



بررسی عددی و تجربی فرآیند اندازه کردن لوله‌های استحکام بالا تولید شده به روش شکل دهی غلتکی سرد

حسین یوسفیان¹، حسن مسلمی نایینی^{2*}، روح الله عزیزی تفتی³، بهنام عباسزاده⁴

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

4- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، moslemi@modares.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله، بانوجه به نیاز روز افزون به لوله‌های استحکام بالا و نازک در صنایع نفت و گاز، اثر استحکام، ضخامت اولیه لوله و اصطکاک بین لوله و غلتک، روی توزیع ضخامت و دوپهنی سطح مقطع لوله در فرآیند اندازه‌کردن به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری مارک‌منتات انجام گرفته است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش استحکام تسلیم و کاهش ضخامت، دوپهنی سطح مقطع لوله کاهش می‌یابد. نشان داده شده است که با 2.77 برابر شدن استحکام تسلیم لوله‌ای به ضخامت 2.8 میلی‌متر، دوپهنی 27 درصد کاهش یافته است. با کاهش ضخامت از 2.8 به 1.8 میلی‌متر لوله‌ای با جنس فولاد St37 دوپهنی 2 درصد کاهش می‌یابد. این تغییرات با افزایش استحکام تسلیم بیشتر می‌شود به طوری که در لوله‌ای با جنس آل‌فورم 700 با کاهش ضخامت از 2.8 به 1.8 میلی‌متر، دوپهنی 45 درصد کاهش می‌یابد. همچنین اصطکاک تاثیر ناچیزی بر دوپهنی و توزیع ضخامت لوله دارد. اعتبار شبیه‌سازی اجزای محدود با مقایسه نتایج تجربی تأیید شده است.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 بهمن 1396 پذیرش: 22 اردیبهشت 1397 ارائه در سایت: 10 خرداد 1397 کلید واژگان: فرآیند اندازه کردن دوپهنی لوله استحکام بالا شکل دهی غلتکی

Numerical and experimental investigation of sizing process of high strength pipes producing by cold roll forming

Hossein Yousefian¹, Hassan Moslemi Naeini^{1*}, Roohollah Azizi Tafti², Behnam Abbaszadeh¹

1- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 February 2018
Accepted 12 May 2018
Available Online 31 May 2018

Keywords:

Sizing process
Ovality
High strength pipe
Roll forming

ABSTRACT

In this paper, considering the increasing need for high strength and thin pipes in the oil and gas industries, the effects of material strength and the initial thickness of the pipe and the friction between the pipe and the roller, on the distribution of the thickness and ovality of the cross-section of pipe in the process of sizing have been numerically and experimentally investigated. The simulation is performed using the commercial software MSC Marc Mentat. Results of the simulation show that by increasing strength material and reduction of thickness, the ovality of the cross-section of pipe decrease. It has been shown that with a 2.77-fold increase in the yield strength of a pipe with thickness of 2.8 mm, the ovality decreased by 27%. By decreasing the thickness of the St37 pipe from 2.8 to 1.8 mm, the ovality decreased to 2%. These changes increase with increasing yield strength, so that in the alform700 pipe with a thickness reduction of 2.8 to 1.8 mm, the ovality decreased to 45%. Furthermore, the friction condition has very little effect on the ovality of pipe. The validity of the finite element simulation is confirmed by comparison with experimental results.

در هریک از روش‌های ساخت، مقطع لوله به‌طور کامل گرد نشده و مقطع

آن بیضی (دوپهن) می‌شود. که عدم کنترل این پدیده، باعث مشکلاتی از قبیل عدم اتصال دو لوله در حین جوش کاری یا فلنج کردن، تغییر ممان سطح تعریف شده در روابط برای به‌دست آوردن تنش در طراحی و مشکلات تداخل و انطباق می‌شود. دوپهنی به دلایل مختلفی در فرآیند ساخت لوله بوجود می‌آید که از جمله می‌توان به ناهمگن بودن قطعه یا ماده اولیه، ارتعاشات دستگاه تولید،

1- مقدمه

لوله‌ها به دو روش بدون درز و با درز ساخته می‌شوند. روش‌های مختلف ساخت لوله بدون درز عبارتست از: روش روزن‌رانی، هیدروفرمینگ، ریخته‌گری، سوراخکاری و نورد با تویی. اما برای ساخت لوله‌های درز دار و با قطر کم از روش شکل دهی غلتکی سرد استفاده شده که در انتهای خط تولید، عملیات جوشکاری روی لوله انجام می‌شود.

اصلاح هندسه نهایی لوله انجام گرفته است. یوشیاکی و ماتسویو [5] به بررسی تاثیر شعاع انحنای غلتک و فاصله دو غلتک بر روی اصلاح دوپهنی در فرآیند اندازه کردن تک‌ایستگاهی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که شعاع انحنای غلتک با در نظر گرفتن مقدار انقباض محیطی لوله، می‌تواند بهینه شود، هم‌چنین فاصله عمودی دو غلتک در مقداری مشخص کمترین دوپهنی را در لوله نتیجه می‌دهد. اینویو و همکاران [6] در پژوهش خود به بررسی فرآیند اندازه کردن پرداخته و توانستند با ساخت یک ایستگاه سه‌غلتکی نسبت به 4 ایستگاه دوغلتکی فرآیند اندازه کردن را برای لوله با نسبت‌های ضخامت به قطر بیشتری (افزایش 25 درصدی) اجرا کنند. یوشیاکی و همکاران [7] به بررسی تغییر رفتار لوله‌های جوشکاری شده در فرآیندهای اندازه کردن پرداختند. آن‌ها تاثیر استحکام تسلیم درز جوش روی تغییر شکل لوله را به کمک آزمایش تجربی و تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی بررسی کردند. در این مطالعه آن‌ها تاثیر تنش‌های پسماند روی خط جوش را در نظر گرفته و در نسبت‌های مختلف استحکام درز جوش به استحکام بدنه لوله، نسبت‌های بهینه‌ای برای شعاع غلتک بالایی به کناری، در فرآیند اندازه کردن چهار غلتکی ارائه دادند. تاثیر تنش پسماند و توزیع ناهمگن استحکام فقط در شعاع غلتک قابل بررسی است. ولیدی [8] در مطالعه تحلیلی و تجربی فرآیند شکل‌دهی مجدد لوله‌های مربعی به این نتیجه رسید که شرایط اصطکاکی تأثیری روی هندسه پروفیل مقطع محصول ندارد. اما با افزایش ضریب اصطکاک، توان شکل‌دهی افزایش می‌یابد. کاهش ضریب اصطکاک، سطح خراش برداشته را کمتر می‌نماید. هرنیک و همکاران [9] به شبیه‌سازی عددی فرآیند ساخت لوله‌های قطور U&O پرداخته و به نتایج جالبی دست یافتند. آن‌ها با استفاده از برنامه مارک‌منتات و نوشتن زیربرنامه به این نتیجه رسیدند که دوپهنی مستقیماً با فرآیند جوشکاری در ارتباط است و افزایش انبساط پس از تولید لوله، از صفر تا 0.5 درصد خیلی موثر است و تقریباً دوپهنی را صفر می‌کند. ولی از 0.5 تا 2 درصد تغییر چندانی حاصل نشده و این می‌تواند برای طراحی دستگاه انبساط‌دهنده موثر واقع شود. کیانچ و همکاران [10] در بررسی عددی شکل‌دهی ورق به لوله به روش U&O، به مدل‌سازی دوبعدی کل فرآیند پرداختند. در این مدل‌سازی آن‌ها رفتار ماده را سینماتیک خطی و اثر باوشینگ را نیز در نظر گرفتند. آن‌ها اثر پارامترهای فرآیند، ضریب اصطکاک و خواص ماده را روی بازشدگی درز و دوپهنی لوله بررسی کردند. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش اصطکاک در این فرآیند باعث کاهش دوپهنی لوله می‌شود. لی و همکاران [11] به بررسی تغییرات تنش تسلیم در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد و اندازه کردن در تولید لوله پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد انقباض محیطی اعمال شده طی فرآیند اندازه کردن تنش تسلیم افزایش می‌یابد. کریمی فیروزجایی و همکاران [12] تاثیر نوع الگوی گل بر روی توزیع ضخامت لوله در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله استحکام بالا بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که در الگوهای دو شعاعی و خمش معکوس، لوله توزیع ضخامت بهتری دارد.

با توجه به دیدگاه کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز و در نتیجه استفاده از لوله‌های با استحکام بالا و در عین حال سبک وزن، تحقیقی در راستای بررسی تاثیر استحکام تسلیم و ضخامت اولیه لوله بر دوپهنی لوله در طی فرآیند اندازه کردن مشاهده نشده است. هم‌چنین گزارشی در راستای تاثیر شرایط اصطکاکی (متغیر فرآیندی تحت کنترل) بر روی دوپهنی در فرآیند اندازه کردن، مشاهده نشده است. در عین حال ایجاد انقباض محیطی (کرنش حلقوی) در فرآیند اندازه کردن باعث کاهش میزان دوپهنی لوله می‌شود. استحکام تسلیم اولیه و ضخامت اولیه لوله از متغیرهایی هستند که روی میزان

عدم دقت در اندازه‌گیری‌ها و تolerانس ابزارها، سایش و خوردگی ابزار یا غلتک اشاره کرد. "شکل 1" نمایی از سطح مقطع دوپهن شده را نشان می‌دهد. برای بیان ریاضی دوپهنی معادله (1) ارائه شده است [1]. ov که مقدار دوپهنی لوله می‌باشد معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود.

مقدار دوپهنی لوله با ریزسنج یا وسایل اندازه‌گیری نوری به دست می‌آید. استانداردهای مختلفی برای مقادیر مجاز دوپهنی وجود دارد. مقادیر مجاز با توجه به درزدار بودن یا نبودن، قطر داخلی و خارجی، ضخامت، فشار کاری و غیره مشخص می‌شود. استاندارد ASME B31 در حالتی که فشار داخلی کاری کمتر از 600(Psi) باشد، مقدار 8 درصد و برای فشار بیشتر از 600(Psi) مقدار حداکثر 5 درصد را پیشنهاد می‌کند. هم‌چنین در حالت فشار خارجی و خلا مقدار 2 درصد را مجاز می‌داند [2].

$$ov = \frac{2(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، D_{max} مقدار قطر حداکثر لوله دوپهن شده و D_{min} حداقل قطر آن می‌باشد.

ضخامت لوله در راستای طولی و محیطی یکسان نمی‌باشد. از متغیرهایی که نشان‌دهنده این توزیع ضخامت می‌باشد می‌توان متغیر خروج از مرکز را نام برد. خروج از مرکز به صورت معادله (2) بیان می‌شود [3]. e که مقدار خروج از مرکز می‌باشد معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. برای پیش‌گیری از عیوب در حین جوش کاری یا در حین کارکرد لوله باید این مقدار در محدوده‌های مجاز قرار گیرد. معمولاً در استانداردها مقدار مجاز خروج از مرکز با مقادیر مجاز حداقل و حداکثر ضخامت به دست می‌آید [4,3]. برای مثال مقدار مجاز برابر خروج از مرکز 0.5 درصد قطر لوله در مرجع [4] بیان شده است.

$$e = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، T_{max} حداکثر ضخامت و T_{min} حداقل ضخامت لوله در یک سطح مقطع مشخص می‌باشد.

یکی از روش‌های ساخت لوله همان‌طور که گفته شد روش شکل‌دهی غلتکی سرد می‌باشد. پس از شکل‌دهی ورق به لوله، در ادامه عملیات جوشکاری انجام می‌شود و در پایان برای قرارگیری مقدار قطر، ضخامت و دوپهنی لوله در محدوده مجاز، لوله به فرآیند اندازه کردن وارد می‌شود. فرآیند اندازه کردن با استفاده از چیدمان خاص غلتک‌ها به صورت دوتایی، سه تایی و چهارتایی در تعدادی مناسب از ایستگاه‌ها انجام می‌شود. الگوی گل غلتک در این فرآیند دایره کامل است.

بررسی‌های زیادی در راستای کاهش دوپهنی، فرآیند اندازه کردن و

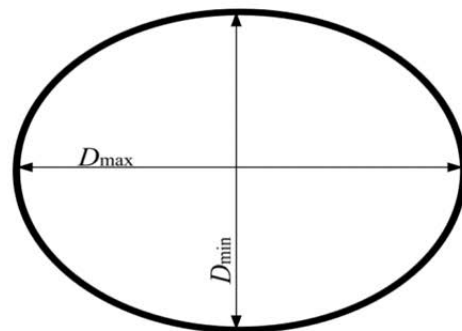


Fig. 1 Schematic of the oval pipe cross section

شکل 1 شماتیک سطح مقطع لوله دوپهن شده

در ادامه حداکثر و حداقل قطر لوله در بین ایستگاه‌های اندازه‌کردن با ریزسنج با قدرت تفکیک 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها درفاصله بین ایستگاه‌ها انجام گرفت تا حداکثر برگشت فتری رخ دهد. "شکل 4" چگونگی اندازه‌گیری را نشان می‌دهند.

3- شبیه‌سازی اجزای محدود

روش اجزای محدود برای اندازه‌گیری درصد دوپهنی و خروج از مرکز لوله در فرآیند شکل‌دهی اندازه‌کردن استفاده شده است.

جهت تحلیل از نرم‌افزار مارک‌منتات² استفاده شد. در ابتدا لوله‌ای به طول 1600 میلی‌متر، مقدار دوپهنی 1.8 درصد و جهت‌گیری دوپهنی 40 درجه نسبت به محور عمودی با ضخامت‌ها، استحکام‌ها و شرایط اصطکاکی مشخص شده در جدول 1 مدل‌سازی شد. مواد به‌صورت همسان‌گرد و تغییرشکل‌ها به‌صورت کشسان-مومسان در نظر گرفته شد، قانون کارسختی همسان‌گرد نیز مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به اعمال بیشترین تغییرشکل در جهت محیطی و شعاعی، لوله در جهت طول به 200 قسمت، در جهت ضخامت به 4 قسمت و در جهت محیطی به 60 قسمت شبکه‌بندی شد. هم‌چنین نوع المان آجری تعریف شد



Fig. 3 Measurement the minimum and maximum pipe diameter before entering the sizing process

شکل 3 اندازه‌گیری حداقل و حداکثر قطر لوله قبل از ورود به فرآیند اندازه‌کردن



Fig. 4 Measurement the minimum and maximum pipe diameter between sizing stations

شکل 4 اندازه‌گیری حداقل و حداکثر قطر لوله بین ایستگاه‌های فرآیند اندازه‌کردن

جدول 1 سطوح مختلف متغیرهای شبیه‌سازی

Table 1 Different levels of simulation parameters.

جنس لوله	ضخامت (mm)	ضریب اصطکاک
St37	1.8	0.1
St52	2.3	0.2
alform700	2.8	0.4

که با شماره 7 در نرم‌افزار مارک‌منتات معرفی می‌شود و به‌صورت المان سه‌بعدی مکعبی با 8 گره می‌باشد، سه درجه آزادی برای هر گره وجود دارد و

کرنش مومسان اعمال شده و میزان افزایش ضخامت تاثیرگذار است. بنابراین در این مقاله، لوله‌های با استحکام معمولی، متوسط و بالا، با یک دوپهنی اولیه، با ضخامت‌های مختلف و تحت شرایط اصطکاکی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود مدل‌سازی شد و در نهایت درصد دوپهنی و خروج از مرکز لوله محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی با مقایسه داده‌های تجربی که از اندازه‌گیری قطر لوله در طی فرآیند اندازه‌کردن خط تولید لوله و پروفیل شرکت سپنتا به‌دست آمد، تطابق خوبی دارد.

2- بررسی‌های تجربی

اندازه‌گیری قطر لوله در طی ایستگاه‌های مختلف فرآیند اندازه‌کردن بر روی خط تولید لوله و پروفیل شرکت سپنتا انجام گرفته است. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ریزسنج با قدرت تفکیک 0.01 میلی‌متر به‌دست آمده است. هم‌چنین برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی دقیق‌تر، خواص مکانیکی ورق مورد استفاده در خط و ورق‌های مطالعه شده نیز با استفاده از آزمون کشش به‌دست آمد. اطلاعات تجربی جهت بررسی نتایج به‌دست آمده از روش تحلیل اجزای محدود بکار گرفته شده است.

2-1- آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی ورق

ورق استفاده شده در خط تولید لوله و پروفیل شرکت سپنتا St37 بوده و دو ورق با استحکام‌های متوسط و بالا که به ترتیب با نام‌های St52 و آل‌فورم 700 شناخته می‌شوند مورد آزمون کشش تک محوری با استاندارد ASTM E8/E8M-09 بوسیله دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام موجود در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه تربیت مدرس، قرار گرفتند. در نهایت پس از تبدیل مقادیر جابجایی و نیرو، به تنش حقیقی و کرنش مومسان حقیقی که در "شکل 2" ملاحظه می‌شود مقادیر وارد محیط شبیه‌سازی شد.

2-2- اندازه‌گیری دوپهنی لوله

در ابتدا قطر لوله قبل از ورود به فرآیند اندازه‌کردن اندازه‌گیری شد و مقادیر

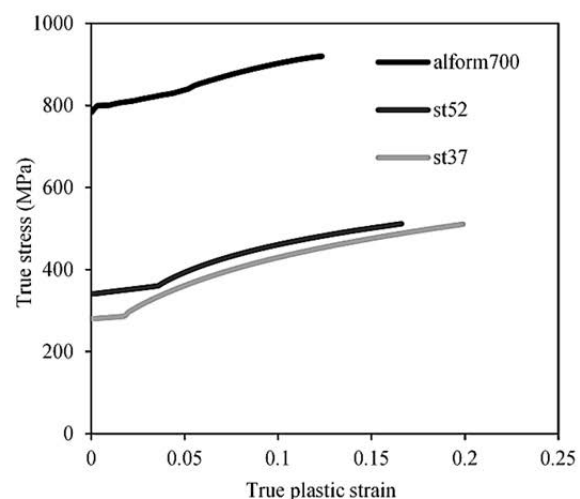


Fig. 2 True strain-true plastic strain diagram for the three tested materials

شکل 2 نمودار تنش حقیقی-کرنش مومسان حقیقی برای سه ماده مورد آزمایش حداکثر و حداقل قطر لوله و جهت‌گیری دوپهنی لوله مشخص شد (شکل 3).

² Marc Mentat

¹ alform

حافظه از ویژگی‌های روش حل صریح بوده که آنرا به یک روش کاربردی در شبیه‌سازی فرآیندهای شکل‌دهی تبدیل کرده است.

3-1- محاسبه دوپهنی و خروج از مرکز اجزای محدود

پس از اتمام کامل فرآیند حل عددی به‌وسیله نرم افزار مارک منتات، سطح مقطعی برای اندازه‌گیری مشخص شد. به‌دلیل کمی گازگرفتی در لبه جلویی لوله در آغاز حرکت و در نتیجه اعوجاج غیرمستقیم لبه جلویی لوله، به اندازه 160 میلی‌متر از لبه جلویی فاصله گرفته و برای در نظر گرفتن بازگشت کامل کرنش کشسان زمان مناسب برای حل انتخاب شد که نهایتاً با فاصله 760 میلی‌متری از غلتک آخر سطح مقطع مورد نظر مشخص شد (شکل 8).

پس از به‌دست آوردن مقادیر جابجایی در دو راستای صفحه، این مقادیر به مقادیر مختصاتی لوله در حالت ابتدایی، یعنی قبل از ورود به فرآیند اندازه‌کردن، اضافه شد و مختصات نهایی هر گره در سطح مقطع مشخص به‌دست آمد. در نهایت با استفاده رابطه تبدیل مختصات دکارتی به مختصات قطبی، شعاع هر گره مشخص شد. با به‌دست آوردن شعاع گره‌های موجود در سطح داخلی و خارجی سطح مقطع، توزیع ضخامت به‌دست آمد.

3-2- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

برای تایید صحت مدل اجزای محدود، قطر خارجی لوله در خط تولید لوله پروفیل سینتا بخش اندازه‌کردن با همان مشخصات ورودی در محیط شبیه‌سازی، اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در "شکل 9" مشاهده می‌شود محور افقی بیانگر شماره ایستگاه شکل‌دهی در فرآیند اندازه‌کردن و محور عمودی بیانگر مقدار میانگین قطر خارجی لوله برحسب میلی‌متر است که به اختصار قطر خارجی نامیده شده است. مشابه با اندازه‌گیری‌های تجربی، قطر

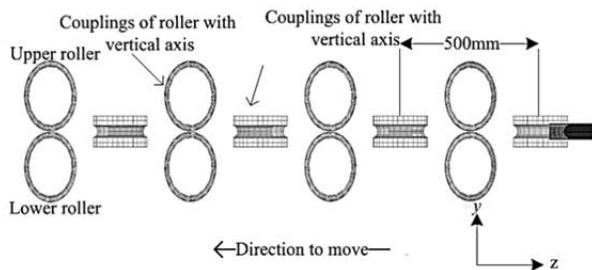


Fig. 7 A View of sizing stations in modeling

شکل 7 نمایشی از ایستگاه‌های اندازه‌کردن در مدل‌سازی

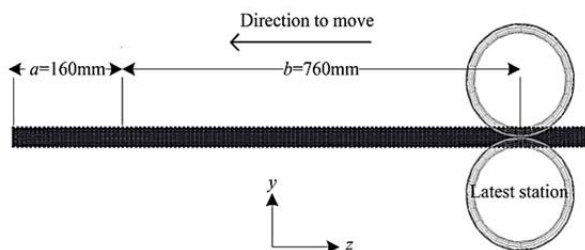


Fig. 8 The desired section for measuring simulation results

شکل 8 مقطع موردنظر برای اندازه‌گیری نتایج شبیه‌سازی

خارجی در وسط فاصله‌ی ایستگاهی از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود به دست آمد. قطر خارجی لوله در شماره ایستگاه صفر برابر با قطر خارجی آن قبل از ورود به ایستگاه‌های اندازه‌کردن است.

از انتگرال‌گیری گوسی 8 نقطه‌ای برای حل استفاده می‌شود. تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت. مدل اجزای محدود استفاده شده در این مدل‌سازی در "شکل 5" نشان داده شده است.

مشابه با غلتک‌های موجود در خط تولید لوله و پروفیل شرکت سینتا، غلتک‌های شکل‌دهی طراحی و به‌صورت جسم صلب تحلیلی وارد محیط شبیه‌سازی شد. از دلایل انتخاب جسم صلب تحلیلی کارکرد محاسباتی بالای آن، به دلیل عدم نیاز به شبکه بندی می‌باشد. این حالت برای اجسامی که معمولاً تغییرشکل بسیار ناچیزی در حین فرآیند داشته و هندسه پیچیده‌ای ندارند اتخاذ می‌شود.

در "شکل 6" ایستگاه‌های اندازه‌کردن و شماره آن‌ها نشان داده شده است. در ایستگاه‌های فرد غلتک‌ها افقی و هرزگرد بوده و در ایستگاه‌های زوج غلتک‌ها عمودی هستند که غلتک پایینی محرک و غلتک بالایی هرزگرد است.

با توجه به فاصله ایستگاه‌های فرد در خط تولید موجود که 500 میلی‌متر بوده و ایستگاه‌های زوج دقیقاً در وسط ایستگاه‌های فرد قرار دارند، جابجایی غلتک‌ها به‌صورت "شکل 7" مشخص شد. به همین دلیل غلتک‌هایی که به موتور متصل اند (اتصال چرخنده و گاردان می‌باشد) دارای اصطکاک غلتشی- لغزشی می‌باشند و در محیط شبیه‌سازی برای آن‌ها اصطکاک تعریف می‌شود. اصطکاک تعریف شده از نوع اصطکاک کلمب می‌باشد و براساس تعریف آزمایش ضرایب 0.1، 0.2 و 0.4 در هر آزمایش به‌صورت مجزا اعمال می‌شود. هرگونه حرکتی از غلتک‌ها گرفته شده است و تنها حرکت در راستای Z به لبه جلویی لوله داده شده است. این جابجایی به‌صورت سرعت

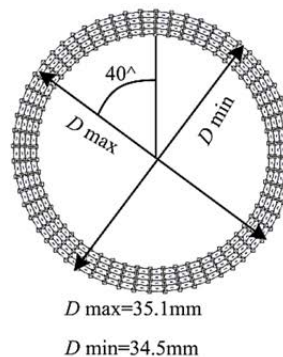


Fig. 5 A view of meshed pipe in software

شکل 5 نمایشی از لوله شبکه‌بندی شده در نرم افزار مارک منتات

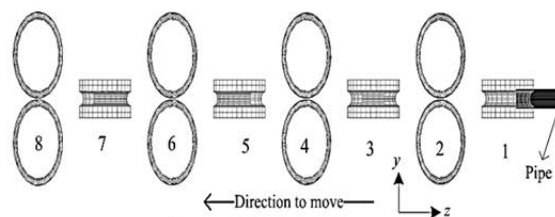


Fig. 6 Different stations sizing and assign numbers assigned to them

شکل 6 ایستگاه‌های مختلف اندازه‌کردن و شماره فرض شده برای آن‌ها ثابت با توجه به سرعت خط تولید 35 متر بر دقیقه اعمال شده است. با توجه به سرعت کم فرآیند اندازه‌کردن که نسبتاً کم بوده شبیه‌سازی‌ها به‌صورت شبه‌استاتیک در نظر گرفته شده و همچنین روش حل صریح به دلیل لزوم تعداد بالایی از شبیه‌سازی‌های زمان‌بر، اتخاذ گردیده است. کاهش نیاز به

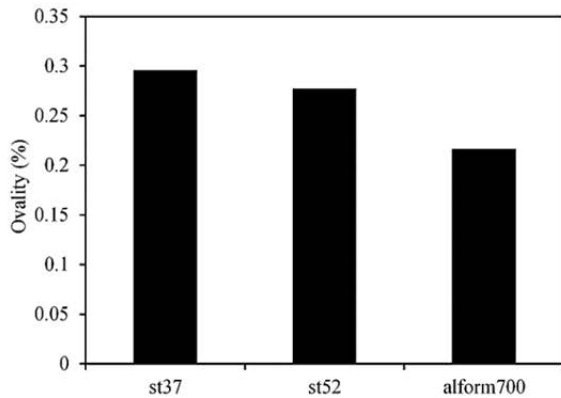


Fig. 10 ovality percentage in the output pipe of the sizing process

شکل 10 درصد دوپهنی لوله در خروجی فرآیند اندازه‌کردن

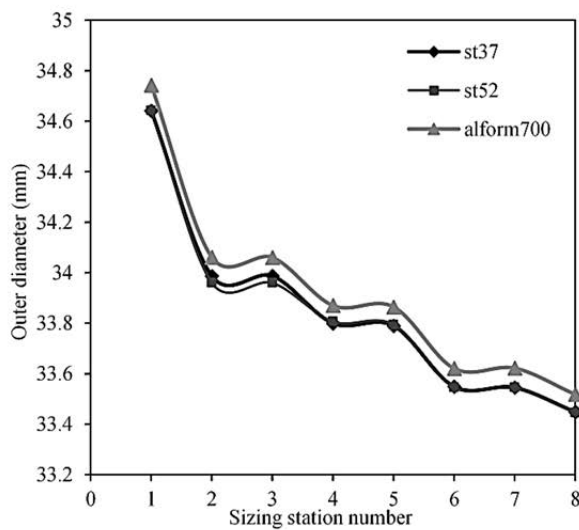


Fig. 11 Mean pipe diameter at sizing stations for the studied materials

شکل 11 قطر میانگین لوله در ایستگاه‌های اندازه‌کردن برای مواد مطالعه شده

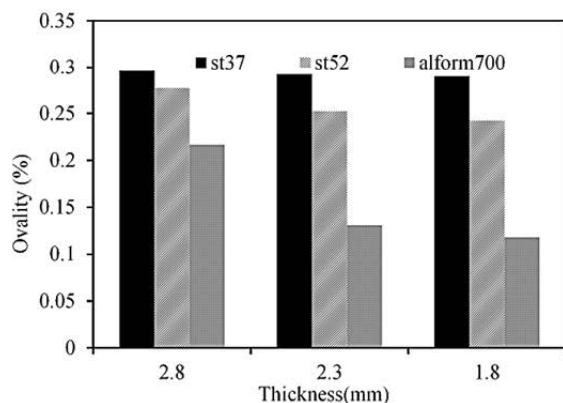


Fig. 12 ovality pipe output in different thicknesses for different materials

شکل 12 درصد دوپهنی لوله‌ی خروجی در ضخامت‌های مختلف برای مواد مختلف

مواد مورد مطالعه در خروج از فرآیند اندازه‌کردن نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با کاهش ضخامت از 2.8 به 2.3 و 1.8 (میلی‌متر) درصد دوپهنی خروجی در هر سه ماده کاهش داشته است. تغییرات در لوله‌های

با توجه به "شکل 9"، با پیشروی لوله در فرآیند اندازه‌کردن، به طور کلی قطر خارجی به تدریج کم می‌شود که این امر در نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. در عین حال، نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود با داده‌های تجربی اختلاف کمی دارند. بیش‌ترین تفاوت در ایستگاه‌های سوم و هشتم بوده و برابر 0.8 درصد است. بین نتایج عددی و تجربی انطباق خوبی مشاهده شد. اما خطای ایجاد شده ناشی از ناهمسانگردی خواص مکانیکی لوله و در نظر نگرفتن خط جوش و خواص متفاوت آن در محیط شبیه‌سازی می‌باشد. بنابراین مدل اجزای محدود توسعه داده شده، پیش‌بینی قابل اطمینانی از هندسه خروجی لوله در طی فرآیند شکل‌دهی اندازه‌کردن ارائه کرده است. از این رو مطالعات پارامتریک می‌تواند با استفاده از این مدل معتبر انجام شود.

4- بحث و نتایج

4-1- اثر استحکام و ضخامت اولیه لوله بر دوپهنی

در "شکل 10" درصد دوپهنی لوله برای مواد مطالعه شده در خروجی از فرآیند اندازه‌کردن نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش استحکام از St37 به St52 و آفورم 700 درصد دوپهنی خروجی به ترتیب از 0.29 درصد به 0.27 درصد و 0.21 درصد کاهش می‌یابد.

از جمله دلایل کاهش دوپهنی خروجی با افزایش استحکام تسلیم می‌توان به افزایش برگشت‌فنی با افزایش استحکام تسلیم اشاره کرد. در یک کرنش ثابت برای مواد مختلف، با افزایش استحکام تسلیم ماده و در نتیجه افزایش برگشت‌فنی، قطر خارجی لوله افزایش می‌یابد.

"شکل 11" قطر خارجی لوله در طی فرآیند اندازه‌کردن را برای سه جنس مختلف برای لوله با ضخامت اولیه 2.8 میلی‌متر نشان می‌دهد. می‌توان گفت با افزایش برگشت‌فنی و در نتیجه، افزایش قطر خارجی لوله در طی فرآیند اندازه‌کردن، تماس لوله با غلتک کاملاً دایروی بیشتر شده و در نتیجه لوله بیشتر به دایره تمایل پیدا می‌کند، بنابراین دوپهنی کاهش می‌یابد.

در "شکل 12" درصد دوپهنی لوله در ضخامت‌های اولیه مختلف برای

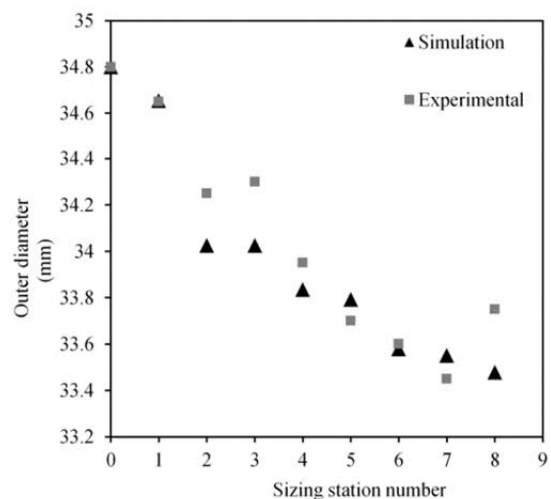


Fig. 9 Mean pipe diameter at different measuring stations

شکل 9 قطر خارجی لوله در ایستگاه‌های مختلف اندازه‌کردن

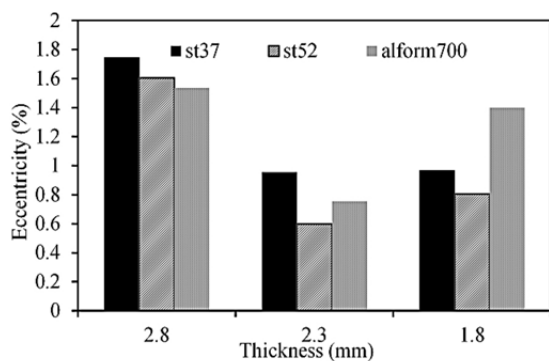


Fig. 14 Eccentricity of output pipe of the process sizing for the studied materials

شکل 14 درصد خروج از مرکز لوله‌ی خروجی از فرآیند اندازه‌کردن برای مواد مطالعه شده

ضخامت توجیه کرد. بدین گونه که با کاهش ضخامت برگشت فنی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضخامت‌های حداقل و حداکثر لوله طی فرآیند اندازه‌کردن کمتر افزایش داشته‌است. بنابراین مخرج کسر خروج از مرکز با کاهش ضخامت کاهش می‌یابد. اما برای تصمیم‌گیری در مورد صورت کسر خروج از مرکز باید اطلاعات دقیقی از شرایط تماس و تعداد اجزای‌های تحت تماس داشت. وابسته به شرایط تماس صورت کسر می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. نسبت تغییرات صورت به کاهش مخرج تعیین‌کننده تغییرات خروج از مرکز می‌باشد.

4-3- اثر اصطکاک بر دوپهنی و خروج از مرکز

در این بخش، به منظور مطالعه اثر اصطکاک بر دوپهنی و خروج از مرکز لوله خروجی، سه ضریب اصطکاک کلمب (0.1، 0.2 و 0.4) [1] برای شرایط اصطکاکی غلتک با لوله بررسی شده‌است.

جدول 2 تغییرات هندسه خروجی لوله شامل، درصد دوپهنی، قطر میانگین و حداقل و حداکثر ضخامت لوله خروجی را برای جنس St37 با ضخامت ورودی 2.8 میلی‌متر نشان می‌دهد. با تغییر شرایط اصطکاکی از حالتی با ضریب اصطکاک کولمب 0.2 به 0.1 یا 0.4 بیشترین تغییرات در ضخامت حداقل حدود 0.1 میلی‌متر و در ضخامت حداکثر به میزان 0.4 میلی‌متر است. بنابراین تاثیر اصطکاک بر خروج از مرکز و ضخامت‌های کمینه و بیشینه قابل توجه نیست. همچنین، از نتایج به‌دست آمده این نکته بر می‌آید که اصطکاک تاثیر ناچیزی بر دوپهنی دارد. بنابراین، تاثیر اصطکاک بر هندسه محصول قابل چشم‌پوشی است. این نتیجه با مرجع [8] مطابقت دارد.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی عددی و تجربی فرآیند اندازه‌کردن لوله‌های استحکام بالا تولید شده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد پرداخته شد. به این منظور،

جدول 2 تغییرات هندسه لوله خروجی با تغییر اصطکاک

Table 2 Changes in the Output pipe geometry with a change in friction coefficient

ضریب اصطکاک	دوپهنی (درصد)	قطر میانگین (mm)	ضخامت حداکثر (mm)	ضخامت حداقل (mm)
0.1	0.29	33.46	2.91	2.79
0.2	0.29	33.45	2.93	2.78
0.4	0.29	33.45	2.89	2.77

با جنس St37 و St52 کم بوده ولی در ماده استحکام بالا با کاهش حدود 25 درصد در ضخامت (کاهش ضخامت از 2.8 میلی‌متر به 2.3 میلی‌متر) کاهش 60 درصدی در دوپهنی لوله داشته‌است.

برای ذکر علت باید به "شکل 13" توجه شود، همان‌طور که دیده می‌شود با کاهش ضخامت، کرنش معادل اعمال شده بر لوله افزایش داشته‌است. بنابراین کار بیشتری بر روی لوله اعمال شده و در نتیجه، لوله بیشتر به سطح غلتک تمایل پیدا می‌کند. بنابراین دوپهنی با کاهش ضخامت کاهش می‌یابد.

4-2- اثر استحکام و ضخامت اولیه لوله بر خروج از مرکز

در "شکل 14" درصد خروج از مرکز در مواد مختلف و برای ضخامت‌های ورودی مختلف نشان داده شده‌است. با توجه به ستونی که مربوط به ضخامت لوله برابر 2.8 میلی‌متر است، دیده می‌شود با افزایش حدود 25 درصد استحکام تسلیم از St37 به St52، کاهش 8.4 درصدی در خروج از مرکز رخ داده‌است، و با افزایش 130 درصد در استحکام تسلیم از ماده St52 به آفورم 700، کاهش 4.1 درصدی در خروج از مرکز لوله مشاهده می‌شود. در ضخامت‌های کمتر اختلاف درصد خروج از مرکز بیشتر شده و حتی با افزایش استحکام در ضخامت‌های 1.8 و 2.3 میلی‌متر تاثیر دوگانه داشته‌است یعنی با افزایش استحکام از St37 به St52 کاهش درصد خروج از مرکز، اما با افزایش استحکام از St52 به آفورم 700 افزایش درصد خروج از مرکز مشاهده می‌شود. حتی درصد خروج از مرکز در ضخامت 1.8 میلی‌متر برای ماده St37 نسبت به ماده آفورم 700 کمتر می‌شود.

همان‌طور که در "شکل 14" دیده می‌شود با تغییر ضخامت لوله، در طی فرآیند اندازه‌کردن، خروج از مرکز لوله تغییر می‌یابد. با کاهش ضخامت از 2.8 به 2.3 میلی‌متر در همه مواد آزمایش شده خروج از مرکز کاهش می‌یابد. ولی با کاهش ضخامت از 2.3 به 1.8 میلی‌متر افزایش خروج از مرکز مشاهده شد. این تغییرات با افزایش استحکام تشدید می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در مقداری مشخص از ضخامت لوله، خروج از مرکز حداقل می‌شود.

دلیل این تغییرات را می‌توان با توجه به رابطه معکوس برگشت فنی با

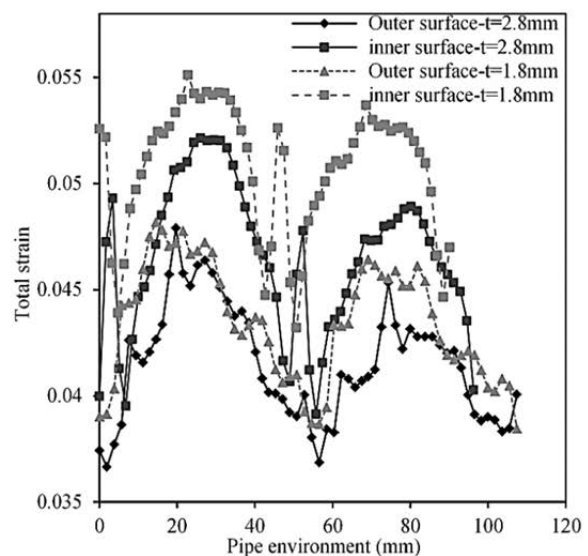


Fig. 13 Total strain applied to the pipe during the sizing process (St52 pipe).

شکل 13 کرنش معادل اعمال شده به لوله طی فرآیند اندازه‌کردن (جنس لوله St52)

T_{min}	حداقل ضخامت لوله (mm)
زیرنویس‌ها	
max	حداکثر
min	حداقل

7- تقدیر و تشکر

از کارشناسان فنی شرکت لوله و پروفیل سپنتا به‌خصوص مدیرعامل محترم جناب آقای مهندس آمره بابت کمک‌های ارزشمندشان در انجام کارهای تجربی، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

8- مراجع

- [1] G. Halmos, *Roll Forming Handbook*, First Edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 9.23-9.43, Toronto: CRC, 2006.
- [2] ASME B31.1, First Edition, pp. 205-206, April 2010.
- [3] A. S. Zeleziarne, *Steel Tube and Pipe Handbook*, 14th Edition, pp. 207-208, Slovak Republic, Switzerland: CR, 2018.
- [4] C. William, *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, S. Lyon, J. P. Gary, L. Sga(Eds), pp. 607-670, 2011.
- [5] I. Yoshiaki, A. Matsuo, Deformation analysis of ERW pipes subjected to 2-roll sizer- improvement of roundness at the end of ERW pipes with thin wall pipes III, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol. 37, No. 431, pp.307-310, 1996 (In Japanese).
- [6] T. Inoue, M. Suzuki, T. Okabe, Y. Matsui, Development of advanced electric resistance welding (ERW) line pipe mighty seam TM with high quality weld seam suitable for extra-low temperature services, *Journal of Financial Economics Technical Report*, Vol. 18, No. 410, pp. 18-22, 1996.
- [7] I. Yoshiaki, M. Takao, A. Isao, Development of pipe with high resection for automotive propeller shaft, *Nippon Steel Technical Report*, Vol. 44, No. 72, pp. 81-86, January 1998.
- [8] H. Validi, *In the Analytical and Empirical Study of the Process of Re-Shaping Square Tubes with Consideration of Friction*, Master's Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modarres University, 2007. (in Persian فارسی)
- [9] M. D. Herynk, S. Kyriakides, A. Onoufriou, H. D. Yun, Effects of the UOE/UOC pipe manufacturing processes on pipe collapse pressure, *International Journal of Mechanical Society*. Vol. 49, No. 5, pp. 533-553, 2007.
- [10] R. Qiang, Z. Tianxia, L. Dayong, T. Ding, Numerical study on the X80 UOE pipe forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 215, No. 6, pp. 264-277, 2015.
- [11] L. Joonmin, K. Dongwook, L. Quagliato, K. Soochang, Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the bauschinger effect, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 244, No. 41, pp. 304-313, 2017.
- [12] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, H. R. Farahmand, B. Abbaszadeh, M. M. Kasaei, Numerical and experimental investigation on flower pattern design methods in cold roll forming process of a high strength steel pipe, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 259-270, 2017. (in Persian فارسی)

فرآیند اندازه‌کردن در نرم‌افزار تجاری مارک‌منتات مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید. سپس تغییرهندسی سطح مقطع لوله در طی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

شبیه‌سازی فرآیند اندازه‌کردن برای یک لوله با قطر خارجی، درصد دوپه‌نی ورودی و جهت‌گیری دوپه‌نی مشخص انجام شد. اثر متغیرهای ابعادی شامل استحکام تسلیم لوله و ضخامت لوله و متغیر فرآیندی یعنی اصطکاک بر روی دوپه‌نی و خروج از مرکز لوله بررسی شد. مهم‌ترین نتایجی که در این تحقیق به‌دست آمد، عبارتند از:

- 1- با افزایش استحکام تسلیم لوله، دوپه‌نی خروجی لوله کاهش می‌یابد. با 2.77 برابر شدن استحکام تسلیم لوله با ضخامت 2.8 میلی‌متر، دوپه‌نی سطح مقطع لوله به 27 درصد کاهش یافته است. برای یک لوله با جنس مشخص، با کاهش ضخامت شیب تغییرات بیشتر می‌شود.
- 2- با تغییر استحکام تسلیم و تغییر ضخامت لوله، خروج از مرکز لوله تغییر می‌یابد. با کاهش ضخامت از 2.8 به 2.3 میلی‌متر، خروج از مرکز سطح مقطع لوله کاهش می‌یابد. ولی با کاهش ضخامت از 2.3 به 1.8 میلی‌متر، افزایش خروج از مرکز مشاهده شد. این تغییرات با افزایش استحکام تشدید می‌شود.
- 3- با کاهش ضخامت لوله، در طی فرآیند اندازه‌کردن دوپه‌نی خروجی لوله کاهش می‌یابد. با 0.64 برابر شدن ضخامت (کاهش ضخامت از 2.8 به 1.8 میلی‌متر) لوله با جنس فولاد St37 دوپه‌نی به 2 درصد کاهش می‌یابد. تغییرات با افزایش استحکام تسلیم بیشتر می‌شود به طوری که در ماده آلفورم 700 با 0.64 برابر شدن ضخامت دوپه‌نی 45 درصد کاهش می‌یابد.
- 4- تاثیر اصطکاک روی دوپه‌نی و خروج از مرکز لوله بسیار ناچیز است.

6- فهرست علائم

D_{max}	حداکثر قطر لوله (mm)
D_{min}	حداقل قطر لوله (mm)
e	درصد خروج از مرکز لوله
ov	درصد دوپه‌نی لوله
T_{max}	حداکثر ضخامت لوله (mm)