



بررسی دقت ابعادی میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی

مجید الیاسی^{1*}، حسین طالبی قادیکولایی²، مرتضی حسین‌زاده³

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

چکیده

اطلاعات مقاله

صفحات دو قطبی فلزی یکی از بخش‌های اصلی تشکیل دهنده پیل سوختی است. برای تولید این صفحات از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود که در این میان می‌توان فرایندهای شکل‌دهی الکترومغناطیسی، هیدروفورمینگ، پرس کاری و شکل‌دهی لاستیکی را نام برد. در این پژوهش، تأثیر متغیرهای فرایند بر دقت ابعادی صفحات دو قطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی بررسی شد. بدین منظور از نرم‌افزار آباکوس/استاندارد در شبیه‌سازی فرایند مورد نظر استفاده گردید و صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش 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، سختی لایه لاستیکی، ضخامت لایه لاستیکی و لقی بین سنبه و محفظه نگهدارنده لایه لاستیکی بر روی دقت ابعادی نمونه‌های شکل‌داده شده می‌باشد. به این منظور از لایه‌های لاستیکی با سختی 55، 70، 85 و 90 شور A و ضخامت‌های 1.5 تا 5.5 میلی‌متر استفاده شده است. پس از انجام آزمایش‌های مورد نظر و بررسی نتایج مشخص گردید که اختلافی بین عمق کنال‌های کناری و میانی می‌باشد که این اختلاف با افزایش نیروی شکل‌دهی کاهش یافته و در نهایت موجب افزایش دقت ابعادی شده است. مطابق با نتایج این پژوهش افزایش سختی لایه لاستیکی و ضخامت آن موجب افزایش دقت ابعادی می‌گردد. به علاوه میزان لقی بین سنبه و محفظه نگهدارنده لایه لاستیکی نیز موجب کاهش اختلاف عمق کنال‌های کناری و میانی و در نتیجه موجب افزایش دقت ابعادی نمونه‌های شکل‌داده شده است.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 25 مهر 1394
 پذیرش: 10 آبان 1394
 ارائه در سایت: 14 آذر 1394
 کلید واژگان:
 صفحات دو قطبی فلزی
 شکل‌دهی لاستیکی
 ضخامت لاستیک
 سختی لاستیک
 دقت ابعادی

Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process

Majid Elyasi^{1*}, Hossein Talebi Ghadikolaee¹, Morteza Hosseinzadeh²

- 1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani 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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 18 August 2015
 Accepted 01 November 2015
 Available Online 05 December 2015

Keywords:
 Metallic bipolar plates
 Rubber Pad forming
 Rubber thickness
 Hardness of rubber
 Dimensional accuracy

ABSTRACT

Metallic bipolar plate is one of the main parts of fuel cell. Several methods have been used by researchers to manufacture bipolar plate such as stamping, hydroforming and electromagnet forming. The effect of process parameters on dimensional accuracy of metallic bipolar plates in rubber pad forming process has been investigated in this study. ABAQUS/Standard finite element software is used to simulate the process. The accuracy of the results of simulation process is evaluated by using experimental results. To perform experimental procedures, rigid die with parallel flow field is used to form SS316 bipolar plate, 0.1 mm thick. For this purpose the effect of punch load, rubber hardness, rubber thickness and clearance between die and container on the dimensional accuracy of the formed parts is investigated. In this regard, rubber layer with hardness of 55, 70, 85 and 90 Shore A and thickness of 1.5mm up to 5.5mm were used. The results show difference between lateral and central channel depth, the amount of disparity will decrease by increases in punch load, so the dimensional accuracy will increase. According to the result, increase in hardness and thickness of the rubber layer leads to improvement in the dimensional accuracy. Also, the clearance between die and container decreases the difference between lateral and central channel depth and eventually cause an increase in dimensional accuracy of formed part.

1- مقدمه

کارایی و صرفه اقتصادی برطرف شود. مجموعه پیل سوختی از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که به منظور بهینه‌سازی این تکنولوژی تلاش‌های زیادی برای کاهش هزینه ساخت قسمت‌های مختلف آن انجام گرفته است. در میان اجزای مختلف تشکیل دهنده پیل سوختی، صفحات دوقطبی 60 تا

با توجه به گسترش استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر به عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی و کاربرد این منابع در صنایع مختلف، در سال‌های اخیر سعی شده است تا موانع پیش‌روی تکنولوژی پیل سوختی به منظور افزایش

Please cite this article using:

M. Elyasi, H. Talebi Ghadikolaee, M. Hosseinzadeh, Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 461-471, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

لاستیکی و کاهش سختی آن و همچنین افزایش نیرو و سرعت پرس، موجب افزایش عمق کانال قابل دستیابی در فرایند خواهد شد.

گیل کنگ و همکاران [9] شکل‌دهی ورق تیتانیومی با ضخامت 0.1 میلی‌متر توسط فرایند شکل‌دهی با لایه لاستیکی بررسی کردند. 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 گرفت. مطابق با نتایج بدست آمده در این پژوهش، افزایش ضخامت لایه لاستیک و کاهش سختی آن موجب بهبود عمق کانال در نمونه‌های شکل‌داده شده خواهد شد. در نهایت با توجه به تأثیر متغیرها بر روی عمق کانال صفحات دو قطبی، مقادیر مناسب برای متغیرهای شکل‌دهی را انتخاب نمودند.

جونگ و همکاران [10] تأثیر سرعت پانچ، فشار اعمالی به مجموعه، ضخامت لاستیک و سختی لاستیک را در شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس SS304 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این موضوع است 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 است. همچنین تأثیر زاویه دیواره قالب بر دقت ابعادی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که افزایش زاویه دیواره باعث افزایش دقت ابعادی و یکنواختی عمق کانال‌ها می‌شود.

الیاسی و همکاران [11] تأثیر الگوی شکل‌دهی محدب و مقعر بر نیروی شکل‌دهی و پرشدگی کانال‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از ورق فولاد زنگ نزن 316 با ضخامت 0.1 میلی‌متر و لایه لاستیکی با سختی شور A 85 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 بیشینه، میزان عمق پرشدگی در قالب مقعر ثابت مانده و افزایش نیرو موجب تخریب لاستیک می‌شود.

علاوه بر موارد ذکر شده، تحقیقاتی در زمینه هیدروفرمینگ صفحات دو قطبی فلزی انجام گرفته است که در این میان می‌توان به پژوهش انجام گرفته توسط نفیسه محمدتبار و همکاران [12] اشاره کرد. در این تحقیق شکل‌دهی یک الگوی شیاری ماریچ متصل به هم بر روی صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن 304 با فرایند هیدروفرمینگ به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفت. اثر پارامترهای فرایندی و هندسی قالب بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده این موضوع می‌باشند که با افزایش فشار شکل‌دهی، پرشدگی قالب افزایش می‌یابد و ضخامت ناحیه بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش، بیشتر کاهش می‌یابد.

در پژوهش دیگری که توسط بلالی اوصیا و همکاران [13] انجام گرفت شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با ضخامت 0.11 میلی‌متر و با الگوی پینی به کمک فرایند هیدروفرمینگ در قالب محدب بطور تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا پارامترهای مختلفی نظیر سطح فشار اعمالی، هندسه پین و نسبت عمق به عرض تغییر داده شده و نتایجی شامل پروفیل شکل داده شده، درصد

80 درصد از وزن مجموعه پیل سوختی و همچنین 30 تا 45 درصد از هزینه‌های آن را تشکیل می‌دهند، در نتیجه در میان اجزای مختلف مجموعه پیل سوختی، صفحات دوقطبی از لحاظ حجم، وزن و هزینه در جایگاه بالایی قرار دارند و با توجه به موارد ذکر شده این صفحات را می‌توان از اصلی‌ترین قسمت‌های تشکیل‌دهنده این مجموعه دانست [2،1].

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 این صفحات انجام گرفته است. بر این اساس صفحات گرافیتی، کامپوزیتی و فلزی به منظور ساخت صفحات دوقطبی مورد استفاده قرار گرفتند [3]. در میان گزینه‌های ذکر شده، صفحات فلزی به دلیل ویژگی‌هایی مانند رسانایی بالا، خواص مکانیکی مطلوب، خواص الکتریکی مطلوب، خواص گرمایی مناسب و قابلیت تولید نسبتاً خوب بیشتر از صفحات گرافیتی و کامپوزیتی مورد توجه قرار گرفتند [4].

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 [3،5،6]. به علاوه روش‌های متفاوتی مانند فرایندهای هیدروفرمینگ¹، پرس‌کاری² و شکل‌دهی لاستیکی³ گروهی از روش‌های شکل‌دهی می‌باشند که برای ایجاد الگوی مسیر جریان بر روی صفحات دو قطبی فلزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

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 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 اشاره می‌شود.

لیو و همکاران [7] شکل‌دهی صفحات دو قطبی با فرایند شکل‌دهی لاستیکی را مورد بررسی قرار دادند. از شبیه‌سازی دو بعدی فرایند مورد نظر برای بررسی اثر شعاع گوشه قالب، زاویه دیواره و سختی لاستیک استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد افزایش شعاع گوشه باعث پرشدگی بهتر کانال‌ها می‌شود و همچنین احتمال پارگی کاهش می‌یابد. طبق نتایج سختی لاستیک تأثیر زیادی بر روی توزیع تنش در ورق‌های شکل یافته نداشته و همچنین افزایش زاویه دیواره باعث کاهش نیروی لازم برای شکل‌دهی خواهد شد.

لیم و همکاران [8] شکل‌دهی صفحات دو قطبی از جنس آلومینیوم 1050 را مورد بررسی قرار دادند. آنها ابتدا تأثیر ابعاد سطح مقطع کانال بر روی نحوه‌ی جریان گازها در کانال را مورد بررسی قرار داده و در ادامه تأثیر سرعت پرس، نیرو، ضخامت لاستیک 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

1- Hydroforming
2- Stamping
3- Rubber pad forming

از ناهمسانگردی نمونه‌ها صرف‌نظر گردید. به منظور تعیین خواص مکانیکی و برون‌یابی منحنی تنش کرنش بدست آمده از تست کشش، رفتار پلاستیک ماده مورد استفاده با رابطه (1) مدل شد.

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

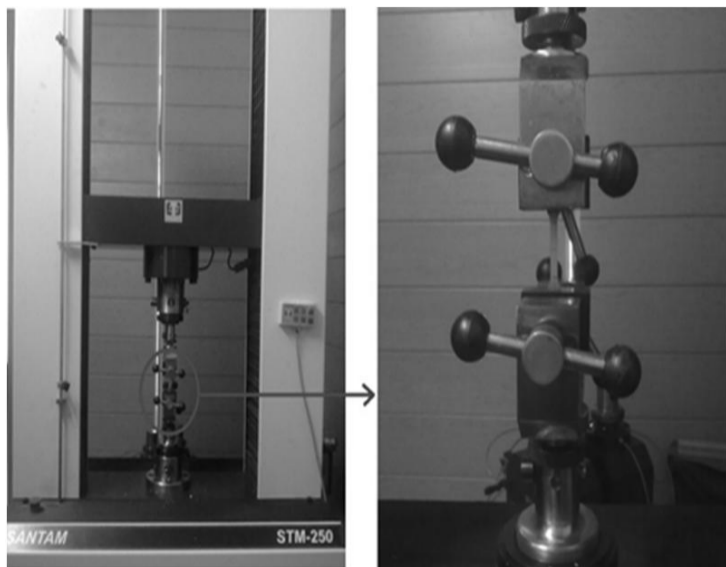


Fig. 1 Tensile test machine

شکل 1 دستگاه تست کشش

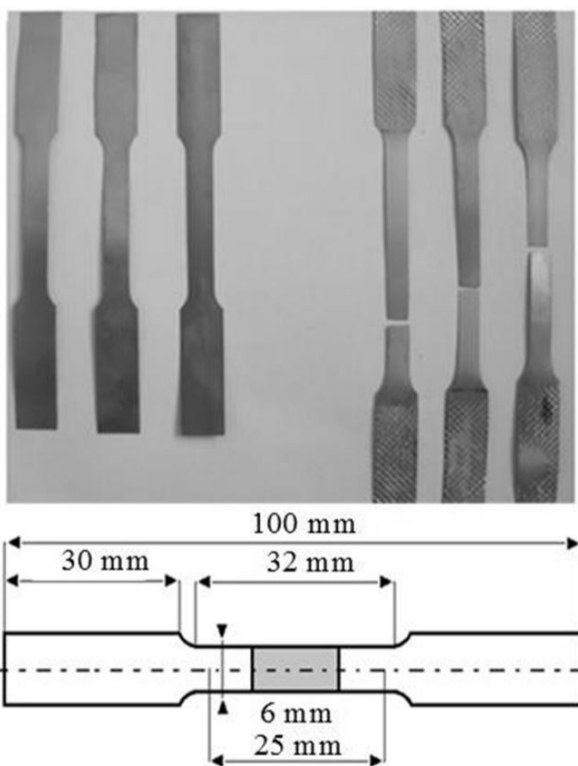


Fig. 2 Tensile test sample

شکل 2 نمونه‌های تست کشش

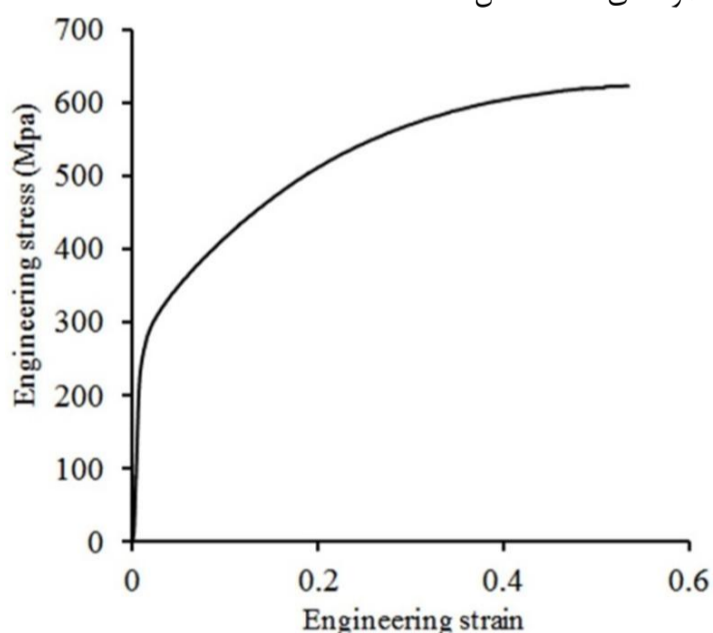


Fig. 3 Engineering stress-strain curve of austenitic stainless steel 316

شکل 3 نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه فولاد زنگ نزن 316

پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی نمونه‌های شکل داده شده با یکدیگر مقایسه گردید. طور کلی با افزایش نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ (a/b) و کاهش نسبت عمق به عرض (h/w) درصد پرشدگی و نازک‌شدگی رفتار مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند.

لازم به ذکر است که برای تولید صفحات دو قطبی فلزی در ابعاد صنعتی توسط فرایند هیدروفرمینگ، سیستمی با قابلیت تأمین فشار بالا مورد نیاز است که باعث افزایش هزینه‌های فرایند خواهد شد و همچنین مشکلات مربوط به آب‌بندی مجموعه در فشارهای بالا، شدیدتر خواهد شد. به علاوه زمان انجام فرایند نیز نسبت به فرایند شکل‌دهی لاستیکی بیشتر می‌باشد. در نتیجه فرایند شکل‌دهی لاستیکی از نظر هزینه و سهولت فرایند، به مراتب مناسب‌تر از فرایند هیدروفرمینگ می‌باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

تحقیقاتی که پیش‌تر ذکر گردید، تأثیر متغیرهای هندسی قالب، مشخصات لایه لاستیکی و نیروی مورد نیاز را بر عمق کانال شکل داده شده صفحات دو قطبی بررسی کردند، اما به جز تحقیق انجام گرفته توسط جونگ و همکاران [10] که صرفاً تأثیر زاویه دیواره قالب را بر دقت ابعادی مورد بررسی قرار دادند، در تحقیقاتی که در زمینه شکل‌دهی صفحات دو قطبی توسط فرایند شکل‌دهی لاستیکی انجام گرفته است، تأثیر نیروی شکل‌دهی، سختی لایه لاستیکی، ضخامت لایه لاستیکی و لقی بین سنبه و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی بر دقت ابعادی میکروکانال‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو در پژوهش حاضر سعی شده است که به منظور تکمیل تحقیقات انجام گرفته توسط سایر محققان، تأثیر متغیرهای ذکر شده در شکل‌دهی صفحات دوقطبی و دقت ابعادی میکروکانال‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

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 آلیاژی ورق مورد استفاده در این پژوهش مطابق با نتایج حاصل از تست کوآنتومتری در جدول 1 نشان داده شده است.

به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق، نمونه‌هایی به کمک دستگاه برش سیمی، مطابق با استاندارد ASTM (E8M-04) تهیه شدند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایش کشش انیورسال سنتام مدل STM250 با توان اعمال بار تا 25 تن، تا حد پارگی کشیده شدند. شکل 1 دستگاه تست کشش انیورسال به همراه نمونه‌های قرار داده شده در فک دستگاه تست کشش را نشان می‌دهد. در شکل 2 تصویری از نمونه‌های تست کشش قبل و بعد از انجام آزمون نشان داده شده است. نتایج حاصل از تست کشش نیز در نمودارهای موجود در شکل‌های 3 و 4 آورده شده است که نشان دهنده نمودار تنش-کرنش مهندسی و حقیقی حاصل از آزمون می‌باشند. همچنین

جدول 1 درصد عناصر آلیاژی ورق

Table 1 Percentage of alloying elements of sheet

عناصر آلیاژی	درصد	عناصر آلیاژی	درصد	عناصر آلیاژی	درصد
کروم	16.150	گوگرد	0.005	منگنز	1.440
مس	0.360	فسفر	0.048	سیلیسیم	0.660
کربن	0.047	مولیبدن	2.110	کبالت	0.280
نیکل	12.190	آلومینیم	0.010	وانادیم	0.090

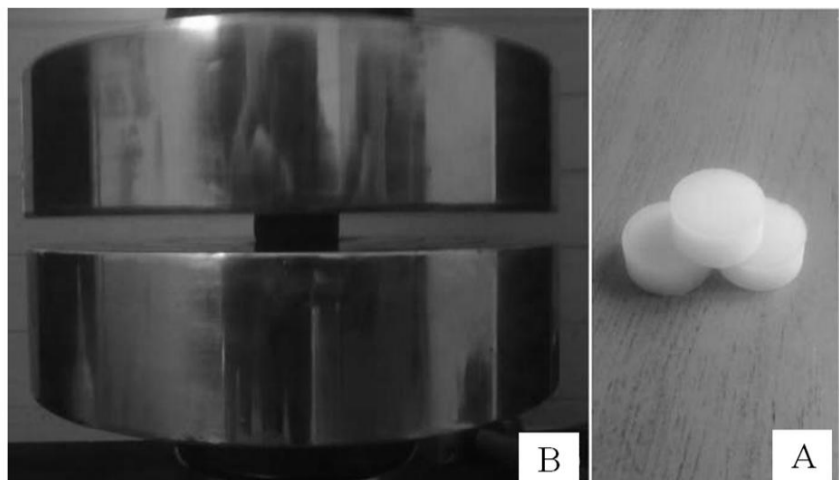


Fig. 5 A) Samples of rubber pressure test, B) Compressed sample

شکل 5 (A) نمونه‌های تست فشار لاستیک، (B) نمونه‌ها تحت فشار

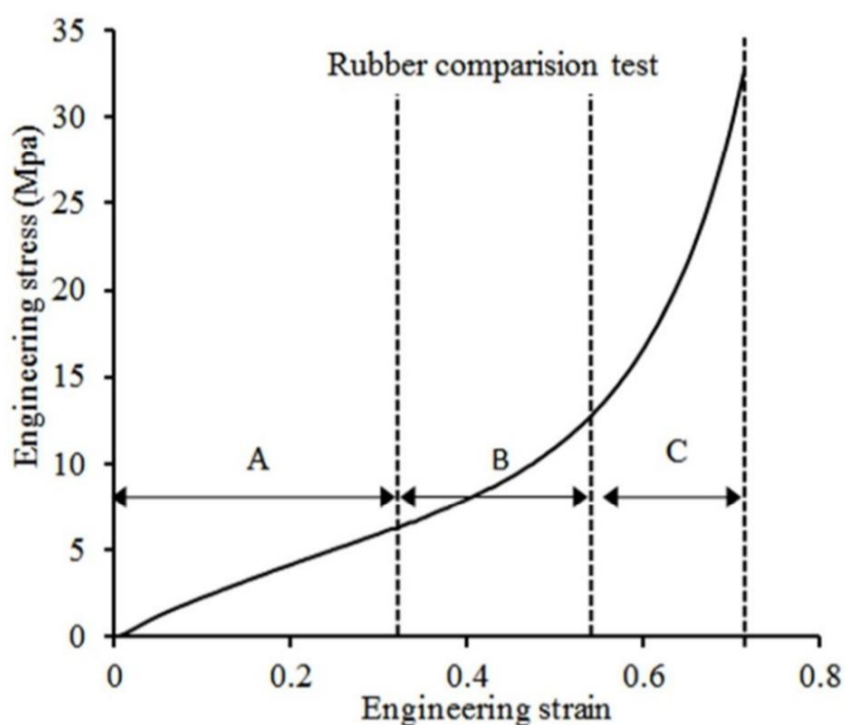


Fig. 6 Rubber real stress-strain curve

شکل 6 نمودار تنش-کرنش حقیقی لاستیک

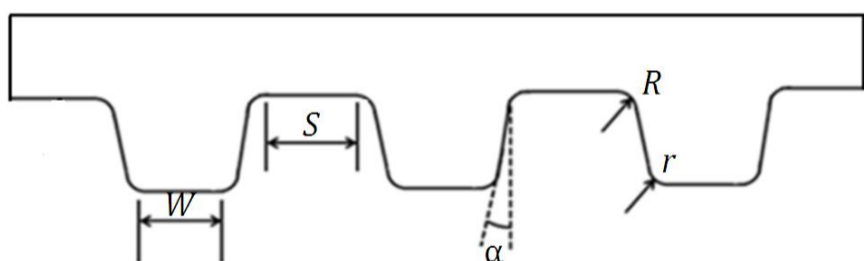


Fig. 7 Schematic of bipolar plate's micro channel

شکل 7 شماتیک میکروکانال‌های صفحات دو قطبی

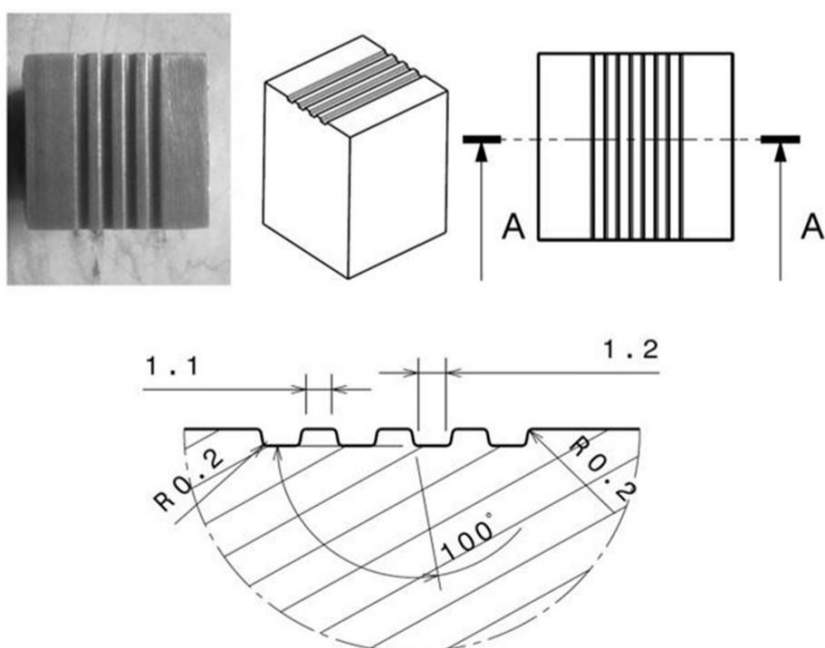


Fig. 8 Four channel insert and dimension

شکل 8 اینسرت‌های چهار کانال و ابعاد آن

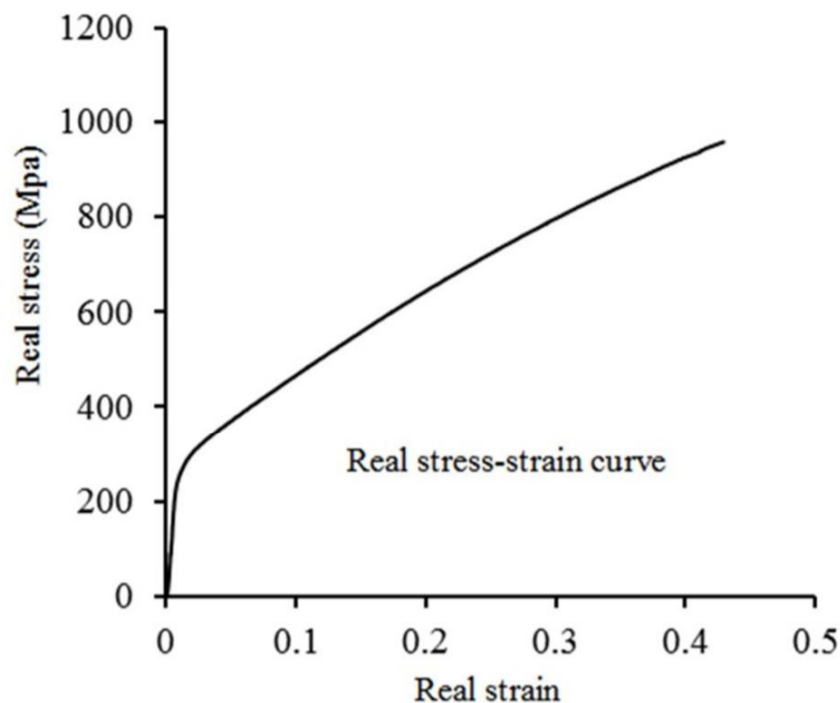


Fig. 4 Real stress-strain curve of austenitic stainless steel 316

شکل 4 نمودار تنش-کرنش حقیقی نمونه فولاد زنگ نزن 316

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 برآزش گردید.

$$\sigma = 1512 (\epsilon + 0.04)^{0.53} \quad (2)$$

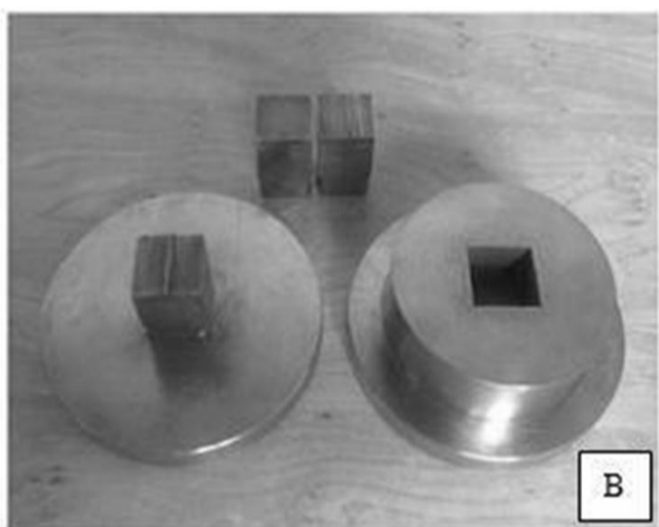
به منظور تعیین خواص مکانیکی لایه لاستیکی از تست فشار لاستیک مطابق با استاندارد ASTM(D-575) استفاده شد. در ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای مطابق با ابعاد ذکر شده در استاندارد تهیه شده و در مرحله بعد با تحت فشار قرار دادن آن‌ها بین دو فک فشار، توسط پرس 25 تن، نمودار تنش-کرنش لاستیک بدست آمد. نمونه‌های تهیه شده و پرس مورد استفاده در شکل 5 نشان داده شده است. شکل 6 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 استفاده شد.

قالب مورد استفاده شامل بدنه اصلی و اینسرت مستطیلی از جنس فولاد SPK با طول و عرض 25 میلی‌متر می‌باشد. شکل 7 نشان دهنده شماتیک از میکروکانال‌های صفحات دو قطبی می‌باشد که در آن بخش‌های مختلف هر کانال به صورت پارامتریک نشان داده شده است.

در این پژوهش شکل‌دهی میکروکانال‌هایی با پهنای دیواره (s) 1.2 میلی‌متر و عرض کانال (w) 1.1 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهایی همچون شعاع گوشه داخلی و خارجی (R و r) و زاویه دیواره (α) تأثیر زیادی بر شکل‌دهی صفحات دو قطبی و جلوگیری از وقوع پارگی در آن‌ها دارند که مقادیر به ترتیب برابر 0.2 میلی‌متر، 0.2 میلی‌متر و 10 درجه می‌باشد. در شکل 8 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 برای تحت فشار قرار دادن قالب به منظور انجام فرایند شکل‌دهی از یک پرس 60 تن استفاده شده است. در شکل 9



شکل 9 A) پرس 60 تن، B) مجموعه قالب شکل‌دهی

جدول 2 خواص مکانیکی ورق فولاد زنگ نزن 316

مقدار	واحد	خواص مکانیکی
200	گیگاپاسکال	مدول الاستیک
0.3	-	ضریب پواسون
269	مگاپاسکال	تنش تسلیم
1512	مگاپاسکال	ضریب استحکام ماده
0.53	-	نمای کرنش سختی
0.04	-	کرنش اولیه

جدول 3 مشخصات لایه‌های لاستیکی

ضریب پواسون	C ₀₁	C ₁₀	سختی لاستیک (شور A)
	0.096	0.382	55
0.499	0.184	0.736	75
	0.706	2.824	90

نمایی از مجموعه قالب و پرس مورد استفاده، نشان داده شده است.

3- مراحل شبیه‌سازی اجزای محدود

3-1- معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی فرایند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استاندارد استفاده شد. به دلیل همسانگرد در نظر گرفتن خواص ورق فولادی و همچنین کاهش زمان تحلیل، از مدل دو بعدی به منظور بررسی تأثیر پارامترهایی همچون نیروی اعمالی به مجموعه، سختی لاستیک، ضخامت لایه لاستیکی و لقی بین سنبه و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی بر خروجی‌های مورد نظر استفاده شد.

ورق و لایه لاستیکی به صورت شکل‌پذیر¹ و سنبه و محفظه‌نگه دارنده لایه لاستیکی صلب تحلیلی² در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی و المان‌بندی ورق و لاستیک از المان CPE4R استفاده شده است. از آنجا 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 2 اعمال شده است و به صورت همسانگرد فرض شده است. از آنجا که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. لایه لاستیکی به صورت هایپر الاستیک³ مدل شده و از مدل انرژی کرنشی مونی ریویلین⁴ برای تعریف خواص آن استفاده شده است. در این مدل، برای تعریف خواص ماده از ضرایب C₀₁ و C₁₀ و یا داده‌های تست فشار استفاده می‌شود. در این پژوهش برای شبیه‌سازی رفتار لایه لاستیکی با سختی شور A 85 که در آزمایش‌های تجربی هم مورد استفاده قرار گرفت، از نتایج تست فشار لاستیک که در شکل 6 نشان داده شده است، استفاده شد. همچنین برای تعریف خواص لایه‌های لاستیکی با سختی 55، 75 و 90 شور A از ضرایب C₀₁ و C₁₀ استفاده شد که مقادیر آن‌ها در جدول 3 نشان داده شده است [14,7]. 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 پنالنتی است. برای تعریف تماس بین ورق و قالب از تماس سطح به سطح استفاده گردید. در قسمت تعیین مشخصات سطوح در تماس، مدل اصطکاکی کولمب اعمال شده است. بر اساس مرجع [15] 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. برای بدست آوردن ابعاد و تعداد بهینه المان‌ها، مدل‌هایی با عدد دانه‌بندی مختلف برای لایه لاستیکی (0.07، 0.08، 0.09، 0.12 و 0.06 میلی‌متر) و ورق (0.03، 0.05، 0.07 و 0.02 میلی‌متر) شبیه‌سازی شده است. برای بدست آوردن اندازه بهینه دانه‌بندی از همگرایی توزیع ضخامت استفاده شد و در نهایت با بررسی نتایج، مقدار 0.06 میلی‌متر برای لایه لاستیکی و 0.03 میلی‌متر برای ورق به عنوان اندازه دانه‌بندی انتخاب شد. شکل 10 نشان دهنده تصویری از مدل دو بعدی شبیه‌سازی شده می‌باشد. در آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش، شکل‌دهی نمونه‌ها تحت نیروهای 25، 35، 45، 60 کیلو نیوتن انجام گرفته است. به منظور انجام تست‌های تجربی، از لایه لاستیکی از جنس پلی اورتان با سختی شور A 85 با ضخامت 15 میلی‌متر استفاده شده است.

1- Deformable
2- Analytical Rigid
3- Hyperelastic
4- Mooney-Rivlin

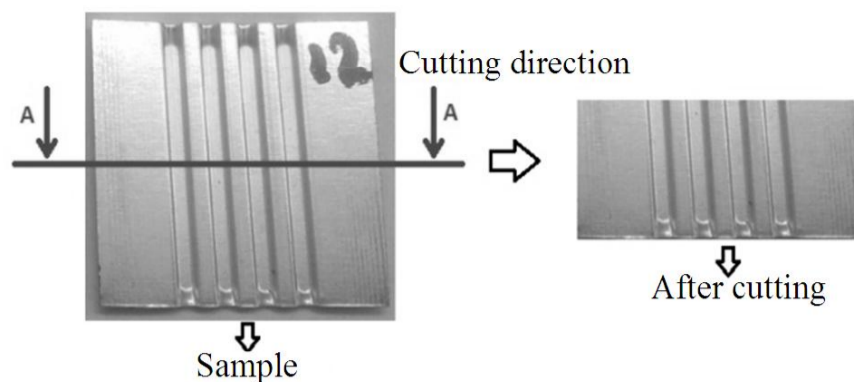


Fig. 11 Cutting direction of sample

شکل 11 راستای برش نمونه‌ها

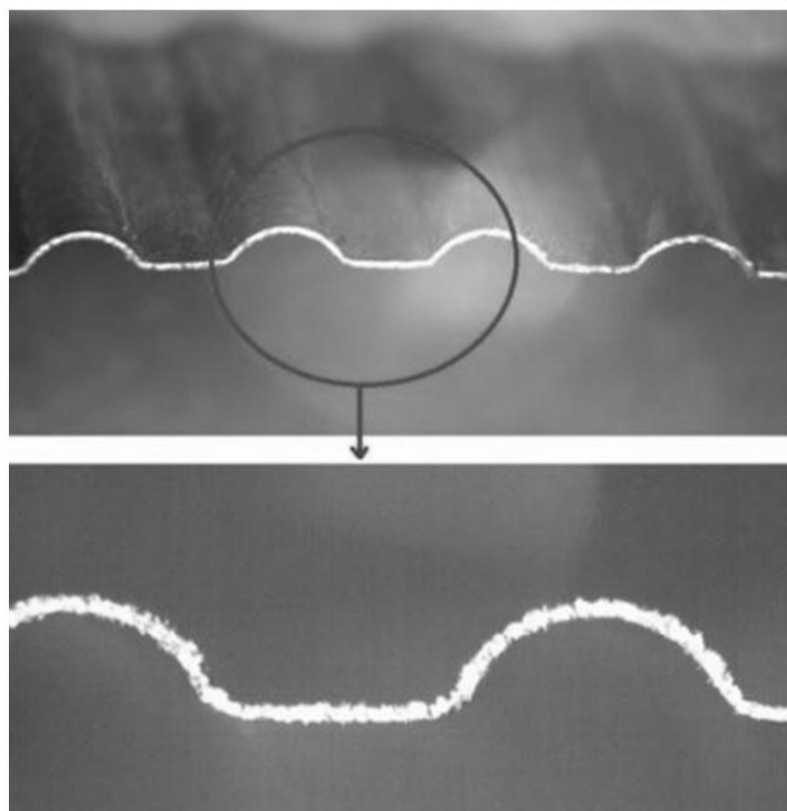


Fig. 12 Cross section of Cut samples with wire cut machine

شکل 12 سطح مقطع نمونه‌های برش داده شده توسط دستگاه برش سیمی

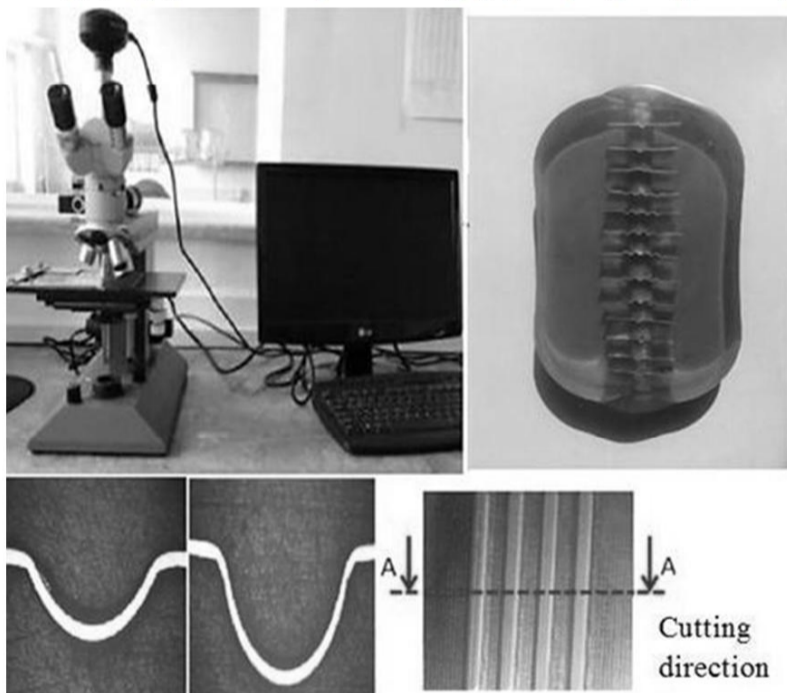


Fig. 13 Process of formed sample preparation

شکل 13 فرایند آماده سازی نمونه‌های شکل داده شده

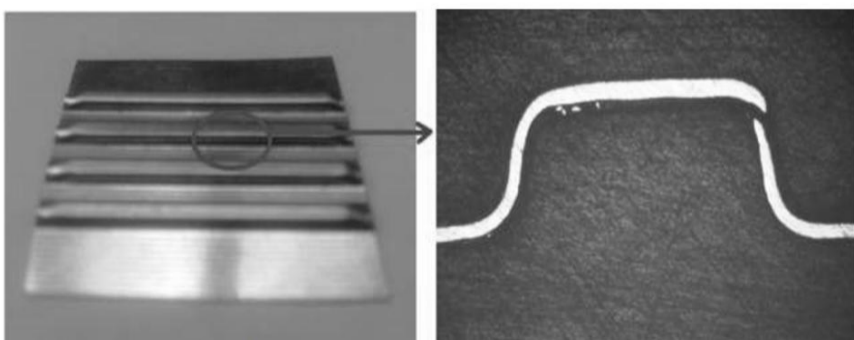


Fig. 14 Position of rapture in sample

شکل 14 محل وقوع پارگی در نمونه

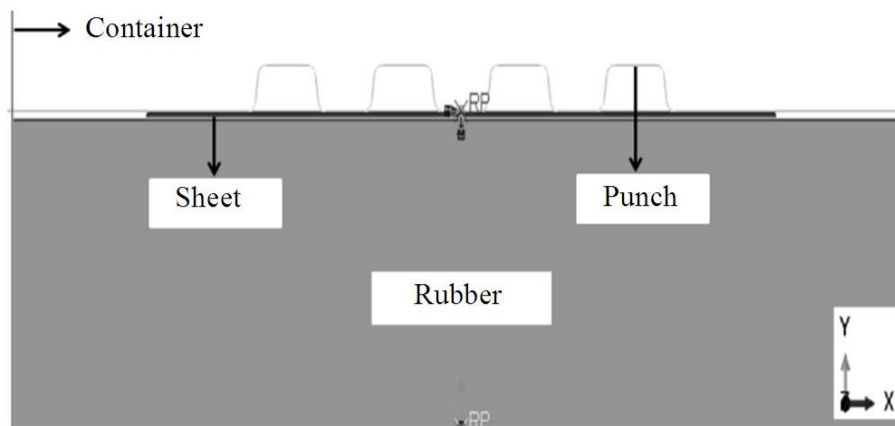


Fig. 10 2D simulation model

شکل 10 مدل دو بعدی شبیه سازی شده

2-3- اعتبار بخشی مدل اجزای محدود

به منظور تعیین دقت مدل اجزای محدود و بررسی صحت نتایج، نمونه‌هایی در 25، 35، 45 و 60 کیلو نیوتن توسط قالب با اینسرت چهار کانال شکل داده شده است. برای بررسی عمق کانال و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده، نمونه‌ها پس از اتمام عملیات شکل‌دهی به کمک دستگاه برش سیمی در راستای مشخص برش داده شدند. راستای برش نمونه‌ها در شکل 11 نشان داده شده است. سطح مقطع نمونه‌های بریده شده در فرایند برش، کیفیت لازم به منظور انجام اندازه‌گیری‌های دقیق را نداشتند. شکل 12 نشان‌دهنده تصویری از سطح مقطع نمونه‌های برش داده شده می‌باشد. همان‌طور که از شکل پیداست وجود پلیسه و برآمدگی‌ها در لبه برش موجب کاهش دقت اندازه‌گیری خواهد شد. از این رو عملیاتی بر روی آن‌ها برای آماده‌سازی سطح مقطع برش داده شده به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، انجام گردید. به منظور افزایش کیفیت سطوح برش داده شده، نمونه‌ها توسط رزین اپوکسی قالب‌گیری شده و سپس عملیات سنباده زنی و پولیش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در نهایت نمونه‌های پولیش شده در زیر میکروسکپ نوری قرار داده شد و تعیین عمق کانال و اندازه‌گیری خروجی‌های مورد نظر انجام گرفت. در شکل 13 مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و تصویر مقطع چند نمونه از صفحات شکل داده شده نشان داده شده است. به منظور تعیین توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌ها تصویری از سطح مقطع آن‌ها تهیه گردید و در مرحله بعد توسط نرم افزار آنالیز و اندازه‌گیری میزان عمق کانال و ضخامت در نواحی مختلف قطعه اندازه‌گیری شد.

یکی از مسایل مهم در شبیه‌سازی فرایند تعیین وقوع عیب پارگی در نمونه‌ها بود. بدین منظور از حداقل ضخامت نمونه در آزمایش‌های تجربی استفاده شد. پس از برش نمونه‌ها و مشاهده پارگی در نمونه‌های معیوب، به منظور تعیین درصد نازک شدگی در محل وقوع پارگی، ضخامت ناحیه مورد نظر در نمونه شکل داده شده با ضخامت اولیه ورق مقایسه گردید و مشاهده شد که پارگی در نقاطی با ضخامت حدود 66 میکرومتر رخ داده است. در نتیجه در فرایند شبیه‌سازی نیز به منظور پیش‌بینی وقوع پارگی از درصد نازک شدگی 34 درصد استفاده شد. در شکل 14 نمونه شکل داده شده و محل وقوع پارگی نشان داده شده است.

به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی انجام گرفته است. مقایسه عمق کانال در شکل‌دهی چهار میکروکانال در شکل 15 نشان داده شده است. در این حالت بیشترین اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی 4.6 درصد بدست آمد که بیانگر تطابق نتیجه‌ها برای تعیین عمق کانال در حالت تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد.

اندازه‌گیری شده در شکل 18 نشان داده شده است. با توجه به نتایجی که در شکل 18 نشان داده شده است، اختلاف عمق کانال بین کانال‌های میانی و کناری وجود خواهد داشت که با افزایش نیروی شکل‌دهی کاهش می‌یابد.

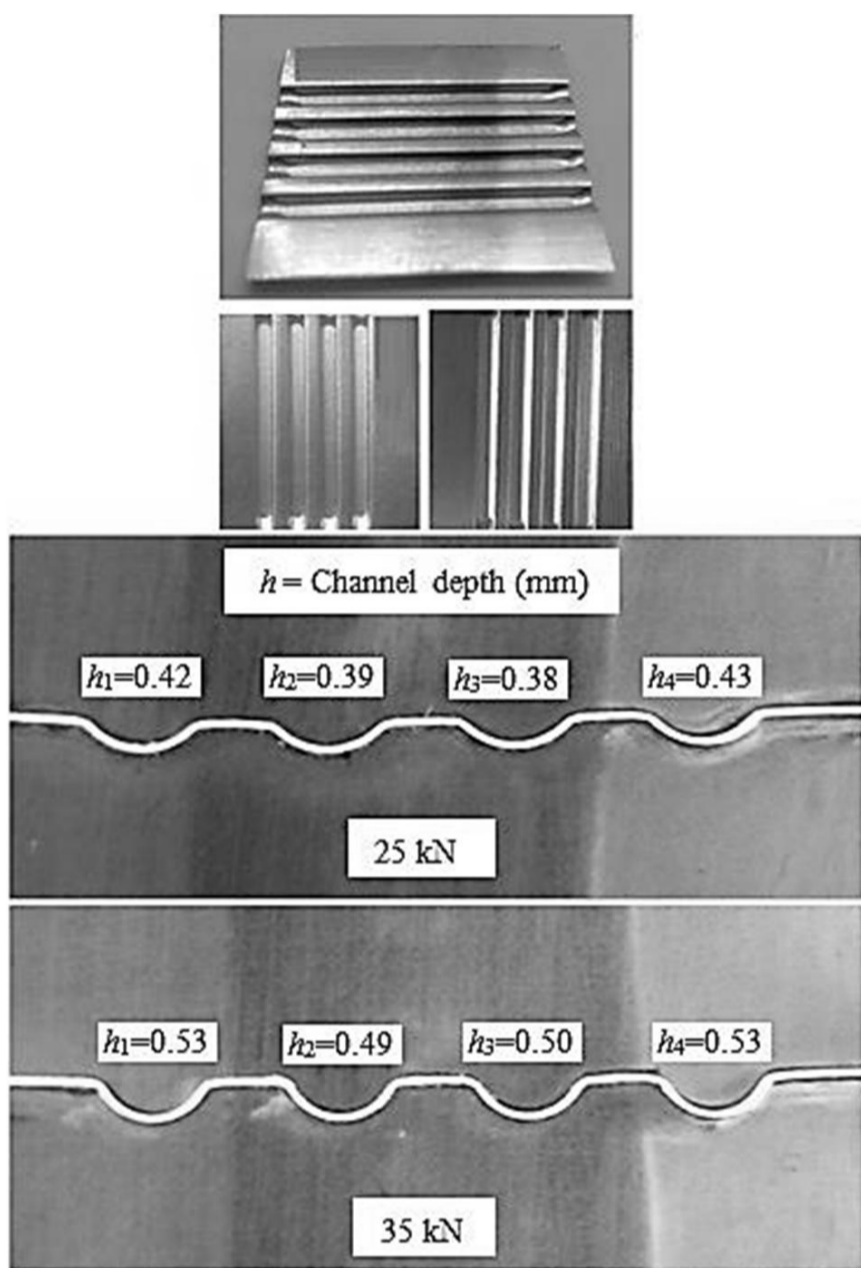


Fig. 16 Cross section of formed sample in different force
شکل 16 سطح مقطع نمونه‌های شکل داده شده در نیروهای مختلف

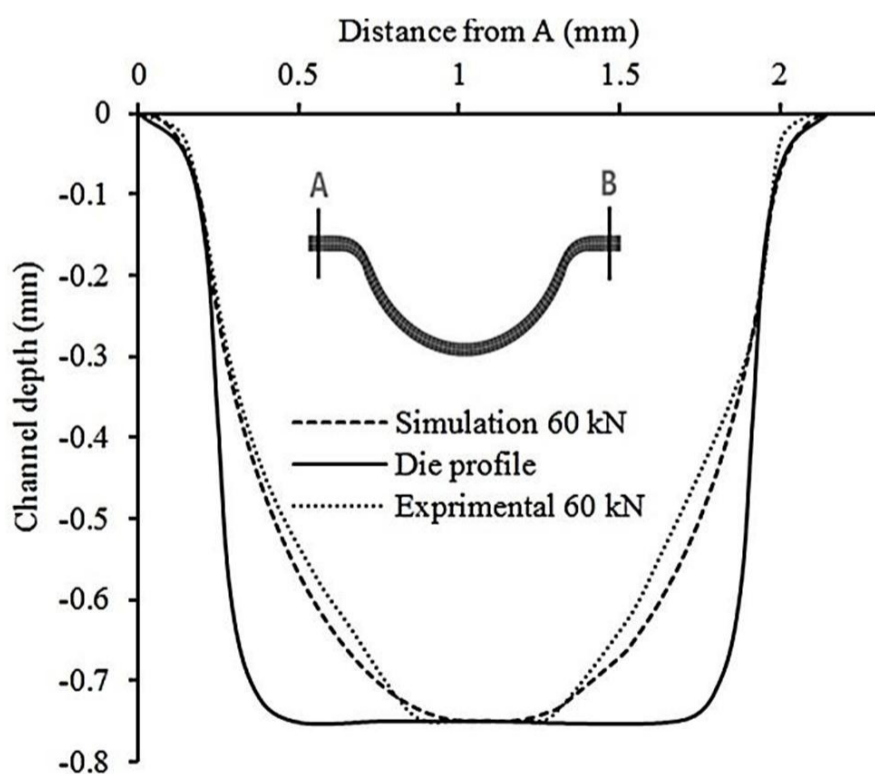


Fig. 17 Comparison of Simulation and experimental profile of sample
شکل 17 مقایسه پروفیل نمونه‌ها در حالت تجربی و شبیه‌سازی

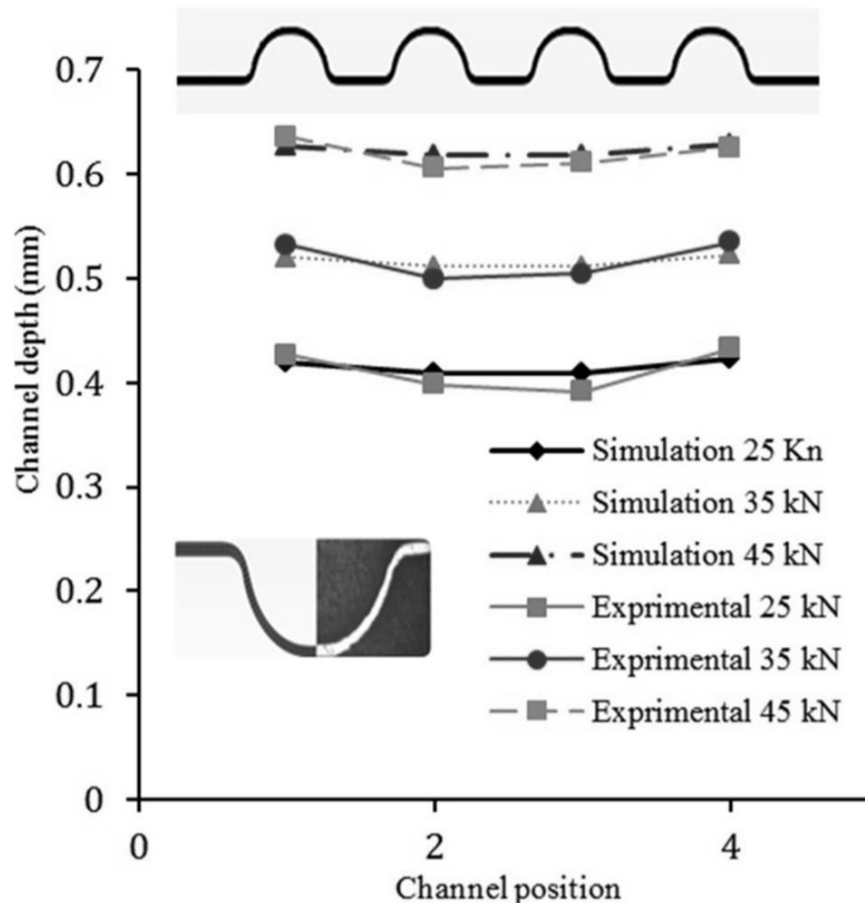


Fig. 15 Comparison of Simulation and experimental channel depth in forming of four micro channels

شکل 15 مقایسه عمق کانال تجربی و شبیه‌سازی در شکل‌دهی چهار میکروکانال

در شکل 16 نیز تصویر سطح مقطع نمونه‌های شکل داده شده در نیروهای 25 و 35 کیلو نیوتن نشان داده شده است. علاوه بر مقایسه نتایج بدست آمده در تعیین عمق کانال در حالت تجربی و شبیه‌سازی، در ادامه پروفیل پرشدگی نمونه‌ها در حالت تجربی و شبیه‌سازی به منظور اطمینان از نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل 17 نشان دهنده نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و نمونه‌های تجربی می‌باشد که بیانگر تطابق نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد. برای این مقایسه، پروفیل پرشدگی در نیروی 60 کیلو نیوتن و با استفاده از لایه لاستیکی با سختی شور 85 A و ضخامت 15 میلی‌متر در هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است.

4- نتایج و بحث

از جمله پارامترهایی که در شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی دارای اهمیت می‌باشد، یکنواختی میزان عمق کانال‌ها و به بیان دیگر دقت ابعادی بالای نمونه‌ها پس از اتمام فرایند شکل‌دهی است. بر اساس پژوهش انجام گرفته پارامترهایی شامل نیروی شکل‌دهی، سختی لایه لاستیکی، ضخامت لایه لاستیکی و لقی میان سنبه و محفظه نگه‌دارنده لایه لاستیکی بر میزان دقت ابعادی نمونه‌های بدست آمده از فرایند شکل‌دهی لاستیکی مؤثر می‌باشند. در این راستا نتایج بدست آمده از میزان و نحوه تأثیرگذاری به صورت کمی مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد.

4-1- تأثیر نیروی شکل‌دهی و سختی لاستیک بر میزان دقت ابعادی

در شکل‌دهی چهار میکرو کانال، هر چهار کانال شکل گرفته دارای عمق کانال دقیقاً یکسان نمی‌باشد و میزان عمق کانال در قسمت‌های کناری و میانی متفاوت است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع نمونه‌هایی با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده در نیروهای 10، 20، 30 و 50 کیلو نیوتن توسط لایه لاستیکی با ضخامت 7.5 میلی‌متر و سختی شور 85 A شکل داده شده‌اند. در مرحله بعد عمق کانال در هر چهار کانال شکل گرفته در نیروی معین،

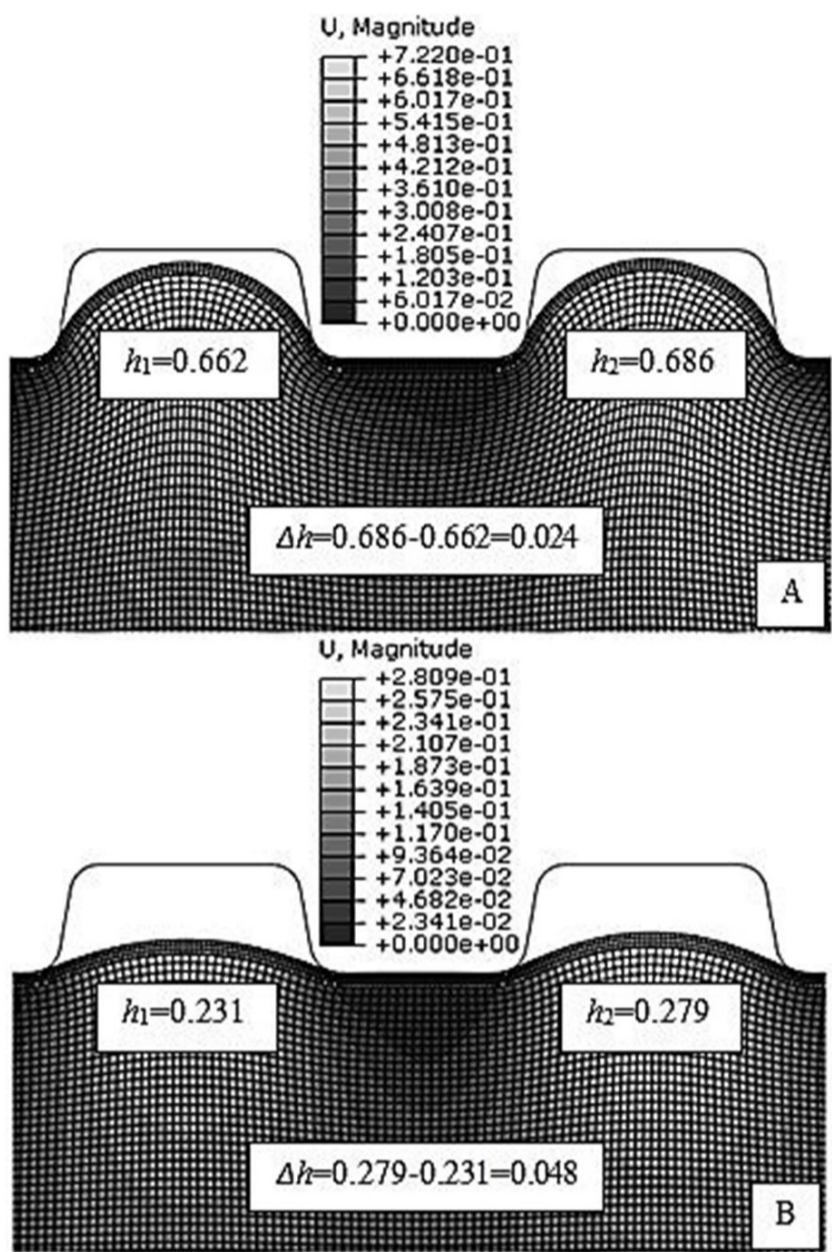


Fig. 19 The uniformity of rubber Displacement, A) Force 50 kN, B) Force 10 kN

شکل 19 میزان یکنواختی جابجایی لایه لاستیکی، (الف) نیرو 50 کیلو نیوتن، (ب) نیروی 10 کیلو نیوتن

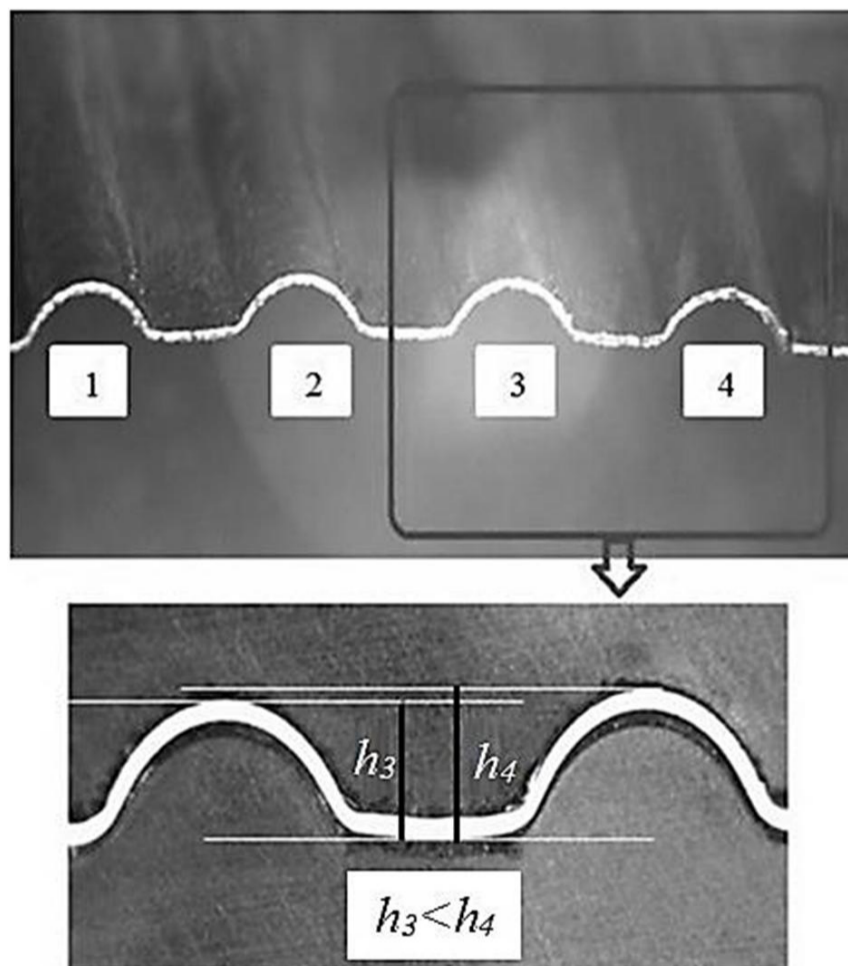


Fig. 20 Difference between lateral and central channel depth in experimental test

شکل 20 اختلاف عمق کانال‌های کناری و میانی در آزمایشات تجربی

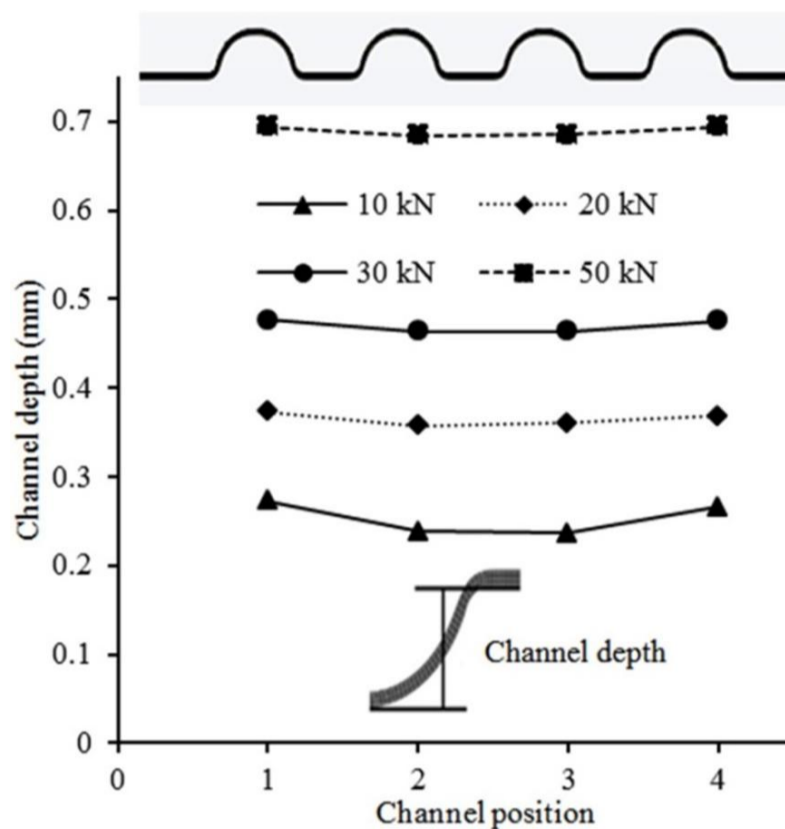


Fig. 18 Channel depth at different force in forming of four micro channels

شکل 18 عمق کانال در نیروهای متفاوت در شکل‌دهی چهار میکروکانال

به منظور بیان کمی این موضوع از معیار انحراف از مقدار میانگین عمق کانال استفاده شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = \left(\frac{|h_i - h_m|}{h_m} \right) \times 100 \quad (3)$$

در رابطه (3)، h_m برابر با عمق میانگین کانال‌ها و h_k عمق کانال مورد نظر می‌باشد. بر این اساس، رابطه ذکر شده میزان انحراف عمق هر کانال از مقدار عمق کانال میانگین را نشان می‌دهد که این مقادیر برای صفحاتی که تحت نیروهای 10، 20، 30 و 50 کیلو نیوتن و لایه لاستیکی با عدد سختی شور 85 شکل‌دهی شدند، در جدول 4 نشان داده شده است. طبق نتایج ارایه شده در جدول 4 با افزایش میزان نیروی شکل‌دهی، میزان انحراف عمق کانال‌ها از مقدار میانگین کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش دقت ابعادی نمونه‌ها می‌باشد. این موضوع ناشی از افزایش یکنواختی میزان جابجایی لایه لاستیکی در هر کانال می‌باشد. شکل 19 نشان دهنده تغییر شکل لایه لاستیکی در نیروهای 10 و 50 کیلو نیوتن می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در ابتدا تغییر شکل و جابجایی لایه لاستیکی در کانال‌های کناری بیشتر بوده (موجب افزایش اختلاف عمق کانال کناری و میانی می‌شود) و در ادامه فرایند این وضعیت یکنواخت‌تر خواهد شد و میزان اختلاف عمق کانال از 0.048 میلی‌متر در نیروی 10 کیلو نیوتن به 0.024 میلی‌متر در نیروی 50 کیلو نیوتن کاهش یافت که افزایش دقت ابعادی را در پی خواهد داشت. شکل 20 نشان‌دهنده عدم یکنواختی عمق کانال در آزمایش‌های تجربی می‌باشد که با توجه به تصویر، در این شرایط نیز عمق کانال کناری (h_4) بیشتر از عمق کانال‌های میانی (h_3) می‌باشد.

جدول 4 دقت ابعادی نمونه‌ها در نیروهای متفاوت

Table 4 Dimensional accuracy of sample in different force

موقعیت کانال	10 کیلو نیوتن	20 کیلو نیوتن	30 کیلو نیوتن	50 کیلو نیوتن
1	7.663	2.208	1.449	0.696
2	6.008	2.068	1.305	0.744
3	6.758	1.188	1.233	0.593
4	5.103	1.049	1.088	0.641

جدول 5 تأثیر سختی بر انحراف از مقدار میانگین

Table 5 Effect of hardness on Deviation from the average value

موقعیت کانال	سختی 55	سختی 70	سختی 85	سختی 90
1	2.456	1.388	0.619	0.552
2	2.339	1.437	1.056	0.547
3	2.359	1.224	0.956	0.548
4	2.243	1.274	1.096	0.551

به عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور عمق کانال در نمونه‌های چهار کاناله که توسط لایه لاستیکی با سختی شور 85 A و ضخامت‌های 1.5، 2.5، 3.5 و 5.5 میلی‌متر شکل‌دهی شده‌اند در شکل 22 نشان داده شد. اندازه گیری عمق کانال‌ها در شرایطی انجام گرفته که عمق کانال سمت راست (کانال شماره 4) 0.75 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

همان‌طور که از نتایج شکل 22 پیداست افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب نزدیکتر شدن میزان عمق کانال‌های میانی و کناری و کاهش اختلاف بین آن‌ها می‌شود. به بیان دیگر این مسأله موجب افزایش دقت ابعادی فرایند می‌شود. در بررسی‌های انجام گرفته در شرایطی که از لایه‌های لاستیکی با سختی متفاوت استفاده شده است، با توجه به عمق کانال 0.75 میلی‌متر در کانال شماره 4 درصد پرشدگی در این کانال مقدار 100 درصد محاسبه شد. به همین ترتیب میزان درصد پرشدگی در کانال شماره 3 در هنگام استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1.5، 2.5، 3.5 و 5.5 میلی‌متر به ترتیب 83.573، 93.013، 96.666 و 97.640 درصد می‌باشد که بیانگر کاهش اختلاف درصد پرشدگی بین کانال کناری (شماره 4) و کانال شماره 3، با افزایش ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد. در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر، از معیار انحراف از مقدار میانگین برای بیان کمی مسأله استفاده شده است. نتایج میزان درصد انحراف از مقدار میانگین عمق کانال در جدول 6 نشان داده شده است.

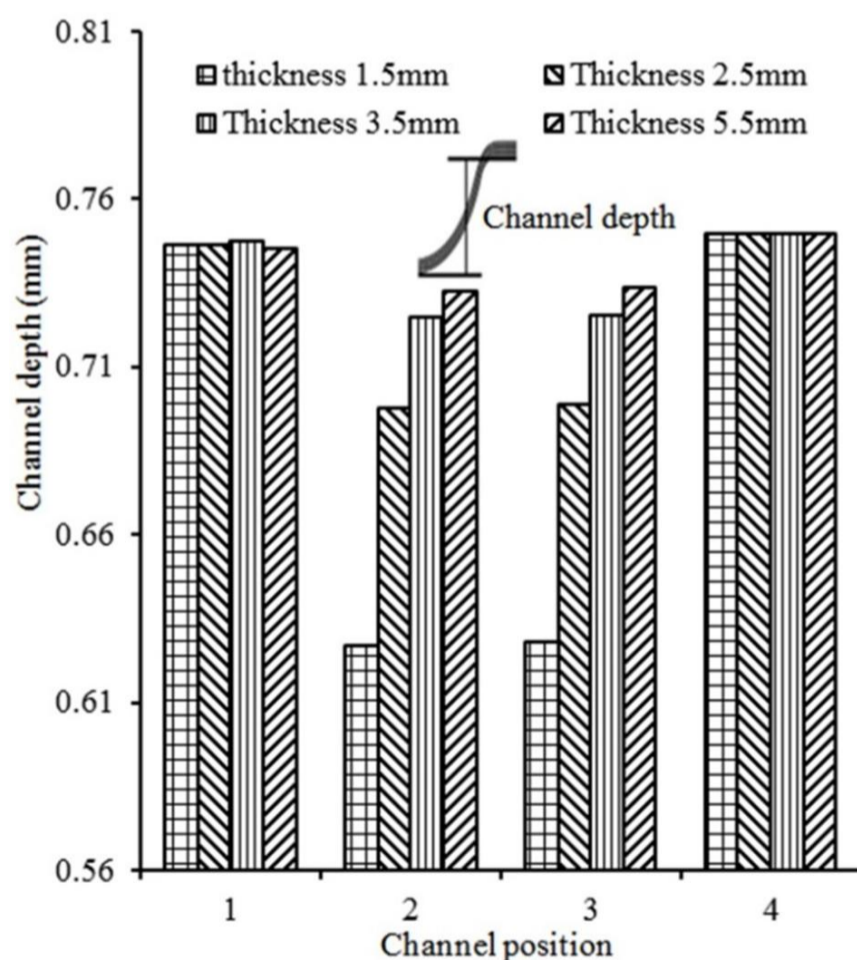


Fig. 22 Effect of rubber thickness on dimensional accuracy

شکل 22 تأثیر ضخامت بر دقت ابعادی

همان‌طور که از نتایج نمودار شکل 21 پیداست، افزایش سختی لایه لاستیکی نیز موجب نزدیک‌تر شدن عمق کانال‌های میانی و کناری و به بیان دیگر باعث کاهش اختلاف بین آن‌ها می‌شود.

این مسأله موجب افزایش دقت ابعادی فرایند می‌شود. در بررسی‌های انجام گرفته با توجه به عمق کانال 0.55 میلی‌متر در کانال شماره 4، بر اساس معیار d/D که در آن پارامتر d بیانگر عمق کانال شکل گرفته و D بیانگر عمق کانال ایجاد شده بر روی قالب می‌باشد، درصد پرشدگی در کانال شماره 4 مقدار 73 درصد محاسبه شد. به همین ترتیب میزان درصد پرشدگی در کانال شماره 3 در هنگام استفاده از لایه لاستیکی با سختی 55، 70، 85 و 90 در مقیاس Shore A به ترتیب 71.453، 71.733 و 72.933 درصد می‌باشد که بیانگر کاهش اختلاف میزان درصد پرشدگی بین کانال کناری (شماره 4) و کانال شماره 3، با افزایش سختی لایه لاستیکی می‌باشد.

در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر از معیار انحراف از مقدار میانگین برای بیان کمی مسأله استفاده می‌شود. نتایج میزان درصد انحراف از مقدار میانگین عمق کانال که بیانگر دقت ابعادی است در جدول 5 نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج ارایه شده در جدول پیداست، افزایش سختی لایه لاستیکی موجب کاهش درصد انحراف از مقدار میانگین (افزایش دقت ابعادی) عمق کانال‌ها شده است که این موضوع نیز بیانگر نسبت مستقیم دقت ابعادی با سختی لایه لاستیکی می‌باشد. و بیشترین میزان دقت ابعادی در شرایطی بدست آمد که از لایه لاستیکی با سختی شور 90 A استفاده شد. در این حالت بیشترین میزان انحراف از مقدار میانگین 0.548 درصد محاسبه شد که کمترین مقدار را در بین لایه‌های لاستیکی مورد استفاده نشان می‌دهد.

2-4-2- تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر دقت ابعادی

تاکنون تأثیر نیرو و سختی لایه لاستیکی بر دقت ابعادی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر دقت ابعادی نمونه‌ها

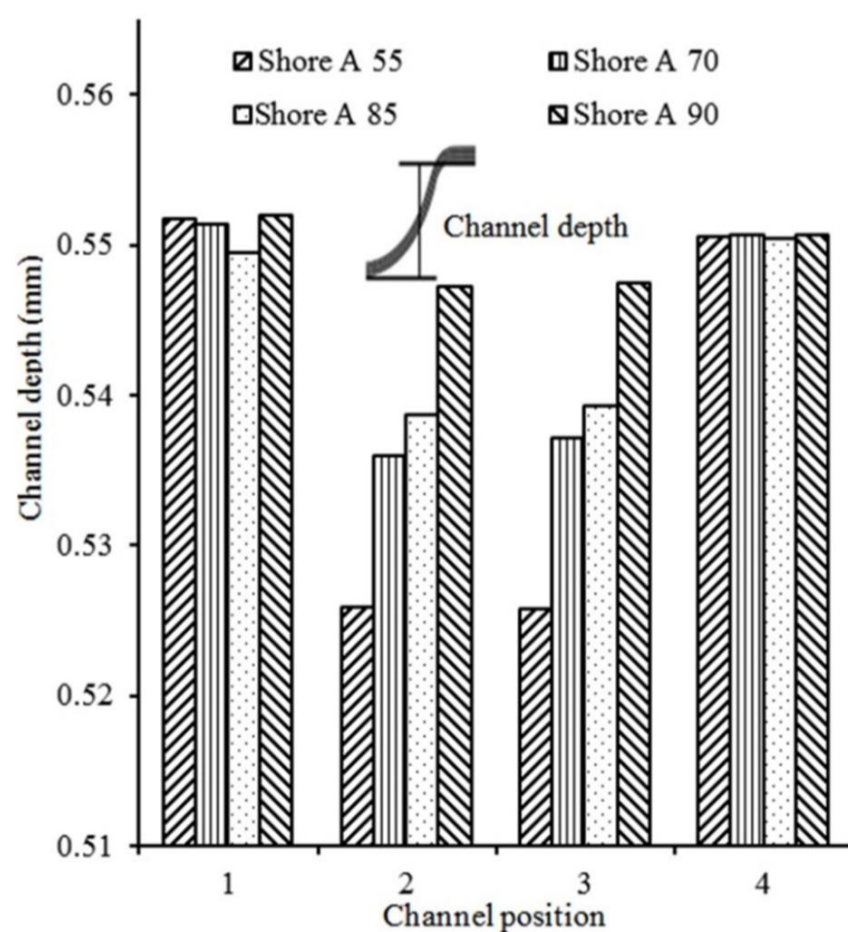


Fig. 21 Investigation of effect of hardness on dimensional accuracy

شکل 21 بررسی تأثیر سختی بر دقت ابعادی

مشاهده رفتار تغییرشکل لاستیک در حالت‌های مختلف، می‌توان دریافت که علت اصلی کاهش دقت ابعادی و اختلاف بین عمق کانال‌های میانی و کناری، تغییر شکل غیر یکنواخت لایه لاستیکی و تمرکز بیش‌تر جابجایی آن در کناره‌ها می‌باشد. بر این اساس استفاده از راه‌کارهایی به منظور دور کردن تمرکز جابجایی لایه لاستیکی از کانال‌های کناری می‌تواند تأثیر مثبتی بر روی یکنواخت‌تر شدن عمق کانال‌ها و در نهایت بهبود دقت ابعادی گردد.

بدین منظور یکی از راه‌کارهایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت در نظر گرفتن لقی بین سنبه و محفظه‌نگه دارنده لایه لاستیکی می‌باشد. نمونه‌هایی در این شرایط و با استفاده از لایه لاستیکی با سختی شور A 85 و ضخامت 7.5 میلی‌متر مدل‌سازی شدند. فرایند شکل‌دهی در لحظه‌ای که عمق کانال کناری سمت راست (شماره 4) به میزان 0.3 میلی‌متر رسید متوقف شده و عمق کانال در بقیه کانال‌ها اندازه‌گیری شدند.

نتایج بدست‌آمده از اندازه‌گیری عمق کانال‌ها در شکل 24 نشان داده شده است. به علاوه میزان وضعیت عمق کانال‌ها در شرایط بدون لقی نیز اندازه‌گیری شده و در شکل 24 رسم شده است. با مقایسه اختلاف عمق کانال‌ها در شرایطی که فرایند شکل‌دهی با در نظر گرفتن لقی بین سنبه و محفظه لاستیک انجام گرفته و همچنین شرایط بدون لقی، می‌توان مشاهده نمود که اختلاف عمق کانال‌ها در حالتی که لقی در قالب در نظر گرفته شده است کاهش یافته و به بیان دیگر دقت ابعادی در این حالت افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود علت این پدیده دور کردن تمرکز جابجایی لایه لاستیکی از ناحیه‌ای است که کانال‌های کناری صفحات دو قطبی در حال شکل‌گیری می‌باشد. میزان انحراف از مقدار میانگین عمق کانال در هر دو حالت در جدول 7 نشان داده شده است که با توجه به نتایج و به دلیل یکنواختی بیشتر عمق کانال در قالبی که دارای لقی می‌باشد، میزان درصد انحراف عمق کانال از مقدار میانگین نیز کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش دقت ابعادی نمونه‌ها در این شرایط می‌باشد.

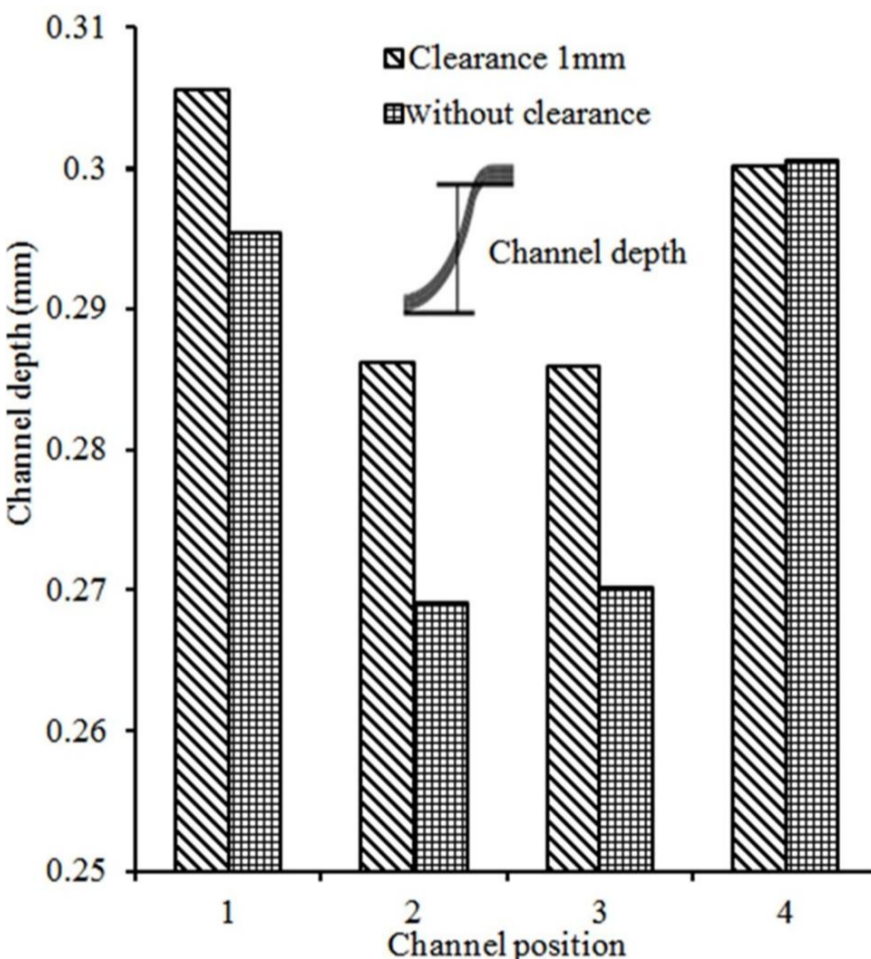


Fig. 24 Effect of clearance on difference between channel depths (dimensional accuracy)

شکل 24 تأثیر لقی بر اختلاف عمق کانال‌ها (دقت ابعادی)

همان‌طور که از نتایج آرایه شده در جدول پیداست افزایش ضخامت لایه لاستیکی موجب کاهش درصد انحراف از مقدار میانگین عمق کانال‌ها شده است. این موضوع نیز بیانگر نسبت مستقیم دقت ابعادی با ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد. کاهش میزان دقت ابعادی به ازای کاهش ضخامت لاستیک به دلیل جریان غیر یکنواخت لایه لاستیکی در ضخامت‌های کم می‌باشد. در ضخامت‌های پایین جریان یافتن لایه لاستیکی به درون کانال‌های میانی به سختی و طور غیر یکنواخت صورت می‌پذیرد که در نهایت منجر به اختلاف در عمق کانال میانی و کناری و در نتیجه کاهش دقت ابعادی می‌شود. این موضوع به وضوح در شکل 23 نشان داده شده است که بیان‌کننده جریان غیر یکنواخت لایه لاستیکی در ضخامت‌های 1.5 میلی‌متر و همچنین بهبود وضعیت در 5.5 میلی‌متر می‌باشد، که در نهایت منجر به یکنواختی عمق کانال‌های میانی و کناری و کاهش انحراف از مقدار میانگین و در نتیجه افزایش دقت ابعادی می‌شود.

3-4- تأثیر لقی بر دقت ابعادی

بعد از بررسی تأثیر سختی، نیرو و ضخامت لایه لاستیکی بر دقت ابعادی و

جدول 6 تأثیر ضخامت لایه لاستیکی بر انحراف از مقدار میانگین

Table 6 Effect of rubber thickness on Deviation from the average value

موقعیت کانال	ضخامت 5.5 میلی‌متر	ضخامت 3.5 میلی‌متر	ضخامت 2.5 میلی‌متر	ضخامت 1.5 میلی‌متر
1	0.664	1.426	3.214	7.498
2	1.080	1.628	3.525	8.846
3	0.869	1.545	3.391	8.683
4	1.286	1.747	3.702	9.031

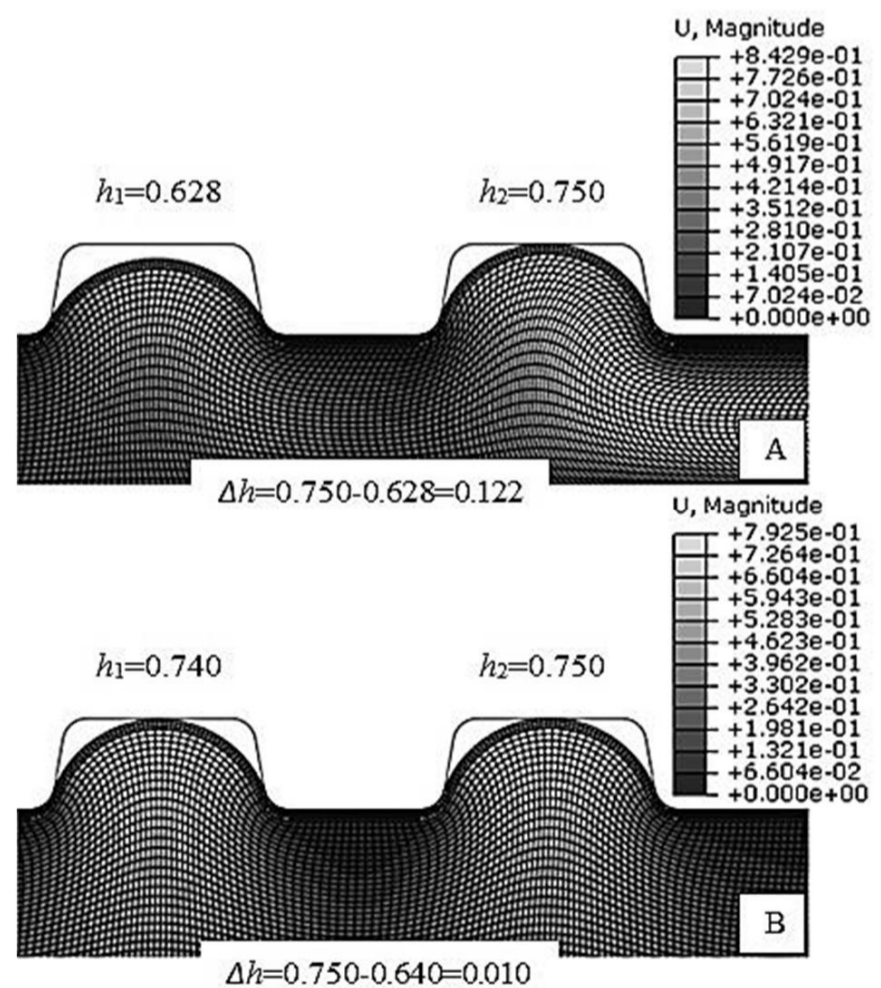


Fig. 23 Rubber displacement pattern A) Thickness 1.5 mm, B) Thickness 5.5 mm

شکل 23 نحوه جریان لایه لاستیکی (الف) ضخامت 1.5 میلی‌متر، (ب) ضخامت 5.5 میلی‌متر

جدول 7 تأثیر لقی بر انحراف از مقدار میانگین

Table 7 Effect of Clearance on Deviation from the average value

موقعیت کانال	بدون لقی	لقى 1 میلی‌متر
1	4.088	3.783
2	5.173	2.811
3	4.801	2.908
4	5.886	1.936

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از فرایند شکل‌دهی لاستیکی به منظور شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی با الگوی موازی مستقیم استفاده شده است. با توجه به مشاهده عدم یکنواختی عمق کانال در کانال‌های میانی و کناری با استفاده از معیار انحراف از مقدار میانگین، دقت ابعادی نمونه‌ها به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه تأثیر پارامترهایی مانند نیرو و مشخصات لایه لاستیکی همچون سختی و ضخامت لایه لاستیکی و همچنین هندسه قالب بر میزان دقت ابعادی فرایند مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده در ادامه بیان می‌گردد:

- میزان دقت ابعادی (یکنواختی عمق کانال) نمونه‌ها در نیروی‌های بالاتر افزایش می‌یابد که ناشی از یکنواخت شدن جریان لایه لاستیکی در هنگام پیشرفت فرایند می‌باشد.

- کاهش سختی تأثیر مطلوبی بر دقت ابعادی نداشته و موجب افزایش اختلاف عمق کانال‌های کناری و میانی می‌شود که در نهایت منجر به کاهش دقت ابعادی خواهد شد.

بیشترین میزان انحراف از مقدار میانگین در نمونه‌ها تحت شرایطی که از لایه لاستیکی شور A 55 استفاده شده است به میزان 2.456 درصد می‌باشد که این مقدار در هنگام استفاده از لایه لاستیکی با سختی شور A 90 به مقدار 0.552 درصد خواهد رسید که نشانگر کاهش اختلاف عمق کانال‌های کناری و میانی و به بیان دیگر افزایش دقت ابعادی می‌باشد. میزان درصد پرشدگی در این حالت در کانال کناری (کانال شماره 4) 73 درصد در نظر گرفته شد و در مرحله بعد درصد پرشدگی در کانال شماره 3 با استفاده از لایه لاستیکی با سختی شور 55، 70، 85 و A 90 به ترتیب 71.733، 71.453، 72.933 محاسبه گردید. میزان درصد پرشدگی در کانال شماره 3 در هنگام استفاده از لایه لاستیکی با سختی بالا (شور A 90) کمترین اختلاف را با درصد پرشدگی در کانال شماره 4 (73 درصد) دارد که بیانگر افزایش دقت ابعادی با افزایش سختی لایه لاستیکی می‌باشد.

- ضخامت لایه لاستیکی بر دقت ابعادی فرایند نیز موثر بوده و افزایش آن از طریق ایجاد تغییر شکل یکنواخت در لایه لاستیکی موجب بهبود دقت ابعادی فرایند می‌گردد. بیشترین میزان دقت ابعادی در شرایطی بدست آمد که از لایه لاستیکی با ضخامت 5.5 میلی‌متر استفاده شد و میزان انحراف از مقدار میانگین در این شرایط 1.286 درصد می‌باشد که در مقایسه با 9.031 درصد که در هنگام استفاده از ضخامت 1.5 میلی‌متر بدست‌آمد، به

وضوح نشان‌دهنده رابطه مستقیم دقت ابعادی با ضخامت لاستیک می‌باشد. به همین ترتیب در شرایطی که درصد پرشدگی در کانال شماره 4 به مقدار 100 درصد در نظر گرفته شد، میزان درصد پرشدگی در کانال شماره 3 در هنگام استفاده از لایه لاستیکی با ضخامت 1.5، 2.5، 3.5 و 5.5 میلی‌متر به ترتیب 83.573، 93.013، 96.666 و 97.640 درصد می‌باشد که بیانگر کاهش اختلاف میزان درصد پرشدگی بین کانال کناری (شماره 4) و کانال شماره 3،

با افزایش ضخامت لایه لاستیکی می‌باشد.

- ایجاد لقی بین سنبه و محفظه نگه‌دارنده به دلیل دور کردن تمرکز جابجایی لایه لاستیکی از کانال‌های کناری، تأثیر مثبتی بر یکنواخت‌تر شدن عمق کانال‌ها و در نهایت بهبود دقت ابعادی دارد. بیشترین میزان انحراف از مقدار میانگین از 5.886 درصد در شرایط بدون لقی به 3.783 درصد در شرایطی که لقی 1 میلی‌متر در نظر گرفته شد، کاهش یافت. این موضوع نشان‌دهنده افزایش دقت ابعادی با در نظر گرفتن لقی می‌باشد.

6- مراجع

- [1] T. E. Lipman, J. L. Edwards, D. M. Kammen, Fuel cell system economics: comparing the costs of generating power with stationary and motor vehicle PEM fuel cell systems, *Energy Policy*, Vol. 32, No. 1, pp. 101-125, 2004.
- [2] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, Bipolar plate for pem fuel cells: A review, *international journal of hydrogen energy*, Vol. 30, No. 12, pp. 1297-1302, 2005.
- [3] S. Karimi, N. Fraser, B. Roberts, F. R. Foulkes, A Review of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: materials and fabrication methods, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2012, No. 1, pp. 1-22, 2012.
- [4] J. C. Hung, T. C. Yang, K. C. Li, Studies on the fabrication of metallic bipolar plates—Using micro electrical discharge machining milling, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 4, pp. 2070-2074, 2010.
- [5] A. Muller, P. Kauranen, A. Von Ganski, B. Hell, Injection moulding of graphite composite bipolar plates, *Journal of Power Sources*, Vol. 154, No. 2, pp. 467-471, 2006.
- [6] X. Yuan, H. Wang, J. Zhang, D. P. Wilkinson, Bipolar plates for PEM fuel cells - from materials to processing, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 257-267, 2005.
- [7] 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, No. 11, pp. 3529-3535, 2010.
- [8] S. S. Lim, Y. T. Kim, C. G. Kang, Fabrication of aluminum 1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 1, pp. 231-238, 2013.
- [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, No. 36, pp. 21480-21488, 2014.
- [10] M. G. Jeong, C. K. Jin, G. W. Hwang, C. 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, No. 5, pp. 913-919, 2014.
- [11] 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).
- [12] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. Gorji, 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).
- [13] M. B. Osia, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 150-158, 2014 (in Persian).
- [14] A. Prete, G. Papadia, B. Manisi, Computer aided modelling of rubber pad forming process, *Key Engineering Materials*, Vol. 473, No. 1, pp. 637-644, 2011.
- [15] 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, No. 12, pp. 2952-2959, 2012.