



تأثیر مندرل‌های پلی‌یورتان و NBR در فرآیند خم دورانی لوله فولادی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی

سیدعلی پورسیدرضایی^۱، مجید جباری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

* خمینی‌شهر، صندوق پستی ۱۱۹-۸۴۱۷۵، jabbari@iaukhsh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۱۳ مرداد ۱۳۹۸ پذیرش: ۵ آذر ۱۳۹۸ ارائه در سایت: ۲۵ آذر ۱۳۹۸	امروزه لوله‌های خمیده با شعاع خم گوناگون، کاربرد بسیاری در صنایع خودروسازی، هوافضا و کشتی‌سازی دارند. در خم‌کاری لوله‌ها، هر چه میزان شعاع خم کوچک‌تر و ضخامت دیواره لوله کمتر باشد احتمال ایجاد عیوبی نظیر چین و چروک و گسیختگی بیشتر می‌شود. برطرف کردن این عیوب، یکی از مسایل مهم می‌باشد. به این منظور جهت کاهش چروکیدگی و گسیختگی نیاز به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی ابزار خم‌کاری، قالب و مندرل‌های مورد استفاده در لوله می‌باشد. نوع مندرل استفاده شده در فرآیند خم‌کاری لوله می‌تواند علاوه بر کاهش عیوب موردنظر در بهینه کردن نیروی قالب خم‌کاری تأثیرگذار باشد. این مقاله شبیه‌سازی و آزمایش تجربی فرآیند خم دورانی لوله‌های فولادی با قطرهای مختلف با استفاده از مندرل‌های الاستومری پلی‌یورتان و NBR را ارائه می‌دهد و آنگاه بررسی نیروی خمکاری و انرژی‌های داخلی و جنبشی انجام می‌گردد. از جمله نوآوری‌های این پژوهش حصول پارامترهای بهینه به منظور خم کردن لوله بدون پارگی و گسیختگی و بررسی تأثیر نوع مندرل بر نیروی قالب می‌باشند. آزمایش تجربی جهت صحت‌سنجی نتایج با دقت مناسبی انجام شده است.
کلیدواژگان نیروی قالب فرآیند خم‌کاری لوله مندرل آزمایش تجربی شبیه‌سازی عددی	

The Effect of Polyurethane Mandrels and NBR in the Bending Process of Steel Pipe with using the Numerical Simulation and Experimental Test

Seyed Ali Poursayed Rezaee¹, Majid Jabbari^{2*}

1-Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran

* P.O.B. 84175-119 Khomeinishahr/Isfahan, Iran, jabbari@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 4 August 2019
Accepted 26 November 2019
Available Online 16 December 2019

Keywords

Mold Force
Tube Bending
Mandrels
Experimental Test
Numerical Simulation.

ABSTRACT

Today, the bent tubes of various bending radius are widely used in the automobile, aerospace, and shipbuilding industries. In the tubes bending, the smaller the bending radius and wall thickness of the tube, the greater the likelihood of defects such as wrinkle, rupture and non-circularity of the cross-section of the tube. Therefore, one of the most important issues is how to fix these defects. For the reduction of wrinkle and rupture, the effect of geometric parameters of bending tools, mold and mandrels in pipes are been considerate. The type of mandrel used in the bending process can be effective in optimizing bending mold force and the reduction of wrinkle and rupture. In the paper, the simulation and test of the rotational tube bending process will be presented with using elastomer mandrels of polyurethane elastomeric mandrels and NBR and then the crucial mechanical and physical properties for steel tubes of different diameters. Then the optimal parameters are determined for bending the tube without rupture with using mold force, internal and kinetic energy. The test results verify the simulation results.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Seyed Ali Poursayed Rezaee, Majid Jabbari, The Effect of Polyurethane Mandrels and NBR in the Bending Process of Steel Pipe with using the Numerical Simulation and Experimental Test, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 3, pp. 13-21, 2019 (In Persian)

۱- مقدمه

لاگرانژی تحلیل خویش را انجام دادند و نتایج حاصل از این تحلیل را با نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی مقایسه نمودند [۴]. ژیبین لی و همکارانش در سال ۲۰۱۳، لوله را به سه شکل مختلف یعنی خالی، کاملاً پر و نیمه پر تحت بارگذاری دینامیکی قرار دادند و هر سه را خم کردند. شکل شکست و میزان جذب انرژی، توسط هر سه لوله بررسی شد و مشخص شد که به خاطر مقاومت خمشی دینامیکی بالا و نیز به دلیل تأثیرات جذب انرژی، لوله نیمه پر، یک ساختار شکست پذیر دارد [۵]. لی‌هن، پنی و شی‌کای و همکارانش در سال ۲۰۱۲، با استفاده از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی با نرم افزار آباگوس رفتار برگشت پذیری برای لوله‌ای با جنس AL-6061-T4 در خمش غلظتی لوله را بررسی نمودند تا بتوانند تغییر شکل خمشی دقیق را برای لوله مشخص کنند [۶]. هونگ‌لی و همکارانش در سال ۲۰۱۲، 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 نرم افزار بررسی کردند. در این تحقیق مشخص شد که هرچه قطر بزرگ‌تر شود و ضخامت کاهش یابد خاصیت ضد چروکیدگی کاهش می‌یابد و جداره بیشتر نازک می‌شود و تغییر شکل سطح مقطع نیز افزایش می‌یابد [۷]. مزیت عمده دیگر این روش، انتقال محور خنثی لوله به سمت ناحیه بیرونی خم (ناحیه کشش) می‌باشد. در نتیجه ناحیه وسیعی از سطح مقطع لوله تحت فشار قرار گرفته و از این رو میزان کاهش ضخامت لوله نسبت به روش‌های دیگر بسیار کمتر می‌گردد، تا جایی که می‌توان تمام ناحیه سطح لوله را وارد ناحیه فشار نمود [۸]. هنگامی که لوله تحت اثر فرآیند خم‌کاری قرار می‌گیرد دو اثر متفاوت در آن پدیدار می‌گردد. کشیدگی در ناحیه خارجی خم که باعث نازک شدن ضخامت در دیواره خارجی لوله شده و دیگری فشردگی در ناحیه داخلی خم که باعث افزایش ضخامت در دیواره داخلی لوله خواهد شد. دلایل این دو اثر این‌گونه بیان شده است که درحین فرآیند خم‌کاری، دیواره خارجی لوله مسافت بیشتری نسبت به محور لوله طی نموده و ماده به ناچار کشیده خواهد شد و از سوی دیگر، مسافتی که دیواره داخلی لوله طی می‌کند کمتر از محور لوله می‌باشد و

در خم‌کاری کششی دورانی در ابتدا لوله در محل شروع خم توسط گیره به قالب فشرده و محکم گرفته شده و سپس هر دو با هم شروع به دوران کرده و نتیجتاً لوله به درون قالب کشیده می‌گردد. جهت جلوگیری از تغییر فرم سطح مقطع لوله و بیضی شدن آن قالب فشاری به لوله فشرده شده و در اثر اصطکاک، به همراه لوله به جلو کشیده شده و همواره در نقطه شروع خم در مقابل قالب قرار می‌گیرد و مانع از تغییر شکل لوله و بیضی شدن آن در هنگام خم‌کاری می‌شود. به همین دلیل طول آن بایستی حداقل برابر طول خم باشد. در این روش برای خم‌کاری لوله‌هایی با ضخامت کم، از مندریل که در درون لوله قرار می‌گیرد، استفاده می‌گردد. مندریل موجب کنترل ابعاد هندسی و مانع از بیضی شدن لوله شده است. به عبارت ساده‌تر با استفاده از مندریل و قالب از تغییر شکل لوله به ترتیب از طرف داخل و بیرون در حین عملیات خم‌کاری جلوگیری می‌شود. هونگ‌وی، لینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی مکانیزم فرم دهی و مشخصات فرایند شکل دهی خم یک لوله با ضخامت جداره ضخیم با استفاده از یک جفت غلتک مخروطی پرداختند. وی و همکارانش پارامترهای مختلف تأثیر گذار بر فرایند خم لوله را مورد ارزیابی قرار دادند [۱]. فرهمند و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای به عنوان آنالیز کران بالای لوله‌های شکل پذیر مجدد با ضخامت دیواره ضخیم و سطح مقطع چند ضلعی در فرآیند شکل دهی لوله چند مرحله‌ای پرداختند. آنها با کدهای المان محدود به بررسی تنش پسماند و کرنش سختی ناشی از هر مرحله شکل دهی پرداخته و معادلات حاکم بر آنها را استخراج نمودند و با آزمایشات تجربی مقایسه کردند [۲]. جرارد ویشر و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در مقاله‌ای به عنوان ارزیابی عددی و تجربی لوله‌های فولادی با دیواره نازک و بررسی و شبیه‌سازی لوله‌های فولادی جدار نازک پرداختند [۳]. ریچلر و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی فرم دهی لوله‌هایی با آلیاژ منیزیم پرداختند. آنها از آزمایشات تجربی و روابط تحلیلی برای بررسی فرآیند استفاده نمودند معادلات حاکم بر این فرآیند فرم دهی را بررسی نموده و بر اساس معادلات دیفرانسیل محدود به روش

بنابراین مواد اضافی در این ناحیه متراکم گشته و دیواره در این ناحیه ضخیم می‌شود [۹]. با استفاده از قالب خم‌کاری و قطر ایجاد شده بر روی این قالب، شعاع خم مورد نظر بر روی لوله ایجاد خواهد شد. همان‌طور که بیان شد، لوله بر روی شیار به وجود آمده، روی این قالب کشیده می‌شود. قالب‌های خم از دو قسمت گیره و قالب فرم تشکیل می‌گردد. این دو قسمت یا به صورت یکپارچه تراشیده می‌شوند و یا اینکه دو قسمت به صورت مجزا تولید شده و سپس با استفاده از جوش دو بخش و یا با استفاده از پیچ و مهره به یکدیگر متصل می‌گردند. پس از تراشیدن قالب خم‌کاری، عملیات حرارتی مورد نظر با توجه به تعداد تولید، کیفیت تولید و دیگر فاکتورها بر روی آن‌ها صورت می‌پذیرد. جنس قالب‌های خم‌کاری و دیگر قالب‌ها نیز با توجه به تعداد خم تولید شده توسط قالب‌ها متفاوت انتخاب شده می‌شوند. قالب‌های ساخته شده از فولاد ابزار، ۵۸ تا ۶۲ راکول سخت می‌شوند، فولادهای نرم پر کربن ۵۰ تا ۵۵ راکول سخت می‌گردند. قالب‌های با فرم بزرگ از فولاد کم‌کربن ریختگی ساخته شده و سپس سخت‌کاری خواهند شد [۱۰].

ژایو و همکارانش در سال ۲۰۱۰، حدود چروکیدگی و شعاع خمش مینیمم که در آن چروکیدگی وجود نداشته باشد را برای لوله جدار نازک با سطح مقطع مربعی شکل در فرآیند خم دورانی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای پیش‌بینی یک مدل دقیق و سریع برای چروکیدگی از تئوری پلاستیسیته و روش انرژی استفاده کردند و سپس آزمایشاتی نیز روی لوله انجام دادند [۱۱].

یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ یک مدل تحلیلی بر اساس معیار انرژی برای پیش‌بینی چروکیدگی ارائه کردند. آنها با استفاده از این معیار، به روش کنترل عددی، حد چروکیدگی را در فرآیند خم‌کاری برای لوله‌های جدار نازک با قطر زیاد به دست آوردند [۱۲].

زانگ و ردیکاپ در سال ۲۰۰۶ خم‌کاری لوله به روش فشاری را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند و تعدادی از پارامترهای مؤثر بر شکل‌پذیری، شامل شعاع خم‌کاری، فشار

داخلی و ضریب اصطکاک را مورد تحلیل قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که کاهش شعاع خم، سبب افزایش تغییرات ضخامت می‌شود و افزایش فشار داخلی میزان چروک را کاهش می‌دهد. آنها دریافتند که تأثیر ضریب اصطکاک نسبت به سایر پارامترها کمتر بوده و افزایش آن باعث پیدایش چروک در نمونه می‌شود [۱۳].

وانگ و آگاروال در سال ۲۰۰۶ غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله و تغییرات ضخامتی دیواره لوله را در فرآیند خم‌کاری هیدروفورمینگ لوله، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی، به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با اعمال هم‌زمان فشار داخلی و نیروی محوری، غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع و چروکیدگی در شعاع داخلی لوله کاهش می‌یابد [۱۴].

لانفنگ و همکاران شبیه‌سازی عددی برای تغییر شکل لوله‌های جدار نازک با نسبت قطر به ضخامت بزرگ ارائه کردند که از مندرل نوع الاستیک بیونیک استفاده کردند [۱۵].

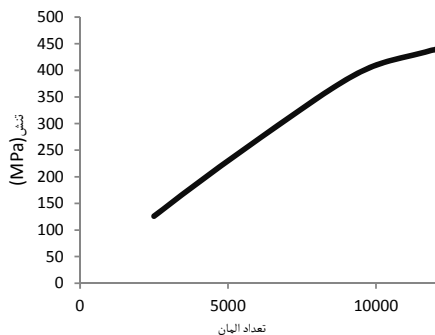
با بررسی تحقیقات انجام شده ملاحظه می‌شود استفاده از مغزی‌ها در خم‌کاری لوله‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله تلاش گردیده از نوع خاصی از مغزی‌های پلی‌یورتان و NBR استفاده شود. شبیه‌سازی و آزمایش تجربی فرآیند خم‌کاری لوله‌های توخالی فولادی با روش RDB به کمک مغزی‌های پلی‌یورتان و NBR انجام می‌شود. از جمله نوآوری‌های این مقاله حصول پارامترهای بهینه به منظور خم‌کردن لوله بدون پارگی و گسیختگی و بررسی تأثیر نوع مندرل بر نیروی قالب می‌باشند.

۲- نمونه مورد آزمایش و تحلیل

برای بدست آوردن خصوصیات فولاد ۳۰۴ ابتدا نمونه‌ای دمبلی شکل بر اساس اندازه استاندارد تست کشش ساخته و سپس تست کشش سرد روی آن انجام گردیده است (شکل ۱). اطلاعات حاصله از تست کشش در جدول ۱ و اطلاعات ابعادی برای شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

۳- شبیه‌سازی فرایند خمش لوله دورانی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR

غلتک‌ها به دلیل اینکه بر اساس جسم صلب مجزا مدل شده‌اند بنابراین به المان‌بندی نیاز خواهند داشت. البته المان‌های جسم صلب تأثیری در تحلیل و زمان شبیه‌سازی ندارند. مش‌بندی لوله با المان‌های شش وجهی و روش جاروب کردن انجام گرفته است. شکل ۲ نمودار همگرایی نتایج مدل اجزا محدود را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار همگرایی روش اجزا محدود جهت حصول نتایج مناسب، نیاز است نسبت انرژی جنبشی و انرژی درونی برای اندازه‌گیری اثرات دینامیکی محاسبه شود. در شبیه‌سازی‌ها، انرژی درونی به خاطر تغییر شکل پلاستیک می‌باشد و از آنجائی که لوله تنها جسمی می‌باشد که دارای جرم است انرژی جنبشی به ندرت باعث حرکت جسم خواهد شد. بنابراین اگر انرژی جنبشی در شکل ۳ از ۵-۱۰٪ انرژی درونی در شکل ۴ بیشتر نشود صحت شبیه‌سازی اثبات می‌شود. در این شبیه‌سازی نسبت انرژی جنبشی به دورنی حدود ۰/۱ یا ۱ درصد می‌باشد.



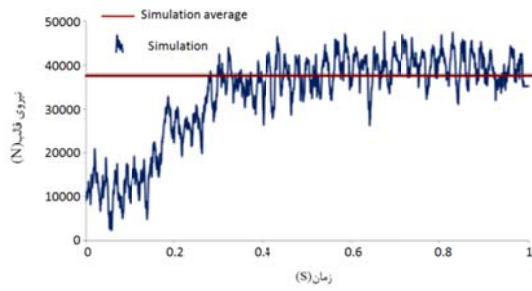
شکل ۱ دستگاه تست کشش

جدول ۱- خصوصیات جنس فولاد ۳۰۴ و الاستومرهای پلی‌یورتان و NBR

فولاد ۳۰۴	جنس لوله
۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی فولاد
۰/۳۳	ضریب پواسن فولاد
۲۱۰ گیگا پاسکال	مدول یانگ فولاد
پلی یورتان	جنس بالشتک
۰/۱۸۴	C01
۰/۷۳۶	C10
۵/۵۱۷ مگا پاسکال	مدول یانگ الاستومر
۰/۴۹	ضریب پواسن الاستومر
NBR	جنس بالشتک
۰/۵۴۶۸	C01
۰/۸۱۴۱۶۹	C10
۲۶۰ مگا پاسکال	تنش تسلیم
۴۹۰ مگا پاسکال	تنش نهایی

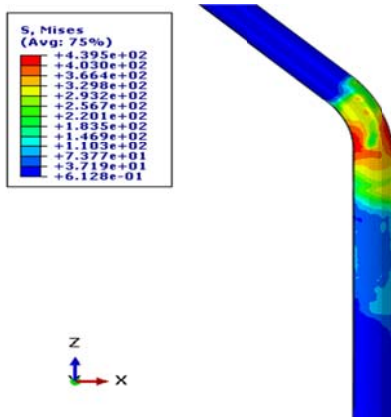
جدول ۲ اطلاعات ابعادی برای شبیه‌سازی و تست

۱ میلیمتر	ضخامت لوله
۲۵/۴ میلیمتر	قطر خارجی لوله
۲۲/۴ میلیمتر	قطر داخلی لوله
۴۵ درجه	مقدار خم لوله
۴۰ میلیمتر	شعاع خم لوله

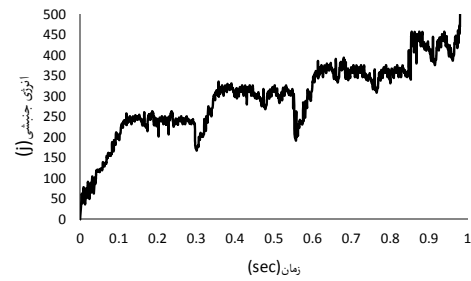


شکل ۶- نیروی قالب خمشی شبیه‌سازی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان

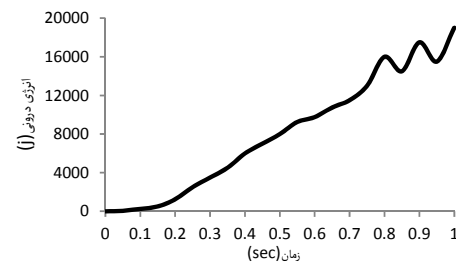
بر اساس بررسی روی نمودارها کاملاً مشخص است که نیروی قالب برای پلی‌یورتان به مراتب کمتر از قالب NBR است و با نیروی کمتری می‌توان قطعه مورد نظر را شکل داد. نتایج تنش ناشی از شبیه‌سازی فرایند خمش لوله دورانی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۷- معیار تنش فون مایز ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل NBR

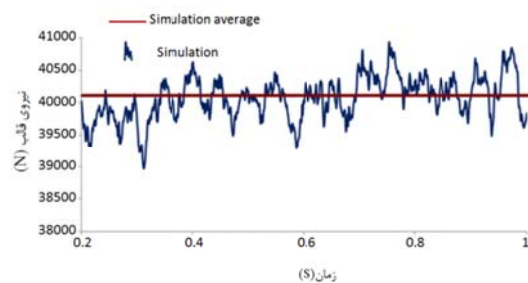


شکل ۳- انرژی جنبشی فولاد ۳۰۴ فرایند خمش دورانی لوله فولادی ۳۰۴



شکل ۴- انرژی دورانی فولاد ۳۰۴ فرایند خمش دورانی لوله فولادی ۳۰۴

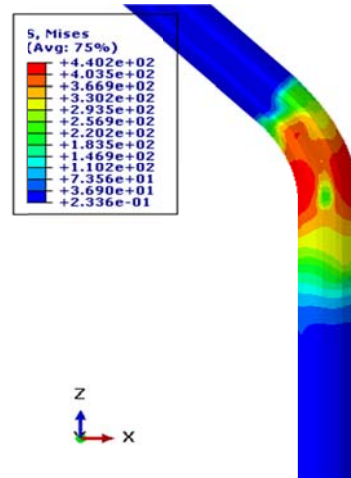
در فرایند خمش کششی دورانی دو قالب کلمپ و قالب فشاری بصورت قالب‌های پشتیبان بوده و نقش نگهداری لوله را در این شبیه‌سازی خواهد داشت و تنها قالب خمشی نقش قالب کاری را خواهد داشت که با تنظیم سرعت و نیروی مشخصی برای خمش لوله بکار می‌رود. شکل ۵ نیروی قالب خمشی شبیه‌سازی فولاد ۳۰۴ با مندرل NBR و شکل ۶ نیروی قالب خمشی شبیه‌سازی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان را نشان می‌دهند.



شکل ۵- نیروی قالب خمشی شبیه‌سازی فولاد ۳۰۴ با مندرل NBR

438	434	Third invariant
-----	-----	-----------------

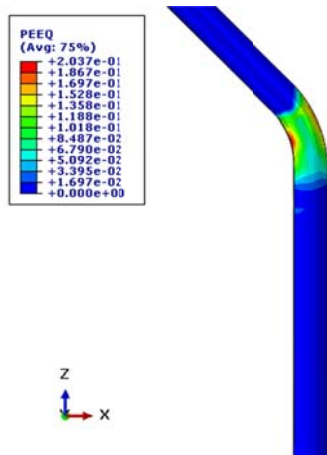
نتایج کرنش ناشی از شبیه‌سازی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. کرنش‌های ارائه شده معرف کرنش اعمالی بر لوله بوده و هر کرنش بر اساس نوع آن بیانگر نوعی از کرنش وارد شده بر لوله در اثر فرایند خمش کششی دورانی می‌باشد.



شکل ۸- معیار تنش فون مایز ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان

در شکل‌های ۷ و ۸ تنش فون مایز ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ در هر دو مندرل پلی‌یورتان و NBR تقریباً یکسان می‌باشد.

مقایسه بین نتایج حاصله تنش برای شرایط خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۹- کرنش ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل NBR

جدول ۳ مقایسه تنش‌های ناشی از شبیه‌سازی فرایند خمش دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR

معیار تنش	مندرل پلی‌یورتان (MPa)	مندرل NBR (MPa)
Mises	440	439
Max Principle	453	437
Max Principle (ABS)	453	437
Mid Principle	42.8	41
Min Principle	35.68	32
Tresca	500	483
Pressure	301	320

شکل ۱۰- کرنش ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان

در شکل‌های ۹ و ۱۰ کرنش ناشی از شبیه‌سازی خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ در هر دو مندرل پلی‌یورتان و NBR تقریباً یکسان



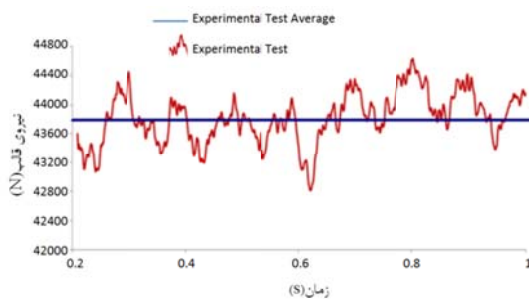
شکل ۱۱- نمونه مورد نظر برای تست تجربی فولاد ۳۰۴



شکل ۱۲- نمونه مورد نظر برای تست تجربی فولاد ۳۰۴



شکل ۱۳- نمونه مورد نظر برای تست تجربی فولاد ۳۰۴



شکل ۱۴- نیروی خمشی قالب فولاد ۳۰۴ با مندرل NBR

می‌باشد. مقایسه بین نتایج حاصله کرنش برای شرایط خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴ مقایسه کرنش‌های ناشی از شبیه‌سازی فرایند خم دورانی لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR

حالت مندرل پلی‌یورتان	حالت مندرل NBR	کرنش
1.75E-01	1.76E-01	PE, Max principle
3.99E-02	6.12E-02	Mid Principle
1.37E-02	1.62E-02	Min Principle

بر طبق نتایج حاصله بیشترین کرنش حاصله در دو حالت پلی‌یورتان و NBR به یکدیگر نزدیک می‌باشد و نوع مندرل تأثیری بر این نتایج ندارد.

۴- آزمایش تجربی فرایند خمش لوله دورانی فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان و NBR و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی

در این بخش آزمایش‌های لازم برای خم نمودن لوله فولادی انجام خواهد شد و نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های تجربی مقایسه می‌شود و صحت‌سنجی و اثبات درستی مدل شبیه‌سازی شده ارائه می‌شود. در این بین پارامترهایی نظیر زاویه دوران قالب خم و همچنین ویژگی‌های لوله، مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت. استفاده از معیارهای شکست، پیش بینی دقیق و کاملی را از شرایط چروکیدگی، گسستگی، ترک، پارگی و سایر تغییر شکل‌ها در شرایط مختلف امکان‌پذیر می‌نماید.

نمونه مورد نظر برای تست با مشخصات ذکر شده برای شبیه‌سازی در شکل ۱۱ و دستگاه تست جهت خم نمودن لوله در دو حالت خم در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. مهم‌ترین و اصلی‌ترین پارامتر مورد نیاز برای صحت‌سنجی نیروی حاصل از غلتک‌کاری می‌باشد که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ حاصل از دستگاه خم‌ساختار شده و با نتیجه حاصل از شبیه‌سازی مقایسه گردیده است و برای کلیه تست‌ها میزان درصد خطای ناشی از تست عملی و شبیه‌سازی حاصل خواهد شد.

کششی-چرخشی جهت بررسی تأثیر نوع مندرل پرداخته شده است. آنگاه بررسی پارامترهای کنترلی و غیرکنترلی فرآیند خم کاری کششی-چرخشی جهت کم کردن هزینه‌های ساخت در صنایع گوناگون ارائه شده است. از جمله نوآوری‌های این مقاله حصول پارامترهای بهینه به منظور خم کردن لوله بدون پارگی و گسیختگی و بررسی تأثیر نوع مندرل بر نیروی قالب می‌باشند. به عنوان نتایج کلی از این تحقیق می‌توان موارد زیر را بیان نمود:

- با در نظر گرفتن پارامترهای کنترلی، می‌توان چروکیدگی دیواره داخلی لوله را حذف و از نازک شدن بیش از حد دیواره خارجی لوله و تغییر شکل سطح مقطع جلوگیری کرد.

- از طرفی مقدار جابجایی اعمال شده به لبه لوله نسبت به حرکت قالب فشار تأثیر به‌سزایی در انجام موفق خم کاری داشته است.

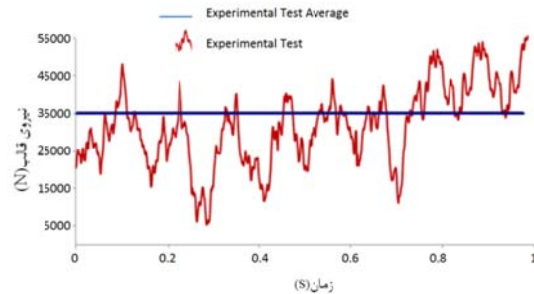
- بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست می‌توان نتیجه گرفت که مندرل‌های پلی‌یورتان و NBR نقش تقریباً یکسانی در خم کاری لوله‌ها دارند.

- با مقایسه‌ی نیروی قالب مدل خم کاری لوله با جنس فولاد ۳۰۴ استفاده از مندرل نیروی قالب برای پلی‌یورتان به مراتب کمتر از قالب NBR است و با نیروی کمتری می‌توان قطعه مورد نظر را شکل داد.

- استفاده مندرل‌های الاستومری NBR و پلی‌یورتان می‌تواند به شکل‌گیری بهتر و دقیق‌تر فرآیند بدون گسیختگی و پارگی منجر گردد.

۶- مراجع

- [1] W. Li, G. Ren, Z. Li, L. Feng, H. Yang., 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*, Vol. 227, No.1, pp. 288-307, 2016.
- [2] HR. Farahmand, K. Abrinia, An upper bound analysis for reshaping thick tubes to polygonal cross-section tubes through multistage roll forming process.



شکل ۱۵- نیروی خمشی قالب فولاد ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتان

در حالت لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل NBR با مقایسه شکل‌های ۵ و ۱۴ میانگین نیروی تست تجربی ۴۳۸۰۰ نیوتن و میانگین نیروی حاصل از شبیه‌سازی ۴۰۱۰۰ نیوتن می‌باشد. میزان درصد خطای موجود بین تست تجربی و شبیه‌سازی برابر ۸٪ درصد می‌باشد.

در حالت لوله فولادی ۳۰۴ با مندرل پلی‌یورتال با مقایسه شکل-های ۶ و ۱۵ میانگین نیروی تست تجربی ۳۵۰۰۰ نیوتن و میانگین نیروی حاصل از شبیه‌سازی ۳۸۰۰۰ نیوتن می‌باشد. میزان درصد خطای موجود بین تست تجربی و شبیه‌سازی برابر ۷٪ درصد می‌باشد.

ملاحظه می‌شود نیروی خمکاری در حالت مندرل پلی‌یورتال نسبت به NBR حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است و این نتیجه می‌تواند تأثیر مهمی در کاهش توان موتور محرک برای خمکاری ایفا کند.

۵- نتیجه‌گیری

خم کاری لوله در صنعت قطعه سازی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در حقیقت خم لوله روشی برای تبدیل لوله‌های فلزی به شکل مورد نظر بدون شکست، چروکیدگی و یا نازک شدن موضعی لوله می‌باشد. به منظور بررسی کاهش چروکیدگی، گسیختگی و غیر دایره‌ای بودن سطح مقطع لوله و تأثیر پارامترهای هندسی ابزار خمکاری، قالب و سایر پارامترهای مؤثر بر خمکاری، پژوهش‌های کمی صورت گرفته است. در این مقاله شبیه‌سازی و آزمایش تجربی فرآیند خم کاری لوله به روش

- International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 100, No.1, pp. 90-98, 2015.
- [3] J. Raujol, F. Toussaint, L. Tabourot, M. Vautrot, P. Balland, Experimental and numerical investigation of a short, thin-walled steel tube incremental forming process. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 19, No.1, pp. 59-66, 2015.
- [4] K. Richter, R. Haase, F. Schieck, D. Landgrebe, Tempered forming of magnesium alloys using the example of roll forming, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, No.1, pp. 60-66, 2015.
- [5] Z. Li, Z. Zheng, J. Yu, L. Guo, Crashworthiness of foam-filled thin-walled circular tubes under dynamic bending. *Metals and design*, Vol. 52, No.1, pp. 1058-1064, 2013.
- [6] L. Hen, S. kai-peny, T. Yu-Li, Spring back law of thin-walled 6061-T4 AL-alloy tube upon bending. *Transactions of Nonferrous Metals*, Vol. 22, No.1, pp. 357-363, 2012.
- [7] H. Li, L. He, Z. Zekang, Advances and trends on tube bending forming technologies. *Aeronautics*, Vol. 25, No.1, pp. 1-12, 2012.
- [8] H. Lee, C.J. Van Tyne, D. Field, Finite element bending analysis of oval tubes using rotary draw bender for hydroforming applications. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, No.2, pp. 327-335, 2005.
- [9] E. Miller, S. Kyriakides, A.H. Bastard, On bend-stretch forming of aluminum extruded tubes - II: Analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.43 No.5, pp. 1319-1338, 2001.
- [10] H. Yang, H. Li, M. Zhan, Friction role in bending behaviors of thin-walled tube in rotary-draw-bending under small bending radii. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No.15, pp. 2273-2284, 2010.
- [11] G.r. Zhao, Y.L. Liu, C.S. Dong, H. Rang, X.G. Fan, Analysis of wrinkling limit of rotary draw bending process for thin - walled rectangular tube, *Materials processing technology*, Vol. 69, No.1, pp. 1224-1231, 2010.
- [12] H. Li, H. Yang, M. Zhan, R.J. Gu, A New method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, No.1, pp. 192-196, 2006.
- [13] Y. Zhang, D. Redekop, Shell element simulation of the push method of tube bending, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17, No.1, pp. 301-304, 2006.
- [14] J. Wang, R. Agarwal, Tube bending under axial force and internal pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, No.1, pp. 598-605, 2006.
- [15] J. Lanfang, Z. Shuyou, W. Yaqun, F. Yixiong, L. Yaochen, L. Hong, Z. Fei, S. Hong, research on bending forming method of large diameter-thickness ratio thin-walled tubes for aerospace, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, No.1, pp. 3037-3049, 2019.