

Numerical and Experimental Investigation on Strip Width in Cold Roll Forming Process of Steel Pipes with High Thickness-to-Diameter Ratio

Mohammad Reza Khalil Arjmandi¹, Hassan Moslemi Naeini^{1,2*} , Mehdi Karimi Firouzjaei¹, Behnam Abbaszadeh¹, Mohammad Mehdi Kasaei^{3,4}

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

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, IR Iran

³ Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, IR Iran

⁴ Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering (INEGI), Porto, Portugal

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: July 21, 2025

Revised: September 08, 2025

Accepted: October 05, 2025

ePublished: October 24, 2025

ABSTRACT

Roll forming is the most prevalent method for producing steel pipes, in which a steel strip undergoes gradual deformation through a series of forming stations. To ensure the production of high-quality pipes, precise determination of the initial strip width considering the required deformations is necessary. This paper focuses on determining the initial strip width for steel pipes with high thickness-to-diameter ratios, where the effect of thickness is significant. An industrial roll forming line is simulated using the commercial finite element software ABAQUS. The circumference of the deformed strip and the distance between its two edges are measured on the production line, and these measurements are then compared with the simulation results to validate the accuracy of the finite element model. Subsequently, the optimal initial strip width is determined for production of St37 steel pipes with an external diameter of 219.1 mm and thicknesses of 6, 10, and 14 mm. Determination of initial strip width is done considering criteria such as circumferential length of pipe, longitudinal strain, relative curvature distribution, and thickness distribution of deformed strip. The results showed that an increase in the thickness of the pipe from 6 mm to 14 mm leads to a higher optimal reduction ratio in the fin-pass stations from 1.4 to 2 percent. Consequently, the appropriate on optimal initial strip width for thick-walled pipes is smaller than for thin-walled sections.

Keywords: Roll Forming of Pipe, Initial Strip Width, High Thickness to Diameter

How to cite this article

Khalil Arjmandi M.R, Moslemi Naeini H, Karimi Firouzjaei M, Abbaszadeh B, Kasaei M.M, Numerical and Experimental Investigation on Strip Width in Cold Roll Forming Process of Steel Pipes with High Thickness-to-Diameter Ratio. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(08):529-542.

*Corresponding author's email: moslemi@modares.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-6428-2268



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی عددی و تجربی عرض ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های فولادی با نسبت ضخامت به قطر بالا

محمدرضا خلیل ارجمندی^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲،*}، مهدی کریمی فیروزجائی^۱، بهنام عباس‌زاده^۱، محمد مهدی کسائی^{۳،۴}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، جمهوری اسلامی ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، جمهوری اسلامی ایران

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، جمهوری اسلامی ایران

^۴ موسسه علم و نوآوری در مهندسی مکانیک و صنایع، پورتو، پرتغال

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

شکل‌دهی غلتکی سرد رایج‌ترین روش برای تولید لوله‌های فولادی است که در آن یک ورق فولادی از طریق مجموعه‌ای از ایستگاه‌های شکل‌دهی به تدریج دچار تغییر شکل می‌شود. برای دستیابی به لوله‌هایی با کیفیت بالا، تعیین دقیق عرض ورق اولیه با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های مورد نیاز ضروری است. در این مقاله، عرض ورق اولیه برای لوله‌های فولادی با نسبت ضخامت به قطر بالا بررسی می‌شود، که تأثیر ضخامت از پارامترهای مهم آن است. یک خط صنعتی شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از نرم‌افزار تجاری اجزای محدود اباکوس شبیه‌سازی شده است. محیط ورق تغییر شکل یافته و فاصله بین دو لبه آن در خط تولید اندازه‌گیری شد و با مقایسه نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، صحت مدل اجزای محدود مورد تایید قرار گرفت. سپس، عرض ورق اولیه مناسب برای تولید لوله‌هایی از جنس فولاد St37 با قطر خارجی ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر تعیین گردید. تعیین عرض ورق اولیه با در نظر گرفتن معیارهایی مانند محیط خارجی لوله، کرنش طولی، توزیع انحنای نسبی و توزیع ضخامت ورق تغییر شکل یافته صورت پذیرفت نتایج نشان داد که افزایش ضخامت لوله از ۶ میلی‌متر به ۱۴ میلی‌متر منجر به افزایش میزان کاهش بهینه در مرحله پره‌ای از ۱/۴ درصد به ۲ درصد می‌شود. بر این اساس، عرض ورق اولیه مناسب و بهینه برای لوله‌های جدار ضخیم نسبت به مقاطع جدار نازک کوچک‌تر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: شکل‌دهی غلتکی لوله، عرض ورق اولیه، ضخامت به قطر بالا

نحوه ارجاع به این مقاله

خلیل ارجمندی محمدرضا، مسلمی نائینی حسن، کریمی فیروزجائی مهدی، عباس‌زاده بهنام، کسائی محمد مهدی، بررسی عددی و تجربی عرض ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های فولادی با نسبت ضخامت به قطر بالا، مهندسی مکانیک مدرس. ۵۴۲-۵۲۹-۵۲۹(۰۸):۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moslemi@modares.ac.ir

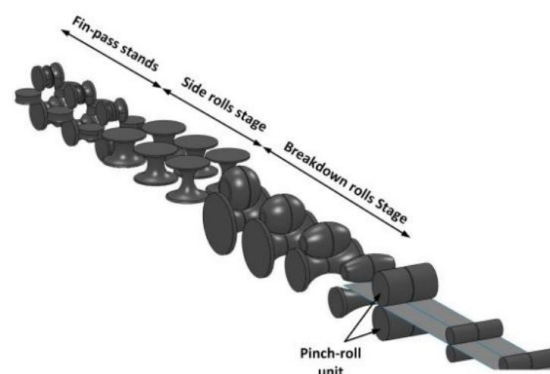
*شناسه آرکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۰۲-۶۴۲۸-۲۲۶۸



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد روشی است که در آن ورق فلزی در اثر ایجاد خم‌های متوالی حین عبور از بین مجموعه‌های غلتک‌های دوار به صورت پیوسته به شکل مقطع مد نظر می‌رسد [۱، ۲]. این فرایند به طور گسترده در صنایع نفت، گاز و آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند ورق فلزی با استفاده از چیدمان و هندسه خاص غلتک‌ها تغییر شکل می‌یابد [۳، ۴]. شکل ۱ فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله را نشان می‌دهد که شامل مراحل شکل‌دهی فشاری، شکل‌دهی کناری و شکل‌دهی پره‌ای است.



شکل ۱ فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله [۴]

Fig.1 Roll forming process of pipe [۴]

از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار برای دستیابی به لوله با هندسه نهایی و ابعاد مطلوب، عرض ورق اولیه می‌باشد. تعیین مناسب عرض ورق اولیه بر روی توزیع یکنواخت ضخامت و توزیع یکنواخت انحنا در لوله نهایی و همچنین کاهش عیوبی مانند موج دار شدن لبه ورق بسیار حائز اهمیت است [۵، ۶]. در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله، ورق تحت تغییر شکل‌های مختلفی از جمله خمش طولی و محیطی و کرنش ضخامتی در هر یک از مراحل فشاری، کناری و پره‌ای قرار می‌گیرد [۷، ۸]. بنابراین، تعیین عرض ورق تابع پارامترهای مختلف شکل‌دهی می‌باشد. به طور کلی عرض ورق اولیه از محاسبه طول تار خنثی لوله نهایی بدست می‌آید. کیم و همکاران [۹] فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی سرد لوله را به صورت سه‌بعدی با استفاده از برنامه‌ای سه‌بعدی به نام شپ‌آر اف شبیه‌سازی کردند و به پیش بینی شکل لبه ورق اولیه بر اساس رگرسیون درجه دو پرداختند. ایشان مناسب‌ترین شکل لبه ورق را برای دستیابی به ناحیه جوش مناسب پیش بینی کردند و دریافتند هر چه ضخامت ورق افزایش پیدا کند، لبه ورق باید به صورت مایل و زاویه‌دار باشد. جیانگ و همکاران [۱۰] برای اولین بار توانستند فرایند شکل‌دهی غلتکی قفسه‌ای را در نرم‌افزار اجزای محدود ال‌اس-داینا به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کنند و به بررسی تغییر شکل ورق در این فرایند بپردازند. کسای و همکاران [۱۱] به بررسی عرض ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی قفسه

ای پرداختند و با استفاده از معیار کماتش لبه ورق، عرض ورق مناسب را پیش بینی کردند. ایشان با بررسی کرنش‌های طولی در لبه ورق، ناحیه مستعد چین خوردگی را مراحل پره‌ای دانستند. کریمی و همکاران [۱۲، ۱۳] به بررسی الگوهای گل مختلف در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد فولادهای استحکام بالا پرداختند. آن‌ها الگوی گل خمش معکوس را به لحاظ توزیع ضخامت و توزیع انحنای نسبی و الگوی گل دایره‌ای را به لحاظ برگشت فنی مناسب دیدند. چنگ و همکاران [۱۴] به وسیله نرم افزار اجزای محدود اباکوس، لوله‌های با قطر یکسان و ضخامت‌های مختلف را شبیه‌سازی کردند و به بررسی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف پذیر لوله پرداختند. آن‌ها متوجه شدند که هر چقدر ضخامت ورق افزایش پیدا کند، مقدار کرنش‌های عرضی نیز افزایش پیدا میکند. امامی و همکاران [۱۵] به بررسی عدم دایره‌ای شدن لوله با در نظر گرفتن الگوی گل‌های لبه‌ای، دو شعاعی، خمش معکوس و دایره‌ای پرداختند. الگوی گل خمش معکوس مقدار عدم دایره‌ای شدن کمتری نسبت به بقیه الگوها داشت.

امروزه استفاده از مقاطع با نسبت ضخامت به قطر بالا به دلیل مزیت استحکام بالای آن مورد توجه قرار گرفته است [۱۶]. در گذشته تولید لوله‌ها با نسبت ضخامت به قطر پایین به راحتی امکان پذیر بود. این در حالی است که به دلیل محدودیتهای فرایند شکل‌دهی، امکان تولید لوله با نسبت ضخامت به قطر بالا وجود نداشت [۱۷، ۱۸]. اهمیت استفاده از سازه‌های ساختمانی، لوله‌های نفت، گاز و آب با دیواره ضخیم موجب شد تا تولید مقاطع با نسبت ضخامت به قطر بالا که به عنوان مقاطع جدار ضخیم شناخته می‌شوند، مورد توجه قرار گیرد [۱۹-۲۱]. لی و همکاران [۲۲] مقاطع با ضخامت‌های بالای ۶ میلی‌متر را به عنوان مقاطع جدار ضخیم معرفی کردند. اما به طور کلی رقوناث و همکاران [۲۳] مقاطع با نسبت ضخامت به قطر داخلی لوله بیش‌تر از ۰/۰۵ را به عنوان مقاطع جدار ضخیم در نظر گرفتند. زلالم و همکاران [۲۴] با استفاده از آزمایش‌های تجربی، به بررسی تنش پسماند در مقاطع فولادی مربعی و مستطیلی پرداختند و متوجه شدند که هر چقدر ضخامت محصول افزایش پیدا کند، تنش پسماند کاهش می‌یابد. لو و همکارانش [۲۵] با استفاده از مدل اجزای محدود به بررسی تبدیل لوله به مقطع مربعی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع جدار ضخیم با در نظر گرفتن کم‌ترین شعاع گوشه پرداختند. آن‌ها متوجه شدند که با افزایش سرعت فرایند، کرنش در ناحیه گوشه‌های مقطع مربعی افزایش می‌یابد و احتمال بروز شکست وجود دارد. لیو و همکاران [۲۶] به بررسی تفاوت فرایند شکل‌دهی غلتکی مستقیم و غیر مستقیم در مقاطع جدار ضخیم پرداختند. آن‌ها فرایند شکل‌دهی غلتکی غیر مستقیم را به لحاظ خواص مکانیکی یکنواخت در قسمت‌های مختلف مقطع نسبت به فرایند شکل‌دهی غلتکی مستقیم مناسب‌تر دیدند.

جدول ۱: درصد کاهش در نظر گرفته شده برای لوله‌های با ضخامت مختلف

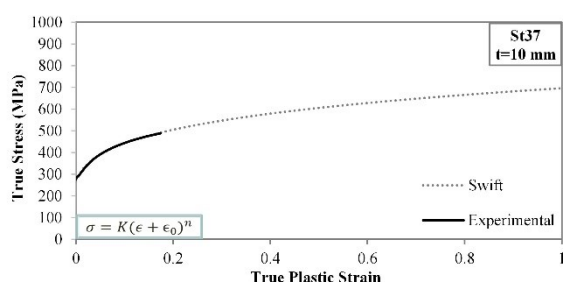
Table 1 Reduction amount considered for pipes of different thicknesses

	Test No.	Reduction amount	Thickness (mm)		
			6	10	14
Initial strip width (mm)	1	0.8%	683.4	671.3	659.2
	2	1%	684.8	672.6	660.5
	3	1.2%	686.2	674	661.9
	4	1.4%	687.5	675.4	663.2
	5	1.6%	688.9	676.7	664.6
	6	1.8%	_____	687.1	665.9
	7	2%	_____	679.5	667.3
	8	2.2%	_____	_____	668.6

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- تعیین خواص مومسان

برای تعیین دقیق خواص مکانیکی ورق فولاد St37، آزمون کشش تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام شد. شکل ۲ منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان حقیقی ورق را نشان می‌دهد. رابطه کارسختی سوئیفت به منظور برازش منحنی جهت تخمین منحنی تنش-کرنش در مقادیر کرنش‌های بالاتر از حد گلوئی شدن نمونه مورد استفاده قرار گرفت. خواص مکانیکی ورق به همراه مقادیر پارامترهای رابطه سوئیفت در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ نمودار تنش حقیقی بر حسب کرنش مومسان حقیقی برای ورق St37

Fig.2 Diagram of true stress-true plastic strain for St37

جدول ۲: خواص مکانیکی ورق به همراه مقادیر پارامترهای رابطه سوئیفت

Table 2: Mechanical properties of the sheet with the values of Swift's parameters

Material	Elastic modulus (GPa)	yield strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Poisson's ratio	K	n	ϵ_0
St37	200	277	488.2	0.3	695.1	0.21	0.01

۲-۲- اندازه‌گیری هندسه ورق

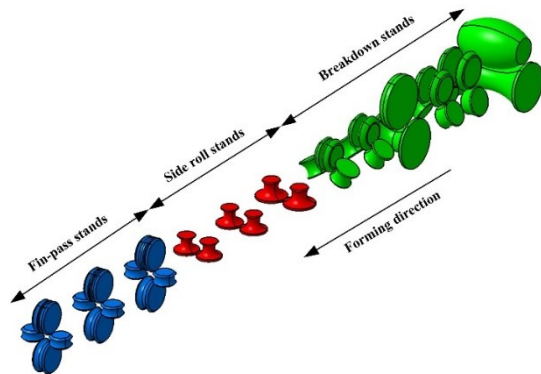
مطابق شکل ۳ عرض ورق اولیه به منظور ورودی شبیه سازی برای هر ضخامت قبل از ورود به خط تولید شکل‌دهی غلتکی سرد لوله به صورت تجربی اندازه‌گیری شد.

از آنجایی که عرض ورق اولیه از پارامترهای تاثیرگذار در مراحل جوشکاری و اندازه کردن لوله می‌باشد، تعیین مناسب آن تا قبل از مرحله جوشکاری بسیار حائز اهمیت است. با توجه به این‌که گزارشی در راستای تعیین عرض ورق در مقاطع با نسبت ضخامت به قطر بالا مشاهده نشده است، در این مقاله با در نظر گرفتن معیارهای کرنش طولی لبه ورق، توزیع انحنای نسبی و توزیع ضخامت به بررسی تغییرشکل ورق پرداخته می‌شود. ابتدا عرض ورق‌های مختلف برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت‌های ۱۰، ۶ و ۱۴ میلی‌متر تعیین شد. سپس شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله انجام شد. به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی، هندسه ورق به دو روش فاصله افقی دو لبه ورق و محیط خارجی ورق در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی در خط تولید مقایسه شد. شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برای ورق‌های با ضخامت مختلف و عرض ورق‌های تعیین شده انجام شد. تغییرشکل ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی به لحاظ معیارهای موردنظر برای ورق با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. در پایان اثر نسبت ضخامت به قطر لوله بر روی عرض ورق بررسی شد و عرض ورق مناسب برای ضخامت‌های مختلف تعیین گردید.

۱-۱- محاسبه عرض ورق اولیه

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، عرض ورق با در نظر گرفتن طول تار خنثی لوله نهایی و مقدار درصد‌های کاهش در ایستگاه‌های پره‌ای محاسبه می‌شود [۲۷]. با توجه به این‌که تعیین عرض ورق تا قبل از مرحله جوشکاری است، از درصد‌های کاهش مراحل پره‌ای برای تعیین عرض ورق استفاده می‌شود. برای بدست آوردن مقدار درصد کاهش مراحل پره‌ای برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت‌های ۱۰، ۶ و ۱۴ میلی‌متر با توجه به نقشه غلتک‌های ایستگاه‌های پره‌ای و اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده بر روی خط تولید، درصد کاهش ایستگاه‌های مرحله پره‌ای در خط تولید کارخانه معادل ۱/۲ درصد از عرض ورق اولیه محاسبه شد. بدین ترتیب، مقادیر در نظر گرفته شده برای عرض ورق به صورت دو سطح کمتر (۸/۰٪ و ۱٪) و دو سطح بیش‌تر (۴/۱٪ و ۶/۱٪) به منظور مقایسه نتایج و بدست آوردن عرض ورق مناسب لحاظ شد. برای ضخامت‌های ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر، تعداد سطح‌های بیش‌تری برای مقایسه در نظر گرفته شده است. مقادیر درصد کاهش به همراه عرض ورق اولیه متناظر هر کدام برای لوله‌های با ضخامت مختلف در جدول ۱ ذکر شده است.

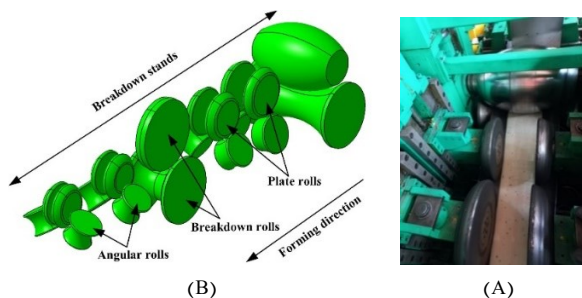
فرایند دارای شش ایستگاه در مرحله فشاری، سه ایستگاه در مرحله کناری و سه ایستگاه در مرحله پره‌ای است.



شکل ۵: شماتیکی از مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله

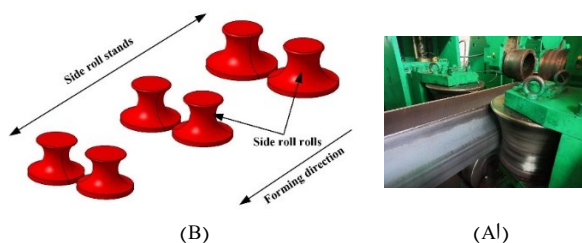
Fig 5. Schematic of modeling the cold roll forming process of a pipe

مطابق شکل ۶ مرحله شکل‌دهی فشاری دارای چهار ایستگاه با غلتک‌های صفحه‌ای و زاویه‌ای است که برای تولید لوله با قطر و ضخامت‌های مختلف، این غلتک‌ها در راستای افقی و عمودی جابه‌جا می‌شوند. مطابق شکل ۷ غلتک‌های مرحله شکل‌دهی کناری که بیش‌تر وظیفه شکل‌دهی قسمت میانی ورق را بر عهده دارند، به صورت هرزگرد می‌چرخند و این بخش هم قابلیت جابه‌جایی در راستای افقی برای تولید انواع لوله با قطر و ضخامت مختلف را دارد.



شکل ۶: شماتیکی از غلتک‌های بخش فشاری در (A) خط تولید (B) شبیه‌سازی

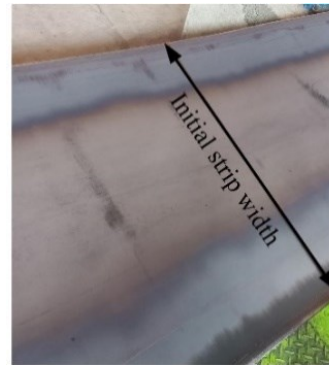
Fig 6. Schematic of the Breakdown station in A) production line B) simulation



شکل ۷: شماتیکی از غلتک‌های بخش کناری در (A) خط تولید (B) شبیه‌سازی

Fig 7. Schematic of side-roll station in A) production line B) simulation

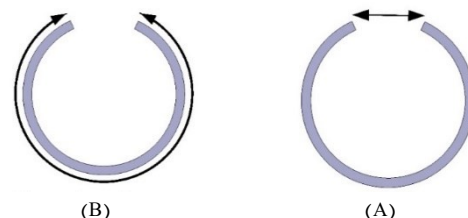
از مهم‌ترین بخش‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، مرحله پره‌ای است. مرحله پره‌ای آخرین مرحله تغییر شکل ورق به لوله نهایی



شکل ۳: اندازه‌گیری تجربی عرض ورق اولیه

Fig 3. Experimental measurement of the initial strip width

در ادامه به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، هندسه ورق تغییرشکل یافته در خط تولید مورد اندازه‌گیری قرار گرفت تا از این طریق بتوان از صحت شبیه‌سازی اطمینان حاصل نمود. مطابق شکل ۴ هندسه ورق تغییرشکل یافته با اندازه‌گیری فاصله افقی دو لبه ورق و نیز محیط خارجی ورق در موقعیت‌های مختلف روی خط تولید مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری فاصله افقی دو لبه با کولیس و اندازه‌گیری محیط خارج ورق با استفاده از متر مخصوص برای لوله به قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر با ضخامت ۶ میلی‌متر انجام شد. در هر مورد، اندازه‌گیری در سه موقعیت انجام شد و مقادیر میانگین و انحراف معیار محیط خارجی و فاصله افقی دو لبه ورق در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴: اندازه‌گیری هندسه ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد
(A) اندازه‌گیری فاصله افقی دو لبه ورق (B) اندازه‌گیری محیط خارجی ورق

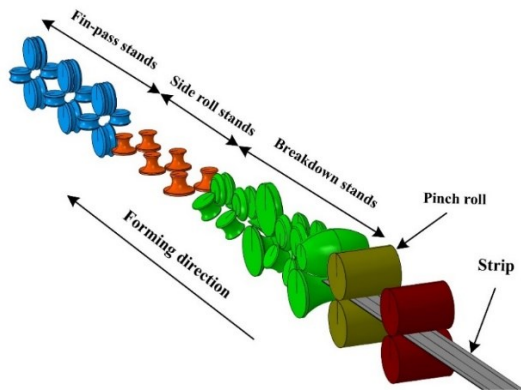
Fig 4. Measuring strip geometry in the cold roll forming process
A) Measuring the horizontal distance between the two edges of the strip B) Measuring the circumferential length of the strip

جدول ۳: اندازه‌گیری تجربی هندسه ورق

Forming Station	SR3	FP1	FP2	FP3
Circumferential length (mm)	716±4	704±2	709±3	710±3
Horizontal distance between two edges	—	32±1	68±1	108±2

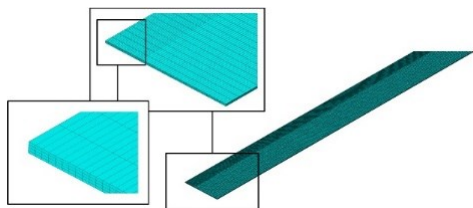
۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

به منظور بررسی اثر عرض ورق اولیه به لحاظ معیارهای مد نظر در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله مطابق با خط تولید صنعتی شرکت فولاد گستر آتنا در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. مطابق شکل ۵ این



شکل ۱۰: شماتیکی از شبیه‌سازی خط شکل‌دهی غلتکی سرد لوله
Fig 9. Schematic of the simulation of a cold roll forming process of a pipe

کاهش داده شد و کرنش طولی لبه ورق مورد بررسی قرار گرفت تا این‌که تفاوت نتایج به حداقل مقدار قابل قبول برسد. مطابق شکل ۱۱ برای افزایش دقت نتایج، در نواحی اطراف لبه ورق که تمرکز تغییرشکل در آن ناحیه وجود دارد، اندازه مش ریزتری (ابعاد در لبه $1/5 \times 4 \times 20$ میلی‌متر) لحاظ شد. در نهایت ورق به 117000 شبکه تقسیم‌بندی شد. ورق از نوع المان سالیید و به‌صورت چهارلایه در راستای ضخامت تعریف شد و نوع المان C3D8R برای آن انتخاب گردید. سرعت حرکت ورق در شبیه‌سازی شکل‌دهی غلتکی سرد لوله مطابق با سرعت اندازه‌گیری شده در خط تولید کارخانه فولاد گستر آتنا برابر با 10 متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. شرایط اصطکاک بین غلتک و ورق با استفاده از قانون کلمب مدل و مقدار ضریب اصطکاک برابر 0.2 در نظر گرفته شد. رفتار ورق به صورت کشسان-مومسان تعریف شد. منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان حقیقی در نرم افزار وارد شد و قانون سخت‌شوندگی همسان‌گرد مورد استفاده قرار گرفت.

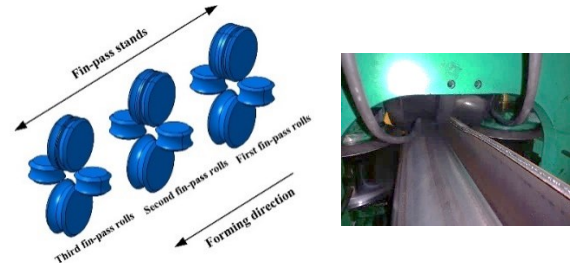


شکل ۱۱: شماتیکی از ورق شبکه‌بندی شده
Fig 11. Schematic of a meshed strip

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده برای لوله از جنس فولاد St37 و قطر $219/1$ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا نتایج به دست آمده برای کرنش طولی لبه، تغییرات محیط خارجی، توزیع انحنای نسبی و توزیع ضخامت ورق تغییرشکل یافته برای ورق با ضخامت 10 میلی‌متر بررسی می‌شود. سپس، اثر ضخامت ورق بر روی عرض ورق اولیه بررسی شده و مقادیر بهینه عرض ورق اولیه مناسب در لوله‌های با نسبت ضخامت به قطر بالا ارائه می‌گردد.

است که در آن عیوب موجود در ورق تغییر شکل یافته به مقدار قابل ملاحظه‌ای اصلاح شده و ورق آماده ورود به مرحله جوش می‌شود (شکل ۸). در این مرحله با اعمال کاهش عرضی، لوله به اندازه نهایی نزدیک می‌شود. به این کاهش عرضی، درصد کاهش نیز گفته می‌شود.



شکل ۸: شماتیکی از غلتک‌های بخش پره‌ای در (A) خط تولید (B) شبیه‌سازی
Fig 8. Schematic of Fin-pass station in A) production line B) simulation

شکل ۹ الگوی گل ورق تغییر شکل یافته در 12 ایستگاه به صورت سراسیمبی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله را نشان می‌دهد. با توجه به انتخاب الگوی گل دایره‌ای برای طراحی خط تولید لوله، هر ایستگاه یک قسمت خاص از مقطع عرضی ورق تحت شکل‌دهی قرار می‌گیرد.



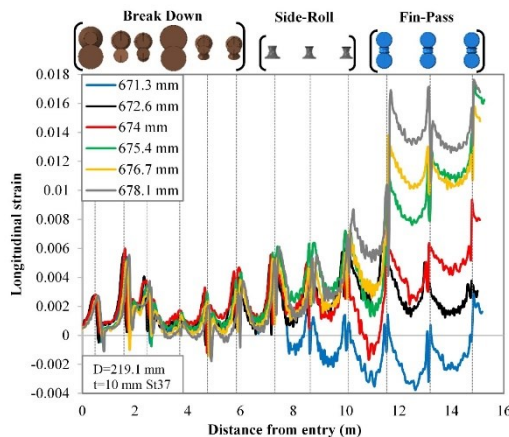
شکل ۹: الگوی گل طراحی شده برای فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله
Fig 10. Flower pattern designed for the cold roll forming process of pipe

مطابق شکل ۱۰ مراحل شکل‌دهی ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله در سه بخش شکل‌دهی فشاری، کناری و پره‌ای مدل‌سازی شد. برای این منظور، تعداد 38 غلتک در نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان عضوهای تماسی معرفی شدند. با توجه به این‌که تغییرشکل غلتک‌ها در مقایسه با ورق بسیار ناچیز است، هر یک از غلتک‌ها به عنوان عضو تماسی صلب در نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شوند. تنها نیمی از ورق در محیط نرم‌افزار آباکوس به دلیل تقارن در مقطع دایره‌ای مدل و شبیه‌سازی شد. ورق در محیط نرم‌افزار آباکوس ایجاد و به عنوان یک عضو تماسی تغییرشکل‌پذیر تعریف گردید. طول ورق در مدل شکل‌دهی غلتکی 12000 میلی‌متر در نظر گرفته شد تا حین شکل‌دهی، هم‌زمان تمامی طول ورق در تماس با غلتک‌های ایستگاه‌های شکل‌دهی قرار داشته باشد.

برای رسیدن به اندازه شبکه مناسب برای مش‌بندی ورق، طی چند مرحله اندازه شبکه‌ها هم در جهت طول و هم در جهت عرض ورق

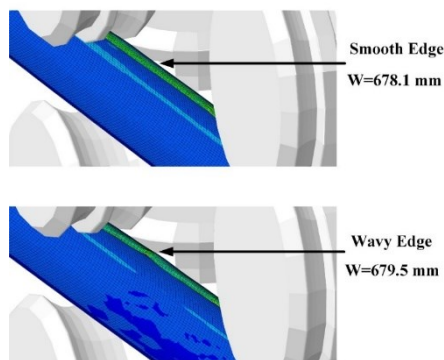
۴-۱- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

مقایسه هندسه ورق تغییرشکل یافته در شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج تجربی به دست آمده برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر، ضخامت ۶ میلی‌متر و عرض ورق اولیه ۶۸۶/۲ میلی‌متر بر مبنای دو معیار فاصله افقی دو لبه ورق نسبت به هم و محیط خارجی ورق تغییر شکل یافته انجام شد. با توجه به این‌که طراحی آزمایش بر مبنای ایستگاه‌های مرحله پره‌ای انجام شده است، مقایسه نتایج در این ایستگاه‌ها حائز اهمیت است. بر این اساس، مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی در سه ایستگاه از مرحله پره‌ای و ایستگاه آخر مرحله کناری صورت گرفت. مطابق شکل ۱۲، اختلاف اندکی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد و درصد خطا کمتر از ۶ درصد می‌باشد که نشان دهنده تطابق خوب نتایج است. بر این اساس، صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مورد تایید قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳: توزیع کرنش طولی در لبه ورق با عرض‌های مختلف در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

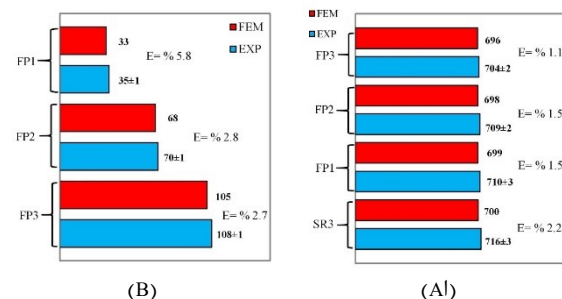
Fig 13. Longitudinal strain distribution at the edge of strips with different widths in the cold roll forming process



شکل ۱۴: عیب کمانش لبه ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله

Fig 14. Strip edge buckling defect in the cold roll forming process of a pipe

نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با ورود ورق به هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای، کرنش طولی در لبه ورق با افزایش شدیدی همراه شده است. افزایش کرنش طولی در هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای ناشی از دو عامل می‌باشد. عامل اول، کاهش محیط خارجی ورق با ورود آن به ایستگاه‌های مرحله پره‌ای است. با اعمال کاهش محیطی، ماده ناچار به سیلان در راستای طولی شده و در نتیجه کرنش در راستای طولی افزایش پیدا می‌کند. از آنجایی که بیش‌ترین فشار کاهش ایستگاه‌های پره‌ای روی

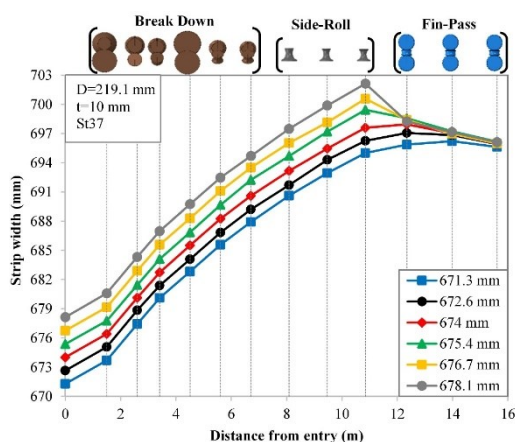


شکل ۱۲: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر (A) اندازه‌گیری محیط خارجی ورق (B) اندازه‌گیری فاصله افقی دو لبه ورق

Fig 12. Comparison of simulation results and experimental tests for a pipe with a diameter of 219.1 mm and a thickness of 6 mm. A) Measurement of the outer perimeter of the strip B) Measurement of the horizontal distance between the two edges of the strip

۴-۲- کرنش طولی لبه ورق

توزیع کرنش طولی در لبه ورق در مراحل مختلف شکل‌دهی برای ورق‌های با عرض مختلف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل تا قبل از مرحله کناری، کرنش طولی لبه ورق برای عرض ورق‌های مختلف تقریباً یکسان است. با ورود ورق به مرحله کناری، کرنش طولی برای نمونه‌های مختلف اندکی متفاوت شده است. این در حالی است که با ورود ورق به مرحله پره‌ای، اختلاف کرنش طولی لبه ورق برای ورق‌های با عرض اولیه متفاوت محسوس می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض ورق اولیه، بیشینه کرنش طولی در لبه ورق در هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای افزایش یافته است. زیرا همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، افزایش عرض ورق اولیه موجب افزایش درصد کاهش ایستگاه پره‌ای می‌گردد. از این رو، با افزایش کرنش طولی لبه ورق احتمال موج‌دار شدن لبه ورق نیز زیاد می‌شود. با توجه به شکل ۱۳، عرض ورق‌های ۶۷۱/۳ میلی‌متر و ۶۷۲/۶ میلی‌متر به علت این‌که درصد کاهش روی آن‌ها اعمال نمی‌شود، کرنش

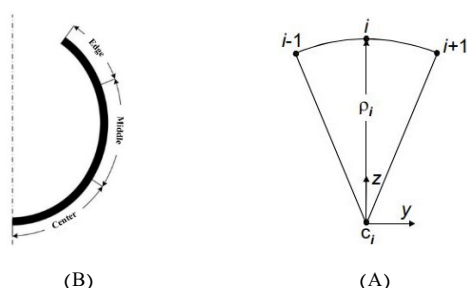


شکل ۱۶: تغییرات محیط خارجی ورق با عرض‌های مختلف در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

Fig 16. Circumferential length of strips with different widths in the cold roll forming process

۴-۳- توزیع انحنای نسبی ورق تغییر شکل یافته

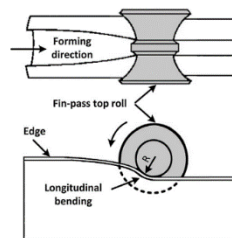
به منظور بررسی دقیق ورق تغییر شکل یافته در فرایند شکل‌دهی غلتکی، توزیع انحنای نسبی مقطع لوله در ایستگاه‌های شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، کدی در نرم افزار اکسل با توجه به شکل ۱۷ الف تهیه شد که ورودی آن مختصات گره‌های ورق و خروجی آن انحنای ورق می‌باشد. برای بررسی تغییرات انحنای در راستای مقطع عرضی ورق در ایستگاه‌های مختلف، فاکتور بی- بعد انحنای نسبی به صورت نسبت انحنای ورق تغییر شکل یافته به انحنای لوله نهایی تعریف شد. هر چه انحنای نسبی مقطع تغییر شکل یافته ورق به یک نزدیک‌تر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد، محصول نهایی به لوله نزدیک‌تر خواهد بود. این در حالی است که کمتر بودن انحنای نسبی از یک نشان دهنده تغییر شکل اعمالی کمتر است. مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته مطابق شکل ۱۷ به سه ناحیه مرکزی، میانی و لبه ورق تقسیم شده است که در ادامه به بررسی این سه ناحیه پرداخته می‌شود.



شکل ۱۷: (A) مقطع ورق تغییر شکل یافته برای محاسبه توزیع انحنای نسبی (B) نواحی مرکزی، میانی و لبه مقطع تغییر شکل یافته

Fig 17. a) Deformed strip cross-section for calculating relative curvature distribution b) Central, middle and edge of the deformed cross-section

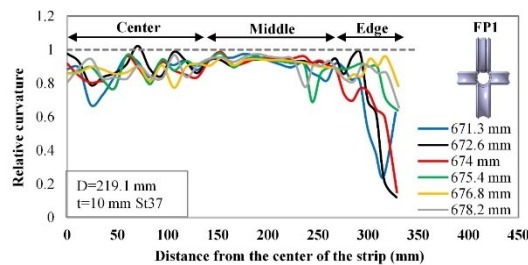
ناحیه لبه ورق اعمال می‌شود، افزایش کرنش طولی در لبه ورق در مقایسه با سایر نواحی قابل توجه است. کاهش عرضی در این مرحله سبب افزایش ضخامت ورق به خصوص در ناحیه لبه نیز می‌گردد. عامل دوم، خمش طولی ناحیه لبه ورق است که مطابق شکل ۱۵ هنگام ورود ورق به فضای بین غلتک‌ها رخ می‌دهد. این خمش موجب افزایش ناگهانی کرنش طولی در لبه ورق می‌شود [۲۸].



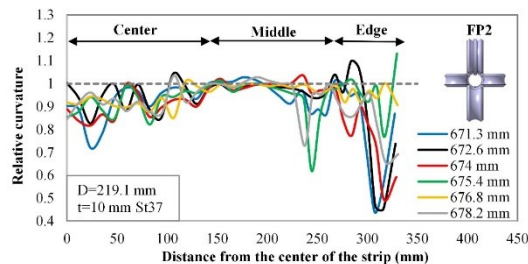
شکل ۱۵: خمش طولی در ناحیه لبه ورق در ایستگاه پره‌ای

Fig 15. Longitudinal bending in strip edge at Fin-pass station

اعمال کاهش عرضی در مرحله پره‌ای یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر روی عیوب شکل‌دهی تاثیر به‌سزایی دارد. ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه‌های فشاری و کناری دارای عیوب زیادی است که عمده این عیوب در مرحله پره‌ای اصلاح می‌شوند. شکل ۱۶ تغییرات محیط خارجی ورق را در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله با ضخامت ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تا قبل از مرحله پره‌ای، محیط خارجی ورق افزایش پیدا می‌کند. زیرا تا قبل از ایستگاه پره‌ای محدودیتی در جهت عرضی به ورق اعمال نمی‌شود و کشش محیطی ناشی از خمش عرضی در لایه خارجی ورق در هر ایستگاه باعث افزایش محیط خارجی می‌شود. با ورود ورق به ایستگاه پره‌ای، کاهش محیطی به ورق اعمال می‌شود. به نحوی که هرچه قدر محیط خارجی ورق ورودی بیشتر باشد، کاهش محیطی بیشتری به آن اعمال می‌گردد. از این رو محیط خارجی ورق در مرحله پره‌ای به صورت نزولی کاهش می‌یابد تا این که به مقدار محیط استاندارد لوله نهایی برسد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، سه عرض ورق ۶۷۱/۳، ۶۷۲/۶ و ۶۷۴ میلی‌متر هنگامی که وارد ایستگاه اول پره‌ای می‌شوند، کاهش محیطی به آن‌ها اعمال نمی‌شود و محیط خارجی آن‌ها در اثر خمش عرضی در ایستگاه پره‌ای افزایش یافته است. زیرا محیط خارجی مقطع این سه عرض تا قبل از ایستگاه اول پره‌ای (به ترتیب برابر با ۶۹۵، ۶۹۶ و ۶۹۷ میلی‌متر) کمتر از محیط خارجی مقطع الگوی گل مورد استفاده برای طراحی غلتک‌های ایستگاه اول پره‌ای (برابر با ۶۹۸ میلی‌متر) است. از این رو به جای اعمال کاهش محیطی روی آن‌ها، خمش محیطی اعمال شده و محیط خارجی ورق افزایش می‌یابد. همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، عرض ورق ۶۷۱/۳، ۶۷۲/۶ و ۶۷۴ میلی‌متر دارای کرنش طولی کوچک‌تر در لبه ورق می‌باشند. این موضوع در تطابق با نتایج به دست آمده در مورد عدم اعمال کاهش محیطی برای این دو عرض ورق است.



(A)



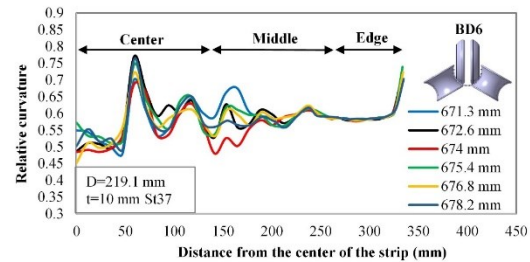
(B)

شکل ۱۹: توزیع انحنای نسبی مقطع ورق تغییر شکل یافته (A) ایستگاه اول پره‌ای (B) ایستگاه دوم پره‌ای

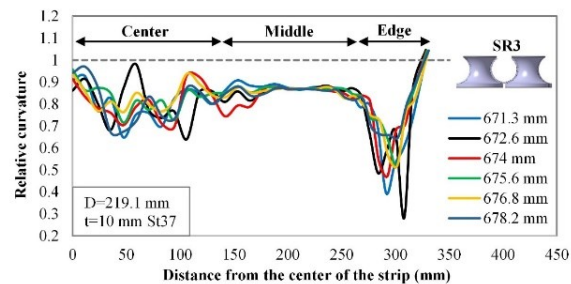
Fig 19. Distribution of relative curvature of the deformed strip a) First fin-pass station b) Second fin-pass station

توزیع انحنای نسبی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه سوم پره‌ای در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با توجه به استفاده از الگوی گل دایره‌ای برای تغییر شکل ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، توزیع انحنای نسبی در قسمت میانی و مرکزی تقریباً برای تمامی عرض‌ها یکسان می‌باشد. این در حالی است که مطابق با شکل ۲۰ ب نوساناتی در لبه ورق مشاهده می‌شود. انحنای قسمت لبه ورق برای عرض ورق‌های اولیه $671/3$ ، $672/6$ و 674 میلی‌متر اختلاف زیادی با انحنای لوله نهایی دارد. بررسی کرنش طولی لبه ورق و محیط خارجی ورق در بخش قبل نشان داد که کاهش عرضی ایستگاه پره‌ای در این دو عرض ورق به درستی اعمال نشده است. بنابراین، کوبش ناحیه لبه ورق به خوبی صورت نگرفته و اصلاح هندسه ناحیه لبه انجام نشده است. اما در عرض ورق اولیه $675/4$ ، $676/8$ و $678/2$ میلی‌متر توزیع انحنای خوبی را نسبت به سایر عرض ورق‌ها نشان می‌دهد. این موضوع به علت اعمال کاهش عرضی مناسب به ورق در مرحله پره‌ای برای این عرض ورق می‌باشد.

شکل ۱۸ الف و ب توزیع انحنای نسبی در مراحل فشاری و کناری را در سه ناحیه لبه، میانی و مرکزی ورق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مرحله فشاری به علت وجود شکل‌دهی دایره‌ای به صورت سرشیبی، در تمام نواحی مقطع عرضی ورق انحنای کمتر از حدود $0/8$ مشاهده می‌شود. با ورود ورق به مرحله کناری، قسمت میانی و مرکزی ورق با تغییر شکل بیش‌تری همراه می‌شوند و انحنای نسبی این نواحی به حدود $0/8$ الی 1 نزدیک می‌شود. این در حالی است که ناحیه لبه ورق تحت تغییر شکل کم‌تری است و انحنای آن از مقدار نهایی فاصله زیادی دارد.



(A)

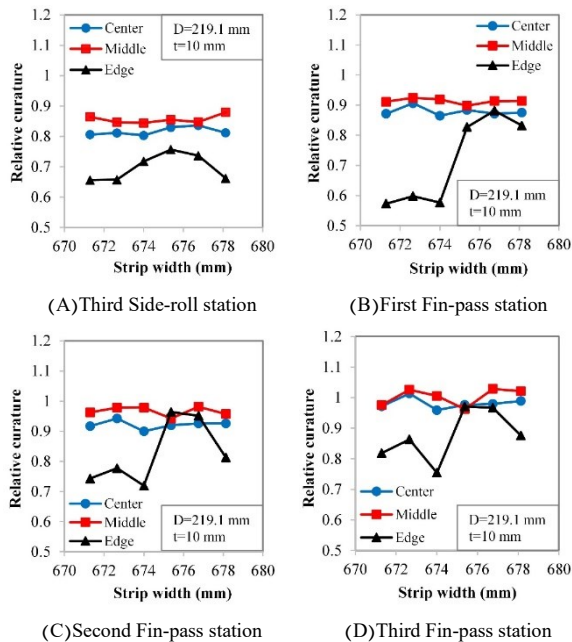


(B)

شکل ۱۸: توزیع انحنای نسبی مقطع ورق تغییر شکل یافته (A) ایستگاه سوم بخش فشاری (B) ایستگاه سوم بخش کناری

Fig 18. Distribution of relative curvature of the deformed strip a) Third station of the break down b) Third station of the side roll

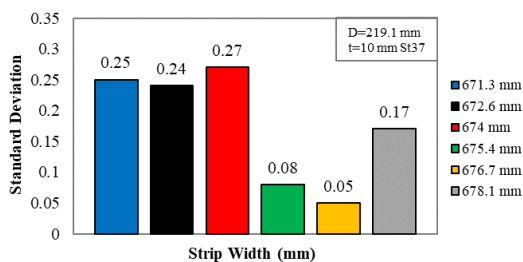
با ورود ورق به مرحله پره‌ای، نواحی خم نشده به تدریج کاهش می‌یابد و از غیر یکنواختی توزیع انحنای ورق تغییر شکل یافته نیز کاسته می‌شود. شکل ۱۹ الف و ب توزیع انحنای نسبی در ایستگاه اول و دوم پره‌ای را نشان می‌دهد. استفاده از ایستگاه‌های پره‌ای و اعمال کاهش عرضی موجب می‌شود تا ورق در تماس کامل با غلتک‌ها قرار گرفته و نواحی خم نشده ورق نیز دچار تغییر شکل شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی عرض ورق‌ها قسمت میانی و مرکزی به طور کامل تحت تغییر شکل قرار گرفته‌اند و توزیع انحنا در این نواحی نزدیک به یک می‌باشد. با این حال، قسمت لبه ورق برای عرض ورق‌های مختلف دچار نوساناتی است که بررسی آن‌ها را در ایستگاه سوم پره‌ای انجام می‌شود. زیرا مقطع ورق به طور کامل از فرایند خارج شده است و آماده برای ایستگاه جوشکاری می‌باشد.



شکل ۲۱: میانگین انحنای نسبی مقطع تغییرشکل یافته (A) ایستگاه سوم کناری (B) ایستگاه اول پره‌ای (C) ایستگاه دوم پره‌ای (D) ایستگاه سوم پره‌ای

Fig 21. Average relative curvature of the deformed section a) Third side-roll station b) First fin-pass station c) Second fin-pass station d) Third fin-pass station

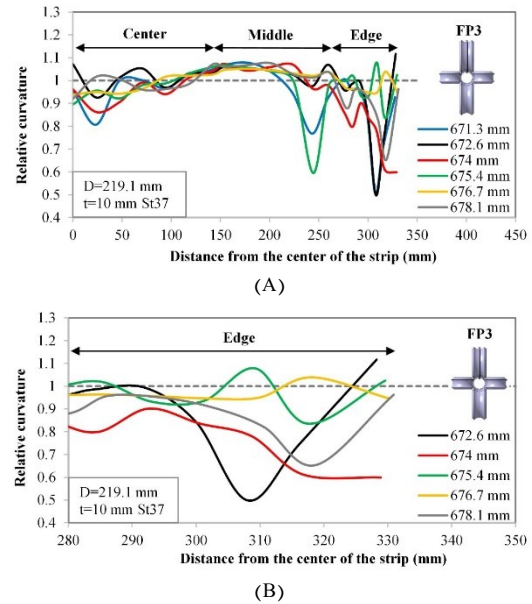
شاخص بعدی برای بررسی توزیع انحنای نسبی، فاکتور انحراف معیار از مرجع می‌باشد که بر اساس انحراف میانگین مقادیر انحنای نسبی از مقدار انحنای ایده‌آل بر اساس طراحی الگوی گل در نظر گرفته شده است. این شاخص برای بررسی انحراف معیار انحنای قسمت لبه ورق برای عرض ورق‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۲۲ عرض ورق‌های ۶۷۵/۴ و ۶۷۶/۷ میلی‌متر کمترین میزان انحراف را دارند که مناسب‌تر هستند.



شکل ۲۲: انحراف معیار از مرجع برای توزیع انحنای نسبی قسمت لبه ورق تغییر شکل یافته

Fig 22. Standard deviation from the reference for the distribution of relative curvature of the edge part of the deformed strip

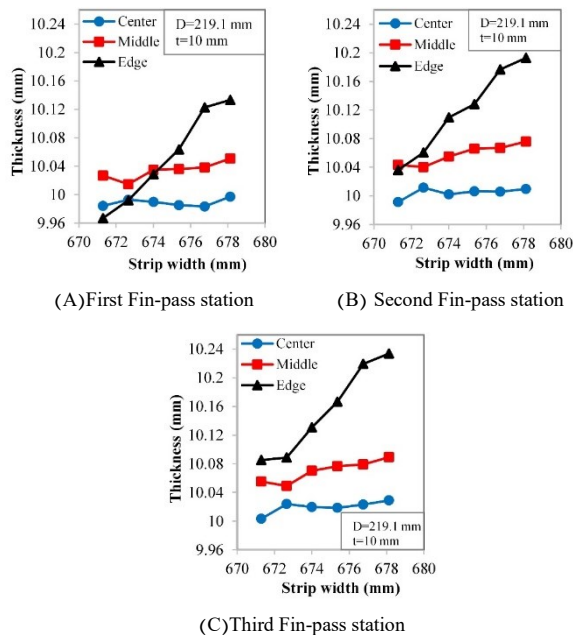
در نهایت با در نظر گرفتن منحنی تغییرات انحنای نسبی و نیز شاخص‌های میانگین انحنای نسبی سه ناحیه و انحراف معیار از مرجع، عرض ورق اولیه مناسب تعیین می‌گردد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، عرض ورق اولیه ۶۷۶/۷ میلی‌متر به لحاظ شاخص‌های تعریف شده برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر مناسب است.



شکل ۲۰: توزیع انحنای نسبی مقطع ورق تغییر شکل یافته (الف) ایستگاه سوم پره‌ای (ب) ناحیه لبه ورق

Fig 20. Distribution of relative curvature of the deformed strip A) Third fin-pass station B) Strip edge area

شاخص دیگری که در بخش توزیع انحنای نسبی بررسی شد، میانگین انحنای نسبی مقطع تغییرشکل یافته در سه ناحیه می‌باشد. میانگین انحنای نسبی مقطع تغییر شکل یافته در سه ایستگاه پره‌ای و یک ایستگاه قبل آن یعنی ایستگاه سوم کناری در شکل ۲۱ نشان داده شده است. نزدیک‌تر بودن میانگین انحنای نسبی سه ناحیه به یک نشان دهنده توزیع انحنای نسبی مناسب می‌باشد. به لحاظ میانگین توزیع انحنای نسبی، با افزایش عرض ورق اولیه تا قبل از مرحله پره‌ای، نواحی میانی و مرکزی دچار تغییر شکل یکسان و یکنواختی بوده‌اند؛ اما ناحیه لبه تغییرشکل کمتری داشته است. با ورود ورق به ایستگاه پره‌ای، نواحی میانی و مرکزی تحت تغییرشکل یکسانی قرار می‌گیرند؛ اما ناحیه لبه ورق به علت اعمال کاهش عرضی تحت انحنای بیش‌تری قرار گرفته است. همان‌طور که در بخش‌های قبل مشاهده شد، عرض ورق‌هایی که درصد کاهش روی آن‌ها اعمال نشده است دارای توزیع انحنای کمی می‌باشند. میزان انحنای نواحی مختلف ورق برای دو عرض ۶۷۵/۴ و ۶۷۶/۷ میلی‌متر نسبت به بقیه عرض‌ها نزدیک‌تر است و به لحاظ معیار میانگین انحنای نسبی مناسب می‌باشند.



شکل ۲۴: میانگین توزیع ضخامت مقطع تغییر شکل یافته
(A) ایستگاه اول پره‌ای (B) ایستگاه دوم پره‌ای (C) ایستگاه سوم پره‌ای
Fig 24. Average thickness distribution of deformed strip
A) First fin-pass station B) Second fin-pass station C) Third fin-pass station

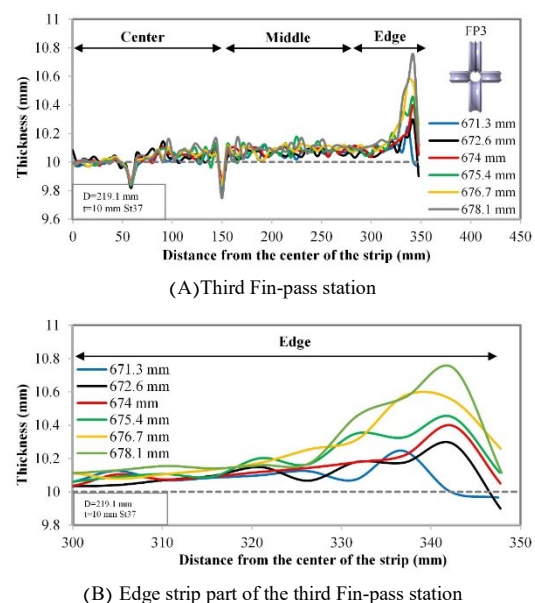
بررسی تغییرشکل ورق برای لوله با قطر ۲۱۹/۱ میلی‌متر و ضخامت های ۶ و ۱۴ میلی‌متر مشابه بخش های قبل انجام شد. مقایسه عرض ورق های مختلف برای ضخامت های ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر به ترتیب در جدول ۴ و جدول ۵ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن شاخص‌های تعریف شده، برای لوله با ضخامت ۶ میلی‌متر، عرض ورق اولیه ۶۸۷/۵ میلی‌متر و برای لوله با ضخامت ۱۴ میلی‌متر، عرض ورق اولیه ۶۶۷/۳ میلی‌متر به عنوان عرض ورق اولیه مناسب و بهینه تعیین گردید.

جدول ۴: مقایسه معیارها برای عرض ورق های مختلف برای لوله با ضخامت ۶ میلی‌متر

Criteria reviewed	Initial strip width (mm)				
	683.4	684.8	686.3	687.5	688.9
Circumferential length	×	×	✓	✓	✓
Edge buckling	✓	✓	✓	✓	×
Relative curvature	×	×	×	✓	×
Thickness distribution	×	×	✓	✓	✓

۴-۴- توزیع ضخامت ورق تغییر شکل یافته

همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، توزیع ضخامت در ناحیه لبه ورق با افزایش عرض ورق، افزایش پیدا کرده است. با افزایش عرض ورق میزان کاهش فشاری عرضی در ایستگاه پره‌ای افزایش می‌یابد که این کاهش موجب جریان ماده در جهت طولی و ضخامتی می‌شود. شکل ۲۴ میانگین توزیع ضخامت در سه ناحیه مرکزی، میانی و لبه را نشان می‌دهد. به علت تمرکز زیاد کرنش فشاری محیطی روی قسمت لبه ورق، ضخامت این ناحیه نسبت به بقیه ناحیه‌ها بیش‌تر می‌باشد. هر چقدر ناحیه لبه ضخامت بیش‌تری نسبت به بقیه نواحی داشته باشد، ناحیه جوش مناسبی ایجاد می‌شود. مطابق با بخش‌های قبل، مشاهده می‌شود که به دلیل عدم اعمال کاهش عرضی، توزیع ضخامت در لبه ورق برای سه عرض ۶۷۱/۳، ۶۷۲/۶ و ۶۷۴ میلی‌متر بسیار کم است. بیش‌ترین تغییرات ضخامت برای عرض ورق اولیه ۶۷۸/۱ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲۳: توزیع ضخامت مقطع تغییر شکل یافته
(A) ایستگاه سوم پره‌ای (B) قسمت لبه ورق ایستگاه سوم پره‌ای
Fig 23. Thickness distribution of the deformed strip A) Third fin-pass station B) Edge strip part of the third fin-pass station

افزایش کم ضخامت ناحیه لبه در عرض ورق های ۶۷۱/۳، ۶۷۲/۶ و ۶۷۴ میلی‌متر نشان دهنده اعمال نشدن درست کاهش عرضی در ایستگاه‌های پره‌ای می‌باشد که کوبش لبه ورق در این عرض‌ها به صورت صحیحی انجام نشده است. از این رو به لحاظ معیار توزیع ضخامت ورق، عرض ورق‌های بیش‌تر از ۶۷۴ میلی‌متر توصیه می‌گردد (شکل ۲۴).

جدول ۵: مقایسه معیارها برای عرض ورق های مختلف برای لوله با

ضخامت ۱۴ میلی متر

Table 5. Comparison of criteria for different strip widths for pipe of 14 mm thickness

Criteria reviewed	Initial strip width (mm)						
	659.2	660.5	661.9	663.2	664.6	665.9	667.3
Circumferential length	×	×	×	×	✓	✓	✓
Edge buckling	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Relative curvature	×	×	×	×	×	×	✓
Thickness distribution	×	×	×	×	✓	✓	✓

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر عرض ورق اولیه در فرایند شکل دهی غلتکی سرد لوله با نسبت ضخامت به قطر بالا پرداخته شد. این فرایند با استفاده از عرض ورق های اولیه مختلف برای سه ضخامت ۶، ۱۰ و ۱۴ میلی متر در نرم افزار اجزای محدود آباکوس مدل سازی و شبیه سازی شد. تغییر شکل ورق با استفاده از معیارهای کرنش طولی لبه ورق، توزیع انحنای نسبی مقطع تغییر شکل یافته و توزیع ضخامت ورق مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت به بررسی اثر نسبت ضخامت به قطر لوله بر روی تعیین عرض ورق اولیه مناسب پرداخته شد.

نتایج به صورت خلاصه به این صورت بیان می شود:

- با ورود ورق به ایستگاه های شکل دهی، کرنش طولی لبه ورق افزایش می یابد. زیرا در این مراحل ناحیه لبه ورق تحت تماس بیش تری با غلتک ها است و طول خطوط جریان در ناحیه لبه افزایش می یابد. با افزایش عرض ورق اولیه، پیشینه کرنش طولی در لبه ورق در هر یک از ایستگاه های پره ای زیاد شده و در صورتی که عرض ورق اولیه از مقدار معینی بیش تر شود، موجب بروز عیب کماتش لبه ورق می گردد. برای لوله با ضخامت ۱۰ میلی متر و عرض ورق بهینه ۶۶۷/۳ میلی متر، پیشینه کرنش طولی لبه به میزان ۰/۱۶ می باشد.
- به منظور بررسی تغییرات انحنا در راستای مقطع عرضی ورق در ایستگاه های مختلف، فاکتور بی بعد انحنای نسبی معرفی شد. نواحی لبه، مرکزی و میانی ورق در مراحل فشاری و کناری دارای تغییرات توزیع انحنای نسبی یکنواخت می باشند. این در حالی است که با ورود ورق به مرحله پره ای، نواحی خم نشده به تدریج کاهش یافته و از غیر یکنواختی توزیع انحنا کاسته می شود. برای لوله با ضخامت ۱۰ میلی متر و عرض ورق بهینه ۶۶۷/۳ میلی متر، میانگین انحنای نسبی در سه ناحیه نزدیک به یک و انحراف معیار از مرجع در لبه ورق ۰/۰۵ می باشد.

- محیط خارجی ورق تا قبل از مرحله پره ای به صورت پیوسته افزایش یافته و با ورود به مرحله پره ای به علت افزایش فشار محیطی ناشی از کاهش عرضی، از محیط خارجی ورق کاسته می شود. در نتیجه، ضخامت ورق تا قبل از ایستگاه های پره ای در قسمت مرکزی و میانی ورق تقریباً ثابت است. اما با ورود به مرحله پره ای، ضخامت ورق در ناحیه لبه به علت جریان ماده در راستای طولی و ضخامتی زیاد می شود. به این ترتیب، عیوبی از جمله ناصافی لبه ورق اصلاح شده و موجب افزایش کیفیت جوش نیز می گردد. برای ورق ضخامت ۱۰ میلی متر و عرض ورق بهینه ۶۶۷/۳ میلی متر، میانگین ضخامت در قسمت میانی و مرکزی حدود ۱۰/۱ میلی متر و در قسمت لبه ۱۰/۶ میلی متر می باشد.
- پیشنهاد می شود تا برای مقاطع جدار ضخیم در مقایسه با مقاطع جدار نازک، عرض ورق اولیه کوچک تر و درصد کاهش مرحله پره ای بزرگ تر در نظر گرفته شود. بر این اساس، برای لوله با ضخامت ۶ میلی متر، عرض ورق اولیه ۶۸۷/۵ میلی متر با درصد کاهش ۱/۴٪ و برای لوله با ضخامت ۱۴ میلی متر، عرض ورق اولیه ۶۶۷/۳ میلی متر با درصد کاهش ۲٪ به عنوان مقادیر بهینه تعیین گردید.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] G. T. Halmos, Roll forming handbook. Crc Press, 2005. <http://doi.org/10.1201/9781420030693>
- [2] H. Talebi-Ghadikolaee, M. Elyasi, Y. Dadgar Asl, A. Zeinolabedin Beygi, and M. Davoudi, "Feasibility of forming U-shaped microchannels by flexible-die forming process," Karafan Journal, vol. 19, No. 3, pp. 53-70, 2022.
- [3] M.M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, B. Abbaszadeh, A.H. Roohi, M.B. Silva, and P.A.F. Martins, "On the prediction of wrinkling in flexible roll forming," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 113, no. 7, pp. 2257-2275, 2021. <http://doi.org/10.1007/s00170-021-06790-4>
- [4] S. Hajiahmadi, H. Moslemi Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, R. Safdarian, and A. Zeinolabedin-Beygi, "Insights into spring-back prediction: a comparative analysis of constitutive models for perforated U-shaped roll-formed steel profiles," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.

- [14] J. Cao, X. Wang, K. Ruan, J. Cheng, Z. Wei, and R. Zhao, "Numerical simulation research on UDF flexible roll forming of multi-specification thin-walled circular tubes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, no. 9, pp. 4503–4517, 2023. <http://doi.org/10.1007/s00170-023-11824-0>
- [15] A. E. Satellou and M. Sedighi, "Effect of different roll-forming flower patterns on coiled tubing ovality and pressure performance," *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 225, p. 211687, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211687>
- [16] M.R. Khalil Arjmandi, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, B. Abbaszadeh, M. Karimi Firouzjaei, and L.F.M. da Silva, "A method for determining initial strip width in roll forming of thick-walled steel pipes," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, p. 09544054241308925, 2024. <http://doi.org/10.1177/09544054241308925>
- [17] S. Hajiahmadi, H. Moslemi Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, R. Safdarian, and A. Zeinolabedin-Beygi, "Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 129, no. 9, pp. 3965–3978, 2023. [doi:10.1007/s00170-023-12516-5](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12516-5)
- [18] A. Zeinolabedin-Beygi, H. Moslemi Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, A.H. Rabiee, and S. Hajiahmadi, "Predictive modeling of spring-back in pre-punched sheet roll forming using machine learning," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 59, no. 7, pp. 463–474, 2024. <http://doi.org/10.1177/03093247241263685>
- [19] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, M.J. Mirnia, and L.F.M. da Silva, "Microscale modeling of the ductile fracture behavior of thin stainless steel sheets," *Thin-Walled Structures*, vol. 196, p. 111457, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111457>
- [20] P. Men, J. Di, F. Qin, E. Lin, J. Wang, and X. Peng, "Experimental investigation on axial compression behaviour of cold-formed thick-walled steel tubes," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 214, p. 108431, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108431>
- [21] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, and M.J. Mirnia, "A constitutive model for stainless steel 304 sheet considering size effect in micro-scale," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 8, pp. 519–528, 2022. <http://doi.org/10.52547/mme.22.8.519>
- [22] G.-W. Li, Y.-Q. Li, J. Xu, and X. Cao, "Experimental investigation on the longitudinal residual stress of cold-formed thick-walled SHS and RHS steel tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 138, pp. 473–484, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.036>
- [23] R. Reghunath and S. Korah, "Analysis of Internally Pressurised Thick Walled Cylinders," *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, vol. 1, no. 2, pp. 83–89, 2014.
- 134, no. 3, pp. 1915–1933, 2024. <http://doi.org/10.1007/s00170-024-14211-5>
- [5] M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, M. Salmani Tehrani, and R. Azizi Tafti, "Numerical and experimental investigation of strip deformation in cage roll forming process for pipes with low ratio of thickness/diameter," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1315, no. 1, pp. 593–598, 2011. <http://doi.org/10.1063/1.3552512>
- [6] B. Shirani Bidabadi, H. Moslemi Naeini, R. Safdarian, and H. Barghikar, "Investigation of over-bending defect in the cold roll forming of U-channel section using experimental and numerical methods," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 236, no. 10, pp. 1380–1392, 2022. <http://doi.org/10.1177/09544054221076628>
- [7] M.M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, B. Abbaszadeh, S. J. Hashemi, and L.F.M. da Silva, "Improvement of material flow in tube hydroforming by advanced sealing methods," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 238, no. 3, pp. 442–453, 2024. <http://doi.org/10.1177/09544054231184914>
- [8] H. Mohammadi Najafabadi, H. Moslemi Naeini, R. Safdarian, M.M. Kasaei, D. Akbari, and B. Abbaszadeh, "Effect of forming parameters on edge wrinkling in cold roll forming of wide profiles," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, pp. 181–194, 2019. <http://doi.org/10.1007/s00170-018-2885-x>
- [9] N. Kim, B. Kang, and S. Lee, "Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, no. 2, pp. 479–486, 2003. [http://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00645-9](http://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00645-9)
- [10] J. Jiang, D. Li, Y. Peng, and J. Li, "Research on strip deformation in the cage roll-forming process of ERW round pipes," *Journal of materials processing technology*, vol. 209, no. 10, pp. 4850–4856, 2009. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.011>
- [11] M.M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, R. Azizi Tafti, and M. Salmani Tehrani, "Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion," *Journal of materials processing technology*, vol. 214, no. 2, pp. 190–199, 2014. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.012>
- [12] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, B. Abbaszadeh, and L.F.M. da Silva, "Effect of flower pattern design on the springback of high strength steel in cold roll forming process of pipes," in *International Conference on Mechanics of Solids*, Springer, pp. 49–61, 2022. http://doi.org/10.1007/978-3-031-26797-0_5
- [13] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, H. Farahmand, B. Abbaszadeh, and 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, 2018.

steel columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 371–379, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.004>

[27] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, B. Abbaszadeh, and M.M. Kasaei, "Effect of flower pattern on the curvature of high-strength steel pipe in roll forming," *Analy. Numer. Methods Mech*, vol. 1, no. 1, pp. 9–18, 2022.

[28] H. Badparva, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, Y. Dadgar Asl, B. Abbaszadeh, and L.F.M. da Silva, "Deformation length in flexible roll forming," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 125, no. 3, pp. 1229–1238, 2023. <http://doi.org/10.1007/s00170-023-10803-9>

[24] M. Z. Abathun, J. Han, and W. Yu, "Effects of manufacturing methods and production routes on residual stresses of rectangular and square hollow steel sections: a review," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 3, p. 100, 2021. <http://doi.org/10.1007/s43452-021-00193-8>

[25] Z. Luo, M. Sun, Z. Zhang, C. Lu, G. Zhang, and X. Fan, "Finite element analysis of circle-to-rectangle roll forming of thick-walled rectangular tubes with small rounded corners," *International Journal of Material Forming*, vol. 15, no. 6, p. 73, 2022. <http://doi.org/10.1007/s12289-022-01719-y>

[26] D. Liu, H. Liu, Z. Chen, and X. Liao, "Structural behavior of extreme thick-walled cold-formed square