



# اثر روان کار بر پرشدگی عمق کانال صفحات دوقطبی فلزی با الگوهای شکل دهی محدب و مقعر در فرآیند شکل دهی لاستیکی

مجید الیاسی<sup>1\*</sup>، فرزاد احمدی ختیر<sup>2</sup>، مرتضی حسین زاده<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل  
 2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، آمل  
 \* بابل، صندوق پستی 484، elyasi@nit.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 19 مهر 1394  
 پذیرش: 16 آبان 1394  
 ارائه در سایت: 14 آذر 1394  
 کلید واژگان:  
 شکل دهی لاستیکی  
 روان کار سیال و جامد  
 پرشدگی قالب  
 توزیع ضخامت صفحه دوقطبی فلزی

## چکیده

فرآیند شکل دهی لاستیکی، یک روش عملی و کم هزینه برای تولید صفحات دوقطبی فلزی با کانالهای جریان چند آرایه پیچیده می باشد. در این پژوهش، به بررسی اثر روان کار بر میزان پرشدگی کانالهای صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 316 و با ضخامت 0.1 میلی متر که با استفاده از فرآیند شکل دهی لاستیکی شکل داده شده است، می پردازد. بدین منظور از یک لاستیک پلی اورتان با عدد سختی شور A 85 و ضخامت 25 میلی متر و سه حالت روان کاری خشک، روغن SAE10 و نایلون پلی پروپیلن استفاده شده است. در ابتدا پروفیل پرشدگی و توزیع ضخامت صفحات شکل گرفته برای دو قالب محدب و مقعر در حالت بدون استفاده از روان کار بررسی شد. در ادامه به منظور افزایش بیشتر در عمق پرشدگی و رسیدن به توزیع ضخامت یکنواخت تر، تاثیر روان کار بررسی گردید. نتایج نشان داد که در فرآیند شکل دهی لاستیکی، به منظور افزایش بیشتر در عمق پرشدگی و توزیع ضخامت یکنواخت تر در کانالهای صفحات تولیدی می توان از روان کار استفاده کرد. همچنین در بین روان کارهای موجود، نایلون پلی پروپیلن به منظور مقاومت کششی بالا و ضخامت کم، بهترین گزینه برای تولید صفحات دوقطبی می باشد.

## Lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process

Majid Elyasi<sup>1\*</sup>, Farzad Ahmadi Khatir<sup>1</sup>, Morteza Hosseinzadeh<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran  
 \* P.O.B. 484, Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 11 October 2015  
 Accepted 07 November 2015  
 Available Online 05 December 2015

**Keywords:**  
 Rubber pad forming  
 Solid and oil Lubricant  
 Depth filling  
 Thickness distribution of metallic bipolar plate

### ABSTRACT

Rubber pad forming is a practical and low-cost method of producing metal bi-polar plates with complicated multi- array contours since it only needs a rigid die and flexible rubber. In this study, 316 stainless steel sheets with thickness of 0.1 mm were used. To form the plates, a polyurethane rubber was used with the hardness shore of A 85 with thickness of 25 mm. In order to increase the depth of the channel flow and form filling plates with a high depth-to-width ratio, firstly, the effects of lubricants on shaping metal plates were ignored. Subsequently, by implementing lubricants, their effects on achieving a higher filling depth and a more uniform thickness distribution were investigated. The results showed that in rubber pad forming process, lubricants could be used to further enhance the depth of filling and have a uniform thickness distribution in the channels of generated plates. Moreover, among available lubricants, polypropylene nylon will be the best alternative for the production of bipolar plates due to its high tensile strength and low thickness.

### 1- مقدمه

سوختی، بازدهی بالا به علت محدود نبودن شرایط و خصوصیات به سیکل کارنو، انتشار آلودگی پایین، عملکرد بدون سر و صدا، عدم دارا بودن قسمت هایی که نیاز به حمل و نقل سخت و پرهزینه دارند، می باشد. راندمان پیل های سوختی به دلیل تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به الکتریسیته (حذف مرحله تبدیل انرژی شیمیایی سوخت به حرارت) تابع قانون کارنو نیستند و با تکنولوژی حاضر مقدار راندمان به حدود 40 تا 65

امروزه با توجه به افزایش استفاده از آلوده کننده های محیطی، فناوری پیل سوختی به عنوان رویکرد اصلی، در صنایع دفاعی و نظامی، صنایع اتومبیل سازی و صنایع حمل و نقل مورد توجه قرار گرفته است. پیل های سوختی، هیدروژن یا سوخت های هیدروکربنی مانند متانول، اتانول و ... را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می کنند. از جمله خواص مورد توجه و مثبت پیل های

Please cite this article using:

M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir, M. Hosseinzadeh, Lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 450-460, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش ماشین‌کاری بدلیل زمان زیادی که برای تولید هر صفحه به کار می‌رود و همچنین نیاز به صفحات ضخیم و سنگین، از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. اما در روش شکل‌دهی برخلاف ماشین‌کاری می‌توان از صفحات با ضخامت بسیار کم استفاده کرد و همچنین به زمان بسیار کمتری نیاز دارد که برای تولید انبوه بسیار مناسب است. لذا از روش شکل‌دهی در سال‌های اخیر استقبال زیادی شده است.

به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی، روش‌های گوناگونی از جمله فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیسی<sup>2</sup>، شکل‌دهی با لیزر<sup>3</sup>، هیدروفرمینگ<sup>4</sup>، شکل‌دهی با گاز<sup>5</sup>، استمپینگ<sup>6</sup> و شکل‌دهی لاستیکی<sup>7</sup> وجود دارد [8].

یکی از رایج‌ترین روش‌ها در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، فرآیند شکل‌دهی با بالشتک لاستیکی می‌باشد. در این فرآیند، لاستیک در داخل یک محفظه صلب قرار می‌گیرد که از اطراف توسط این محفظه بسته شده و فقط سطح بالایی لاستیک با ورق و قالب به منظور پر کردن حفره‌های کانال در تماس است. در واقع محفظه صلب تنها نقش نگاه دارنده لاستیک و وظیفه جلوگیری از تغییر شکل بیش از اندازه لاستیک به اطراف به هنگام اعمال نیرو را بر عهده دارد. شکل‌دهی با استفاده از نیروی ایجاد شده توسط یک پرس هیدرولیکی به انجام می‌رسد که به دلیل خاصیت ارتجاعی لاستیک و بالا رفتن کیفیت سطحی، همیشه مورد توجه قرار می‌گیرد. برخی لاستیک‌ها دارای خواص مکانیکی مناسبی هستند که آن‌ها را به یک ابزار قابل تغییر شکل تبدیل کرده است. این موضوع به طراحان این اجازه را می‌دهد تا از انعطاف‌پذیری لاستیک و خواص مکانیکی آن در طراحی ابزار کمک بگیرند. انعطاف‌پذیر بودن لاستیک باعث می‌شود که حجم زیادی از عملیات ماشین‌کاری لازم برای ساخت ابزار حذف شود چرا که لاستیک با خواص شکل‌دهی مناسب، جایگزین نیمی از ابزار (سنبه یا ماتریس) می‌شود و نیمه دیگر با استفاده از خاصیت انعطاف‌پذیری لاستیک، شکل موردنظر را تحت بار اعمال شده به خود می‌گیرد و در مقایسه با فرآیند استمپینگ که به دو قالب بالا و پایین نیاز دارد، دارای هزینه ساخت قالب کم است [9].

از مزایای فرآیند شکل‌دهی لاستیکی می‌توان موارد زیر را نام برد:

1. صفحه لاستیکی استفاده شده در آن، تنها یک سطح لاستیکی صاف و بدون شکل خاص است و می‌تواند برای فرم‌های مختلف قالب استفاده شود.
2. این فرآیند تنها به یک طرف قالب صلب نیاز دارد که می‌تواند از مواد کم هزینه و با قابلیت ماشین‌کاری آسان تولید شود. چرا که فشار هیدرواستاتیک وارد بر آن‌ها بسیار کم می‌باشد.
3. به هنگام تولید و ساخت اشکال مختلف محصول، قالب‌ها را می‌توان بدون هم‌ترازی و یا مشکلات مربوط به عدم تطابق، به راحتی تعویض کرد.
4. قطعات با کیفیت سطح بسیار عالی را می‌توان با هیچگونه آثار ابزار بر روی سطح آن به راحتی شکل داد. همچنین پد لاستیکی، سطح فلز را از خش محافظت می‌کند. بنابراین امکان شکل‌دهی ورق‌های پوشش داده شده (گالوانیزه) با این فرآیند وجود دارد. در شکل 3 شماتیکی از فرآیند شکل‌دهی لاستیکی نشان داده شده است.

درصد می‌رسد. جریان الکتریکی خروجی پیل‌های سوختی جریان مستقیم با ولتاژ کم است. از این‌رو امکان استفاده مستقیم آن در بسیاری از وسایل برقی وجود دارد. برای تولید قدرتی در حد مطلوب، پیل‌های سوختی را می‌توان به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل کرده و یک توده پیل سوختی<sup>1</sup> را تشکیل داد. علاوه بر آن در صورت نیاز به جریان متناوب می‌توان با استفاده از یک مبدل الکتریکی، جریان مستقیم یک توده پیل سوختی را به یک جریانی متناوب تبدیل کرد [1].

در حال حاضر هزینه تولید پیل‌های سوختی در مقایسه با موتورهای احتراقی و باتری‌ها زیاد است و تجاری شدن آن نیاز به کاهش هزینه‌های تولید دارد که این کار با کاهش هزینه قطعات و مونتاژ امکان پذیر است. صفحات دوقطبی مجموعاً حدود 75 درصد از وزن و 11 تا 45 درصد از هزینه یک مجموعه پیل سوختی را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل انتخاب یک جنس و روش تولید مناسب برای صفحات پیل سوختی سهم بسزایی در بازده و طول عمر یک پیل سوختی و همچنین هزینه تمام شده آن ایفا می‌کند [2,3].

در دو سمت صفحات دوقطبی، کانال‌های ریزی موسوم به میکروکانال وجود دارد. وظیفه این کانال‌ها توزیع بهتر هیدروژن و اکسیژن در سراسر صفحات دوقطبی، خروج محصول جانبی ایجاد شده (آب)، انتقال الکترون‌های تولید شده، خنک‌کاری پیل سوختی و کاهش دمای آن جهت افزایش بازدهی پیل سوختی می‌باشد. شکل 1 نمایی از یک صفحه دوقطبی را نشان می‌دهد. یک صفحه دوقطبی شامل دو ناحیه سطح آندی-کاتدی (سطح تماس با MEA) و مسیر عبور جریان می‌باشد که در شکل 1 نشان داده شده است [4].

صفحات دوقطبی بدلیل قرار گرفتن در محیط مرطوب و شدیداً اسیدی باید مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشند. در غیر این صورت، لایه پایدار ناشی از خوردگی روی سطح صفحه دوقطبی فلزی سبب مسمومیت غشای الکترولیت و کاهش رسانایی یونی آن شده که موجب افت نهایی پیل سوختی گردیده و طول عمر آن را کاهش می‌دهد. همچنین این صفحات باید دارای استحکام مکانیکی بالا، مقاومت بالا در برابر شوک و ضربه، رسانایی الکتریکی و حرارتی خوب و سهولت در تولید کانال‌های جریان باشند.

صفحات پیل سوختی به‌طور کلی از نظر نوع جنس شامل گرافیت غیر متخلخل، کامپوزیت‌ها و مواد فلزی هستند. همچنین کامپوزیت‌ها به دو دسته پلیمر-کربن و پلیمر-فلز و فلزات به دو دسته با پوشش و بدون پوشش تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل 2 انواع صفحات دوقطبی که با روش‌های مختلف تولید شده است را نشان می‌دهد [5-7].

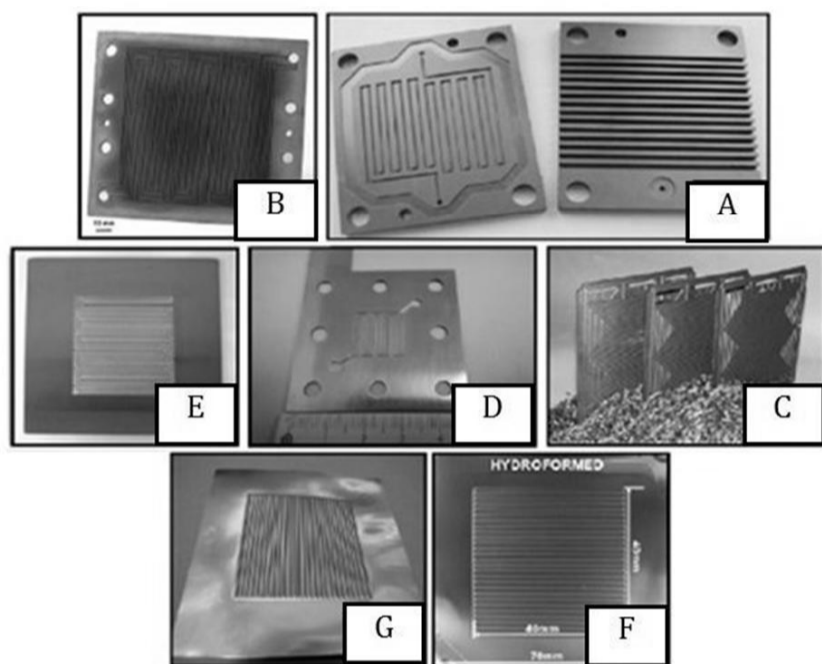
در میان انواع صفحات دوقطبی، صفحات فلزی به دلیل هدایت الکتریکی بالا، شکل‌پذیری راحت و به دنبال آن کاهش هزینه تولید و همچنین خواص گرمایی مطلوب، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مهمترین عیب فلزات، چگالی بالا و ضعف در برابر خوردگی می‌باشد. چرا که اتمسفر داخل پیل سوختی پلیمری خورنده بوده و شامل بخار آب، اکسیژن، محیط اسیدی الکترولیت و گرما می‌باشد. جهت محافظت در برابر خوردگی این صفحات از انواع پوشش‌هایی با جنس‌های مختلف اعم از پایه کربنی، پلیمری، گرافیتی و پایه فلزی مانند پوشش طلا و قلع استفاده می‌شود.

به منظور کاهش در هزینه نهایی این صفحات، باید از یک روش کارآمد و کم هزینه برای تولید این صفحات استفاده کرد. به طور کلی روش‌های ساخت صفحات دوقطبی فلزی به دو دسته ماشین‌کاری و شکل‌دهی تقسیم می‌شود.

2- Electromagnet Forming  
3- Laser Forming  
4- Hydroforming  
5- Gas Forming  
6- Stamping  
7- Rubber Pad Forming

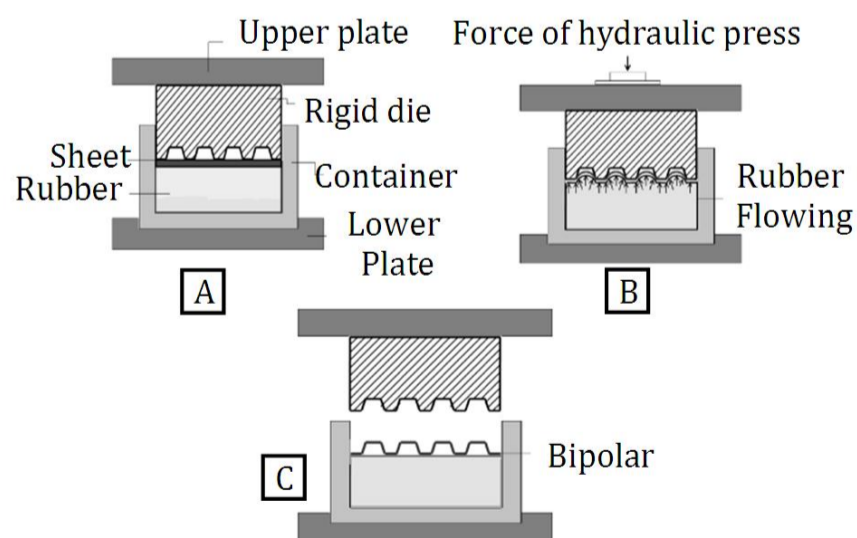
1- Fuel Cell Stack

فلزی در فرآیند شکل دهی لاستیکی انجام شده است، مشاهده گردید که در رابطه با الگوی شیاری، حداکثر نسبت ابعادی (عمق به عرض) که محققان به آن رسیده اند، 0.5 به دست آمده است. درحالی که در پژوهش حاضر با وجود پیچیدگی هندسی بالای الگوی شکل داده شده که الگوی مارپیچ موازی می باشد، نسبت 0.55 مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که هر چقدر نسبت عمق به عرض بیشتر باشد، عملکرد صفحه دوقطبی بهتر است. برای تولید یک صفحه دوقطبی فلزی هم می توان از قالب محدب که نقش سنبه را در فرآیند استمپینگ دارد و هم از قالب مقعر که نقش ماتریس را بازی می کند، استفاده کرد. اما چون در فرآیند شکل دهی لاستیکی،



**Fig. 2** Different types of bipolar plates: A) machined graphite plates, B) molded carbon-composite polymer, C) molded carbon/carbon plate, D) micro EDM stainless steel, E) formed stainless steel, F) photo-etched 430 stainless steel plate, G) 304 stainless steel sheet produced by stamping, covered with gold [13]

**شکل 2** انواع صفحات دوقطبی، الف) گرافیت ماشین کاری شده، ب) کامپوزیت کربن- پلیمر قالب گیری شده، ج) صفحه کربن- کربن قالب گیری شده، د) ورق فولادی زنگ نزن 316 ماشین کاری شده با روش میکرو EDM، ه) ورق فولادی زنگ نزن 430 فتو اچ شده، و) ورق فولادی زنگ نزن 304، تولید شده به روش هیدروفورمینگ، ی) ورق فولادی زنگ نزن 304، تولید شده با روش استمپینگ و با پوشش طلا [13]



**Fig. 3** The stages of producing a bipolar plate in rubber pad forming process, A) The placement of sheet between the mold and rubber pad, B) the application of hydraulic pressing force to the set, C) removing the formed sheet

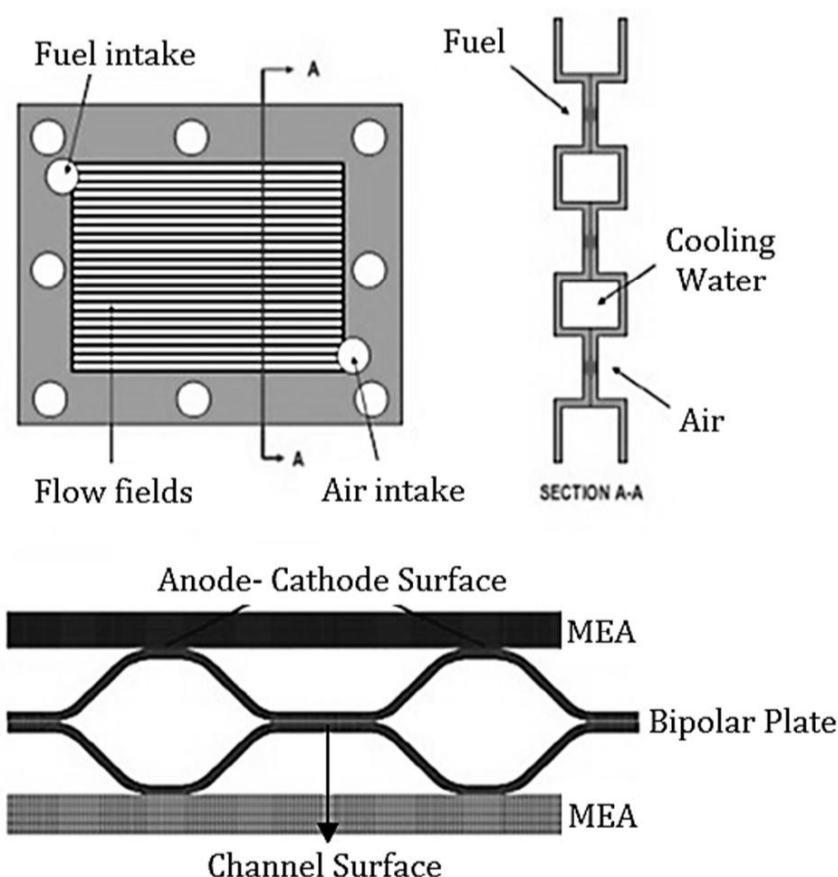
**شکل 3** مراحل تولید صفحه دوقطبی در فرآیند شکل دهی لاستیکی، الف) قرارگیری ورق بین قالب و پد لاستیکی، ب) اعمال نیروی پرس هیدرولیکی و جریان یافتن ورق و پد لاستیکی، ج) خارج کردن صفحه تولید شده

در زمینه تولید صفحات دوقطبی فلزی پژوهش هایی صورت گرفته است که در ادامه مطالب به چند نمونه از آن ها به اختصار اشاره شده است. لیو و همکاران در سال 2010 به بررسی تاثیر الگوهای شکل دهی برای تولید صفحات دوقطبی فلزی در فرآیند شکل دهی لاستیکی پرداخته اند. در این پژوهش دو قالب محدب و مقعر برای یک تک کانال از صفحات دوقطبی ساخته شده و تاثیر این دو الگو بر نیروی پخشدهی و توزیع ضخامت کانال ها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به کمک شبیه سازی دوبعدی نسبت عرض کانال ( $w$ ) به عرض دنده ( $s$ ) را مورد بررسی قرار داده اند و به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت عرض کانال به عرض دنده بزرگتر از یک باشد الگوی مقعر مناسب تر بوده و در غیر این صورت از الگوی محدب استفاده می شود [10].

محمد تبار و همکاران در سال 2014 شکل دهی بخشی از کانال های صفحات دوقطبی فلزی با الگوی جریان مارپیچ را با روش هیدروفورمینگ بررسی کردند. این محققان به شکل دهی صفحات فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 پرداختند و تاثیر پارامترهای هندسی همچون زاویه دیواره کانال، شعاع گوشه و نسبت ابعادی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه دیواره و شعاع گوشه میزان عمق پخشدهی کانال های جریان افزایش می یابد و بهترین حالت برای زاویه دیواره و شعاع گوشه به ترتیب 10 درجه و 0.2 میلی متر بدست آوردند [11].

در پژوهش پیشین که توسط الیاسی و همکاران در سال 2015 بر روی شکل دهی لاستیکی انجام گرفت، مشاهده شد که در حالت بدون استفاده از روان کار، میزان عمق پخشدهی محدود بوده و همچنین وجود لقی بین سنبه و ماتریس سبب می شود که لاستیک بعد از چندین مرحله شکل دهی، کارایی خود را از دست می دهد. همچنین عدم وجود روان کار باعث شد تا پیش از پخشدهی کامل کانال های جریان، پارگی در میکروکانال های صفحات رخ دهد [12].

با بررسی پژوهش هایی که تاکنون پیرامون شکل دهی صفحات دوقطبی



**Fig. 1** The structure of a grooved metal bipolar plate [4]

**شکل 1** ساختار صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیاری [4]

از آنجایی که در فرآیند شکل‌دهی لاستیکی، صفحه لاستیکی وظیفه هدایت ورق به درون حفره‌های قالب را دارد، لذا از یک لاستیک از جنس پلی اورتان با عدد سختی شور 85 A و به ضخامت 25 میلی‌متر می‌باشد، استفاده شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی لاستیک پلی اورتان، نمونه تست فشار مطابق استاندارد ASTM D575 تهیه شده و به کمک دستگاه تست فشار، نمودار تنش- کرنش حقیقی لاستیک که در شکل 8 نشان داده شده است، بدست آمده است. شکل 9 نمونه‌های لاستیکی و فک‌های فشاری جهت فشردن لاستیک را مشاهده می‌کنید.

از آنجایی که نحوه شکل‌گیری هر دو سطوح آندی- کاتدی و مسیر عبور جریان در یک صفحه دوقطبی اهمیت دارد، لذا به همین منظور دو قالب محدب و مقعر با زاویه دیواره و شعاع گوشه‌های کاملاً یکسان ساخته شد. مطابق شکل 10، تفاوت بین الگوی محدب و مقعر این است که در قالب با الگوی محدب، سطوح آندی- کاتدی در حال شکل‌گیری هستند. درحالی‌که در الگوی مقعر، مسیر عبور جریان یک صفحه دوقطبی شکل می‌گیرد.

جنس قالب‌ها از فولاد SPK بوده و شیارهای این قالب به کمک دستگاه کنترل عددی با دقت بالا ماشین‌کاری شده است. در جدول 3، ابعاد هندسی کانال‌های جریان برای هر دو الگو نشان داده شده است.

در این پژوهش از مجموعه قالبی با دو کفه به‌همراه اینسرتی قابل تعویض استفاده شده است. جنس بدنه کلی این قالب از فولاد ابزار سرد کار می‌باشد. کفه پایینی قالب به منظور جدا کردن محفظه نگاه‌دارنده و پد لاستیکی به‌صورت دو تکه ساخته شده است. شکل 11 مجموعه اجزای تشکیل دهنده قالب را در حالت مجزا از هم و حالت مونتاژ شده نشان می‌دهد.

از آنجایی که به منظور شکل‌دهی هندسه میکروکانال‌ها، نیروی زیادی لازم است، لذا از یک پرس هیدرولیکی با دقت بالا و مجهز به سیستم نشان‌دهنده نیرو بر روی کامپیوتر، با حداکثر ظرفیت 200 تن استفاده شده است. شکل 12 تصویری از این پرس را نشان می‌دهد.

مراحل انجام آزمایش بدین صورت می‌باشد که در ابتدا ورق متناسب با ابعاد شیارهای قالب بریده شده و در درون قالب تنظیم می‌گردد. سپس با قرار دادن دو کفه قالب بر روی هم و اعمال نیرو، شکل‌دهی انجام می‌گیرد. در این پژوهش در ابتدا شکل‌دهی ورق بدون استفاده از روان‌کار مورد بررسی قرار گرفته و ماکزیمم حد شکل‌دهی برای هر دو الگوی محدب و مقعر بدست آمده است. در ادامه به منظور افزایش بیشتر در عمق کانال‌های جریان و همچنین توزیع ضخامت یکنواخت‌تر برای صفحات تولید شده، تاثیر استفاده از روان‌کار مورد ارزیابی قرار گرفته است. کلیه مراحل تست، جهت انجام مقایسه صحیح، با شرایط کاملاً یکسان برای هر دو الگوی مقعر و محدب تست شده است. در جدول 4 پارامترهای فرآیندی همچون نیروهای شکل‌دهی، دمای شکل‌دهی و نوع روان‌کار استفاده شده جهت انجام تست‌های لازم را نشان می‌دهد.

پس از شکل‌دهی صفحات، به منظور بررسی پروفیل پرشدگی و توزیع ضخامت کانال‌های صفحات تولید شده، نمونه‌ها مطابق شکل 13 به کمک دستگاه برش سیمی در راستای طولی و راستای عرضی که تحت زاویه 45 درجه نسبت به راستای طولی می‌باشد، برش می‌خورند. همان‌طور که از شکل پیداست، به هنگام برش نمونه‌ها سطح مقطع کانال در اثر حرارت ناشی از برش سوخته شده است. بنابراین به منظور اندازه‌گیری دقیق پروفیل پرشدگی کانال‌ها و همچنین اندازه‌گیری ضخامت در ناحیه بحرانی کانال، لازم است تا سطح مقطع نمونه‌ها کاملاً صاف و عاری از پلیسه باشد. بدین منظور باید بر

لاستیک جایگزین یکی از دو سمت قالب شده است، انتخاب سمت دیگر قالب که می‌تواند یکی از دو قالب محدب یا مقعر باشد، در تولید صفحه نهایی تاثیرگذار باشد. در زمینه بررسی تاثیر الگوهای شکل‌دهی محدب و مقعر، تنها مرجع [10] نحوه شکل‌پذیری ورق را از لحاظ نسبت ابعادی ( $w/s$ ) برای یک کانال از صفحات دوقطبی، بصورت شبیه‌سازی بررسی کرده است. درحالی‌که نحوه شکل‌پذیری سطوح آندی- کاتدی و مسیر عبور جریان بررسی نگردید. در زمینه خوردگی صفحات دوقطبی فلزی تحقیقات گوناگونی انجام شد و مشاهده شد که در صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده، سطوح آندی- کاتدی (سطوحی که با MEA در تماس می‌باشد) بشدت در معرض شرایط خوردگی قرار دارند. به همین دلیل، کیفیت سطح بالایی در این نواحی نیاز می‌باشد [14]. از طرفی زبری سطح مناطقی که در آن تغییر شکل اتفاق می‌افتد (قله) در مقایسه با سطوح در تماس با قالب (دره)، با افزایش نیروی شکل‌دهی، با روند سریع‌تری افزایش می‌یابند [15]. از آنجایی که در پژوهش حاضر، در قالب محدب، مسیر عبور جریان ثابت بوده و سطوح آندی- کاتدی در حال شکل‌گیری است و برعکس در قالب مقعر سطوح آندی- کاتدی ثابت بوده و مسیر عبور جریان در حال شکل گرفتن است، لذا لازم است تا توزیع ضخامت در هر یک از این دو سطح بررسی گردد تا بهترین صفحه دوقطبی از لحاظ عملکرد تولید گردد.

در این پژوهش به منظور بهبود عمق پرشدگی کانال‌های جریان، تاثیر استفاده از روان‌کار بررسی گردید. لذا صفحات شکل‌گرفته در سه حالت بدون روان‌کار، استفاده از روان‌کار روغن SAE 10 و روان‌کار نایلون پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت.

## 2- مراحل تجربی

شکل 4 شماتیک قطعه مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، قطعه مورد نظر صفحه دوقطبی با الگوی تکرار شونده مارپیچ موازی می‌باشد. با توجه به مراجع قبلی، بهترین ترکیب زاویه دیواره و شعاع گوشه به ترتیب 10 درجه و 0.2 میلی‌متر به دست آمده بود که در این پژوهش نیز این مقادیر انتخاب شد. اما عمق کانال‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که با توجه به ضخامت اولیه ورق، فرآیند شکل‌دهی لاستیکی در پیچیده‌ترین حالت نسبت به پژوهش‌های پیشین بررسی گردد. برای انجام آزمایشات از ورق فولادی زنگ نزن آستنیتی 316 با ضخامت 0.1 میلی‌متر استفاده شده است. به‌منظور تعیین صحت آلیاژ مورد نظر و تعیین ترکیب شیمیایی آن، تست کوانتومتری گرفته شد. جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق استفاده شده را برحسب درصد وزنی عناصر نشان می‌دهد. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی، مطابق استاندارد ASTM E8M نمونه‌هایی در ابعاد کوچک<sup>1</sup> در راستای نورد ورق به کمک دستگاه برش سیمی<sup>2</sup> تهیه شد. به‌منظور صحت سنجی نتایج، سه نمونه تهیه گردیده و به کمک دستگاه کشش انیورسال سنتام، نمونه‌ها کشیده شدند. شکل 5 دستگاه تست کشش و همچنین نمونه‌های تهیه شده برای تست کشش را قبل و بعد از آزمایش نشان می‌دهد. رفتار پلاستیک ماده به‌صورت  $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$  تعریف شده است. خواص مکانیکی ورق مورد نظر پس از انجام تست کشش به‌دست آمد که در جدول 2 نشان داده شده است. همچنین شکل 6 و 7 به ترتیب نمودار تنش- کرنش مهندسی و حقیقی را برای ورق فولادی آستنیتی زنگ نزن 316 نشان می‌دهد.

1- Sub Size  
2- Wire Cut  
3- Swift law

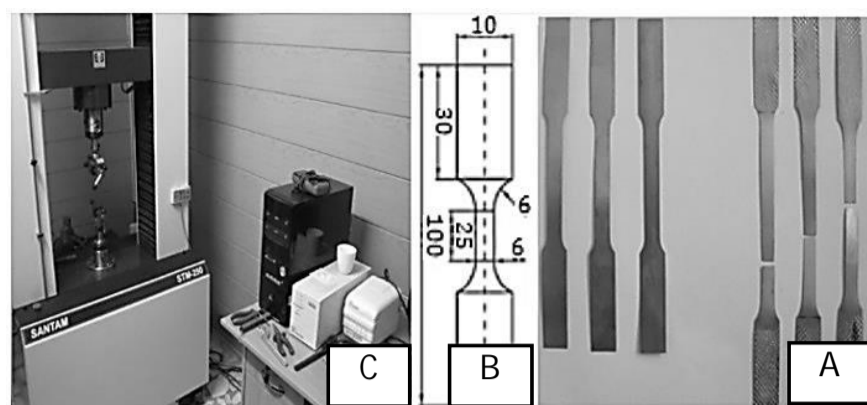


Fig. 5 Tensile test of sheet steel plate austenitic 316, A) Before and after tensile test, B) size of the sample, C) tensile testing machine

شکل 5 تست کشش ورق آستنیتی 316، الف) نمونه‌ها قبل و بعد از کشش، ب) ابعاد هندسی نمونه تست کشش، ج) دستگاه تست کشش سنتام

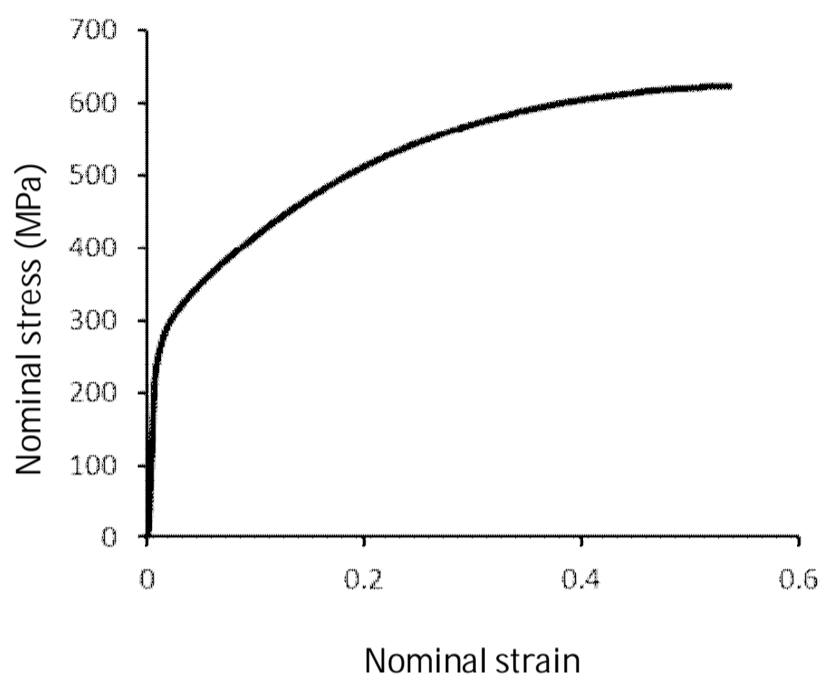


Fig. 6 Nominal stress-strain curve of austenitic stainless steel 316

شکل 6 منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه فولادی زنگ نزن آستنیتی 316

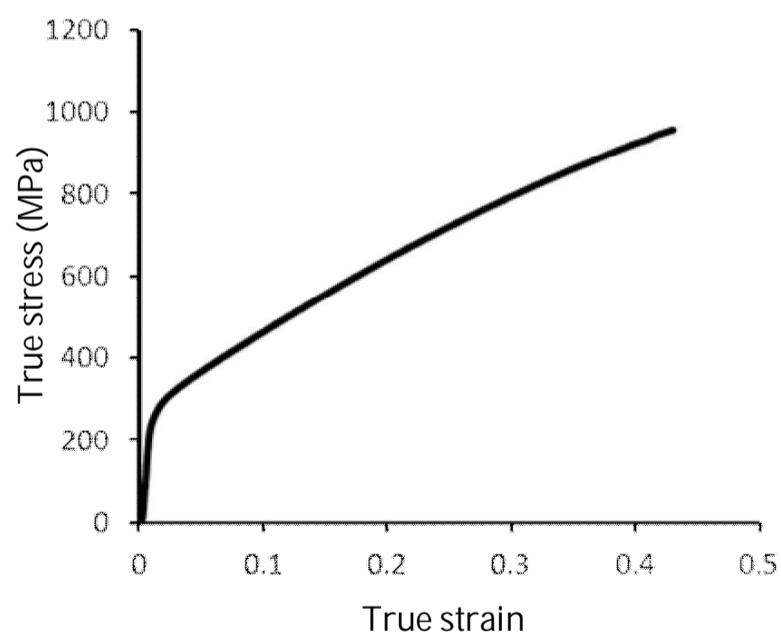


Fig. 7 True stress-strain curve of austenitic stainless steel 316

شکل 7 منحنی تنش - کرنش حقیقی نمونه فولادی زنگ نزن آستنیتی 316

بررسی پارگی استفاده شده است. حداکثر نازک‌شدگی با استفاده از رابطه (1) مشخص می‌شود.

$$\text{درصد نازک‌شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $t_0$  ضخامت اولیه ورق می‌باشد و مقدار ضخامت نهایی  $t_f$  از رابطه (2) بدست می‌آید.

$$t_f = t_0 \exp(\epsilon_f) \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی ( $e_f$ ) در شرایط کرنش صفحه‌ای از طریق

روی نمونه‌های برش خورده عملیات سنباده زنی و پولیش کاری صورت گیرد. لذا فرآیند مانت کردن بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد تا هم عمل سنباده‌زنی راحت‌تر انجام شود و هم بتوان پروفیل مقطع را به‌صورت عمود در زیر میکروسکوپ مشاهده کرد. در ابتدا پروفیل نمونه‌ها در دستگاه اندازه‌گیری تصویری - ویدیویی<sup>1</sup> با بزرگ‌نمایی X2 مشاهده گردیدند. در ادامه به منظور اندازه‌گیری با دقت بالاتر لازم است تا پروفیل نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی بیشتر مشاهده گردند، لذا از دستگاه میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی X4 استفاده شد. جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت و پروفیل پرشدگی کانال‌ها از نرم افزار اندازه‌گیری<sup>2</sup> که بر روی سیستم کامپیوتر نصب بوده و سیستم کامپیوتر به میکروسکوپ متصل می‌باشد، استفاده شده است. شکل 13 خلاصه مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها از مرحله برش تا اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

### 3- معیار توزیع ضخامت و درصد پرشدگی کانال

مطابق با مرجع [16]، در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای

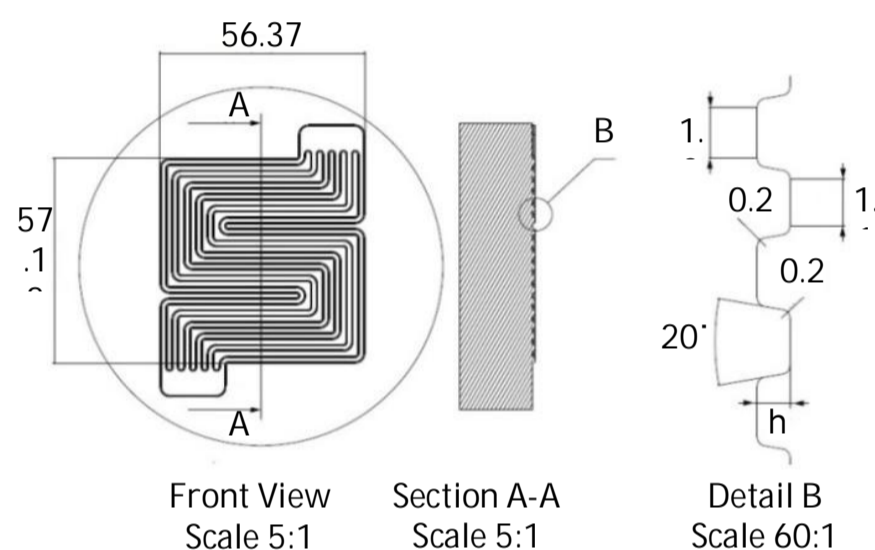


Fig. 4 The frame of parallel worming grooves of a bipolar plate and its geometric dimensions (mm)

شکل 4 نقشه الگوی شیاری مارپیچ موازی و ابعاد هندسی (میلی‌متر)

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق فولادی آستنیتی 316 بر حسب درصد وزنی عناصر

Table 1 Chemical composition of the sheet according to the weight percentage of elements

عناصر	درصد	عناصر	درصد	عناصر	درصد
کروم	15.150	گوگرد	0.005	منگنز	1.440
مس	0.360	فسفر	0.058	سیلیسیم	0.660
وانادیم	0.090	کالت	0.280	آلومینیم	0.010
نیوبیم	0.002	تیتانیوم	0.040	تنگستن	0.071
قلع	0.023	سلنیم	0.030	سرب	0.010
کربن	0.047	نیکل	12.190	مولیبدن	2.110

جدول 2 خواص مکانیکی ورق فولادی آستنیتی 316

Table 2 Mechanical properties of stainless steel 316

مقدار	خواص مکانیکی
200	مدول الاستیک، $E$ (GPa)
0.3	ضریب پواسون، $\nu$
269	تنش تسلیم، $\sigma_y$ (MPa)
1512	ضریب استحکام، $K$ (MPa)
0.53	نمای کرنش سختی، $n$

1- VMM-VMS  
2- Measurement

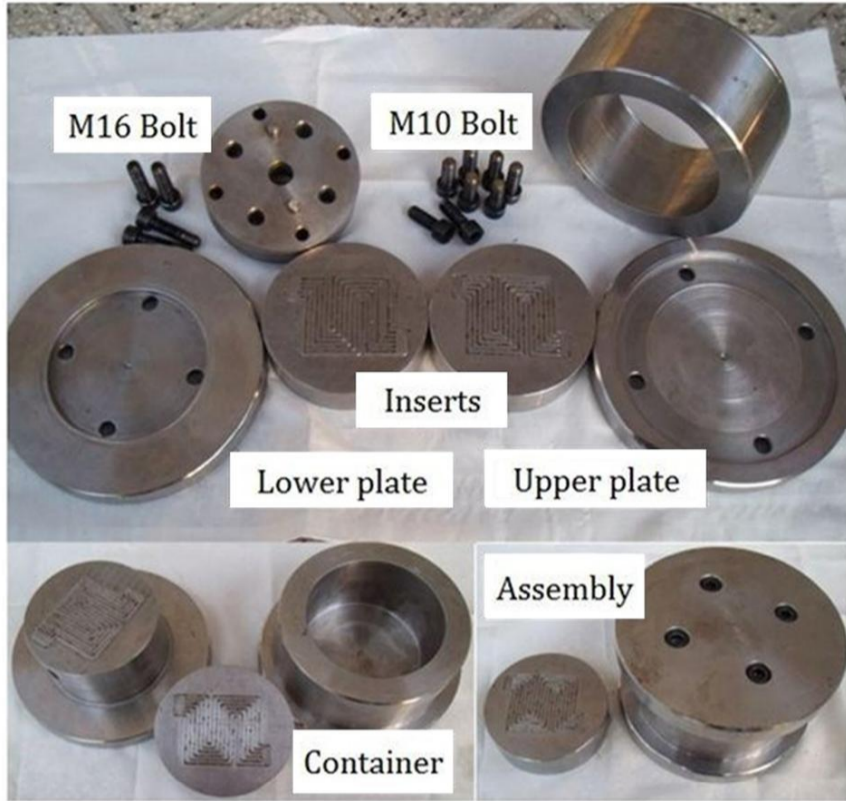


Fig. 11 Components of die in separate and assembled view  
شکل 11 اجزای قالب در حالت مجزا و اسمبل شده

جدول 3 ابعاد و اندازه‌های دو قالب ساخته شده (میلی‌متر)

Table 3 Dimension of concave and convex dies (mm)

الگوی مقعر	الگوی محدب	پارامترهای هندسی
1.1	1.1	مسیر عبور جریان ( $W$ )
1.2	1.2	سطح آندی - کاتدی ( $S$ )
0.75	0.75	عمق کانال ( $h$ )
0.2	0.2	شعاع گوشه بالا ( $R$ )
0.2	0.2	شعاع گوشه پایین ( $r$ )
10	10	زاویه دیواره ( $\alpha$ درجه)



Fig. 12 Applied hydraulic stamping device for acting force on the die with capacity of 200 ton  
شکل 12 دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت 200 تن جهت اعمال نیرو به قالب

با استفاده از روابط (4) و (5) و محاسبه ( $\epsilon_t$ ) و جای گذاری در رابطه (2) مقدار ( $t_f$ ) بدست آمده و به دنبال آن طبق رابطه (1) حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. مقدار حداکثر نازک‌شدگی برای ورق فولادی زنگ نزن 316، 37% بدست آمده است که با مقدار حداکثر نازک‌شدگی تجربی

رابطه (3) تخمین زده می‌شود:

$$e_r = \left[ \left( 23.3 + \frac{360}{25.4} t_0 \right) \left( \frac{n}{0.21} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن،  $n$  نمای کرنش سختی و  $t_0$  ضخامت اولیه ورق می‌باشد. با توجه به برقراری روابط (4) و (5) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی و کرنش ضخامتی  $\epsilon_t$  تعیین می‌شود.

$$\epsilon_r = \ln(1 + e_r/100) \quad (4)$$

$$\epsilon_t = -\epsilon_r \quad (5)$$

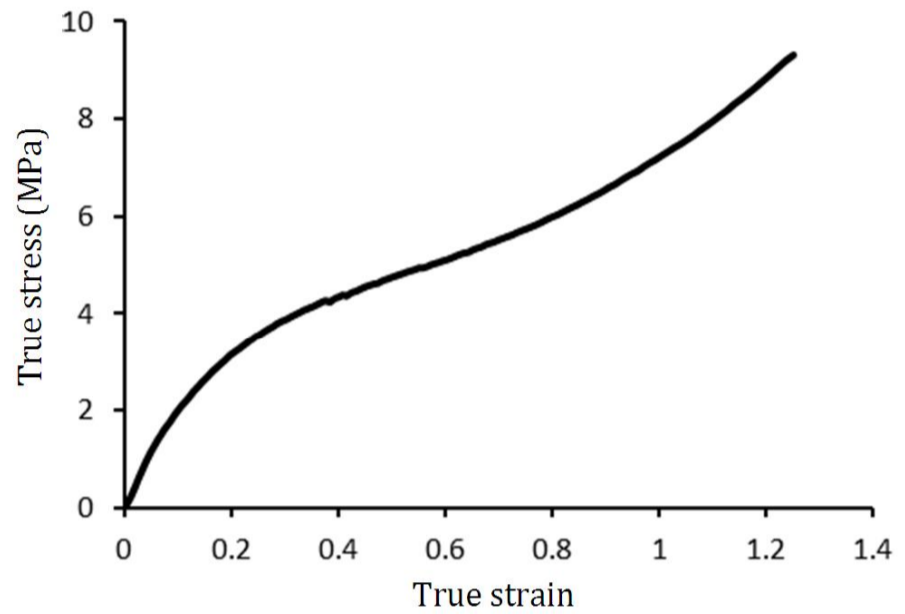


Fig. 8 Tension curve according to polyurethane rubber with hardness shore A 85

شکل 8 نمودار تنش برحسب کرنش لاستیک پلی اورتان با عدد سختی شور A85

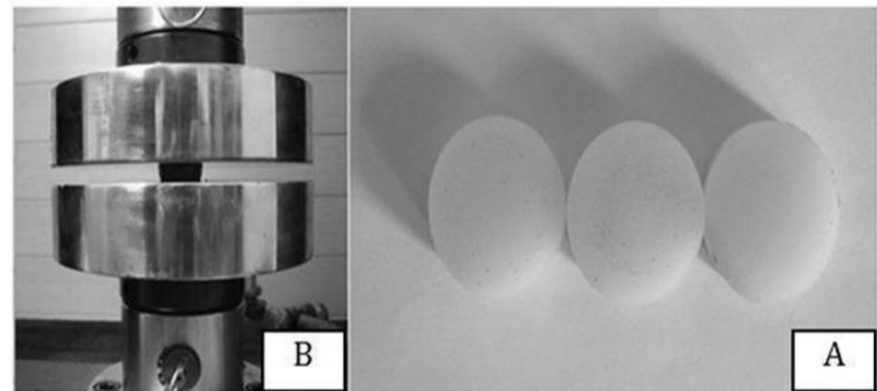


Fig. 9 A) Samples of rubber pressure test, B) Compression jaws

شکل 9 الف) نمونه‌های تست فشار لاستیک، ب) فک‌های فشاری دستگاه

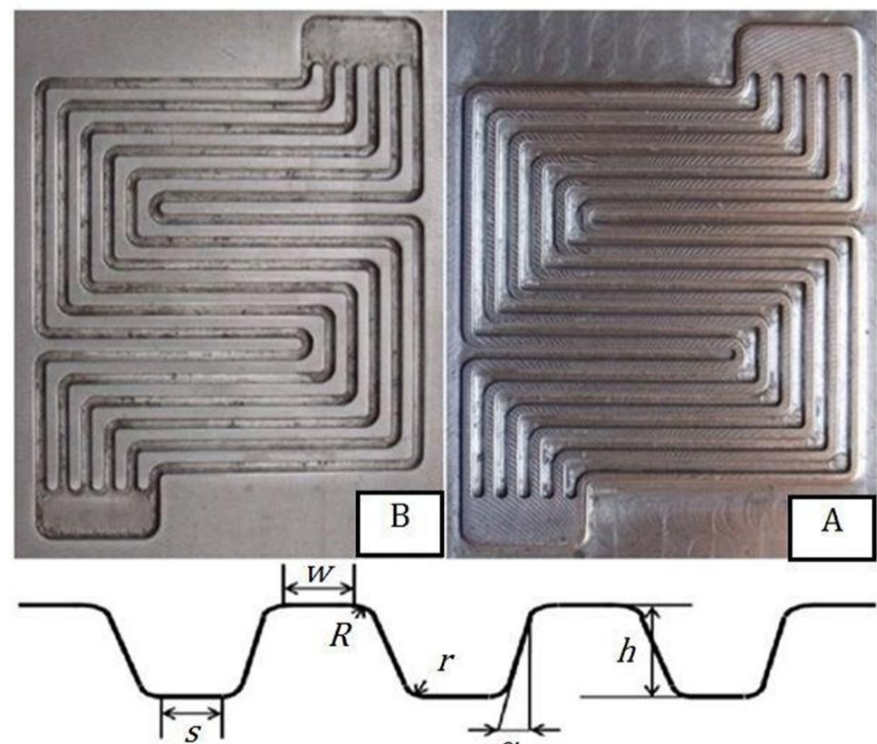


Fig. 10 Used dies in this study, A) The convex die, B) The concave die  
شکل 10 قالب‌های استفاده شده، الف) قالب با الگوی محدب، ب) قالب با الگوی مقعر

برای بررسی درصد پرشدگی از رابطه (6) استفاده شده است. این رابطه بر مبنای مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده، به مساحت کل حفره قالب در ناحیه بحرانی می باشد. رابطه (6) به وضوح در شکل 15 نشان داده شده است.

$$\text{درصد پرشدگی} = \frac{\text{مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \times 100 \quad (6)$$

#### 4- تحلیل نتایج

در این بخش، اثر روان کار بر میزان پرشدگی کانال صفحات دوقطبی و توزیع ضخامت قطعه فرم داده شده در دو الگوی محدب و مقعر مورد بررسی قرار گرفته است و ماکزیمم حد شکل دهی صفحات تا قبل از رسیدن به پارگی بررسی گردیدند.

#### 4-1- بررسی اثر روان کار بر میزان پرشدگی

هدف اصلی این پژوهش، تولید یک صفحه دوقطبی سالم با حداکثر عمق پرشدگی و کمترین میزان نازک شدگی و همچنین بررسی اثر الگوهای قالب بر روی قطعات سالم شکل داده شده می باشد. بدین منظور برای هر دو الگوی محدب و مقعر، صفحات در بالاترین حد شکل دهی، شکل داده شدند.

شکل 16 پروفیل پرشدگی نمونه محدب را در برش طولی و در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن SAE10 و روان کار نایلون پلی پروپیلن در ماکزیمم حد شکل دهی شان مقایسه می کند. همان طور که در شکل مشاهده می گردد استفاده از نایلون پلی پروپیلن بیشترین مقدار پر شدگی را دارا می باشد. علت این امر آن است که با توجه به آن که ورق به طور کامل بین قالب و صفحه پلی اورتان قرار دارد، بالا بودن اصطکاک سبب می شود که جریان ورق به سختی انجام شده و ورق کشیده شود. بنابراین تنش کششی در ورق افزایش یافته و پاره می گردد. بیشترین درصد پرشدگی مطابق رابطه 6 در این حالت 60% بدست آمده است.

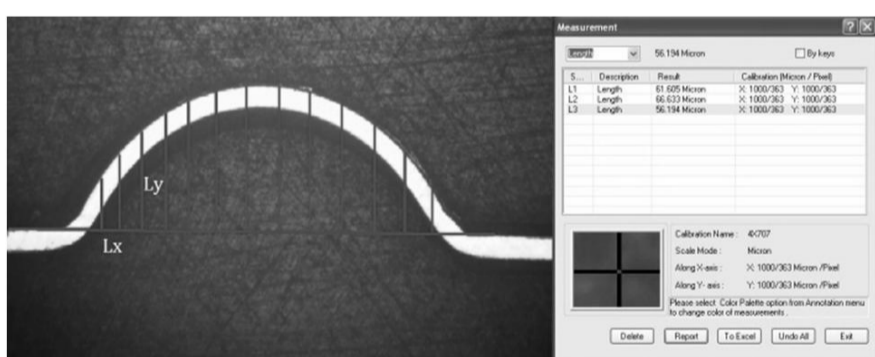


Fig. 14 The method of measuring the filling depth of bipolar plate channels

شکل 14 نحوه اندازه گیری عمق پرشدگی کانال های صفحات دوقطبی

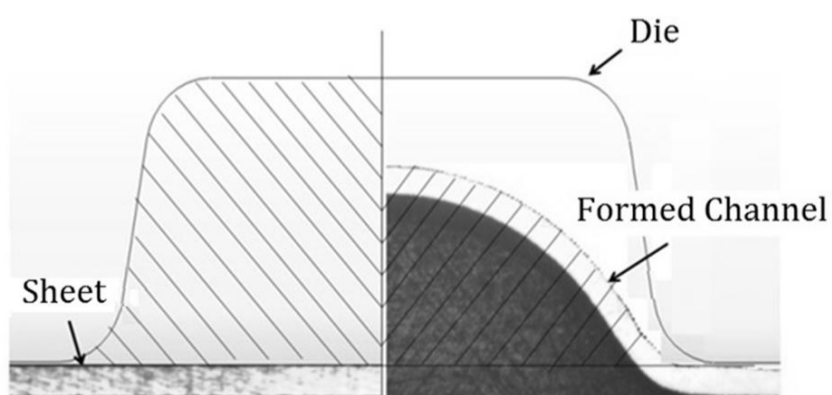


Fig. 15 View of the area of the formed sheet and the area of die cavity  
شکل 15 نمایی از مساحت ورق شکل گرفته و مساحت حفره قالب

جدول 4 پارامترهای فرآیندی جهت شکل دهی صفحات

Table 4 The process parameters for forming plates

پارامترهای فرآیندی	الگوی محدب	الگوی مقعر
دمای شکل دهی (°C)	25	25
نیروهای شکل دهی (تن)	55-60-75-80	55-60-75-80
سرعت شکل دهی (mm/s)	5	5
نوع روان کار	نایلون پلی پروپیلن روغن SAE10	نایلون پلی پروپیلن روغن SAE10

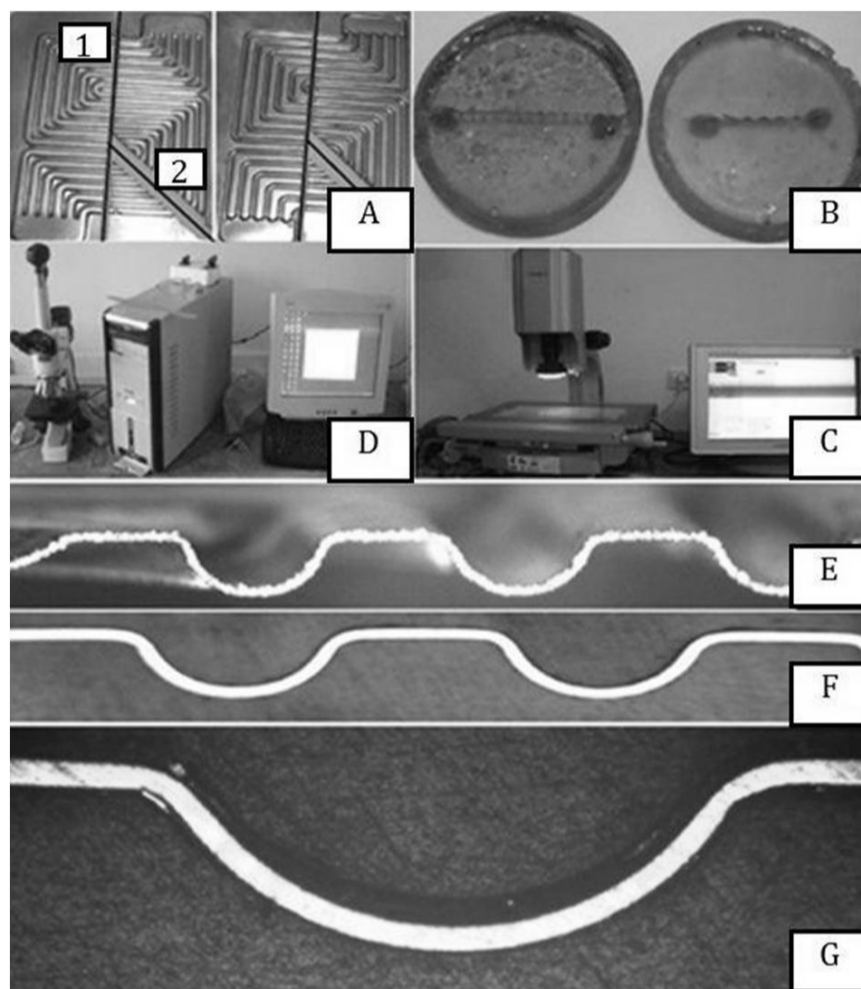


Fig. 13 Preparation stages of formed samples in order to survey the thickness distribution and filling profile of samples, A) sheet cutting in both longitudinal (1) and cross-sectional (2) directions, B) the mounting of longitudinal and cross-sectional samples to observe the profile under microscope, C) measuring VMM-VMS device for observing mounted profile with X2 magnifying, D) microscope to observe mounted profile with X4 magnifying, and also to measure samples, E) image of not-polished sample with X2 magnifying, F) image of polished X2 magnifying, G) image of channel die with X4 magnifying

شکل 13 مراحل آماده سازی نمونه های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و مشاهده پروفیل پرشدگی نمونه ها، الف) برش ورق در دو راستای طولی و عرضی برای دو نمونه محدب و مقعر، ب) مانت کردن نمونه های طولی و عرضی به منظور مشاهده مقطع در زیر میکروسکوپ، ج) دستگاه اندازه گیری تصویری-ویدیویی جهت مشاهده مقطع پروفیل مانت شده با بزرگنمایی X2، د) میکروسکوپ جهت مشاهده مقطع پروفیل مانت شده با بزرگنمایی X4 و همچنین اندازه گیری نمونه ها، ه) تصویر نمونه برش خورده با بزرگنمایی X2، ی) تصویر نمونه سنباده خورده و پولیش شده با بزرگنمایی X2، ز) تصویر کانال با بزرگنمایی X4

اندازه گیری شده که 34% می باشد، اختلاف ناچیزی دارد.

به منظور مشاهده میزان پرشدگی کانال های جریان صفحات دوقطبی، لازم است تا پروفیل کانال شکل گرفته با کانال قالب مقایسه گردد تا از این طریق بتوان درصد پرشدگی کانال های جریان را با دقت بالا اندازه گیری کرد. شکل 14 نحوه اندازه گیری میزان پرشدگی را نشان می دهد.

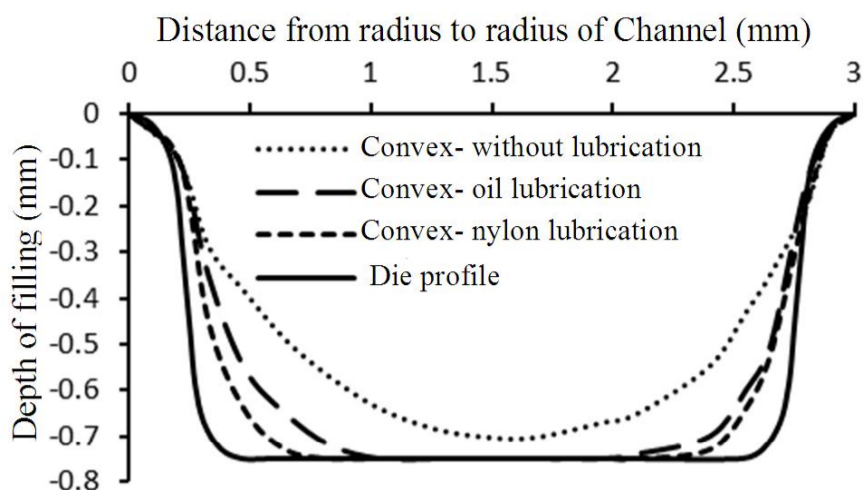


Fig. 17 Comparing the convex sample filling profile in cross-sectional direction and maximum filling depth in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 17 مقایسه پروفیل پرشدگی نمونه محدب در راستای عرضی و در عمق پرشدگی ماکزیمم، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

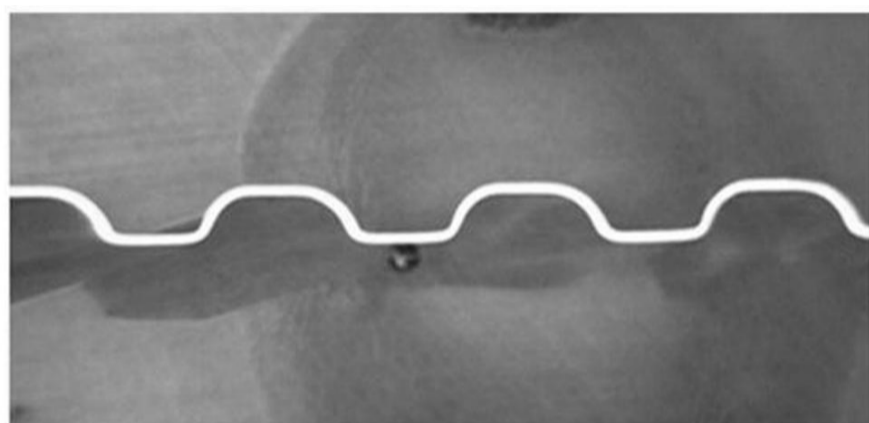


Fig. 18 Profile image of the convex sample in cross-sectional direction with nylon lubricant

شکل 18 تصویر پروفیل نمونه محدب در راستای عرضی با استفاده از روان کار نایلون

بدون روان کار 49%، با روان کار روغن 62% و برای روان کار نایلون 67% اندازه گیری شده است. شکل 20 پروفیل پرشدگی الگوی مقعر را در راستای عرضی نشان می دهد. همان طور که از شکل 10 مشخص است، پروفیل مسیر عبور جریان بین راستای طولی و عرضی در الگوی مقعر از اختلاف اندکی برخوردار است. به همین جهت میزان پرشدگی در راستای طولی و عرضی اختلاف کمی دارند و شکل پروفیل در این دو راستا تقریباً به هم نزدیک است. مشابه با حالت طولی، در این راستا نیز صفحات در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون با یکدیگر مقایسه شدند که درصد پرشدگی به ترتیب 50%، 65% و 70% بدست آمده است.

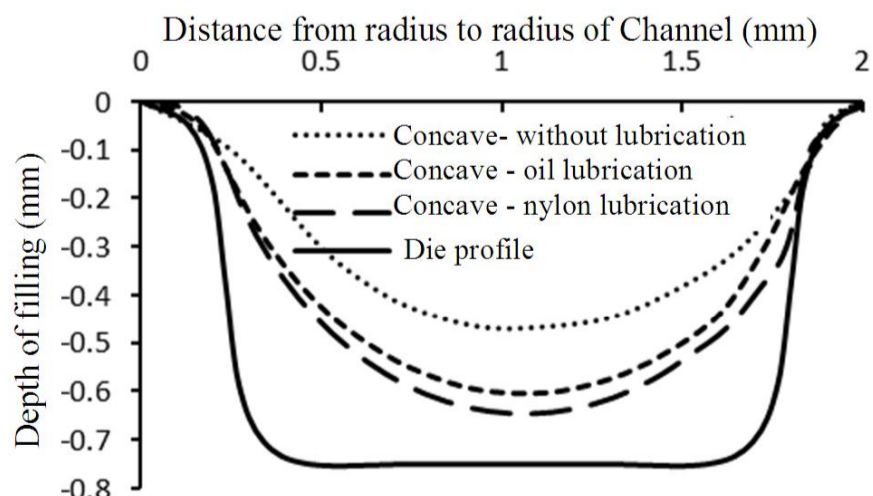


Fig. 19 Comparing the concave sample filling profile in longitudinal direction and maximum filling depth in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 19 مقایسه پروفیل پرشدگی نمونه مقعر در راستای طولی و در عمق پرشدگی ماکزیمم، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

همچنین شکل 16 نشان می دهد که روان کار روغن در مقایسه با روان کار نایلون سبب میزان پرشدگی کمتری می گردد. چرا که روغن در بین حفره های کانال محبوس شده و به ورق اجازه پرکردن حفره های قالب را نمی دهد. همچنین در حین شکل دهی، روان کاری در تمام سطوح به طور یکسان صورت نمی گیرد. بیشترین درصد پرشدگی به دست آمده در حالت استفاده از روان کار روغن 81% اندازه گیری شده است. اما روان کار نایلون پلی پروپیلن به دلیل ضخامت بسیار کم آن مشکلی برای پر کردن حفره های قالب توسط ورق ایجاد نمی کند. همچنین این نوع روان کار از مقاومت در برابر کشش بسیار بالایی برخوردار می باشد که موجب می شود همزمان همراه با ورق به درون حفره های قالب هدایت شده و ورق را تا پرشدگی کامل همراهی کند و پاره نشود. ماکزیمم درصد پرشدگی برای صفحه نهایی تولید شده، در حالت استفاده از روان کار نایلون بدست آمده که مقدار آن 85% می باشد.

شکل 17 پروفیل پرشدگی نمونه محدب را در برش عرضی و در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون نشان می دهد. همان طور که از شکل پیداست، پرشدگی در این جهت بسیار بهتر از جهت طولی می باشد. علت این افزایش آن است که در الگوی محدب سطح آندی- کاتدی در حال شکل گیری است و همان طور که از شکل 10 پیداست، راستای عرضی در این الگو از فضای کانال بیشتری نسبت به راستای طولی برخوردار است، لذا پد لاستیکی راحت تر می تواند ورق را به درون این کانال هدایت کند. درصد پرشدگی بدست آمده در حالت بدون استفاده از روان کار 77% اندازه گیری شده است. همچنین درصد پرشدگی برای روان کار روغن و روان کار نایلون، به ترتیب 90% و 94% اندازه گیری شده است. شکل 18، عکس میکروسکوپی از پروفیل نمونه شکل داده شده در قالب محدب را در راستای عرضی نشان می دهد.

در شکل 19، پروفیل پرشدگی نمونه مقعر در برش طولی نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود، درصد پرشدگی الگوی محدب بیشتر از الگوی مقعر می باشد. ماکزیمم درصد پرشدگی در این حالت 49% اندازه گیری شده است. زیرا در الگوی مقعر مسیر عبور جریان صفحه دوقطبی در حال شکل گیری است و پهنای مسیر جریان (w) از پهنای سطح آندی- کاتدی (s) کمتر است، لذا میزان عمق پرشدگی کانال ها در الگوی محدب از الگوی مقعر بیشتر است. مجدداً مشاهده شد که در حالت استفاده از روان کار میزان پرشدگی نسبت به حالت های بدون روان کار افزایش داشته است. بیشترین میزان پرشدگی مطابق با رابطه (6)، برای نمونه مقعر در حالت

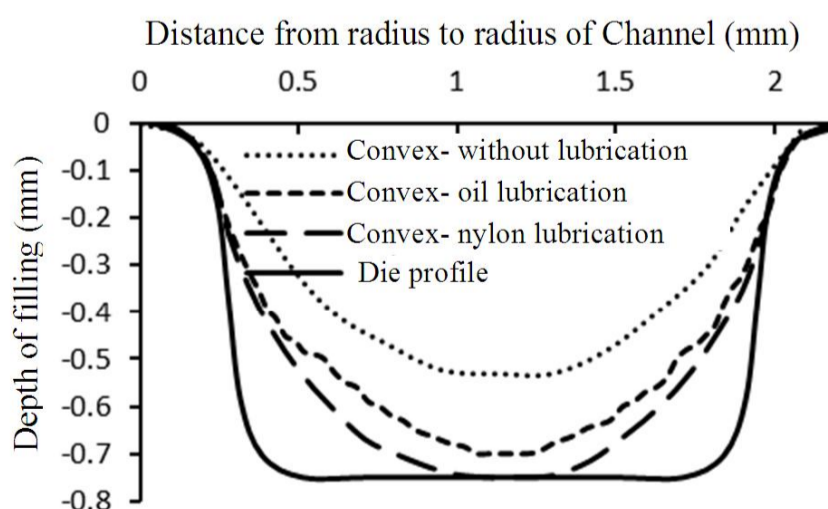


Fig. 16 Comparing the convex sample filling profile in longitudinal direction and maximum filling depth in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 16 مقایسه پروفیل پرشدگی نمونه محدب در راستای طولی و در عمق پرشدگی ماکزیمم، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون



بیشترین میزان نازک‌شدگی در حالت بدون استفاده از روان کار 0.067 میلی‌متر اندازه‌گیری شده که درصد نازک‌شدگی برابر 34% بدست آمده است. اما در حالت استفاده از روان کار، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر گردیده و کمترین مقدار ضخامت در حالت روان کار روغن 0.072 میلی‌متر و روان کار نایلون 0.072 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که درصد نازک‌شدگی به ترتیب 28% و 29% بدست آمده است.

شکل 24 توزیع ضخامت نمونه مقعر را در راستای برش طولی، در ماکزیمم حد شکل دهی و در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون مقایسه می‌کند. با توجه به این شکل، برای نمونه بدون استفاده از روان کار، کمترین ضخامت برای ورق در ناحیه بحرانی 0.066 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که درصد نازک‌شدگی برابر 34% بدست آمده است. در حالت استفاده از روان کار کمترین ضخامت برای ورق در روان کار روغن و

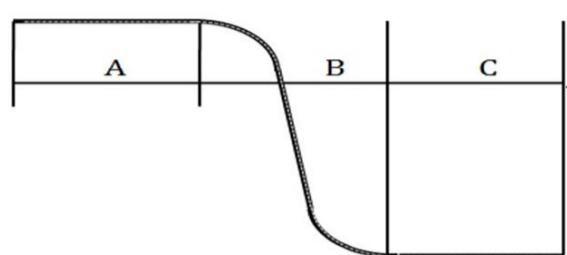


Fig. 21 Measuring sheet thickness at three areas of the channel

شکل 21 اندازه‌گیری ضخامت ورق در سه ناحیه از یک کانال

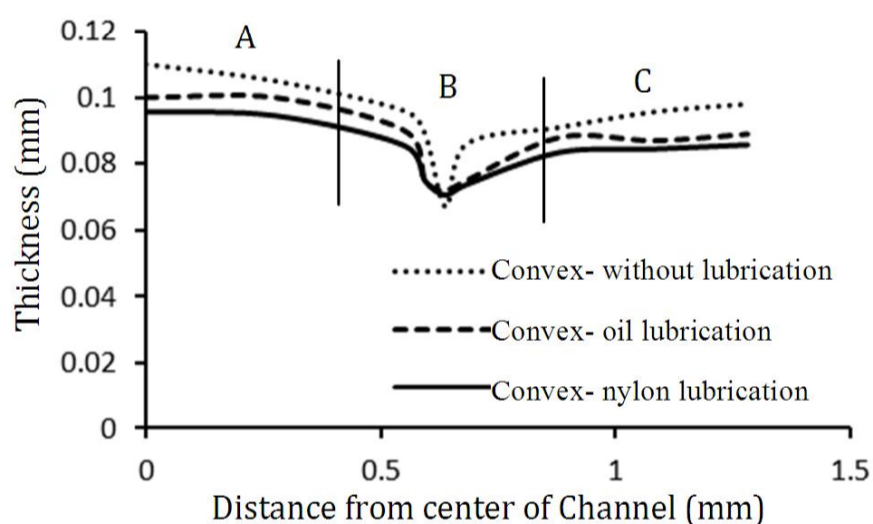


Fig. 22 Comparing the convex sample thickness distribution in longitudinal direction in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 22 مقایسه توزیع ضخامت نمونه محدب در راستای طولی، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

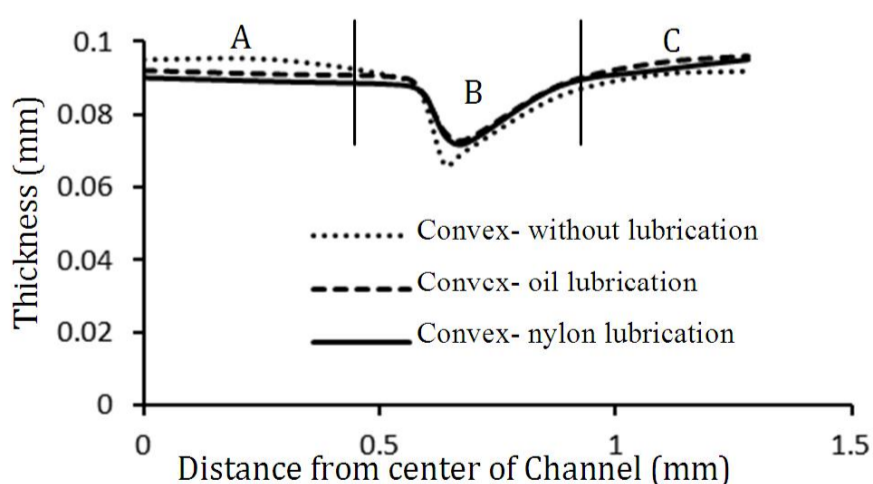


Fig. 23 Comparing the convex sample thickness distribution in cross-sectional direction in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 23 مقایسه توزیع ضخامت نمونه محدب در راستای عرضی، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

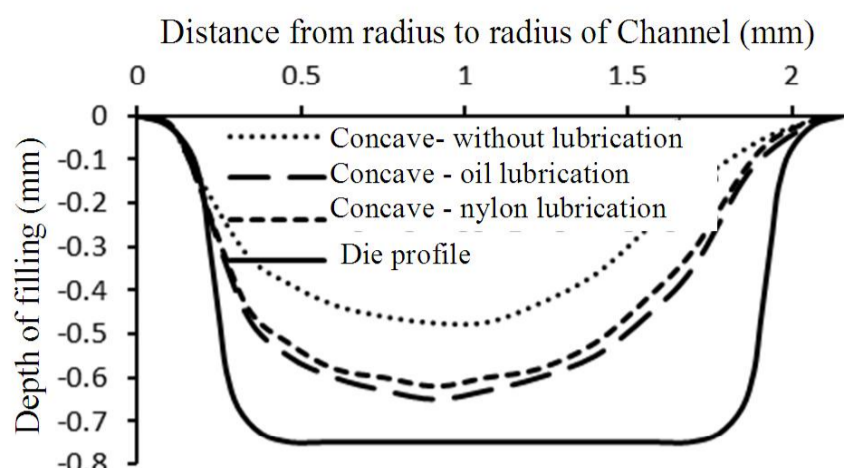


Fig. 20 Comparing the concave sample filling profile in cross-sectional direction and maximum filling depth in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

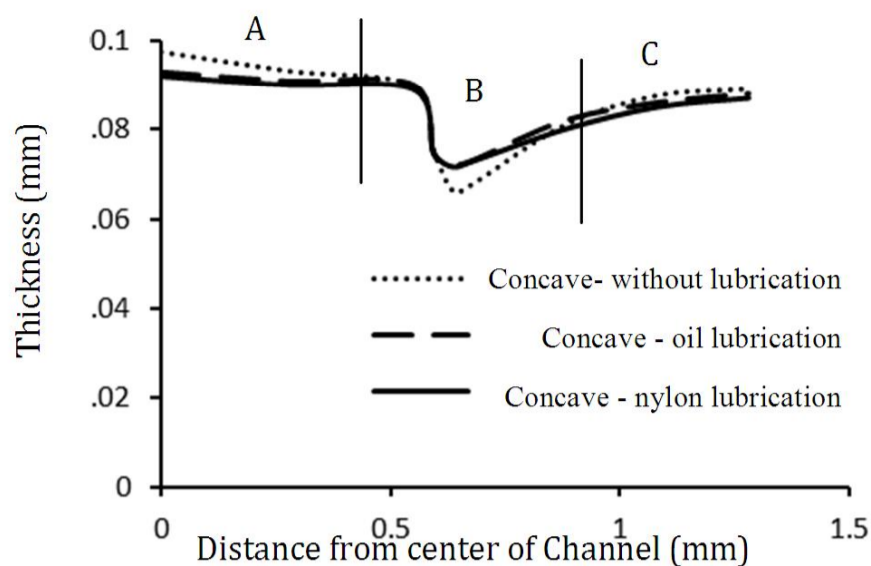
شکل 20 مقایسه پروفیل پرشدگی نمونه مقعر در راستای عرضی و در عمق پرشدگی ماکزیمم، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

#### 2-4- بررسی اثر روان کار بر توزیع ضخامت

به منظور بررسی وقوع نقطه پارگی در نمونه‌های شکل داده شده در دو الگوی محدب و مقعر، ضخامت نمونه‌ها در سه ناحیه از یک کانال اندازه‌گیری شده است. تفاوت اصلی دو الگوی محدب و مقعر در نحوه توزیع ضخامت این دو الگو می‌باشد. بطوری که در الگوی محدب، صفحه پلی اورتانی ورق را به درون کانال‌هایی هدایت می‌کند که این کانال‌ها نقش سطوح آندی- کاتدی یک صفحه دوقطبی را دارند. در حالی که در الگوی مقعر، ورق در حال شکل گرفتن در کانال‌هایی است که این کانال‌ها مسیر عبور جریان یک صفحه دوقطبی را تشکیل می‌دهند. نواحی A، B و C که در شکل 21 نشان داده شده است، به ترتیب نصف پهنای کانال یا مسیر عبور جریان (A)، شعاع گوشه بالا، دیواره و شعاع گوشه پایین (B) و نصف پهنای دنده یا سطوح آندی- کاتدی (C) را نشان می‌دهد.

شکل 22 توزیع ضخامت ورق را در سه ناحیه از کانال در قالب محدب و در برش طولی برای حالت‌های بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، در حالت بدون روان کار ضخامت در ناحیه مسیر عبور جریان (ناحیه A) بیشتر از سایر نواحی می‌باشد. چرا که ورق بین قالب و پد لاستیکی محصور گشته و امکان جریان یافتن ورق در این ناحیه به دلیل افزایش نیروهای اصطکاکی سخت‌تر می‌گردد. ورق در ناحیه B و C در حال شکل‌گیری است. در این دو ناحیه فقط نیروی اصطکاکی بین ورق و پد لاستیکی به عنوان عامل مزاحم برای سیلان ورق می‌باشد. بیشترین نازک‌شدگی در ورق در ناحیه B ایجاد می‌شود که بدلیل کشش ورق به منظور پر کردن حفره قالب است. کمترین مقدار برای ضخامت ورق در این ناحیه 0.067 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که درصد نازک‌شدگی مطابق با رابطه (1) برابر 33% بدست آمده است. از ناحیه B تا C نیز توزیع ضخامت ورق روندی افزایشی دارد که علت آن کاهش تنش‌های کششی در این ناحیه است. با این حال ضخامت ورق در ناحیه سطوح آندی- کاتدی کمتر از ضخامت در ناحیه مسیر عبور جریان می‌باشد. در حالت استفاده از روان کار، ورق نسبت به حالت بدون روان کار راحت‌تر جریان پیدا کرده و توزیع ضخامت یکنواخت‌تر شده است. با این حال کمترین ضخامت ورق در ناحیه B رخ داده که مقدار آن 0.072 میلی‌متر برای روان کار روغن و 0.07 میلی‌متر برای روان کار نایلون بدست آمده است که درصد نازک‌شدگی به ترتیب 28% و 30% اندازه‌گیری شده است.

شکل 23 توزیع ضخامت ورق را در الگوی محدب و در برش عرضی، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون نشان می‌دهد.



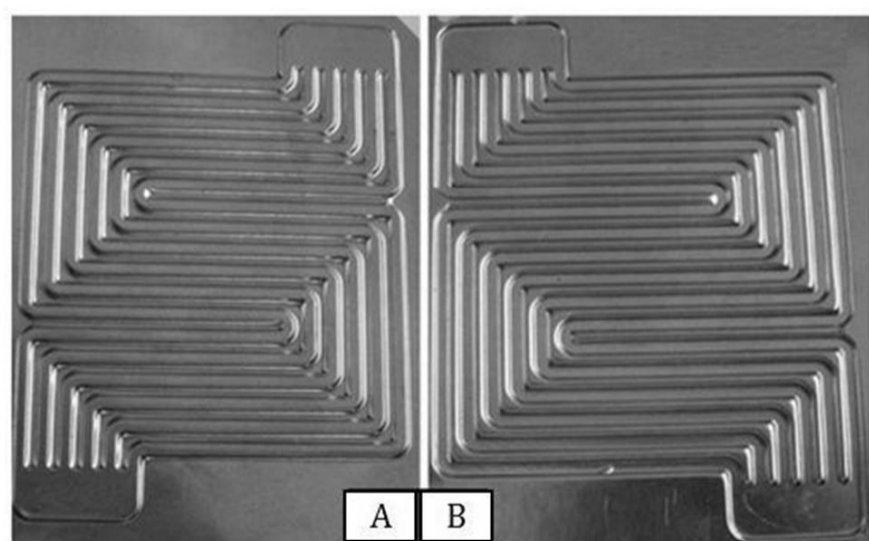
**Fig. 25** Comparing the concave sample thickness distribution in cross-sectional direction in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 25 مقایسه توزیع ضخامت نمونه مقعر در راستای عرضی، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

جدول 5 ابعاد هندسی صفحات تولید شده

**Table 5** Geometrical dimensions of produced plates

الگوی مقعر			الگوی محدب			پارامترهای هندسی
بدون روان کار	روغن	روغن نایلون	بدون روان کار	روغن	روغن نایلون	
بدون روان کار	روغن	روغن نایلون	بدون روان کار	روغن	روغن نایلون	درصد پرشدگی در راستای طولی
67%	62%	49%	85%	81%	60%	درصد پرشدگی در راستای عرضی
70%	65%	50%	94%	90%	77%	ماکزیمم درصد نازک شدگی در راستای طولی
32%	31%	34%	30%	28%	33%	ماکزیمم درصد نازک شدگی در راستای عرضی
29%	28%	33%	29%	28%	34%	



**Fig. 26** Sample of a metal bipolar plate fabricated by rubber pad forming with nylon lubricant and convex die: (a) front view of the bipolar plate and (b) back view of the bipolar plate

شکل 26 صفحات تولید شده از فرآیند شکل دهی لاستیکی با روان کار نایلون در الگوی محدب، الف) جلوی صفحه، ب) پشت صفحه

سپس میزان پرشدگی کانال و توزیع ضخامت قطعات شکل داده در هر حالت با یکدیگر مقایسه شده و حالتی که بهترین پرشدگی و توزیع ضخامت به

نایلون به ترتیب 0.069 و 0.068 میلی متر اندازه گیری شده است که درصد نازک شدگی به ترتیب 31% و 32% مطابق رابطه (1) بدست آمده است.

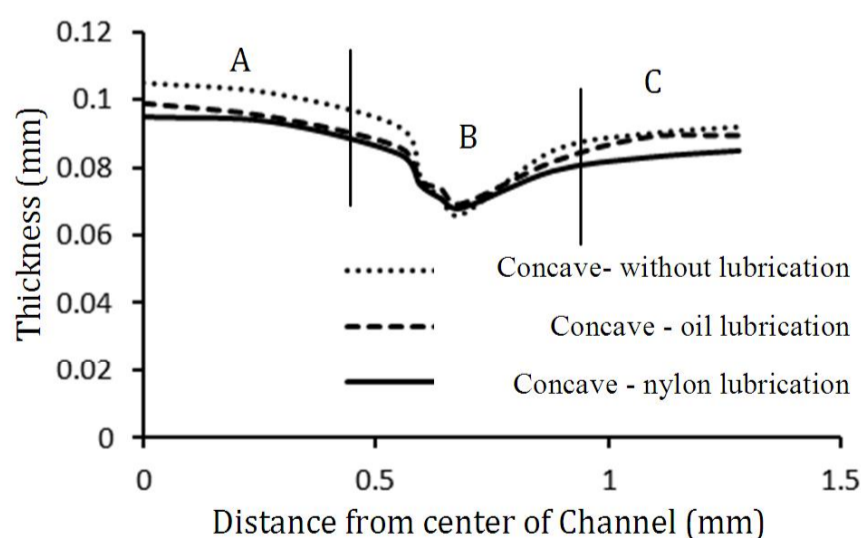
شکل 25 نیز توزیع ضخامت ورق را در الگوی مقعر و در حالت برش عرضی نشان می دهد. همان طور که قبلا بیان شد اختلاف عمق پرشدگی در دو راستای طولی و عرضی ناچیز بوده که نشان دهنده یکنواخت پرشدن الگوی مقعر در دو راستای طولی و عرضی بوده است. بنابراین نحوه توزیع ضخامت نیز در این دو راستا بسیار به هم نزدیک می باشد. مقدار ضخامت اندازه گیری شده در نزدیکی محل پارگی و یا بحرانی ترین نقطه از نظر ضخامت، در حالت بدون روان کار 0.067 میلی متر بدست آمده است که میزان درصد نازک شدگی برابر 33% اندازه گیری شده است. در حالت استفاده از روان کار روغن، کمترین ضخامت اندازه گیری شده 0.072 میلی متر بدست آمده است که درصد نازک شدگی برابر 28% اندازه گیری گردید. کمترین ضخامت اندازه گیری شده برای روان کار نایلون که بیشترین میزان پرشدگی را دارد، 0.071 میلی متر بدست آمده که درصد نازک شدگی برابر 29% محاسبه شده است.

جدول 5، پارامترهای اندازه گیری شده صفحات تولید شده با الگوی محدب و مقعر را در سه حالت بدون استفاده از روان کار، روان کار روغن SAE10 و روان کار نایلون پلی پروپیلن نشان می دهد. در این جدول، میزان درصد پرشدگی در دو راستای طولی و عرضی با محاسبه مساحت پروفیل پر شده به مساحت کل حفره قالب مطابق با رابطه (6) بدست اندازه گیری شده است. همچنین مطابق با رابطه (1) میزان درصد نازک شدگی برای بحرانی ترین قسمت از سه ناحیه اندازه گیری شده A، B و C نشان داده شده است.

شکل 26 و 27 نیز به ترتیب بهترین صفحات تولید شده از الگوی محدب و مقعر را نشان می دهد که با کمک استفاده از روان کار تولید شده اند. در واقع این صفحات دارای بیشترین درصد پرشدگی و کمترین میزان نازک شدگی می باشند.

### 5- نتیجه گیری

در این پژوهش، شکل دهی صفحات دو قطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی 316 با ضخامت 0.1 در حالت های بدون روان کار و تحت اثر روان کارهای روغن SAE10 و نایلون پلی پروپیلن با استفاده از روش شکل دهی لاستیکی برای دو الگوی قالب محدب و مقعر بررسی گردید.



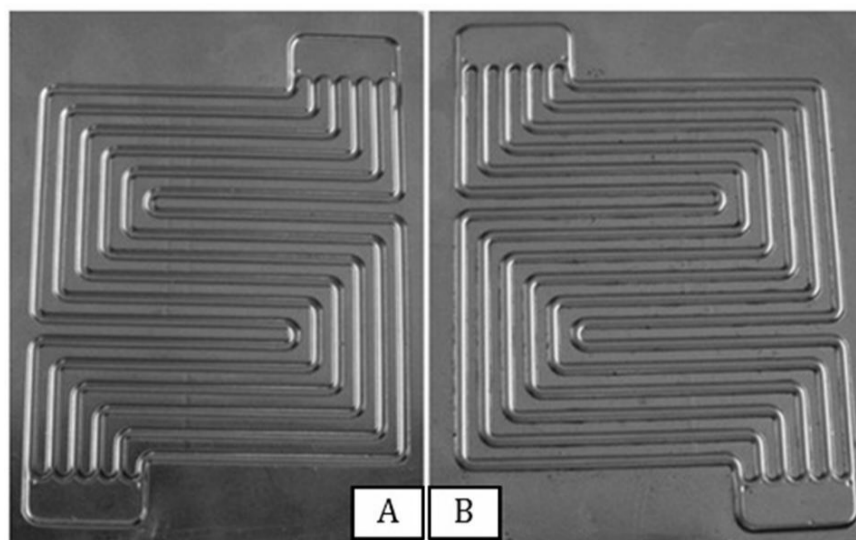
**Fig. 24** Comparing the concave sample thickness distribution in longitudinal direction in three cases, i.e. without lubricant, oil lubricant and nylon lubricant

شکل 24 مقایسه توزیع ضخامت نمونه مقعر در راستای طولی، در سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون

دارند و شکل پروفیل در این دو راستا تقریباً به هم نزدیک است. در هر دو راستای طولی و عرضی نشان داده شد که روان کار نایلون دارای پرشدگی بهتری نسبت به حالت‌های بدون روان کار و روان کار روغن است.

### 6- مراجع

- [1] J. C. Hung, C. C. Lin, Fabrication of micro-flow channels for metallic bipolar plates by a high-pressure hydroforming apparatus, *Journal of Power Sources*, Vol. 206, pp. 179-184, 2012.
- [2] L. Ma, S. Warthesen, D. A. Shores, Evaluation of materials for bipolar plates in PEMFCs, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 221-228, 2000.
- [3] H. Wang, J. A. Turner, Reviewing metallic PEMFC bipolar plates, *Fuel Cells*, Vol. 10, No. 10, pp. 510-519, 2010.
- [4] S. Mahabunphachai, *A hybrid hydroforming and mechanical bonding process for fuel cell bipolar plates*, PhD Thesis, Mechanical Engineering, The University of Michigan, 2008.
- [5] H. Blunk, D. J. Lisi, Y. E. Yoo, C. L. Tucker, Enhanced conductivity of fuel cell plates through controlled fiber orientation, *AIChE Journal*, Vol. 49, No. 1, pp. 18-29, 2003.
- [6] A. Muller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, Injection molding of graphite composite bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 15, No. 2, pp. 467-471, 2006.
- [7] M. F. Peker, *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*, PhD Thesis, Mechanical Engineering, Virginia Commonwealth University, 2012.
- [8] H. J. Kwon, Y. P. Jeon, C. G. Kang, Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminium bipolar plate with microchannel, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 5-8, pp. 381-94, 2013.
- [9] Metals handbook, Forming and forging, 9<sup>th</sup> Edition, Vol. 14, pp. 605-615, 1988.
- [10] Y. Liu, L. Hua, Studies of the deformation styles of the rubber-pad forming process used for manufacturing metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 24, pp. 8177-8184, 2010.
- [11] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi Jooybari, S. J. Hosseini-pour, A. Gotji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014 (in Persian).
- [12] M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir, M. Hosseinzadeh, Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for production of metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 179-186, 2015 (in Persian).
- [13] M. B. Osia, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseini-pour, A. Gorgi, The experimental and simulation investigation of process and geometrical parameters for hydroforming of pin-type metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 215-226, 2015 (in Persian).
- [14] F. Dundar, E. Dur, S. Mahabunphachai, M. Koc, Corrosion resistance characteristics of stamped and hydroformed proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 11, pp. 3546-3552, 2010.
- [15] S. Mahabunphachai, Ö. N. Cora, M. Koc, Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, No. 16, pp. 5269-5277, 2010.
- [16] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 137-143, 2004.



**Fig. 27** Sample of a metal bipolar plate fabricated by rubber pad forming with nylon lubricant and concave die: (a) front view of the bipolar plate and (b) back view of the bipolar plate

شکل 27 صفحات تولید شده از فرآیند شکل‌دهی لاستیکی با روانکار نایلون در الگوی مقعر، الف) جلوی صفحه، ب) پشت صفحه

- دست آمده ارایه شد. به طور کلی نتایج زیر از این پژوهش حاصل شده است:
1. به منظور افزایش عمق پرشدگی بیشتر برای صفحات تولید شده، از دو روان کار روغن SAE10 و نایلون پلی‌پروپیلن استفاده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از روان کار نایلون بهترین گزینه برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی در فرآیند شکل‌دهی لاستیکی می‌باشد. علت این است که ضخامت روان کار نایلون بسیار کم بوده که مزاحمتی برای جریان ورق ایجاد نمی‌کند و همچنین به علت مقاومت کششی بسیار بالایی که دارد، بدون پارگی، ورق را تا پرکردن کامل حفره‌های قالب همراهی می‌کند.
  2. با توجه به میزان درصد پرشدگی برای الگوی مقعر، حداکثر نسبت عمق به عرض ( $h/w$ ) که می‌توان از این الگو بدست آورد 0.48 می‌باشد. در حالی که برای الگوی محدب نسبت 0.55 ماکزیمم حدی است که برای این الگو بدست آمده است.
  3. به‌طورکلی در هر سه حالت بدون روان کار، روان کار روغن و روان کار نایلون، پرشدگی نمونه در قالب محدب در راستای عرضی بسیار بهتر از جهت طولی می‌باشد. همان‌طور که نشان داده شد راستای عرضی در این الگو از فضای کانال بیشتری نسبت به راستای طولی برخوردار است، لذا پد لاستیکی راحت‌تر می‌تواند ورق را به درون این کانال هدایت کند.
  4. در قالب با الگوی مقعر نتیجه گرفته شد پرشدگی قطعه در راستای طولی و عرضی از اختلاف اندکی برخوردار است. به همین جهت میزان پرشدگی در راستای طولی و عرضی اختلاف کمی