

## Comparison of Conventional Roll Forming Process and Flexible Pipe Roll Forming Process

Zeinab Jabaseh<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>1,2\*</sup>, Siamak Mazdak<sup>3</sup>, Yaghoub Dadgar Asl<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Article History

Received: December 16, 2025

Revised: January 12, 2026

Accepted: January 13, 2026

ePublished: February 14, 2026

### ABSTRACT

This paper, relying on a developed mold model and a geometric model based on the involute curve, investigates the strain stress behavior, the gradual load transfer and the possibility of geometric and mechanical defects in the two processes. The aim is to present an analytical-numerical method for accurately comparing the forming steps, determining the position and angle of the rollers and analyzing the effect of the proposed arrangement on improving the mechanical response of the sheet. The working method includes developing the mold model, extracting the involute equations, determining the configuration of the five-station rollers by numerical solution in MATLAB and analyzing the stress-strain analysis with a 3D Abaqus model. The results showed that the equivalent strain study at the first station indicated that the conventional roll forming process produces 15% more strain in the edge area than the flexible process. Also, the longitudinal strain in critical areas such as the edge is 79% lower in the flexible roll forming process than in the conventional roll forming process. In terms of stress, the average values obtained show that the flexible roll forming process produces a 27% reduction in stress compared to the conventional one. By eliminating sudden jumps in diameter, more gradual control of curvature and more uniform distribution of loading, the flexible roll forming process not only reduces critical strains, but also effectively reduces the possibility of defects such as edge cracking, local thinning and cross-sectional distortion.

**Keywords:** Flexible Roll Forming, Involute Curve, Pipe Forming, ERW Pipe, Flower Pattern Design

### How to cite this article

Jabaseh Z, Moslemi Naeini H, Mazdak S, Dadgar Asl Y, Comparison of conventional roll forming process and flexible pipe roll forming process. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(03):157-168.

\*Corresponding author's email: [moslemi@modares.ac.ir](mailto: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.



## مقایسه فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر لوله

زینب جبسه<sup>۱</sup>، حسن مسلمی نایینی<sup>۲\*</sup>، سیامک مزدک<sup>۳</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

### چکیده

این مقاله با تکیه بر یک الگوی گل توسعه یافته و مدل هندسی مبتنی بر منحنی اینولوت، رفتار تنش کرنش، نحوه انتقال تدریجی بارگذاری و احتمال بروز عیوب هندسی و مکانیکی را در دو فرایند مذکور بررسی می کند. هدف، ارائه یک روش تحلیلی-عددی برای مقایسه دقیق مراحل شکل دهی، تعیین موقعیت و زاویه غلتک ها و تحلیل اثر چیدمان پیشنهادی در بهبود پاسخ مکانیکی ورق است. روش کار شامل توسعه الگوی گل، استخراج معادلات اینولوت، تعیین پیکربندی غلتک های پنج ایستگاه با حل عددی در متلب و تحلیل تنش کرنش با مدل سه بعدی آباکوس است. نتایج نشان داد که بررسی کرنش معادل در ایستگاه نخست بیانگر آن است که فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم ۱۵ درصد کرنش بیشتری در ناحیه لبه بیشتر از فرایند انعطاف پذیر ایجاد می کند. همچنین کرنش طولی در نواحی بحرانی مانند لبه، در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ۷۹ درصد کمتر از فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم است. از نظر تنش نیز متوسط مقادیر به دست آمده نشان می دهد که فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ۲۷ درصد کاهش تنش نسبت به مرسوم ایجاد می کند. فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر با حذف جهش های ناگهانی قطر، کنترل تدریجی تر انحنا و توزیع یکنواخت تر بارگذاری، نه تنها کرنش های بحرانی را کاهش می دهد، بلکه احتمال بروز عیوبی مانند ترک لبه، نازک شدگی موضعی و اعوجاج مقطع را نیز به طور مؤثری کم می کند.

### اطلاعات مقاله

#### نوع مقاله

مقاله پژوهشی

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

**کلیدواژه ها:** شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر، منحنی اینولوت، شکل دهی لوله، لوله های جوش مقاومت الکتریکی، طراحی الگوی گل

### نحوه ارجاع به این مقاله

جبسه زینب، مسلمی نایینی حسن، مزدک سیامک، دادگر اصل یعقوب، مقایسه فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر لوله، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۵۷-۱۷۸: ۱۴۰۴؛ ۲۶(۰۳)

\*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: moslemi@modares.ac.ir

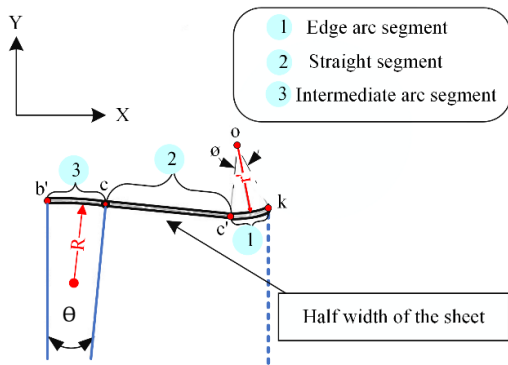
\*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: ۰۳۰۷-۵۷۳۷-۰۰۰۲-۰۰۰۰-۰۰۰۰



## ۱- مقدمه

برای لوله‌های جوشکاری مقاومت الکتریکی یکی از مهم‌ترین محصولات فلزی مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله انتقال آب، نفت و گاز، ساخت‌وساز و خودروسازی هستند. افزایش تقاضا برای تولید لوله‌هایی با مشخصات متنوع باعث شده است که کارایی، انعطاف‌پذیری و مقرون‌به‌صرفه بودن فرایندهای تولید بیش از پیش اهمیت پیدا کند. در روش‌های مرسوم تولید، مجموعه‌ای از ایستگاه‌های شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر ایستگاه مجهز به غلتک‌های منحنی‌شکل اختصاصی است. با تغییر قطر لوله، مجموعه غلتک‌ها باید تعویض شوند؛ فرایندی که علاوه بر زمان‌بر بودن، به فضای ذخیره‌سازی قابل‌توجهی برای نگهداری تعداد زیادی غلتک نیاز دارد. در لوله‌های فولادی جدار نازک، چالش‌هایی چون برگشت فنری، کرنش‌های زیاد فرایند و سخت‌شوندگی نوار نیز وجود دارد که در نهایت نسبت تسلیم (YR) را افزایش می‌دهد. نسبت تسلیم - تعریف‌شده به صورت نسبت استحکام تسلیم (YS) به استحکام کششی (TS) - به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان تغییرشکل‌پذیری لوله مطرح است و مقادیر کمتر آن برای لوله‌های خطی مطلوب‌تر است [۱،۲]. با توجه به این چالش‌ها و هم‌زمان با نیازهای رو به رشد صنعت مدرن، در کاربردهای لوله‌های جدار نازک گسترده‌تر و با اهمیت بیشتری مواجه شده است. در همین راستا، کریمی فیروزجایی و همکاران [۳] پژوهشی جامع روی شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های فولادی با استحکام بالا انجام دادند و نشان دادند که چهار نوع الگوی گل - دایره‌ای، لبه‌ای، دو شعاعی - تأثیرات متفاوتی بر انحنای توزیع ضخامت و میزان برگشت فنری دارند. نتایج آنها بیانگر برتری الگوی خمش معکوس از نظر حداقل انحراف انحنای و یکنواختی ضخامت است. در مطالعه‌ای دیگر، لی و همکاران [۴] سازوکار شکل‌دهی غلتکی خطی لوله‌صاف را بررسی کرده و نشان دادند که تغییر شکل مومسان قابل‌توجهی در مرکز و لبه‌های نوار رخ می‌دهد و بیشترین میزان کرنش در ایستگاه‌های پره‌ای دیده می‌شود. دنگ و همکاران [۵] با بهره‌گیری از راهبرد شکل‌دهی خمش معکوس و مدل‌سازی منحنی مکعبی، الگوی گل ۲۱ مرحله‌ای و چیدمان مرتبط با آن را ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که گرچه موقعیت غلتک‌ها به‌طور محسوس بر حالت تماس و توزیع تنش اثر می‌گذارد، اما اثر آن بر هندسه نهایی لوله محدود است. کانگ و همکاران [۶] با مقایسه چهار روش خم‌کاری - محیطی، لبه‌ای، مرکزی و ترکیبی - نشان دادند که روش خم‌کاری ترکیبی در کاهش عیوب لبه مانند برآمدگی و موج‌دار شدن عملکرد بهتری دارد. ساکو و همکاران [۷] نیز با انجام تحلیل‌های عددی روی روش‌های دو شعاعی و خمش معکوس دریافتند که گرچه طرح هندسی در این روش‌ها مشابه است، اما بسته به راهبرد انتخاب‌شده، رفتار کماتش و توزیع کرنش طولی تفاوت قابل‌توجهی دارد. آن‌ها تأکید کردند که شکل‌دهی خمش معکوس در مقایسه با روش‌های دیگر، توان

بیشتری در کنترل برگشت فنری و بهبود شکل‌پذیری دارد. تانیموتو و همکاران [۱] نیز با اشاره به هزینه و زمان بالای تولید و تعویض غلتک‌ها، استفاده از غلتک‌های اینولوت را به‌عنوان یک راه حل مؤثر معرفی کردند که با امکان استفاده برای قطرهای مختلف، انعطاف‌پذیری فرایند را به شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ارتقا می‌دهد. در ادامه این مسیر، کسای و همکاران [۸] معادلاتی برای محاسبه کرنش در نواحی انتقالی پروفیل‌های دارای عرض متغیر ارائه کرده و نشان دادند که تغییر شکل در این نواحی حاصل ترکیبی از شکل‌دهی غلتکی مرسوم و فرایند لبه دار کردن است. آنها در پژوهش بعدی [۹] یک دستگاه نیمه صنعتی برای پروفیل‌های با عرض متغیر ساختند و با تحلیل توزیع تنش و کرنش، سازوکار چین‌خوردگی لبه نوار در شکل‌دهی انعطاف‌پذیر را بررسی کردند. بادپروا و همکاران [۱۰] نیز با مطالعه اثر قطر غلتک دریافتند که هرچند قطر غلتک تأثیر ناچیزی بر عیوب در پروفیل دارد، اما انحراف لبه نسبت به مسیر مطلوب را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. رضایی و همکاران [۱۱] نیز اثر پارامترهای مختلف هندسی بر تابیدگی ورق را بررسی کرده و نشان دادند که افزایش زاویه شکل‌دهی، طول لبه و تنش تسلیم - همچنین کاهش شعاع ناحیه انتقال - موجب افزایش تابیدگی می‌شود؛ آنها شکل بهینه منحنی انتقال را نیز برای کاهش عیوب معرفی کردند. در راستای توسعه فناوری‌های پیشرفته شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، چنگ و همکاران [۱۲] پروفیل‌های غلتکی قوسی-مماس-اینولوت و یک طراحی بهینه‌شده از الگوی گل را برای شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر لوله‌های جوشکاری مقاومت الکتریکی معرفی کردند که با شبیه‌سازی‌های عددی اعتبارسنجی شد. رویکرد پیشنهادی آنها باعث بهبود توزیع کرنش عرضی، ساده‌سازی فرایند آماده‌سازی غلتک‌ها برای قطرهای مختلف لوله و کاهش وزن غلتک‌ها به میزان حدود ۳۵ درصد شد و مسیر تازه‌ای برای توسعه شکل‌دهی غلتکی سبک و انعطاف‌پذیر ارائه داد. وانگ و همکاران [۱۳] یک روش جدید شکل‌دهی غلتکی برای لوله‌های فولادی توسعه دادند که قابلیت شکل‌پذیری در بخش کناری را افزایش می‌دهد، محدودیت‌های روش انعطاف‌پذیر را برطرف می‌کند و به‌طور چشمگیری عیوب غلتک، نشانه‌های سطحی و پدیده کماتش را کاهش می‌دهد. کوراموتو و همکاران [۱۴] نیز یک روش شکل‌دهی غلتکی ارائه کردند که از غلتک‌هایی با انحنای متغیر و پروفیل تقریباً اینولوت استفاده می‌کند. این روش امکان تولید لوله با قطرهای با استفاده از یک مجموعه غلتک و تعداد کمتر مراحل شکل‌دهی را فراهم می‌سازد و در عین حال خمش لبه و برگشت فنری را به حداقل رسانده و شکل‌پذیری کلی را بهبود می‌بخشد. همچنین، کائو و همکاران [۱۵] نشان دادند که شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر موجب کاهش برگشت فنری و افزایش دقت در حفظ قطر بیرونی می‌شود، که مزایای مهم این فناوری را در تولید پیشرفته لوله‌ها برجسته می‌کند.



شکل ۱ تصویر شماتیک از مقطع خمش معکوس ورق.  
Fig. 1 Schematic illustration of the reverse bending cross-section of the sheet.

## ۲- روش کار

### ۱-۲ طراحی الگوی گل

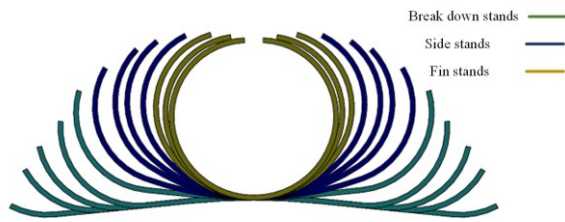
ویژگی بنیادی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر لوله، تغییر شعاع انحنای مقطع در ایستگاه‌های مختلف است؛ به بیان دیگر، تعیین می‌شود که حرکت غلتک‌ها چگونه باید تنظیم شود تا بتوان لوله با هر قطر دلخواه را تولید کرد. در این راستا، دو مولفه اصلی یعنی الگوی گل و منحنی اینولوت غلتک به‌عنوان مبنای طراحی مورد توجه قرار گرفتند و تمامی روابط موردنیاز از طریق روش تحلیلی توسعه‌یافته استخراج شد. پس از تعیین تعداد ایستگاه‌هایی که طی آن ورق به تدریج به لوله تبدیل می‌شود، مشخص می‌گردد که ایستگاه‌های یک تا چهار ورق را بر اساس خمش معکوس شکل‌دهی می‌کنند، ایستگاه پنجم جهت خمش غلتک میانی تغییر داده می‌شود، و از ایستگاه ششم تا یازدهم ورق به روش شعاعی دبل شکل می‌گیرد. با توجه به تقارن الگوی گل، تنها نیمه مقطع لوله مدل‌سازی شد که این کار زمان تحلیل را به نصف کاهش می‌دهد. نصف سطح مقطع ورق برای چهار ایستگاه نخست به سه ناحیه هندسی تقسیم شده و برای هر ناحیه، معادلات استخراجی جداگانه تدوین گردید. شکل ۱ نمای شماتیک بخش‌های مختلف سطح مقطع ورق را نشان می‌دهد.

لازم است مشخص شود که در گذار ورق از یک ایستگاه به ایستگاه بعدی کدام متغیرهای هندسی تغییر می‌کنند تا معادلات لازم برای تعیین این متغیرها به‌درستی تدوین شوند. در ادامه، برای دستیابی به روابط بخش قوس لبه که در یک نقطه با غلتک اینولوت مشترک است، از معادلات منحنی اینولوت استفاده شد؛ این معادلات مبنای تولید قوس دایره‌ای لبه هستند. با تعیین دقیق نقطه تماس مشترک میان منحنی اینولوت و قوس دایره‌ای لبه، امکان محاسبه مختصات مرکز دایره لبه فراهم می‌شود. هدف اصلی توسعه مدل تحلیلی، دستیابی به مدلی انعطاف‌پذیر است که در آن زاویه‌ها، شعاع‌های خمش، موقعیت غلتک‌ها، زاویه اولیه لبه و ضخامت ورق بتوانند به‌سادگی تغییر داده شوند. شکل ۲ الگوریتم به‌کاررفته برای استخراج معادلات الگوی گل مبتنی بر خمش معکوس را نمایش می‌دهد.

دینگ و همکاران [۱۶] برای افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در تولید لوله‌های مستقیم، روشی نو مبتنی بر اصل خمکاری بیش از حد در شکل‌دهی سه‌نقطه‌ای متقارن ارائه کردند. در این روش، با استفاده از اثر خمکاری اضافی، پیش از شکل‌دهی نهایی، الگوی تماس غلتک و لوله اصلاح می‌شود تا شکل بهینه حاصل گردد. مختصات تماس و زوایای غلتک‌ها به‌صورت تحلیلی تعیین شده و برای تنظیم سریع موقعیت و زاویه غلتک‌ها در مرحله اولیه به‌کار می‌رود؛ بنابراین امکان تولید لوله‌هایی با قطر و ضخامت‌های مختلف بدون نیاز به تعویض کامل غلتک‌ها فراهم می‌شود. نتایج آزمایش روی لوله‌های  $\Phi 50 \times 2$  و  $\Phi 80 \times 2$  نشان داد که خطای قطر نهایی کمتر از  $0.2\%$  میلی‌متر بوده و کیفیت محصول بالا است. این روش زمان و هزینه آماده‌سازی خط را به‌طور چشمگیری کاهش داده و کاربرد صنعتی مؤثری برای تولید سریع و دقیق لوله‌ها دارد.

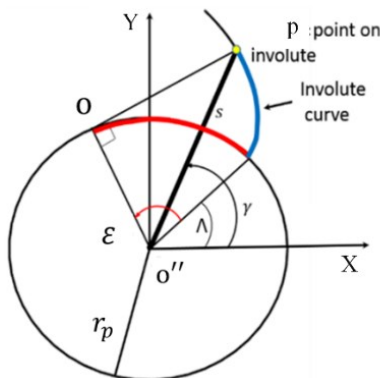
وی و همکاران [۱۷] با مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم افزار تخصصی کوپرا سهم موضعی هر گذر غلتک را تحلیل کرده و روش خمکاری موضعی چندشعاعه و راهبرد جدید موقعیت‌دهی ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش صنعتی نشان داد که طول لبه افزایش نمی‌یابد و رابطه خطی بین کرنش‌ها و نسبت ضخامت به قطر برقرار است. این روش امکان تولید اندازه‌های مختلف لوله بدون تعویض غلتک و با کیفیت سطحی بالا را فراهم می‌کند و زمان تنظیم و هزینه انبار غلتک‌ها را به‌طور قابل توجه کاهش می‌دهد.

در مطالعات پیشین، تعیین پیکربندی غلتک‌ها – از جمله زاویه چرخش و موقعیت آنها – عمدتاً بر ایستگاه شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار کپرا انجام شده و نتایج به‌طور کامل متکی بر تنظیمات داخلی این نرم‌افزار بوده است. با وجود این، چنین پارامترهایی باید برای هر قطر لوله به‌صورت اختصاصی تعیین شوند و شکل هندسی غلتک نیز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر فرایند شکل‌دهی داشته باشد. در این مقاله، الگوی گل مبتنی بر خمش معکوس رابطه مند شده و با معادله اینولوت غلتک تلفیق شد. معادلات حاصل به‌صورت عددی در محیط متلب حل گردید و بدین ترتیب موقعیت، شیب و زاویه چرخش غلتک‌ها برای یک فرایند شکل‌دهی پنج‌ایستگاه استخراج شد. داده‌های خروجی متلب به‌عنوان مدل تحلیلی وارد نرم‌افزار آباکوس گردید تا تحلیل مکانیکی تنش و کرنش با دقت انجام شود. در مرحله بعد، الگوی گل استخراج‌شده مبنای شبیه‌سازی هر دو فرایند شکل‌دهی غلتکی مرسوم و شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها امکان مقایسه مستقیم دو فرایند را از نظر مسیر تغییر شکل، توزیع تنش و کرنش، رفتار لبه ورق و کیفیت نهایی مقطع فراهم کردند. با وجود استفاده از یک الگوی گل مشترک، فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌واسطه اعمال تدریجی انحنا و توزیع بهتر بارگذاری، عملکرد یکنواخت‌تر و مقطع نهایی با کیفیت بالاتری نسبت به فرایند مرسوم ارائه می‌دهد.



شکل ۳ الگوی گل لوله Ø32 میلی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر.

Fig. 3 Flower pattern for the Ø32 mm tube with a wall thickness of 1 mm.



شکل ۴ منحنی اینولوت ایجاد شده توسط زاویه غلتش ε، روی یک دایره پایه با شعاع  $r_p$ .

Fig. 4 The involute curve generated by the rolling angle ε on a base circle of radius  $r_p$ .

## ۲-۲- طراحی پروفیل غلتکهای اینولوت و تعیین موقعیت و چرخش آن

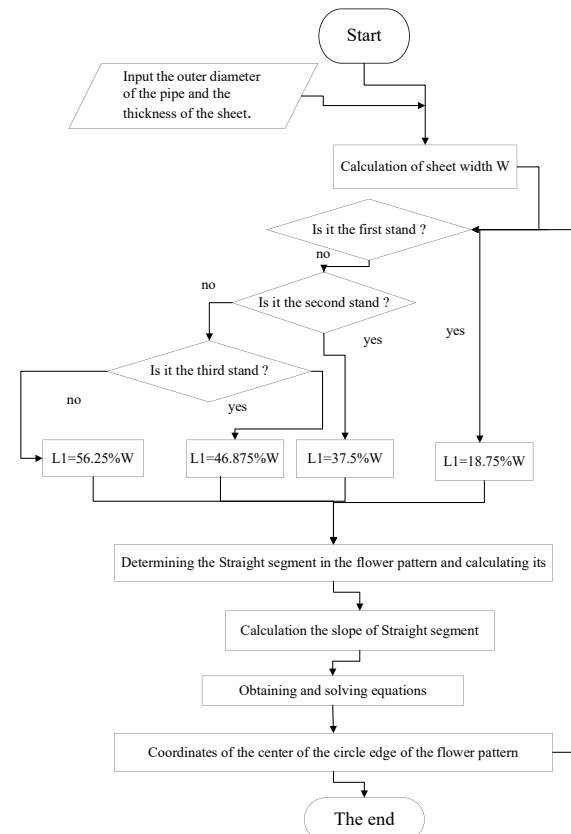
ویژگی اصلی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر لوله، شعاع انحنای لوله در ایستگاه‌های مختلف است. به عبارت دیگر چرخش غلتک به چه صورت انجام خواهد شد تا بتواند هر لوله دلخواه را تولید کرد. غلتک بالایی جابه‌جایی روی محوره‌های X و Y و چرخش حول محور Z را دارد. در یک سیستم مختصات دکارتی، معادله اساسی یک منحنی دوبعدی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X_{ro} = r_p \times (\cos(\varepsilon + \lambda) + \varepsilon \sin(\varepsilon + \lambda)) \quad (1)$$

$$Y_{ro} = r_p \times (\sin(\varepsilon + \lambda) - \varepsilon \cos(\varepsilon + \lambda)) \quad (2)$$

که در آن  $r_p$ ،  $\varepsilon$  و  $\lambda$  به ترتیب شعاع دایره پایه، زاویه غلتش و زاویه اولیه منحنی اینولوت هستند. پروفیل غلتک منحنی اینواوت با محدوده خاصی از  $\varepsilon$  تشکیل می‌شود. مقدار  $\lambda$  بستگی به انتخاب مبدا اینولوت دارد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، یک نقطه دلخواه در منحنی اینولوت می‌تواند در یک سیستم مختصات دکارتی یا یک سیستم مختصات استوانه‌ای نشان داده شود.

با در نظر گرفتن چرخش غلتک اینولوت حول محور Z، نقطه تماس غلتک با ورق (P) بر حسب قطر لوله دلخواه، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، تغییر می‌یابد.



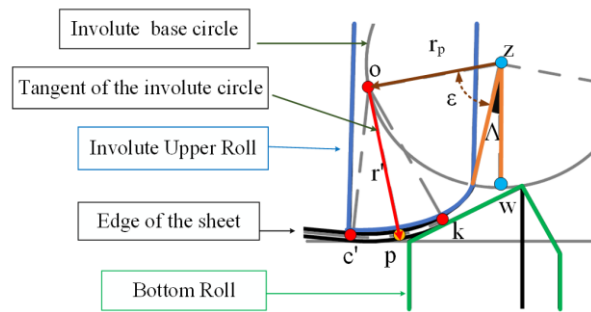
شکل ۲ الگوریتم ترسیم الگوی گل خمش معکوس توسعه‌یافته برای روش پیشنهادی.

Fig. 2 The developed algorithm for drawing the inverse bending-flower pattern in the proposed method.

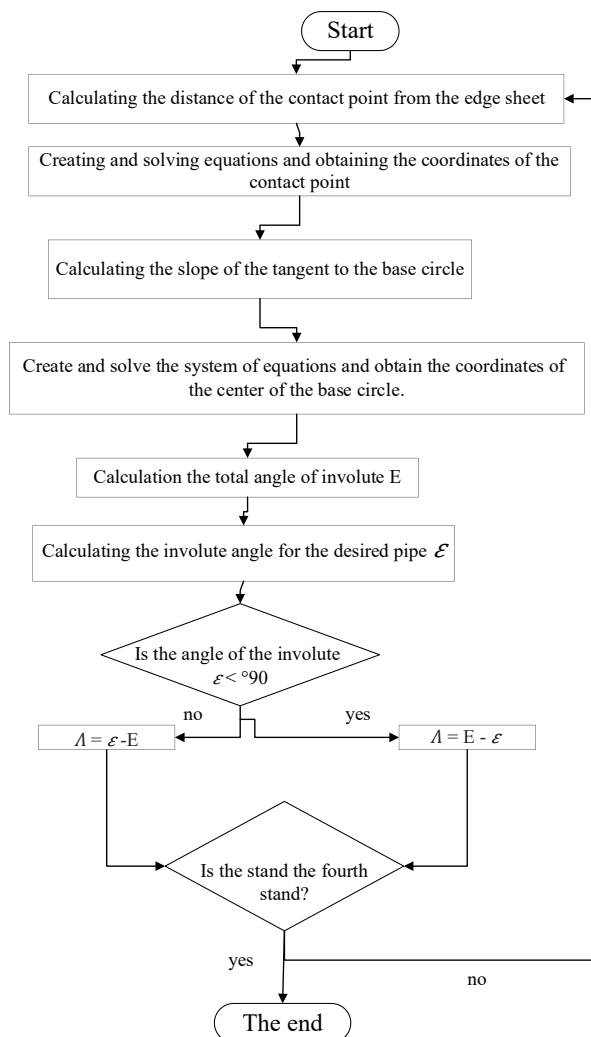
الگوی گل فرایند پیشنهادی با تکیه بر روش خمش معکوس و بر اساس معادلات و الگوریتم ارائه شده برای ایستگاه‌های شکل‌دهی تولید شده است. این الگوریتم، تغییرات هندسی ورق در ایستگاه‌های اصلی را گام‌به‌گام محاسبه کرده و امکان پیش‌بینی دقیق مسیر تغییر شکل را فراهم می‌کند. برای بخش‌های ایستگاه‌های کناری و ناحیه پره‌ای ورق نیز از روش دو شعاعی استفاده شد؛ روشی که در آن پروفیل ورق از ترکیب دو قوس با شعاع‌های متفاوت ترسیم شده و امکان مدل‌سازی دقیق‌تر توزیع خمش در لبه‌ها و نواحی انتقالی را فراهم می‌سازد. در ادامه، تمامی این معادلات در محیط سالی‌دورک پیاده‌سازی شدند تا شکل نهایی الگوی گل با دقت هندسی مناسب بازسازی شود. خروجی مدل سالی‌دورک بیانگر آن است که تغییرات زاویه، شعاع خم، و موقعیت غلتک‌ها مطابق با پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی تطابق کامل دارند. شکل ۳ الگوی گل به دست آمده را بر اساس روش خمش معکوس و ترسیم دو شعاعی در نواحی کناری و پره‌ای نمایش می‌دهد.

### ۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای شبیه سازی فرایند شکل دهی غلتکی، در ابتدا لازم است هر یک از غلتکهای شکل دهی با استفاده از نرم افزار طراحی به کمک رایانه مدل سازی شوند. در این راستا، هر یک از غلتکهای شکل دهی به صورت جداگانه در نرم افزار سالیید ورک طراحی و مدل سازی شدند. سپس، به منظور چیدمان خط تولید، مدل های ایجاد شده به محیط نرم افزار آباکوس ۲۰۲۱ منتقل شده و در موقعیت های تعیین شده قرار گرفتند. با توجه به تقارن هندسی فرایند شکل دهی غلتکی، تنها نیمی از مدل فرایند در نرم افزار آباکوس وارد شد. در مرحله نخست، سه مدل مجزا برای ایستگاه های شکل دهی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر لوله، با سه قطر متفاوت، طراحی و شبیه سازی گردید. هدف از این مرحله، بررسی تأثیر تغییر قطر بر عملکرد ایستگاه ها و رفتار هندسی و مکانیکی لوله در طول فرایند شکل دهی بود. در مرحله دوم، برای یک قطر مشخص، مدل سازی و شبیه سازی کامل فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و همچنین فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر انجام شد. نتایج حاصل از این دو فرایند با یکدیگر مقایسه گردید تا تفاوت های عملکردی، کیفیت شکل دهی و نحوه توزیع تنش ها در هر فرایند مورد ارزیابی قرار گیرد. شکل ۷، نمایی شماتیک از ایستگاه اول در فرایند شکل دهی غلتکی را در دو چیدمان متفاوت نمایش می دهد. در شکل ۷ الف، چیدمان مرسوم شامل یک غلتک بالا، یک غلتک پایین و ورق قرار گرفته بین آنها، نشان داده شده است. در این فرایند، ابعاد و پروفیل غلتک ها برای هر قطر لوله به صورت اختصاصی طراحی می شود و در صورت تغییر قطر، نیاز به تعویض کامل غلتک ها وجود دارد. این ساختار ساده برای تولید مقاطع یکنواخت با هندسه ثابت مناسب است. در شکل ۷ ب، چیدمان فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر نشان داده شده است. در این فرایند، غلتک های بالایی مرسوم جای خود را به غلتک های اینولوت داده اند، این غلتک ها به دلیل ساختار هندسی خاص خود، قابلیت حرکت و چرخش نیاز به تعویض برای اندازه های مختلف قطر لوله ندارند و با تغییر موقعیت غلتک ها به صورت خودکار می توان لوله دلخواه را تولید کرد. همچنین، غلتک پایینی مرسوم با مجموعه ای شامل سه غلتک - دو غلتک میانی و یک غلتک پایینی - جایگزین شده است. این ترکیب با قابلیت جابه جایی اجزا، امکان تولید طیف وسیعی از قطرهای لوله را فراهم می سازد. طراحی متقارن و چندبخشی این چیدمان، کنترل دقیق تر تغییر شکل، توزیع یکنواخت نیروها و بهبود کیفیت سطحی محصول را ممکن می سازد. مقایسه این دو چیدمان در شکل ۷، تفاوت های ساختاری و عملکردی میان فرایند مرسوم و فرایند انعطاف پذیر را به خوبی نشان می دهد و مبنایی برای تحلیل های عددی و تجربی در ادامه مقاله فراهم می سازد.

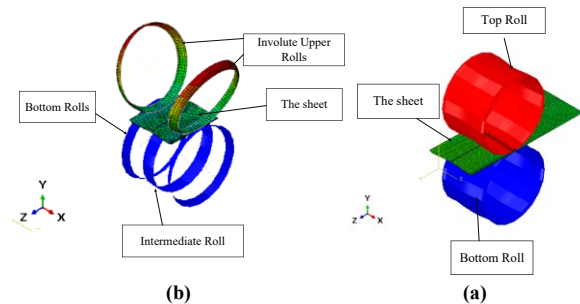
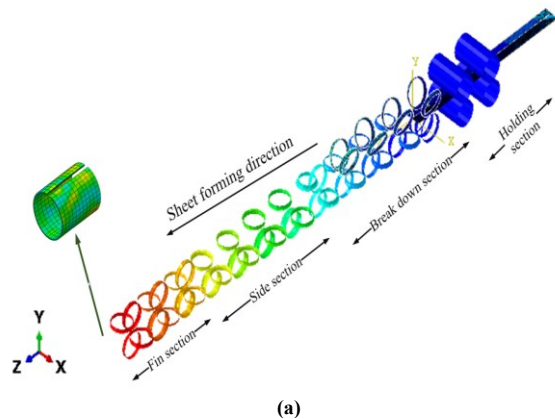


شکل ۵ طرح شماتیکی منحنی اینولوت مربوط به غلتک بالا.  
Fig. 5 Schematic involute curve of the upper roll.



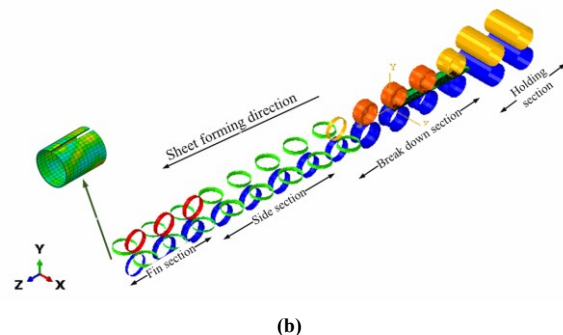
شکل ۶ الگوریتم تعیین موقعیت و چرخش غلتک بالا.  
Fig. 6 Algorithm for determining the position and rotation of the upper roll.

پس از طراحی آن با استفاده از الگوریتم که در شکل ۶ نشان داده شده می توان چیدمان غلتک های انعطاف پذیر تشخیص داده و موقعیت و چرخش آن به دست می آید.



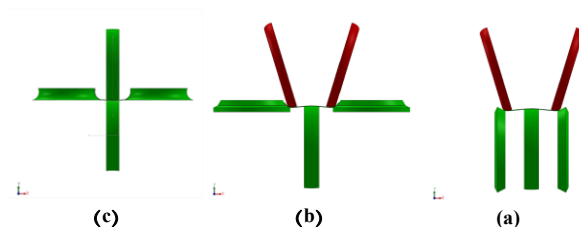
شکل ۷ ایستگاه اول فرایند شکل دهی غلتکی: (الف) مرسوم، (ب) انعطاف پذیر.

Fig. 7 . First forming stand of the roll-forming process: (a) Conventional, (b) Flexible.



شکل ۸ خط شکل دهی غلتکی لوله در نرم افزار آباکوس: (الف) خط شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر، (ب) خط شکل دهی غلتکی مرسوم.

Fig. 8 The flexible roll-forming line for tube production in ABAQUS; (a) Flexible roll-forming line, (b) Conventional roll-forming line



شکل ۹ غلتک های بخش فشاری برای الگوی گل خمش معکوس (الف) ایستگاه اول (ب) ایستگاه دوم، سوم و چهارم (ج) ایستگاه پنجم

Fig. 9 Break down-section rolls for the reverse-bending flower pattern: (a) first stand, (b) second, third, and fourth stands, (c) fifth stand



شکل ۱۰ غلتک های بخش کناری.

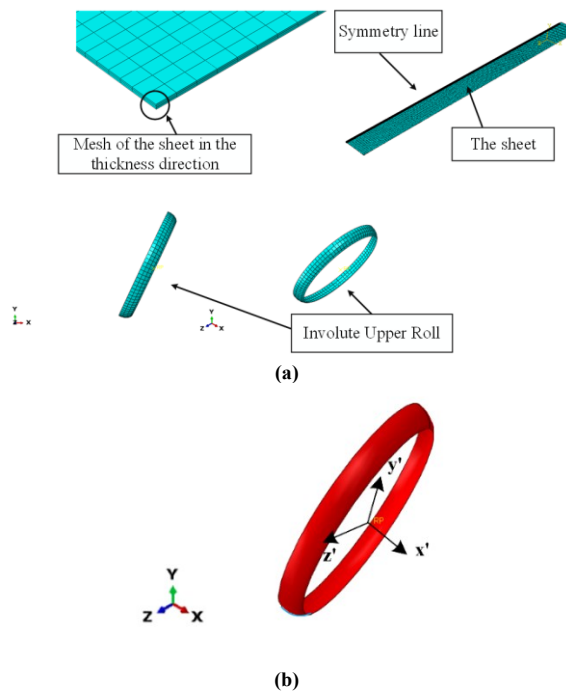
Fig. 10 Rolls of the side section.

فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر شامل چهارده ایستگاه شکل دهی است که در قالب چهار بخش اصلی طراحی شده اند: ایستگاه های نگه دارنده یا راهنما، ایستگاه های فشاری، ایستگاه های کناری و ایستگاه های پره ای. این تقسیم بندی با هدف کنترل دقیق تر تغییر شکل، بهبود کیفیت سطح و افزایش انعطاف پذیری در تولید لوله های با قطر متغیر صورت گرفته است. شبیه سازی این فرایند در نرم افزار اجزای محدود آباکوس ۲۰۲۱ انجام شد. شکل ۸، مدل سازی کامل فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و انعطاف پذیر برای لوله ای با قطر ۳۲ میلیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر را نمایش می دهد. مدل ایجاد شده شامل ۲ ایستگاه نگه دارنده و ۱۲ ایستگاه شکل دهی است در ادامه، به معرفی هر یک از این ایستگاه ها و نحوه چیدمان غلتک ها در ساختار کلی فرایند پرداخته خواهد شد.

مطابق شکل ۹ مرحله شکل دهی فشاری دارای پنج ایستگاه با غلتک های اینولوت و شیب دار است که برای تولید لوله با قطر و ضخامت های مختلف، غلتک های اینولوت در راستای افقی و عمودی جابه جا می شوند و حول محور  $z$  می چرخد در حالی که غلتک های شیب دار فقط در راستای افقی و عمودی جابه جا می شوند.

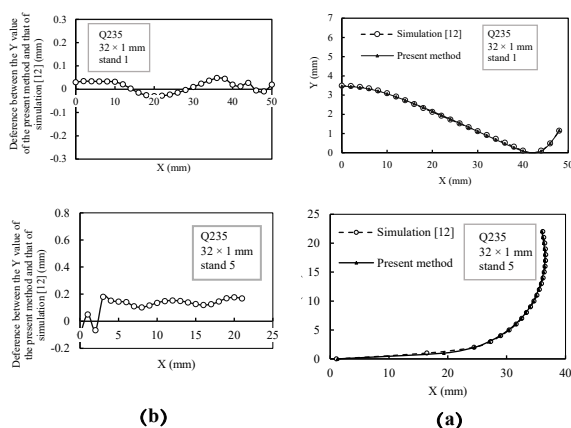
مطابق شکل ۱۰ غلتک های مرحله شکل دهی کناری که بیشتر وظیفه شکل دهی قسمت میانی ورق را بر عهده دارند، به صورت هرزگرد می چرخند و این بخش هم قابلیت جابه جایی در راستای افقی را دارد.

از مهم ترین بخش های فرایند شکل دهی غلتکی، مرحله پره ای است. مرحله پره ای آخرین مرحله تغییر شکل ورق به لوله نهایی است. که در آن عیوب موجود در ورق تغییر شکل یافته به مقدار قابل ملاحظه ای اصلاح شده و ورق آماده ورود به مرحله جوش می شود شکل ۱۱. در این مرحله با اعمال کاهش عرضی، لوله به اندازه نهایی نزدیک می شود.



شکل ۱۲ (الف) مدل مش بندی شده، (ب) دستگاه مختصات غلتک های اینولوت.

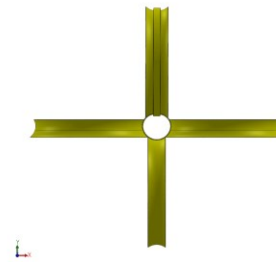
Fig. 12 (a) The meshed model, (b) axes system for the involute rolls.



شکل ۱۳ (الف) مقایسه سطح مقطع به دست آمده از روش تحلیلی-عددی با سطح مقطع حاصل از شبیه سازی [۱۲] در ایستگاه های ۱ و ۵ (ب) خطای حاصل از اختلاف مقادیر Y بین دو سطح مقطع.

Fig. 13 a) Comparison of the cross-section obtained from the analytical-numerical method with the cross-section obtained from the simulation [12] at stands 1 and 5. b) Error resulting from the difference in Y values between the two cross-sections.

با استفاده از الگوی گل استخراج شده از مدل پیشنهادی، شبیه سازی هر دو فرایند تحت شرایط یکسان انجام گرفته تا نقش طراحی غلتک و مسیر خمش در شکل گیری مقطع، و همچنین نحوه توزیع تنش و کرنش، به طور دقیق مشخص شود. این مقایسه، تفاوت های بنیادین هر فرایند و مبادله های میان دقت هندسی و یکنواختی مکانیکی را آشکار می سازد



شکل ۱۱ غلتک های بخش پره ای.

Fig. 11 Rolls of the Fin section.

جدول ۱ خواص مکانیکی فلز مورد استفاده Q235 [15]

Table 1 The mechanical properties of Q235 [15]

| $E(GPa)$ | $\nu$ | El.(%) | $\sigma_s(MPa)$ | $\sigma_{UTS}(MPa)$ |
|----------|-------|--------|-----------------|---------------------|
| 210      | 0.3   | 25     | 235             | 425                 |

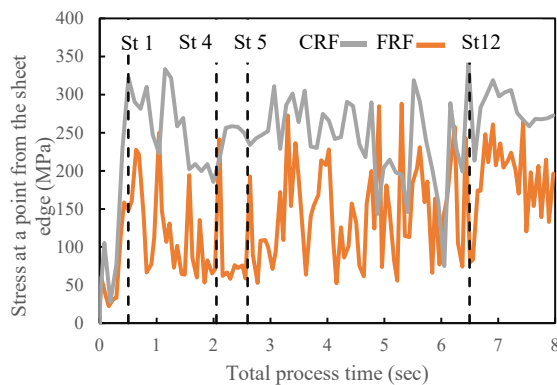
بر اساس الزامات تولیدی، فولاد Q235 به عنوان ماده مورد استفاده در شبیه سازی اجزای محدود فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر لوله های دایره ای چند-مشخصه انتخاب شد. خواص مکانیکی فولاد Q235 در جدول ۱ ارائه شده است. در ناحیه کشسان، رابطه تنش حقیقی-کرنش حقیقی توسط قانون هوک تعریف می شود، در حالی که در ناحیه مومسان، این رابطه با استفاده از مدل سخت شونده گی قانون سویفت بیان می شود، همان گونه که در معادله ۳ آمده است.

$$\sigma = 486.4775(0.0024 + \epsilon)^{0.1323} \quad (3)$$

که در آن:  $\nu$  نسبت پواسون،  $E$  از دیاد طول در نقطه ی شکست،  $\sigma_s$  تنش تسلیم،  $\sigma_{UTS}$  تنش کششی نهایی هستند. پایینی در ایستگاه اول، حرکت در راستاهای  $Y$  و  $Z$  مقید شدند. در مقابل، غلتک های پایینی در ایستگاه های دوم، سوم و چهارم در درجات آزادی حرکتی در راستاهای  $X$  و  $Z$  مقید بودند، در حالی که چرخش حول محور  $Y$  برای آن ها آزاد بود. برای غلتک های اینولوت، یک سیستم مختصات محلی ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ) تعریف شد که در آن درجات آزادی حرکتی در راستاهای  $Y'$  و  $Z'$  مقید، و چرخش حول محور  $X'$  آزاد در نظر گرفته شد؛ همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. یک تماس سطح-به-سطح بین ورق و غلتک ها تعریف شد و ضریب اصطکاک برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شد [۱۸].

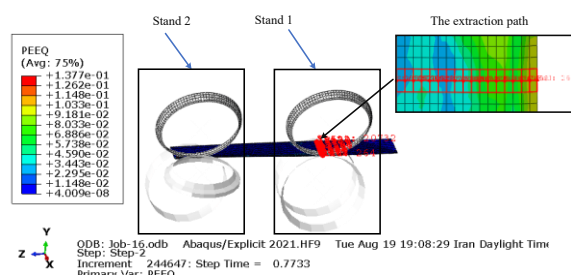
#### ۴- نتایج و بحث

در این مقاله، به منظور افزایش اعتبار روش تحلیلی-عددی توسعه داده شده، از اعتبارسنجی مبتنی بر مقایسه با نتایج منتشر شده در ادبیات معتبر استفاده شده است. در اینجا سطح مقطع ورق در ایستگاه های ۱ و ۵ فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر استخراج شده از روش پیشنهادی، برای لوله با قطر ۳۲ میلی متر با نتایج گزارش شده برای فرایند انعطاف پذیر در مرجع [۱۲] مقایسه شده است. تطابق خوب بین نتایج نشان دهند صحت روش فوق الذکر است.



شکل ۱۴ مقایسه تغییرات تنش لبه ورق در دو فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و انعطاف پذیر در ایستگاه های مختلف

Fig. 14 Comparison of edge-stress variations in conventional (CRF) and flexible (FRF) roll-forming processes across different stands



شکل ۱۵ مسیر کرنش معادل در ناحیه بین ایستگاه های اول و دوم در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر

Fig. 15 . Path used to extract the equivalent strain in the region between the first and second stands of the flexible roll-forming process

پس از تعریف مسیر عرضی و استخراج مقادیر کرنش معادل در نقاط مختلف مقطع، نتایج در قالب نمودار مقایسه ای ارائه شد. همان طور که در شکل ۱۶ نشان می دهد، تا حدود ۳۵ میلی متر از مرکز ورق، توزیع کرنش در دو فرایند مشابه است و تغییر شکل با ملایمت پیش می رود. با نزدیک شدن به لبه، هر دو فرایند افزایش کرنش را نشان می دهند، اما مقدار حداکثر آن در فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم حدود ۰/۰۲۶ و در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر حدود ۰/۰۲۲ است؛ یعنی فرایند مرسوم ۱۵ درصد کرنش بیشتری در ناحیه بحرانی ایجاد می کند. این اختلاف نشان می دهد که طراحی غلتک ها در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر و اعمال بارگذاری تدریجی، موجب یکنواخت تر شدن مسیر تغییر شکل، کاهش تمرکز و شدت کرنش های موضعی و در نتیجه کاهش احتمال بروز عیوبی نظیر نازک شدگی شدید، ترک خوردگی لبه و اعوجاج مقطع می شود.

#### ۴-۱- مقایسه تنش ورق در شکل دهی غلتکی مرسوم و انعطاف پذیر

تحلیل تنش در فرایند شکل دهی غلتکی اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان می دهد ورق در هنگام خم شدن چه مقدار بار مکانیکی را تحمل می کند و در کدام نواحی احتمال بروز عیوبی مانند ترک خوردگی، نازک شدگی یا اعوجاج بیشتر است. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، بررسی تغییرات تنش لبه ورق در طول زمان برای دو فرایند مرسوم و انعطاف پذیر نشان می دهد که فرایند مرسوم در ایستگاه های کلیدی تنش های به مراتب بزرگ تری تولید می کند.

در ایستگاه ۱، حداکثر تنش لبه در فرایند مرسوم حدود ۳۲۰ مگاپاسکال و در فرایند انعطاف پذیر حدود ۲۵۰ مگاپاسکال است؛ در ایستگاه ۴ این مقادیر به ترتیب حدود ۲۵۰ و ۱۷۰ مگاپاسکال می باشند. همچنین در ایستگاه ۵، حداکثر تنش در فرایند مرسوم حدود ۲۴۰ مگاپاسکال و در فرایند انعطاف پذیر حدود ۱۹۰ مگاپاسکال ثبت شده است. در ایستگاه پایانی ۱۲ نیز تنش لبه در فرایند مرسوم به حدود ۳۴۰ مگاپاسکال می رسد، در حالی که این مقدار در فرایند انعطاف پذیر حدود ۲۳۰ مگاپاسکال است.

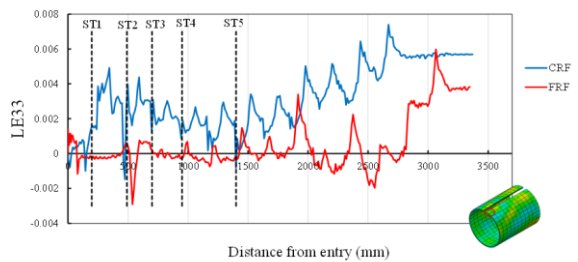
این کاهش تنش در فرایند انعطاف پذیر ناشی از کنترل تدریجی خم کاری توسط غلتک های اینولوتی-شیب دار بوده و منجر به توزیع یکنواخت تر تنش، کاهش نوسانات تنش-کرنش و در نتیجه کاهش احتمال ترک خوردگی، نازک شدگی موضعی و اعوجاج مقطع در طول فرایند شکل دهی می شود.

به طور کلی، نتایج نشان می دهد که در ایستگاه های کلیدی تنش های فرایند مرسوم به طور میانگین حدود ۲۷ درصد بیشتر از فرایند انعطاف پذیر است.

#### ۴-۲- مقایسه کرنش ورق در شکل دهی غلتکی مرسوم و انعطاف پذیر

##### ۴-۲-۱- کرنش مومسانی معادل در عرض ورق

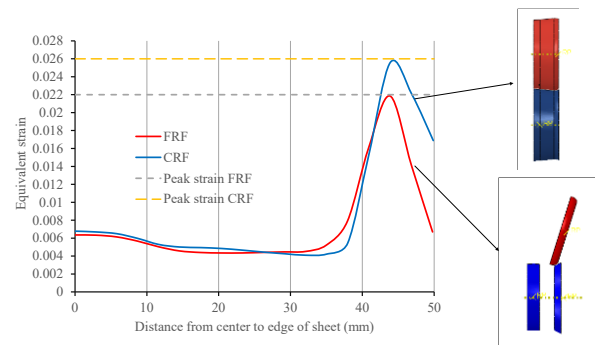
کرنش مومسانی معادل در عرض ورق نشان می دهد ورق در هر نقطه در راستای X چه میزان تغییر شکل واقعی را تجربه کرده و شدت تغییر شکل چگونه در ایستگاه های مختلف توزیع می شود. برای ارزیابی این توزیع در دو فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر، یک مسیر عرضی در خروجی آباکوس تعریف شد تا مقادیر کرنش معادل با دقت از نقاط مختلف مقطع استخراج شود. همان گونه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، این مسیر در ناحیه تماس ورق با غلتک های ایستگاه های اول و دوم قرار گرفته و نقاط به صورت یکنواخت از مرکز تا لبه ورق انتخاب شده اند. داده های استخراج شده از این مسیر مبنای ترسیم و مقایسه نمودار کرنش معادل برای دو فرایند قرار گرفته اند.



**شکل ۱۷** تغییرات کرنش طولی در نقطه لبه ورق در دو فرایند شکل‌دهی غلتکی مرسوم و شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در ایستگاه‌های مختلف.  
**Fig. 17** Longitudinal strain variations at the sheet edge point in the conventional and flexible roll forming process at different stands.

#### ۳-۴- سطح مقطع ورق در ایستگاه آخر

مقایسه سطح مقطع ورق در ایستگاه نهایی شکل‌دهی غلتکی شکل ۱۸ نشان می‌دهد که فرایند انعطاف‌پذیر بیشترین تطابق را با روش تحلیلی دارد و در ناحیه بزرگ‌نمایی‌شده نیز هم‌پوشانی آن تقریباً کامل است. در مقابل، سطح مقطع ورق فرایند مرسوم دارای اختلافات قابل‌توجه‌تری، به‌ویژه در خم‌های میانی و انتهایی است که می‌تواند باعث کاهش دقت شکل نهایی شود. بررسی سطح مقطع نهایی ورق در فرایند انعطاف‌پذیر در بخش عمده لبه بالا، نواحی پایینی و مرحله بسته‌شدن مقطع به‌مراتب دقیق‌تر از مدل تحلیلی پیروی می‌کند، در حالی که فرایند مرسوم تنها در یک بخش موضعی از لبه انطباق نسبی بهتری دارد. با این حال، بازشدگی لبه و انحراف کلی سطح مقطع مرسوم نسبت به حالت ایده‌آل بیشتر است. در ناحیه میان‌قوسی، هر دو فرایند رفتار نزدیک‌تری دارند، اما سطح مقطع انعطاف‌پذیر همچنان عملکرد یکنواخت‌تری ارائه می‌دهد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که دقت هندسی در سطح مقطع فرایند انعطاف‌پذیر گسترده و پایدار است، در حالی که مزیت‌های مرسوم محدود و موضعی باقی می‌ماند و انعطاف‌پذیر بهترین تطابق کلی با پروفیل تحلیلی را فراهم می‌کند.



**شکل ۱۶** مقایسه توزیع کرنش معادل در سطح مقطع ورق در ایستگاه اول برای دو فرایند شکل‌دهی غلتکی.

**Fig. 16** Comparison of the equivalent-strain distribution across the sheet cross-section at the first stand for the two roll-forming processes.

#### ۴-۲-۲- کرنش طولی لبه

کرنش طولی شاخص مهمی برای سنجش میزان کشش یا فشردگی ورق در راستای Z (امتداد مسیر شکل‌دهی) است و رفتار آن در ناحیه لبه اهمیت بیشتری دارد، زیرا لبه حساس‌ترین بخش مقطع در برابر تمرکز تنش و بروز عیوب است. مقایسه دو فرایند شکل‌دهی غلتکی مرسوم و انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد نحوه اعمال انحنا و توزیع بارگذاری نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت کرنش طولی ایجادشده در این نقطه دارد.

در شکل ۱۷ رفتار کرنش طولی لبه در ۱۲ ایستگاه شکل‌دهی در دو فرایند شکل‌دهی غلتکی مرسوم و فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر نشان داده شده است. در ایستگاه اول ST1، در فرایند مرسوم افزایش بسیار سریع کرنش تا حدود ۰/۰۳۵ دیده شده، در حالی که در فرایند انعطاف‌پذیر مقدار آن کمتر از ۰/۰۱ باقی می‌ماند. در ایستگاه پنجم ST5، که محل بیشترین انحنا است، کرنش لبه در فرایند مرسوم به ۰/۰۶۵ می‌رسد، در مقابل فرایند انعطاف‌پذیر تنها حدود ۰/۰۱۴ کرنش است. در انتهای فرایند ST12، مقدار نهایی کرنش لبه در فرایند مرسوم حدود ۰/۰۷۶ تثبیت می‌شود، اما در فرایند انعطاف‌پذیر کمتر از ۰/۰۱۸ است؛ یعنی فرایند انعطاف‌پذیر حدود ۷۹ درصد کرنش کمتری از فرایند مرسوم ایجاد می‌کند. این روند نشان می‌دهد که در فرایند مرسوم انحنا به‌صورت ناگهانی و تجمیعی بوده و منجر به ایجاد قله‌های کرنش و تمرکز تغییرشکل در لبه می‌شود، در حالی که در فرایند انعطاف‌پذیر انتقال مرحله‌ای و پیوسته انحنا با استفاده از غلتک‌های اینولوتی و شیب‌دار موجب توزیع یکنواخت‌تر تغییرشکل و کاهش چشمگیر گرادیان کرنش طولی لبه می‌گردد. در نتیجه، فرایند انعطاف‌پذیر با کاهش کشیدگی موضعی، احتمال بروز عیوبی مانند ترک لبه، نازک‌شدگی شدید و ایجاد تنش‌های پسماند را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

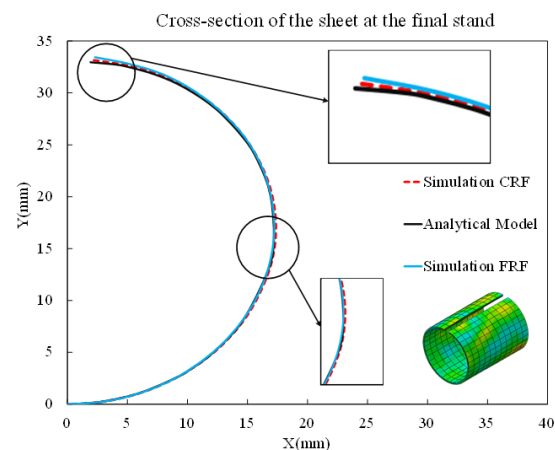
اولیه تجهیزات و حساسیت فرایند به تنظیمات نادرست می‌تواند چالش‌هایی را در کاربرد صنعتی ایجاد کند. با این حال، این محدودیت‌ها در برابر مزایایی مانند کاهش عیوب، افزایش انعطاف‌پذیری تولید و توانایی ساخت لوله‌هایی با قطرهای مختلف بدون تعویض کامل قالب، قابل توجه بوده و به‌ویژه در خطوط تولید با تنوع ابعادی بالا اهمیت بیشتری می‌یابد. به‌طور کلی، فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با حذف جهش‌های ناگهانی در تغییر قطر، کنترل تدریجی انحنا و توزیع یکنواخت‌تر بارگذاری، نه تنها میزان کرنش‌های بحرانی را کاهش می‌دهد، بلکه پتانسیل بروز عیوبی همچون ترک لبه، نازک‌شدگی موضعی و اعوجاج مقطع را نیز به شکل مؤثری کم می‌کند.

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

**تعارض منافع:** در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری دانشجو تحت راهنمایی نویسنده مسئول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد

### منابع

- [1] M. Tanimoto, I. Kawata, O. Sotokawa, T. Nakaji, T. Magatani, and E. Tsuru, "Outline of new forming equipment for Hikari 24-inch ERW Mill," *Nippon Steel Technical Report*, no. 90, pp. 122–126, 2004.
- [2] M. Safari and J. Joudaki, "Ovality and bow defect of pre-punched sheets in roll forming of trapezoidal sections," *International Journal of Engineering, Series A*, vol. 31, no. 9, pp. 1123–1128, 2018. doi: 10.5829/ije.2018.31.07a.17
- [3] M. Karimi Firouzjaei, H. Moslemi Naeini, H. Farahmand, B. Abbaszadeh, and 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. (in Persian) doi: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.15.3
- [4] D.-J. Li, L.-Q. Xu, L.-J. Li, C.-F. Yue, W.-J. Zhou, and C.-L. Zhang, "Finite element simulation for straightedge lineal roll forming process of high frequency welding pipe," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 19, no. 2, pp. 743–751, 2025. doi: 10.1007/s12008-023-01298-5
- [5] X. Deng, S. Hui, X. Ye, W. Ye, Y. Yu, and Y. Li, "Research on flower pattern and roll positioning optimization for roll forming process of TA4 coiled tubing," *Materials*, vol. 17, no. 24, Art. no. 6164, 2024. doi: 10.3390/ma17246164
- [6] C. Kang, B. Sun, X. Zhang, and C. Yao, "Research on the mechanism and processability of roll forming," *Materials*, vol. 17, no. 13, Art. no. 3126, 2024. doi: 10.3390/ma17133126
- [7] T. Suckow, J. Schroeder, and P. Groche, "Roll forming of a high strength AA7075 aluminum tube," *Production Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 573–586, 2021. doi: 10.1007/s11740-021-01046-2
- [8] M. M. Kasaei, H. M. Naeini, B. Abbaszadeh, M. Mohammadi, M. Ghodsi, M. Kiuchi, et al., "Flange wrinkling



**شکل ۱۸** مقایسه سطح مقطع ورق در ایستگاه آخر به همراه بزرگ‌نمایی نواحی لبه و میان‌قوس برای فرایندهای مرسوم و انعطاف پذیر و مدل تحلیلی

**Fig. 18** Comparison of the sheet cross-section at the last stand, with magnified views of the edge and mid-arc regions for the CRF, FRF, and analytical model

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار مکانیکی ورق در دو فرایند شکل دهی غلتکی مرسوم و فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت تا میزان کارایی روش پیشنهادی در بهبود کیفیت شکل‌دهی و کاهش تمرکز تنش و کرنش ارزیابی شود. نتایج به‌طور واضح نشان می‌دهد که فرایند انعطاف پذیر از نظر توزیع یکنواخت تغییرشکل، کنترل تدریجی انحنا و کاهش بارگذاری ناگهانی، عملکرد بسیار بهتری نسبت به فرایند مرسوم دارد. بررسی کرنش معادل در مسیر عرضی بین ایستگاه‌های اولیه نشان داد که فرایند مرسوم حدود ۱۵ درصد کرنش تولید می‌کند و این موضوع ناشی از اعمال شعاع انحنايی تجمعی و سطح تماس بیشتر غلتک‌ها در این فرایند است. در مقابل، طراحی غلتک‌های اینولوتی و تغییرات مرحله‌به‌مرحله در فرایند انعطاف پذیر موجب کاهش قله‌های کرنش و یکنواختی بیشتر تغییرشکل شده است. تحلیل کرنش طولی نیز یک اختلاف بنیادین میان دو فرایند را آشکار ساخت. در تمام ۱۲ ایستگاه شکل‌دهی، لبه ورق در فرایند مرسوم کرنش به‌مراتب بیشتری را تجربه کرد. به‌طور کلی، کرنش طولی در گره لبه فرایند مرسوم به طور میانگین ۷۹٪ درصد بیشتر از روش انعطاف‌پذیر است. چنین رفتاری بیانگر آن است که توزیع مرحله‌ای قطر و انحنا در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر، گردایان کرنش را به میزان چشمگیری کاهش داده و از تشکیل نواحی حساس و مستعد پارگی جلوگیری می‌کند. با وجود مزایای مکانیکی و هندسی مشاهده‌شده، فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با برخی محدودیت‌های عملی همراه است. این روش به سیستم کنترلی دقیق‌تر برای تنظیم موقعیت و زاویه غلتک‌ها نیاز دارد و پیچیدگی طراحی و راه‌اندازی آن نسبت به سیستم‌های مرسوم بیشتر است. علاوه‌براین، هزینه

- [13] F. Wang and A. Okamoto, "Method for roll forming steel pipes, and equipment for same," U.S. Patent US6212925B1, 2001.
- [14] R. Kuramoto, A. Okamoto, and T. Tomino, "Forming roll, forming process and its apparatus in the pipe mill," U.S. Patent US4770019A, 1988.
- [15] 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," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, no. 9, pp. 4503–4517, 2023. doi: [10.21203/rs.3.rs-2425277/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2425277/v1)
- [16] S. Yu and N. Jun, "Adjustment of rollers in the flexible roll forming unit for the production of different types of straight pipes," *DEStech Trans. Eng. Technol. Res.*, 2017. doi: [10.12783/dtetr/amma2017/13346](https://doi.org/10.12783/dtetr/amma2017/13346)
- [17] Z. Wei et al., "Research on flexible roll forming process for manufacturing thin-walled round pipes with multi-specification," *J. Manuf. Process.*, vol. 152, pp. 180–204, 2025. doi: [10.1016/j.jmapro.2025.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.08.005)
- [18] Q. Bui and J. Ponthot, "Numerical simulation of cold roll-forming processes," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 202, no. 1–3, pp. 275–282, 2008. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2007.08.073](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.073)
- in flexible roll forming process," *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 245–250, 2014. doi: [10.1016/j.proeng.2014.09.158](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.158)
- [9] M. Kasaei, H. M. Naeini, B. Abbaszadeh, M. Silva, and P. Martins, "Flexible roll forming," in *Materials Forming and Machining*, Elsevier, 2015, pp. 51–71. doi: [10.1016/B978-0-85709-483-4.00003-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-483-4.00003-X)
- [10] H. Badparva, M. Kasaei, and B. Abbaszadeh, "Investigation of parameters affecting deformation length in flexible roll forming process," 2020. (in persian) doi: [20.1001.1.10275940.1400.22.1.3.4](https://doi.org/20.1001.1.10275940.1400.22.1.3.4)
- [11] R. Rezaei, H. Moslemi Naeini, R. A. Tafti, M. M. Kasaei, M. Mohammadi, and B. Abbaszadeh, "Effect of bend curve on web warping in flexible roll formed profiles," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 9, pp. 3625–3636, 2017. doi: [10.1007/s00170-017-0784-1](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0784-1)
- [12] Cheng, J. Cao, J. Zhao, J. Liu, R. Zhao, and S. Liu, "The flower pattern and rolls design for ERW pipes with the different specification in the flexible roll forming process," *Thin-Walled Structures*, vol. 154, p. 106809, 2020. doi: [10.1016/j.tws.2020.106809](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106809)