



# Numerical and Experimental Investigation of Twisting Defect of Symmetrical Channel Section with Asymmetrical Holes Formed by Cold Roll Forming

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Yousefian H.<sup>1</sup>,  
Moslemi Naeini H.<sup>1\*</sup>,  
Dadgar Asl Y.<sup>2</sup>,  
Talebi Ghadikolaee H.<sup>3</sup>,  
Heydari MM.<sup>1</sup>,

### How to cite this article

Yousefian H, Moslemi Naeini H, Dadgar Asl Y, Talebi Ghadikolaee H, Heydari MM . Numerical and Experimental Investigation of Twisting Defect of Symmetrical Channel Section with Asymmetrical Holes Formed by Cold Roll Forming. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(08):449-454.

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

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering-Manufacturing and Production, Kashan University, Kashan, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IR Iran.

moslemi@modares.ac.ir

### Article History

Received: March 13, 2023

Accepted: June 15, 2023

ePublished: October 5, 2023

## ABSTRACT

The roll forming of an asymmetrical channel section is associated with a twisting defect, but this defect also occurs in a symmetrical section whose holes are asymmetrical. Therefore, first, a finite element model was presented to investigate the process. By designing the full factorial method, the important factors affecting the twisting defect and the effect of each during the cold roll forming process have been investigated. In the end, it was concluded that the thickness of the sheet and the diameter of the holes are the most important factors affecting the twisting defect. It was concluded that the greater the difference in the diameter of the holes on both sides of the channel, the higher the amount of twisting defect. For the forming angle of 45 degrees, by increasing the thickness of the sheet from 2 mm to 3 mm, the twist angle of the piece increased from 1.5 degrees to 2.5 degrees. According to the behavior of the metal, a series of experimental tests were designed and the effect of the hole diameter factor on this defect was determined. Appropriate matching of experimental and numerical results indicates reliable and verifiable numerical results.

**Keywords** Roll Forming, Twist, Holes Channel Section

## CITATION LINKS

1- Roll forming handbook. 2- The prediction of deformation length in cold roll-forming. 3- Cold-roll forming of small-diameter pipes with pre-notches. 4- Effect of coil set on shape defects in roll forming steel strip. 5- A strategy to reduce the twist defect in roll-formed asymmetrical-channel sections. 6- Experimental study of bowing defects in pre-notched channel section products in the cold roll forming process.

## بررسی عددی و تجربی عیب پیچش در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کانالی متقارن با سوراخ‌های نامتقارن

حسین یوسفیان<sup>۱</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۲\*</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۳</sup>، حسین طالبی قادیکلایی<sup>۴</sup>، محمدمهدی حیدری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<sup>۵</sup> گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

شکل‌دهی مقطع کانالی نامتقارن با عیب پیچش همراه است؛ اما این عیب در مقطع متقارنی که سوراخ‌های آن به صورت نامتقارن باشد نیز ایجاد می‌شود. در این مقاله، عیب پیچش در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کانالی متقارن سوراخ‌دار به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک مدل اجزای محدود جهت بررسی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کانالی متقارن با سوراخ‌های نامتقارن ارائه گردید. به وسیله طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل، عوامل موثر بر عیب پیچش و تاثیر هر کدام حین انجام فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی نشان داد که ضخامت ورق و قطر سوراخ‌ها مهم‌ترین عوامل موثر در عیب پیچش می‌باشند. هرچه تفاوت قطر سوراخ‌ها در دو طرف کانال بیشتر باشد، میزان عیب پیچش بیشتر خواهد بود. همچنین برای زاویه شکل‌دهی ۴۵ درجه، با افزایش ضخامت ورق از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر، میزان زاویه پیچش قطعه از ۱/۵ درجه به ۲/۵ درجه افزایش یافت. با توجه به رفتار فلز، یک سری آزمایش‌های تجربی طراحی و میزان تاثیر عامل قطر سوراخ‌ها بر روی این عیب مشخص گردید. نتایج مناسب نتایج تجربی و عددی بیانگر نتایج عددی قابل اعتماد و قابل بررسی است.

**کلیدواژه‌ها:** شکل‌دهی غلتکی سرد، عیب پیچش، مقطع کانالی سوراخ‌دار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

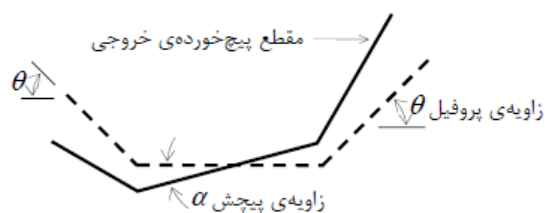
\* نویسنده مسئول: moslemi@modares.ac.ir

### ۱- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد به‌عنوان یکی از روش‌های شکل‌دهی محصولات کانالی شکل، یک روش برای ایجاد خم‌های متوالی و پیوسته در نوار فلزی است. این تغییر شکل‌ها به وسیله عبور دادن نوار از بین مجموعه غلتک‌های دوار می‌باشد. یک تفاوت مهم این فرآیند با نورد، ثابت ماندن ضخامت در آن است [1]. امروزه در صنایع مختلف از محصولات کانالی شکل سوراخ‌دار استفاده می‌شود. سوراخ‌ها گاهی نسبت به کف کانال متقارن نیستند و این نامتقارنی در سوراخ‌های ایجاد شده بر روی دو بال

کانال باعث نامتقارنی در نیروی خمشی لازم برای شکل‌دهی کانال می‌شود.

تفاوت در نیروی خمشی وارده از طرف غلتک‌ها باعث به وجود آمدن گشتاور پیچشی خالص غیر صفر در جهت طول در کانال در حال شکل‌دهی می‌شود. این گشتاور در راستای طولی کانال بوده و باعث پیچش کانال حول گشتاور پیچشی خالص در راستای طول کانال می‌شود. بنابراین یکی از عیوب مهم در هنگام تولید محصولات کانالی سوراخ‌دار نامتقارن، عیب پیچش محصول است. در واقع وقتی ورق از لحاظ هندسی تقارن نداشته باشد، هنگام فرآیند شکل‌دهی، حول محور طولی ورق دوران کرده و از محور مستقیم خود منحرف می‌شود که این حالت به وجود آمده را عیب پیچش می‌گویند. برای معرفی زاویه پیچش روش‌های مختلفی وجود دارد؛ از جمله زاویه پیچش بر حسب کف کانال بدون در نظر گرفتن طول کانال (شکل ۱). رایجترین روش، زاویه انحراف مقطع کانال از خط مستقیم است که در این روش از سه راس کف کانال یک صفحه گذشته و از راس چهارم مقطع، زاویه پیچش برحسب رادیان به دست می‌آید. در این پژوهش تبدیل رادیان به درجه انجام شده است. در ادامه پیشینه‌ای از پژوهش‌های انجام گرفته در این راستا مورد بررسی قرار گرفته است. باناچاریا و همکارانش [2] بر روی کرنش طولی در لبه به عنوان یک معیار مهم و تاثیرگذار برای تولید مقاطع کانالی شکل به صورتی کاملاً مستقیم و بدون اعوجاج تحقیقاتی انجام دادند. ایشان پس از انجام یک سری آزمایش‌های تجربی، تاثیر ایستگاه‌های اول و آخر شکل‌دهی را بیشتر اعلام کردند و روند نمایی را برای انتخاب مناسب غلتک‌ها ارائه دادند. واتاری و اونا [3] به بررسی تاثیر برخی عوامل موثر در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع سوراخ‌دار پرداختند. آنها در تحقیقات خود به بررسی عیب پیچش، چین خوردگی لبه و کمانش با توجه به موقعیت سوراخ‌ها بر روی ورق در حال شکل‌دهی در مقاطع وی شکل پرداختند. آنها با توجه به برخی عیوب به وجود آمده در هنگام تولید این محصولات در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد به بررسی طراحی غلتک‌هایی که میزان عیوب را کاهش دهد، پرداختند. متیاس و همکاران [4] به بررسی عددی و تجربی فرآیند شکل‌دهی غلتکی پروفیلی نامتقارن پرداخته و اثر نوع ورودی ورق از کوپل (رو به بالا یا رو به پایین) را بر میزان پیچش بررسی کردند.

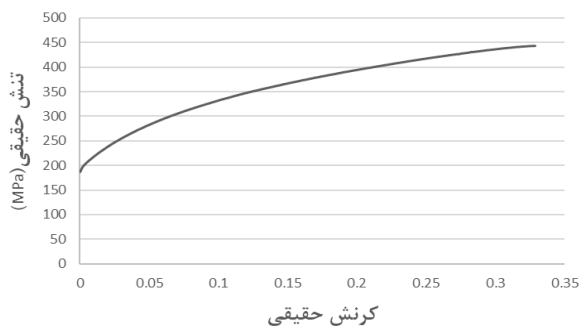


شکل ۱) مقطع بیخ‌خورده کانال

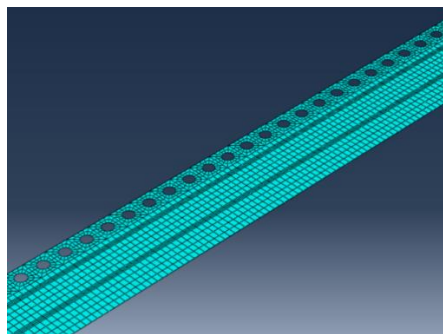
ابتدا با استفاده از استاندارد ASTM-E8 خواص مکانیکی ورق از نتایج آزمون کشش تک محوره استخراج و خواص آورده شده در نمودار شکل ۲ برای مدل‌سازی ورق استفاده شد. مدول یانگ ۲۰۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شد. ورق به صورت همسان‌گرد و تغییرشکل‌ها بصورت کشسان-مومسان در نظر گرفته شد؛ قانون کارسختی همسان‌گرد نیز مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل شبیه‌سازی یک فرایند شکل‌دهی ورق، ورق از نوع "المان پوسته‌ای" تعریف شد. با توجه به پایین بودن نسبت ضخامت به دیگر ابعاد ورق، المان S4R که از نوع پوسته نازک چهار گرهی است، برای ورق انتخاب گردید. جهت شبکه بندی اطراف سوراخ‌ها نیز از همین مدل المان انتخاب گردید. در شکل ۳ نمایی از ورق شبکه‌بندی شده مشاهده می‌شود.

غلتک‌های شکل‌دهی طراحی و به‌صورت جسم صلب تحلیلی وارد محیط شبیه‌سازی شد. از دلایل انتخاب جسم صلب تحلیلی، کارکرد محاسباتی بالای آن، به دلیل عدم نیاز به شبکه بندی می‌باشد. این حالت برای اجسامی که معمولا تغییرشکل بسیار ناچیزی در حین فرایند داشته و هندسه پیچیده‌ای ندارند اتخاذ می‌شود.

برای جلوگیری از ایجاد عیوب دیگر در محصول از ایستگاه نگه دارنده که شامل یک جفت غلتک مسطح می‌باشد استفاده شد. در این شبیه‌سازی‌ها فاصله ایستگاه‌ها برابر با ۴۰۰ میلی‌متر و طول ورق ۲/۵ برابر فاصله ایستگاه‌های شکل‌دهی در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی‌ها، ورق از نوع شکل پذیر و ضریب اصطکاک ۰/۲ انتخاب شد.



شکل ۲) نمودار تنش-کرنش حقیقی ورق شکل‌دهی شده.



شکل ۳) نمایی از ورق شبکه‌بندی شده در نرم افزار اباکوس

نوع ورودی روبه پایین پیچش کمتری را در پروفیل نتیجه داده است. دلیل این تفاوت، اختلاف در سطح تنش و کرنش اعمالی در طی باز شدن کوپل تشریح شد. با اندازه‌گیری خواص ورق قبل از ورود به فرایند شکل‌دهی و بعد از باز شدن از کوپل، مشخص شد که سطح تنش و کرنش اعمالی بر روی ورق متفاوت است. تاجیک و همکاران [5] توانستند با استفاده از غلتک‌های نامتقارن، عیب پیچش مقطع کانالی نامتقارن را کاهش دهند. میزان خطا برای پیش‌بینی عیب پیچش ۱۵ درصد بود. در این بررسی آنها زاویه چرخش غلتک‌ها را بر اساس رسیدن همزمان بال بلند و کوتاه تعیین کردند تا بتوانند با یکنواختی در کرنش طولی لبه عیب پیچش را کاهش دهند. شیرانی و همکاران [6] به بررسی تجربی و عددی فرایند شکل‌دهی غلتکی پروفیل کانالی سوراخ‌دار پرداختند. آنها نتیجه گرفتند الگوی گل (زاویه خمش و تعداد ایستگاه) مهمترین عوامل موثر روی ابعاد سوراخ و کمانش طولی هستند. به طوری که با کاهش زاویه خمش، کمانش طولی و اعوجاج سوراخ‌ها کاهش می‌یابد.

با توجه به کاربرد روزافزون محصولات سوراخ‌دار تولیدی به کمک فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در بسیاری از صنایع دیگر و نیز عدم رفع برخی عیوب موجود در این محصولات، نیاز به انجام تحقیقات علمی و کاربردی در این زمینه احساس شد. عیب پیچش فقط در مقاطع کانالی بدون سوراخ بررسی و در تحقیق‌های انجام شده، علت زمان رسیدن متفاوت ورق به غلتک در دو بال با اندازه متفاوت مشخص و کمانش طولی و اعوجاج سوراخ در پروفیل سوراخ‌دار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اما پژوهشی در راستای پیچش مقاطع متقارن با سوراخ‌های نامتقارن انجام نشده است. بنابراین در این مقاله با انتخاب ورق با استحکام معمولی با سه ضخامت مختلف، سه حالت متفاوت از لحاظ قطر سوراخ‌ها فقط در یک بال و سه زاویه شکل‌دهی به روش شکل‌دهی غلتکی سرد، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت و مقدار زاویه پیچش از نتایج خروجی استخراج گردید. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی به دست آمده از محصول دارای سوراخ‌های با قطرهای مختلف، ضخامت ورق و زاویه شکل‌دهی ثابت، طی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در خط تولید شرکت پایا صحت سنجی شد.

## ۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

در مطالعه حاضر، روش اجزای محدود برای اندازه‌گیری زاویه پیچش در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد استفاده شده است. جهت تحلیل از نرم‌افزار اباکوس استفاده شد.

ورق در یک ایستگاه شکل‌دهی برای تبدیل به مقطع کانالی مورد بررسی شکل‌دهی شد که در آن ایستگاه یک جفت غلتک (بالایی و پایینی) وجود دارد. جنس ورق از فولاد St12 انتخاب شد. در

طراحی آزمایش با توجه به شرایط موجود و با روش فاکتوریل کامل انجام شد. شرایط مختلف شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) شرایط مختلف آزمایش

ضخامت (mm)	قطر سوراخ (mm)	زاویه شکل دهی
۱	۱۵	۱۵
۲	۲۰	۳۰
۳	۲۵	۴۵

فاصله مراکز سوراخها ۳۵ میلی‌متر، فاصله تا لبه ورق ۱۹ میلی‌متر، عرض ورق ۸۰ میلی‌متر و طول بال ها ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر است.

تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت.

عامل حرکت ورق به سمت جلو در فرایند شکل دهی غلتکی سرد، نیروی اصطکاک بین ورق و غلتکهای شکلی دهی می‌باشد. غلتک‌ها با سرعتی ثابت حرکت کرده و ورق را شکل می‌دهند. ورق در سراسر فرایند شکل دهی در راستای طولی در کشش است. برای ایجاد کشش در ورق سرعت دورانی در هر ایستگاه به اندازه ۰/۵ درصد افزایش داده شد.

### ۳- آزمایش‌های تجربی

برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، فرایند شبیه‌سازی شده به صورت تجربی نیز انجام گرفت. به منظور انجام عملیات شکل‌دهی غلتکی سرد، از ورق St12 استفاده شد.

در ادامه با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی خط تولید لوله و پروفیل شرکت پایا اصفهان که در شکل ۵ نشان داده شده است، ورق با غلتک‌های ۳۰ درجه شکل‌داده شد. سپس در ادامه میزان پیچش اندازه‌گیری شد. ورق با غلتک‌های ۳۰ درجه شکل‌داده شد. سپس در ادامه میزان پیچش اندازه‌گیری شد.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در ابتدا ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر با هر سه حالت قطرهای مختلف سوراخ‌زنی به کمک لیزر انجام شد.



شکل ۴) سوراخ زدن و برش ورق با دستگاه لیزر



شکل ۵) انجام عملیات شکل دهی بر روی ورق

نیروی برش با استفاده از سیستم جمع‌آوری داده‌های کامپیوتری در زمان واقعی و با کمک دینامومتر (KISTLER) اندازه‌گیری شد. در طول عملیات ماشین‌کاری، نیرو در سنسورهای پیزوالکتریک اندازه‌گیری می‌شود. از نرم‌افزار (KISTLER DynoWare) برای جمع‌آوری داده‌ها به صورت نمودار استفاده شد.

### ۳-۱- اندازه‌گیری پیچش

پس از مرحله تولید نمونه‌های مقطع کانالی، اندازه‌گیری و ثبت مقادیر عیوب انجام شد. در این پژوهش از روش موسوم به انحراف راس چهارم استفاده شده است. در تمامی نتایج پیچش به سمت بال سوراخ‌دار بود.

در حالت عادی وقتی کانال متقارن است و هیچ‌گونه پیچش محسوسی در کانال مشاهده نمی‌شود، هر چهار راس کف کانال از یک صفحه عبور خواهند کرد. اما در صورتی که عیب پیچش در محصول به وجود آید اگر از سه راس کف کانال صفحه‌ای عبور داده شود، راس چهارم روی صفحه مربوطه قرار نگیرد و کمی انحراف پیدا می‌کند. اگر این مقدار انحراف بر طول کف کانال تقسیم شود، مقدار زاویه پیچش بر اساس رادیان به دست می‌آید که معیار مناسبی برای اندازه‌گیری این عیب می‌باشد. تمامی اندازه‌ها در نتایج عددی و تجربی در فاصله‌ای مناسب از ایستگاه، بعد از آزاد شدن کرنش‌ها و تنش‌های کشسان یعنی در ۷۰ میلی‌متری از ایستگاه اندازه‌گیری شده است.

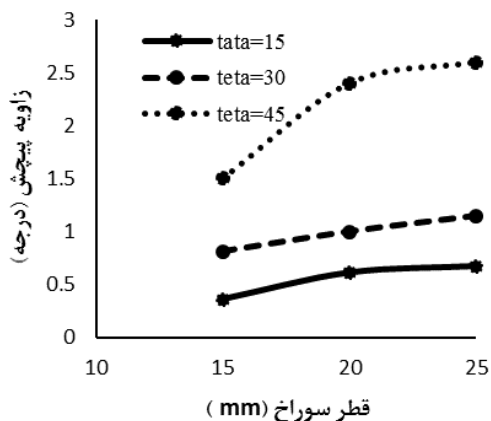
### ۴- بحث و نتایج

#### ۴-۱- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

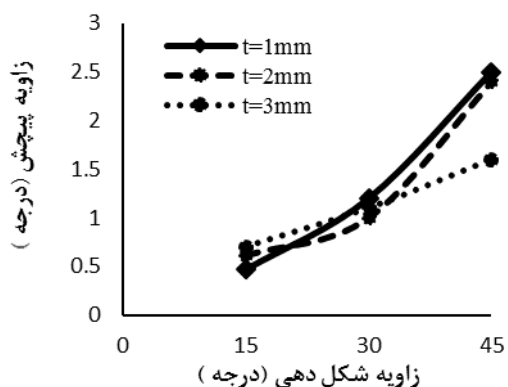
همان‌طور که در شکل ۶ برای ورق شکل‌دهی شده با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان داده شده است، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حداکثر ۹ درصد می‌باشد. لذا تطابق قابل قبولی بین این نتایج وجود دارد که نشان از تایید نتایج شبیه‌سازی شده اجرای محدود است.

#### ۴-۲- بررسی تاثیر ضخامت ورق بر پیچش کانال

همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است در حالت کلی با افزایش ضخامت ورق در صورت ثابت ماندن پارامترهای زاویه



شکل ۸) بررسی اثر قطر سوراخ بر زاویه پیچش با ضخامت ورق ۲ میلی متر



شکل ۹) بررسی اثر زاویه شکل دهی بر زاویه پیچش با قطر سوراخ ۲۰ میلی متر

با توجه به اینکه فرآیند شکل‌دهی طراحی شده در این پژوهش تک ایستگاهی بوده و تمام عملیات شکل‌دهی در یک ایستگاه انجام می‌شود، بنابراین زاویه مربوط به غلتک‌های آن ایستگاه زاویه شکل‌دهی می‌باشد. با افزایش زاویه شکل‌دهی میزان شکل دهی در ایستگاه افزایش یافته و باعث می‌شود که ورق با یکنواختی کمتری از ایستگاه خارج شده، تفاوت مقاومت بال‌های کانال در برابر نیروی شکل‌دهی افزایش یافته و در نتیجه این عامل، پیچش افزایش می‌یابد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله عوامل موثر بر عیب پیچش در مقطع کانالی متقارن با سوراخ‌های نامتقارن مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا عیب پیچش شناسایی شده و عوامل موثر بر آن مشخص شدند. طراحی آزمایش انجام گرفت و یک مدل شبیه‌سازی به روش اجزای محدود در نرم افزار آباکوس ایجاد و تاثیر عوامل موثر شامل ضخامت ورق، هندسه محصول و زاویه شکل‌دهی بر روی عیب پیچش مورد بررسی قرار گرفت. سپس آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی شرکت پایا اصفهان انجام

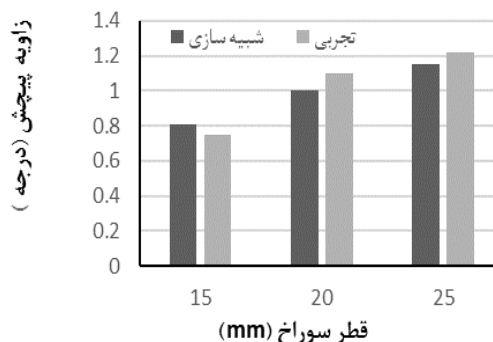
شکل‌دهی و قطر سوراخ، عیب پیچش افزایش می‌یابد. همانطور که گفته شد، در واقع این عیب به علت تفاوت نیروی خمشی مقطع در دو طرف کانال به وجود می‌آید. با توجه به اینکه در ضخامت‌های بالاتر نیروی بیشتری برای شکل‌دهی نیاز است، بنابراین اختلاف نیروهای لازم برای شکل‌دهی ورق افزایش یافته و در نتیجه افزایش گشتاور پیچشی خالص در راستای طول، زاویه پیچش متاثر از این گشتاور افزایش می‌یابد.

### ۴-۳- بررسی تاثیر قطر سوراخ بر عیب پیچش

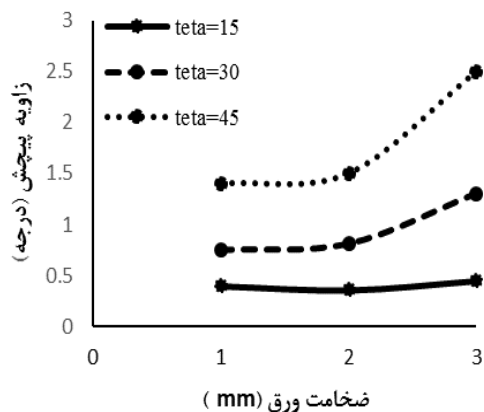
همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است با افزایش قطر سوراخ‌ها در صورت ثابت ماندن زاویه شکل‌دهی و ضخامت ورق، میزان عیب پیچش افزایش می‌یابد. علت این امر این است که با افزایش قطر سوراخ‌ها میزان ماده تحت شکل‌دهی در دو طرف کانال یا به عبارت دیگر عدم تقارنی که عامل اصلی پیچش است، افزایش یافته و در نتیجه میزان پیچش محصول هنگام خروج از ایستگاه پایانی فرآیند افزایش می‌یابد.

### ۴-۴- بررسی تاثیر زاویه شکل دهی بر عیب پیچش

با افزایش زاویه شکل‌دهی در صورت ثابت ماندن پارامترهای ضخامت ورق و قطر سوراخ، میزان عیب پیچش افزایش می‌یابد. این بیان در نتایج نشان داده در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۶) مقایسه نتایج زاویه پیچش مربوط به آزمایش تجربی و شبیه سازی



شکل ۷) بررسی اثر ضخامت ورق بر زاویه پیچش با قطر سوراخ ۱۵ میلی‌متر

شد و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی صورت پذیرفت. مهمترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- مهمترین عامل موثر بر عیب پیچش مقاطع کانالی شکل سوراخ‌دار، ضخامت ورق است. برای زاویه شکل‌دهی ۴۵ درجه، با افزایش ضخامت ورق از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر، میزان زاویه پیچش قطعه از ۱/۵ درجه به ۲/۵ درجه افزایش یافت.
- ۲- با افزایش قطر سوراخ‌ها در دو طرف مقطع کانال، با توجه به این که نامتقارنی و اختلاف گشتاورهای پیچشی مقطع در دو طرف کانال افزایش می‌یابد، میزان پیچش افزایش خواهد یافت.
- ۳- با افزایش زاویه شکل‌دهی در صورت ثابت ماندن پارامترهای ضخامت ورق و قطر سوراخ، میزان پیچش افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه شکل‌دهی، میزان شکل‌دهی در ایستگاه افزایش یافته و باعث می‌شود که ورق با یکنواختی کمتری از ایستگاه خارج شده، تفاوت مقاومت بال‌های کانال در برابر نیروی شکل‌دهی افزایش یافته و در نتیجه این عامل، پیچش افزایش می‌یابد.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.  
**تعارض منافع:** این مقاله تعارض منافی ندارد.

#### منابع

- 1- Halmos GT, editor. Roll forming handbook. Crc Press; 2005.
- 2- Bhattacharyya D, Smith PD, Yee CH, Collins IF. The prediction of deformation length in cold roll-forming. *journal of mechanical working technology*. 1984.
- 3- Watari H, Ona H. Cold-roll forming of small-diameter pipes with pre-notches. *Journal of Materials processing technology*. 2001.
- 4- Weiss M, Abeyrathna B, Rolfe B, Abee A, Wolfkamp H. Effect of coil set on shape defects in roll forming steel strip. *Journal of manufacturing processes*. 2017.
- 5- Tajik Y, Naeini HM, Tafti RA, Bidabadi BS. A strategy to reduce the twist defect in roll-formed asymmetrical-channel sections. *Thin-Walled Structures*. 2018.
- 6- Shirani Bidabadi B, Moslemi Naeini H, Azizi Tafti R, Barghikar H. Experimental study of bowing defects in pre-notched channel section products in the cold roll forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016.