



## بررسی تاثیر متغیرهای فرایند شکل‌دهی انعطاف‌پذیر بر یکنواختی توزیع ضخامت میکروکانال‌های U شکل

حسین طالبی قادیکلایی\*

عضو هیئت‌علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۸ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

صفحات دوقطبی فلزی

شکل‌دهی فلزات

شکل‌دهی لاستیکی

عمق کانال

### چکیده

در این پژوهش تاثیر مشخصات لایه‌ی لاستیکی همچون سختی و ضخامت بر نازک شدن کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی در عمق یکسان، به صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی خواهد شد. صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای انجام مراحل تجربی از قالبی با شیار موازی و همچنین از پرس ۶۰ تن برای اعمال نیرو به مجموعه استفاده شده‌است. با توجه به نتایج بدست آمده کاهش سختی لایه‌ی لاستیکی باعث ایجاد توزیع ضخامت یکنواخت‌تری در عمق یکسان خواهد شد. حداقل ضخامت ایجاد شده در قطعه‌ی نهایی در فرایند شکل‌دهی توسط لایه‌ی لاستیکی با سختی ShoreA55 برابر با ۰/۷۰۳ می‌باشد که در مقایسه با سختی ShoreA90 بیانگر ۳/۱ درصد بهبود در میزان نازک‌شدگی می‌باشد. همچنین، افزایش ضخامت لایه‌ی لاستیکی موجب بهبود فرایند شکل‌دهی شده و طبق نتایج بدست آمده در عمق یکسان، لایه‌ی لاستیکی با ضخامت بالاتر موجب شکل‌دهی میکروکانال‌هایی با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر در نواحی بحرانی خواهد شد.

## Investigating the effect of flexible forming process variables on the uniformity of thickness distribution in U-Shaped Micro-channels

Hossein Talebi-Ghadikolaee\*

Faculty Member, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* Corresponding Author's Email: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 30 September 2023

Accepted: 23 October 2023

#### Keywords:

Metallic Bipolar Plate

Metal Forming

Rubber Pad Forming

Channel Depth

### Abstract

In this research, the effect of rubber layer characteristics such as hardness and thickness of the rubber layer on the thinning of metallic bipolar plate channels at a constant depth was investigated experimentally and through simulation. The accuracy of the simulation results was evaluated using experimental data. For the experimental stages, a die with parallel grooves and a 60-ton press were used to apply force to the forming die. According to the results obtained, reducing the hardness of the rubber layer will lead to a more uniform thickness distribution at the same depth. The minimum thickness of the formed sample using a Shore A 55 rubber layer was 0.703 mm, which represents a 1.3% improvement in thinning compared to Shore A 90 hardness. Furthermore, increasing the thickness of the rubber layer improves the shaping process, and based on the results at the same depth, a thicker rubber layer will result in the formation of microchannels with a more uniform thickness distribution in critical areas.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Talebi-Ghadikolaee H. Investigating the effect of flexible forming process variables on the uniformity of thickness distribution in U-Shaped Micro-channels. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 Apr 21;10(2):41-48. doi: 10.22034/IJME.2023.418762.1847 [In Persian]

## ۱- مقدمه

پیل‌های سوختی پلیمری به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر از قسمت‌های مختلفی از جمله غشای متخلخل، الکتروود و صفحات دو قطبی تشکیل شده‌اند تکنولوژی پیل سوختی علی‌رغم دارا بودن مزیت‌هایی نظیر بازده نسبتاً بالا، عملکرد آرام و بدون صدا، از لحاظ هزینه در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های تولید الکتریسته گران می‌باشد.

هزینه پیل سوختی ۴ تا ۱۰ برابر از موتورهای احتراق داخلی، بیشتر می‌باشد. (۳۰ تا ۴۰ دلار بر هر کیلووات در برابر ۲۰۰ تا ۴۰۰ دلار بر هر کیلووات) بنابراین در حال حاضر هزینه‌های بالای پیل سوختی مانع مهمی در برابر تجاری شدن این محصول می‌باشد [۱]. صفحات دو قطبی ۶۰ تا ۸۰ درصد از وزن مجموعه پیل سوختی و همچنین ۳۰ تا ۴۵ درصد از هزینه‌های آن را تشکیل می‌دهند در نتیجه در میان اجزای مختلف یک استک پیل سوختی، صفحات دو قطبی از لحاظ حجم، وزن و هزینه در جایگاه بالایی قرار دارند و با توجه به موارد ذکر شده صفحات دو قطبی را می‌توان از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی آن دانست [۲].

به دلیل اهمیت این صفحات در عملکرد مجموعه‌ی پیل سوختی و هزینه‌های آن، تحقیقات گسترده‌ای به منظور انتخاب جنس مناسب برای این صفحات و همچنین روش ساخت مناسب و کم هزینه برای آن انجام گرفته است [۳-۶]. بر این اساس صفحات گرافیتی، کامپوزیتی و فلزی به منظور ساخت صفحات دو قطبی مورد استفاده قرار گرفتند. در میان گزینه‌های ذکر شده، صفحات فلزی به دلیل ویژگی‌هایی همچون راسانایی بالا هزینه‌ی پایین، خواص مکانیکی و الکتریکی مطلوب، خواص گرمایی مناسب، قابلیت تولید نسبتاً بیشتر از صفحات گرافیتی و کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفتند [۷].

روش‌های مختلفی همچون فرایندهای شکل‌دهی لاستیکی، هیدروفرمینگ و استمپینگ [۸] برای تولید صفحات دو قطبی، تاکنون توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است. لیو و همکاران شکل‌دهی صفحات دو قطبی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از شبیه‌سازی دو بعدی فرایند مورد نظر برای بررسی اثر شعاع گوشه قالب و زاویه دیواره و سختی لاستیک، استفاده نمودند. مطابق با نتایج، افزایش شعاع گوشه باعث افزایش پرشدگی کانال‌ها می‌شوند و همچنین احتمال پارگی کاهش می‌یابد. لیو و همکاران شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس آلومینیوم ۱۰۵۰ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تاثیر ابعاد سطح مقطع کانال را بر روی نحوه‌ی جریان گازها در کانال مورد بررسی قرار داده و در ادامه تاثیر سرعت پرس، نیرو، ضخامت و سختی لاستیک بر روی عمق کانال‌ها مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج گزارش شده، افزایش ضخامت لایه لاستیکی و کاهش سختی آن و همچنین افزایش نیرو و سرعت پرس، موجب افزایش عمق کانال قابل در فرایند خواهد شد [۹]. جونگ و همکاران تاثیر سرعت پانچ، فشار اعمالی به مجموعه، ضخامت و سختی لاستیک را در شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس S.S۳۰۴ مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشد که عمق کانال‌ها دارای نسبت مستقیم با سرعت پانچ، فشار و ضخامت لاستیک می‌باشد و کاهش سختی لاستیک باعث بهبود قابلیت شکل‌دهی خواهد شد [۱۰].

همچنین در زمینه‌ی هیدروفرمینگ صفحات دو قطبی فلزی نیز تحقیقاتی انجام گرفته است که در این بین می‌توان به پژوهش محمدتبار و همکاران [۱۱] اشاره نمود. آنان شکل‌دهی یک الگوی شیری مارپیچ از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با فرایند هیدروفرمینگ را به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده این موضوع می‌باشند که با افزایش فشار شکل‌دهی، پرشدگی قالب افزایش می‌یابد و ضخامت ناحیه‌ی بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش، بیشتر کاهش می‌یابد. به علاوه، استمپینگ صفحات تیتانیومی نیز توسط مدانلو و همکاران [۱۲، ۱۳] مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج آنان، وقوع شکست و عمق کانال کم دو چالش اصلی در استمپینگ صفحات تیتانیومی می‌باشد. همچنین، چروک دیواره بیرونی صفحات دو قطبی، چالش بعدی در استمپینگ صفحات دو قطبی می‌باشد که توسط صدیقی و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت.

لازم به ذکر است که در میان روش‌های موجود برای شکل‌دهی صفحات دو قطبی، فرآیند شکل‌دهی لاستیکی به دلیل سادگی فرآیند، هزینه‌ی کمتر قالب، سرعت تولید بالا و کیفیت سطح مناسب، از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱۵، ۱۶]. مزیت‌های ذکر شده موجب استفاده از این فرایند برای شکل‌دهی صفحات دو قطبی فلزی شده است که در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

در پژوهش‌هایی که پیش‌تر بیان گردید، تاثیر سختی و ضخامت لایه‌ی لاستیکی، نیرو و سرعت برش بر عمق کانال به صورت تجربی بیان گردید و در پژوهش‌هایی که از شبیه‌سازی المان محدود برای تحلیل فرایند استفاده شده است، پارامترهای سنبه مانند الگوی محدب و مقعر، نسبت عمق کانال به پهنا، زاویه‌ی دیواره و شعاع گوشه‌ی قالب بر درصد نازک‌شدگی و درصد پرشدگی

مورد مطالعه قرار گرفتند اما نتایج بدست آمده در این پژوهش‌ها گویای تاثیر سختی و ضخامت لایه‌ی لاستیکی بر میزان نازک‌شدگی در میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در عمق یکسان نمی‌باشد و از آنجایی که لایه‌ی لاستیکی دارای نقش اساسی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی می‌باشد، در این پژوهش، شکل‌دهی یک الگوی شیاری موازی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با فرایند شکل‌دهی لاستیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر پارامترهایی همچون سختی و ضخامت لایه‌ی لاستیکی بر میزان نازک‌شدگی صفحات دو قطبی فلزی (در عمق کانال یکسان) مورد بررسی قرار گرفته که پارامتر مهمی در کیفیت نهایی صفحات تولید شده برای کاربرد در پیل‌های سوختی پلیمری می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

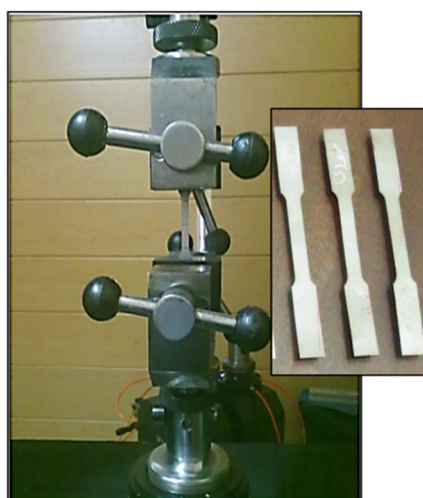
در این مطالعه از ورق فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و از الگوی شیار مارپیچ برای شکل‌دهی صفحات دو قطبی با طول و عرضی تقریباً برابر با ۵۵ میلی‌متر استفاده شده است. درصد عناصر الیازی ورق مورد استفاده در این پژوهش مطابق با نتایج حاصل از تست کوآنتومتری در جدول ۱ نشان داده شده است.

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  | آلومینیم     | ۰/۰۱ | مولیبیدن     | ۲/۱۱  |

به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی به کمک دستگاه برش سیمی، مطابق با استاندارد ASTM (E8M-04) تهیه شده است. آزمون کشش تک محوری به کمک دستگاه تست کشش یونیورسال انجام شد (شکل ۱). خواص مکانیکی و مومسان ورق به کمک داده‌های حاصل از تست کشش، تعیین شد. همچنین از ناهمسانگردی نمونه‌ها صرف نظر شد. به منظور تعیین کمی رفتار مومسان، از معادله سوئیفت استفاده شد و ضرایب آن با استفاده از نتایج آزمون کشش تعیین گردید (معادله ۱).

$$\sigma = 1512 (\epsilon + 0.04)^{0.53} \quad (1)$$



شکل ۱ دستگاه تست کشش و نمونه‌های آزمون

همچنین، در فرایند شکل‌دهی لاستیکی نیاز به یک قالب برای اعمال نیرو بر ورق شکل‌پذیر به منظور ایجاد الگوهای مورد نظر بر روی آن می‌باشد. در این پژوهش از قالبی که بر روی آن میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی با الگوی شیاری مستقیم توسط دستگاه فرز CNC ماشینکاری شده، استفاده شد. به منظور انجام فرایند شکل‌دهی از یک پرس ۶۰ تن استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از مجموعه قالب و پرس مورد استفاده، نشان داده شده است. به منظور آغاز فرایند شکل‌دهی، ورق بر روی سنبه در فک پایین قرار گرفت و در مرحله بعد، پس از تنظیم میزان نیروی مورد نظر بر روی پرس، فک بالای پرس شروع به حرکت نمود و با اعمال نیرو بر محفظه‌ی لاستیک، موجب ایجاد تغییر شکل الاستیک در لایه لاستیکی و پر کردن شیاریهای قالب شد و در نتیجه با اعمال نیرو بر ورق که ناشی از ایجاد تغییر شکل در لاستیک می‌باشد، شیاریهای مورد نظر بر روی آن ایجاد شد. در آزمایشات انجام گرفته در این پژوهش، نمونه‌ها تحت نیروهای ۳۵، ۴۵، ۵۵ کیلو نیوتن شکل‌دهی شدند. لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت شبه استاتیک فرایندهای شکل‌دهی و اثر ناچیز سرعت شکل‌دهی بر رفتار مواد حین تغییر شکل، اثرات نرخ کرنش در پژوهش حاضر در نظر گرفته نشد. در تست‌های تجربی برای بررسی پارامترهای مورد نظر، از لایه‌ی لاستیکی از جنس پلی‌اورتان با سختی ShoreA85 با ضخامت ۱۵ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۲ مجموعه قالب و پرس در آزمون‌های تجربی

علاوه بر آزمون‌های تجربی، شبیه‌سازی اجزای محدود نیز در این پژوهش برای ارزیابی اثر پارامترهای فرایند در کیفیت محصول تولیدی مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل همسانگرد در نظر گرفتن خواص ورق فولادی و همچنین کاهش زمان تحلیل، از مدل دو بعدی به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر همچون سختی و ضخامت لایه‌ی لاستیکی بر خروجی‌های مورد نظر استفاده شد. ورق و لایه لاستیکی بصورت تغییر شکل‌پذیر و سنبه و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی صلب تحلیلی در نظر گرفته شد. از آنجایی که قالب و محفظه نگه‌دارنده‌ی لایه لاستیکی به صورت صلب مدل شده‌اند در نتیجه المان‌بندی نشدند. خصوصیات مکانیکی ورق مطابق با نتایج آزمون کشش تک‌محوری، به مدل‌سازی اعمال شد. لایه لاستیکی به صورت هایپر الاستیک مدل شده و از بیان مونی ریویلین<sup>۱</sup> برای تعریف خواص آن استفاده شده است. در روش مونی ریویلین برای تعریف خواص ماده از ضرایب C10 و C01 و یا داده‌های تست فشار استفاده می‌شود [۱۴]. همچنین، مقدار ضریب اصطکاک برای تماس ورق و قالب ۰/۴۵ و ضریب اصطکاک، بین لایه لاستیکی و ورق ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است [۱۷].

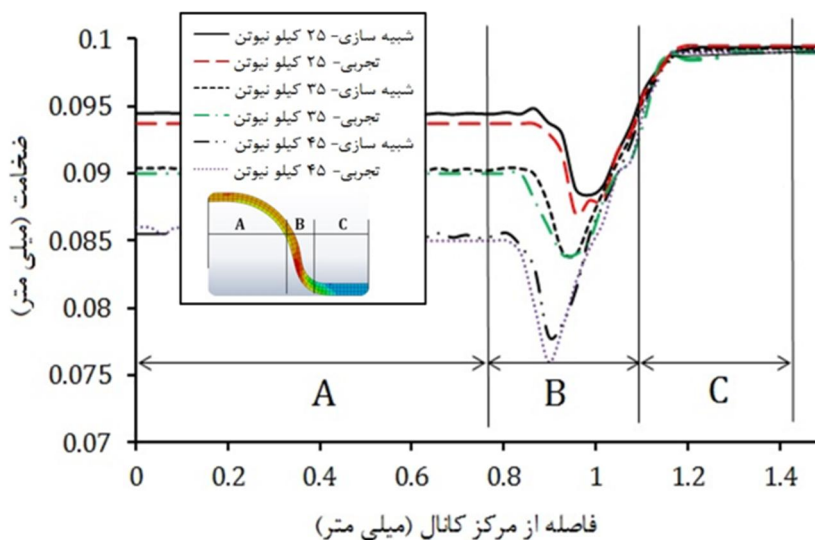
### ۳- نتایج و بحث

در ابتدا از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای بررسی صحت نتایج مدول اجزای محدود استفاده شد. به منظور بررسی تجربی توزیع ضخامت و اندازه‌گیری نتایج آزمون‌های تجربی، نمونه‌ها پس از شکل‌دهی برش داده شده و عملیاتی بر روی آن‌ها برای آماده‌سازی

<sup>1</sup> Mooney-Rivlin

سطح مقطع برش داده شده به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، انجام شد. بدین منظور برای برش نمونه‌ها از دستگاه برش سیمی استفاده شده است. همچنین بدلیل کیفیت نامناسب سطح مقطع نمونه‌ها بعد از برش توسط دستگاه برش سیمی، برای افزایش دقت اندازه‌گیری، سطوح برش داده شده توسط رزین اپوکسی قالب‌گیری شده و سپس به منظور افزایش کیفیت سطح مقطع آن‌ها، عملیات سنباذه زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در ادامه برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر در نمونه‌ها از میکروسکپ نوری با بزرگنمایی ۴ و ۱۰ برابر استفاده شد که مجهز به نرم‌افزار اندازه‌گیری و آنالیز سطوح می‌باشد. در شکل ۳ توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در آزمایش‌ها با نمودار توزیع ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شدند. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد و حداکثر اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی، کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

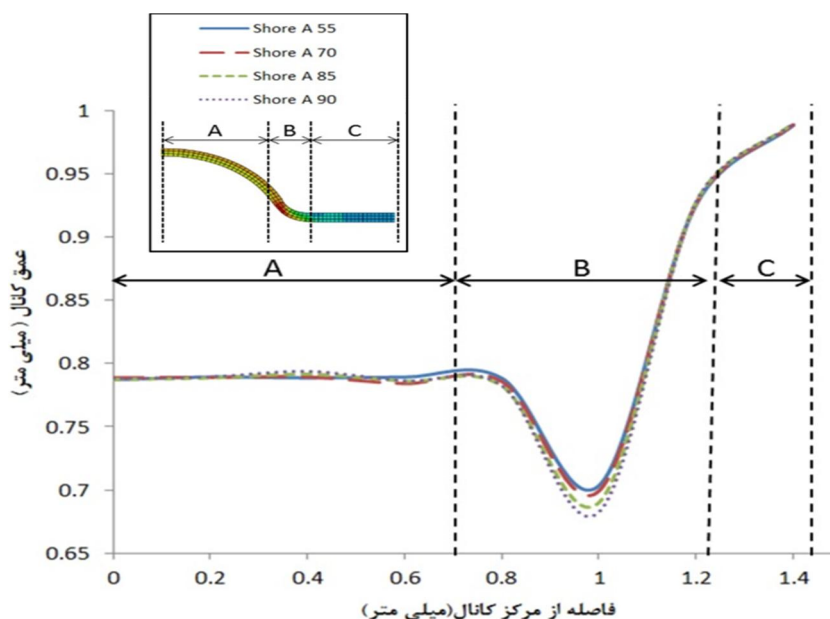
از جمله پارامترهایی که شکل‌دهی میکرو کانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، می‌توان به مشخصات لایه لاستیکی همچون سختی و ضخامت اشاره نمود. پارامترهای مذکور علاوه بر موثر بودن بر کیفیت صفحات از طریق بهبود توزیع ضخامت و همچنین نیروی مورد نیاز به منظور شکل‌دهی، بر هزینه‌های فرایند نیز تاثیر بسزایی داشته و بر این اساس مطالعه‌ی رفتار لایه‌های لاستیکی به منظور آگاهی از نحوه تاثیرگذاری آن‌ها بر فرایند، از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو تاثیر پارامتر یاد شده بر شکل‌دهی میکرو کانال‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳ توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی

مطابق با نتایج پژوهش حاضر، این پارامتر بر توزیع ضخامت در نواحی بحرانی میکرو کانال‌ها موثر می‌باشد که روند تغییرات توزیع ضخامت با تغییر سختی لایه لاستیکی در شکل ۴ نشان داده شده است.

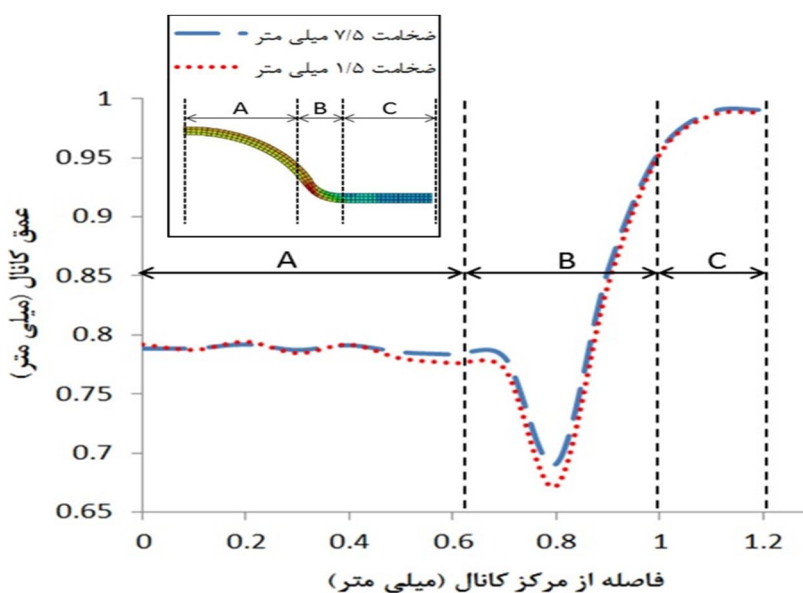
براین اساس نتایج بدست آمده کاهش سختی لایه لاستیکی موجب افزایش حداقل ضخامت بدست آمده در ناحیه بحرانی خواهد شد که این موضوع موجب بهبود شرایط شکل‌دهی و جلوگیری از وقوع پارگی خواهد شد. بر این اساس حداقل ضخامت بدست آمده با کاهش سختی لاستیک، افزایش می‌یابد به طوری که در فرایند شکل‌دهی توسط لایه لاستیکی با سختی Shore A55 حداقل ضخامت برابر با ۰/۷۰۳ میلی‌متر و در سختی لاستیک Shore A90 مقدار ۰/۶۸۲ میلی‌متر بدست آمد. در واقع، کاهش سختی لایه لاستیکی موجب می‌گردد تا عمق کانال‌های مورد نظر در نیروهای پایین‌تری شکل‌دهی شوند در نتیجه ورق با نیروی کمتری به دیواره قالب فشرده شود که این موضوع موجب راحت‌تر جریان یافتن ورق در نواحی بحرانی (ناحیه B) و در نتیجه بهبود کاهش ضخامت در این ناحیه خواهد شد.



شکل ۴ تاثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت

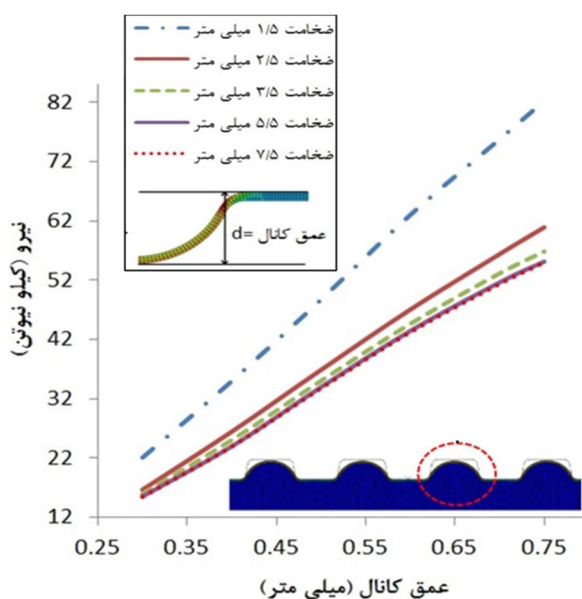
شکل ۵ نشان‌دهنده تاثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده می‌باشد. برای بررسی تاثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت نمونه‌ها از لایه لاستیکی با سختی Shore A85 استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده افزایش ضخامت لایه لاستیک موجب افزایش حداقل ضخامت ایجاد شده در ورق و بهبود توزیع ضخامت خواهد شد. شکل ۵ نشان‌دهنده روند تغییر توزیع ضخامت در شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی توسط لاستیک‌هایی با ضخامت ۱/۵ و ۷/۵ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نتایج، حداقل ضخامت در شکل‌دهی میکروکانال‌ها توسط لاستیک‌های با ضخامت ۱/۵ و ۷/۵ میلی‌متر برابر با ۰/۶۷۲ و ۰/۶۹۱ بدست آمده است.

مشابه با بهبود توزیع ضخامت در لاستیک‌هایی با سختی کمتر، افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب می‌گردد تا عمق کانال‌های مورد نظر در نیروهای پایین‌تری شکل‌دهی شوند در نتیجه ورق با نیروی کمتری به دیواره قالب فشرده شود که این موضوع موجب راحت‌تر جریان یافتن ورق در نواحی بحرانی (ناحیه B) و در نتیجه بهبود کاهش ضخامت در این ناحیه خواهد شد.



شکل ۵ تاثیر سختی لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت

موضوع کاهش نیرو به ازای افزایش ضخامت در شکل ۶ مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج، افزایش ضخامت لایه لاستیکی در این شرایط، از میزان ۱/۵ میلی‌متر تا ۵/۵ میلی‌متر موجب کاهش نیرو مورد نیاز برای شکل‌دهی خواهد شد. به بیان دیگر با افزایش ضخامت لاستیک، نیروی برابر با میزان عمق کانال ایجاد شده در میکروکانال‌ها افزایش می‌یابد. در هنگام شکل‌دهی میکروکانال، افزایش ضخامت لایه لاستیکی از ۵/۵ میلی‌متر به ۷/۵ میلی‌متر تاثیر قابل توجهی بر فرایند نخواهد داشت. افزایش میزان نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی با کاهش ضخامت لاستیک به این دلیل می‌باشد که به ازای جابجایی برابر در لایه لاستیک، میزان کرنش فشاری بیشتری در لایه لاستیکی با ضخامت کمتر ایجاد خواهد شد. این بدان معنی است که نیروی بالاتری برای ایجاد تغییر شکل در لایه‌ی لاستیکی با ضخامت کمتر نیاز می‌باشد در نتیجه کاهش ضخامت لایه‌ی لاستیکی موجب کاهش تغییر شکل ایجاد شده در آن به ازای نیروی یکسان شده و در نتیجه به میزان کمتری در کانال‌ها نفوذ کرده و متعاقباً عمق کانال کمتری در ورق‌های شکل داده شده ایجاد خواهد شد.



شکل ۶ تاثیر ضخامت لایه لاستیکی بر نیروی شکل‌دهی

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت شکل‌دهی صفحات دو قطبی پیل سوختی پلیمری با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ توسط فرایند شکل‌دهی لاستیکی مطالعه شد و تاثیر متغیرهای فرایند بر روند توزیع ضخامت در میکروکانال‌های صفحات دو قطبی، به صورت تجربی و عددی بررسی شد. در این راستا، تاثیر پارامترهایی همچون سختی و ضخامت لایه‌ی لاستیکی در شکل‌دهی میکروکانال‌ها مد نظر قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان شده است:

- کاهش سختی لایه لاستیکی موجب بهبود توزیع ضخامت در نواحی بحرانی خواهد شد به نحوی که در فرایند شکل‌دهی توسط لایه لاستیکی با سختی Shore A55 حداقل ضخامت برابر با ۰/۷۰۳ میلی‌متر و در سختی لاستیک Shore A90 مقدار ۰/۶۸۲ میلی‌متر بدست آمد.

- کاهش سختی لایه لاستیکی موجب می‌گردد تا عمق کانال‌های مورد نظر در نیروهای پایین‌تری شکل‌دهی شوند در نتیجه ورق با نیروی کمتری به دیواره قالب فشرده شود که این موضوع موجب راحت‌تر جریان یافتن ورق در نواحی بحرانی و در نتیجه کاهش نازک‌شدگی در این ناحیه خواهد شد.

- افزایش ضخامت لایه از میزان ۱/۵ میلی‌متر تا ۷/۵ میلی‌متر موجب کاهش نیرو مورد نیاز برای شکل‌دهی خواهد شد. در نتیجه جریان فلز هنگام شکل‌دهی راحت‌تر انجام گرفته که موجب بهبود ضخامت ناحیه‌ی بحرانی در شکل‌دهی تک و چهار کانال خواهد شد. حداقل ضخامت در شکل‌دهی میکروکانال‌ها توسط لاستیک‌های با ضخامت ۱/۵ و ۷/۵ میلی‌متر برابر با ۰/۶۷۲ و ۰/۶۹۱ بدست آمده است.

## References

- [1] Bar-On I, Kirchain R, Roth R. Technical cost analysis for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2002;109(1):71-5. doi: [10.1016/S0378-7753\(02\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00062-9)
- [2] Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International journal of hydrogen Energy*. 2005;30(12):1297-302. doi: [10.1016/j.ijhydene.2005.04.016](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.016)
- [3] Talebi-Ghadikolaee H, Barzegari MM, Seddighi S. Investigation of deformation mechanics and forming limit of thin-walled metallic bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(11):4469-91. doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.10.270](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.270)
- [4] Talebi-Ghadikolaee H, Ahmadi Khatir F, Seddighi S. Numerical-experimental study on the thickness distribution of metallic bipolar plates for PEM fuel cells. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*. 2022;9(1):1-18. doi: [0.22104/IJHFC.2021.5217.1230](https://doi.org/0.22104/IJHFC.2021.5217.1230)
- [5] Talebi-Ghadikolaee H, Elyasi M, Dadgar Asl Y, Zeinolabedin Beygi A, Davoudi M. Feasibility of Forming U-Shaped Microchannels by Flexible-Die Forming Process. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2022;19(3):53-70. doi: [10.48301/KSSA.2022.336972.2063](https://doi.org/10.48301/KSSA.2022.336972.2063)
- [6] Talebi-Ghadikolaee H, Modanloo V, Elyasi M, Khatir FA. Multiple criteria decision support analysis for manufacturing process parameters selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023;14644207231203312. doi: [10.1177/1464420723120331](https://doi.org/10.1177/1464420723120331)
- [7] Yuan XZ, Wang H, Zhang J, Wilkinson DP. Bipolar plates for PEM fuel cells-from materials to processing. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*. 2005;8(4):257.
- [8] Modanloo V, Talebi-Ghadikolaee H, Alimirzaloo V, Elyasi M. Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(7):5729-39. doi: [10.1016/j.ijhydene.2020.11.088](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.088)
- [9] Lim S, Kim Y, Kang C. 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*. 2013;65:231-8. doi: [10.1007/s00170-012-4162-8](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4162-8)
- [10] Jeong M-G, Jin C-K, Hwang G-W, Kang C-G. 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*. 2014;15:913-9. doi: [10.1007/s12541-014-0417-7](https://doi.org/10.1007/s12541-014-0417-7)
- [11] Mohammadtabar N, Bakhshi-Jooybari M, Hosseinipour S, Gorji A. Feasibility study of a double-step hydroforming process for fabrication of fuel cell bipolar plates with slotted interdigitated serpentine flow field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;85:765-77. doi: [10.1007/s00170-015-7960-y](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7960-y)
- [12] Modanloo V, Talebi-Ghadikolaee H, Alimirzaloo V, Elyasi M. Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Jan 27;46(7):5729-39. doi: [10.1016/j.ijhydene.2020.11.088](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.088)
- [13] Modanloo V, Mashayekhi A, Akhoundi B. Analysis of Formability in Stamping of Metallic Bipolar Plates with Parallel Flow Field for Proton Exchange Membrane Fuel Cells using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2024 Apr 1;15(2):170-6.
- [14] Seddighi S, Barzegari MM, Talebi-Ghadikolaee H. Numerical-experimental investigation of using rubber blank holder on wrinkling of metallic bipolar plates formed by stamping process. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023 Mar 31. doi: [10.1016/j.ijhydene.2023.03.172](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.172)
- [15] Talebi-Ghadikolaee H, Elyasi M, Mirnia MJ. Investigation of failure during rubber pad forming of metallic bipolar plates. *Thin-Walled Structures*. 2020;150:106671. doi: [10.1016/j.tws.2020.106671](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106671)
- [16] Talebi-Ghadikolaee H, Elyasi M, Shahgaldi S, Seddighi S, Kasaei MM, da Silva LF. The Effect of Rubber Hardness on the Channel Depth of the Metallic Bipolar Plates Fabricated by Rubber Pad Forming. *InMaterials Design and Applications IV 2022 Oct 30* (pp. 123-133). Cham: Springer International Publishing. doi: [10.1007/978-3-031-18130-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18130-6_9)
- [17] Talebi Ghadikolaee H, Seddighi S, Barzegari MM. Study of the forming process effects on the wrinkling and thinning percentage of the micro-channels with serpentine layout. *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*. 2023 Apr 1;10(1):81-93. doi: [10.22104/IJHFC.2023.6007.1255](https://doi.org/10.22104/IJHFC.2023.6007.1255)
- [18] SUN Y-n, Min W, WU X-d. Friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012;22(12):2952-9. doi: [10.1016/S1003-6326\(11\)61551-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61551-3)