایش داده شده است (شکل ۴).

همان طور که در شکل های ۵-الف) و ۵-ب) مشخص است، با مقایسه ضخامت های به دست آمده از آزمایش ها و شبیه سازی، میزان خطای ناشی، از نرم افزار آباکوس به دست آمده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، میانگین کاهش ضخامت در دیواره خارجی ۷/۲۶ درصد و میانگین افزایش ضخامت در دیواره داخلی خم ۹/۵ درصد است. بنابراین می توان از نتایج حاصل از آباکوس نیز جهت استفاده در فرآیند خم کاری لوله به روش



**شکل ۴** نقاط اندازه گیری شده خم کاری لوله ۲۵/۴ میلی متر با زاویه ۴۵ در شبیه سازی



(الف)



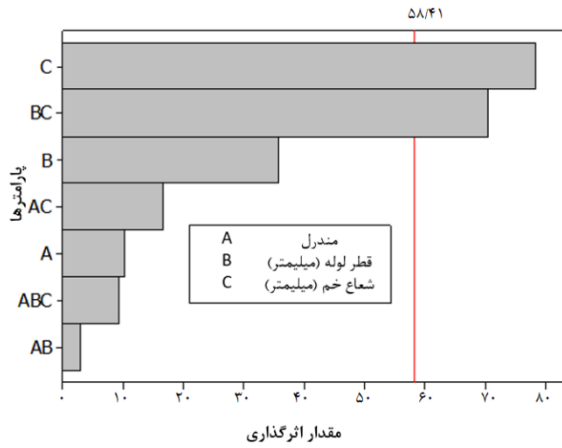
(ب)

**شکل ۵** (الف) نتایج حاصل از شبیه سازی و تست تجربی لوله به قطر ۲۵/۴ میلی متر با زاویه ۴۵ درجه در ناحیه خارجی (ب) نتایج حاصل از شبیه سازی و تست تجربی لوله ۳۸ به قطر میلی متر با زاویه ۴۵ درجه در ناحیه داخلی



میانگین بین نتایج شبیه سازی و تجربی در حدود ۷ درصد می-باشد.

در ادامه و به منظور بررسی اثرات عوامل فرآیند بر نیروی حداکثر شکل‌دهی، از نرم افزار مینی‌تب استفاده شد. شکل ۸ دیاگرام پارتو مربوط به عوامل فرآیند را نشان می‌دهد.

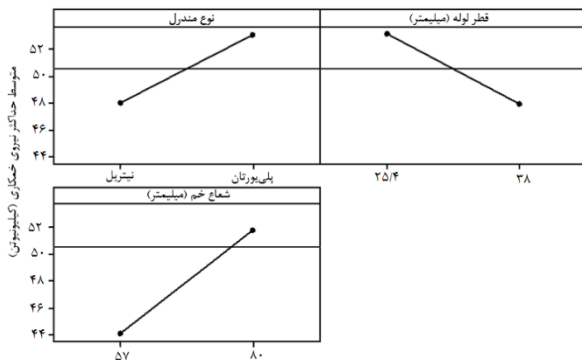


شکل ۸) دیاگرام پارتو برای بررسی اثرات متقابل پارامترهای فرآیند

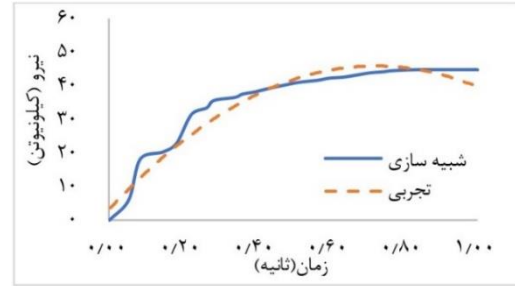
با توجه به شکل ۸ به صورت واضح مشخص شده است که عامل شعاع خم بیشترین تاثیر را روی حداکثر نیروی شکل‌دهی می-گذارد. همچنین ترکیب شعاع خم و قطر لوله در مرحله بعدی اثرگذاری قرار دارند. در شکل ۹ اثرات تک تک پارامترهای فرآیند بر نیروی حداکثر شکل‌دهی گزارش شده است.

همان‌گونه که از شکل ۹ قابل مشاهده است، استفاده از مندرل پلی‌یورتان نیروهای خم کاری بیشتری را نسبت به مندرل نیتریل نشان می‌دهد. همچنین با افزایش قطر لوله، نیروی خم کاری کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر افزایش شعاع خم باعث افزایش نیروهای خم کاری در فرآیند می‌شود.

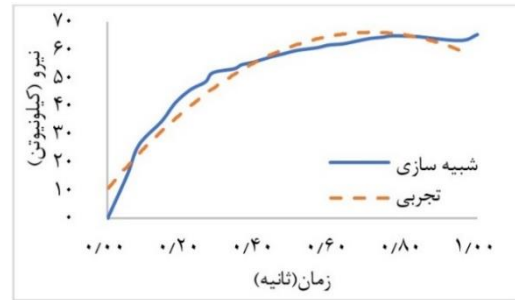
در پایان نیز به منظور بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر نیروی حداکثر خم کاری از کانتور اثرات متقابل استفاده شده است. شکل ۱۰ گراف‌های مد نظر را نمایش می‌دهد.



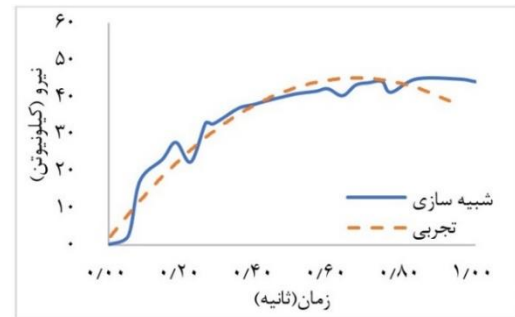
شکل ۹) دیاگرام اثرات میانگین برای تغییرات نیرو بر حسب پارامترهای فرآیند



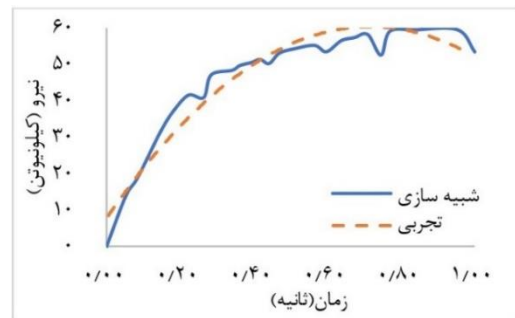
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷) نیروی شکل‌دهی با استفاده از مندرل پلی‌یورتان برای (الف) قطر لوله ۲۵/۴ و شعاع خم ۶۲/۵ (ب) قطر لوله ۲۵/۴ و شعاع خم ۶۵ (ج) قطر لوله ۳۸ و شعاع خم ۵۷ (د) قطر لوله ۳۸ و شعاع خم ۸۰

نتایج حاصل از تحلیل نیروها نشان می‌دهد که فرآیند خمش با مندرل پلی‌یورتان تا حدودی نیروهای بیشتری را به قالب خمش وارد می‌کند. لازم به ذکر است که این دو مندرل نسبت به مندرل-های دیگر نیروهای کمتری را داشته و تقریباً استفاده از این دو مندرل با تقریب خوبی نتایج مشابهی را ایجاد می‌کند. خطای

۳- با افزایش میزان شعاع خم کاری نیروهای شکل دهی نیز افزایش می یابند. برای لوله های با قطر کم، افزایش ۳۰ درصدی شعاع خم منجر به ۵ برابر شدن مقدار نیروی خم کاری می شود. با افزایش قطر لوله، اثرات شعاع خم کاری بر نیروی خم کاری به شدت کاهش می یابد.

۴- نتایج نشان دادند استفاده از مندرل پلی یورتان نیروهای شکل دهی بیشتری نسبت به مندرل نیتریل حاصل می شود. به عنوان مثال در یک قطر و شعاع خم ثابت، مقدار نیروی خم کاری در حالت استفاده از پلی یورتان ۲۵ درصد بیشتر از مندرل نیتریل می باشد.

۵- نیروهای خم کاری در مندرل با الاستومر پلی یورتان از مندرل الاستومر نیتریل بیشتر است.

۶- نتایج عددی و تجربی مربوط به تغییرات ضخامت دیواره لوله بیانگر این نکته است که بیشترین کاهش ضخامت مربوط به خم خارجی و بیشترین افزایش ضخامت دیواره مربوط به خم داخلی می باشد.

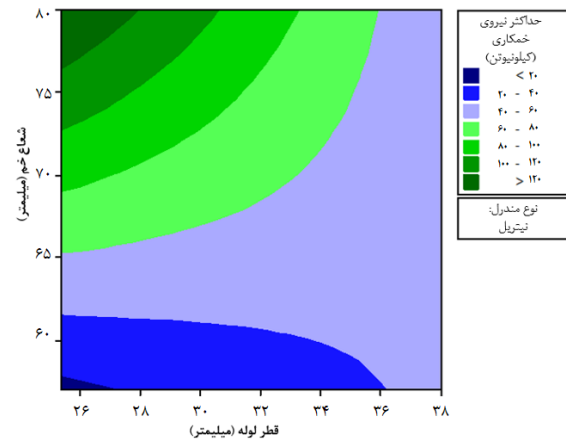
**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر با هیچ شخص و یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

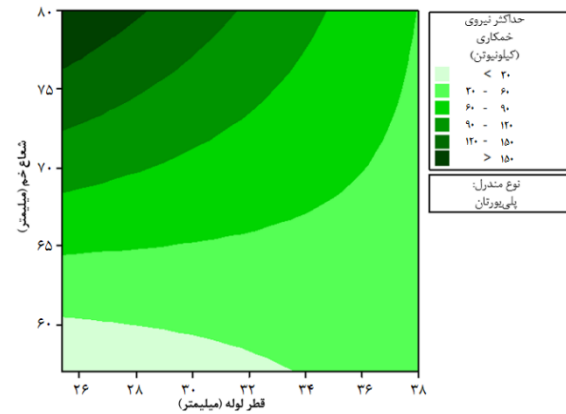
**منابع مالی:** منابع مالی از پژوهانه اساتید تامین شده است.

### منابع

- 1- Trana K. Finite element simulation of the tube hydroforming process—bending, preforming and hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;127(3):401-8.
- 2- Heng L, He Y, Mei Z, Zhichao S, Ruijie G. Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(7-8):1164-75.
- 3- Gu RJ, Yang H, Zhan M, Li H, Li HW. Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process. *Computational Materials Science*. 2008;42(4):537-49.
- 4- Zhao GY, Liu YL, Yang H, Lu CH, Gu RJ. Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;499(1-2):257-61.
- 5- He Y, Jing Y, Mei Z, Heng L, Yongle K. 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints. *Computational Materials Science*. 2009;45(4):1052-67.
- 6- Li H, Yang H, Yan J, Zhan M. Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius. *Computational Materials Science*. 2009;45(4):921-34.
- 7- Tang NC. Plastic-deformation analysis in tube bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000;77(12):751-9.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۰** کانتور مربوط به اثر پارامترهای شعاع خم و قطر لوله بر نیروی حداکثر خم کاری برای مندرل (الف) نیتریل (ب) پلی یورتان

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود که در هنگام استفاده از مندرلهای مختلف، بیشترین نیروی خم کاری برای شعاع خم بالا و قطر لوله پایین بدست می آید.

### ۵- جمع بندی

در این مقاله به مطالعه تجربی و عددی اثرات عوامل قطر لوله و شعاع خم در فرایند خم کاری کششی-دورانی لوله هایی از جنس SS-304 پرداخته شد. برای این منظور برای اولین بار دو جنس مندرل پلی یورتان و نیتریل مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به نتایج شبیه سازی و آزمون های تجربی در این پژوهش نسبت به عوامل مذکور نتایج به شرح زیر است:

۱- حداکثر خطای بین نتایج تجربی و عددی در پیش بینی تغییرات ضخامت در خم خارجی حدوداً ۱۳ درصد می باشد. این خطا برای خم داخلی حدوداً ۱۱ درصد بدست آمده است.

۲- با توجه به نتایج تجربی و عددی به دست آمده، فرایند خم کاری لوله با قطرهای (۲۵/۴ و ۳۸) میلی متر با زاویه لغزنده ۰/۵ تا ۱ درجه قابل انجام است. لازم به ذکر است با توجه به نتایج مذکور هر چه قطر خارجی لوله افزایش پیدا کند نیروهای لازم برای خم کاری کاهش می یابد.

- Aluminum Tube. Iranian Journal of Materials Forming. 2020;7(1):70-83.
- 23- Ma J, Li H, Fu MW. Modelling of springback in tube bending: A generalized analytical approach. International Journal of Mechanical Sciences. 2021;204:106516.
- 24- Ha T, Ma J, Blindheim J, Welo T, Ringen G, Wang J. In-line springback measurement for tube bending using a laser system. Procedia Manufacturing. 2020;47:766-73.
- 25- Miller GG. Tube forming processes: a comprehensive guide. Society of Manufacturing Engineers; 2003.
- 26- <http://www.hineshending.com>, Hines Bending systems, Basic Tube Bending Guide.
- 27- Stange RR. Tube and pipe bending: principles, methods, tooling, techniques, developments. Tools for bending Inc. 1997.
- 8- Wang J, Agarwal R. Tube bending under axial force and internal pressure. Transactions of the ASME. 2006 128:598-605.
- 9- Fang J, Lu S, Wang K, Yao Z. Three-dimensional finite element model of high strength 21-6-9 stainless steel tube in rotary draw bending and its application. 2015, 22:141-152.
- 10- Ghiotti A, Simonetto E, Bruschi S. Insights on tube rotary draw bending with superimposed localized thermal field. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021;33:30-41.
- 11- Li HW, Ren GY, Li ZJ, Feng L, Yang H. Forming mechanism and characteristics of a process for equal-thickness in-plane ring roll-bending of a metal strip by twin conical rolls. Journal of Materials Processing Technology. 2016;227:288-307.
- 12- Farahmand HR, Abrinia K. An upper bound analysis for reshaping thick tubes to polygonal cross-section tubes through multistage roll forming process. International Journal of Mechanical Sciences. 2015;100:90-8.
- 13- Raujol-Veillé J, Toussaint F, Tabourot L, Vautrot M, Balland P. Experimental and numerical investigation of a short, thin-walled steel tube incremental forming process. Journal of Manufacturing Processes. 2015;19:59-66.
- 14- Li Z, Zheng Z, Yu J, Guo L. Crashworthiness of foam-filled thin-walled circular tubes under dynamic bending. Materials & Design (1980-2015). 2013;52:1058-64.
- 15- He Y, Heng L, Zhang Z, Mei ZH, Jing LI, Guangjun L. Advances and trends on tube bending forming technologies. Chinese Journal of Aeronautics. 2012;25(1):1-2.
- 16- Zhang ZY, He YA, Heng LI, Ning RE, Tian YL. Bending behaviors of large diameter thin-walled CP-Ti tube in rotary draw bending. Progress in Natural Science: Materials International. 2011;21(5):401-12.
- 17- Simonetto E, Ghiotti A, Bruschi S. In-process measurement of springback in tube rotary draw bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;112(9):2485-96.
- 18- Zhao GY, Liu YL, Dong CS, Yang H, Fan XG. Analysis of wrinkling limit of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube. Journal of Materials Processing Technology. 2010;210(9):1224-31.
- 19- Zhu YX, Chen W, Tu WB, Guo Y, Chen L. Three-dimensional finite element modeling of rotary-draw bending of copper-titanium composite tube. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020;106(5):2377-89.
- 20- Safdarian R. Investigation of tube fracture in the rotary draw bending process using experimental and numerical methods. International Journal of Material Forming. 2020;13(4):493-516.
- 21- Zhou H, Zhang S, Qiu L, Wang Z. Springback angle prediction of circular metal tube considering the interference of cross-sectional distortion in mandrel-less rotary draw bending. Science Progress. 2021;104(1):0036850420984303.
- 22- Seyyedhatami SM, Lexian H. Analysis of the Rotary-draw Bending Process for Thin-walled Rectangular