مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، زمستان 1394، دوره 2، شماره 4، ص‌ص 57-69

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر شکل‌دهیِ میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی

حسین طالبی قادیکلایی[1]، مجید الیاسی[2*]، مرتضی حسین‌زاده[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ازاد اسلامی، واحد ایت الله آملی، آمل

* بابل، صندوق پستی484، elyasi@nit.ac.ir

کلیدواژگان

پیل سوختی پلیمری

صفحات دو قطبی فلزی

شکل‌دهی ورق فلزی

شکل‌دهی لاستیکی

ضخامت لاستیک

چکیده

در این پژوهش، تاثیر ضخامت لایه لاستیکی بر بهبود کیفیت شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در فرایند شکل-دهی لاستیکی بررسی شد. بدین منظور از نرم افزار آباکوس/استاندارد در شبیه سازی فرایند مورد نظر استفاده گردید و صحت نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی فرایند، با استفاده از نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام مراحل تجربی از یک قالب با شیارهای موازی مستقیم برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ نزن 316 با ضخامت 0/1 میلی‌متر استفاده شد. متغیرهای مورد مطالعه شامل نیروی شکل‌دهی و ضخامت لایه لاستیکی بر عمق کانال، درصد پرشدگی، نحوه توزیع ضخامت و درصد نازک شدگی نمونه‌های شکل داده شده می‌باشد. بدین منظور از لایه‌لاستیکی با ضخامت 1 تا 7/5 میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا تاثیر نیروی اعمالی و ضخامت لاستیک بر عمق کانال صفحات دو قطبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع می باشد که با افزایش نیرو و ضخامت لاستیک، حداکثر عمق کانال و درصد پرشدگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در شکل‌دهی چهار میکروکانال میزان نیروی شکل‌دهی برای دست‌یابی به عمق کانال 0/75 میلی‌متر از 82/25 کیلونیوتن درضخامت لایه لاستیکی 1/5 میلی‌متر به 55/15 کیلونیوتن در ضخامت 5/5 میلی‌متر کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش 31 درصدی در نیروی مورد نیاز شکل‌دهی می‌باشد و افزایش ضخامت لاستیک بیشتر از این مقدار تاثیر قابل توجهی بر کاهش نیروی شکل‌دهی ندارد. همچنین ضخامت بهینه لاستیک با کاهش تعداد میکروکانال‌ها کاهش می‌یابد و این مقدار 5.5 میلی‌متر در شکل‌دهی چهار میکروکانال به 3 میلی‌متر در شکل‌دهی یک میکرو کانال کاهش یافت. با توجه به نتایج بدست آمده افزایش ضخامت لاستیک موجب دستیابی به عمق کانال بیشتر در نیروی برابر می‌گردد که منجر به افزایش درصد نازک شدگی می‌گردد. همچنین افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب یکنواختی بیشتر توزیع ضخامتِ نمونه‌ها در شعاع گوشه بیرونی می‌گردد. اختلاف درصد نازک شدگی در شعاع گوشه بیروی از مقدار 3 درصد با استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر به 0/4 درصد با استفاده از لایه لاستیکی 5/5 میلی‌مترکاهش یافت که بیانگر بهبود قابل توجه در یکنواختی توزیع ضخامت نمونه‌ها می‌باشد.

Investigate the effect of rubber layers thickness on forming of bipolar plate's microchannels in rubber pad forming process

Hossein Talebi Ghadikolaee[1], Majid Elyasi[1]*, Morteza Hosseinzadeh[2]

1- Department of Mechanical Engineering, BabolNoshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Branch, Amol, Iran

* P.O.B. 484 Babol, Iran, elyasi@nit.ac.ir

Keywords

Proton exchange membrane fuel cell

Metallic bipolar plate

Sheet forming

Rubber pad forming

Rubber thickness

Abstract

In this study the effect of rubber thickness on forming quality of metallic bipolar plates microchannel's was investigated in rubber pad forming process. ABAQUS/Standard finite element software was used to simulate the process, where the accuracy of the simulation results was evaluated by using experimental results. To perform experimental procedures a die with parallel flow field was used to form SS316 bipolar plate with 0.1 mm thickness. For this purpose the effect of punch load and rubber thickness on channel depth, filling percentage, thickness distribution and thinning percentage of the formed parts were investigated. In this regard, rubber layers thickness of 1 mm to 7.5 mm thickness were tested. First, the effect of punch load and rubber thickness on the microchannels depth of bipolar plates was investigated. The results demonstrate that with increasing punch load and thickness of the rubber layer, leads to increasing the channel depth and filling percentage. Amount of force in forming of four microchannels will decrease from 82.25 kN to 55.15 kN by increasing in thickness of rubber layer from 1.5 to 5.5 mm, that show 31% decrease in forming force to achieve 0.75 mm channel depth; while more increase in rubber layers thickness has no significant effect on forming force. Moreover optimum thickness of rubber layer will decrease from 5.5 mm to 3 mm by decreasing the number of microchannels from 4 to 1. According to the result, increasing the rubber thickness would achieve greater channel depth at equal punch force, which also leads to increase in thinning percentage. Furthermore, increase in the thickness of rubber layer leads to more uniformity of the samples thickness distribution at outer corner radius. Thinning percentage difference at outer corner radius decreases from 3% by using rubber thickness of 1.5 mm to 0.4% by using rubber thickness of 5.5 mm, which indicates considerable improvement in uniformity of thickness distribution.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Talebi Ghadikolaee, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, Investigate the effect of rubber layers thickness on forming of bipolar plate's micro channels in rubber pad forming process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 57-69, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

پیل سوختی وسیله‌ای الکتروشیمیایی است که انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر پیل سوختی شبیه یک باطری بوده ولی بر خلاف باطری نیاز به انبارش (شارژ) ندارد. تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل سوختی تأمین شود، سیستم به کار خود ادامه خواهد داد. از آنجا که در این سیستم گاز سوختی مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌شود، بازده آن از موتورهای احتراق داخلی بیشتر است [1]. هزینه پیل‌سوختی در مقایسه با موتورهای احتراق داخلی، 4 تا 10 برابر می‌باشد. بنابراین در حال حاضر هزینه‌های بالای پیل سوختی مانع مهمی در برابر تجاری شدن این محصول می‌باشد [2].

در میان اجزای مختلف مجموعه پیل سوختی که قسمت عمده‌ای از هزینه‌های آن را تشکیل می‌دهند، صفحات دوقطبی 60 تا 80 درصد از وزن مجموعه پیل سوختی و همچنین 30 تا 45 درصد از هزینه‌های آن را تشکیل می‌دهند. در نتیجه صفحات دو قطبی از لحاظ حجم، وزن و هزینه در جایگاه بالایی قرار دارند و با توجه به موارد ذکر شده صفحات دوقطبی را می‌توان از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل‌دهنده آن دانست [3].

به دلیل اهمیت این صفحات در عملکرد مجموعه پیل سوختی و هزینه‌های آن، تحقیقات گسترده‌ای به منظور انتخاب جنس و همچنین روش ساخت مناسب و کم هزینه برای آن‌ها انجام گرفته است. بر این اساس صفحات گرافیتی، کامپوزیتی و فلزی به منظور ساخت صفحات دوقطبی مورد استفاده قرار گرفتند. در میان گزینه‌های ذکر شده، صفحات فلزی به دلیل ویژگی‌هایی همچون رسانایی بالا، هزینه پایین، خواص مکانیکی و الکتریکی مطلوب، خواص گرمایی مناسب و قابلیت تولید نسبتاً خوب بیشتر از صفحات گرافیتی و کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفتند [4]. در شکل 1 صفحات تولید شده از مواد متفاوت نشان داده شده است.

روش‌های تولید صفحات دو قطبی به سه گروه قالب‌گیری، ماشین‌کاری و شکل‌دهی تقسیم‌بندی می‌شوند. از روش قالب‌گیری برای تولید صفحات کامپوزیتی و از روش ماشین‌کاری برای تولید صفحات دو قطبی فلزی و گرافیتی و همچنین از روش‌های شکل‌دهی برای تولید صفحات دو قطبی فلزی با ضخامت اندک استفاده می‌شود. به علاوه روش‌های متفاوتی مانند فرایندهای هیدروفرمینگ[1]، استمپینگ[2] و شکل‌دهی لاستیکی[3] گروهی از روش‌های شکل‌دهی می‌باشند که برای ایجاد الگوی مسیر جریان بر روی صفحات دو قطبی فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [5].

Fig. 1 Bipolar plate manufacturing methods, A) Carbon-carbon composite, B) Graphite bipolar plate machining, C) Polymer-carbon composite, D) Stainless steel bipolar plates machining, E) Forming of Stainless steel bipolar plates

شکل 1 روش‌های تولید صفحات دو قطبی پیل سوختی، (الف) کامپوزیت کربن-کربن، (ب) ماشین‌کاری صفحات گرافیتی، (ج) کامپوزیت‌پلیمر-کربن، (ت) ماشین‌کاری صفحات از جنس فولاد زنگ‌نزن، (پ) شکل‌دهی صفحات فولاد زنگ‌نزن [5]

در میان روش‌های اشاره شده، فرایند شکل‌دهی لاستیکی به دلیل سادگی فرایند، هزینه کمتر قالب، سرعت تولید بالا و کیفیت سطح مناسب، از اهمیت بسزایی برخوردار است. مزیت‌های ذکر شده موجب استفاده از این فرایند برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی شده است.

در این فرایند مشخصات لایه لاستیکی نقش اصلی را در کیفیت نمونه‌های تولید شده توسط فرایند مورد نظر داشته و همچنین دارای نقش تأثیرگذاری در هزینه‌های فرایند شکل‌دهی لاستیکی خواهند داشت. از این رو پژوهش‌هایی به منظور شناخت رفتار لایه لاستیکی و تأثیر آن بر متغیرهای مورد نظر انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آنان پرداخته می‌شود.

لیو و همکاران [6] شکل‌دهی صفحات دو قطبی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی را مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی فرایند مورد نظر، اثر شعاع گوشه قالب، زاویه دیواره و سختی لاستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطابق با نتایج بدست‌آمده افزایش شعاع گوشه باعث پر شدگی بهتر کانال‌ها می شود و همچنین احتمال پارگی کاهش می‌یابد. همچنین، سختی لاستیک تأثیر زیادی بر روی توزیع تنش در

[1] Hydro forming
[2] Stamping
[3] Rubber pad forming

ورق‌های شکل یافته نداشته و همچنین افزایش زاویه دیواره باعث کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی خواهد شد. لیم و همکاران [7] شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس آلومینیوم 1050 را مورد بررسی قرار دادند. آنها ابتدا تأثیر ابعاد سطح مقطع کانال را بر روی نحوه جریان و توزیع یکنواخت گاز در کانال‌ها مورد بررسی قرار داده و در ادامه تأثیر سرعت پرس، نیرو، ضخامت و سختی لاستیک بر روی عمق کانال‌ها مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مقادیر مناسب برای متغیرهای شکل‌دهی را انتخاب نمودند. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، افزایش ضخامت لایه لاستیکی و کاهش سختی آن و همچنین افزایش نیرو و سرعت پرس، موجب افزایش عمق کانال قابل دست‌یابی در فرایند خواهد شد.

جونگ و همکاران [8] تأثیر سرعت پانچ، فشار اعمالی به مجموعه، ضخامت و سختی لاستیک را در شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس فولاد زنگ نزن 304 را 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. همچنین افزایش زاویه دیواره، بخصوص در دامنه 10 تا 20 درجه بهبود شکل‌دهی را در پی خواهد داشت. عمق کانال‌ها در زوایای 20 تا 30 درجه تفاوت زیادی نداشته در نتیجه زاویه 20 مطلوب‌تر می‌باشد. در پژوهش گیل کنگ و همکاران [9] شکل-دهی ورق تیتانیومی با ضخامت 0/1 میلی‌متر توسط فرایند شکل‌دهی با لایه لاستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر سرعت پانچ، فشار اعمالی به مجموعه، ضخامت لاستیک و سختی لاستیک و همچنین زاویه دیواره قالب بر روی عمق کانال مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج بدست آمده در این پژوهش، افزایش ضخامت لایه لاستیک و کاهش سختی آن موجب افزایش عمق کانال خواهد شد. در نهایت با توجه به تأثیر متغیرها بر روی عمق کانال صفحات دو قطبی، مقادیر مناسب برای متغیرهای شکل‌دهی را انتخاب نمودند. الیاسی و همکاران [11،10] تأثیر الگوی شکل‌دهی محدب و مقعر بر نیروی شکل‌دهی و پرشدگی کانال‌ها را مورد بررسی قراردادند. در این پژوهش از ورق فولاد زنگ نزن 316 با ضخامت 0/1 میلی‌متر و لایه لاستیکی با سختی شور 85 A به منظور شکل‌دهی نمونه‌ها استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در یک نیروی یکسان، قالب محدب میزان عمق پرشدگی بیشتری نسبت به قالب مقعر از خود نشان می‌دهد و همچنین با افزایش نیروی شکل‌دهی تا یک مقدار ماکزیمم، میزان عمق پرشدگی در قالب مقعر ثابت مانده و افزایش نیرو موجب تخریب لاستیک می‌گردد.

تحقیقاتی که پیش‌تر ذکر گردید تأثیر لایه لاستیکی بر روی میزان عمق کانال صفحات دو قطبی مورد بررسی قرار داده‌اند اما از انجایی که دست‌یابی به میزان عمق کانال بیشتر و درصد پرشدگی بالاتر تأثیر بسزایی در عملکرد و بازده مجموعه پیل سوختی خواهد داشت، نیاز می‌باشد تا تحقیقات دیگری به منظور دست‌یابی به عمق کانال‌های بیشتر انجام گیرد که به دلیل ضخامت کم ورق مورد نظر (0/1 میلی‌متر) دارای اهمیت بالایی می‌باشد. در این شرایط آگاهی از نحوه توزیع ضخامت در نواحی مختلف ورق و تشخیص نقاط بحرانی و همچنین بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر درصد نازک شدگی و حداقل ضخامت ایجاد شده در ورق حائز اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر در تحقیقاتی که تا کنون انجام گرفت اثر متغیرهای لایه لاستیکی همچون ضخامت لایه لاستیکی بر نحوه توزیع ضخامت و یکنواختی آن، حداقل ضخامت ایجاد شده در ورق و حداکثر نازک شدگی مورد بررسی قرار نگرفته است که با توجه به ضخامت اندک ورق، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد و بهبود روند توزیع ضخامت می‌تواند موجب دست‌یابی به عمق کانال و درصد پرشدگی بالاتر گردد. بر این اساس پژوهشی در راستای بررسی موارد فوق انجام گرفته تا اثر پارامترهای ذکر شده را به صورت کمی مورد بررسی قرار دهد.

2- مراحل آزمایشگاهی

در این مطالعه از ورق فولاد زنگ نزن 316 با ضخامت 0/1 میلی‌متر و از الگوی شیار موازی مستقیم برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی استفاده شده است. درصد عناصر الیاژی ورق مورد استفاده در این پژوهش مطابق با نتایج حاصل از تست کوانتومتری در جدول 1 نشان داده شده است که نشان‌دهنده صحت الیاژ مورد استفاده می‌باشد.

Table 1 Percentage of alloying elements of sheet

جدول 1 عناصر الیاژی ورق مورد استفاده در فرایند

عناصر آلیاژی	درصد	عناصر آلیاژی	درصد	عناصر آلیاژی	درصد
کروم	16/150	گوگرد	0/005	منگنز	1/440
مس	0/360	فسفر	0/048	سیلسیم	0/660
کربن	0/047	مولیبدن	2/110	کبالت	0/280
نیکل	12/190	آلومینیم	0/010	وانادیم	0/090

به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی به کمک دستگاه برش سیمی، مطابق با استاندارد ASTM (E8M-04) تهیه شده‌اند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایش کشش انیورسال سنتام مدل STM250 با توان اعمال بار تا 25 تن، در آزمایشگاه خواص مواد دانشگاه صنعتی بابل تا حد پارگی کشیده شدند. در این آزمایش‌ها از ناهمسانگردی نمونه‌ها صرف‌نظر گردید. به منظور تعیین خواص مکانیکی با استفاده از منحنی تنش کرنش بدست آمده از تست کشش، رفتار پلاستیک ماده مورد استفاده با رابطه (1) مدل شد.

$$\sigma = k\,(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \qquad (1)$$

در این رابطه k (ضریب مقاومت ماده)، n (نمای کرنش سختی)، σ (تنش سیلان حقیقی)، ε (کرنش حقیقی) و ε_0 (کرنش اولیه) می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از تست کشش رابطه رفتار پلاستیک ورق مورد استفاده در پژوهش به صورتی که در رابطه (2) نشان داده شده است بیان می‌گردد.

$$\sigma = 1512\,(\varepsilon + 0.04)^{0.53} \qquad (2)$$

به منظور تعیین خواص مکانیکی لایه لاستیکی از تست فشار لاستیک مطابق با استاندارد ASTM(D-575) استفاده شده است. در ابتدا نمونه‌هایی استوانه‌ای مطابق با ابعاد مذکور در استاندارد تهیه شده و در مرحله بعد با تحت فشار قرار دادن آن‌ها بین دو فک فشار در پرس 25 تن نمودار تنش-کرنش لایه لاستیکی بدست آمد. شکل 2 نشان دهنده نتایج بدست آمده از آزمون فشار لاستیک می‌باشد.

به منظور انجام 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 است استفاده شد. قالب مورد استفاده شامل بدنه اصلی و اینسرت مستطیلی از جنس فولاد SPK با طول و عرض 25 میلی‌متر می باشد. شکل 3 نشان دهنده شماتیکی از میکروکانال‌های صفحات دو قطبی می‌باشد که در آن بخش‌های مختلف هر کانال به صورت پارامتریک نشان داده شده است. ابعاد قسمت‌های مختلف کانال در جدول 2 نشان‌داده شده است. در شکل 4 تصویری از اینسرت‌های ساخته شده و ابعاد آن‌ها نشان داده شده است. در ادامه با ماشین‌کاری قسمت بالا و پایین قالب و اتصال اینسرت‌ها به فک پایین، قالب مورد نظر برای شکل‌دهی نمونه‌ها و بدست آوردن نتایج تجربی کامل گردید و همچنین به منظور انجام فرایند شکل‌دهی، از یک پرس 60 تن استفاده شده است. در شکل 5 نمایی از مجموعه قالب و پرس نشان داده شده است. در آزمایش‌هاش انجام گرفته در این پژوهش، شکل‌دهی نمونه‌ها تحت نیروهای 35، 45، 55 کیلونیوتن انجام گرفت. به منظور انجام تست‌های تجربی به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر، لایه لاستیکی از جنس پلی اورتان با سختی شور 85 A با ضخامت 15 میلی‌متر استفاده شده است.

3- مراحل شبیه‌سازی اجزای محدود

3-1- معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس/ استاندارد استفاده شد.

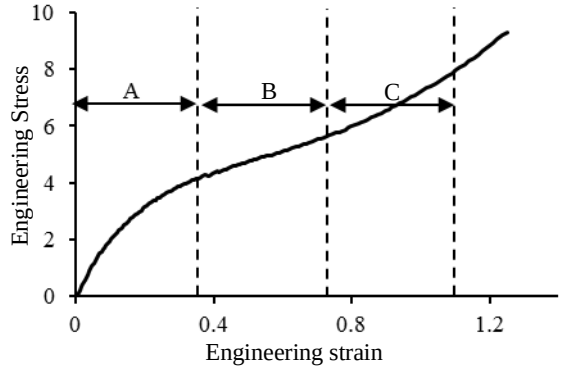

Fig. 2 Rubber real stress-strain curve

شکل 2 نمودار تنش-کرنش حقیقی لاستیک

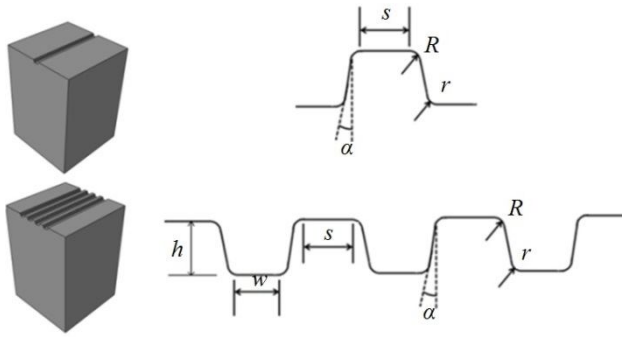

Fig. 3 Schematic of bipolar plate's micro channel

شکل 3 شماتیک میکروکانال‌های صفحات دو قطبی

Table 2 Dimension of different part of micro channel

جدول 2 ابعاد قسمت‌های مختلف میکرو کانال

علامت اختصاری	نام پارامتر	واحد	مقدار
s	عرض دیواره	میلی‌متر	1/2
w	پهنای کانال	میلی‌متر	1/1
h	عمق کانال	میلی‌متر	0/75
R	شعاع گوشه داخلی	میلی‌متر	0/2
r	شعاع گوشه بیرونی	میلی‌متر	0/2
α	زاویه دیواره	درجه	10

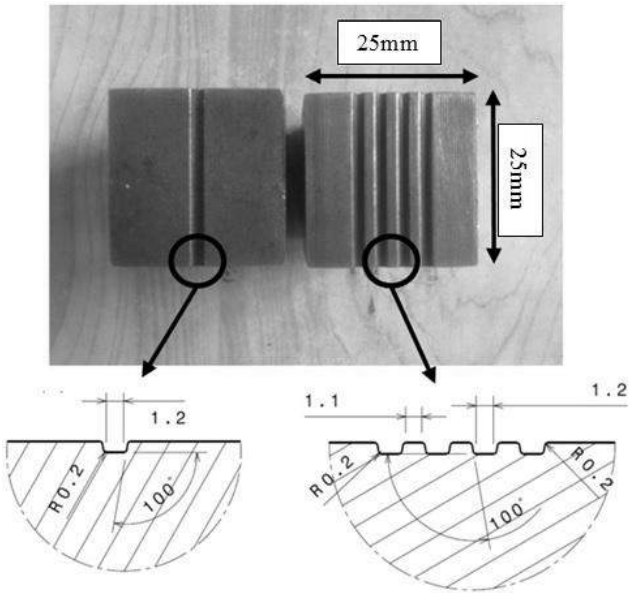

Fig. 4 Four and one channel insert and dimension

شکل 4 اینسرت‌های تک و چهار کانال و ابعاد آن

به دلیل همسانگرد در نظر گرفتن خواص ورق فولادی و همچنین کاهش زمان تحلیل، از مدل دو بعدی به منظور بررسی پارامترهایی مورد نظر همچون نیروی اعمالی و ضخامت لایه لاستیکی استفاده شد. ورق و لایه لاستیکی بصورت شکل‌پذیر[1] و سنبه و محفظه نگه دارنده لایه لاستیکی صلب تحلیلی[2] در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی ورق و لاستیک از المان CPE4R استفاده شده است. از انجایی که قالب و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی به صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند در نتیجه المان‌بندی نشدند. خصوصیات مکانیکی ورق برای تعیین رفتار الاستیک و پلاستیک، مطابق جدول 3 اعمال شده و به صورت همسانگرد فرض شد. از آنجا که قالب به‌صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. لایه لاستیکی به صورت‌هایپر الاستیک[3] مدل شده و از بیان انرژی کرنشی مونی ریویلین[4] برای تعریف خواص آن استفاده شده است. در روش مونی ریولین برای تعریف خواص ماده از ضرایب C_{10} و C_{01} و یا داده‌های تست فشار استفاده می‌شود. در این پژوهش برای شبیه‌سازی رفتار لایه لاستیکی با سختی شور 85 A، که در آزمایشات تجربی هم مورد استفاده قرارگرفت، از نتایج تست فشار لاستیک که در شکل 2 نشان داده شده است استفاده شد. همچنین برای تعریف خواص لایه‌های لاستیکی با سختی 55، 75 و 90 شور 85 A از ضرایب C_{10} و C_{01} استفاده شد که مقادیر آن‌ها در جدول 4 نشان‌داده شده است [12،6].

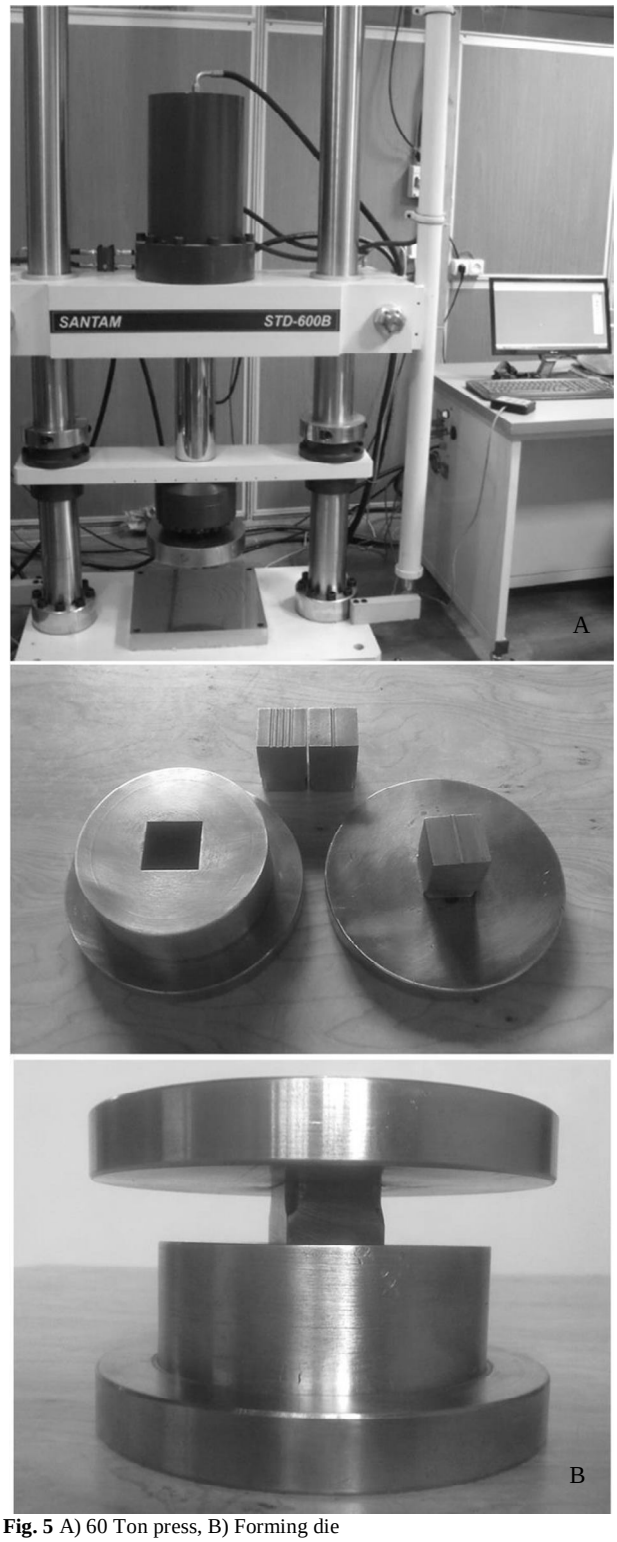

Fig. 5 A) 60 Ton press, B) Forming die

شکل 5 (الف) پرس 60 تن، (ب) مجموعه قالب شکل‌دهی

به دلیل تراکم ناپذیر بودن لایه لاستیکی از ضریب پواسون 0/499 استفاده شد. در این پژوهش شرایط تماسی استفاده شده از نوع تماس مکانیکی با رفتار مماسی با بیان ریاضی پنالتی است. برای تعریف تماس بین ورق و قالب از تماس سطح به سطح استفاده گردید.

[1] Deformable
[2] Analytical Rigid
[3] Hyper elastic
[4] Mooney-Rivilin

Table 3 Mechanical properties of stainless steel 316

جدول 3 خواص مکانیکی ورق فولاد زنگ نزن 316

خواص مکانیکی	واحد	مقدار
مدول الاستیک	گیگاپاسکال	200
ضریب پواسون	-	0.3
تنش تسلیم	مگاپاسکال	269
ضریب استحکام ماده	مگاپاسکال	0/53
نمای کرنش سختی	-	1512
کرنش اولیه	-	0/04

Table 4 Rubber layer properties

جدول 4 مشخصات لایه‌های لاستیکی

سختی لاستیک (ShoreA)	c_{10}	c_{01}	ضریب پواسون
55	0/382	0/096	
75	0/736	0/184	0/499
90	2/824	0/706	

در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس، مدل اصطکاکی کولمب اعمال شده است. براساس مراجع [13] مقدار ضریب اصطکاک برای تماس ورق و قالب 0/45 و ضریب اصطکاک بین لایه لاستیکی و ورق 0/15 در نظر گرفته شده است.

3-2- اعتبار بخشی مدل اجزای محدود

به منظور تعیین دقت مدل اجزای محدود و بررسی صحت نتایج، نمونه‌هایی در 25، 35، 45 و 55 کیلونیوتن توسط قالب با اینسرت‌های تک کانال و چهار کانال شکل داده شد. در مرحله بعد به منظور ارزیابی و تحلیل نمونه‌ها و دست‌یابی به داده‌هایی همچون درصد پرشدگیِ صفحات دوقطبی در شرایط مختلف آزمایش، نمونه‌ها در راستاهای مشخص برش داده شده و به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری عملیاتی بر روی آن‌ها برای آماده سازی سطح مقطع برش داده شده انجام گردید. برای برش نمونه‌ها از دستگاه برش سیمی استفاده شده است. به دلیل کیفیت نامناسب سطح مقطع نمونه‌ها بعد از برش، به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، سطوح برش داده شده توسط رزین اپوکسی قالب‌گیری شده و سپس عملیات سنباده زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

پس از برش نمونه‌ها و مشاهده پارگی در نمونه‌های معیوب، به منظور تعیین زمان وقوع پارگی، ضخامت ناحیه مورد نظر در نمونه شکل داده شده با ضخامت اولیه ورق مقایسه گردید و مشاهده شد که پارگی در لحظه‌ای که حداقل ضخامت ایجاد شده در ورق حدود 66 میکرومتر باشد، رخ می‌دهد. در نتیجه در فرایند شبیه‌سازی نیز به منظور پیش‌بینی وقوع پارگی از درصد نازک شدگی 34 درصد استفاده شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی انجام گرفته است. در ابتدا میزان درصد پرشدگی در شکل‌دهی تک کانال مقایسه شده است که بیشترین اختلاف در نتایج شبیه‌سازی و تجربی 3/9 درصد بدست آمد. نتایج مربوطه در شکل 6 نشان داده شده است. مقایسه عمق کانال در شکل‌دهی چهار میکروکانال نیز در شکل 7 نشان‌داده شده است در این حالت نیز بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی 2/9 درصد محاسبه شد که بیانگر مطابقت نتایج بدست آمده برای تعیین عمق کانال و درصد پرشدگی در حالت تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد. در ادامه نمودار درصد نازک شدگی نمونه‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. بر همین اساس نتایج درصد نازک‌شدگی نمونه‌های تک کانال در نیروهای 25، 35 و 45 به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند. همان طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد و حداکثر اختلاف بین منحنیهای توزیع ضخامت تجربی و شبیه سازی در شکل‌دهی تک کانال، 1/9 درصد می‌باشد. بعد از اطمینان یافتن از صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، در ادامه به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر بر خروجی‌های فرایند، از مدل شبیه‌سازی بدست آمده در این پژوهش استفاده می‌شود که در ادامه نتایج مربوطه ارائه می‌گردد.

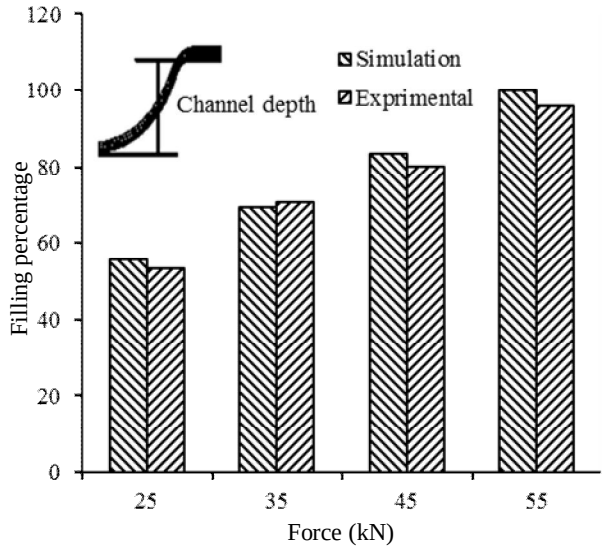

Fig. 6 Comparison of Simulation and experimental filling percentage in forming of one channel

شکل 6 مقایسه درصد پرشدگی تجربی و شبیه‌سازی شکل‌دهی تک کانال

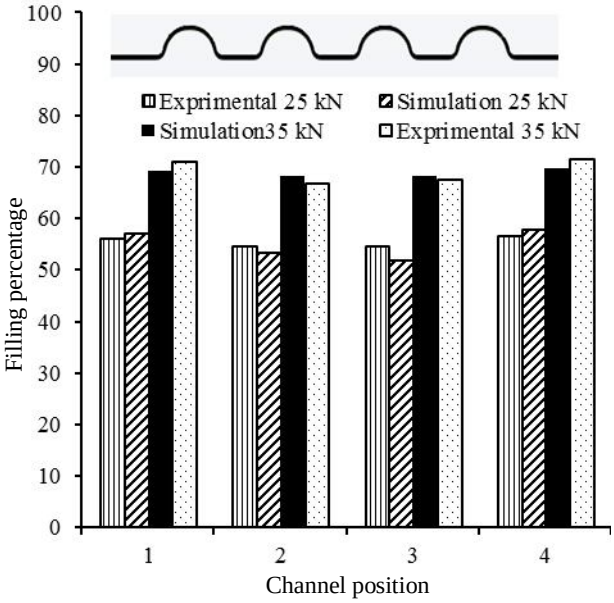

Fig. 7 Comparison of Simulation and experimental channel depth in forming of four channels

شکل 7 مقایسه عمق کانال تجربی و شبیه‌سازی شکل‌دهی چهار کانال

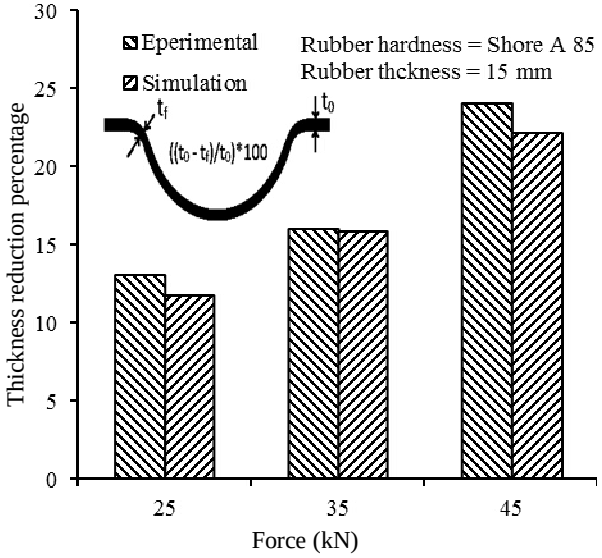

Fig. 8 Comparison of Simulation and experimental thickness reduction percentage

شکل 8 مقایسه درصد کاهش ضخامت ضخامت تجربی و شبیه‌سازی

4- نتایج و بحث

از جمله پارامترهایی که شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توان به مشخصات لایه لاستیکی همچون ضخامت آن اشاره نمود. پارامتر مذکور علاوه بر مؤثر بودن بر کیفیت صفحات از طریق بهبود توزیع ضخامت و همچنین کاهش نیروی مورد نیاز به منظور شکل‌دهی، بر هزینه‌های فرایند نیز تأثیر بسزایی داشته و بر این اساس مطالعه رفتار لایه‌های لاستیکی به منظور آگاهی از نحوه تأثیر گذاری آن بر فرایند، از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو تأثیر پارامتر یاد شده بر شکل‌دهی تک کانال و چهار کانال در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4-1- شکل‌دهی تک کانال

4-1-1- تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر عمق کانال و درصد پرشدگی

ضخامت لایه لاستیکی در فرایند شکل‌دهی علاوه بر اینکه می‌تواند در شکل‌دهی و کیفیت نمونه‌های تولیدی مؤثر باشد از جمله پارامترهایی است که تأثیر بسزایی در هزینه‌های فرایند داشته و افزایش و یا کاهش بیش از اندازه آن می‌تواند بر یکی از جوانب فرایند تأثیر منفی داشته باشد. از این رو در این بخش تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر عمق کانال‌های شکل گرفته مورد بررسی قرار گرفت تا با آگاهی یافتن از نحوه تأثیر ضخامت لایه لاستیکی، بتوان ضخامت مناسب برای انجام فرایند شکل‌دهی انتخاب کرد. برای بررسی تأثیر ضخامت لایه لاستیکی، از لاستیکی با سختی شور 85 A و با ضخامت 1 تا 5/5 میلی‌متر استفاده شده است.

با توجه به شکل 9 افزایش ضخامت لایه لاستیک موجب کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی خواهد شد. اما این تأثیرگذاری بر روی نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی، از ضخامت 1 میلی‌متر تا 3 میلی‌متر ادامه می‌یابد و افزایش ضخامت لایه لاستیکی بیشتر از 3 میلی‌متر تأثیر قابل توجهی بر میزان نیروی شکل‌دهی مورد نیاز نداشته و افزایش بیش از حد آن موجب افزایش هزینه فرایند می‌گردد و تأثیر مثبتی بر عمق کانال ایجاد شده در میکرو کانال‌ها نخواهد داشت. تفاوت در عمق کانالِ ایجاد شده در فرایند شکل‌دهی (توسط لایه‌های لاستیکی متفاوت) در پروفیل سطح مقطع نمونه‌ها هم مؤثر بوده و درصد پرشدگی متفاوتی در نیروی برابر ایجاد خواهد شد. در شکل 10 پروفیل نمونه‌ها در نیروی 54/5 کیلونیوتن نشان داده شده است. با توجه به شکل 10، افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب افزایش درصد پرشدگی خواهد شد. درصد پرشدگی نمونه‌ها از مقدار 50/57 درصد در لایه لاستیکی با ضخامت 1 میلی‌متر به 83/10 درصد در شرایطی که از لاستیکی 3 میلی‌متر استفاده شده است، افزایش می‌یابد.

افزایش میزان نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی با کاهش ضخامت لاستیک به این دلیل می‌باشد که به ازای جابجایی برابر در لایه لاستیکی، میزان کرنش بیشتری در لایه لاستیکی با ضخامت کمتر ایجاد خواهد شد.

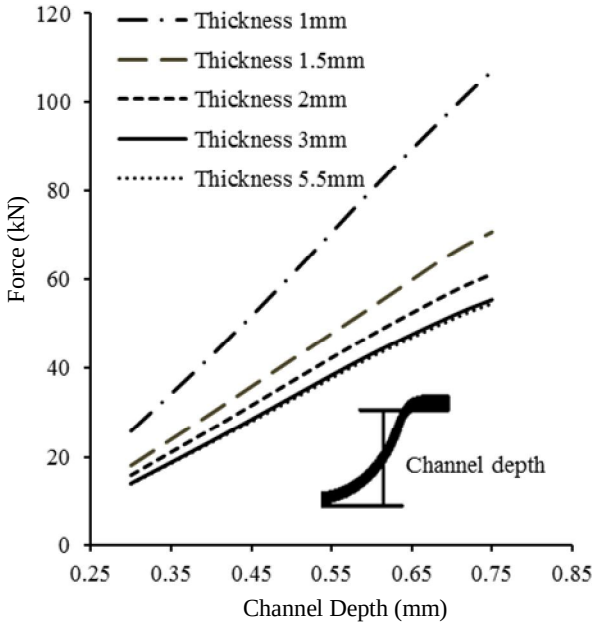

Fig. 9 Effect of rubber thickness on channel depth

شکل 9 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر عمق کانال در شکل‌دهی تک کانال

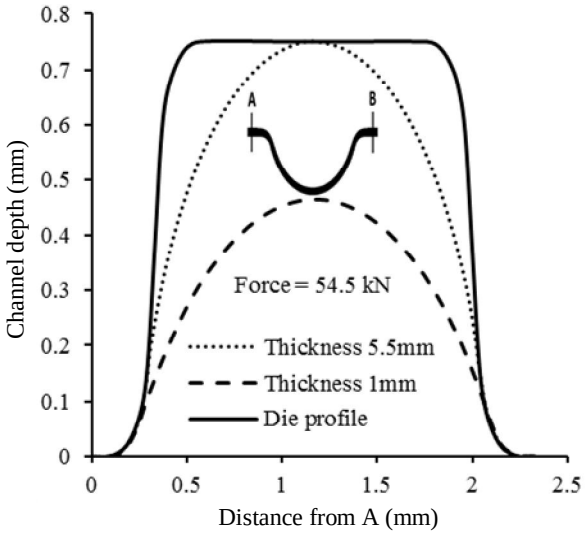

Fig. 10 Effect of rubber thickness on samples cross section

شکل 10 تأثیر ضخامت پروفیل سطح مقطع نمونه‌ها

از سوی دیگر به توجه با شکل 2 برای ایجاد کرنش‌های بالاتر در لایه لاستیکی میزان تنش با شیب بیشتری نسبت به کرنش‌های کمتر افزایش می‌یابد (در شکل 2 شیب منحنی در ناحیه C بیشتر از شیب منحنی در ناحیه A و B می‌باشد). این بدان معنی است که نیروی بالاتری برای ایجاد تغییر شکل در لایه لاستکی با ضخامت کمتر نیاز می‌باشد. در نتیجه کاهش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش تغییرشکل ایجاد شده در آن به ازای نیروی یکسان شده و در نهایت به میزان کمتری در کانال‌ها نفوذ کرده و متعاقباً عمق کانال کمتری در ورق ایجاد خواهد شد. در شکل 11 میزان کرنش ایجاد شده در لایه لاستیکی با ضخامت‌های متفاوت برای دست‌یابی به عمق کانال یکسان نشان داده شده است. با توجه به شکل 11 نیز می‌توان به این مسأله پی برد که کرنش ایجاد شده در لایه لاستیکی با ضخامت 1 میلی‌متر بیشتر از لایه لاستیکی با ضخامت 3 میلی‌متر می‌باشد. در ادامه با اندازه‌گیری میزان عمق کانال در نیروهای 10، 30 و 50 کیلونیوتن و با استفاده از معیار پرشدگی d/D میزان درصد پرشدگی در نمونه‌ها توسط لایه‌های لاستیکی با ضخامت متفاوت محاسبه شد که پارامتر d تعیین کننده میزان عمق کانال و D بیانگر عمق کانال قالب (0/75 میلی‌متر) می‌باشد. با توجه به نتایج، با افزایش ضخامت لایه لاستیکی میزان درصد پرشدگی افزایش یافته و تأثیرگذاری افزایش ضخامت لاستیک بر درصد پرشدگی در ضخامت‌های پایین (1 تا 3 میلی‌متر) به مراتب بیشتر از تأثیرگذاری این پارامتر بر درصد پرشدگی هنگام افزایش ضخامت از 3 به 5/5 میلی‌متر می‌باشد. به عنوان مثال میزان درصد پرشدگی در نیروی 50 کیلونیوتن در حالتی که از لایه لاستیکی با ضخامت 1 میلی‌متر استفاده شده است 58/9 درصد می‌باشد که با استفاده از لاستیک با ضخامت 3 میلی‌متر به 89/56 درصد افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش 30/66 درصدی می‌باشد اما افزایش ضخامت از 3 به 5/5 میلی‌متر موجب افزایش درصد پرشدگی به مقدار 91/68 درصد خواهد شد که بیانگر افزایش 2/12 درصدی در میزان درصد پرشدگی می‌باشد. نتایج ذکر شده در شکل 12 نشان داده شده است.

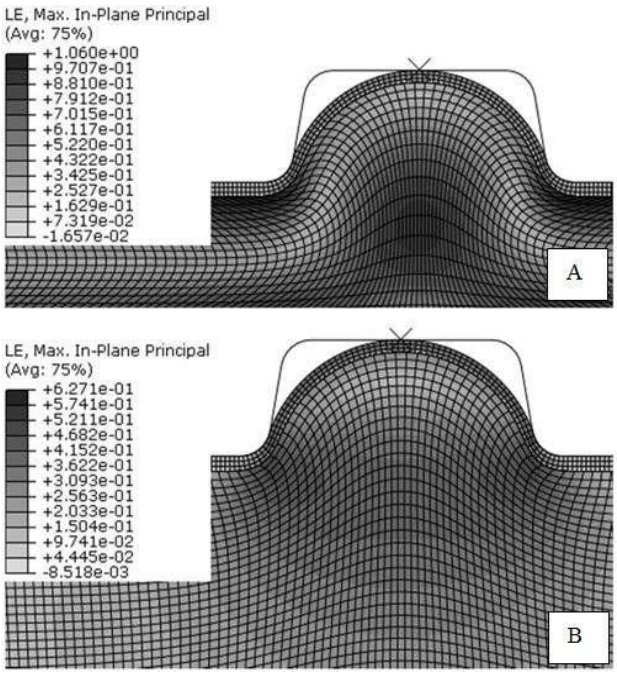

Fig. 11 Strain in rubber layer, A) Thickness 3 mm, B) Thickness 1 mm

شکل 11 میزان کرنش در لایه لاستیکی (الف) ضخامت 3 میلی‌متر، (ب) ضخامت 1 میلی‌متر

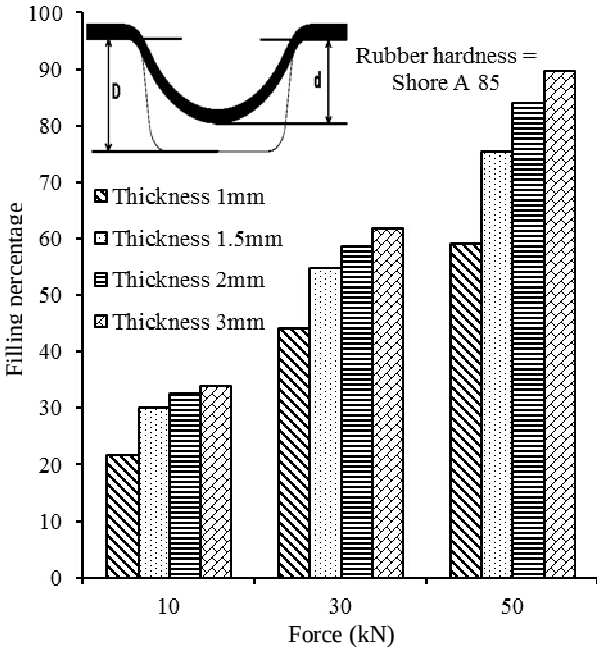

Fig. 12 Effect of rubber thickness on filling percentage in forming of one channel

شکل 12 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر درصد پرشدگی در شکل‌دهی تک کانال

4-2- شکل‌دهی چهار کانال

در ادامه پژوهش و بعد از آگاهی یافتن از نحوه تأثیرگذاری پارامترها بر خروجی‌های مورد نظر در شکل‌دهی تک کانال، پارامترهای مذکور در شکل‌دهی چهار میکروکانال موازی مورد بررسی قرار گرفتند تا نتایج بدست آمده محدود به شکل‌گیری تک کانال نبوده و قابلیت تعمیم به تعداد کانال‌های بیشتری را داشته باشد.

4-2-1- تأثیر ضخامت بر عمق کانال

روندی مشابه با آنچه در شکل‌دهی تک کانال مشاهده شد، در شکل‌دهی چهار کانال نیز به وقوع می‌پیوندد. مطابق با شکل 13 افزایش ضخامت لایه لاستیکی در این شرایط، از میزان 1/5 میلی‌متر تا 5/5 میلی‌متر موجب کاهش نیرو مورد نیاز برای شکل‌دهی خواهد شد.

به بیان دیگر با افزایش ضخامت لاستیک، میزان عمق کانال در نیروی برابر افزایش می‌یابد. در هنگام شکل‌دهی چهار کانال، افزایش ضخامت لایه لاستیکی از 5/5 میلی‌متر به 7/5 میلی‌متر تأثیر قابل توجهی بر فرایند نخواهد داشت. با توجه به نتایج بدست آمده، میزانِ حداقل ضخامت مورد نیاز برای لایه لاستیکی با افزایش تعداد میکروکانال‌ها افزایش می‌یابد (حداقل ضخامت 3 میلی‌متر در شکل‌دهی تک کانال به 5/5 میلی‌متر در شکل‌دهی چهار کانال افزایش یافت). این موضوع به این دلیل می‌باشد که برای ایجاد یک عمق کانال برابر در هنگام شکل‌دهی چهار میکروکانال، لایه لاستیکی نیاز به تغییر شکل بیشتری نسبت به شکل‌دهی یک میکروکانال خواهد داشت در نتیجه به دلیل ایجاد کرنش‌های بیشتر در این شرایط، به منظور جلوگیری از افزایش نیروی شکل‌دهی (جلوگیری از ایجاد کرنش‌های زیاد در لاستیک) حداقل ضخامت لایه لاستیکی افزایش خواهد یافت.

میزان درصد پرشدگی در نیروهای 10، 30 و 50 کیلونیوتن و لایه‌های لاستیکی با ضخامت 1/5 الی 5/5 میلی‌متر، با اندازه گیری عمق کانال و با استفاده از معیار (d/D) محاسبه شده و در شکل 14 نشان‌داده شده است.

نتایج بیانگر افزایش درصد پرشدگی با افزایش ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد. بیشترین میزان درصد پرشدگی در نیروی 50 کیلونیوتن، به میزان 90/6 درصد در لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر بدست آمد. با توجه به نتایج، میزان اختلاف درصد پرشدگی نمونه‌ها در نیروهای بالاتر افزایش می‌یابد که این موضوع ناشی از افزایش اختلاف عمق کانال‌ها به ازای نیروی یکسان، در نیروهای بالاتر می‌باشد. به عنوان نمونه، عمق کانال در نیروی 30 کیلونیوتن در لایه لاستیکی با ضخامت 2/5 میلی-متر از مقدار 0/44 میلی‌متر به 0/46 میلی‌متر در نیروی 30 کیلونیوتن در لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش 0/02 میلی‌متری می‌باشد.

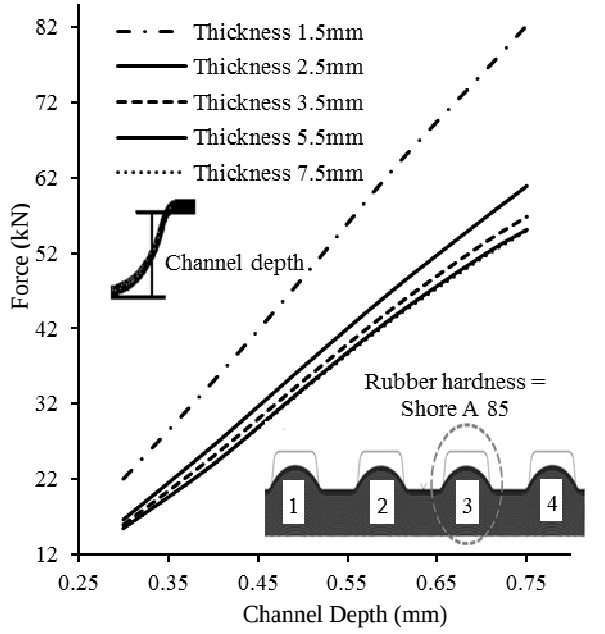

Fig. 13 Effect of rubber thickness on channel depth

شکل 13 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر عمق کانال

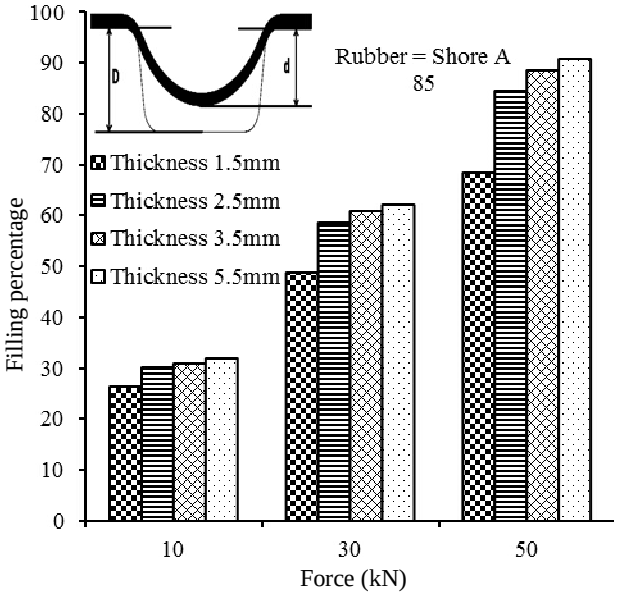

Fig. 14 Effect of rubber thickness on filling percentage in forming of four channels

شکل 14 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر درصد پرشدگی در شکل‌دهی چهار کانال

اما عمق کانال در نیروی 50 کیلونیوتن در لایه لاستیکی با ضخامت 2/5 میلی‌متر از مقدار میلی‌متر 0/63 به 0/68 میلی‌متر در نیروی 50 کیلونیوتن در لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی-متر افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش 0/05 میلی‌متری می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده افزایش تأثیر ضخامت بر عمق کانال و درصد پرشدگی در نیروهای بالاتر می‌باشد.

4-2-2- تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت

شکل 15 نشان‌دهنده تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت نمونه‌های شکل داده شده چهار کانال می‌باشد. برای بررسی تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت، از لایه لاستیکی با سختی شور 85 A و ضخامت‌های 1/5 و 5/5 میلی‌متر استفاده شد. اندازه‌گیری ضخامت در همه حالات در نیروی 55 کیلونیوتن انجام گرفت.

مطابق با نتایج، حداقل ضخامت بدست‌آمده در شکل‌دهی چهار کانال توسط لاستیک‌هایی با ضخامت 1/5 و 5/5 میلی‌متر، برابر با 0/806 و 0/691 میلی‌متر بدست آمد. همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده است، حداقل ضخامتِ ایجاد شده در ورق در نواحی A و B به ازای نیروی شکل‌دهی برابر، با کاهش ضخامت لاستیک افزایش می‌یابد که ناشی از کاهش عمق کانال قابل دستیابی با کاهش ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد.

با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبل بیان شد، افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب افزایش عمق کانال نمونه‌ها در نیروی برابر می‌گردد. افزایش عمق کانال نیازمند جریان فلز و تغییر شکل بیشتر در آن می‌باشد که این موضوع موجب افزایش کرنش ایجاد شده در بخش‌های مختلف و در نهایت کاهش ضخامت بیشتر در این نواحی می‌گردد.

شکل 15 نشان دهنده نحوه توزیع ضخامت ایجاد شده در شرایط متفاوت می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین میزان کاهش ضخامت در ناحیه B اتفاق می‌افتد که به علت تمرکز تغییر شکل در این ناحیه (شعاع گوشه خارجی) و ایجاد کرنش کششی بیشتر می‌باشد که در نهایت موجب کاهش شدید ضخامت می‌گردد. در شکل 16 میزان کرنش در نواحی مختلف ورق‌های شکل‌داده شده توسط لایه لاستیکی با سختی شور 85 A و ضخامت‌های 1/5 و 5/5 میلی‌متر نشان داده شده است. مطابق با نتایج شکل 16 میزان کرنش بیشتری در نمونه‌ی شکل‌دهی شده توسط لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر به وجود می‌آید که در نهایت موجب کاهش ضخامت بیشتری در این ناحیه می‌گردد. با توجه به روند توزیع ضخامت در نمونه‌ها و تعیین نواحی بحرانی و همچنین اندازه‌گیری حداقل ضخامت در این ناحیه، میزان درصد نازک شدگی در نیروهای مختلف و لایه-های لاستیکی با ضخامت 1/5 تا 5/5 میلی‌متر محاسبه گردید و در شکل 17 نشان داده شد.

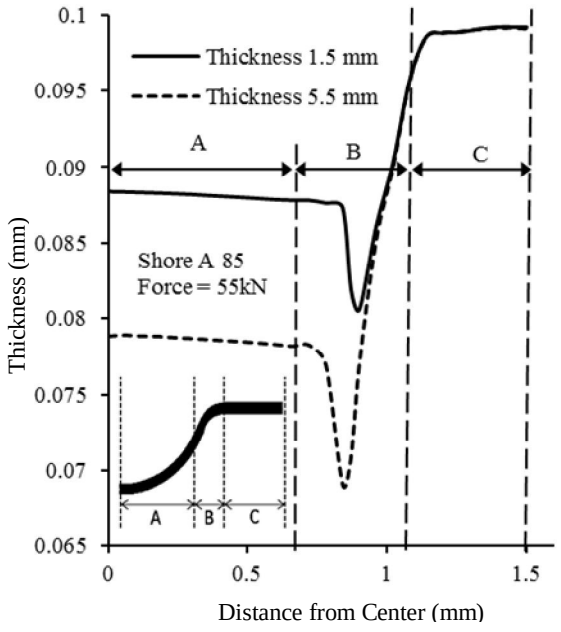

Fig. 15 Effect of rubber thickness on thickness distribution

شکل 15 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت در شکل‌دهی چهار کانال

با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش نیرو در هنگام شکل‌دهی با لایه‌های لاستیکی با ضخامت متفاوت، موجب افزایش درصد

نازک شدگی می‌گردد که ناشی از افزایش عمق کانال ایجاد شده در نمونه‌ها و در نتیجه ایجاد کشیدگی بیشتر در ورق و متعاقب آن سریع‌تر شدن روند افزایش درصد نازک شدگی می‌باشد. همچنین شکل 17 نیز نشان می‌دهد که میزان درصد نازک شدگی در یک نیروی برابر با افزایش ضخامت لایه لاستیکی افزایش می‌یابد.

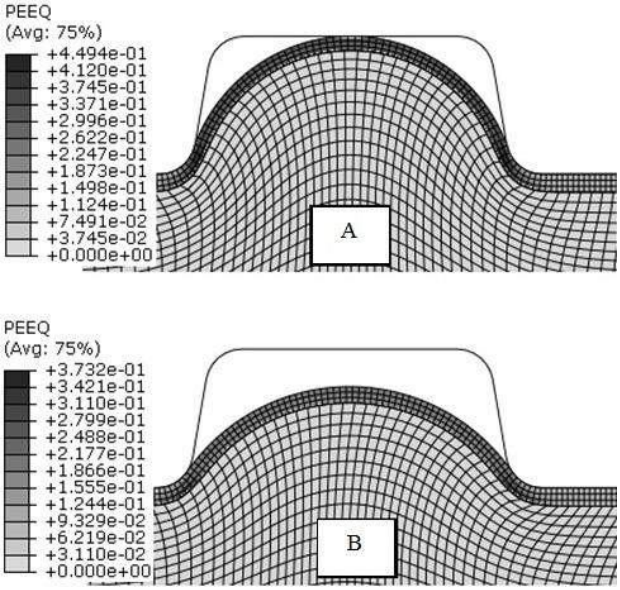

Fig. 16 Strain of central channel in forming of four channel, A) Rubber layer 5.5 mm thick, B) Rubber layer 1.5 mm thick

شکل 16 کرنش کانال میانی در شکل‌دهی چهار کانال (الف) لایه لاستیکی 5/5 میلی‌متر، (ب) لایه لاستیکی 1/5 میلی‌متر

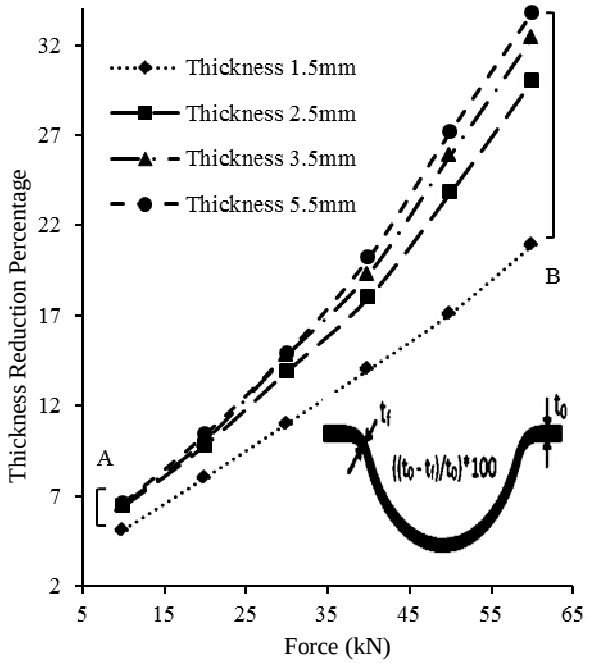

Fig. 17 Effect of rubber thickness on Thickness reduction percentage

شکل 17 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر درصد نازک شدگی در شکل‌دهی چهار کانال

با توجه به مطالب پیشین این موضوع به دلیل افزایش میزان عمق کانال و کرنش کششی در اثر افزایش ضخامت لایه لاستیکی به ازای نیروی برابر می‌باشد. به عنوان نمونه میزان درصد نازک شدگی در نیروی 60 کیلو نیوتن با استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر، 20/9 درصد بدست آمد که این مقدار به 33/8 درصد با استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر افزایش یافت.

علاوه بر موارد ذکر شده میزان اختلاف درصد نازک شدگی در نیروهای شکل‌دهی بالا افزایش می‌یابد (افزایش اختلاف میان خطوط ترسیم شده در شکل 17 در نیروهای بالاتر). این موضوع ناشی از افزایش اختلاف عمق کانال در نیروهای بالاتر می‌باشدکه در شکل‌های 9 و 13 نشان داده شده است. افزایش اختلاف عمق کانال موجب افزایش اختلاف کرنش ایجاد شده در ناحیه بحرانی و در نهایت باعث افزایش اختلاف درصد نازک شدگی در نمونه-های شکل‌داده شده توسط لایه لاستیکی با ضخامت متفاوت، در نیروی‌های بالاتر می‌باشد. به عنوان مثال درصد نازک شدکی در نیروی 10 کیلونیوتن با استفاده از لایه‌های لاستیکی با ضخامت 1/5 و 5/5 میلی‌متر به ترتیب 5.1 و 6.6 درصد می‌باشد که بیانگر اختلاف 1/5 درصدی (ناحیه A در شکل 17) می‌باشد، اما میزان درصد نازک شدکی در نیروی 50 کیلونیوتن با استفاده از لایه‌های لاستیکی با ضخامت 1/5 و 5/5 میلی‌متر به ترتیب 17/1 و 27/2 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده اختلاف 10/1 درصدی (ناحیه B در شکل 17) می‌باشد. به توجه به مقادیرِ بیان شده، مقدار اختلاف درصد نازک شدگی از 1/5 درصد در نیروی 10 کیلونیوتن به 10/1 درصد در نیروی 50 کیلونیوتن افزایش یافت که بیانگر افزایش اختلاف درصد نازک شدگی (افزایش فاصله خطوطِ مربوط به ضخامت 5/5 و 1/5 میلی‌متر در شکل 17) می‌باشد.

نکته دیگری که در تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر توزیع ضخامت وجود دارد یکنواختی توزیع ضخامت و حداقل ضخامت ایجاد شده در گوشه‌های خارجی سمت راست و چپ (ناحیه A و B در شکل 18) می‌باشد. بررسی نتایج بدست‌آمده از توزیع ضخامت بیانگر افزایش یکنواختی روند توزیع ضخامت با افزایش ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد. با توجه به نتایج در حالتی که از لایه لاستیکی با ضخامت کم برای شکل‌دهی میکروکانال‌ها استفاده می‌گردد اختلافی میان حداقل ضخامت ایجاد شده در ناحیه A و B (شکل 18) می‌گردد. این مسأله به دلیل جریان غیر یکنواخت لایه لاستیکی با ضخامت کم می‌باشد.

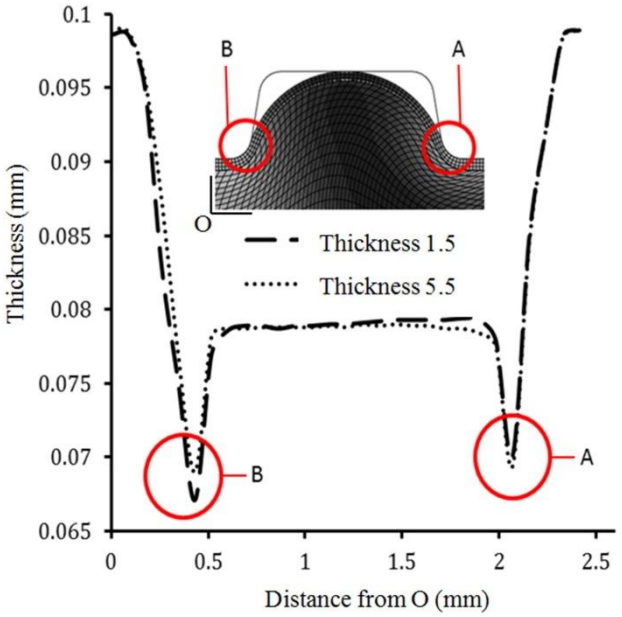

Fig. 18 Effect of rubber thickness on uniformity of thickness distribution

شکل 18 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر یکنواختی توزیع ضخامت

در این شرایط یک سمت از ورق (ناحیه A) بیشتر از سمت دیگر (ناحیه B) به دیواره قالب فشرده می‌گردد، در نتیجه جریان فلز در ناحیه A دشوارتر بوده و باعث می‌شود میزان کرنش کششی کمتری در این ناحیه ایجاد شود و در نهایت میزان حداقل ضخامت ایجاد شده در این ناحیه نسبت به ناحیه B کمتر می‌باشد.

حداقل ضخامت ایجاد شده با استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر در عمق کانال 0/75 میلی‌متر در ناحیه A و B به ترتیب 0/0701 و 0/0671 می باشد که بیانگر درصد نازک شدگی 29 و 32 درصد می‌باشد. اما در شرایطی که از لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 استفاده شد حداقل ضخامت ایجاد شده در ناحیه A و B به ترتیب 0/0694 و 0/0690 که بیانگر درصد نازک شدگی 30/6 و 31 درصد می‌باشد.

همان‌طور که از میزان درصد نازک شدگی در شرایط مختلف پیداست، اختلاف بین درصد نازک شدگی از 3 درصد در شرایطی که از لایه لاستیکی 1/5 میلی‌متر استفاده شده است به 0/4 درصد در حالتی که از لاستیکی 5/5 میلی‌متر استفاده شد، کاهش یافت. این موضوع بیانگر افزایش یکنواختی توزیع ضخامت با استفاده از لایه‌های لاستیکی ضخیم‌تر می‌باشد که در کیفیت صفحات تولید شده از فرایند و در نهایت در بازده پیل سوختی موثر خواهد بود. همچنین با توجه به شکل 18 نتیجه دیگری که حائز اهمیت می‌باشد، تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر درصد نازک شدگی در عمق کانال یکسان می‌باشد. با توجه به شکل 18 که توزیع ضخامت در عمق کانال 0/75 میلی‌متر در شرایطی که از لایه‌های لاستیکی با ضخامت 1/5 و 5/5 میلی‌متر استفاده شده است، نشان داده شده است. حداقل ضخامت‌های بدست‌آمده با استفاده از لایه‌های لاستیکی 1/5 و 5/5 میلی‌متر به ترتیب 0/067 و 0/069 میلی‌متر بدست‌آمد. با مقایسه حداقل ضخامت‌های ایجاد شده در ناحیه بحرانی (B) می‌توان دریافت که افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش میزان درصد نازک شدگی از 33 درصد به 31 درصد می‌گردد که ناشی از کاهش نیروی شکل‌دهی می‌باشد. کاهش نیروی شکل‌دهی موجب افزایش تغذیه ورق از دیواره قالب به حفره شکل‌دهی می‌گردد تا بخشی از کاهش ضخامت ایجاد شده در نواحی بحرانی تغییر شکل (شعاع گوشه داخلی) را جبران نماید. این موضوع بیانگر بهبود 2 درصدی در کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی می‌گردد و با توجه به ضخامت اندک ورق اولیه این میزان موجب بهبود شرایط شکل‌دهی و افزایش درصد پرشدگی نهایی می‌گردد.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحه دو قطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی با هدف افزایش میزان عمق کانال و درصد پرشدگی و همچنین بهبود توزیع ضخامت و کاهش درصد نازک شدگی ارائه شده است. بر این اساس تأثیر متغیرهایی همچون ضخامت لایه لاستیکی و نیروی شکل‌دهی بر خروجی‌های مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصل از پژوهش در ادامه بیان شده است:

- افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی خواهد شد. به بیان دیگر میزان عمق کانال شکل‌گرفته در نمونه‌ها در یک نیروی برابر، با افزایش ضخامت لایه لاستیکی (در محدوده‌ای مشخص) افزایش می‌یابد و فراتر از این محدوده تأثیر چندانی بر عمق کانال نخواهد داشت. بیشترین میزان عمق کانال (0/75 میلی‌متر) در شکل‌دهی تک کانال در بهترین شرایط (لایه لاستیکی ضخامت 3 میلی‌متر) در نیروی 50/45 کیلونیوتن و با استفاده از لایه لاستیکی باضخامت 1 میلی‌متر در نیروی 107/025 کیلونیوتن بدست آمده که بیانگر کاهش 52/86 درصدی در نیروی شکل‌دهی به ازای افزایش ضخامت لاستیکی از 1 به 3 میلی‌متر می‌باشد. همچنین نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی چهار کانال توسط لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر 55/15 بدست آمد که نشان‌دهنده کاهش نیروی مورد نیاز در مقایسه با نیروی مورد نیاز شکل‌دهی در

شرایط استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1/5 میلی‌متر (82/25 کیلونیوتن) می‌باشد.

- محدوده تأثیر گذاری ضخامت لایه لاستیکی در فرایند شکل‌دهی با توجه به ابعاد و تعداد میکروکانال‌های در حال شکل‌گیری، متغیر می‌باشد. به عنوان مثال برای شکل‌دهی یک میکروکانال با توجه به نتایج بدست‌آمده در این پژوهش، افزایش ضخامت لایه لاستیکی از 3 به 5/5 میلی‌متر تأثیر چندانی بر فرایند نداشته در نتیجه ضخامت 3 میلی‌متر بهترین مقدار می‌باشد اما در شکل‌دهی چهار میکروکانال افزایش ضخامت لایه لاستیکی از 1/5 تا 5/5 بر فرایند شکل‌دهی موثر بوده اما افزایش آن از 5/5 به 7/5 میلی‌متر تأثیر چندانی برا فرایند نخواهد داشت. در نتیجه حداقل ضخامت مورد نیاز برای شکل‌دهی از 3 میلی‌متر در شکل‌دهی تک کانال به 5/5 میلی‌متر در شکل‌دهی چهار کانال افزایش می‌یابد.

- افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش حداقل ضخامت ایجاد شده در نمونه‌ها در نیروی برابر و همچنین افزایش درصد نازک شدگی در ناحیه بحرانی ناحیه می‌گردد. با توجه به نتایج بدست آمده حداقل ضخامت بدست‌آمده در شکل‌دهی چهار کانال توسط لاستیک‌هایی با ضخامت 1/5 و 5/5 میلی‌متر در نیروی 55 کیلونیوتن برابر با 0/0806 و 0/691 میلی‌متر بدست آمد. همچنین بیشترین درصد نازک شدگی در نیروی 60 کیلونیوتن توسط لایه لاستیکی با ضخامت 5/5 میلی‌متر به مقدار 33/8 درصد بدست‌آمد.

- افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب بهبود یکنواختی توزیع ضخامت در شعاع گوشه‌های چپ و راست می‌گردد به نحوی که اختلاف بین درصد نازک شدگی در عمق کانال 0/75 میلی‌متر از 3 درصد در شرایطی که از لایه لاستیکی 1/5 میلی‌متر استفاده شده است به 0/4 درصد در حالتی که از لاستیکی 5/5 میلی‌متر استفاده شد، کاهش یافت.

- افزایش ضخامت لایه لاستیکی از 1/5 به 5/5 میلی‌متر موجب بهبود 2 درصدی در میزان نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی تغییر شکل (شعاع گوشه) می‌گردد.

6- مراجع

[1] S. Mahabunphachai, *A hybrid hydroforming and mechanical bonding process for fuel cell bipolar plates*, Doctor of Philosophy, University of Michigan, 2008.

[2] I. Bar-On, R. Kirchain, R. Roth, Technical cost analysis for PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, pp. 71–75, 2002.

[3] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, Bipolar plate for pem fuel cells:Areview, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 1297-1302, 2005

[4] J. Wind, R. Spah, W. Kaiser, G. Boehm, Metallic bipolar plate for pem fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 105, pp. 256-260, 2002

[5] M. Belali-Owsia, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. H. Gorji, A new process of forming metallic bipolar plates for PEMfuel cell with pin-type pattern, *International journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 77, pp. 1281-1293, 2014.

[6] Y. Liu, L. Hua, Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell by rubber pad forming, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 3529–3535, 2010.

[7] S. S. Lim, Y. T. Kim, C. G. Kang, Fabrication of aluminum1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process, *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 231-238, 2013.

[8] M. G. Jeong, Ch. K. Jin, G. W. Hwang, Ch. G. Kang, Formability evaluation of stainless steel bipolar plate considering draft angle of die and process parameters by rubber forming, *Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, pp. 913-919, 2014.

[9] C. K. Jin, M. G. Jeong, C. G. Kang, Fabrication of titanium bipolar plates by rubber forming and performance of single cell using TiN-coated titanium bipolar plates, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 21480–21488, 2014.

[10] 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 فارسی).

[11] M. Elyasi, F. Ahmadi khatir, M. Hosseinzadeh, Investigation of 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 فارسی)

[12] A. Prete, G. Papadia, B. Manisi, Computer aided modelling of rubber pad forming process, *Key Engineering Materials*, Vol. 473, pp. 637-644, 2011.

[13] S. Yong-na, W. Min, W. Xiang-dong, Friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 2952−2959, 2012.