



## A Study on Spring-Back of Pre-Punched Profiles in Cold Roll Forming Process

Saeid Hajiahmadi<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>2\*</sup>, Hossein Talebi-Ghadikolae<sup>3</sup>, Rasoul Safdarian<sup>4</sup>, Ali Zeinolabedin Beygi<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

<sup>5</sup>MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 11.27.2022

**Revised:** 03.16.2023

**Accepted:** 04.10.2023

**Keyword:**

Cold roll forming

Spring-back

Pre-punched sheet

Finite element simulation

**\*Corresponding Author:**

Hassan Moslemi Naeini

**Email:** [Ali.Zeinolabedin-Beygi](mailto:Ali.Zeinolabedin-Beygi)

### ABSTRACT

The cold roll forming is one of the common processes to form metal profiles in the industry. Due to the nature of the bending deformation in cold roll forming process, spring-back is one of the main resulting defects. In order to compensate the spring-back, the amount of spring-back must be correctly predicted. In this article, the effect of the hole and its position on the spring-back was investigated by experimental and numerical methods. Three channel section profiles made of St12 and thickness of 1 mm, without hole, with circular holes on the bend area and holes on the flange were used. Cold roll forming was carried out in three stations with a fixed bending radius pattern and 15 degrees bending in each forming station and numerical solution using Abaqus finite element software. The results indicated that there is a relationship between the amount of spring-back and the position of the hole in such a way that the amount of spring-back in hole on the bend area profile was 9% more than the hole-less profile and in hole on the flange profile was 16% less than hole-less profile. Additionally, according to finite elements results, it was observed that the amount of equivalent strain in the bend area of the profile with holes on the bend area was 20% less and in the profile with holes near the bend area was 16% more than the profile without holes, which can justify the difference observed in the amount of spring-back.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Cold roll forming is one of the forming methods in the industry, which has many advantages, including cost and suitable production speed, compared to other forming methods for producing profiles from metal sheets. In order to produce profile parts with proper accuracy and quality from the point of view of dimensional accuracy and physical health of the production profile, the common defects that occur in this forming method should be controlled as much as possible. One of the defects that must be considered in all the different processes of sheet production and shaping and its influence on the accuracy of the final profile cannot be ignored, is spring-back.

According to the research background, no study has been carried out regarding the prediction of spring-back for pre-punched profiles produced by cold roll forming method. It was essential to conduct research on the effect of the existence of a gap and its location on the amount of spring-back in the pre-punched profiles to fill this research gap and complete the work thus far carried out in this field. In the present research, the effect of hole and its position on the spring-back of the profiles produced by the cold roll forming method was investigated experimentally using finite element software

### Methodology

ST12 sheet with a thickness of 1 mm was used for the roll forming process. In order to investigate the effect of hole on the amount of spring-back in the cold roll forming process, a flower pattern shown (Figure 1) with a channel-shaped section with three forming stations was experimentally considered.

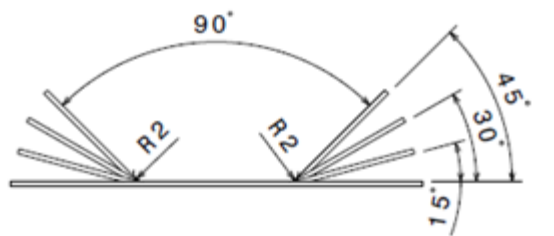


Figure 1. Flower pattern of experimental tests

In order to investigate the effect of the presence of the hole and its position relative to the edge of the profile, three samples were used. The first sample was hole-less, the second sample had circular holes in the center of the profile bend area, and the third sample had circular holes on the profile flange near the bend area. The three studied samples are shown in Figure 2. In the rest of the article, the first sample is denoted as without holes, the second sample on the bend and the third sample near the bend.

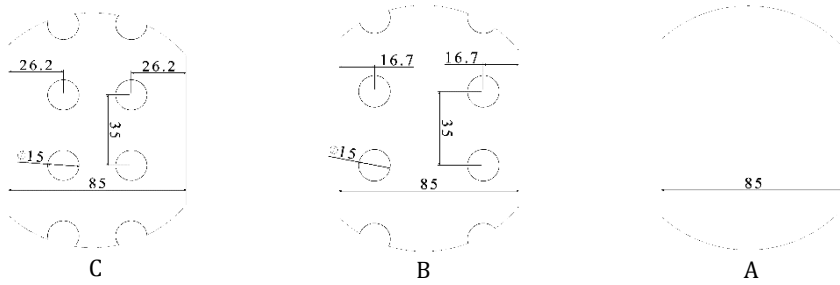


Figure 2. Samples of cold roll forming tests a) without holes b) near the bend c) on the bend

### Results and discussion

The experimental spring-back amount was obtained by obtaining the difference of the average angle from three sections for each station with the ideal angle value. Figure 3 shows the amount of spring-back for three hole positions in three forming stations. By looking at the diagram, three points can be recognized: 1) the amount of spring-back in the third forming station for all three models was lower than the previous two stations; 2) the amount of spring-back was based on the position of the hole on the bend model, without holes and near the bend model; and 3) on average, the amount of spring-back in on the bend was 9% greater and near the bend 16% lesser than the without holes.

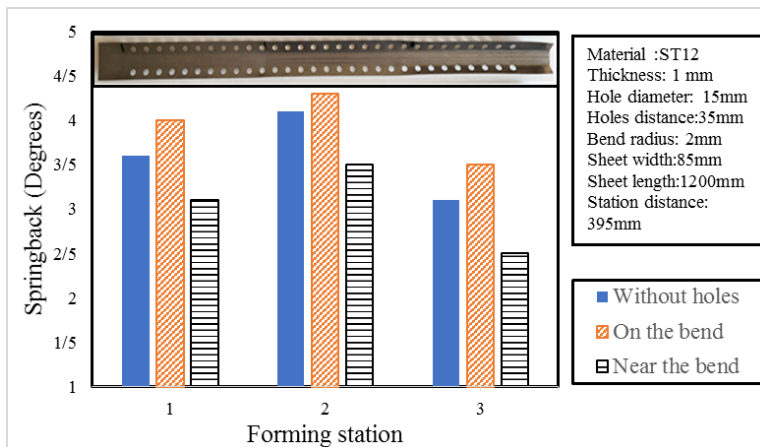


Figure 3. Experimental spring-back results in three stations

In order to study the difference in the amount of spring-back in the three hole positions, the equivalent plastic strain values of the elements in the bend area along the formed profiles were drawn according to Figure 4. The higher values of the plastic strain in the case of near the bend, which was approximately 16% greater than the without holes, indicated the decrease in the elastic area and the increase in the plastic area in the bend area of this profile. As a result, the less elastic area in the near the bend profile can be expected to have

a lower spring-back than the other two profiles. In addition, the amount of equivalent plastic strain in the bend area of the on the bend profile was approximately 20% lower than the without holes profile, which was the reason of the higher spring-back in this profile compared to the profile without holes as explained in the previous paragraph.

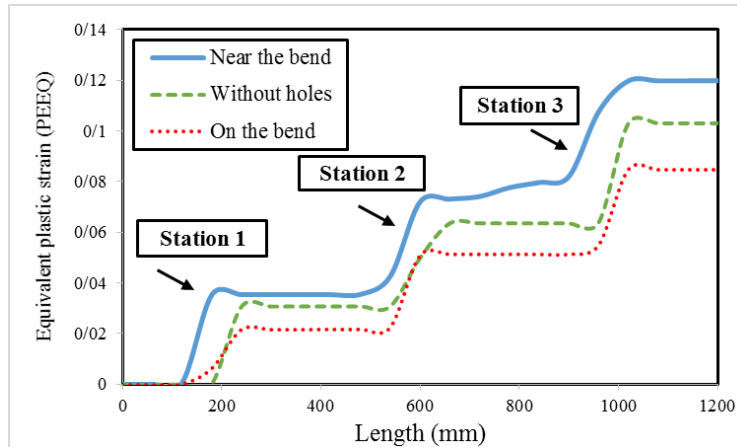


Figure 4. Experimental spring-back results in three stations

## Conclusion

In the current research, the effect of the presence of hole and its position in the profiles produced by cold roll forming process on the amount of spring-back was investigated numerically and experimentally. The results of the simulation performed using the Abaqus finite element method were validated using the experimental results. The results showed that there is a correlation between the amount of spring-back and the position of hole in such a way that the amount of spring-back in the profile with a hole in the bend area was 9% greater than the hole-less profile and in the profile with a hole near the bend area was 16% lesser than hole-less profile was obtained. The obtained results showed that the presence of hole, according to its position from the edge of the profile, can decrease or increase the amount of spring-back in the profile formed by the cold roll forming method. Based on the numerical data, the amount of equivalent plastic strain in the bend area of the on the bend area model was 20% less and in the near the bend area model was 16% more than the without holes model. This will cause a decrease in the elastic area along the thickness of the profile and as a result, a decrease in the amount of spring-back for the on the bend model compared to the hole-less profile.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



## مطالعه بر گشت فنی پروفیل‌های سوراخ دار در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

سعید حاجی احمدی<sup>۱</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۲\*</sup>، حسین طالبی قادیکلایی<sup>۳</sup>، رسول صفدریان<sup>۴</sup>، علی زین العابدین بیگی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.
- ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

### چکیده

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد یکی از فرایندهای متداول شکل‌دهی پروفیل‌های فلزی در صنعت است. به دلیل ماهیت تغییر شکل خمشی که در ورق بر اثر فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد رخ می‌دهد، یکی از مهم‌ترین عیوب غیرقابل اجتناب در محصول عیب برگشت فنی است. در این مقاله به تأثیر وجود سوراخ و موقعیت آن بر روی میزان برگشت فنی ایجاد شده به روش تجربی و عددی پرداخته شده است. جهت بررسی اثر موقعیت سوراخ از سه پروفیل با مقطع کانالی از جنس St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر به صورت بدون سوراخ، دارای سوراخ دایره‌ای در مرکز ناحیه خم و دارای سوراخ بر روی بال پروفیل در نزدیکی ناحیه خم استفاده شد. شکل‌دهی غلتکی سرد در سه ایستگاه با الگوی شعاع خم ثابت با خم‌کاری ۱۵ درجه در هر ایستگاه شکل‌دهی و حل عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. نتایج حاکی از آن است که میان میزان برگشت فنی و موقعیت سوراخ ارتباطی وجود دارد به این صورت که میزان برگشت فنی در پروفیل دارای سوراخ روی ناحیه خم ۹ درصد بیشتر از پروفیل بدون سوراخ و در پروفیل دارای سوراخ در نزدیکی ناحیه خم ۱۶ درصد کمتر از پروفیل بدون سوراخ است. همچنین طبق نتایج اجزاء محدود مشاهده شد که میزان کرنش مومسان معادل وارده به ناحیه خم پروفیل دارای سوراخ روی ناحیه خم ۲۰ درصد کمتر و در پروفیل دارای سوراخ در نزدیک ناحیه خم ۱۶ درصد بیشتر از پروفیل بدون سوراخ است که می‌تواند علت اختلاف مشاهده شده در برگشت فنی را توجیه کند.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

### کلید واژگان:

شکل‌دهی غلتکی سرد

برگشت فنی

ورق سوراخ‌دار

شبیه‌سازی اجزاء محدود

\*نویسنده مسئول: حسن مسلمی

نائینی

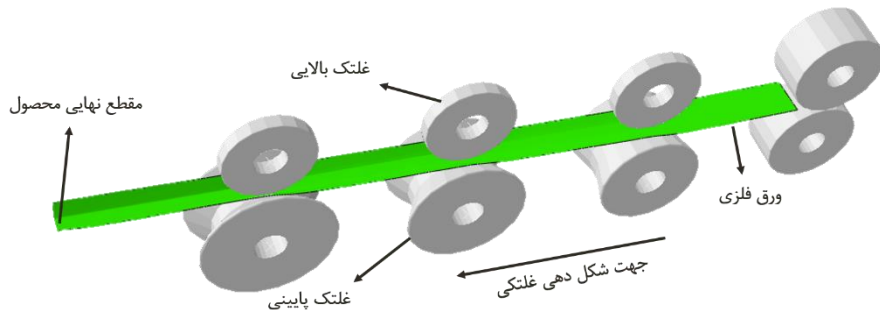
پست الکترونیکی:

Ali Zeinolabedin-Beygi



## مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی فلزات از جمله شکل‌دهی لاستیکی<sup>۱</sup> [۱]، شکل‌دهی به کمک فشار سیال<sup>۲</sup> [۲]، مهرزنی<sup>۳</sup> [۳]، شکل‌دهی نموی [۴] و خم‌کاری کششی [۵] از فرایندهای رایج برای تولید قطعات فلزی است. در کنار فرایندهای مذکور فرایند شکل‌دهی غلتکی یکی از فرایندهای متداول جهت تولید پیوسته پروفیل‌های فلزی است. فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد از تعدادی ایستگاه شکل‌دهی تشکیل شده است که هر ایستگاه شامل حداقل دو غلتک است که با عبور ورق فلزی از فاصلهٔ میان دو غلتک با خم‌کاری ورق میان دو غلتک در حال دوران ورق عبوری شکل پروفیل غلتک دوار را به خود می‌گیرد. در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در هر ایستگاه با تغییر شکل ملایم و آرام سطح مقطع با تغییر شکل تدریجی سطح مقطع قطعه به شکل نهایی موردنظر پروفیل مطلوب نزدیک خواهد شد. تعداد ایستگاه‌ها و غلتک‌های موردنیاز برای تولید به پیچیدگی هندسی قطعه و همچنین خواص مکانیکی ورق بستگی دارد [۶].



شکل ۱. نمایشی از فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

شکل‌دهی غلتکی سرد یکی از روش‌های شکل‌دهی در صنعت است که دارای مزایای بسیاری از جمله هزینه و سرعت تولید مناسب نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی برای تولید پروفیل از ورق‌های فلزی است. این روش به‌عنوان یکی از اولویت‌های اول در انتخاب روش شکل‌دهی برای تولید پروفیل است و بسیار مورد استفاده تولیدکنندگان پروفیل قرار می‌گیرد. برای تولید قطعات پروفیل با دقت و کیفیت مناسب از منظر دقت ابعادی و سلامت فیزیکی پروفیل تولیدی، بایستی عیوب متداولی که در این روش شکل‌دهی در قطعات به وجود می‌آید تا حد امکان کنترل شود. از جمله عیوب متداول در این فرایند می‌توان به اعوجاج لبهٔ پروفیل<sup>۴</sup> [۷]، کماتی شدن<sup>۵</sup> [۸]، برگشت فنری، پیچش مقطع پروفیل<sup>۶</sup> [۹]، تابیدگی انتهایی<sup>۷</sup> [۱۰] و پارگی [۱۱؛ ۱۲] اشاره کرد.

یکی از عیوبی که در تمام فرایندهای مختلف تولید و شکل‌دهی ورق بایستی در نظر گرفته شود و تأثیر آن بر دقت پروفیل نهایی غیرقابل‌اغماض است برگشت فنری است. باید توجه داشت که امروزه استفاده از روش‌های قدیمی همچون سعی و خطا در جهت تخمین و اصلاح برگشت فنری با توجه به زمان و هزینه زیادی که در نتیجه آن از دست می‌رود از منظر اقتصادی غیرقابل‌توجیه است.

<sup>1</sup> Rubber Pad Forming

<sup>2</sup> Hydroforming

<sup>3</sup> Stamping

<sup>4</sup> Edge Wave

<sup>5</sup> Warping (Bow)

<sup>6</sup> Twisting

<sup>7</sup> End flare

برای کنترل برگشت فنری لازم است که ابتدا میزان برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی با دقت مناسبی پیش‌بینی شود و سپس با استفاده از اصلاح پارامترهای کنترلی فرایند که در شکل‌دهی غلتکی سرد شامل تعداد ایستگاه شکل‌دهی، الگوی گل، ابعاد و هندسه غلتک‌ها در هر مرحله، شرایط اصطکاکی و همچنین فاصله میان دو غلتک و میان ایستگاه‌های فرایند است. با توجه به میزان تأثیر هر کدام از متغیرها بر برگشت فنری بایستی تغییرات مناسب در جهت کاهش میزان برگشت فنری به میزان قابل قبول صورت گیرد.

با گسترش نرم‌افزارهای شبیه‌سازی اجزاء محدود با امکانات تعریف هندسه‌های پیچیده و مدل‌های رفتاری ماده مختلف بهترین و دقیق‌ترین راه برای محاسبه برگشت فنری استفاده از همین نرم‌افزارها است. همچنین با ورود ورق‌های فلزی با جنس‌های متفاوت و هندسه‌های مختلف و در نتیجه رفتار متفاوت ورق‌ها در حین شکل‌دهی روش‌های قدیمی بر پایه روابط و فرمول‌های تخمینی در جهت پیش‌بینی برگشت فنری که بسته به خواص مکانیکی و متغیرهای هندسی همچون ضخامت و یا شعاع و زاویه خم ورق است دیگر نتایج قابل قبولی برای تخمین برگشت فنری به دست نمی‌دهد [۱۳].

پدیده برگشت فنری به دلیل تغییرات ابعادی به وجود آورده در هندسه قطعه نهایی و کاهش دقت ابعادی آن یکی از عیوب مهم در فرایندهای شکل‌دهی فلزات است که جهت جبران آن بایستی میزان برگشت فنری و متغیرهای تأثیرگذار بر آن به‌درستی بررسی شود. در راستای پیش‌بینی برگشت فنری و جبران آن در فرایندهای شکل‌دهی مطالعاتی انجام شده است که در ادامه برخی از آنها آمده است.

ابوبای و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود پروفیل وی شکل تولیدشده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد اهمیت استفاده از مدول کشسان متغیر با میزان کرنش مومسان را بر میزان برگشت فنری پیش‌بینی‌شده نشان دادند. طبق نتایج گزارش‌شده از مدل اجزاء محدود فولاد TRIP۷۰۰ در نظر گرفتن تغییرات مدول کشسان باعث افزایش ۶۰ درصدی میزان برگشت فنری پیش‌بینی‌شده نسبت به حالت مدول کشسان ثابت شد.

سو و همکاران [۱۵] به ارائه روشی جهت طراحی الگوی گل فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد بر اساس شرایط مرزی پنج‌گانه پرداختند. روش جدید ارائه‌شده کاهش میزان برگشت فنری ایجادشده در قطعه کلاهی شکل از جنس Q۲۳۵ به میزان ۴۰ درصد نسبت به روش شعاع خم ثابت را نشان داد. همچنین با مقایسه تأثیر تغییرات برگشت فنری با ضخامت نتیجه گرفتند که رابطه معکوس تقریباً خطی میان ضخامت ورق و میزان برگشت فنری وجود دارد.

گروچه و همکاران [۱۶] با نشان دادن عدم کارایی روابط و فرمول‌های تئوری موجود برای پیش‌بینی برگشت فنری در شکل‌دهی غلتکی سرد یک روش جایگزین برای جبران برگشت فنری ارائه دادند. آنها از یک سیستم مداربسته کنترلی جهت تشخیص میزان برگشت فنری شامل لیزر و دوربین‌های دیجیتال نصب‌شده بر روی خط تولید استفاده کردند. سپس با استفاده از غلتک‌های انتهایی خط تولید که قابلیت گرفتن فرمان را به‌صورت خودکار از سیستم کنترلی دارد، برگشت فنری را اصلاح کردند.

جیانو و همکاران [۱۷] یک روش برای طراحی الگوی گل برای یک قطعه با پروفیل کلاهی از جنس فولاد استحکام بالا برای تولید با روش شکل‌دهی غلتکی سرد ارائه دادند. سپس با مقایسه نتایج روش ارائه‌شده و مقایسه با دو روش متداول طراحی الگوی گل میزان پایین‌تر برگشت فنری و اعوجاج لبه را گزارش دادند. همچنین با توجه به نیاز صنعت به محدوده اختلاف کمتر از ۰/۵ درجه نسبت به مقادیر خواسته‌شده رسیدند.

بدر و همکاران [۱۸] با مدل‌سازی برگشت فنری پروفیل وی شکل با روش خم‌کاری و شکل‌دهی غلتکی سرد و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از هر دو روش نتیجه گرفتند که به دلیل ماهیت مرحله‌ای بودن فرایند شکل‌دهی در شکل‌دهی غلتکی سرد میزان برگشت فنری نسبت به خم‌کاری کمتر است.

لیو و همکاران [۱۹] تأثیر معیار تسلیم مورد استفاده در پیش‌بینی برگشت فنری قطعه کلاهی شکل از جنس فولاد فوق استحکام بالا در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد با مدل‌سازی اجزاء محدود را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از معیار تسلیم  $Yld2000$  نسبت به معیار تسلیم فون میسز همراه با مدل سخت‌شوندگی یوشیدا دقت برگشت فنری پیش‌بینی شده را به میزان ۲۵ درصد افزایش خواهد داد.

نوفل و همکاران [۲۰] تأثیر تغییرات مدول کشسان و همچنین مدل سخت‌شوندگی را برای پیش‌بینی برگشت فنری فولاد  $St37$  با مدل‌سازی اجزاء محدود بررسی کردند. طبق نتایج ارائه شده استفاده از مدل سختی یوشیدا نسبت به مدل همسانگرد و همچنین استفاده از مدول کشسان متغیر نسبت به مدول کشسان ثابت نتایج دقیق‌تری برای پیش‌بینی برگشت فنری ارائه داد.

شیرانی بیدآبادی و همکاران [۲۱] به بررسی عیب کمائی شدن در پروفیل‌های دارای سوراخ بر روی ناحیه دیواره پروفیل پرداختند. با بررسی متغیرهای هندسی پروفیل سوراخ دار از جمله فاصله میان سوراخ‌ها، فاصله سوراخ‌ها از لبه پروفیل، قطر سوراخ‌ها و ضخامت ورق و همچنین متغیرهای فرایند از جمله الگوی گل، فاصله میان ایستگاه‌ها و شرایط روغن کاری اثر آنها را بر روی میزان کمائی شدن پروفیل بررسی کردند. بر اساس نتایج، الگوی گل و فاصله میان سوراخ‌ها بیشترین تأثیر را بر روی کمائی شدن دارد به نحوی که افزایش ایستگاه‌های شکل‌دهی از دو به شش ایستگاه موجب کاهش ۵ برابری میزان کمائی شدن خواهد شد.

فارسی و همکاران [۲۲] میزان برگشت فنری ورق دارای سوراخ بیضی شکل در ناحیه خم، خم کاری شده با روش خم کاری پرس برک<sup>۱</sup> را با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی پرداختند. طبق نتایج فولاد کم کربن یک منطقه بیشینه برگشت فنری را که درصد حفره حدود ۴۰ درصد است را نشان داد و درصدهای کمتر و بیشتر از آن مقدار برگشت فنری کمتری دارد. مقدار پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با زیاد شدن مقدار درصد حفره، اختلاف نتایج بالاتری را با نتایج تجربی نشان می‌دهد که برای فولاد استحکام بالا این خطا بیشتر و در خلاف روند نتایج تجربی است.

نصراللهی و همکاران [۲۳] با استفاده از مدل استفاده شده توسط فارسی با تغییر دادن شکل هندسی حفره تأثیر شکل حفره را با در نظر گرفتن سه حالت دایره، بیضی و مستطیلی برای فولاد  $St12$  و  $HSLA360$  به صورت تجربی بررسی کردند. طبق یافته‌های مقاله بر اساس نتایج تجربی سوراخ داروی بیشترین و مستطیلی کمترین برگشت فنری را دارد. همچنین با افزایش تعداد حفره‌ها با ثابت نگاه داشتن مساحت آنها با انجام شبیه‌سازی اجزاء محدود نتیجه گرفتند در مقادیر پایین مساحت حفره افزایش، تعداد سوراخ تأثیری بر روی برگشت فنری ندارد.

طبق پیشینه پژوهش صورت گرفته تاکنون در خصوص پیش‌بینی برگشت فنری برای پروفیل‌های سوراخ‌دار تولید شده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد مطالعه‌ای صورت نگرفته است. همچنین از آنجا که این پدیده می‌تواند بر روی کیفیت قطعه تولید شده از منظر دقت ابعادی تأثیر بالایی داشته باشد و به هندسه قطعه از جمله وجود سوراخ بر روی قطعه وابسته است، پس تأثیر سوراخ بر روی این پدیده جهت اصلاح این عیب در قطعه بایستی بررسی گردد. بر این اساس انجام پژوهشی در خصوص مطالعه تأثیر وجود سوراخ و موقعیت آن بر روی میزان برگشت فنری در پروفیل‌های سوراخ‌دار برای پر کردن این خلأ پژوهشی و تکمیل کارهای انجام شده در این زمینه نیاز است. در این مقاله به بررسی تأثیر سوراخ و موقعیت آن بر روی میزان برگشت فنری پروفیل‌های تولیدی به روش شکل‌دهی غلتکی سرد به صورت تجربی و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود پرداخته خواهد شد. همچنین با تحلیل نتایج به دست آمده از روش اجزاء محدود به بررسی اثر سوراخ بر روی حالت تنش و اثر آن بر روی میزان برگشت فنری پرداخته خواهد شد.

<sup>1</sup> Press Brake



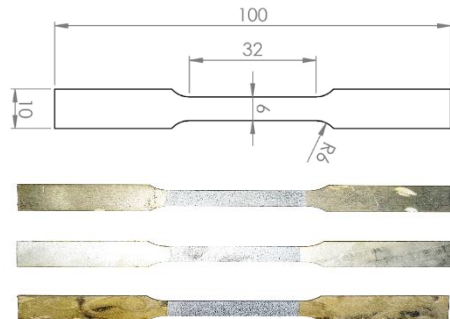
## مراحل آزمایشگاهی

جهت انجام فرایند شکل دهی غلتکی از ورق با جنس St1۲ با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. به منظور استخراج مقادیر تنش تسلیم، نمودار جریان و مدول یانگ، نمونه‌های کشش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM-E۸ با استفاده از دستگاه برش سیمی آماده شد. به منظور بررسی تکرارپذیری و دوری از خطاهای ناشی از آزمون کشش سه نمونه آماده شد.

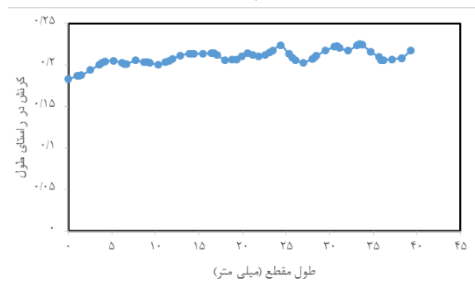
جهت اندازه‌گیری کرنش‌ها برای استخراج منحنی جریان از روش انطباق تصاویر دیجیتال استفاده شد. در روش انطباق تصاویر دیجیتال با ایجاد یک الگوی لکه تصادفی بر روی ناحیه موردنظر و بررسی موقعیت و فاصله لکه‌های ایجادشده نسبت به یکدیگر با استفاده از نرم‌افزار GOM correlate مقادیر کرنش طولی در طول آزمون به دست آمد. در شکل ۲ (الف) نمایی از الگوی لکه تصادفی ایجادشده بر روی نمونه‌های آزمون کشش و ابعاد نمونه بر اساس استاندارد قابل مشاهده است.



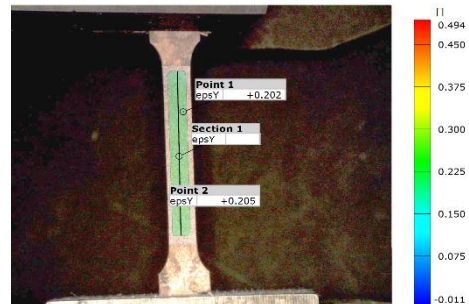
(ب)



(الف)



(د)

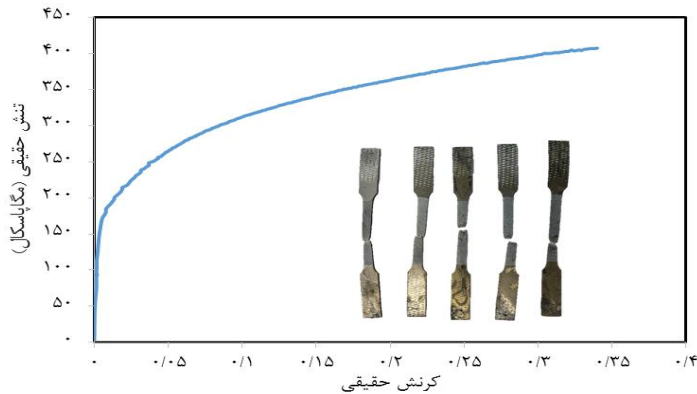


(ج)

شکل ۲. الف) الگوی لکه تصادفی ایجادشده روی نمونه‌ها (ب) انجام آزمون کشش به روش انطباق تصاویر دیجیتال (ج) پراکندگی کرنش طولی در سطح نمونه (د) کرنش در جهت کشش در طول نمونه آزمون کشش

کرنش در راستای کشش نمونه و همچنین کیفیت نقاط ایجادشده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل تصاویر بررسی شد. کیفیت تصاویر در حد مطلوب بوده و مقادیر کرنش طولی همان‌طور که در شکل ۲ (ج) که یک فریم از آزمون کشش است مشخص است مقدار کرنش در محدوده موردبررسی دارای پراکندگی مناسب و یکدست است.

جهت بررسی دقیق‌تر یک مقطع در راستای طول نمونه همان‌طور که در شکل ۲ (ج) مشخص است ایجاد شد و کرنش در راستای کشش نمونه در طول مقطع بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۲ (د) مشخص است کرنش در لحظه تصادفی مورد بررسی در طول نمونه آزمون کشش دارای کرنش تقریباً یکسان ۰/۲ در تمام محدوده طول نمونه است. نمودار تنش-کرنش حقیقی در راستای نورد با استفاده از انطباق داده‌های کرنش به‌دست‌آمده از تصاویر دیجیتال بر روی مقادیر نیروی کشش وارده دستگاه به نمونه که از خروجی نیروسنج دستگاه به‌دست‌آمده است، در شکل ۳ رسم شده است. بر اساس مقادیر تنش-کرنش در جهت نورد، مقدار مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال و مقدار تنش تسلیم بر اساس روش ۰/۲ درصد کرنش میزان ۱۸۴ مگاپاسکال به دست آمد.



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش حقیقی

همچنین با توجه به جنس ورق از معادله کرنش سختی سوییفت (۱) جهت برازش منحنی به‌منظور تخمین مقادیر منحنی جریان در کرنش‌های بالاتر از گلوبی شدن استفاده شد.

$$\sigma = K(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

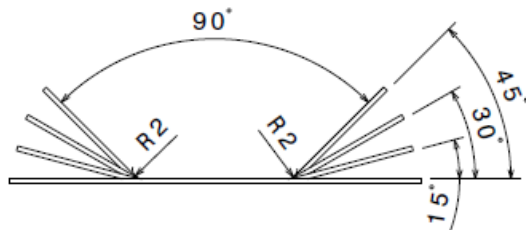
در معادله بالا مقدار  $n$  برابر با توان کرنش سختی، مقدار  $K$  ضریب کرنش سختی و مقادیر  $\varepsilon_p$  و  $\varepsilon_0$  به ترتیب معرف کرنش مومسان و کرنش اولیه هستند. مقادیر رابطه سوییفت با برازش معادله جریان سوییفت بر روی داده‌های نمودار تنش-کرنش تجربی به‌دست‌آمده، محاسبه شد که در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق

$R^2$	$\varepsilon_0$	$n$	$K$ (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۸۳	۰/۲۲۸	۵۲۴/۴	۱۸۴	۲۰۰

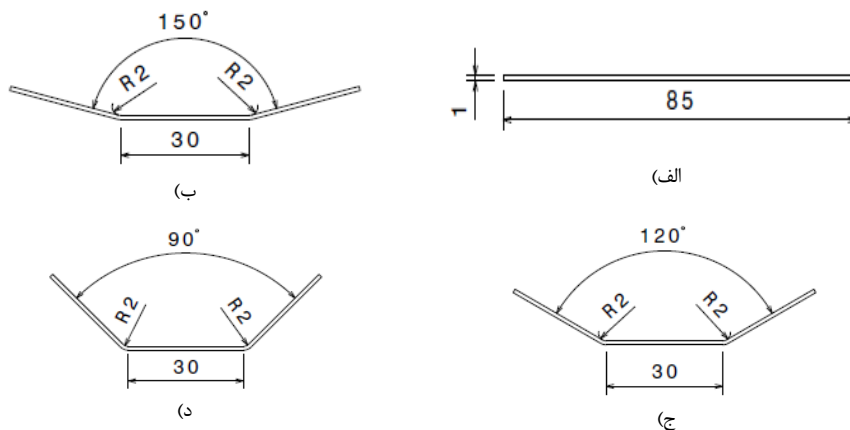
با استفاده از معادله سوییفت مقادیر کرنش در محدوده بالاتر از مقادیر قابل‌اندازه‌گیری به روش آزمون کشش تک‌محوری (کرنش حدود ۰/۲) قابل تخمین است. منحنی معادله سوییفت برازش شده تطابق بسیار خوبی با منحنی تجربی در بازه کمتر از ۰/۲ کرنش با ضریب تعیین بالای ۹۹ درصد را دارد.

جهت بررسی اثر سوراخ بر روی میزان برگشت فنی در فرایند شکل دهی غلتکی به صورت تجربی یک الگوی گل با مقطع کانالی شکل با سه ایستگاه شکل دهی غلتکی در نظر گرفته شد. زاویه ۱۵ در ایستگاه اول و زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه در ایستگاه دوم و ایستگاه آخر جهت شکل دهی غلتکی یک کانال ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. در شکل ۴ الگوی گل مقطع کانالی نشان داده شده است.



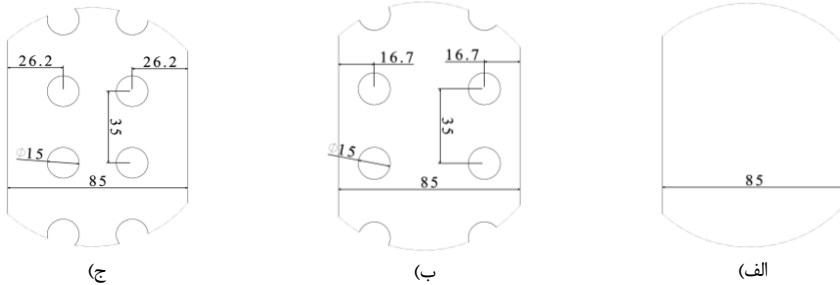
شکل ۴. الگوی گل فرایند تجربی

طراحی الگوی گل بر اساس روش شعاع خم ثابت با شعاع خم ۲ میلی متر طراحی شد. با توجه به فواصل حدود ۴۰ سانتی متری بین دو ایستگاه بایستی طول پروفیل بیش از دو برابر فاصله ایستگاه باشد تا ورق در هر لحظه میان دو ایستگاه درگیر باشد تا به درستی به ایستگاه بعدی هدایت شود. در نتیجه طول نمونه برای حل مشکل هدایت درست و همچنین دوری از ناحیه ابتدا و انتهای ورق که به دلیل عیب خمیدگی انتها در ورود و خروج ناحیه نامطلوبی برای اندازه گیری برگشت فنی است، طول نمونه ۱۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. در شکل ۵ مراحل شکل دهی و همچنین ابعاد هندسی مقطع کانال قابل مشاهده است.



شکل ۵. مراحل شکل دهی غلتکی سرد الف) ورق اولیه، ب) ایستگاه اول، ج) ایستگاه دوم، د) ایستگاه سوم

به منظور بررسی اثر وجود سوراخ و موقعیت آن نسبت به لبه پروفیل از سه نمونه استفاده شد. نمونه اول بدون سوراخ، نمونه دوم دارای سوراخ به صورت دایره ای در مرکز ناحیه خم پروفیل و نمونه سوم دارای سوراخ دایره ای در روی بال پروفیل در نزدیکی ناحیه خم است. سه نمونه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. در ادامه مقاله از نمونه اول به عنوان بدون سوراخ، نمونه دوم روی خم و نمونه سوم نزدیک خم نام برده خواهد شد.



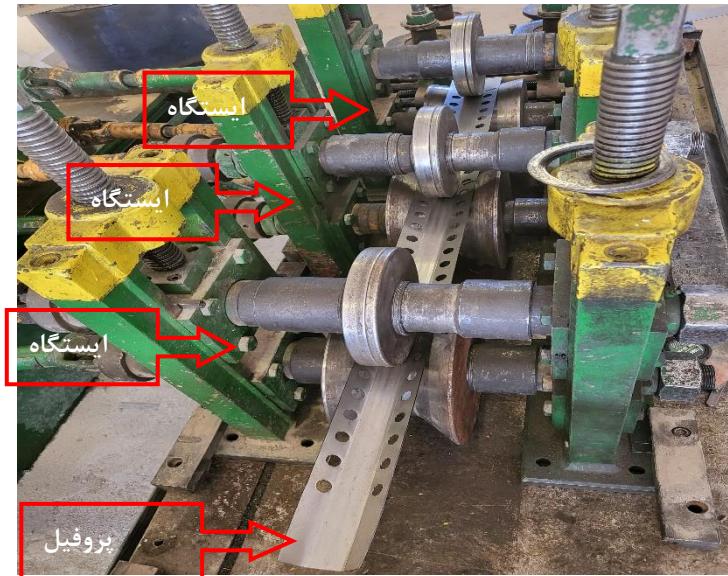
شکل ۶. نمونه‌های شکل‌دهی غلتکی سرد الف) بدون سوراخ، ب) نزدیک خم، ج) روی خم

مقادیر متغیرهای هندسه ورق و متغیرهای هندسی سوراخ‌های دایره‌ای ایجادشده بر روی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی ورق

متغیر هندسی	مقدار	واحد
طول ورق	۱۲۰۰	میلی‌متر
عرض ورق	۸۵	میلی‌متر
ضخامت ورق	۱	میلی‌متر
زاویه خم	۴۵	درجه
شعاع خم	۲	میلی‌متر
قطر سوراخ	۱۵	میلی‌متر
فاصله بین سوراخ‌ها	۳۵	میلی‌متر

غلتک‌ها از جنس CK۴۵ ساخته شده که در آن غلتک پایینی به صورت کامل و غلتک بالا تنها محدوده کف کانال را پوشش می‌دهد در شکل ۷ نمایی از غلتک‌های مورد استفاده و دستگاه نشان داده شده است. جهت هدایت پروفیل به ایستگاه اول از غلتک‌های هدایت‌کننده استفاده شده است.



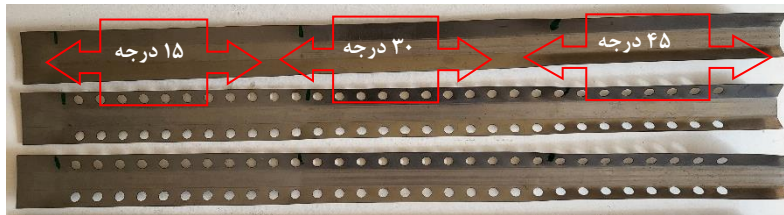
شکل ۷. فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد انجام‌شده در سه ایستگاه

جهت هدایت ورق برای ورود به ایستگاه شکل‌دهی اول از غلتک‌های راهنمای کناری استفاده شد. مقدار فاصله میان دو غلتک بالا و پایین برابر با ضخامت ورق ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و لقی ندارد. متغیرهای فرایند شکل‌دهی غلتکی در جدول ۳ آمده است.

### جدول ۳. مشخصات فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد

متغیر فرایند شکل‌دهی	مقدار	واحد
شعاع غلتک‌ها	۹۳	میلی‌متر
فاصله ایستگاه‌ها	۳۹۵	میلی‌متر
عرض غلتک بالا	۳۰	میلی‌متر
ضریب اصطکاک	۰/۲	-
تعداد ایستگاه	۳	-

در شکل ۸ پروفیل‌های تولیدی با سوراخ و بدون سوراخ تولید شده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد در سه ایستگاه شکل‌دهی نشان داده شده است. پس از خروج مقداری از پروفیل از ایستگاه انتهایی ۴۵ درجه در حالتی که قسمت ابتدای پروفیل در زیر ایستگاه شکل‌دهی اول قرار داشت پروفیل از دستگاه خارج شد. با خارج کردن پروفیل در حالتی که پروفیل با سه ایستگاه شکل‌دهی درگیر است هر سه زاویه ایستگاه‌های شکل‌دهی بر روی پروفیل قابل دسترسی و اندازه‌گیری است بدین‌صورت که ابتدای پروفیل دارای زاویه خم ۱۵ درجه، وسط پروفیل دارای زاویه ۳۰ درجه و قسمت انتهایی دارای زاویه ۴۵ درجه است. در نتیجه در هر پروفیل تعداد اطلاعات خروجی بیشتر بوده و می‌توان زوایای برگشت فنی را برای هر سه ایستگاه شکل‌دهی غلتکی در اختیار داشت.



(الف)



(ب)

شکل ۸. الف) پروفیل‌های شکل‌دهی شده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد ب) دستگاه اندازه‌گیری مختصات

جهت اندازه‌گیری میزان برگشت فنری از دستگاه اندازه‌گیری مختصات JOHONSSON استفاده شد. جهت حصول اطمینان از دقت میزان برگشت فنری اندازه‌گیری شده برای هر ناحیه موردنظر از سه مقطع جهت اندازه‌گیری استفاده شد که نتایج حاصل، میانگین داده‌های سه مقطع مورد نظر است.

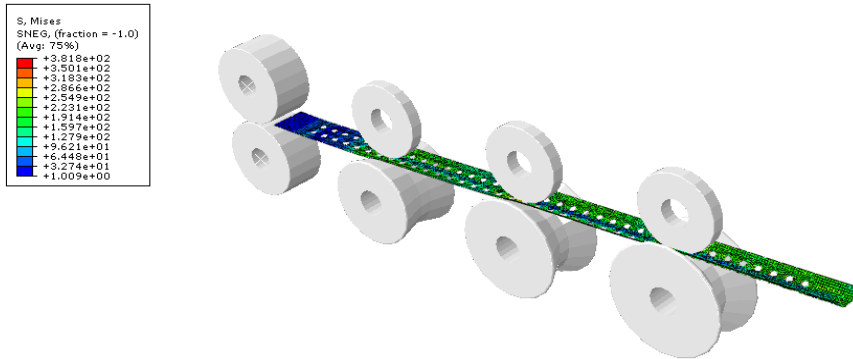
میزان برگشت فنری مطابق معادله (۲) به صورت اختلاف زاویه اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات پس از انجام فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با زاویه ایده‌آل محاسبه شد. منظور از زاویه ایده‌آل مقدار زاویه مطلوب یا همان زاویه غلتک در هر ایستگاه شکل‌دهی است.

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_m \quad (2)$$

در رابطه بالا متغیر  $\theta_i$  مقدار زاویه ایده‌آل است که برابر با مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در ایستگاه اول، دوم و سوم است. متغیر  $\theta_m$  نیز مقدار زاویه اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات است.

## روش عددی

جهت پیش‌بینی میزان برگشت فنری با حل عددی شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس نسخه ۶.۱۴ انجام شد. در شبیه‌سازی ورق به صورت تغییر شکل‌پذیر<sup>۱</sup> و غلتک‌ها صلب<sup>۲</sup> مدل شد. در شکل ۹ نمایی از فرایند شکل‌دهی غلتکی شبیه‌سازی شده به صورت سه ایستگاه و یک ایستگاه هدایت‌کننده در نرم‌افزار اجزاء محدود نشان داده شده است.



شکل ۹. نمای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی

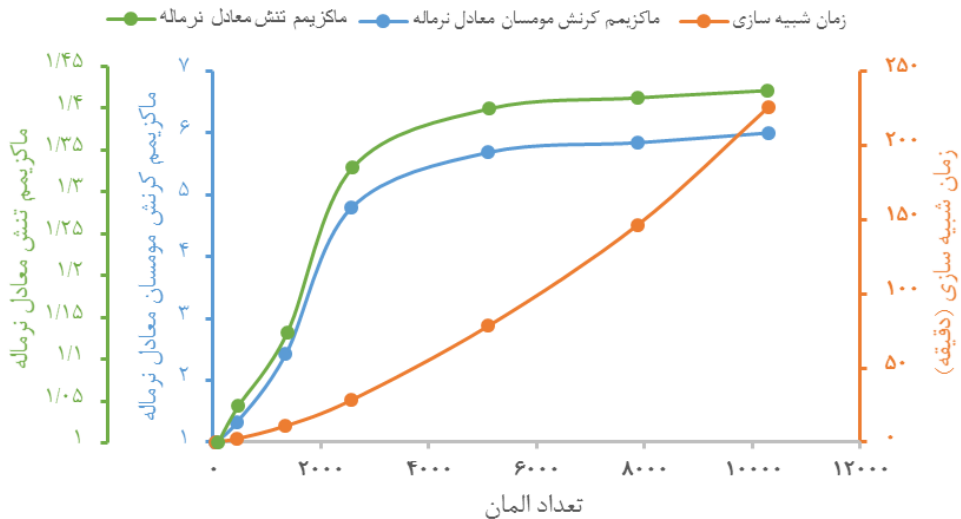
با توجه به نسبت ضخامت به سطح کم ورق از المان پوسته‌ای چهار گره انتگرال کاهش یافته S4R برای شبکه‌بندی ورق استفاده شد. بر اساس مراجع [۲۴؛ ۲۵] از مدل کولمب<sup>۳</sup> با ضریب اصطکاک  $0.2^4$  برای تعریف اصطکاک بین ورق و غلتک‌ها استفاده شد. همچنین تحلیل فرایند شکل‌دهی غلتکی با حلگر دینامیک صریح انجام شد. در شبیه‌سازی فرایندهای تغییر شکل با توجه به ماهیت غیر دینامیک و شبه استاتیکی فرایند در صورت استفاده از حلگر دینامیک بایستی شرایط فرایند از نقطه نظر انرژی جنبشی در طول فرایند کنترل شود. جهت اطمینان از برقراری شرایط شبیه‌سازی شبه استاتیکی بایستی انرژی دینامیک نسبت به انرژی داخلی در فرایند کمتر از ۱۰ درصد آن باشد که شرط مذکور برقرار شد [۲۶].

تماس میان ورق با غلتک‌ها به صورت تماس سطح با سطح صریح تعریف شد. همچنین درجات آزادی ورق بدون قید در نظر گرفته شد و برای غلتک‌ها ۵ درجه آزادی غلتک‌ها مقید شده و تنها درجه آزادی چرخش حول محور غلتک آزاد است که سرعت دورانی آن ثابت و همانند با فرایند شکل‌دهی غلتکی تجربی انجام شده است. پژوهش‌های انجام شده نتایج قابل قبولی جهت شبیه‌سازی برگشت فنری با ۵ نقطه انتگرالی در راستای ضخامت ورق را برای المان S4R نشان داده است [۲۷؛ ۲۸]. به همین جهت تعداد نقاط انتگرالی در طول ضخامت ورق در این پژوهش نیز ۵ نقطه در نظر گرفته شد و تعداد ۵۱۰۰ المان برای شبکه‌بندی ورق استفاده شد.

رفتار مکانیکی ورق در شبیه‌سازی اجزاء محدود به کمک معیار تسلیم همسانگرد فون میسز و با فرض سخت‌شوندگی همسانگرد تعریف شده است. لازم به ذکر است که رفتار مکانیکی و کرنش سختی ورق با استفاده از اطلاعات جدول ۱ در مدل‌سازی اعمال شد.

<sup>1</sup> Deformable  
<sup>2</sup> Analytical rigid  
<sup>3</sup> Coulomb  
<sup>4</sup> Friction coefficient

شبکه‌بندی مناسب ورق از مراحل مهم تحلیل اجزای محدود است. ابتدا شبکه‌های با اندازه نسبتاً بزرگ ایجاد و شبیه‌سازی انجام شد. در ادامه طی چند مرحله، اندازه المانها کاهش داده شده است و مقادیر ماکزیمم کرنش مومسان معادل و ماکزیمم تنش معادل و همچنین زمان حل شبیه‌سازی برای هر مرحله ثبت شده و تمام داده‌ها با تقسیم اعداد بر مقدار اولیه به‌صورت نرمال شده محاسبه و مطابق با شکل ۱۰ رسم شده است. علت بررسی مقادیر کرنش مومسان و تنش معادل تأثیر مستقیم میزان تنش معادل و کرنش مومسان بر روی میزان برگشت فنری ایجاد شده می‌باشد که عامل مورد بررسی در این پژوهش است.



شکل ۱۰. مقادیر نرمال شده ماکزیمم کرنش مومسان معادل، ماکزیمم تنش معادل و زمان شبیه سازی بر حسب تعداد المان

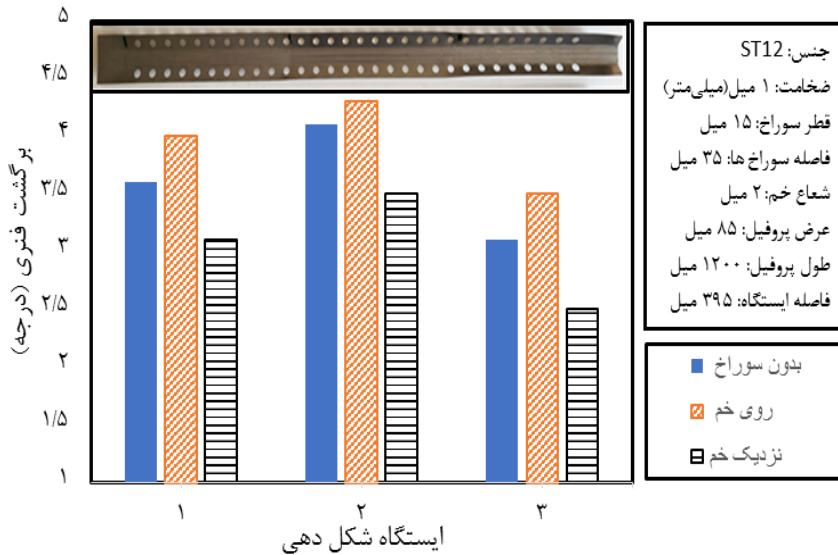
با افزایش تعداد المان‌ها زمان حل شبیه‌سازی به‌صورت نمایی افزایش خواهد یافت، در نتیجه بایستی کمترین تعداد المان با دقت قابل قبول در تخمین کمیت‌های خروجی مورد نظر انتخاب گردد. با عبور تعداد المان‌ها از ۵۱۰۰، شیب تغییرات مقادیر ماکزیمم کرنش و تنش معادل کاهش یافته و میزان تغییرات کمتر از ۲ درصد رسیده است. با توجه به موارد ذکر شده، تعداد المان مناسب جهت انجام شبیه‌سازی اجزاء محدود با در نظر گرفتن زمان حل برابر با ۵۱۰۰ المان در نظر گرفته شد.

## نتایج و بحث

میزان برگشت فنری تجربی با به‌دست آوردن اختلاف میانگین زاویه به‌دست آمده از سه مقطع برای هر ایستگاه با مقدار زاویه ایده‌آل به دست آمد. در شکل ۱۱ میزان برگشت فنری برای سه موقعیت سوراخ در سه ایستگاه شکل‌دهی نشان داده شده است. با مشاهده نمودار سه نکته قابل تشخیص است: ۱- میزان برگشت فنری در ایستگاه سوم شکل‌دهی برای هر سه مدل پایین‌تر از دو ایستگاه قبل است. ۲- میزان برگشت فنری بر اساس موقعیت سوراخ به ترتیب مدل دارای سوراخ در ناحیه خم، مدل بدون سوراخ و سوراخ نزدیک ناحیه خم است. ۳- به‌طور میانگین میزان برگشت فنری

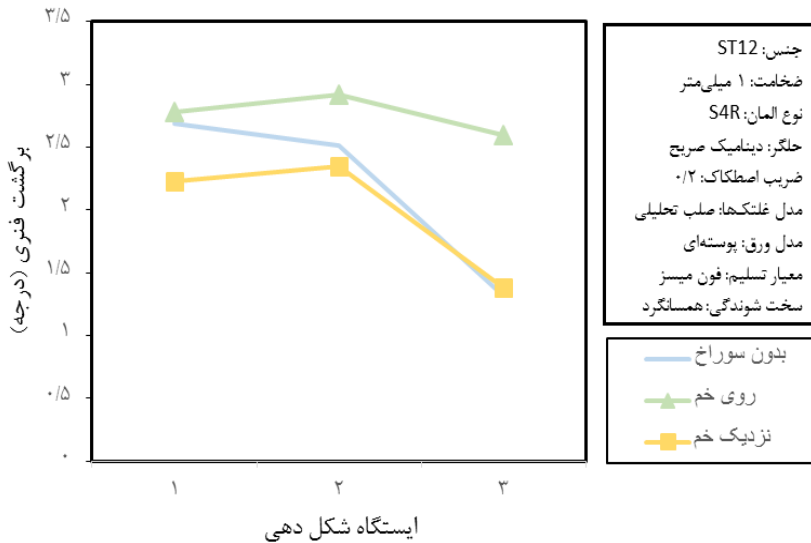


در نمونه دارای سوراخ در ناحیه خم ۹ درصد بیشتر و نمونه دارای سوراخ در نزدیکی خم ۱۶ درصد کمتر از نمونه بدون سوراخ است.



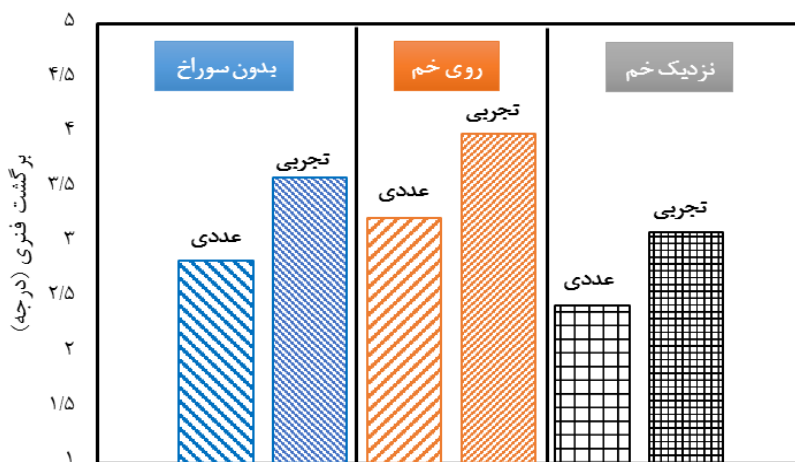
شکل ۱۱. نتایج تجربی برگشت فنی در ایستگاه‌ها

نتایج برگشت فنی شبیه‌سازی اجزاء محدود در هر سه موقعیت سوراخ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. جهت محاسبه برگشت فنی با انتخاب سه مقطع مشابه با روند اندازه‌گیری در فرایند تجربی مختصات گره‌ها روی دو بال در هر مقطع به دست آمده و با استفاده از برازش خط بر روی گره‌ها و اندازه‌گیری زاویه دو خط برازش شده روی بال‌ها میزان زاویه پس از باربرداری محاسبه شد. برگشت فنی با مقایسه زاویه پس از باربرداری با زاویه ایده‌آل بر اساس معادله ۲ به دست آمد. طبق نمودار روند نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت داشته و میزان بالاتر برگشت فنی در موقعیت سوراخ روی خم و همچنین کاهش میزان برگشت در ایستگاه سوم مطابق با نتایج تجربی است.



شکل ۱۲. نتایج حل عددی میزان برگشت فنری در هر ایستگاه

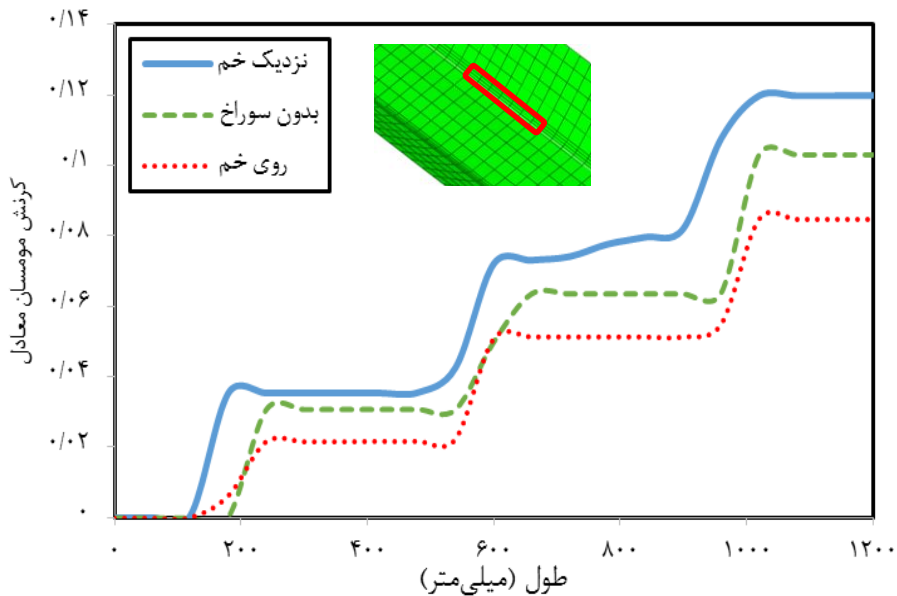
جهت صحت سنجی مقادیر برگشت فنری به دست آمده از شبیه‌سازی در ایستگاه اول با نتایج تجربی در یک نمودار رسم شد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است نتایج تجربی صحت انجام شبیه‌سازی اجزاء محدود انجام شده را نشان می‌دهد. اختلاف نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود برای سه پروفیل مورد بررسی به‌طور میانگین برابر با ۰/۷ درجه است که بیانگر این موضوع است که مدل ارائه شده توصیف دقیقی از رفتار مومسان ورق ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت سیکی بودن فرآیند شکل‌دهی غلتکی و مراحل باربرداری و بارگذاری مختلف که در طول فرایند اتفاق می‌افتد پدیده‌های فیزیکی از جمله اثر باوشینگ و تغییرات مدول یانگ نسبت به پیش کرنش می‌تواند اثرگذار باشد که از عوامل بروز اختلاف میان نتایج تجربی و عددی است.



شکل ۱۳. صحت سنجی نتایج تجربی

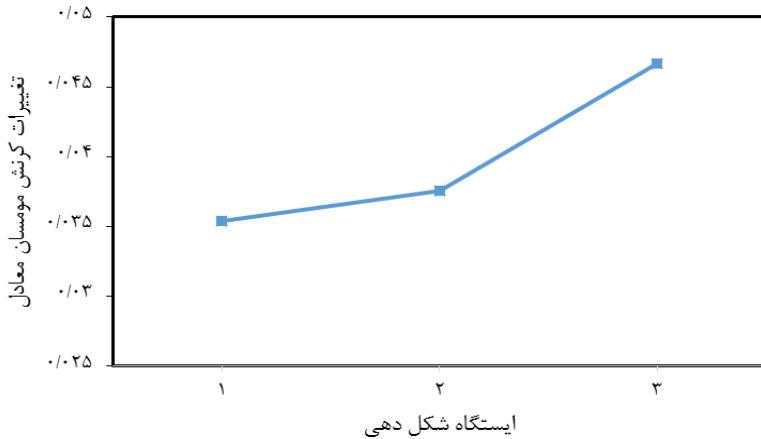
جهت بررسی اختلاف میزان برگشت فنری در سه موقعیت سوراخ میانگین مقادیر کرنش مومسان المان‌های موجود در ناحیه خم (ناحیه مشخص شده در شکل) در طول پروفیل‌های شکل‌دهی شده مطابق شکل ۱۴ رسم شد. مقادیر بالاتر کرنش مومسان در حالت پروفیل دارای سوراخ در نزدیک خم که حدود ۱۶ درصد بیشتر از پروفیل بدون سوراخ است نشانگر کاهش ناحیه کشسان و افزایش ناحیه مومسان در ناحیه خم این پروفیل است. در نتیجه ناحیه کشسان کمتر در پروفیل دارای سوراخ در نزدیکی ناحیه خم می‌توان میزان برگشت فنری پایین‌تر را برای آن نسبت به دو پروفیل دیگر انتظار داشت.

همچنین میزان کرنش مومسان معادل در ناحیه خم پروفیل دارای سوراخ روی ناحیه خم که با محاسبه میانگین کرنش مومسان المان‌های موجود بر روی ناحیه خم پروفیل به دست آمده حدود ۲۰ درصد کمتر از میانگین کرنش مومسان معادل المان‌های موجود بر روی ناحیه خم پروفیل بدون سوراخ است که علت بیشتر بودن برگشت فنری در این پروفیل را نسبت به پروفیل بدون سوراخ مانند توجیه بیان شده در بند قبل می‌تواند توجیه کند.



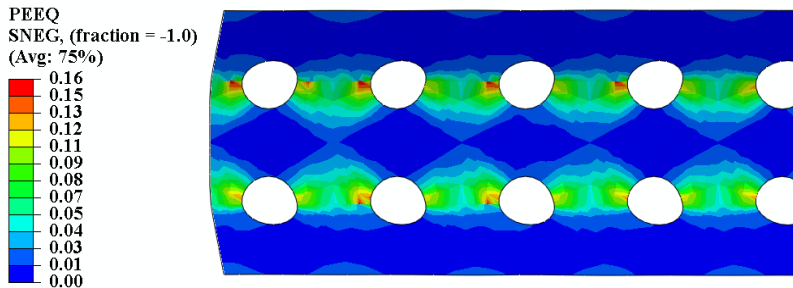
شکل ۱۴. کرنش مومسان معادل در طول پروفیل

جهت بررسی علت تغییرات میزان برگشت فنری در هر ایستگاه شکل‌دهی میزان کرنش مومسان معادل وارده به ناحیه خم در هر ایستگاه محاسبه شد. طبق شکل ۱۵ میزان کرنش مومسان معادل وارده به پروفیل در ایستگاه آخر بالاتر از کرنش معادل مومسان وارده به ناحیه خم پروفیل در ایستگاه‌های قبل است. به نحوی که کرنش مومسان وارده به پروفیل‌ها در ایستگاه انتهایی ۲۸ درصد بالاتر از میانگین کرنش وارده به ناحیه خم پروفیل‌ها در دو ایستگاه قبل است. این اختلاف کرنش مومسان می‌تواند دلیل کاهش ناحیه کشسان در تغییر شکل پروفیل در ایستگاه آخر و در نتیجه پایین‌تر بودن میزان برگشت فنری در ایستگاه سوم را توجیه کند.

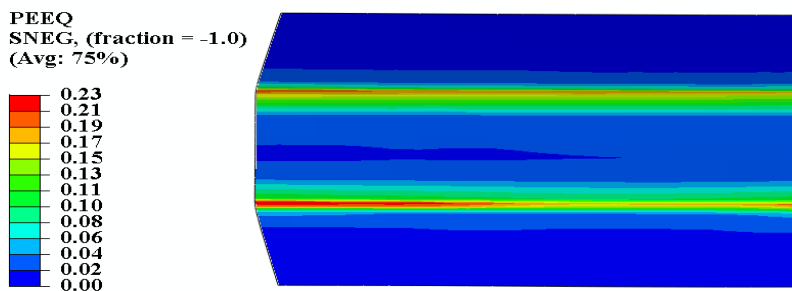


شکل ۱۵. تغییرات کرنش مومسان معادل در هر ایستگاه

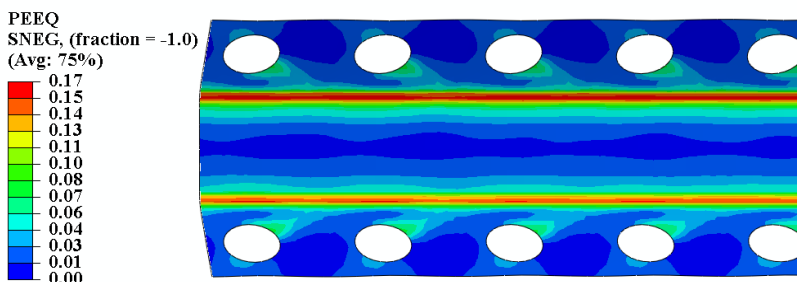
در شکل ۱۶ کانتور کرنش مومسان معادل برای هر سه حالت سوراخ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است در حالت سوراخ در ناحیه خم تمرکز کرنش در ناحیه خم به صورت پراکنده است و در دو حالت دیگر یعنی پروفیل بدون سوراخ و پروفیل دارای سوراخ در نزدیکی ناحیه خم تمرکز کرنش بر روی ناحیه خم مشهود است. به بیان دیگر وجود سوراخ‌ها از تمرکز کرنش مومسان بر روی ناحیه خم جلوگیری کرده و موجب پراکندگی کرنش بیشینه بر روی ناحیه گسترده‌تری شده است و در نتیجه ناحیه کشسان در ناحیه خم در این حالت بیشتر و میزان برگشت فنری بیشتر است. مقدار ۷۵ درصد در کنار کانتور در شکل بیان‌کننده آستانه میانگین است. آستانه میانگین حداکثر اختلاف مجاز برای المان‌های اطراف یک گره جهت محاسبه میانگین بین المان‌های همسایگی گره را کنترل می‌کند.



(الف)



(ب)



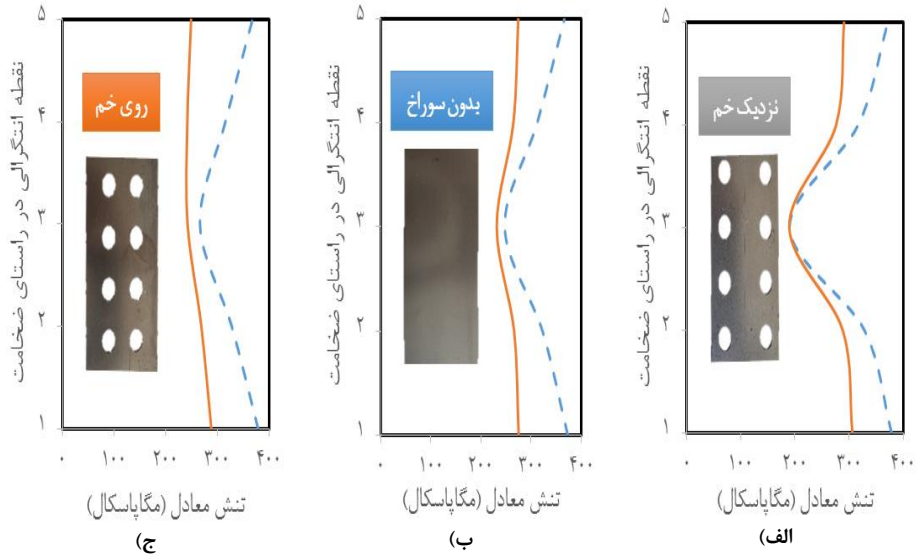
(ج)

شکل ۱۶. کانتور کرنش مومسان معادل در سه حالت سوراخ: الف) سوراخ روی ناحیه خم، ب) بدون سوراخ، ج) سوراخ نزدیک ناحیه خم

به منظور بررسی علت اختلاف مقادیر برگشت فنری در سه پروفیل دارای موقعیت سوراخ متفاوت، مقادیر تنش معادل قبل و بعد از برگشت فنری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین منظور مقادیر تنش معادل در سه پروفیل نمونه در راستای ضخامت برای ۵ نقطه انتگرالی موجود در ناحیه خم قبل از برگشت فنری (خط چین) و بعد از برگشت فنری (خط) رسم شد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

بر اساس تئوری برگشت فنری، برگشت فنری در اثر آزاد شدن تنش‌های ایجاد شده در قطعه پس از باربرداری ایجاد می‌شود. در نتیجه آزاد شدن تنش، قطعه خم شده که دارای تنش کششی در لایه بیرونی و تنش فشاری در لایه و سطح داخلی خم است ممانی برخلاف جهت خم کاری به نمونه وارد می‌شود که عامل اصلی ایجاد برگشت فنری در نمونه نهایی (پس از باربرداری) است. در نتیجه با بررسی تنش‌های قبل و بعد از برگشت فنری (تنش پسماند) در طول ضخامت پروفیل می‌توان این گونه نتیجه گرفت که هر چه تنش بیشتری پس از باربرداری آزاد شود، میزان ممان وارده و برگشت فنری نیز بیشتر خواهد بود.

با مقایسه میزان تنش معادل قبل و بعد از برگشت فنری برای سه حالت مختلف اختلاف بیشتر میان مقادیر قبل و بعد از باربرداری برای حالت پروفیل دارای سوراخ روی ناحیه خم (شکل ۱۷ ج) نسبت به پروفیل بدون سوراخ و پروفیل دارای سوراخ نزدیک ناحیه خم قابل تشخیص است که به سبب آن میزان برگشت فنری بالاتر در این پروفیل همان طور که در نتایج تجربی نیز مشاهده شد قابل انتظار است.



شکل ۱۷. تنش معادل در طول ضخامت ورق قبل از برگشت فنری (خط چین) و بعد از برگشت فنری (خط) در ناحیه خم پروفیل برای سه حالت سوراخ: الف) سوراخ نزدیک ناحیه خم، ب) بدون سوراخ، ج) سوراخ روی ناحیه خم

در زمان باربرداری پروفیل بدون سوراخ میزان تنش آزادشده در سطح بالا و پایین پروفیل که با نقاط انتگرالی ۱ و ۵ در شکل ۱۷ نشان داده شده است اختلاف تنش قبل و بعد از برگشت فنری در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال است که این مقدار برای پروفیل دارای سوراخ در ناحیه خم در حدود ۸۰ مگاپاسکال است که می‌توان انتظار داشت مطابق با نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود، برگشت فنری کمتری در پروفیل دارای سوراخ نزدیک ناحیه خم نسبت به پروفیل ساده مشاهده شود.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر وجود سوراخ و موقعیت آن در پروفیل‌های سوراخ دار تولیدشده به روش شکل‌دهی غلتکی سرد بر روی میزان برگشت فنری به روش عددی و تجربی بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده به روش اجزاء محدود آباکوس با استفاده از نتایج تجربی صحت سنجی شد. از جمله نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- بر اساس داده‌های تجربی میزان برگشت فنری اندازه‌گیری شده در سه ایستگاه در پروفیل دارای سوراخ در ناحیه خم به‌طور میانگین ۹ درصد بیشتر از پروفیل بدون سوراخ است.
- ۲- پروفیل دارای سوراخ در ناحیه خم نسبت به پروفیل بدون سوراخ ۱۶ درصد برگشت فنری کمتر از خود نشان داد و طبق نتایج هر سه پروفیل به نظر می‌رسد که در پروفیل یو شکل مورد بررسی وجود سوراخ در موقعیتی خاص در نزدیکی ناحیه خم برگشت فنری برابر با پروفیل بدون سوراخ دارد و هر چه موقعیت سوراخ به سمت لبه پروفیل تغییر کند برگشت فنری کمتر شده و هر چه به سمت ناحیه خم تغییر موقعیت دهد میزان برگشت فنری بیشتر از پروفیل بدون سوراخ خواهد شد.

- ۳- بر اساس داده‌های عددی میزان کرنش مومسان معادل وارده به ناحیه خم پروفیل دارای سوراخ در ناحیه خم ۲۰ درصد کمتر و در پروفیل دارای سوراخ در نزدیک ناحیه خم ۱۶ درصد بیشتر از پروفیل بدون سوراخ است.
- ۴- افزایش میزان کرنش مومسان معادل وارده به ناحیه خم پروفیل سبب کاهش ناحیه کشسان در راستای ضخامت پروفیل و در نتیجه کاهش میزان برگشت فنری برای پروفیل دارای سوراخ در ناحیه خم نسبت به پروفیل بدون سوراخ خواهد شد.
- ۵- نتایج عددی به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود میانگین اختلاف میزان برگشت فنری ۰/۷ درجه را برای هر سه پروفیل مورد بررسی با نتایج تجربی به دست آمده برای ایستگاه اول نشان می‌دهد که صحت شبیه‌سازی انجام شده را تأیید می‌کند.
- ۶- با توجه به زاویه خم کاری یکسان ۱۵ درجه در هر ایستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد، ایستگاه سوم برای هر سه پروفیل مورد بررسی برگشت فنری پایین‌تری را نسبت به دو ایستگاه قبل نشان داد.
- ۷- میزان کرنش مومسان معادل وارده به ناحیه خم در ایستگاه سوم ۲۸ درصد بالاتر از دو ایستگاه قبل است که سبب کاهش ناحیه کشسان در ناحیه خم پروفیل و برگشت فنری کمتر در ایستگاه سوم نسبت به دو ایستگاه قبل خواهد شد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (شماره پروژه: ۹۶۰۰۴۲۰۴) کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از شرکت تولید لوله و پروفیل پایا جهت همکاری در انجام آزمون‌های تجربی فرایند شکل‌دهی غلتکی و از شرکت پارکیستا ویرا بابت کمک در آماده‌سازی پروفیل‌های سوراخ دار جهت انجام آزمون‌های تجربی کمال تشکر را دارند.

## References

- [1] Talebi-Ghadikolaee, H., Elyasi, M., Dadgar Asl, Y., Zeinolabedin Beygi, A., & Davoudi, M. (2022). Feasibility of forming U-shaped microchannels by the flexible-die forming process. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 53-70. <https://doi.org/10.48301/ksa.2022.336972.2063>
- [2] Safdarian, R., & Pournouri, H. (2019). Experimental and numerical study of hydro-mechanical deep drawing of 2024 aluminum alloy sheet at elevated temperatures. *Materials Research Express*, 6(8), 086505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1ae5>
- [3] Khatir, F. A., Barzegari, M. M., Talebi-Ghadikolaee, H., & Seddighi, S. (2021). Integration of design of experiment and finite element method for the study of geometrical parameters in metallic bipolar plates for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(79), 39469-39482. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.161>
- [4] Deilami Azodi, H., Rezaei, S., Zeinolabedin Beygi, A., & Badparva, H. (2022). Investigation of Parameters Influencing Forming Force and Thickness Distribution in Single Point Incremental Forming of AA3105-St12 Two-Layer Sheet. *Iranian Journal of Materials Forming*, 9(2), 46-57. <https://doi.org/10.22099/IJMF.2022.42993.1215>
- [5] Safdarian, R., & Kord, A. (2019). Experimental investigation of effective parameters in the tube rotary draw bending process. *Materials Research Express*, 6(6), 066531. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0c36>

- [6] Halmos, G. T. (2005). *Roll forming handbook*. Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781420030693>
- [7] Liang, C., Li, S., Liang, J., & Li, J. (2021). Method for Controlling Edge Wave Defects of Parts during Roll Forming of High-Strength Steel. *Metals*, 12(1), 53. <https://doi.org/10.3390/met12010053>
- [8] Safdarian, R., & Naeini, H. M. (2015). The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-Walled Structures*, 92, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.002>
- [9] Tajik, Y., Naeini, H. M., Tafti, R. A., & Bidabadi, B. S. (2018). A strategy to reduce the twist defect in roll-formed asymmetrical-channel sections. *Thin-Walled Structures*, 130, 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.013>
- [10] Moneke, M., & Groche, P. (2021). The origin of end flare in roll formed profiles. *International Journal of Material Forming*, 14(6), 1439-1461. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01640-w>
- [11] Talebi-Ghadikolaee, H., Moslemi Naeini, H., Rabiee, A. H., Zeinolabedin Beygi, A., & Alexandrov, S. (2022). Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS). *International Journal of Modelling and Simulation*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2121675>
- [12] Talebi-Ghadikolaee, H., Moslemi Naeini, H., Talebi Ghadikolaee, E., & Mirnia, M. J. (2022). Predictive modeling of damage evolution and ductile fracture in bending process. *Materials Today Communications*, 31, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103543>
- [13] Banabic, D. (2010). *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
- [14] Abvabi, A., Mendiguren, J., Rolfe, B. F., & Weiss, M. (2014). Springback investigation in roll forming of a V-section. *Applied mechanics and materials*, 553, 643-648. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.553.643>
- [15] Su, C., Liu, J., Zhao, Z., Lou, S., Wang, R., & Yang, L. (2020). Research on roll forming process and springback based on five-boundary condition forming angle distribution function. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(12), 5193-5204. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-1121-4>
- [16] Groche, P., Beiter, P., & Henkelmann, M. (2008). Prediction and inline compensation of springback in roll forming of high and ultra-high strength steels. *Production Engineering*, 2(4), 401-407. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0131-3>
- [17] Jiao-Jiao, C., Jian-Guo, C., Qiu-Fang, Z., Jiang, L., Ning, Y., & Rong-guo, Z. (2020). A novel approach to springback control of high-strength steel in cold roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(1), 1793-1804. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05154-8>
- [18] Badr, O. M., Rolfe, B., Zhang, P., & Weiss, M. (2017). Applying a new constitutive model to analyse the springback behaviour of titanium in bending and roll forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 128-129, 389-400. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.05.025>
- [19] Liu, X.-l., Cao, J.-g., Huang, S.-x., Yan, B., Li, Y.-l., & Zhao, R.-g. (2020). Experimental and numerical prediction and comprehensive compensation of springback in cold roll



- forming of UHSS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(3), 657-671. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06133-9>
- [20] Naofal, J., Naeini, H. M., & Mazdak, S. (2019). Effects of hardening model and variation of elastic modulus on springback prediction in roll forming. *Metals*, 9(9), 1005. <https://doi.org/10.3390/met9091005>
- [21] Bidabadi, B. S., Naeini, H. M., Tafti, R. A., & Barghikar, H. (2016). Experimental study of bowing defects in pre-notched channel section products in the cold roll forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 997-1011. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8547-y>
- [22] Farsi, M. A., Arezoo, B., Alizadeh, V., & Mirzaee, S. (2011). The study of spring-back in wipe-bending processes for perforated components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(11), 2007-2014. <https://doi.org/10.1177/0954405411403253>
- [23] Nasrollahi, V., & Arezoo, B. (2012). Prediction of springback in sheet metal components with holes on the bending area, using experiments, finite element and neural networks. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.039>
- [24] Poursafar, A., Saberi, S., Tarkesh, R., Vahabi, M., & Fesharaki, J. J. (2022). Experimental and mathematical analysis on spring-back and bowing defects in cold roll forming process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 16(2), 531-543. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00818-5>
- [25] Zeinali, M. S., Naeini, H. M., Talebi-Ghadikolaee, H., & Panahizadeh, V. (2022). Numerical and Experimental Investigation of Fracture in Roll Forming Process Using Lou-Huh Fracture Criterion. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 15591-15602. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06662-3>
- [26] Mohammadi Najafabadi, H., Moslemi Naeini, H., Safdarian, R., Kasaei, M. M., Akbari, D., & Abbaszadeh, B. (2019). Effect of forming parameters on edge wrinkling in cold roll forming of wide profiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1), 181-194. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2885-x>
- [27] Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H., Safdarian, R., & Barghikar, H. (2022). Investigation of over-bending defect in the cold roll forming of U-channel section using experimental and numerical methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(10), 1380-1392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/09544054221076628>
- [28] Lindgren, M. (2008, June 16-18). *Validation of finite element model of roll forming*. International Deep Drawing Research Group 2008 International Conference, Olofström, Sweden. [https://www.researchgate.net/publication/29751706\\_Validation\\_of\\_finite\\_element\\_model\\_of\\_roll\\_forming](https://www.researchgate.net/publication/29751706_Validation_of_finite_element_model_of_roll_forming)