



## Feasibility of Forming U-shaped Microchannels by Flexible-die Forming Process

Hossein Talebi-Ghadikolaee<sup>1</sup>, Majid Elyasi<sup>2</sup>, Yaghoob Dadgar Asl<sup>3</sup>, Ali Zeinolabedin Beygi<sup>4</sup>, Mohammadmahdi Davoudi<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noushiravani University of Technology, Babol, Iran.

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>4</sup>Msc. Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>5</sup>Professor, Faculty of Engineering, Cheongju University, Cheongju, South Korea.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 04.11.2022

**Revised:** 04.24.2022

**Accepted:** 04.30.2022

#### Keyword:

Metal Forming  
Rubber Pad Forming  
PEM fuel Cell  
Metallic Bipolar Plate  
Hardness of Rubber

#### \*Corresponding Author:

Mohammadmahdi Davoudi

#### Email:

[davoudimohammadmahdi@gmail.com](mailto:davoudimohammadmahdi@gmail.com)

Metallic bipolar plates can be mentioned as one of the main components of the fuel cell. Various methods such as hydroforming process, electromagnetism, stamping, and rubber forming are used to produce these plates. In this study, the effect of rubber layer on the production of the metallic bipolar plate by the rubber forming method was investigated. The forming die with a convex pattern and parallel helical grooves was used to fabricate bipolar plates made of SS316 with a thickness of 0.1 mm. First, the effect of forming force on channel depth in both transverse and longitudinal directions was studied. Experimental results indicated that there is a direct relationship between the depth of the channel and the applied force, and the maximum depth of the channel occurs in the transverse direction. In addition, the effect of hardness of rubber on the channel depth of bipolar plates was investigated. The results showed that the maximum depth of the channel decreases with increasing hardness of the rubber. On the other hand, with a large decrease in the hardness of the rubber layer, it would be difficult to provide the pressure for applying the plastic deformation on the sheet metal. Then, the depth of the middle and side channels in the longitudinal direction was measured in order to evaluate the dimensional accuracy of the channels. The experimental results showed that the depth of the channels is uniform in this direction, which indicates the acceptable dimensional accuracy for the fabricated samples.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

In recent years, the desire to utilize renewable and clean sources has increased due to the non-renewability of fossil fuels and the amount of pollutants caused by their use. Polymer fuel cell has attracted attention due to its efficiency, low working temperature, and high current density. Bipolar plates can be considered as one of the most important components of polymer fuel cells. The materials used for these plates are usually composite, graphite and metal. With regard to metal bipolar plates, this type of bipolar plates has attracted attention in recent years. Different methods, including flexible-die forming process, have been used to produce metal bipolar plates. The process parameters, including the rubber layer, play a significant role in the quality of the production plates, which should be carefully examined. Since reducing the hardness of the rubber layer in order to achieving greater channel depth has a different function and will cause the channel depth to decrease and since the rubber layer is part of the process that plays a significant role in determining process costs, the behaviour of the rubber layer under different conditions should be studied and evaluated in order to determine the best option for the forming process. Therefore, the present research was conducted in order to examine the above mentioned parameters in a quantitative manner.

### Methodology

In this study, 316 stainless steel sheets with a thickness of 0.1 mm and a spiral groove pattern were used to form bipolar plates with a width and length of approximately 55 mm. To determine the mechanical properties of the sheet, samples according to the standard ASTM (E8M-04) were prepared by wire cut machine. The samples were stretched to the breaking point rupture (Figure 1). According to the tensile test results, the mechanical properties of 316 stainless steel sheet are given in Table 1. It should be noted that the anisotropy of the samples was ignored.



Figure 1. Tensile test samples after the test.

Table 1. Mechanical properties of 316 stainless steel sheet.

| Mechanical properties | Unit | Amount |
|-----------------------|------|--------|
| Elastic Modulus       | GPa  | 200    |
| Poisson's Ratio       | -    | 0.3    |
| Yield Stress          | MPa  | 269    |
| k                     | MPa  | 1512   |

| Mechanical properties | Unit | Amount |
|-----------------------|------|--------|
| n                     | -    | 0.53   |
| Pre-strain            | -    | 0.04   |

In order to form bipolar plates, two patterns of concave and convex shaping can be used. In this study, the channels of bipolar plates were created in a convex form on the die by the machining process. In addition, the angle of the wall was 10 degrees and the radii of the upper and lower corners were 0.2 mm to prevent rapture in the sheet. In addition, the depth of the machined microchannel on the die was equal to 0.75 mm.

## Results and discussion

Figure 2 shows the effect of the amount of force in the depth of the channel of bipolar plates made of 316 stainless steel sheets in the longitudinal and transverse direction with the application of force in the range of 500 to 1000 KN. According to the obtained values, the depth of the channel increases with the increase in the amount of applied force.

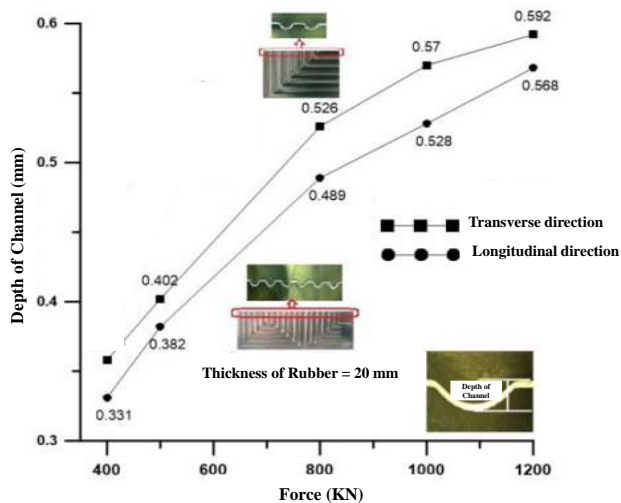


Figure 2. The effect of applied force on depth of channel.

Since the longitudinal direction is the main path of the microchannel, Figure 3 shows the effect of different hardness of rubber on the depth of the channel in the longitudinal direction. In order to investigate the effect of the desired variables, rubber layers with hardness of 40, 60, 85 and 90 on the Shore A scale and thickness of 20 mm were used. The results of examining the effect of the depth of the channel in the longitudinal direction for the rubber layer with different hardness under different forces generally indicated an increase in the depth of the channel with a decrease in the hardness of the rubber layer. However, according to the observations, rubbers with low hardness came out of the space

between the holding chamber of the rubber layer and the punch and a large deformation in this area caused the destruction of the rubber layer. This phenomenon resulted in the rubber layer not to provide the necessary pressure for forming.

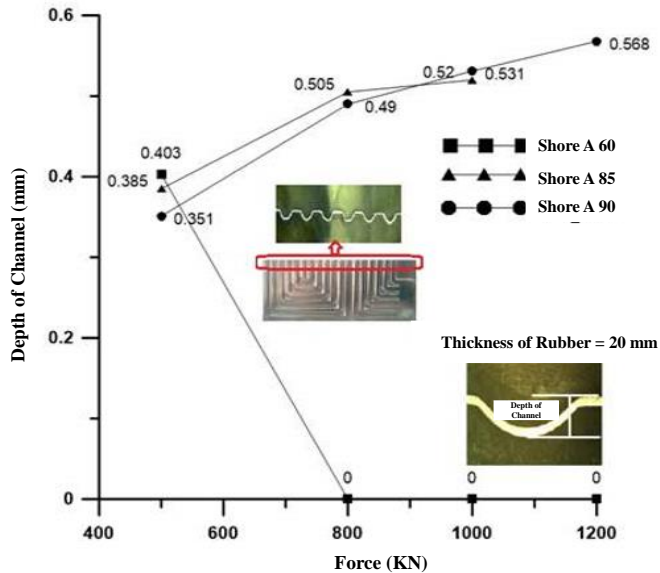


Figure 3. The effect of rubber hardness on the depth of the channel in the longitudinal direction.

## Conclusion

In this study, the forming capability of polymer fuel cell bipolar plates with a thickness of 0.1 mm made of 316 stainless steel sheets was investigated by the flexible-die forming process in addition to the effect of process variables such as the force and hardness of the rubber layer on the channel depth of the bipolar plates.

According to the results, the filling rate of the channels in the transverse direction was greater than the longitudinal direction. The maximum depth of the channel in the transverse direction was obtained in the hardness of 90 Shore A rubber at the rate of 0.592 mm. In the next steps, the effect of the hardness of the rubber layer on the channel depth of the bipolar plates was evaluated, which according to the results of the low hardness rubber layers, performed better than the high hardness rubber layers in forces of 400 and 500 KN. However, in forces above 500 KN, rubbers with low hardness could not provide the required forming pressure because of high forces. Accordingly, the rubber layer with higher hardness performed better than softer rubbers in high applied forces. The highest values were obtained at a force of 1200 KN and 0.568 mm in the longitudinal direction.

## امکان سنجی شکل‌دهی میکروکانال‌های U شکل توسط فرایند شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر

حسین طالبی قدیکلایی<sup>۱</sup>، مجید الیاسی<sup>۲</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۳</sup>، علی زین‌العابدین بیگی<sup>۴</sup>، محمدمهدی داودی<sup>۵\*</sup>

- ۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۵- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه چئونگ جو، چئونگ جو، کره جنوبی.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰

### کلید واژگان:

شکل‌دهی فلزات  
شکل‌دهی لاستیکی  
پیل سوختی پلیمری  
صفحات دوقطبی فلزی  
سختی لاستیک

\*نویسنده مسئول: محمدمهدی داودی  
پست الکترونیکی:  
davoudimohammadmahi@gmail.com

از صفحات دوقطبی فلزی به‌عنوان یکی از بخش‌های اصلی تشکیل‌دهنده پیل سوختی می‌توان یاد کرد. روش‌های مختلفی نظیر فرایندهای شکل‌دهی هیدروفورمینگ، الکترومغناطیسی، استمپینگ و شکل‌دهی لاستیکی برای تولید این صفحات به کار می‌رود. در این مطالعه، اثر لایه لاستیکی در تولید صفحات دوقطبی فلزی به روش شکل‌دهی لاستیکی بررسی شده است. برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس SS۳۱۶ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر از قالبی با الگوی محدب و شیارهای مارپیچ موازی استفاده گردید. در ابتدا اثر نیروی شکل‌دهی بر عمق کانال در دو راستای عرضی و طولی مطالعه شد. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که نسبتی مستقیم بین عمق کانال و نیروی اعمالی وجود دارد و در راستای عرضی بیشترین میزان عمق کانال در نیروهای مختلف رخ می‌دهد. علاوه بر این اثر سختی لاستیک بر عمق کانال صفحات دوقطبی بررسی و مطالعه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که حداکثر عمق کانال با افزایش سختی لاستیک، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با کاهش زیاد سختی لایه لاستیکی، تأمین فشار لازم برای شکل‌دهی ورق با مشکل مواجه خواهد شد. در ادامه عمق کانال‌های میانی و کناری در راستای طولی با هدف بررسی دقت ابعادی کانال‌ها، اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد عمق کانال‌ها در این راستا یکنواخت می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده دقت ابعادی قابل قبول برای نمونه‌های شکل داده شده است.

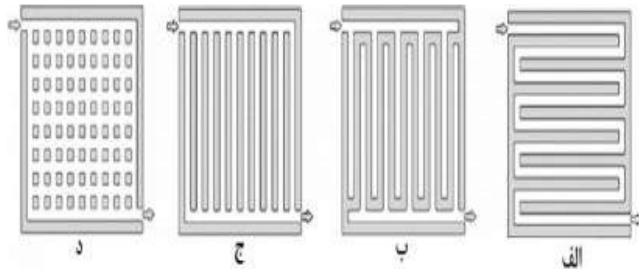
## مقدمه

در سال‌های اخیر میل به استفاده از منابع تجدیدپذیر و پاک به دلیل تجدیدنپذیری سوخت‌های فسیلی و میزان آلاینده‌های ناشی از به‌کارگیری آن‌ها، افزایش یافته که در این بین، پیل سوختی پلیمری به دلیل کارایی، دمای کاری پایین و چگالی جریان بالا مورد توجه قرار گرفته است. صفحات دوقطبی را می‌توان از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل‌دهنده پیل‌های سوختی پلیمری دانست. جنس به‌کاررفته برای این صفحات معمولاً از کامپوزیت، گرافیت و فلز می‌باشد [۱-۳]. در این میان صفحات گرافیتی مقاومت به خوردگی بالا و رسانایی مناسبی را دارا می‌باشند اما به دلیل پایین بودن استحکام مکانیکی و نیاز به عملیات ماشین‌کاری، از هزینه تولید بالایی برخوردار هستند. بنابر مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که فلزات به دلیل خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی مناسب، جایگزینی مناسب برای صفحات گرافیتی می‌باشند [۴]. علاوه بر مزایای ذکر شده برای صفحات دوقطبی فلزی، به دلیل آن که ۶۰ تا ۸۰ درصد از وزن مجموعه پیل سوختی را صفحات دوقطبی و ۳۰ تا ۴۵ درصد از هزینه‌های آن را شامل می‌شوند [۵]، تولید این صفحات به صورت صفحات فلزی، باعث کاهش قابل توجهی از وزن مجموعه پیل سوختی می‌گردد.

یکی دیگر از متغیرهای صفحات دوقطبی فلزی و غیرفلزی الگوی مسیر جریان می‌باشد که نقش مهمی را در عملکرد پیل سوختی ایفا می‌کند؛ از این رو الگوهای متفاوتی به‌عنوان مسیر جریان در صفحات دوقطبی به‌کار می‌رود که براساس تحقیق هینزل و همکاران (۲۰۰۹) [۶] مسیرهای جریان به چهار گروه مارپیچ، پینی، تداخلی و موازی تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۱ نشان‌دهنده تصویری از مسیرهای جریان متفاوت می‌باشد.

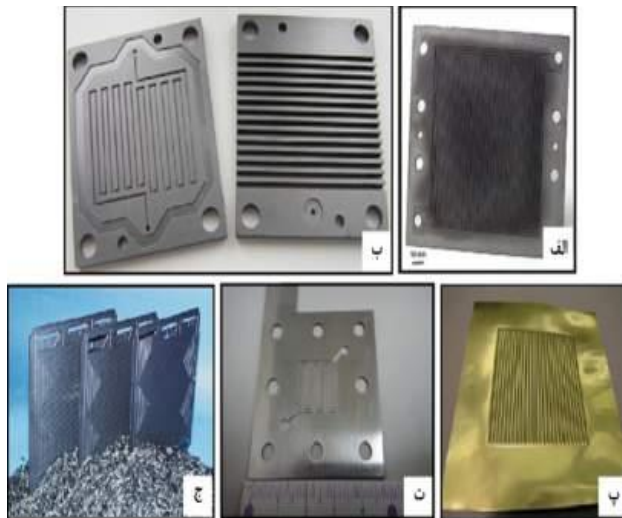
برای تولید صفحات دوقطبی فلزی از روش‌های ماشینکاری و برش [۷؛ ۸] و شکل‌دهی [۹؛ ۱۰] استفاده می‌شود. از روش‌های مختلفی نظیر فرایندهای هیدروفورمینگ، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، استمپینگ و شکل‌دهی لاستیکی می‌توان به‌عنوان گروهی از روش‌های شکل‌دهی یاد کرد که برای ایجاد الگوی مسیر جریان بر روی صفحات دوقطبی فلزی به‌کار می‌روند. صفحات تولید شده توسط روش‌های متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است. از بین روش‌های ذکر شده، فرایند شکل‌دهی لاستیکی به دلیل هزینه کمتر قالب، سادگی فرایند، کیفیت سطح مناسب و سرعت تولید بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که منجر به استفاده از این فرایند برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی می‌گردد. در این فرایند شکل‌دهی برای تأمین فشار لازم برای شکل‌دهی ورق، از لایه لاستیک استفاده می‌گردد؛ از همین رو مشخصات لایه لاستیکی نقش به‌سزایی در این فرایند ایفا خواهد کرد.

با توجه به پارامترهای موجود در فرایند و به دلیل بهبود کیفیت نمونه‌های تولید شده، مطالعاتی در زمینه شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی به کمک فرایند شکل‌دهی لاستیکی صورت پذیرفته است که در ادامه برخی از آن‌ها آمده است. شکل‌دهی صفحات دوقطبی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی توسط لیو و هوا (۲۰۱۰) [۱۱] بررسی و اثر شعاع گوشه قالب، سختی لاستیک و زاویه دیواره را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد با افزایش شعاع گوشه، پرشدگی کانال‌ها بهتر خواهد شد و احتمال بروز پارگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این سختی لاستیک اثر زیادی را بر توزیع تنش در ورق‌های شکل یافته ندارد و با افزایش زاویه دیواره، نیروی لازم برای شکل‌دهی کاهش می‌یابد.



شکل ۱. الگوهای مسیر جریان متفاوت، (الف) مارپیچ، (ب) تداخلی، (ج) موازی، (د) پینی [۶].

لیم و همکاران (۲۰۱۳) [۱۲] به بررسی شکل‌دهی ورق تیتانیومی با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر توسط فرایند شکل‌دهی با لایه لاستیکی پرداختند. آن‌ها اثر فشار اعمالی به مجموعه، سرعت پانچ، سختی لاستیک، ضخامت لاستیک و همچنین زاویه دیواره قالب را بر روی عمق کانال بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ضخامت لایه لاستیک و کاهش سختی لایه لاستیکی، عمق کانال در نمونه‌های شکل‌داده شده بهبود می‌یابد. آن‌ها با توجه به اثر پارامترها بر روی عمق کانال صفحات دوقطبی، به تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای شکل‌دهی پرداختند.



شکل ۲. روش‌های تولید صفحات دوقطبی پیل سوختی، (الف) قالب‌گیری کامپوزیت کربن-کربن، (ب) ماشینکاری صفحات گرافیتی، (ج) قالب‌گیری کامپوزیت-پلیمر-کربن، (ت) ماشینکاری صفحات از جنس فولاد زنگ‌نزن، (پ) شکل‌دهی صفحات فولاد زنگ‌نزن [۱۳].

جونگ و همکاران (۲۰۱۴) [۱۴] تأثیر فشار اعمالی به مجموعه، سرعت پانچ، ضخامت لاستیک و سختی لاستیک در شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس SS۳۰۴ را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد عمق کانال‌ها دارای نسبت مستقیم با سرعت پانچ، فشار و ضخامت لاستیک می‌باشد و کم شدن سختی لاستیک سبب بهبود قابلیت شکل‌دهی می‌گردد. افزایش زاویه دیواره نیز به‌خصوص در دامنه ۱۰ تا ۲۰ درجه سبب بهبود شکل‌دهی خواهد شد. علاوه بر این عمق کانال‌ها در زوایای ۲۰ تا ۳۰ درجه، تفاوت چندانی ندارد و در نتیجه زاویه ۲۰ درجه مطلوب‌تر است.

علاوه بر موارد ذکر شده، مطالعاتی در زمینه هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی صورت پذیرفته است که در این بین می‌توان به مطالعه محمدتبار و همکاران (۲۰۱۴) [۱۵] اشاره کرد. در این مطالعه، شکل‌دهی یک الگوی شیاری ماریچ متصل به هم بر روی صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با فرایند هیدروفرمینگ به صورت شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فشار شکل‌دهی، منجر به افزایش پرشدگی قالب می‌شود و ضخامت ناحیه بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش، بیشتر کاهش می‌یابد. در تحقیق بلالی اوصیا و همکاران (۲۰۱۵) [۱۶]، شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱۱ میلی‌متر و با الگوی پینی به کمک فرایند هیدروفرمینگ در قالب محدب به صورت شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی بررسی شده است. بر همین اساس پارامترهای مختلفی مانند سطح فشار اعمالی، هندسه پین و نسبت عمق به عرض تغییر داده شده و نتایج نظیر پروفیل شکل داده شده، توزیع ضخامت، درصد پرشدگی و درصد نازک‌شدگی نمونه‌های شکل داده شده با یکدیگر مقایسه شدند. به طور کلی با افزایش نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ ( $a/b$ ) و کاهش نسبت عمق به عرض ( $h/w$ )، نازک‌شدگی و درصد پرشدگی، رفتار مطلوب‌تری را از خود نشان می‌دهند اما تولید صفحات دوقطبی فلزی در ابعاد صنعتی به وسیله فرایند هیدروفرمینگ، نیازمند سیستمی با قابلیت تأمین فشار بالا می‌باشد که افزایش هزینه‌های فرایند را در پی خواهد داشت؛ علاوه بر این مشکلات مربوط به آب‌بندی مجموعه در فشارهای بالا نیز بیشتر خواهد شد. همچنین زمان انجام فرایند نیز نسبت به فرایند شکل‌دهی لاستیکی بیشتر است؛ از این رو فرایند شکل‌دهی لاستیکی از نظر سهولت فرایند و هزینه، به مراتب مناسب‌تر از فرایند هیدروفرمینگ می‌باشد که در این مطالعه بحث و بررسی شده است. طالبی قادیکلابی و همکاران (۲۰۲۲) [۱۷] به بررسی تغییر شکل پلاستیک صفحات دوقطبی فلزی در فرایند استمپینگ پرداختند. آن‌ها نشان دادند جریان ماده، تأثیر مهمی در توزیع ضخامت کانال‌های مرکزی و جانبی دارد و درصد کاهش ضخامت کانال مرکزی در جهات طولی، مورب و عرضی، بیشتر از جانبی است.

مطالعات انجام شده اثر لایه لاستیکی را بر میزان عمق کانال صفحات دوقطبی بررسی کرده‌اند اما از آنجایی که رسیدن به میزان عمق کانال بیشتر، نقش مهمی را در عملکرد و بازده مجموعه پیل سوختی ایفا خواهد کرد، نیاز است تا پژوهش‌های دیگری برای دستیابی به عمق کانال‌های بیشتر صورت پذیرد که به دلیل کم‌بودن ضخامت ورق موردنظر (۰/۱ میلی‌متر) از اهمیت بالایی برخوردار است؛ همچنین در مطالعات صورت گرفته، مزیت کاهش سختی لایه لاستیکی در افزایش عمق کانال آورده شده است اما کاهش سختی لایه لاستیکی، به منظور دستیابی به عمق کانال‌های بیشتر، عملکردی متفاوت دارد و سبب کاهش عمق کانال خواهد شد که در مطالعات صورت گرفته این موضوعات ذکر نگردیده است. علاوه بر این، به دلیل آن که لایه لاستیکی قسمتی از فرایند می‌باشد که نقش به‌سزایی را در تعیین هزینه‌های فرایند دارد، باید رفتار لایه لاستیکی در شرایط مختلف مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد تا بهترین گزینه برای انجام فرایند شکل‌دهی مشخص شود. از همین رو پژوهشی در راستای بررسی موارد فوق صورت گرفته است تا پارامترهای مذکور را به صورت کمی مورد بررسی و بحث قرار دهد.

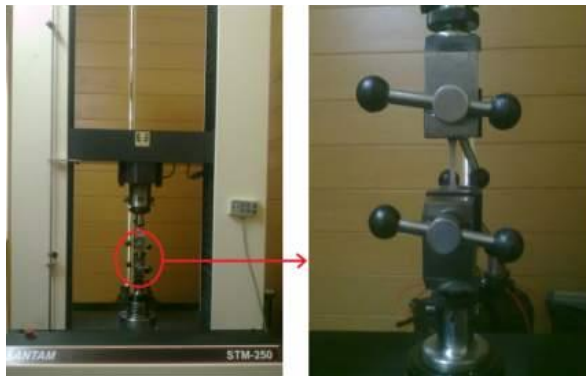
### مراحل آزمایشگاهی

در این مطالعه از ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و از الگوی شیاری ماریچ برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی با عرض و طولی تقریباً برابر با ۵۵ میلی‌متر استفاده شده است. جدول ۱ بیانگر ترکیب شیمیایی ورق به کاررفته در این مطالعه می‌باشد که از طریق انجام آزمایش‌های تجربی تعیین شد.

## جدول ۱. عناصر الیازی ورق مورد استفاده در فرایند.

| عناصر الیازی | درصد  | عناصر الیازی | درصد  | عناصر الیازی | درصد | عناصر الیازی | درصد  |
|--------------|-------|--------------|-------|--------------|------|--------------|-------|
| کروم         | ۱۶/۱۵ | گوگرد        | ۰/۰۰۵ | منگنز        | ۱/۴۴ | کربن         | ۰/۰۴۷ |
| مس           | ۰/۳۶  | فسفر         | ۰/۰۴۸ | سیلیسیم      | ۰/۶۶ | نیکل         | ۱۲/۱۹ |
| وانادیم      | ۰/۰۹  | کبالت        | ۰/۲۸  | آلومینیوم    | ۰/۰۱ | مولیبدن      | ۲/۱۱  |

برای تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی مطابق با استاندارد ASTM (E۸M-۰۴) به‌وسیله دستگاه برش سیمی<sup>۱</sup> تهیه و آماده شده‌اند. به‌منظور انجام آزمایش کشش از دستگاهی با توان اعمال بار تا ۲۵ تن مطابق شکل ۳ استفاده شده است. سپس نمونه‌ها تا حد پارگی تحت کشش قرار گرفتند (شکل ۴).



شکل ۳. دستگاه آزمون کشش انیورسال.



شکل ۴. نمونه‌های آزمون کشش بعد از انجام آزمون.

به کمک نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش، خواص مکانیکی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در جدول ۲ آورده شده است. شایان ذکر است که از ناهمسانگردی نمونه‌ها صرف نظر گردید.

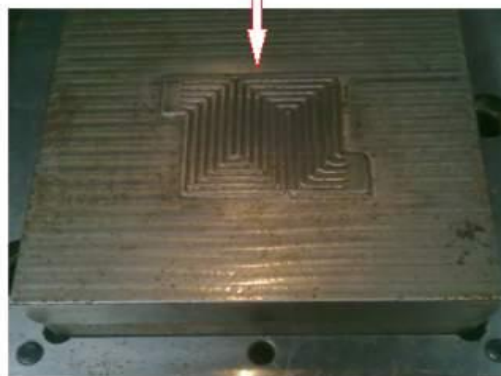
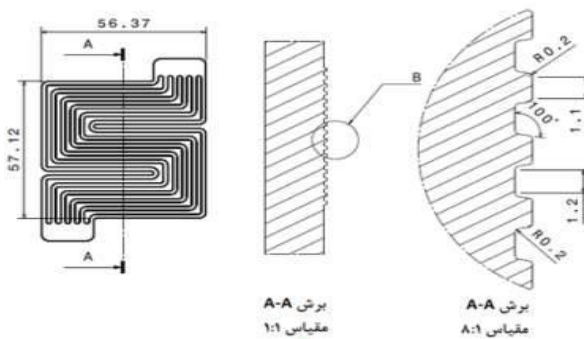
به‌منظور تعیین خواص مکانیکی، رفتار پلاستیک با رابطه  $\sigma = k(\epsilon + \epsilon_0)$  مدل شد که در آن  $k$  ضریب مقاومت ماده،  $n$  نمای کرنش سختی،  $\sigma$  تنش سیلان حقیقی،  $\epsilon$  کرنش حقیقی و  $\epsilon_0$  کرنش اولیه می‌باشد. برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی، قالبی که بر روی آن کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی ماشین‌کاری شده است، ساخته شد. شکل ۵ طرح الگوی شیار مارپیچ، ابعاد میکروکانال‌ها و قالب ماشین‌کاری شده را نشان می‌دهد. قالب مورد استفاده شامل بدنه اصلی و اینسرت مستطیلی از جنس فولاد SPK با طول ۱۶۰ میلی‌متر و عرض ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد که بر روی آن الگوی شیار مارپیچ قالب توسط دستگاه فرز CNC ماشین‌کاری گردید. مطابق با شکل ۵، شیارهای ایجاد شده بر روی قالب دارای عرض دیواره ۱/۲ و پهنای کانال ۱/۱ میلی‌متر می‌باشد.

<sup>1</sup> Wire Cut

## جدول ۲. خواص مکانیکی ورق فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶.

| مقدار | واحد       | خواص مکانیکی      |
|-------|------------|-------------------|
| ۲۰۰   | گیگاپاسکال | مدول الاستیک      |
| ۰/۳   | -          | ضریب پواسون       |
| ۲۶۹   | مگاپاسکال  | تنش تسلیم         |
| ۱۵۱۲  | مگاپاسکال  | ضریب استحکام ماده |
| ۰/۵۳  | -          | نمای کرنش سختی    |
| ۰/۰۴  | -          | کرنش اولیه        |

به‌منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی، از دو الگوی شکل‌دهی مقعر و محدب می‌توان استفاده کرد که در این مطالعه کانال‌های صفحات دوقطبی به‌صورت محدب بر روی قالب به‌وسیله فرایند ماشین‌کاری ایجاد شده است [۱۱]. علاوه بر این زاویه دیواره ۱۰ درجه و شعاع‌های گوشه بالا و پایین به اندازه ۰/۲ میلی‌متر برای جلوگیری از پارگی در ورق انتخاب شده است [۱۱؛ ۱۴؛ ۱۵]. عمق میکروکانال ماشین‌کاری شده بر روی قالب نیز برابر با ۰/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. در این فرایند لایه لاستیک در محفظه‌ای که دارای حفره‌ای متناسب با ابعاد آن است، قرار گرفته و به‌عنوان فک بالای قالب به‌کار رفته است. همچنین سنبه مورد استفاده که شیار مارپیچ صفحات دوقطبی روی آن ماشین‌کاری شده است، به‌عنوان فک پایین قالب در نظر گرفته شد.



شکل ۵. ابعاد کانال‌های ماشین‌کاری شده بر روی قالب و قالب ماشین‌کاری شده.

برای آغاز فرایند شکل‌دهی، ورق بر روی سنبه در فک پایین قرار داده شد و در مرحله بعد، پس از تنظیم میزان نیروی موردنظر بر روی پرس، فک بالای پرس شروع به حرکت کرد و با اعمال نیرو بر محفظه لاستیک، موجب ایجاد تغییر شکل الاستیک در لایه لاستیکی و پر کردن شیارهای قالب خواهد شد و در نتیجه با اعمال نیرو بر ورق که ناشی از ایجاد تغییر شکل در لاستیک می‌باشد، شیارهای موردنظر بر روی آن ایجاد خواهد شد. در آزمایش‌های صورت‌گرفته، نمونه‌ها تحت نیروهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ کیلو نیوتن شکل‌دهی شدند.

بهم‌منظور انجام آزمایش‌ها و مطالعه پارامترهای موردنظر، لایه لاستیکی از جنس پلی‌اورتان استفاده شده است. بر همین اساس برای بررسی تأثیر ویژگی‌هایی نظیر سختی و نیروی اعمالی، از لایه‌های لاستیکی با سختی ۶۰، ۸۵ و ۹۰ در مقیاس Shore A و ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است.

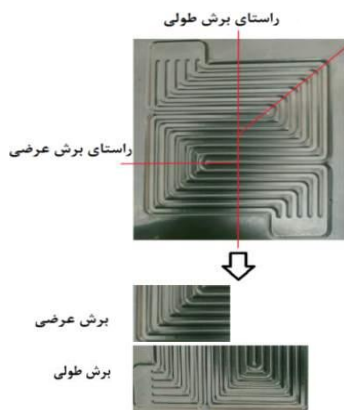
بهم‌منظور جلوگیری از سایش و برخورد لبه سنبه و محفظه نگه‌دارنده لاستیک، بین وجوه کناری سنبه و محفظه لاستیک، فاصله‌ای به اندازه ۲ میلی‌متر لحاظ شده است.

### نتایج و بحث

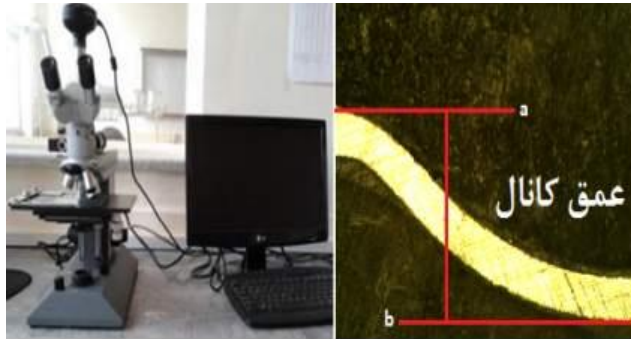
در گام بعدی به‌منظور ارزیابی و تحلیل نمونه‌ها و دستیابی به داده‌هایی نظیر عمق کانال صفحات دوقطبی در شرایط مختلف آزمایش، نمونه‌ها در راستاهای طولی و عرضی مطابق با شکل ۶ برش داده شد و عملیاتی بر روی آن‌ها برای آماده‌سازی سطح مقطع برش داده‌شده به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری انجام گردید. بدین منظور از دستگاه برش سیمی برای برش نمونه‌ها استفاده شد.

همچنین به دلیل کیفیت نامناسب سطح مقطع نمونه‌ها بعد از برش توسط دستگاه برش سیمی، برای افزایش دقت اندازه‌گیری، سطوح برش داده شده توسط رزین اپوکسی قالب‌گیری شد و سپس به‌منظور افزایش کیفیت سطح مقطع آن‌ها، عملیات سنباده‌زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت [۱۶].

در ادامه برای اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر در نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۴ و ۱۰ برابر استفاده شد که مجهز به نرم‌افزار اندازه‌گیری و آنالیز سطوح می‌باشد. به‌منظور اندازه‌گیری عمق کانال، ابتدا تصویری از سطح مقطع آن‌ها توسط میکروسکوپ تهیه شد و در مرحله بعد عمق کانال‌ها با استفاده از تصاویر و ابزارهای اندازه‌گیری تعبیه‌شده در نرم‌افزار مربوطه، اندازه‌گیری شد. تصویری از میکروسکوپ نوری و سطح مقطع کانال در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است با اندازه‌گیری فاصله بین خطوط  $a$  و  $b$  توسط نرم‌افزار آنالیز سطح، عمق کانال صفحات شکل داده شده، به‌دست می‌آید.



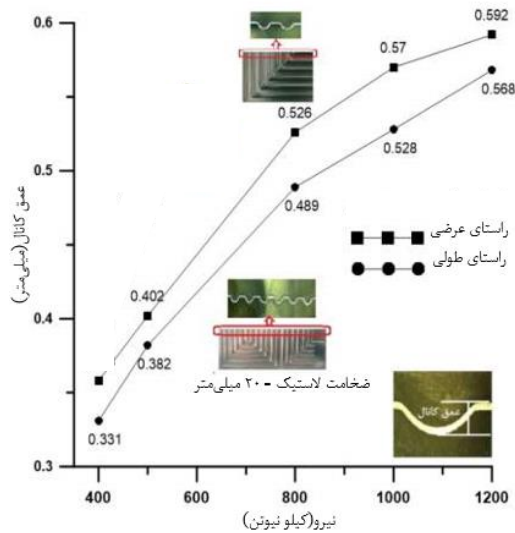
شکل ۶. راستاهای برش عرضی و طولی.



شکل ۷. میکروسکوپ نوری مجهز به کامپیوتر و نرم‌افزار آنالیز سطح.

### تأثیر نیرو در میزان عمق کانال

تأثیر میزان نیرو در عمق کانال صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در دو راستای طولی و عرضی با اعمال نیرو در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلونیوتن مطالعه شده است. در این آزمایش‌ها لایه لاستیکی با سختی Shore A ۹۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر به کار رفته است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، میزان عمق کانال با افزایش مقدار نیروی اعمالی افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش تغییر شکل لایه لاستیک در اثر افزایش نیرو و در نتیجه اعمال نیروی بیشتر به ورق فلزی و تغییر شکل آن می‌باشد. این روند افزایشی تا آن‌جا که لایه لاستیک قابلیت تأمین فشار لازم در محفظه قالب را داشته باشد، ادامه می‌یابد و بیشترین مقدار آن در راستای عرضی در نیروی ۱۲۰۰ کیلونیوتن و به میزان ۰/۵۹۲ میلی‌متر به‌دست آمده است (شکل ۸).



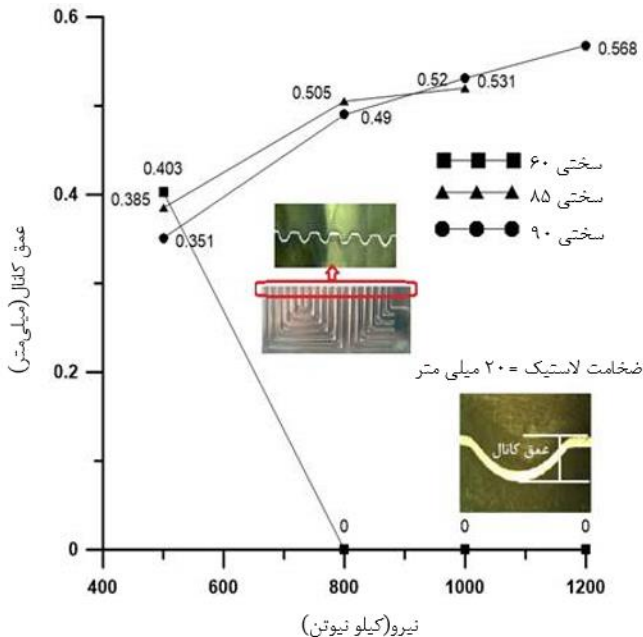
شکل ۸. بررسی تأثیر نیروی اعمالی بر روی عمق کانال.

## تأثیر سختی لایه لاستیکی

از آن‌جا که راستای طولی، مسیر اصلی میکروکانال می‌باشد، در شکل ۹ بررسی تأثیر سختی‌های مختلف لاستیک بر عمق کانال در راستای طولی نشان داده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر متغیرهای موردنظر، از لایه‌های لاستیکی با سختی‌های ۴۰، ۶۰، ۸۵ و ۹۰ در مقیاس Shore A با ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر میزان عمق کانال در راستای طولی به‌ازای لایه لاستیکی با سختی‌های متفاوت، تحت نیروهای مختلف، به‌طور کلی نشان‌دهنده افزایش میزان عمق کانال با کاهش سختی لایه لاستیکی می‌باشد. از سویی دیگر با توجه به مشاهدات انجام شده در آزمایش‌ها، لاستیک‌هایی با سختی کم از فضای موجود بین محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی و سنبه خارج می‌شود و تغییر شکل زیاد در این ناحیه سبب تخریب لایه لاستیکی خواهد شد. این پدیده موجب خواهد شد تا فشار لازم برای شکل‌دهی توسط لایه لاستیکی فراهم نگردد. بر این اساس لایه لاستیکی با سختی Shore A ۴۰ قابلیت تأمین فشار لازم در محفظه قالب تحت نیروی ۴۰۰ کیلو نیوتن را ندارد و به‌راحتی از فضای بین سنبه و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی، با تغییر شکل زیاد خارج شود و قابلیت استفاده برای شکل‌دهی صفحات موردنظر را ندارد. اتفاقی مشابه هنگام استفاده از لایه لاستیکی با سختی Shore A ۶۵ در نیروی ۵۰۰ کیلو نیوتن به وقوع می‌پیوندد که باعث ناکارایی لایه لاستیکی و تخریب آن در نیروهای بالاتر خواهد شد و به همین دلیل میزان عمق کانال در نیروهای بالاتر از ۵۰۰ کیلو نیوتن در لایه لاستیکی با Shore A ۶۵، صفر نشان داده شده است.

لایه لاستیکی با سختی بالاتر، در نیروهای ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلو نیوتن، از نظر میزان عمق کانال ایجاد شده در صفحات، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به لاستیک‌های نرم‌تر از خود نشان می‌دهد اما در نیروهای بالاتر از ۵۰۰ کیلو نیوتن به دلایل بیان‌شده لایه‌های لاستیکی با سختی کم عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند اما لاستیک‌های سخت‌تر در نیروهای بالا قابلیت تأمین فشار لازم برای شکل‌دهی را دارند و روند افزایشی میزان عمق کانال با افزایش نیرو ادامه پیدا می‌کند. با توجه به نتایج، بیشترین میزان عمق کانال در نیروی ۱۲۰۰ کیلو نیوتن و در لایه لاستیکی با سختی Shore A ۹۰ به میزان ۰/۵۹۲ میلی‌متر به‌دست آمده است.



شکل ۹. بررسی تأثیر سختی لاستیک بر عمق کانال در راستای طولی.

### دقت ابعادی

پس از بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر نیرو و سختی لایه لاستیکی بر میزان عمق کانال در راستاهای متفاوت و آگاهی از نحوه تأثیر متغیرهای مختلف بر آن، به بررسی دقت ابعادی در نمونه‌های شکل‌دهی شده توسط فرایند شکل‌دهی لاستیکی پرداخته خواهد شد.

دقت ابعادی به معنی یکنواختی عمق کانال‌های متفاوت در یک راستا تحت نیروی شکل‌دهی و مشخصات لایه لاستیکی یکسان می‌باشد. از این رو تمامی کانال‌های موجود در راستای طولی همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، شماره‌گذاری شده و عمق کانال‌های شماره ۲، ۳، ۱۰، ۱۱، ۱۵ و ۱۶ در راستای طولی به‌منظور بررسی دقت ابعادی در این تحقیق، اندازه‌گیری شده است.

اندازه‌گیری عمق کانال‌ها برای تعیین میزان دقت ابعادی، بر روی نمونه‌های شکل‌گرفته تحت نیروهای ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و لایه لاستیکی با عدد سختی Shore A 85 انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید اندازه‌گیری‌ها در کانال‌های کناری سمت راست و چپ و همچنین کانال‌های میانی انجام گرفته است که با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده اختلاف اندکی بین مقادیر عمق کانال‌های مختلف وجود دارد که بیانگر دقت ابعادی مناسب فرایند می‌باشد. برای بررسی کمی این مسئله، پارامتری به نام  $e$  مطابق رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$e = \frac{|h_m - h_k|}{h_m} \times 100 \quad (1)$$

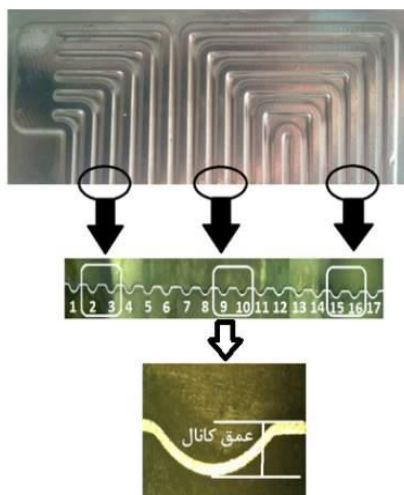
در رابطه ۱،  $h_m$  برابر با عمق میانگین کانال‌ها و  $h_k$  عمق کانال موردنظر می‌باشد.

بر این اساس، رابطه ذکر شده میزان انحراف عمق هر کانال از مقدار عمق کانال میانگین را نشان می‌دهد که این مقادیر برای صفحاتی که تحت نیروهای ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کیلونیوتن و لایه لاستیکی با عدد سختی Shore A 85 شکل‌دهی شده‌اند، در جدول ۳ نشان داده شده است.

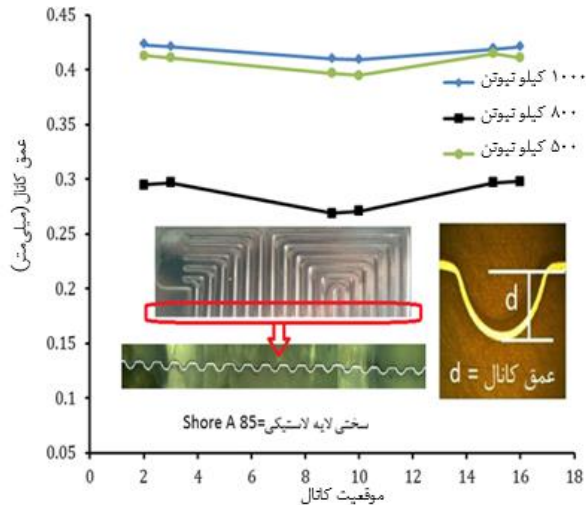
همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است بیشترین میزان انحراف از مقدار میانگین عمق کانال، به مقدار ۶/۵۴۳ درصد در نیروی شکل‌دهی ۵۰۰ کیلونیوتن و ۲/۹۸۴ درصد در نیروی ۸۰۰ کیلونیوتن و ۱/۹۵۸ درصد در نیروی ۱۰۰۰ کیلونیوتن می‌باشد.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این موضوع هستند که با افزایش مقدار نیروی شکل‌دهی، میزان انحراف عمق کانال‌های کناری و میانی از مقدار میانگین عمق کانال کاهش می‌یابد.

علاوه بر موارد ذکر شده، میزان دقت ابعادی در هر سه نیروی ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کیلونیوتن، به دلیل درصد انحراف اندک از مقدار میانگین، قابل قبول می‌باشد و نشان‌دهنده کیفیت بالای نمونه‌های شکل‌داده شده توسط فرایند شکل‌دهی لاستیکی است. با توجه به مطالب بیان شده میزان دقت ابعادی نمونه‌ها نسبت مستقیم با افزایش نیروی شکل‌دهی خواهد داشت و بیشترین دقت ابعادی تحت نیروی اعمالی ۱۰۰۰ کیلونیوتن به‌دست آمد.



شکل ۱۰. بررسی تأثیر سختی لاستیک بر عمق کانال در راستای طولی.



شکل ۱۱. میزان عمق کانال‌های طولی در موقعیت‌های متفاوت.

جدول ۳. میزان انحراف عمق کانال‌ها از مقدار میانگین.

| موقعیت کانال | کیلو نیوتن ۵۰۰ | کیلو نیوتن ۸۰۰ | کیلو نیوتن ۱۰۰۰ |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|
| ۱            | ۲,۴۹۰          | ۱,۴۷۴          | ۱,۳۹۸           |
| ۲            | ۳,۱۸۵          | ۰,۹۸۳          | ۰,۹۱۹           |
| ۳            | ۶,۵۴۳          | ۲,۴۷۵          | ۱,۷۱۸           |
| ۴            | ۵,۸۴۸          | ۲,۹۸۴          | ۱,۹۵۸           |
| ۵            | ۳,۱۸۵          | ۱,۹۶۶          | ۰,۴۴            |
| ۶            | ۳,۵۳۲          | ۰,۹۸۲          | ۰,۹۱            |

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، قابلیت شکل‌دهی صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ توسط فرایند شکل‌دهی لاستیکی بررسی شد و تأثیر متغیرهای فرایند نظیر نیرو و سختی لایه لاستیکی بر میزان عمق کانال صفحات دوقطبی که یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد و بازده پیل سوختی می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت.

در ابتدا تأثیر میزان نیروی اعمالی بر مقدار عمق کانال در دو راستای طولی و عرضی تحت نیروهای ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلو نیوتن بررسی شد. با توجه به نتایج، پرشدگی کانال‌ها در راستای عرضی بیشتر از راستای طولی بوده که این موضوع به دلیل تعداد کانال‌های کمتر در این ناحیه و جریان راحت‌تر لایه لاستیکی می‌باشد.

بیشترین میزان عمق کانال در راستای عرضی، در سختی لاستیک Shore A ۹۰ به میزان ۰/۵۹۲ میلی‌متر به دست آمد. در گام‌های بعدی تأثیر میزان سختی لایه لاستیکی بر عمق کانال صفحات دوقطبی ارزیابی شد که با توجه به نتایج لایه‌های لاستیکی با سختی کم در نیروهای ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلو نیوتن عملکرد بهتری نسبت به لایه‌های لاستیکی با سختی بالا دارند اما در نیروهای بالای ۵۰۰ کیلو نیوتن لاستیک‌هایی با سختی پایین قابلیت تأمین فشار شکل‌دهی مورد نیاز را ندارند؛ زیرا در نیروهای بالا، لایه‌های لاستیکی با سختی کم از فضای موجود بین محفظه نگه‌دارنده لاستیک و سنبه (لقی) خارج شده و امکان جریان یافتن در حفره‌های کانال کاهش می‌یابد. بر همین اساس لایه لاستیکی با سختی بالا

عملکرد بهتری نسبت به لاستیک‌های نرم‌تر در نیروهای اعمالی زیاد خواهد داشت. بیشترین مقادیر در نیروی ۱۲۰۰ کیلونیوتن و به میزان ۰/۵۶۸ میلی‌متر در راستای طولی به‌دست آمد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تولید صفحات پیل سوختی، دقت ابعادی نمونه‌ها می‌باشد که در این پژوهش این پارامتر در نمونه‌ای تولید شده تحت نیروی ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کیلونیوتن و لایه لاستیکی با سختی ۸۵ در مقیاس Shore A بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بیشترین میزان انحراف از مقدار میانگین عمق کانال‌ها به میزان ۲/۵۱۴ درصد می‌باشد که در فرایند شکل‌دهی نمونه‌ها تحت نیروی ۵۰۰ کیلونیوتن به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده میزان دقت ابعادی نمونه‌ها با افزایش نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در هر سه نیروی شکل‌دهی، میزان انحراف از مقدار میانگین عمق کانال‌ها کمتر از ۲/۵ درصد است که این موضوع نشان‌دهنده قابلیت مناسب این فرایند به‌منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد.

## References

- [1] Blunk, R. H. J., Lisi, D. J., Yoo, Y-E., & Tucker III, C. L. (2003). Enhanced conductivity of fuel cell plates through controlled fiber orientation. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 49(1), 18-29. <https://doi.org/10.1002/aic.690490104>
- [2] Müller, A., Kauranen, P., Von Ganski, A., & Hell, B. (2006). Injection moulding of graphite composite bipolar plates. *Journal of Power Sources*, 154(2), 467-471. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.096>
- [3] Peker, M. F. (2012). *Investigations on the micro-scale surface interactions at the tool and workpiece interface in micro-manufacturing of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells* [Doctor, Virginia Commonwealth University]. Richmond, Virginia. <https://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=3759&context=etd>
- [4] Bar-On, I., Kirchain, R., & Roth, R. (2002). Technical cost analysis for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 109(1), 71-75. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)0062-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)0062-9)
- [5] Sopian, K., & Wan Daud, W. R. (2006). Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*, 31(5), 719-727. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.003>
- [6] Heinzl, A., Mahlendorf, F., & Jansen, C. (2009). Bipolar Plates. In *Proton-Exchange Membrane Fuel Cells*. Elsevier. <https://booksite.elsevier.com/brochures/ecps/PDFs/BipolarPlates.pdf>
- [7] Ghaffari Torab Torki, R., Hassan, M. N., Kasaei, M. M., & Talebi-Ghadikolaei, H. (2020). Numerical and Experimental Study on Guillotine Shearing of a Complex Profile Produced by Roll Forming process. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 10(3), 1-15. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2020.8537.2952>
- [8] Li, Z., Tang, J., & Bai, J. (2020). A novel micro-EDM method to improve microhole machining performances using ultrasonic circular vibration (UCV) electrode. *International Journal of Mechanical Sciences*, 175(8), 105574. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105574>
- [9] Liu, S., Xia, Y., Liu, Y., Shi, Z., Yu, H., Li, Z., & Lin, J. (2022). Tool path planning of consecutive free-form sheet metal stamping with deep learning. *Journal of Materials Processing Technology*, 303(2), 117530. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117530>
- [10] Maleki, A., Ahmadi, A., & Talebi-Ghadikolaei, H. (2019). Numerical Investigation of Bending Angle and Entropy Generation in Laser Forming of High Strength Steel. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 9(4), 151-166. <https://doi.org/10.22044/jsfm.2020.7875.2791>

- [11] Liu, Y., & Hua, L. (2010). Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming. *Journal of Power Sources*, 195(11), 3529-3535. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.046>
- [12] Lim, S. S., Kim, Y. T., & Kang, C. G. (2013). Fabrication of aluminum 1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1), 231-238. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4162-8>
- [13] Belali-Owsia, M., Bakhshi-Jooybari, M., Hosseinipour, S. J., & Gorji, A. H. (2015). A new process of forming metallic bipolar plates for PEM fuel cell with pin-type pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(5), 1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6563-3>
- [14] Jeong, M-G., Jin, C-K., Hwang, G-W., & Kang, C-G. (2014). Formability evaluation of stainless steel bipolar plate considering draft angle of die and process parameters by rubber forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(5), 913-919. <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0417-7>
- [15] Bakhshi, M., Mohammadtabar, N., Hosseinipour, S. J., & Gorji, A. (2014). The Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field. *Modares Mechanical Engineering*, 14(8), 17-27. <https://mme.modares.ac.ir/article-15-7256-en.html>
- [16] Belali Osia, M., Hosseinipour, S. J., Bakhshi, M., & Gorji, A. (2015). Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die. *Modares Mechanical Engineering*, 14(10), 150-158. <https://mme.modares.ac.ir/article-15-1250-en.html>
- [17] Talebi-Ghadikolaee, H., Barzegari, M. M., Ahmadi Khatir, F., & Seddighi, S. (2022). Numerical-experimental study on the thickness distribution of metallic bipolar plates for PEM fuel cells. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*, 9(1), 1-18. <https://doi.org/10.22104/jjhfc.2021.5217.1230>