مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 259-270

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی و تجربی تأثیر روش‌های طراحی الگوی گل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله فولادی با استحکام بالا

مهدی کریمی‌فیروزجائی[1]، حسن مسلمی‌نائینی[2*]، حمیدرضا فرهمند[3]، بهنام عباس‌زاده[1]، محمدمهدی کسائی[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، تهران
4- استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین
* تهران، صندوق پستی 143-14115، moslemi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 اردیبهشت 1396
پذیرش: 06 شهریور 1396
ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:
شکل‌دهی غلتکی سرد لوله
طراحی الگوی گل
توزیع انحنا و ضخامت
برگشت فنری
روش اجزای محدود

چکیده

در این مقاله، فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله فولادی با استحکام بالا با استفاده از چهار نوع الگوی گل دایره‌ای، لبه‌ای، دو شعاعی و خمش معکوس به روش اجزای محدود در نرم‌افزار مارک منتات شبیه‌سازی شده است. با توجه به اهمیت کیفیت لوله نهایی و به منظور دست‌یابی به هندسه مطلوب در لوله‌های فولادی با استحکام بالا، انتخاب الگوی گل مناسب جهت طراحی خط تولید شکل‌دهی غلتکی لوله مورد نظر قرار گرفته است. تغییر شکل ورق در این فرآیند با استفاده از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر نوع الگوی گل روی هندسه محصول نهایی که شامل توزیع انحنا، برگشت فنری و توزیع ضخامت لوله می‌باشد، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از الگوی گل خمش معکوس منجر به کاهش انحراف از انحنای میانگین در ناحیه لبه ورق تا حدود 65% می‌گردد. بررسی توزیع ضخامت نشان می‌دهد که الگوی گل دایره‌ای و لبه‌ای به ترتیب موجب له‌شدگی و نازک‌شدگی لبه ورق تا میزان 0.2 میلی‌متر می‌شوند، اما استفاده از الگوهای دو شعاعی و خمش معکوس موجب می‌شوند تا میانگین ضخامت ناحیه لبه به خوبی اصلاح شده و به 2.8 میلی‌متر برسد، همچنین الگوی گل دایره‌ای کم‌ترین مقدار برگشت فنری از لحاظ تغییر میانگین انحنای نسبی به میزان 0.69% و انحراف لبه به میزان 0.15 میلی‌متر را دارد. آزمایش‌های تجربی برای یک ایستگاه شکل‌دهی به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی اجزای محدود طراحی و انجام شد. صحت شبیه‌سازی اجزای محدود با مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی تأیید شد.

Numerical and experimental investigation on flower pattern design methods in cold roll forming process of a high strength steel pipe

Mehdi Karimi Firouzjaei[1], Hasan Moslemi Naeini[1*], Hamid Reza Farahmand[2], Behnam Abbaszadeh[1], Mohammad Mehdi Kasaei[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R. Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Jahad Daneshgahi of Tehran University, Tehran, I.R. Iran
3- Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Qazvin, Qazvin, I.R. Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, moslemi@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 May 2017
Accepted 28 August 2017
Available Online 27 October 2017

Keywords:
Cold Roll Forming Process of Pipe
Flower Pattern Design
Curvature and Thickness Distribution
Spring Back
Finite Element Method

ABSTRACT

In this paper, cold roll forming process of a high strength steel pipe using four types of flower pattern including circular, edge, double radius and reverse bending is simulated with finite element method in MSC Marc Mentat software. Due to importance of quality of final pipe and in order to achieve the desired geometry in high strength steel pipes, selecting the appropriate flower pattern to design the pipe roll forming production line is considered. Using finite element simulation results, deformation of sheet in this process is studied and effect of flower pattern type on geometry of final product, which includes curvature distribution, spring back and thickness distribution of pipe, is investigated. Results show that implementing reverse bending flower pattern, leads to reduction in deviation from mean curvature at edge of the sheet up to about 65 percent. Thickness distribution analysis shows that circular and edge flower patterns cause upsetting and thinning of edge of the sheet up to 0.2 millimeters, respectively. But, use of double radius and reverse bending patterns cause average thickness of edge to be well adjusted to reach 2.8 millimeters. Also, circular flower pattern has the lowest value of spring back in terms of variation of mean relative curvature of 0.69 percent and edge deviation of 0.15 millimeters. To validate the finite element simulation, experimental tests were designed and conducted using one forming stand. By comparing resultant data of experimental tests with simulation results, validity of finite element simulation confirmed.

1- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد فرآیندی است که در آن ورق فلزی با عبور از بین تعدادی غلتک و ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی به شکل نهایی تبدیل می‌شود [1]. برای رسیدن به جریان آرام باید در هر ایستگاه مقطع ورق و

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

غلتک با یکدیگر کاملاً درگیر بوده و فشار لازم از طرف غلتک‌ها به ورق وارد گردد. در این فرآیند هر جفت غلتک نقش ویژه‌ای در ایجاد سطح مقطع و شکل طولی مورد نیاز محصول دارد. عموماً تعداد و شکل هر جفت از غلتک‌ها به ابعاد و پیچیدگی هندسه محصول و خصوصیات مکانیکی ورق شکل داده شده بستگی دارد. به طور کلی هر چه شکل مقطع محصول پیچیده‌تر باشد، برای انجام عملیات شکل‌دهی به تعداد مراحل تغییر شکل بیشتری نیاز است [2]. با استفاده از چیدمان خاص غلتک‌ها در این فرآیند می‌توان ورق اولیه را به لوله تبدیل کرد. تبدیل ورق به لوله در چهار مرحله اصلی صورت می‌گیرد که عبارت از مرحله شکل‌دهی، مرحله پره‌ای[1]، مرحله جوش و مرحله به اندازه در آوردن[2] است.

انتخاب روش مناسب برای طراحی الگوی گل و پروفیل غلتک یکی از مسائل مهم در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله است. سطح مقطع‌های تولید شده در ایستگاه‌های تغییر شکل برای نمایش مراحل شکل‌دهی در این فرآیند به صورت یک‌جا با در نظر گرفتن یک محور خنثی رسم می‌شوند که به آن الگوی گل گفته می‌شود. در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله چهار نوع الگوی گل متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارت از شکل‌دهی دایره‌ای، شکل‌دهی لبه‌ای، شکل‌دهی دو شعاعی و شکل‌دهی خمش معکوس است. انتخاب هر کدام از این الگوهای گل تأثیر زیادی روی پیشینه کرنش هر نقطه از ورق در پایان فرآیند تغییر شکل دارد.

میزوتانی و همکاران [3] فرآیند شکل‌دهی غلتکی لوله با استفاده از غلتک‌های عمودی را معرفی و با مقایسه روش‌های مختلف حالت بهینه را برای مسیر شکل‌دهی و توزیع شکل‌دهی بین ایستگاه‌های مختلف ارائه کردند. کیوچی و همکاران [4] روشی برای طراحی الگوی گل ارائه کردند که پروفیل مجموعه غلتک‌های شکل‌دهی را با در نظر گرفتن معیارهایی مانند کمتر بودن کرنش طولی در لبه ورق از کرنش بحرانی چین‌خوردگی، کمینه بودن تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی و یا یکسان بودن توان در مراحل مختلف شکل‌دهی ارائه می‌کند، همچنین ایشان [5] مفاهیم اساسی طراحی بهینه غلتک‌های مرحله پره‌ای را با بررسی تجربی اثر غلتک‌های مرحله پره‌ای روی بهبود پروفیل عمومی سطح مقطع ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی لوله ارائه کردند. اونا و همکاران [6] روشی بهبود یافته برای طراحی الگوی گل مقاطع دایره‌ای ارائه کردند و پیشنهاد دادند که تعداد ایستگاه‌ها در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله صرف‌نظر از قطر و ضخامت لوله ثابت است و 7 الی 8 ایستگاه برای مراحل فشاری و جانبی و 3 الی 4 ایستگاه برای مرحله پره‌ای مناسب است. ایشان در این مطالعه برای تعیین زاویه خم لوله در هر مرحله فرض کردند که تصویر لبه لوله روی صفحه افقی همواره با یک معادله درجه سه بیان می‌شود و با این فرض الگوی گل دایره‌ای، لبه‌ای و دو شعاعی را معرفی کردند. تویوکا [7] سیستم رایانه‌ای را طراحی کرد که از تحلیل تنش- کرنش ارتجاعی- خمیری و ارزیابی چین‌خوردگی لبه برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد و ارائه الگوی گل بهینه استفاده می‌کند. همچنین او اثر الگوی گل شکل‌دهی روی توزیع تنش و کرنش در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله را برای سه نوع الگوی گل دایره‌ای، لبه‌ای و مرکزی مورد بررسی قرار داد. مسلمی‌نائینی و همکاران [8] تغییر شکل ارتجاعی- خمیری ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله به روش دو شعاعی را مورد مطالعه قرار دادند و با بررسی زاویه اولیه لبه ورق، پارامترهای تماسی بهینه غلتک با ورق و زاویه پره در مرحله پره‌ای روشی بهینه برای طراحی شکل اولیه لبه ورق ارائه کردند. ژنگ و همکاران [9] طراحی بهینه پروفیل غلتک در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد را براساس روش پاسخ سطح ارائه کردند. در این روش میزان افزایش زاویه و شعاع غلتک به عنوان فاکتور طراحی و برگشت فنری و بیشینه کرنش طولی لایه میانی در لبه ورق به عنوان هدف طراحی انتخاب شد. نتایج بهینه برای پروفیل غلتک‌ها، سطح مقطع مطلوب در هر ایستگاه و کمینه تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی به نحوی تعیین شد که عیب چین‌خوردگی در لبه ورق اتفاق نیافتد. آبیراتنا و همکاران [10] روش هندسی جدید برای طراحی الگوی گل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی ارائه کردند که به عنوان ابزار اولیه برای بهینه‌سازی الگوی گل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی و کمینه کردن کرنش طولی لبه بدون استفاده از ابزار شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایشان در این مطالعه با مقایسه سه نوع الگوی گل مختلف پیشنهاد کردند که کرنش طولی کم‌تر در مراحل پایانی شکل‌دهی منجر به کاهش عیوب خواهد شد. سپس به منظور تعمیم روش برای شکل‌دهی غلتکی لوله از مدلی که در پژوهش والکر و همکارن [11] به عنوان مدل نهایی بهینه معرفی شده بود استفاده کردند و تطابق خوبی مشاهده شد.

از آن‌جایی که در پژوهش‌های انجام شده تأثیر روش طراحی الگوی گل روی مشخصات هندسی لوله نهایی از جمله توزیع انحنا، توزیع ضخامت و برگشت فنری بررسی نشده است، در این مقاله فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مارک منتات به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شد و تأثیر الگوهای گل دایره‌ای، لبه‌ای، دو شعاعی و خمش معکوس روی مشخصات هندسی لوله تولیدشده بررسی گردید. آزمایش‌های تجربی برای صحت‌سنجی نتایج انجام و تطابق خوبی مشاهده شد.

2- شبیه‌سازی اجزای محدود

تغییر شکل پیچیده ورق و همچنین تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد، تمایل به استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود را ایجاد کرده است. در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله با استفاده از پروفیل غلتک، ورق با ورود به هر کدام از ایستگاه‌های شکل‌دهی به وسیله پروفیل غلتک‌ها تغییرشکل می‌یابد؛ بنابراین در این فرآیند نحوه طراحی غلتک‌ها ارتباط مستقیم با چگونگی تغییرشکل ورق دارد. طراحی غلتک‌های شکل‌دهی نخستین گام برای مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد است.

2-1- طراحی الگوی گل

به منظور طراحی و مدل‌سازی غلتک‌های شکل‌دهی در ایستگاه‌های مختلف نیاز است تا سطح مقطع ورق در ایستگاه‌های تغییر شکل تعیین شود که به معنای طراحی الگوی گل است. پارامترهای مؤثر در طراحی الگوی گل عبارت از عرض اولیه ورق، فاصله بین ایستگاه‌ها، تعداد ایستگاه‌ها و مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه است.

عرض ورق ورودی به مرحله شکل‌دهی یکی از متغیرهای تأثیرگذار در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله است. با توجه به آن‌که مقطع عرضی لوله در انتهای فرآیند به یک پروفیل بسته تبدیل می‌شود، تعیین بهینه عرض ورق اولیه با در نظر گرفتن تغییرات آن در طول فرآیند برای دست‌یابی به لوله‌ای با تلرانس ابعادی و هندسی دقیق بسیار حائز اهمیت است. در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله از آن‌جایی که ورق تنها تحت خمش عرضی قرار ندارد، نمی‌توان عرض ورق اولیه را با به دست آوردن طول تار خنثی محاسبه کرد. اعمال کاهش عرضی در مراحل پره‌ای و به اندازه در آوردن لوله و همچنین استفاده از ماده خود ورق در جوش‌کاری مقاومتی با فرکانس بالا به عنوان

[1] Fin Pass
[2] Sizing

ماده مصرفی پرکننده درز جوش سبب شده است که تعیین عرض ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله تابع متغیرهای مختلف شکل‌دهی و جوش قرار گیرد. در نتیجه با در نظر گرفتن قطر لوله نهایی، میزان کاهش عرضی اعمال شده در ایستگاه‌های پره‌ای، میزان کاهش محیطی اعمال شده در مرحله به اندازه در آوردن لوله و میزان تقریبی ماده مصرفی در مرحله جوش، عرض اولیه ورق 115 میلی‌متر محاسبه شد.

تغییر شکل ورق در این فرآیند در فضای بین دو ایستگاه و به صورت تدریجی انجام می‌شود. بنابراین فاصله بین دو ایستگاه باید به نحوی انتخاب گردد تا از حداقل فاصله لازم برای تغییرشکل آزاد ورق کم‌تر نباشد. فاصله مناسب بین ایستگاه‌ها با توجه به پارامتری به نام طول تغییر شکل تعیین می‌شود. طول تغییر شکل به فاصله‌ای در راستای طولی ورق گفته می‌شود که پیش از هر ایستگاه شکل‌دهی، ورق تغییر شکل خود را از هندسه پیشین به پروفیل غلتک آن ایستگاه انجام می‌دهد. سلمانی تهرانی [12] پژوهش تحلیلی و عددی را برای پیش‌بینی اندازه طول تغییر شکل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله انجام داده است. از آن‌جایی که هندسه تغییر شکل در این فرآیند بسیار پیچیده‌تر از فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد پروفیل‌های کانالی‌شکل است، یک رابطه صریح و بسته برای پیش‌بینی اندازه طول تغییرشکل به دست نمی‌آید و برای محاسبه آن باید از روش کدنویسی در نرم‌افزاری مانند متلب و یا روش شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شود. در این مقاله فاصله بین ایستگاه‌ها با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ایستگاه‌های کناری 300 میلی‌متر و برای ایستگاه‌های فشاری و پره‌ای 400 میلی‌متر انتخاب شد.

برای تعیین تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی با توجه به پیشنهاد کیوچی [5] و اونا و همکاران [6] چهار ایستگاه فشاری، سه ایستگاه جانبی و سه ایستگاه پره‌ای در نظر گرفته شد. شکل 1 شمایی از انواع غلتک‌های به کار رفته در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله را نشان می‌دهد. غلتک‌های مربوط به ایستگاه‌های جوش‌کاری و به اندازه در آوردن لوله که در خط تولید پس از ایستگاه‌های شکل‌دهی قرار می‌گیرند، در طراحی الگوی گل لحاظ نمی‌شوند.

پس از تعیین تعداد ایستگاه‌ها باید مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه تعیین گردد. برای تعیین مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه با توجه به معادله تحلیلی پیشنهادی توسط اونا و همکاران [6]، موقعیت لبه ورق در هر لحظه و در امتداد خط تولید به صورت منحنی درجه سه تقریب زده شد. شکل 2 منحنی درجه سه عبوری از موقعیت لبه ورق در هر ایستگاه را نشان می‌دهد که در آن X امتداد طولی در راستای مسیر شکل‌دهی از ایستگاه نگهدارنده آخر، Y امتداد عرضی در راستای سطح مقطع ورق، Y_i فاصله لبه ورق تا محور تقارن مقطع، ρ_i شعاع انحنای ورق، θ_i زاویه شکل‌دهی ورق، R شعاع نهایی لوله و W عرض اولیه ورق است.

با توجه به این‌که تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی برای هر چهار روش طراحی الگوی گل به طور یکسان و به تعداد 10 ایستگاه انتخاب گردید، منحنی درجه سه اشاره شده برای هر چهار روش یکسان خواهد بود. با در اختیار داشتن شرایط مرزی هندسی شامل صفر بودن شیب منحنی در ابتدا و انتها و نیز فاصله نقطه ابتدا و انتهای منحنی از محور عمودی، معادله مربوط به منحنی درجه سه به دست آمد. رابطه (1) معادله تحلیلی منحنی درجه سه به دست آمده برای طراحی الگوی گل غلتک‌های شکل‌دهی را برای ورقی با عرض اولیه 115 میلی‌متر در 10 ایستگاه نشان می‌دهد.

$$Y = 0.0864 \times X^3 - 1.42562 \times X^2 + 57.5 \quad (1)$$

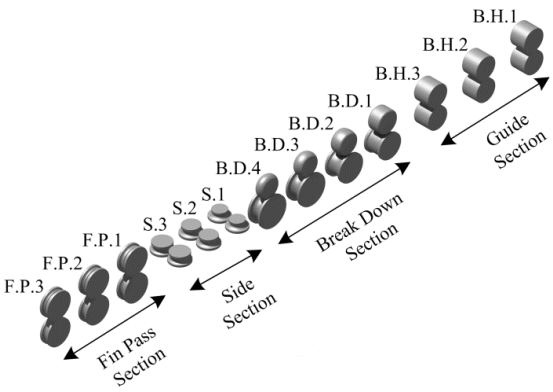


Fig. 1 Schematic of pipe production line

شکل 1 شمای خط تولید لوله

در ایستگاه‌های پره‌ای مقدار مشخصی کاهش عرضی به ورق در اثر فشار ناشی از تماس لبه ورق با غلتک اعمال می‌شود که این امر سبب بهبود هندسه لوله به لحاظ شعاع انحنا و ضخامت می‌شود، همچنین مقدار زاویه پره در ایستگاه‌های پره‌ای که سبب بهبود زاویه لبه ورق خواهد شد نیز باید در نظر قرار گیرد. مقادیر کاهش عرضی و زاویه پره غلتک برای طراحی الگوی گل با توجه به پیشنهاد کیوچی [5] مطابق جدول 1 انتخاب گردید.

برای رسم هندسه مقطع لوله در ایستگاه‌های شکل‌دهی باید توجه داشت که هندسه لوله نهایی، عرض اولیه ورق، فاصله بین ایستگاه‌ها، تعداد ایستگاه‌ها و مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه برای هر چهار روش شکل‌دهی دایره‌ای، لبه‌ای، دو شعاعی و خمش معکوس یکسان است، اما نحوه طراحی الگوی گل برای این چهار روش متفاوت است. مطابق شکل 3 تار خنثی مقطع

جدول 1 زاویه پره و کاهش محیطی در مرحله پره‌ای

Table 1 Fin angle and circumferential compression in fin pass section

شماره ایستگاه پره‌ای	زاویه پره غلتک (درجه)	مقدار کاهش عرضی (%)
اول	20	0.8
دوم	10	0.5
سوم	5	0.3

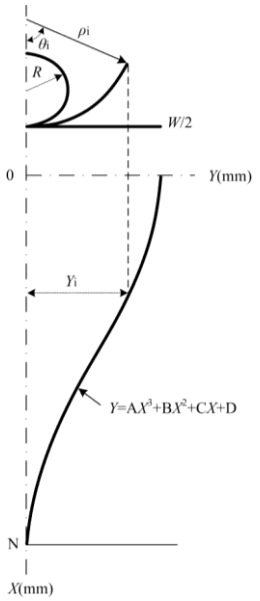


Fig. 2 Three degree polynomial passing through the sheet edge position in each stand [6]

شکل 2 منحنی درجه سه عبوری از موقعیت لبه ورق در هر ایستگاه [6]

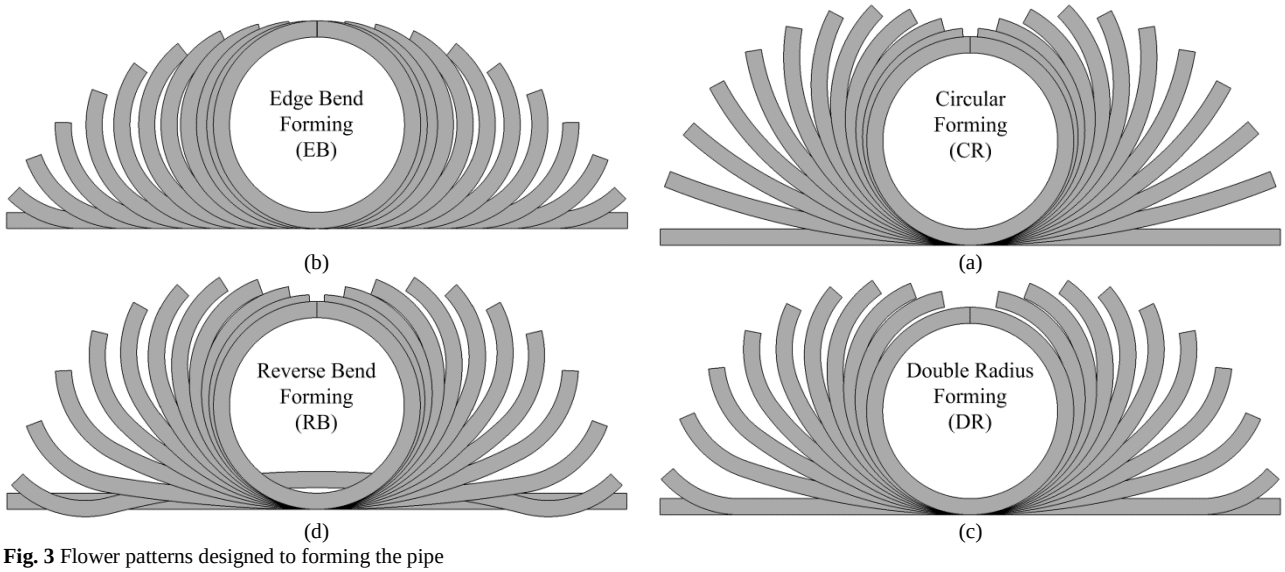


Fig. 3 Flower patterns designed to forming the pipe

شکل 3 الگوهای گل طراحی‌شده برای شکل‌دهی لوله

لوله در ایستگاه‌های شکل‌دهی برای هر چهار روش طراحی الگوی گل رسم و فرآیند طراحی الگوی گل در نرم‌افزار مدل‌سازی کتیا[1] انجام شد.

2-2- مدل‌سازی شکل‌دهی غلتکی سرد لوله

برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی فلزات در ابتدا باید هر یک از اجزای شکل‌دهی با یک نرم‌افزار طراحی به کمک رایانه مدل‌سازی شوند. در این مقاله پس از طراحی الگوی گل غلتک‌ها هر کدام از غلتک‌های شکل‌دهی به طور جداگانه در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی و ذخیره شد. در ادامه هر یک از غلتک‌های ایجاد شده به منظور سوارکردن خط تولید به محیط نرم‌افزار مارک منتات[2] وارد و در محل تعیین شده برای آن قرار داده شد. به این ترتیب مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله برای لوله سایز 38.1 میلی‌متر (1.5 اینچ) در 10 ایستگاه انجام گرفت.

در طراحی خط شکل‌دهی غلتکی لوله از شکل‌دهی سراشیبی استفاده نشده و خط مرکزی ورق از ابتدای تغییر شکل تا ایستگاه آخر در امتداد یک خط مستقیم و ارتفاع ثابت قرار گرفته است [3]. مدل کامل شکل‌دهی غلتکی سرد لوله با استفاده از الگوی گل دو شعاعی در شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به طول زیاد ورق از سه جفت غلتک راهنما برای جلوگیری از تغییر شکل ورق پیش از ایستگاه‌های اصلی استفاده شده است.

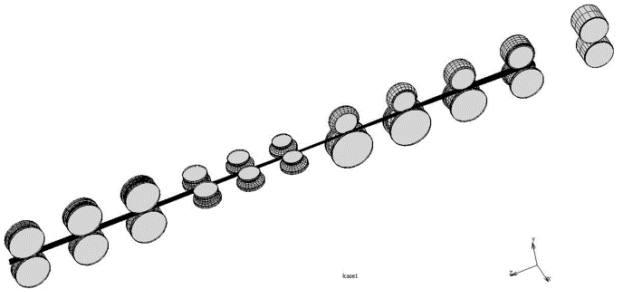


Fig. 4 Model of pipe forming line by double radius method

شکل 4 مدل خط شکل‌دهی لوله به روش دو شعاعی

[1] Catia
[2] Marc Mentat

3-2- شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی غلتکی سرد لوله

در این مقاله شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد برای لوله به قطر 38.1 میلی‌متر (1.5 اینچ) انجام شد. شبیه‌سازی فرآیند به صورت سه بعدی و دینامیک صریح[3] انجام گرفت. از آن‌جایی که تغییر شکل غلتک در مقایسه با ورق بسیار ناچیز است، هر یک از غلتک‌ها به عنوان یک عضو تماسی صلب[4] در نرم‌افزار مارک منتات معرفی شد. مشخصات هندسی ورق در جدول 2 و خواص مکانیکی به دست آمده برای نمونه ورق‌های مورد نظر در جدول 3 نشان داده شده است. استحکام تسلیم با استفاده از قاعده کرنش 0.2% به دست آمد.

به دلیل تقارن در مقطع دایره‌ای تنها نیمی از ورق در محیط نرم‌افزار مارک منتات مدل‌سازی و در صفحه میانی ورق از قیود تقارن استفاده گردید. ورق به عنوان یک عضو تماسی تغییر شکل‌پذیر با المان سالید[5] سه لایه تعریف شد تا بتوان تماس لبه ورق با غلتک‌ها در مرحله پره‌ای را به خوبی مشاهده و کنترل کرد.

جدول 2 مشخصات هندسی ورق‌ها

Table 2 Geometrical properties of sheets

پارامتر	اندازه (mm)
طول ورق L	3600
عرض ورق W	115
ضخامت ورق T	2.8

جدول 3 خواص مکانیکی ورق‌ها

Table 3 Mechanical properties of sheets

خواص مکانیکی	
جنس	فولاد آلفورم[6] 700M
مدول الاستیک (GPa)	200
تنش تسلیم (MPa)	630
استحکام کششی نهایی (MPa)	820
افزایش طول قبل از شکست (%)	0.16
نسبت پواسون	0.3

[3] Dynamic explicit
[4] Rigid
[5] Solid
[6] Alform

ماده همسان‌گرد و تحلیل ارتجاعی- خمیری فرض شد و قانون کارسختی همسانگرد مورد استفاده قرار گرفت. نمودار تنش حقیقی(σ) برحسب کرنش خمیری حقیقی (ε) مطابق شکل 5 برای نرم‌افزار معرفی شد.

برای تعریف نوع تماس بین غلتک و ورق، غلتک‌ها در موقعیت ثابتی قرار گرفته و دوران می‌کنند. در این حالت در اثر نیروی اصطکاک موجود بین ورق و غلتک، ورق به فضای بین غلتک‌ها کشیده شده و تغییر شکل انجام می‌شود. شرایط اصطکاک بین غلتک و ورق با استفاده از قانون کلمب مدل‌سازی و مقدار ضریب اصطکاک 0.2 در نظر گرفته شد. سرعت حرکت ورق در شبیه‌سازی شکل‌دهی غلتکی سرد لوله 9 متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. به این ترتیب سرعت دورانی غلتک‌ها با استفاده از رابطه (2) محاسبه و برای نرم‌افزار معرفی گردید.

$$\omega = \frac{V}{r} \qquad (2)$$

در آن ω سرعت دورانی غلتک، V سرعت خطی حرکت ورق و r شعاع غلتک است.

3- آزمایش‌های تجربی

آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده طراحی و انجام شد. طراحی غلتک برای دو ایستگاه شامل یک ایستگاه شکل‌دهی و یک ایستگاه راهنما انجام شد. شکل 6 شمای دستگاه شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده در آزمون تجربی به همراه نمایش ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی براساس الگوی گل خمش معکوس طراحی شدند. غلتک‌ها از جنس فولاد CK45 ساخته شده و روی دستگاه نصب شد. غلتک‌های بالا و پایین در هر دو ایستگاه به وسیله گیربکس به موتور محرک

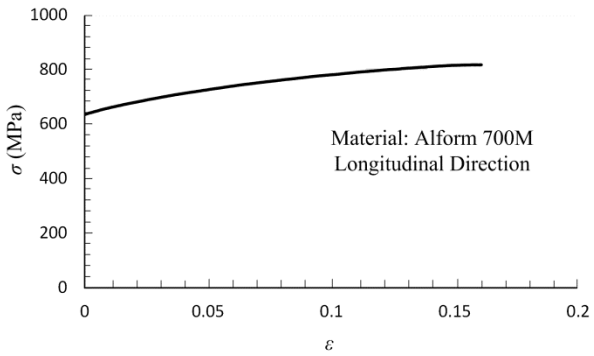


Fig. 5 Diagram of true stress-true plastic strain for Alform 700M

شکل 5 نمودار تنش حقیقی- کرنش خمیری حقیقی برای آلفورم 700M

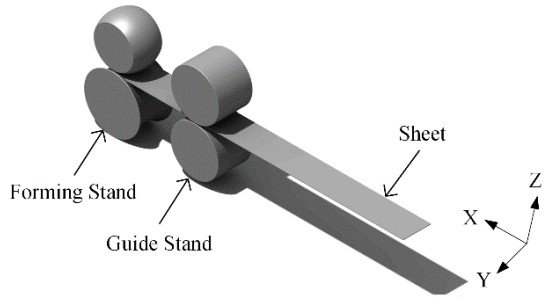


Fig. 6 Schematic of one stand roll forming process in experimental test

شکل 6 طرحواره فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد تک ایستگاهی در آزمون تجربی

متصل است و فاصله بین غلتک بالا و پایین برابر ضخامت ورق تنظیم شد. مشخصات غلتک‌های مورد استفاده در آزمون تجربی در جدول 4 آمده است. همچنین نحوه نصب غلتک‌ها بر دستگاه شکل‌دهی غلتکی در شکل 7 نشان داده شده است.

ورق مورد استفاده در آزمایش تجربی از جنس فولاد آلفورم سری 700M است که به لحاظ استحکام، جزء فولادهای با استحکام بالا دسته‌بندی می‌شود. این فولاد به روش حرارتی- مکانیکی نورد شده و دارای ساختار ریزدانه است. مشخصات هندسی ورق مطابق جدول 2 است با این تفاوت که طول ورق 1000 میلی‌متر در نظر گرفته شد. هر آزمایش به تعداد سه مرتبه جهت اطمینان از صحت نتایج تکرار گردید.

شکل 8 نمونه‌های تولید شده در آزمون تجربی را نشان می‌دهد. از روش اندازه‌گیری نوری برای به دست آوردن هندسه سه بعدی نمونه‌ها استفاده شد. در این روش اندازه‌گیری پویش‌گر[1] نوری با پویش بخش به بخش قطعه مورد نظر و اتصال بخش‌های مختلف در محیط نرم‌افزار مرتبط با آن، هندسه سه‌بعدی قطعه را به صورت ابر نقاط ایجاد می‌کند. دستگاه پویش‌گر نوری مورد استفاده به صورت سه بعدی و با دقت 0.03 میلی‌متر در حوزه کاری 100 × 100 × 133 میلی‌متر عمل می‌کند.

به علت استحکام بالای ورق‌های آلفورم سری 700M نیاز به توان بالایی جهت شکل‌دهی آن‌هاست. همین امر موجب اعمال تمهیدات لازم جهت

جدول 4 مشخصات غلتک‌های شکل‌دهی

Table 4 Forming rolls specification

ایستگاه	غلتک	شعاع غلتک (mm)	عرض غلتک (mm)	شعاع خم غلتک (mm)
ایستگاه راهنما	بالا	186	140	-
	پایین	186	140	-
ایستگاه شکل‌دهی	بالا	181.9	164	158.45
	پایین	187.2	164	155.45

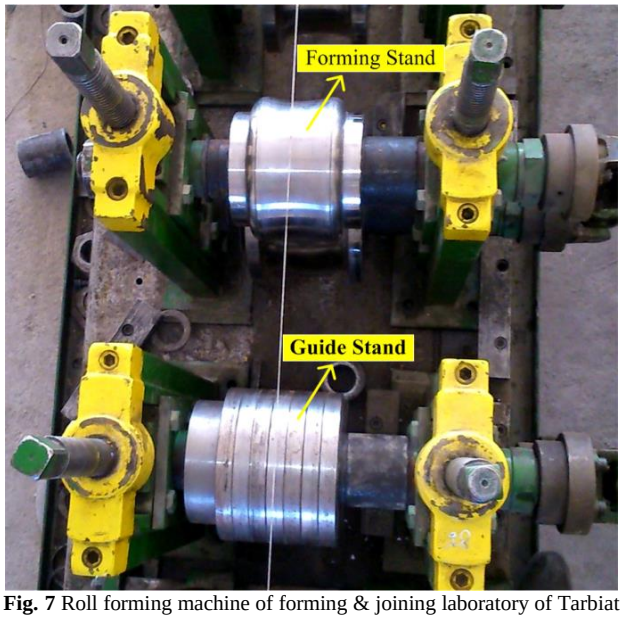


Fig. 7 Roll forming machine of forming & joining laboratory of Tarbiat Modares university

شکل 7 دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد متعلق به آزمایشگاه شکل‌دهی و اتصالات دانشگاه تربیت مدرس

[1] Scanner

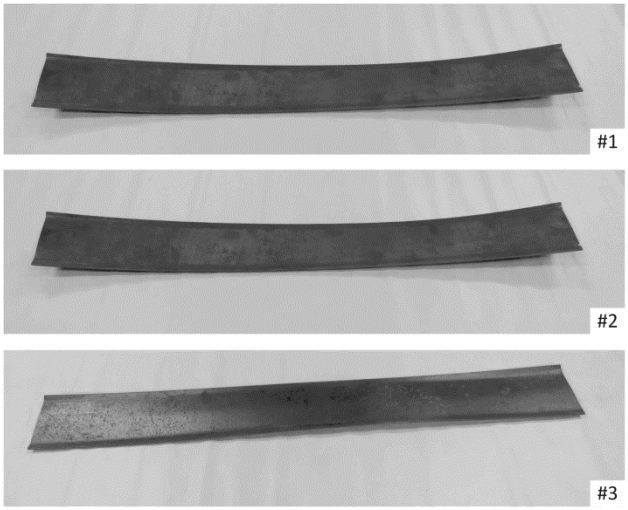


Fig. 8 Schematic of deformed sheet of Alform 700 M

شکل 8 نمایی از نمونه ورق‌های شکل‌دهی شده از جنس آلفورم 700 M

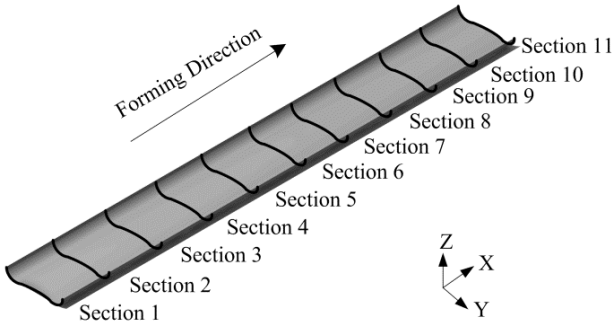


Fig. 9 Cross sections for measuring the curvature of sheet

شکل 9 مقاطع عرضی برای اندازه‌گیری انحنای ورق

انجام آزمون تجربی برای ورق‌هایی از این جنس شد. برای این منظور سرعت دورانی غلتک‌ها بالاتر از حداقل سرعتی که در آن گشتاور نامی موتور قابل انتقال باشد، انتخاب شد. همچنین از دو جفت غلتک راهنما به صورت افقی در ابتدای خط تولید به عنوان غلتک‌های نگه‌دارنده استفاده شد تا موقعیت ورق حین ورود به ایستگاه‌های شکل‌دهی در راستای عرضی کنترل گردد.

4- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی نتایج آزمایش‌های تجربی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود پرداخته می‌شود. در ادامه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، تغییر شکل ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله بررسی می‌شود و اثر الگوی گل شکل‌دهی بر هندسه لوله نهایی ارائه شده و مورد بحث قرار می‌گیرد.

4-1- بررسی صحت شبیه‌سازی اجزای محدود

به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود از مقایسه شعاع انحنای ورق تغییر شکل یافته در آزمایش تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده شد. مطابق شکل 9 شعاع انحنای ورق تغییر شکل یافته در یازده مقطع عرضی که در راستای طول ورق و به فاصله 100 میلی‌متر از هم در نظر گرفته شده اندازه‌گیری شد.

در آزمون تجربی غلتک‌های ایستگاه‌های شکل‌دهی با الگوی گل خمش معکوس طراحی شدند؛ بنابراین با در نظر گرفتن تار خنثی ورق، قسمت لبه از دو طرف به طول کمان 18.5 میلی‌متر دارای شعاع انحنای متفاوت در مقایسه

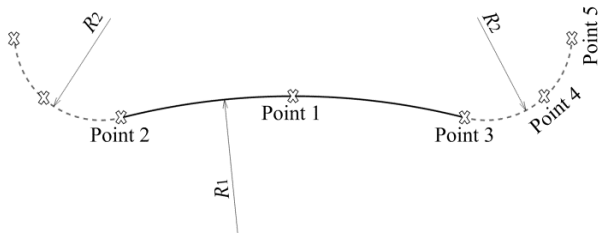


Fig. 10 How to measure the radius of curvature of center and edge of the sheet

شکل 10 نحوه اندازه‌گیری شعاع انحنای قسمت میانی و لبه ورق

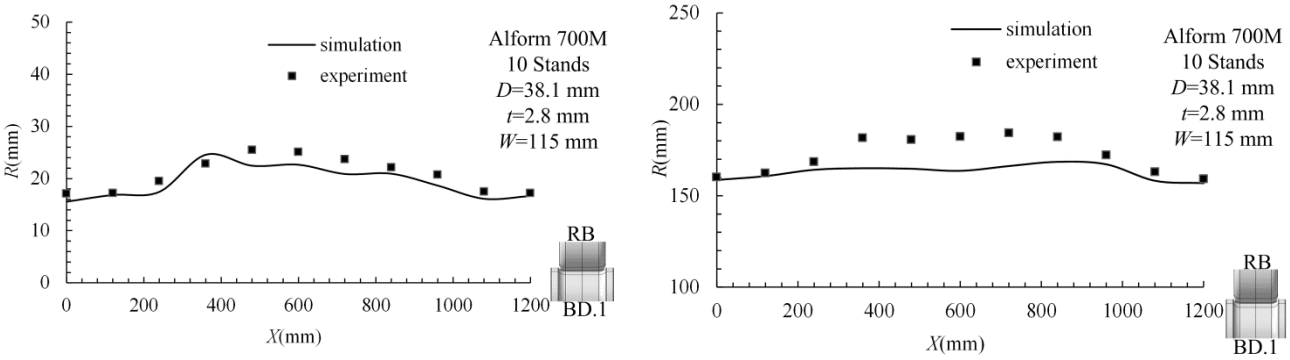
با قسمت میانی است. در قسمت میانی ورق دایره‌ای فرضی با عبور از سه نقطه ابتدا، انتها و مرکز رسم و شعاع انحنای قسمت میانی (R_1) برابر با شعاع دایره در نظر گرفته شد. شعاع انحنای هر کدام از لبه‌های ورق (R_2) نیز با در نظر گرفتن سه نقطه از ابتدا، انتها و مرکز ناحیه لبه و عبور دادن دایره از این سه نقطه محاسبه گردید. سپس شعاع انحنای قسمت لبه برابر با میانگین شعاع انحنای لبه راست و چپ ورق در نظر گرفته شد. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده با توجه به تکرار آزمون تجربی در نتایج درج گردیده است. نحوه انتخاب نقاط یک تا پنج و نیز شعاع انحنا قسمت میانی و لبه ورق در شکل 10 که شمای مقطعی از ورق است، نمایش داده شده است. با توجه به روند شرح داده شده در قسمت پیشین، شعاع انحنای قسمت میانی و لبه پروفیل در آزمون تجربی جداگانه محاسبه و با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه گردید. در شکل 11 مقایسه شعاع انحنای (R) قسمت میانی و لبه ورق برای یازده مقطع در جهت طول نمونه (X) بین آزمون تجربی و شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در وسط پروفیل اندکی بیشتر از دو انتهای آن است، اما در مجموع اختلاف کم نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به خوبی صحت شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید می‌کند.

4-2- کرنش طولی

در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله، کرنش طولی در لبه ورق از محدوده ارتجاعی خارج شده و به صورت قله‌هایی در نمودار کرنش طولی ظاهر می‌گردد. در حالی که کرنش طولی در مرکز ورق در محدوده ارتجاعی باقی مانده و تنها قله‌های کرنشی در برخی موقعیت‌ها از حد کرنش ارتجاعی خارج می‌شوند. با ورود ورق به هر کدام از ایستگاه‌های شکل‌دهی، کرنش طولی ابتدا افزایش پیدا کرده و با خارج شدن ورق از ایستگاه کاهش می‌یابد. کرنش طولی در لایه خارجی (ε_X) برحسب فاصله از ایستگاه نگه‌دارنده (X) در شکل 12 نشان داده شده است. مقایسه کرنش طولی بین لبه و مرکز ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله نشان‌دهنده تفاوت زیاد کرنش بین این دو ناحیه از ورق حین تغییر شکل است. این تفاوت موجب کشیده شدن ناحیه لبه ورق می‌شود که در برخی از موارد لبه ورق از حالت پایدار خارج شده و در نتیجه احتمال کمانش لبه ورق در هر یک از ایستگاه‌ها وجود دارد [13].

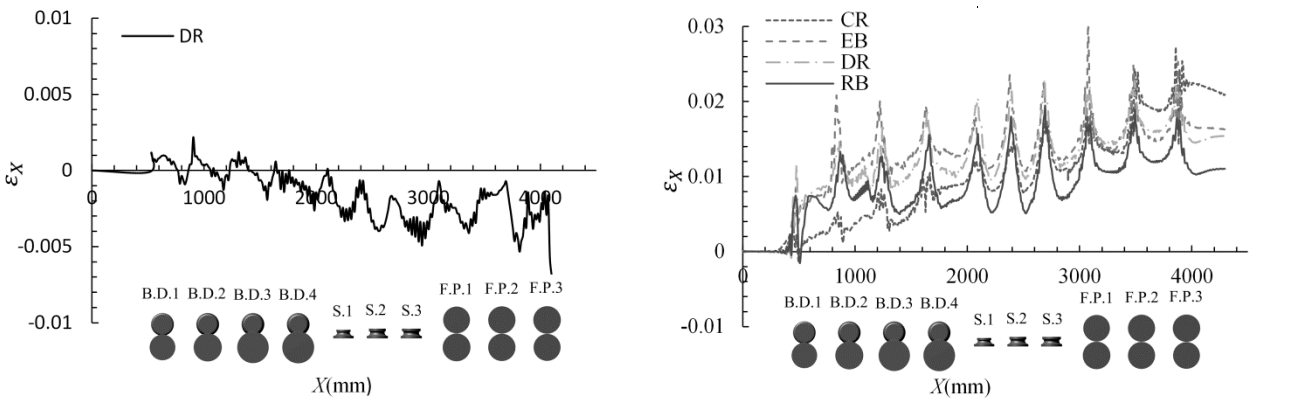
افزایش ناگهانی کرنش طولی لبه نسبت به مرکز ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی پیش از مرحله پره‌ای را می‌توان ناشی از دو عامل دانست. عامل اول خمش عرضی است. هنگام ورود ورق به ایستگاه شکل‌دهی خطوط جریان ناحیه لبه در اثر خمش عرضی اعمالی به ورق توسط غلتک‌ها در دو جهت افقی و عمودی جابه‌جا می‌شوند. در حالی که خطوط جریان ناحیه مرکزی به صورت یک خط مستقیم در جهت شکل‌دهی باقی می‌مانند؛ بنابراین خطوط



(b) (a)

Fig. 11 Comparison the radius of curvature of the sheet in experimental test and simulation results for, (a) midsection and (b) edge section

شکل 11 مقایسه شعاع انحنای ورق در آزمون تجربی و نتایج شبیه‌سازی برای (a) ناحیه میانی و (b) ناحیه لبه



(b) (a)

Fig. 12 Longitudinal strain in outer layer of sheet at (a) edge and (b) center

شکل 12 کرنش طولی در لایه خارجی ورق در ناحیه (a) لبه و (b) مرکز

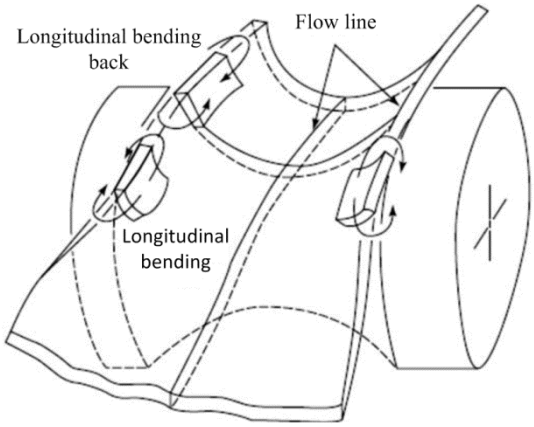


Fig. 13 Longitudinal bend and reverse bend at edge in break down stand [1]

شکل 13 خم طولی و خم معکوس ناحیه لبه در ایستگاه شکل‌دهی فشاری [1]

جریان ناحیه لبه در مقایسه با مرکز ورق افزایش طول می‌یابد که به معنی ایجاد کرنش طولی کششی شدید در ناحیه لبه ورق است. عامل دیگری که سبب افزایش کرنش طولی ناحیه لبه نسبت به مرکز ورق می‌گردد و در پژوهش کسایی و همکاران [14] نیز گزارش شده خم طولی است که در ناحیه لبه ورق ایجاد می‌شود. مطابق شکل 13 هنگام ورود ورق به ایستگاه شکل‌دهی فشاری، از آن‌جایی که خطوط جریان ناحیه لبه در مجاورت غلتک پایینی ایستگاه فشاری قرار دارند، این ناحیه تحت خمش طولی قرار می‌گیرد. این امر سبب افزایش طول خطوط جریان ناحیه لبه و در نتیجه افزایش کرنش طولی در این ناحیه می‌شود. در انتهای فضای غلتک، ناحیه لبه تحت خمش معکوس قرار می‌گیرد تا خم طولی ایجاد شده جبران شده و لبه ورق به حالت مستقیم باز گردد.

مشاهده می‌شود که در مرحله فشاری روش دایره‌ای دارای قله کرنش کوتاه‌تر نسبت به سایر روش‌هاست. دلیل این است که در سه روش دیگر تنها لبه ورق در ایستگاه اول شکل می‌گیرد و به اندازه شعاع انحنای لوله نهایی خم می‌شود. از این‌رو خطوط جریان ناحیه لبه افزایش طول یافته و کرنش طولی زیادی در ناحیه لبه شکل می‌گیرد. این در حالی است که در روش دایره‌ای تمامی نقاط مقطع عرضی ورق به تدریج به شعاع انحنای نهایی می‌رسند و تمرکز شکل‌دهی در قسمت لبه وجود ندارد. تمرکز شکل‌دهی در ناحیه لبه موجب کارسختی و افزایش تنش تسلیم این ناحیه می‌شود. در نتیجه در ایستگاه‌های بعدی لبه ورق به راحتی دچار تغییر شکل خمیری نمی‌شود. کرنش طولی در لبه با ورود ورق به مرحله پره‌ای با افزایش شدیدتری همراه است. در اثر اعمال کاهش محیطی در ناحیه لبه، ورق به ناچار در راستای طولی دچار سیلان شده و کرنش در راستای طولی افزایش می‌یابد. از آن‌جایی که میزان کاهش محیطی اعمالی به ورق در ایستگاه اول پره‌ای بیشتر است، در نتیجه بیشترین مقدار کرنش طولی در این ایستگاه روی می‌دهد. مقایسه کرنش طولی نشان می‌دهد که شکل‌دهی با استفاده از الگوی گل خمش معکوس دارای قله‌های کرنش طولی کوتاه‌تر در مرحله پره‌ای تا میزان 35% نسبت به سایر روش‌هاست، همچنین شکل‌دهی با استفاده از الگوی گل لبه‌ای دارای بلندترین قله‌های کرنش طولی نسبت به سایر روش‌ها بوده و به لحاظ بروز عیب کمانش لبه مستعدتر است.

4-3- تغییرات عرض ورق

تغییرات عرض یا محیط خارجی نیمی از ورق (L) برحسب فاصله از ایستگاه نگهدارنده (X) در شکل 14 نشان داده شده است. در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله تغییر شکل ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی متمرکز شده است. در نتیجه با ورود ورق به هر کدام از ایستگاه‌های شکل‌دهی تا پیش از مرحله پره‌ای، ورق تحت خمش عرضی قرار گرفته و محیط خارجی آن به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. به همین علت محیط خارجی ورق در انتهای مرحله شکل‌دهی نسبت به عرض ابتدایی ورق حدود 7 میلی‌متر افزایش نشان می‌دهد. بیشینه افزایش محیط خارجی در مرحله شکل‌دهی لبه اتفاق می‌افتد و بیشتر در ناحیه لبه ورق تمرکز دارد. با توجه به ماهیت روش دایره‌ای که تمرکز شکل‌دهی در قسمت لبه ورق وجود ندارد، میزان افزایش محیط خارجی ورق در مرحله فشاری برای این روش کم‌تر از سایر روش‌هاست. با ورود ورق به مرحله کناری، شیب افزایش محیط خارجی برای روش دایره‌ای بیشتر می‌شود، به طوری که در پایان این مرحله محیط خارجی ورق برای هر چهار روش تقریباً با هم برابر می‌شود. ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه‌های فشاری و کناری دارای عیوب زیادی است. از این‌رو لازم است تا این عیوب در مرحله پره‌ای اصلاح شود. اعمال کاهش عرضی در مرحله پره‌ای یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر اصلاح عیوب شکل‌دهی تأثیر به‌سزایی دارد. از این‌رو عرض ورق در مرحله پره‌ای کاهش می‌یابد و بیشترین میزان کاهش نیز در ایستگاه اول پره‌ای اعمال می‌شود. میزان کاهش عرض ورق در مراحل پره‌ای برابر 0.16% است که به صورت نزولی بین ایستگاه‌های پره‌ای توزیع شده است. میزان تغییرات محیط خارجی ورق در ایستگاه‌های مرحله پره‌ای در جدول 5 ارائه شده است. اعداد مثبت نشان‌دهنده افزایش عرض لایه خارجی است، اما این به معنی عدم اعمال کاهش عرضی در مرحله پره‌ای نیست. مشابه پژوهش کسایی و همکاران [14] لایه خارجی ورق به علت خمش در حین شکل‌دهی افزایش طول و در اثر تماس با غلتک‌های پره‌ای کاهش طول می‌دهد. برآیند این دو عامل تعیین کننده میزان تغییرات محیط خارجی ورق خواهد بود.

4-4- توزیع انحنای ورق تغییر شکل یافته

به منظور بررسی تغییرات انحنا در راستای عرضی ورق در مراحل مختلف شکل‌دهی، فاکتور بی‌بعد انحنای نسبی به صورت نسبت انحنای ورق تغییر شکل یافته به انحنای لوله نهایی تعریف شد [15]. هر چه انحنای نسبی در عرض ورق به یک نزدیک‌تر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد، پروفیل محصول به لوله نهایی نزدیک‌تر خواهد بود. نزدیک بودن انحنای نسبی به صفر نشان‌دهنده تغییر شکل اعمالی کم است. برای این منظور با توجه به شکل 15

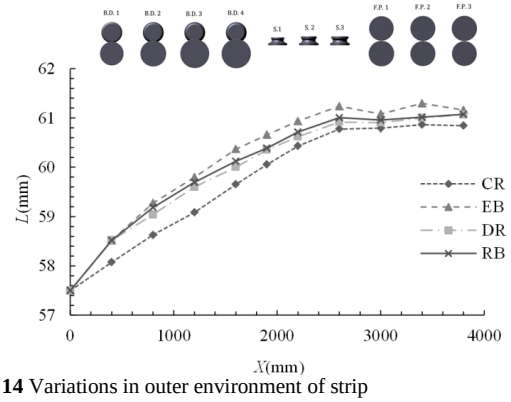


Fig. 14 Variations in outer environment of strip

شکل 14 تغییرات محیط خارجی ورق

جدول 5 میزان تغییرات عرض لایه خارجی ورق در ایستگاه‌های مرحله پره‌ای

Table 5 Changes in width of the outer layer of sheet in fin pass stands

الگوی گل		دایره‌ای	لبه‌ای	دو شعاعی	خمش معکوس
تغییرات	پره‌ای اول	0.018	-0.155	-0.010	-0.047
عرض	پره‌ای دوم	0.073	0.213	0.095	0.059
ورق	پره‌ای سوم	-0.022	-0.134	0.065	0.057

در نرم‌افزار متلب[1] کدی نوشته شد که ورودی آن مختصات گره‌ها و خروجی آن انحنای ورق است. انحنای ورق با داشتن مختصات گره‌ها و عبور دایره فرضی از هر سه نقطه متوالی محاسبه می‌شود.

در شکل 16 محور عمودی (ρ) انحنا نسبی نقاط مختلف مقطع عرضی ورق و محور افقی (Y) فاصله از مرکز ورق را نشان می‌دهد. جهت بررسی توزیع انحنای ورق تغییر شکل یافته، نیمی از مقطع عرضی ورق در نظر گرفته شد. مشاهده می‌شود که به جز روش دایره‌ای برای سایر روش‌های طراحی الگوی گل در مرحله فشاری بیشتر نواحی لبه و اندکی قسمت میانی ورق تحت تغییر شکل قرار می‌گیرند و بقیه نواحی جزء نواحی خم نشده باقی می‌ماند. در حالی که برای روش دایره‌ای تمامی نقاط مقطع دارای انحنای نزدیک به هم بوده و افزایش تدریجی شعاع انحنای نسبی طی مراحل شکل‌دهی مشاهده می‌گردد. در مرحله کناری، قسمت میانی ورق تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد و این نواحی از ورق در پایان مرحله کناری به حدود 75% از شعاع انحنای نهایی خود دست می‌یابند. این در حالی است که برای روش لبه‌ای به این علت که تغییر شکل از قسمت لبه شروع شده و به تدریج تا قسمت مرکزی ورق ادامه می‌یابد، قسمت‌های مرکزی و میانی ورق هم‌چنان تغییر شکل اندکی را تجربه کرده‌اند.

در مرحله کناری به دلیل وجود غلتک‌های جانبی، قسمت میانی ورق به انحنای نهایی می‌رسد و نواحی خم‌نشده ورق به تدریج کاهش می‌یابد، اما غیریکنواختی توزیع انحنا در مقطع ورق باقی می‌ماند. استفاده از سه ایستگاه پره‌ای و اعمال کاهش عرضی سبب می‌شود تا ورق در حالی که در تماس کامل با غلتک‌ها قرار دارد، از ایستگاه پره‌ای عبور کند. در نتیجه میانگین انحنای نسبی ورق تغییر شکل یافته، افزایش می‌یابد و به یک نزدیک می‌شود. همچنین مشابه پژوهش جیانگ و همکاران [15] توزیع انحنای ورق نیز یکنواخت‌تر می‌گردد؛ به گونه‌ای که قسمت‌هایی که انحنای کم‌تر و یا بیشتر از یک داشتند با عبور از غلتک‌های مرحله پره‌ای اصلاح می‌شوند.

مطابق شکل 17 مشاهده می‌شود که در انتهای مرحله پره‌ای، انحنای قسمت مرکزی ورق برای هر چهار الگوی گل بسیار نزدیک به مقدار نهایی بوده و وضعیت مطلوبی دارد. در نتیجه نقطه تمایز این چهار روش، مربوط به انحنای قسمت میانی و لبه ورق است که روش‌های دایره‌ای و لبه‌ای دارای نوسان بوده و از انحنای مطلوب فاصله دارند؛ در حالی که روش‌های دو شعاعی و خمش معکوس دارای شرایط مطلوب و نزدیک به انحنای نهایی است. این در حالی است که در ناحیه نزدیک به لبه ورق، روش دو شعاعی اندکی نوسان را نشان می‌دهد، اما روش خمش معکوس همان‌گونه که در جدول 6 نیز مشاهده می‌گردد دارای کم‌ترین میزان انحراف از انحنای میانگین بوده و بهترین وضعیت را به لحاظ توزیع انحنای ورق داراست.

4-5- برگشت فنری ورق تغییر شکل یافته

با خروج ورق از ایستگاه شکل‌دهی تمام نواحی ورق دچار تغییر شکل خمیری نمی‌شود. از این‌رو پس از خروج ورق تغییر شکل یافته از این مرحله،

[1] Matlab

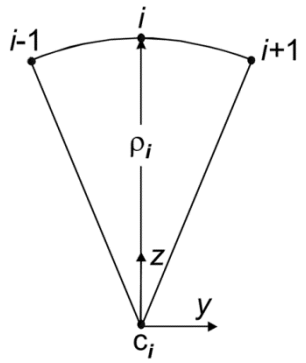
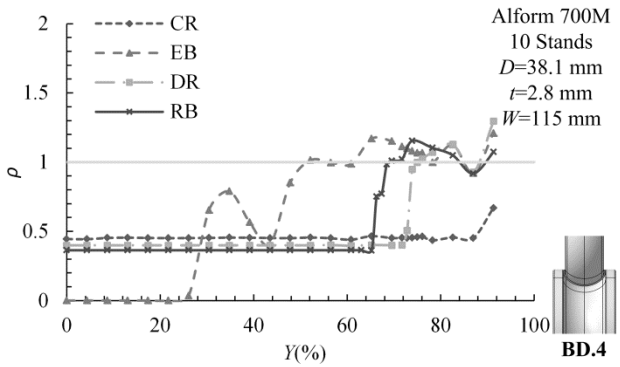
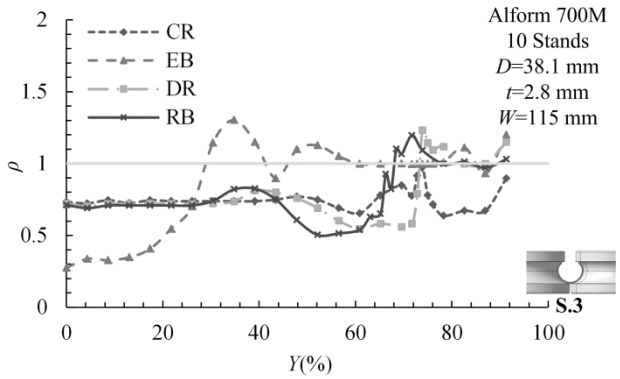


Fig. 15 Schematic of how to measure radius of curvature by nodes coordinates

شکل 15 نمایش نحوه اندازه‌گیری شعاع انحنا از روی مختصات گره‌ها



(a)



(b)

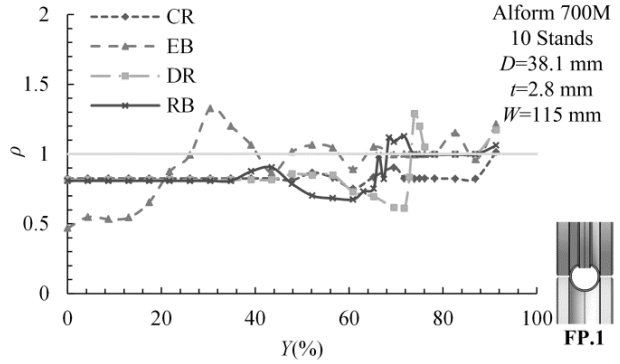
Fig. 16 Distribution of curvature of the cross-section of deformed sheet at the end of (a) breakdown and (b) side stand

شکل 16 توزیع انحنای مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه پایانی (a) فشاری و (b) کناری

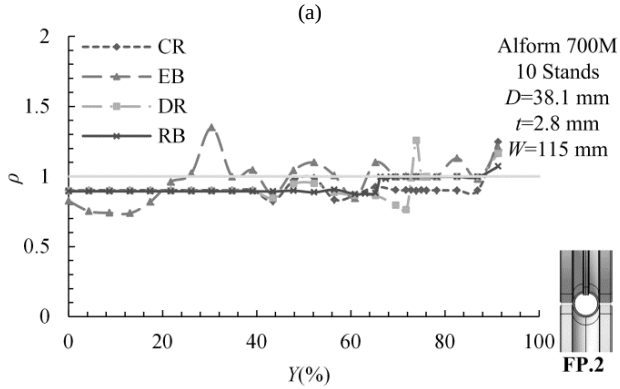
ورق دچار برگشت فنری می‌شود. شکل 18 مقایسه انحنای مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه سوم پره‌ای و 500 میلی‌متر بعد از آن را برای هر چهار نوع الگوی گل نشان می‌دهد. از آن‌جایی که موقعیت‌دهی لبه‌های ورق جهت ورود به مرحله جوش یکی از مهم‌ترین وظایف مرحله پره‌ای است، کنترل برگشت فنری برای دست‌یابی به جوش ایده‌آل ضروری است [8]. برای این‌که امکان مقایسه برگشت فنری ورق پس از خروج از ایستگاه آخر شکل‌دهی به صورت کمی با تغییر پارامترهای مختلف شکل‌دهی برای الگوهای گل مختلف وجود داشته باشد، رابطه هندسی بر مبنای میانگین انحنای نسبی ورق تغییر شکل یافته به صورت رابطه (3) در نظر گرفته شد.

$$\mathrm{S.B.} = \frac{C_{\mathrm{FP3}} - C_{\mathrm{After\ FP3}}}{C_{\mathrm{FP3}}} \times 100 \qquad (3)$$

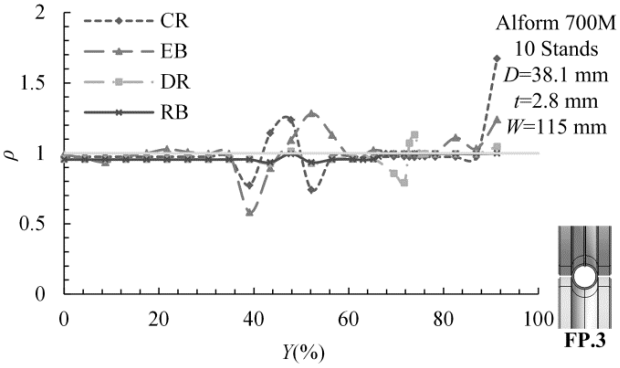
در آن S.B. میزان برگشت فنری، C_{FP3} میانگین انحنای نسبی ورق در



(a)



(b)



(c)

Fig. 17 Distribution of curvature of the cross-section of deformed sheet at fin pass (a) first, (b) second and (c) third stand

شکل 17 توزیع انحنای مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه پره‌ای (a) اول، (b) دوم و (c) سوم

جدول 6 میانگین انحنای نسبی ورق در ایستگاه پره‌ای سوم

Table 6 Mean relative curvature of sheet at third stand of fin pass

نوع الگوی گل	دایره‌ای	لبه‌ای	دو شعاعی	خمش معکوس
میانگین انحنای نسبی	1.001	1.008	0.969	0.970
انحراف از معیار	0.162	0.121	0.062	0.022

ایستگاه سوم پره‌ای و $C_{\mathrm{After\ FP3}}$ میانگین انحنای نسبی ورق در 500 میلی‌متر بعد از ایستگاه سوم پره‌ای است. می‌توان از این معیار برای مقایسه میزان برگشت فنری کل مقطع ورق پس از خروج از ایستگاه آخر پره‌ای استفاده کرد. مقادیر میانگین انحنای نسبی و برگشت فنری که مطابق رابطه (3) محاسبه شده است، برای چهار نوع الگوی گل در جدول 7 قید شده است. مشاهده می‌شود که کم‌ترین میزان برگشت فنری به لحاظ تغییرات میانگین انحنای نسبی مربوط به الگوی گل دایره‌ای است. در این روش کل مقطع ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی به تدریج شکل می‌گیرد و تمرکز شکل‌دهی در

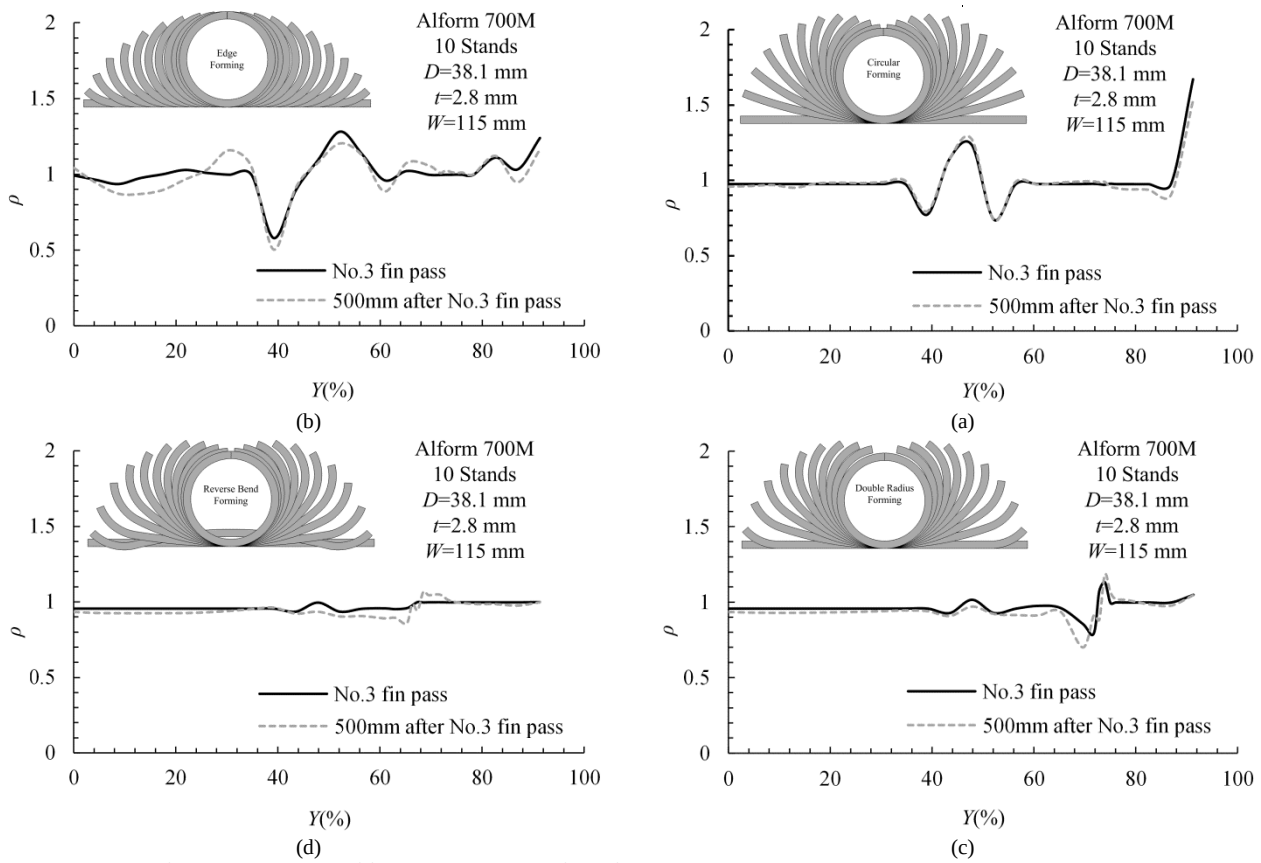


Fig. 18 Curvature of sheet in third stand of fin pass and 500 mm after it for (a) circular, (b) edge, (c) double radius and (d) reverse bending method

شکل 18 انحنای ورق در ایستگاه سوم پره‌ای و 500 میلی‌متر بعد از آن برای روش (a) دایره‌ای، (b) لبه‌ای، (c) دو شعاعی و (d) خمش معکوس

ایستگاه‌های مختلف دیده نمی‌شود. همان گونه که در شکل 14 مشاهده می‌گردد، محیط خارجی ورق در پایان فرآیند شکل‌دهی لوله برای روش دایره‌ای کم‌تر از سایر روش‌هاست که به معنی اعمال کاهش محیطی بیشتر در مرحله پره‌ای است. در نتیجه میزان برگشت فنری پس از خروج از ایستگاه با اعمال تغییر شکل خمیری بیشتر به ورق کاهش می‌یابد. مطابق شکل 19 میزان انحراف لبه ورق در فاصله 500 میلی‌متر بعد از ایستگاه پره‌ای سوم به عنوان معیار دیگری جهت مقایسه برگشت فنری مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر انحراف لبه ورق تغییر شکل یافته پس از خروج از ایستگاه پره‌ای سوم و طی مسافت 500 میلی‌متر برای الگوهای گل مختلف در جدول 8 آورده شده است. در این مورد نیز الگوی گل دایره‌ای دارای کم‌ترین میزان انحراف لبه ورق است. کم‌تر بودن میزان تغییرات متوسط شعاع انحنا در این روش که قسمت پیشین به آن اشاره شد سبب می‌شود تا میزان باز شدن ورق پس از خروج از ایستگاه آخر نیز کمینه شود. عامل دیگری که به کم‌تر شدن انحراف لبه در روش دایره‌ای منجر می‌شود، له شدن لبه ورق در ایستگاه‌های پره‌ای است که منجر به تغییر شکل خمیری بیشتر در ناحیه لبه و کاهش میزان انحراف گردید.

4-6- توزیع ضخامت ورق تغییر شکل یافته

دست‌یابی به شکل لبه مطلوب جهت ایجاد اتصال جوش مطلوب ضروری است [16]. به منظور بررسی توزیع ضخامت و شکل لبه ورق، ضخامت ورق (T) برحسب فاصله از مرکز ورق (Y) در شکل 20 نمایش داده شده است. یکی از عیوبی که در مرحله فشاری رخ می‌دهد، نازک شدن گوشه‌های ورق است. مشاهده می‌شود که در پایان مرحله فشاری ضخامت ورق با نزدیک شدن به لبه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

از آن‌جایی که اولین نقطه تماس غلتک با ورق ناحیه کوچکی در لبه ورق است [8]، در نتیجه در اثر اعمال کرنش طولی کششی شدید به ناحیه لبه ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی، لبه ورق دچار کاهش ضخامت می‌گردد. کاهش ضخامت ناحیه لبه ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی با استفاده از

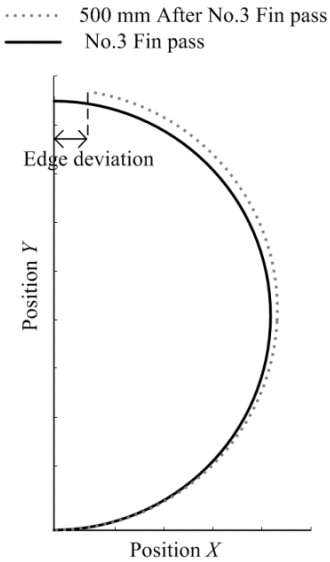


Fig. 19 Profile of sheet in third stand of fin pass and 500 mm after it

شکل 19 پروفیل ورق در ایستگاه سوم پره‌ای و 500 میلی‌متر بعد از آن

جدول 7 میانگین انحنای نسبی و برگشت فنری ورق تغییر شکل یافته

Table 7 Mean relative curvature and spring back of deformed sheet

نوع الگوی گل	دایره‌ای	لبه‌ای	دو شعاعی	خمش معکوس
C_{FP3}	1.001	1.008	0.969	0.970
$C_{After\ FP3}$	0.994	0.998	0.949	0.951
S.B.	0.69	0.99	2.06	1.95

جدول 8 میزان انحراف لبه ورق در فاصله 500 میلی‌متر بعد از ایستگاه پره‌ای سوم

Table 8 Edge deviation in 500 mm after third stand of fin pass

الگوی گل	دایره‌ای	لبه‌ای	دو شعاعی	خمش معکوس
انحراف لبه (mm)	0.151	0.468	1.419	1.309

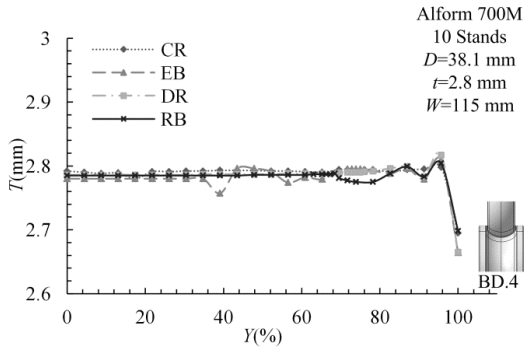
غلتک‌های کناری نیز تشدید می‌گردد، در حالی که ضخامت ناحیه مرکزی و میانی ورق تقریباً ثابت باقی می‌ماند. کاهش ضخامت لبه ورق در مرحله شکل‌دهی از جمله عواملی است که اگر تا پیش از مرحله جوش اصلاح نشود، سبب ایجاد عیوب ناحیه جوش می‌گردد. به طور کلی تغییر ضخامت ورق تا پیش از مرحله پره‌ای در فرآیند شکل‌دهی غلتکی فقط در ناحیه لبه ورق متمرکز است.

توزیع ضخامت مقطع ورق در ایستگاه‌های مرحله پره‌ای در شکل 21 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با عبور ورق از بین غلتک‌های مرحله پره‌ای به تدریج ضخامت ناحیه لبه ورق اصلاح گشته و نزدیک به ضخامت ابتدایی ورق (2.8 میلی‌متر) می‌شود. ضخامت ورق در مرحله پره‌ای به ویژه در ناحیه لبه به علت اعمال کاهش محیطی افزایش پیدا می‌کند. در واقع کوبش لبه ورق در مرحله پره‌ای سبب از بین رفتن عیوب ناحیه لبه از قبیل ناصافی سطح و کاهش ضخامت لبه در اثر تماس با غلتک‌ها شده که این امر در نهایت منجر به افزایش کیفیت جوش لوله می‌شود. میانگین ضخامت ورق در ناحیه‌ای به طول 5 میلی‌متر از لبه در جدول 9 آمده است.

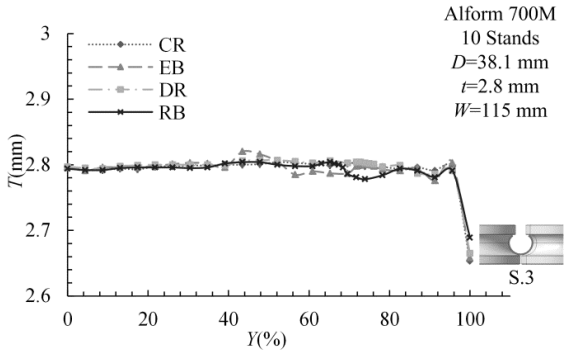
اصلاح ضخامت قسمت لبه ورق برای الگوهای دو شعاعی و خمش معکوس به خوبی صورت می‌گیرد. این در حالی است که برای الگوی لبه‌ای در پایان مرحله پره‌ای افزایش محسوسی در ضخامت ناحیه لبه رخ نمی‌دهد و این حالت برای مرحله جوش نامناسب است. روش دایره‌ای نیز توانایی شکل‌دهی لبه ورق به شکل مطلوب را ندارد و با اعمال فشار بیش از اندازه موجب له‌شدگی لبه ورق می‌شود و لبه ورق وضعیت مطلوبی به لحاظ ضخامت ندارد. در نتیجه شکل‌دهی با روش دو شعاعی و خمش معکوس موجب ایجاد توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و شکل لبه مطلوب‌تر نسبت سایر روش‌ها می‌شوند.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله فولادی از جنس فولاد



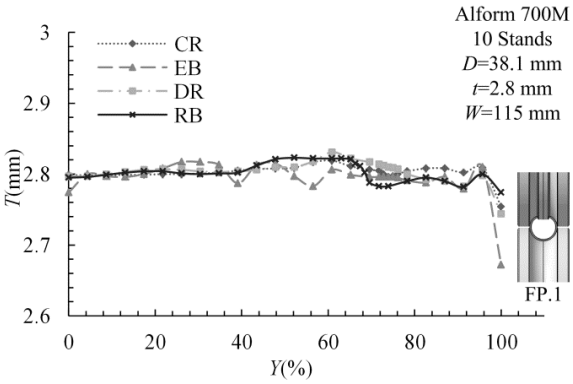
(a)



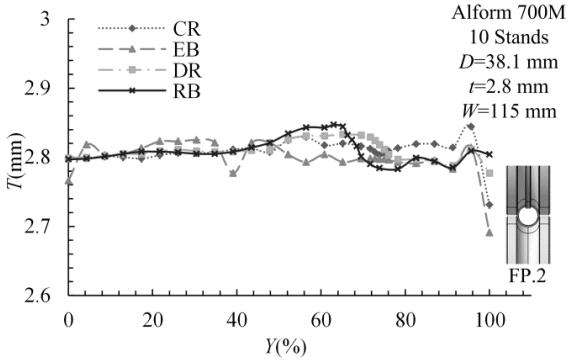
(b)

Fig. 20 Distribution of thickness of the cross-section of deformed sheet at the end of (a) breakdown and (b) side stand

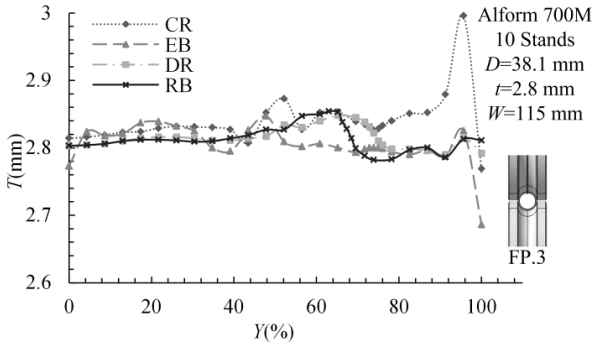
شکل 20 توزیع ضخامت مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه پایانی (a) فشاری و (b) کناری



(a)



(b)



(c)

Fig. 21 Distribution of thickness of the cross-section of deformed sheet at fin pass (a) first, (b) second and (c) third stand

شکل 21 توزیع ضخامت مقطع عرضی ورق تغییر شکل یافته در ایستگاه پره‌ای (a) اول، (b) دوم و (c) سوم

جدول 9 میانگین ضخامت ناحیه لبه ورق

Table 9 Mean thickness of edge portion of the sheet

الگوی گل	دایره‌ای	لبه‌ای	دو شعاعی	خمش معکوس
میانگین ضخامت ناحیه لبه ورق (mm)	2.88	2.76	2.79	2.80

استحکام بالای آلفورم سری 700M با استفاده از روش‌های طراحی الگوی گل مختلف در نرم‌افزار اجزای محدود مارک منتات شبیه‌سازی شد و تغییر شکل ورق و هندسه لوله در این فرآیند مورد بررسی قرار گرفت.

با بررسی کرنش طولی مشاهده شد که شکل‌دهی با استفاده از الگوی گل خمش معکوس نسبت به سایر روش‌ها دارای قله‌های کرنش طولی کوتاه‌تر در مرحله پره‌ای تا میزان 35% است. در نتیجه در این روش امکان چین‌خوردگی لبه ورق کم‌تر از سایر روش‌های طراحی است.

فاکتور بی‌بعد انحنای نسبی به منظور بررسی تغییرات انحنا تعریف شد. در انتهای ایستگاه پره‌ای انحنای نسبی قسمت مرکزی ورق برای هر چهار الگوی گل بسیار نزدیک به یک است. در نواحی میانی و لبه ورق روش‌های دایره‌ای و لبه‌ای دارای نوسان هستند در حالی که روش‌های دو شعاعی و خمش معکوس دارای انحنای نزدیک به یک می‌باشند. در ناحیه نزدیک به لبه ورق روش دو شعاعی اندکی نوسان نشان می‌دهد، اما روش خمش معکوس دارای کم‌ترین مقدار انحراف از انحنای میانگین به مقدار 0.02 بوده و بهترین وضعیت را به لحاظ توزیع انحنای ورق دارد.

به منظور مقایسه برگشت فنری دو فاکتور تغییر میانگین انحنای نسبی و انحراف لبه تعریف گردید. نتایج نشان داد که شکل‌دهی غلتکی لوله با استفاده از الگوی گل دایره‌ای کم‌ترین میزان برگشت فنری از لحاظ تغییر میانگین انحنای نسبی به میزان 0.69% و انحراف لبه به میزان 0.15 میلی‌متر را دارد.

با بررسی توزیع ضخامت ورق مشاهده شد که برای الگوی گل لبه‌ای در پایان مرحله پره‌ای اصلاح ضخامت ناحیه لبه به درستی اتفاق نمی‌افتد و الگوی دایره‌ای نیز توانایی شکل‌دهی لبه ورق به شکل مطلوب را ندارد و با اعمال فشار بیش از اندازه موجب له‌شدگی لبه ورق به میزان 0.2 میلی‌متر می‌شود که هر دو این موارد برای مرحله جوش نامطلوب است. بررسی ضخامت در ناحیه‌ای به طول 5 میلی‌متر از لبه ورق نشان می‌دهد که اصلاح ضخامت برای الگوهای دو شعاعی و خمش معکوس به خوبی صورت گرفته و میانگین ضخامت این ناحیه به حدود 2.8 میلی‌متر می‌رسد.

با بررسی نتایج استفاده از الگوی گل خمش معکوس جهت شکل‌دهی لوله فولادی استحکام بالا با مشخصات یادشده پیشنهاد می‌گردد. آزمایش تجربی در یک ایستگاه شکل‌دهی با الگوی گل خمش معکوس انجام شد. شعاع انحنای نمونه‌های تولیدی با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت و انطباق خوب آن صحت شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید کرد.

6- مراجع

[1] G. Halmos, *Roll Forming Handbook*, pp. 1-4, Torento: CRC, 2005.

[2] T. Toyooka, E. Yokoyama, A. Ejima, *Deformation behaviour and fin pass forming condition in the 26-inch cage forming ERW pipe mill*, Kawasaki Steel Corporation, Japan, pp. 353-364, 1982.

[3] W. Mizutani, K. Nakajima, *Development of a new forming process with vertical rolls for electric-resistance-welded pipes*, Nippon Steel Corporation, Japan, pp. 895-910, 1981.

[4] M. Kiuchi, T. Koudabashi, T. Sato, Automated design system of optimal roll profiles for roll-forming of welded pipe and tube, *Proceedings of The Third International Conference on Steel Rolling*, Tokyo, Japan, September 2-6, 1985.

[5] M. Kiuchi, Optimum design of fin-rolls and fin pass-schedule of roll forming of pips, *Proceedings of The International Conference on Tomorrows Tube*, Tokyo, Japan, July 15-18, 1986.

[6] H. Ona, T. Jimma, H. Kozono, T. Nakako, Development in CAD for cold roll forming, *Proceeding of the Twenty-Sixth MTDR Conference*, Manchester: Springer, pp. 49-54, 1986.

[7] T. Toyooka, *Computer Simulation for Tube-Making by Roll-Forming Process*, PhD Thesis, Aston University, Birmingham, 1999.

[8] H. M. Naeini, M. Tajdari, S. Madak, V. Panahizadeh, Experimental study and simulation of cold roll forming process of pipe by finite elemnet analysis method, *Solid Mechanics in Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 35-48, 2009. (in Persian فارسی)

[9] G. Zeng, S. Li, Z. Yu, X. Lai, Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 1930-1938, 2009.

[10] B. Abeyrathna, B. Rolfe, P. Hodgson, M. Weiss, An extension of flower pattern diagram for roll forming, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 12, pp. 1683-1695, 2016.

[11] T. R. Walker, R. J. Pick, Approximation of the axial strains developed during the roll forming of ERW pipe, *Materials Processing Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-44, 1990.

[12] M. S. Tehrani, M. Bahrami, Analytical and numerical study on deformation length in roll forming of pipe, *Majlesi Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 25-35, 2010. (in Persian فارسی)

[13] M. Kasaei, H. M. Naeini, M. S. Tehrani, E. Rahimi, Numerical and experimental study on sheet deformation in cage roll forming process of pipe, *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-14, 2011. (in Persian فارسی)

[14] M. Kasaei, H. M. Naeini, R. A. Tafti, M. S. Tehrani, Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion, *Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp. 190-199, 2014.

[15] J. Jiang, D. Li, Y. Peng, J. Li, Research on strip deformation in the cage roll-forming process of ERW round pipes, *Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 10, pp. 4850-4856, 2009.

[16] S. Ghanbari, D. Akbari, H. M. Naeini, An investigashion of the groove shape prepration effects in the high frequency induction welding of the metal pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 722-732, 2016. (in Persian فارسی)