



بررسی پارامترهای مؤثر در هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با شیار مارپیچ موازی

نفیسه محمدتبار^۱، محمد بخشی جوئیباری^{۲*}، سید جمال حسینی پور^۳، عبدالحمید گرجی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۴- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸، bakhshi@nit.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳ دی ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۵ اسفند ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۸ شهریور ۱۳۹۳

کلید واژگان:

پیل سوختی

صفحات دوقطبی فلزی

شکل دهی فلزات

هیدروفرمینگ

صفحات دوقطبی مورد استفاده در پیل‌های سوختی از مهمترین و پرهزینه‌ترین اجزای یک پیل سوختی می‌باشند. صفحات دوقطبی فلزی به دلیل وزن و هزینه کمتر، بهترین گزینه برای جایگزینی صفحات فلزی ضخیم ماشین‌کاری شده یا گرافیتی هستند. انتخاب فرایند شکل‌دهی مناسب، یکی از مهمترین موضوعات مطرح در تکنولوژی پیل سوختی است. در حال حاضر، فرایند هیدروفرمینگ به دلیل قابلیت شکل‌دهی قطعاتی با وزن کم و هندسه پیچیده برای تولید صفحات دوقطبی فلزی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از بین الگوهای مختلف صفحات دوقطبی، الگوی کانال جریان مارپیچ، دارای دو عیب عمده پارگی ماده در حین فرایند شکل‌دهی و توزیع جریان نامناسب در حین عملکرد می‌باشد. در این پژوهش، شکل‌دهی یک الگوی شیار مارپیچ متصل به هم بر روی صفحاتی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با فرایند هیدروفرمینگ به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر پارامترهای فرایندی و هندسی قالب بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل هم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که با افزایش فشار شکل‌دهی، پرشدگی قالب افزایش می‌یابد و ضخامت ناحیه بحرانی به دلیل افزایش نسبت کشش، بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که فرایند هیدروفرمینگ از قابلیت تکرارپذیری بالایی برخوردار است.

Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field

Nafiseh Mohammadtabar, Mohammad Bakhshi-Jooybari*, Seyed Jamal Hosseinipour, Abdolhamid Gorji

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

* P.O.B. 47148-71167, Babol, Iran, bakhshi@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 January 2014
Accepted 24 February 2014
Available Online 30 August 2014

Keywords:

Fuel Cell
Metallic Bipolar Plate
Metal Forming
Hydroforming

ABSTRACT

Bipolar plates are the most important and expensive components used in fuel cells. Metallic bipolar plates are the best choice to replace graphite or machined thick metal plates due to their lightweight and low cost. Selection of suitable forming process is one of the main subjects in fuel cell technology. Nowadays, hydroforming process is commonly used for the production of metallic bipolar plates because of its capability in forming lightweight and complex parts. Among the various patterns of bipolar plates, serpentine flow field pattern inevitably brings two main defects of rupture of material during forming process and uneven flow distribution in practical operations. In this research, forming of a slotted interdigitated serpentine pattern on SS304 stainless steel sheet by hydroforming process has been examined using finite element simulation and experiment. The effects of process parameters and die geometry on the thickness distribution and filling percent are also studied. It is concluded that by increasing the forming pressure, filling percent of the die increases and the thickness of critical region is more reduced due to the increasing of drawing ratio. Also, it was found that hydroforming process has high repeatability.

۱- مقدمه

تکنولوژی سلول سوختی^۱ یک فناوری نو در زمینه تولید انرژی محسوب می‌شود که قادر به تولید انرژی پاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

یک سلول سوختی از اجزای مختلفی تشکیل شده است که صفحات دوقطبی^۲ اجزای اصلی آن به شمار می‌آیند و چندین وظیفه کلیدی را بر عهده دارند. صفحات دوقطبی همچنین سهم مؤثری بر کاهش حجم، وزن و هزینه یک

2- Bipolar Plate

1- Fuel Cell

Please cite this article using:

N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A.H. 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

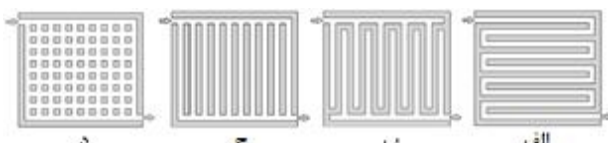
هیدروفرمینگ محدب و مقعر را به منظور شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آنان نشان داد که صفحات دوقطبی شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ محدب دارای عملکرد بهتر (به دلیل پرشدگی بهتر پروفیل الگو) و عمر کاری طولانی تری (به دلیل توزیع ضخامت یکنواخت‌تر) می‌باشد. آنها همچنین اظهار داشتند که به دلیل عدم پرشدگی کامل پروفیل به کمک روش هیدروفرمینگ، انجام یک مرحله استمپینگ نهایی به منظور شکل دهی کامل پروفیل مورد نظر ضروری است. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه الگوهای شیاری صورت گرفته است، اما نکته قابل توجهی که در شکل دهی این الگوها از اهمیت خاصی برخوردار است، دستیابی به نسبت عمق به عرض بالا در کانال‌ها می‌باشد که در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است. از طرفی پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه شکل دهی الگوهای شیاری مارپیچ انجام شده، محدود به شکل دهی به روش لایه لاستیکی بوده که دارای معایب متعددی از قبیل عمر کاری پایین لایه لاستیکی و عدم یکنواختی توزیع ضخامت صفحات شکل داده شده با این روش است و تاکنون شکل دهی این الگوی پیچیده به روش هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو، در این پژوهش، قابلیت شکل دهی صفحات دوقطبی با الگوی شیار مارپیچ موازی به کمک روش هیدروفرمینگ سنبه- سیال مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر پارامترهای هندسی قالب و فشار شکل دهی بر توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل، و همچنین قابلیت تکرارپذیری روش هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش از ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS۳۰۴ آنبیل شده با ضخامت ۱/۱ میلی‌متر استفاده شده است. برای تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی، نمونه‌هایی در ابعاد کوچک^۵ تحت زاویه‌های ۰°، ۴۵° و ۹۰° نسبت به راستای نورد بر اساس استاندارد (ASTM (E8M- 04) [۹] تهیه شدند. سپس نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه تست کشش اونیورسال تا حد پارگی کشیده شدند. مشخصات مکانیکی ورق‌ها در جدول ۱ درج شده است. همچنین در شکل ۲ منحنی تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش نشان داده شده است.

۱۹۶	مدول الاستیک، E (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون، ν
۲۵۵	تنش تسلیم، σ_y (MPa)
۱۵۰۵	ضریب استحکام ماده، K (MPa)
۰/۶۵	نمای کرنش سختی، n
۰/۰۶	کرنش اولیه، ϵ_0
۰/۹۹۱	ضریب ناهمسانگردی در راستای نورد، r_z
۱/۰۱۲	ضریب ناهمسانگردی در راستای ۴۵ درجه، r_{45}
۰/۹۸۳	ضریب ناهمسانگردی در راستای عمود بر نورد، r_{90}

^(۵) رفتار پلاستیک ماده بصورت نمایی تعریف شده است $\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$



شکل ۱ الگوهای مرسوم مسیر جریان بر روی صفحات دوقطبی، (الف) مارپیچ، (ب)

متصل به هم، (ج) موازی، (د) پینی [۳]

مجموعه پیل دارند. بنابراین تعیین جنس مناسب برای صفحات دوقطبی بر بازده و قیمت نهایی پیل سوختی تأثیر زیادی خواهد داشت [۱].

صفحات دوقطبی می‌توانند از جنس‌های گوناگونی ساخته شوند، مانند: صفحات گرافیت ماشین‌کاری شده، صفحات فلزی اچ شده^۱ یا استمپ شده^۲ با بیدون پوشش، کامپوزیت کربن- پلیمر و کامپوزیت کربن- کربن. در این بین، فولاد زنگ‌نزن به دلیل دارا بودن مزایای متعددی همچون هزینه پایین، خواص حرارتی، الکتریکی و مکانیکی بسیار خوب و قابلیت ساخت مطلوب، برای ساخت صفحات دوقطبی اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲].

بر اساس نوع کاربرد پیل‌های سوختی، هندسه کانال جریان روی صفحات دوقطبی می‌تواند متفاوت باشد. هینزولو همکاران [۳] انواع کانال‌های جریان را مورد بررسی قرار دادند و آنها را به چهار دسته اصلی الگوی پینی، موازی، متصل به هم و مارپیچ تقسیم‌بندی کردند (شکل ۱). برای ایجاد کانال‌های جریان، می‌توان از فرایندهای مختلفی همچون شکل دهی با لایه لاستیکی^۳، ماشین‌کاری الکتروشیمیایی، هیدروفرمینگ یا استمپینگ^۴ استفاده کرد که شیارهایی که با فرایند هیدروفرمینگ ایجاد شده‌اند، یکنواخت‌تر و دارای تغییرات ابعادی کمتری هستند [۴].

به دلیل پیشرفت چشمگیر تکنولوژی پیل سوختی در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است که در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود. ماهابانفاجای و همکاران [۴] تأثیر فرایند ساخت صفحات دوقطبی فلزی بر شکل‌پذیری و توپوگرافی سطح این صفحات را مورد مطالعه قرار دادند. آنها فرایندهای هیدروفرمینگ و استمپینگ را روی آلیاژهای فلزی مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که شکل‌پذیری کانال‌ها به میزان زیادی تحت تأثیر فشار هیدروفرمینگ است و سطح نیروی استمپینگ تأثیر چندانی بر آن ندارد. همچنین با کاهش سرعت استمپینگ و افزایش نرخ فشار، مقاومت به خوردگی کاهش، اما زبری سطح افزایش می‌یابد. آنان همچنین دریافتند که فرایند هیدروفرمینگ در مقایسه با فرایند استمپینگ، صفحات دوقطبی با تغییرات ابعادی کمتری تولید می‌کند. هانگ و لین [۵] ساخت میکروکانال‌های جریان روی صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن با ضخامت ۰/۱ mm را با استفاده از فرایند هیدروفرمینگ مورد مطالعه قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار شکل‌دهیمی توان به نسبت ارتفاع به عرض بالاتری برای میکروکانال‌ها دست یافت. لیو و هوا [۶] ساخت صفحات دوقطبی با میکروکانال‌های جریان چند ردیفه را به روش شکل دهی با لایه لاستیکی مورد مطالعه قرار دادند. آنان ابتدا پارامترهای کنترلی فرایند مانند سختی لایه لاستیکی و شعاع داخلی و خارجی را با شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند و سپس اقدام به ساخت صفحات کردند. یافته‌های آنان نشان داد که توزیع ضخامت صفحات یکنواخت نبوده و کناره‌های کانال بحرانی‌ترین نقاط هستند.

ماهابانفاجای و کک [۷] امکان ساخت صفحات دوقطبی از جنس فولاد زنگ‌نزن، با ضخامت ۵۱ μm و با میکروکانال چند ردیفه را به روش ترکیبی جدید مورد بررسی قرار دادند. در این فرایند، ابتدا روی هر دو سمت ورق فلزی دوتایی با عملیات هیدروفرمینگ، میکروکانال‌ها شکل داده شدند و سپس برای ایجاد کانال‌های خنک‌کن داخلی، ورق‌ها با اتصال مکانیکی به هم وصل شدند. نتایج نشان داد که درصد پرشدگی قالب با افزایش فشار داخلی در حین فرایند هیدروفرمینگ افزایش می‌یابد. اوصیا و همکاران [۸] دو روش

1- Etch
2- Stamp
3- Rubber Pad Forming
4- Stamping

کانال (h)، زاویه دیواره کانال (α)، شعاع فیلت خارجی (R) و شعاع فیلت داخلی (r) می‌باشند.

شکل ۴ شماتیک مجموعه قالب مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها و شکل ۵ آن مجموعه ساخته شده را نشان می‌دهد. قالب به صورت دو تکه می‌باشد. بدنه کلی آن از جنس فولاد SPK و قالب اصلی که هندسه‌های مورد نظر بر روی آن ایجاد شده، از جنس برنج است. به منظور خروج هوا و شکل‌دهی بهتر قطعه سوراخ‌هایی نیز در قالب ایجاد شده است.

برای ایجاد فشار سیال جهت شکل‌دهی نمونه‌ها، یک واحد فشار با توانایی اعمال فشار تا حدود ۱۲۰ مگاپاسکال بکار برده شد. به منظور آب‌بندی قالب، علاوه بر اعمال فشار بالا، از تماس سطح به سطح با پرداخت بالا نیز استفاده شده است. همچنین از یک پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۴۰ تن برای اعمال بار استفاده شده است. در شکل ۶ نمایی از واحد اعمال فشار، پرس هیدرولیکی و تجهیزات مورد نیاز برای شکل‌دهی نشان داده شده است. در این پژوهش صفحاتی در فشارهای ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال شکل داده شدند و پارامترهایی مانند تکرارپذیری، درصد پرشدگی و نازک‌شدگی برای این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

۳-۱- معرفی پارامترهای شبیه‌سازی

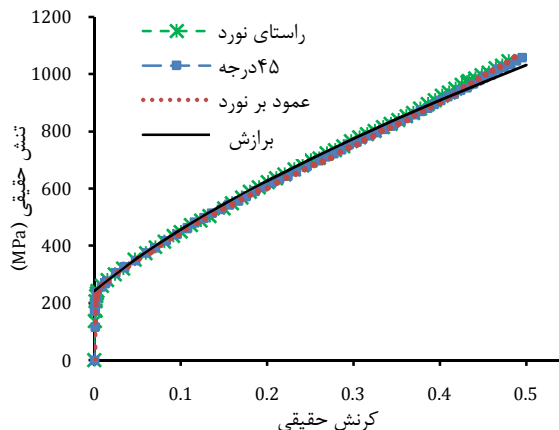
برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۶.۱۰.۱ استفاده شده است. به دلیل خاصیت همسانگردی ورق فولادی و به منظور کاهش زمان تحلیل توسط نرم‌افزار، برای بررسی پارامترهای ابعادی کانال مستقیم (عرض کانال، پهنای دیواره کانال و غیره)، مدل دو بعدی برای تحلیل بکار برده شده است.



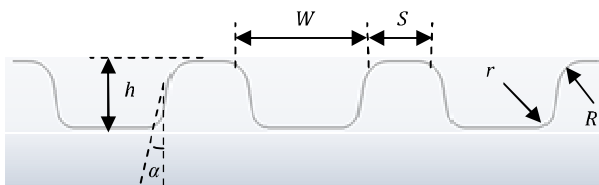
شکل ۵ مجموعه قالب ساخته شده برای شکل‌دهی شیرهای تکرارشونده



شکل ۶ نمایی از واحد اعمال فشار، پرس و تجهیزات مورد نیاز

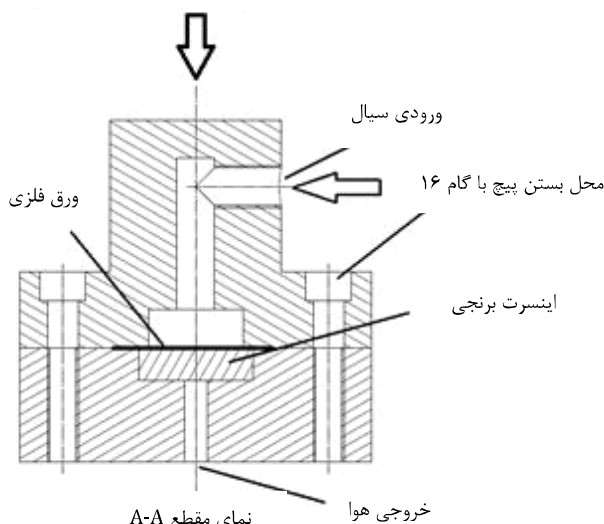


شکل ۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



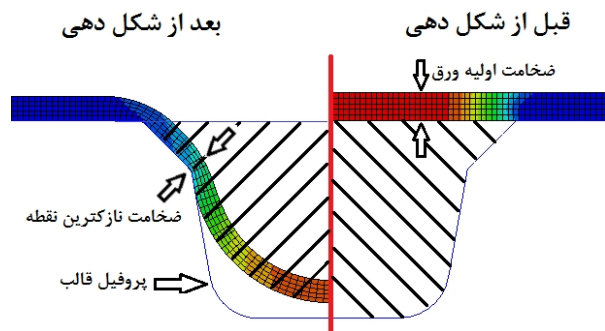
شکل ۳ طرح اولیه الگوی شیار و نمایی از سطح مقطع آن

نیروی اعمالی از جانب پرس (آب‌بندی)



شکل ۴ شماتیک مجموعه قالب مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها

به دلیل اختلاف بسیار ناچیز در نمودار تنش-کرنش در جهت‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه با راستای نورد، از ناهمسانگردی جزئی ورق صرف‌نظر گردید. در این تحقیق، از الگوی شیرهای موازی استفاده شده است. شکل ۳ طرح اولیه این الگو و نمایی از سطح مقطع آن را به همراه پارامترهای قطعه نشان می‌دهد. این پارامترها شامل عرض کانال (w)، پهنای دیواره (s)، عمق

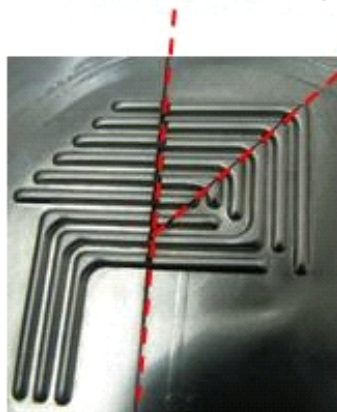


شکل ۸ نمایی از مساحت اولیه و پر شده قالب در تعیین درصد پرشدگی



شکل ۹ نمونه های شکل یافته در فشارهای، الف) ۸۰، ب) ۹۰ و ج) ۱۰۰ مگاپاسکال

خط برش در راستای شعاعی خط برش در راستای شیاری



شکل ۱۰ راستاهای برش نمونه‌ها

۳-۲- اعتباربخشی مدل اجزای محدود

به منظور تعیین دقت مدل اجزای محدود و بررسی صحت نتایج، نمونه‌هایی در فشارهای ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال شکل داده شدند. شکل ۹ چند نمونه از صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده در این فشارها را نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده، این نمونه‌ها پس از شکل‌دهی، در راستاهای شعاعی و شیاری (شکل ۱۰)، به کمک دستگاه برش سیمی^۴ برش داده شدند و سپس مانت و پولیش گردیدند. نمونه‌های پولیش شده در زیر میکروسکوپ نوری قرار داده شد و با بزرگ‌نمایی مشخص از مقطع نمونه‌ها عکس میکروسکوپی تهیه شد. سپس از طریق نرم‌افزار نصب شده بر روی کامپیوتر متصل به میکروسکوپ، توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌ها بررسی شدند. شکل ۱۱ فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها و تصویر مقطع چند نمونه از صفحات شکل داده شده را نشان می‌دهد. پس از برش نمونه‌ها و مشاهده پارگی در نمونه‌های معیوب، به منظور تعیین محل وقوع پارگی، ضخامت ناحیه پارگی در نمونه شکل داده شده با ضخامت اولیه ورق مقایسه و مشاهده گردید که پارگی در نقطه‌ای با ضخامت حدود ۶۴ میکرومتر رخ می‌دهد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب موضع پارگی در شبیه‌سازی‌ها و نمایی از محل وقوع پارگی در نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شوند.

ورق بصورت تغییر شکل‌پذیر^۱ و قالب صلب تحلیلی^۲ در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی ورق از المان پوسته‌ای^۳ CPS4R استفاده شد. همچنین به دلیل مدل صلب تحلیلی که برای قالب در نظر گرفته شد، قالب المان‌بندی نشده و در نتیجه تحلیل نیز نگردید. شکل ۷ مدل شبیه‌سازی مجموعه قالب را نشان می‌دهد. خصوصیات مکانیکی ورق مطابق جدول ۱ اعمال شده است. از آنجا که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. ورق فولادی استفاده شده در شبیه‌سازی همسانگرد فرض شده است که نتایج آزمایشگاهی نیز این فرض را تأیید نمود. در این پژوهش شرایط تماسی استفاده شده از نوع تماس مکانیکی با رفتار ماسمی با بیان ریاضی پنالتی 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. براساس مراجع [۱۰، ۱۱] مقدار ضریب اصطکاک برای تماس ورق و قالب ۰/۱ فرض شده است. ورق از لبه‌های کناری و از تمامی جهات کاملاً مقید شده است.

یکی از مهمترین موارد در شبیه‌سازی‌ها، پیش‌بینی پارگی است. در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای بررسی پارگی ورق استفاده شده است. این کمیت با معادله (۱) مشخص می‌شود. این معادله و معادلات دیگر این بخش از مرجع [۱۲] استخراج شده‌اند.

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

در معادله (۱)، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی است که از معادله (۲) بدست می‌آید.

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

از طرفی کرنش مهندسی (ε_θ) در شرایط کرنش صفحه‌ای از معادله (۳) تخمین زده می‌شود.

$$(3) \quad \varepsilon_\theta = \left(\frac{23}{3} + \frac{360}{4} t_0 \right) \left(\frac{n}{21} \right) / 100$$

که در آن، n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد. با توجه به برقراری معادله‌های (۴) و (۵) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ε_θ و کرنش ضخامتی ε_t تعیین می‌شود.

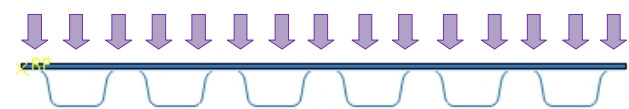
$$(4) \quad \varepsilon_\theta = \ln(1 + \varepsilon_\theta)$$

$$(5) \quad \varepsilon_t = -\varepsilon_\theta$$

با استفاده از معادله‌های (۴) و (۵) و محاسبه ε_t و جایگذاری آن در معادله (۲) مقدار t_f بدست آمده و آن‌گاه طبق معادله (۱) مقدار حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. حداکثر نازک‌شدگی برای ورق فولادی استفاده شده در آزمایش‌ها ۴۱/۹٪ بدست آمده است.

برای بررسی دقیق‌تر، از معیار درصد پرشدگی نیز استفاده گردید. درصد پرشدگی بر مبنای مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده به مساحت کل حفره قالب در ناحیه بحرانی می‌باشد که در شکل ۸ بصورت هاشورخورده نشان داده شد. این معیار مطابق معادله (۶) تعریف شده است:

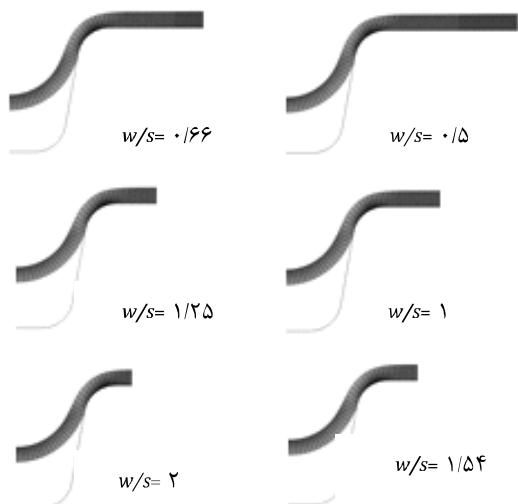
$$(6) \quad \text{درصد پرشدگی} = \frac{\text{مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \times 100$$



شکل ۷ مدل شبیه‌سازی مجموعه قالب

1- Deformable
2- Analytic Rigid
3- Shell

4- Wire Cut



شکل ۱۶ نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با ابعاد جدول ۲ در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال

جدول ۲ مقادیر پارامترهای قالب (برحسب میلی‌متر)

s	۰/۵	۰/۶۵	۰/۸	۱	۱/۵	۲
w/s	۲	۱/۵۴	۱/۲۵	۱	۰/۶۶	۰/۵

$\alpha=10^\circ, r=0.2\text{mm}, R=0.2\text{mm}, w=1\text{mm}$ (۶)

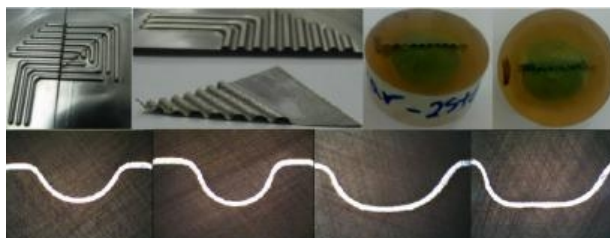
در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده در آزمایش‌ها در دو راستای شیاری و شعاعی با نمودار توزیع ضخامت به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شدند. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود در هر دو راستا با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد و حداکثر اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت تجربی و شبیه‌سازی در دو راستای شیاری و شعاعی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۶۴ درصد است. از این‌رو، مدل اجزای محدود ایجاد شده می‌تواند برای انجام آزمایش‌ها استفاده شود.

۴- نتایج و بحث

از جمله پارامترهای هندسی و فرایندی که فرایند هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توان به نسبت عرض به پهنای دیواره کانال (w/s)، نسبت شعاع فیلت خارجی به داخلی کانال (R/r)، زاویه دیواره کانال (α) و فشار شکل‌دهی صفحات اشاره کرد. در این پژوهش، مقدار ارتفاع صفحات دوقطبی برابر ۰/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در بخش‌های زیر اثر پارامترهای یاد شده بررسی می‌شوند.

۴-۱- بررسی تأثیر پهنای دیواره کانال (s) بر شکل‌دهی ورق

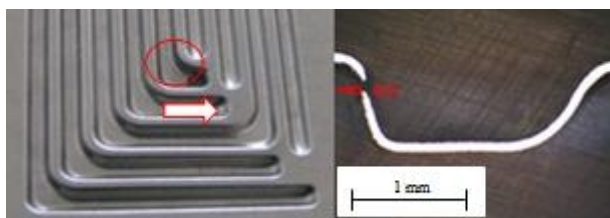
به منظور بررسی تأثیر پهنای دیواره کانال (s) در شبیه‌سازی دوبعدی، مقدار w ثابت و برابر ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و مقادیر s از ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر تغییر داده شد. در این مرحله مقدار $r = R = 0.2\text{mm}$ زاویه دیواره کانال ۱۰ درجه و فشار شکل‌دهی ۱۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. جدول ۲ مقادیر پارامترهای قالب را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی مربوط به قطعات شکل داده شده و مقدار جابجایی ورق به درون حفره قالب را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۱۸ درصد پرشدگی قالب نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده نمود، افزایش پهنای دیواره کانال تأثیر کمی بر عمق شکل‌دهی کانال‌ها دارد و نیز افزایش پهنای دیواره کانال تأثیر چندانی بر درصد پرشدگی ندارد.



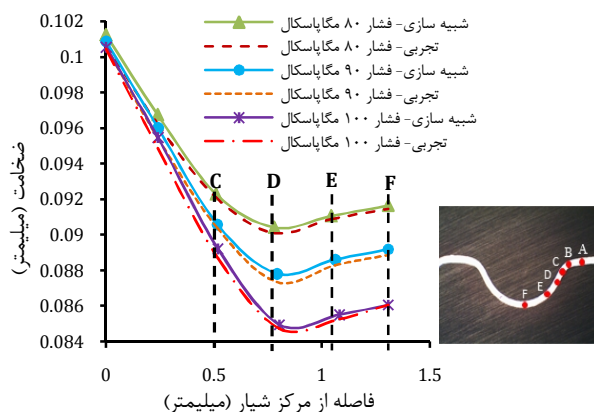
شکل ۱۱ فرایند آماده‌سازی نمونه‌های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل



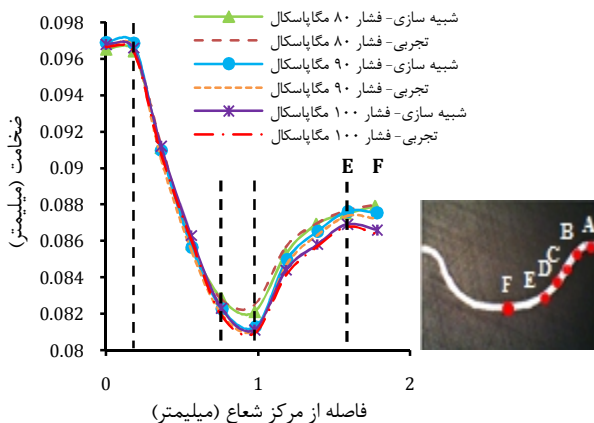
شکل ۱۲ موضع پارگی در نسبت w/s = 1/92



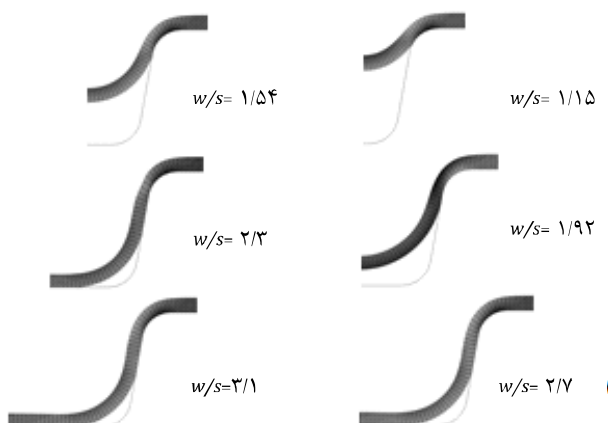
شکل ۱۳ نمایی از محل وقوع پارگی در نمونه



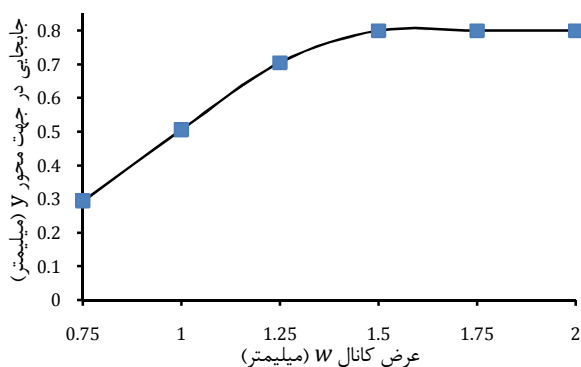
شکل ۱۴ منحنی‌های توزیع ضخامت بدست آمده در راستای شیاری در فشارهای ۸۰ و ۹۰ مگاپاسکال



شکل ۱۵ منحنی‌های توزیع ضخامت بدست آمده در راستای شعاعی در فشارهای ۸۰ و ۹۰ مگاپاسکال



شکل ۲۰ نتایج شبیه‌سازی‌های شکل‌دهی ورق با قالب‌هایی با ابعاد جدول ۳ در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال



شکل ۲۱ منحنی جابجایی ورق به درون حفره قالب در جهت y در عرض کانال (w) مختلف



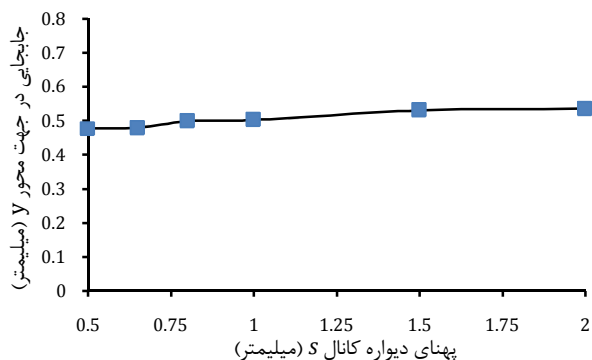
شکل ۲۲ موضع پارگی در نسبت $w/s = 1/92$ با شکل‌دهی در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال

این تفاوت اندک به دلیل کم بودن پهنای دیواره (s) در حالت $s=0/5$ mm و عدم تغذیه مناسب ورق و متعاقباً کاهش ضخامت آن است. از آنجا که هدف از بررسی پارامترهای مختلف، دستیابی به کمترین میزان کبه منظور شکل-دهی مناسب صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد، بنابر آنچه گفته شد، کانالی با پهنای دیواره $0/65$ میلی‌متر مناسب‌ترین است.

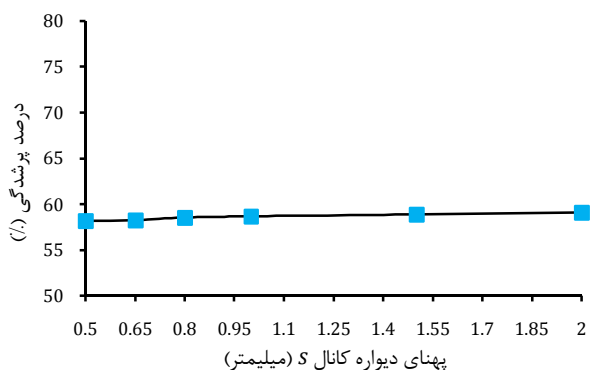
۴-۲- بررسی تأثیر عرض کانال (w) بر شکل‌دهی ورق

به منظور بررسی تأثیر عرض کانال بر شکل‌دهی ورق، مقدار s را ثابت و برابر $0/65$ میلی‌متر (که در قسمت قبل بدست آمد) در نظر گرفته و مقدار w از $0/75$ تا 2 میلی‌متر تغییر داده شد. در این مرحله نیز مقدار $r = R = 0/2$ mm، زاویه دیواره کانال 10° درجه و فشار شکل‌دهی 150 مگاپاسکال در نظر گرفته شد. جدول ۳ مقادیر پارامترهای قالب و شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و مقدار جابجایی ورق به درون حفره قالب را برای حالت‌های مختلف w نشان می‌دهند.

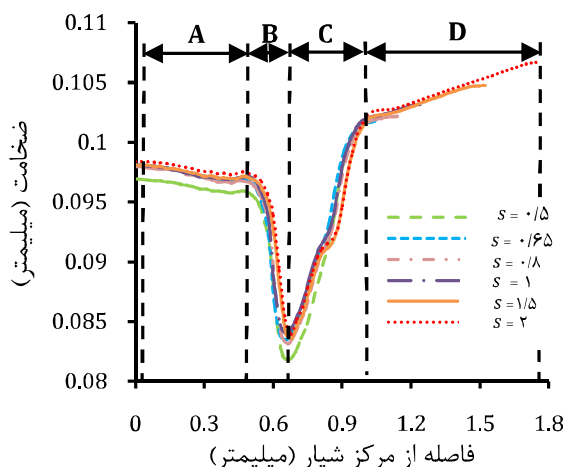
همان‌طور که از شبیه‌سازی‌ها ملاحظه می‌شود، کانال‌هایی به عرض $0/75$ و 1 میلی‌متر ($1/15$ و $1/54$) بر نمی‌شوند و برای پر کردن قالب، فشار بالاتری مورد نیاز است. همچنین مشاهده شد که با افزایش فشار جهت پر-



شکل ۱۷ منحنی جابجایی ورق به درون حفره قالب در جهت y در پهنای دیواره کانال (s) مختلف



شکل ۱۸ مقایسه درصد پراشندگی در پهنای دیواره کانال (s) مختلف



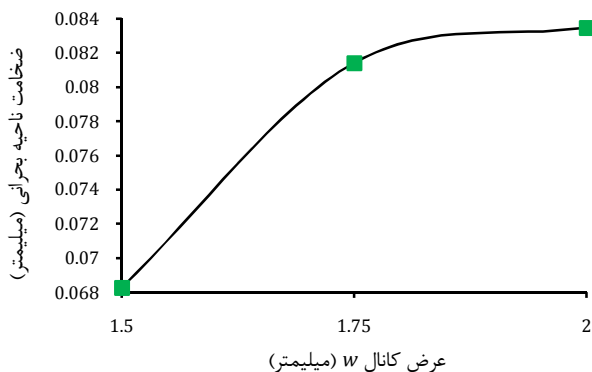
شکل ۱۹ منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده، مربوط به قالب‌های جدول ۲، $w=1$ mm

جدول ۳ مقادیر پارامترهای قالب (برحسب میلی‌متر)

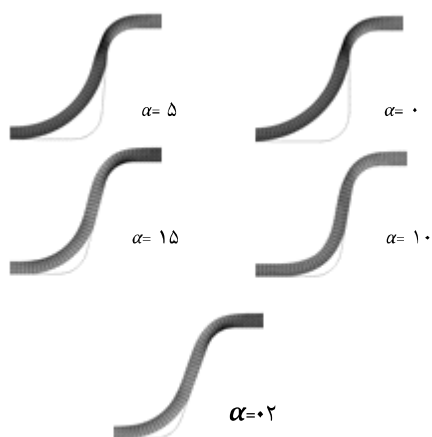
w	0/75	1	1/25	1/5	1/75	2
w/s	1/15	1/54	1/92	2/3	2/7	3/1

$\alpha=10^\circ, r=0/2$ mm, $R=0/2$ mm, $s=0/65$ mm⁽⁶⁾

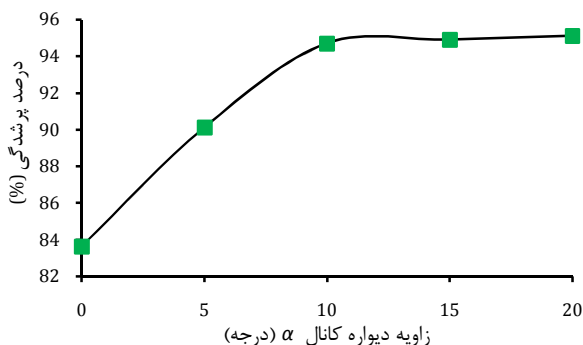
به منظور بررسی تغییرات ضخامت قطعه شکل داده شده، یک نیمه از قطعه شکل یافته در درون یک کانال در نظر گرفته شده است. شکل ۱۹ منحنی‌های توزیع ضخامت را برای پهنای دیواره کانال مختلف نشان می‌دهد. از شکل پیداست که تفاوت چندانی بین منحنی‌های توزیع ضخامت وجود ندارد و تنها اختلاف کمی بین نمودار توزیع ضخامت کانال با پهنای دیواره $0/5$ میلی‌متر و سایر نمودارها در ناحیه A و B (ناحیه محدب) وجود دارد.



شکل ۲۵ منحنی توزیع ضخامت ناحیه بحرانی برای عرض کانال‌های مختلف



شکل ۲۶ نتایج شبیه سازی‌های شکل دهی ورق با قالب‌هایی با زاویه دیواره ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درجه در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال



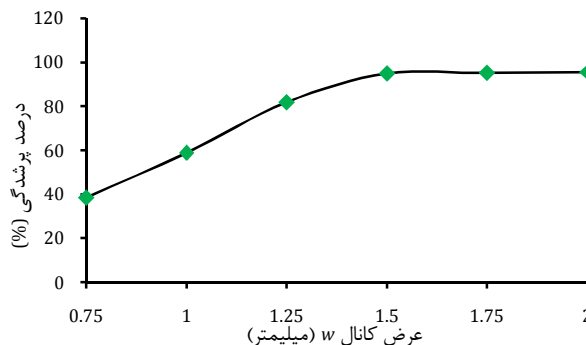
شکل ۲۷ مقایسه درصد پرشدگی قالب بر حسب زاویه دیواره کانال (alpha)

۳-۳- بررسی تأثیر زاویه دیواره کانال (alpha) بر شکل دهی ورق

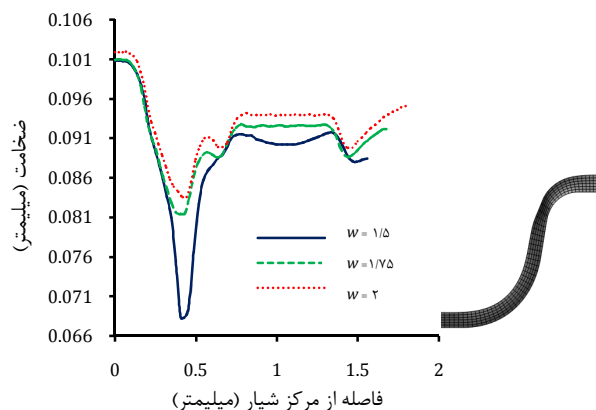
به منظور بررسی تأثیر زاویه alpha بر شکل گیری ورق، زاویه دیواره کانال (alpha) از ۰ تا ۲۰ درجه، برای حالت $w/s = 2/3$ ، $R = 0.2$ mm و $r = 0.2$ mm در نظر گرفته شد. شکل ۲۶ نتایج بدست آمده از شبیه سازی‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت $\alpha = 0^\circ$ ورق در فشار $102/8$ مگاپاسکال، در ناحیه محدب (ناحیه B) دچار پارگی می‌شود و ادامه فرایند شکل دهی امکان پذیر نخواهد بود. در قالبی با زاویه دیواره $\alpha = 5^\circ$ نیز ورق در فشار 105 مگاپاسکال پاره می‌شود، اما در بقیه حالت‌ها ورق بدون پارگی شکل می‌گیرد. به منظور بررسی دقیق‌تر، میزان درصد پرشدگی برای زاویه‌های مختلف محاسبه شد. شکل ۲۷ درصد پرشدگی برای زاویه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه دیواره کانال، درصد پرشدگی قالب افزایش می‌یابد.

کردن قالب، قطعه دچار پارگی می‌شود. در حالت $w/s = 1/92$ قالب بطور کامل پر نمی‌شود و در ناحیه محدب (قسمت بالای ورق) ورق دچار کاهش ضخامت شدیدی شده و پارگی رخ می‌دهد که این ناحیه، ناحیه بحرانی است. شکل ۲۲ موضع پارگی را نشان می‌دهد. در شکل ۲۳ درصد پرشدگی برای حالت‌های مختلف w نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عرض کانال از $w = 0.75$ mm به $w = 1/5$ mm، درصد پرشدگی با شیب تندی افزایش یافته و از $w = 1/5$ mm تا $w = 2$ mm، درصد پرشدگی افزایش ناچیزی دارد. از این رو می‌توان دریافت که افزایش عرض کانال از $1/5$ میلیمتر به بیشتر، تأثیر چندانی بر پرشدگی ندارد. در کانالی با $w = 1/5$ mm و بالاتر از آن درصد پرشدگی حدود ۹۵٪ می‌باشد. بنابراین برای بررسی توزیع ضخامت فقط کانال‌هایی به طول $1/5$ ، $1/75$ و 2 میلیمتر مورد بررسی قرار داده شد. شکل ۲۴ منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده را نشان می‌دهد.

همان گونه که از شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، در حالت $w = 1/5$ mm، ضخامت ناحیه بحرانی ورق به 0.068 میلیمتر می‌رسد. ضخامت ورق در کانال‌هایی به عرض $1/75$ و 2 میلیمتر، تقریباً یکسان و در حدود 0.078 میلیمتر کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که در حالت $w = 1/5$ mm ورق بدون پارگی شکل می‌گیرد و بنابر قسمت قبل دارای میزان درصد پرشدگی قابل قبولی است. در نتیجه در حالت $w = 1/5$ mm بهبود شکل دهی مشاهده می‌شود. بر این اساس، نسبت طول به عرض (w/s) و عمق به عرض کانال (h/w) مطلوب بدست آمده در این مقاله به ترتیب $2/3$ و 0.53 است که نسبت عمق به عرض بدست آمده در این پژوهش در مقایسه به پژوهش‌های هانگ و لین [۵] و ماهابانفاجای و کک [۷] که به ترتیب به نسبت عمق به عرض 0.468 و 0.35 دست یافته‌اند، ۱۳ درصد افزایش داشته است.



شکل ۲۸ مقایسه درصد پرشدگی در عرض کانال‌های (w) مختلف



شکل ۲۹ منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده، مربوط به قالب‌های جدول ۳، $s = 0.65$

به منظور بررسی دقیق‌تر، نیمه یک پله به عنوان مسیر برای بررسی توزیع ضخامت در نظر گرفته شده است. از نمودار توزیع ضخامت می‌توان مشاهده کرد که بیشترین کاهش ضخامت در ناحیه B ایجاد می‌شود که به دلیل کشش ورق، گوشه تیز قالب و پدیده خم در این ناحیه به منظور پر کردن حفره قالب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زوایای کمتر از ۵ درجه شیب جداره قالب تأثیری بر کاهش ضخامت ندارد اما در زاویه بیشتر از ۵ درجه با افزایش زاویه دیواره کانال، درصد نازک‌شدگی ورق کاهش می‌یابد و توزیع ضخامت بهتری به دست می‌آید. افزایش زاویه از ۵ درجه تا ۱۵ درجه تأثیر زیادی بر کاهش ضخامت ناحیه B قطعاً دارد اما افزایش از ۱۵ درجه به بعد تأثیر چندانی بر میزان کاهش ضخامت قطعاً ندارد. در واقع هر چه میزان زاویه دیواره کانال بیشتر باشد، جریان ماده به داخل حفره قالب راحت‌تر صورت می‌گیرد و ورق بهتر شکل می‌گیرد. در صفحات دوقطبی شیب دیواره تا حد امکان کم در نظر گرفته می‌شود تا مساحت سطح مقطع کانال ماکزیمم شود و میزان افت فشار کاهش یابد. بدین ترتیب ظرفیت انتقال جرم/حرارت افزایش می‌یابد [۲].

بنابر توضیحاتی که در بالا اشاره شده، زاویه دیواره کانال ۱۰ درجه مطلوب است.

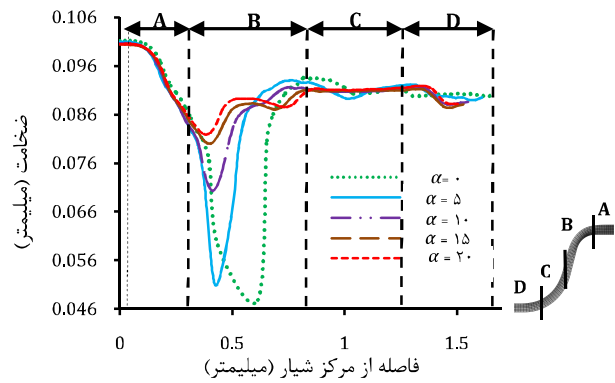
۴-۴- بررسی تأثیر شعاع فیلته خارجی (R) و داخلی (r) بر شکل‌دهی ورق

برای تحلیل اثر R و r (به ترتیب شعاع فیلته خارجی و داخلی کانال) روی تغییر شکل ورق، مقادیر R، شعاع فیلته خارجی ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ میلی‌متر، و مقدار r، شعاع فیلته داخلی از ۰ تا ۰/۴ میلی‌متر در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر شعاع فیلته خارجی (R) بر شکل‌دهی ورق، مقدار شعاع فیلته داخلی (r) ثابت و برابر صفر در نظر گرفته شد و مقدار شعاع فیلته خارجی (R) از ۰ تا ۰/۴ میلی‌متر تغییر داده شد. شکل‌های ۳۰ و ۳۱ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی ورق و منحنی توزیع ضخامت آن را برای کانال‌هایی با شعاع فیلته داخلی r=۰ نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای مقدار R=۰، ورق در فشار ۸۲/۵ مگاپاسکال پاره شده و ادامه فرایند شبیه‌سازی ممکن نبود.

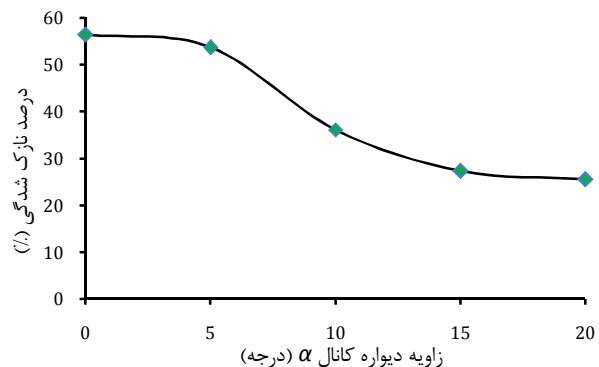
از منحنی توزیع ضخامت ورق می‌توان مشاهده کرد که در کانالی با شعاع فیلته خارجی R=۰/۱ mm، ورق در ناحیه B دچار کاهش ضخامت شدیدی در حدود ۰/۷۵ میلی‌متر شده و پارگی رخ داده است. در این حالت فشار شکل‌دهی در آستانه پارگی، ۱۰۰/۵ مگاپاسکال است. همچنین ضخامت ناحیه بحرانی (ناحیه B) در کانالی با شعاع فیلته خارجی R=۰/۲ mm، در فشار ۱۱۷ مگاپاسکال، ۰/۳۶ میلی‌متر می‌باشد که در این حالت نیز پارگی در ورق مشاهده می‌شود، اما در حالت R=۰/۳ mm و R=۰/۴ mm، ورق بدون پارگی شکل می‌گیرد و ضخامت ناحیه بحرانی این نمونه‌ها به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۰۸۲ میلی‌متر است. شکل ۳۲ نمودار درصد پرشدگی قالب را برای کانال‌هایی با فیلته داخلی ثابت r=۰ نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۳۲ مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع فیلته خارجی (R) از ۰/۱ تا ۰/۳ میلی‌متر، درصد پرشدگی افزایش چشمگیری دارد، اما از ۰/۳ تا ۰/۴ میلی‌متر، افزایش چندانی در میزان پرشدگی ملاحظه نمی‌شود. بنابراین، از آنجا که در شکل‌دهی صفحات دوقطبی، پرشدگی حداکثر قالب و عدم پارگی در نمونه شکل داده شده مطلوب است، لذا فیلته خارجی به شعاع R=۰/۳ mm برای شکل‌دهی مناسب‌تر است.

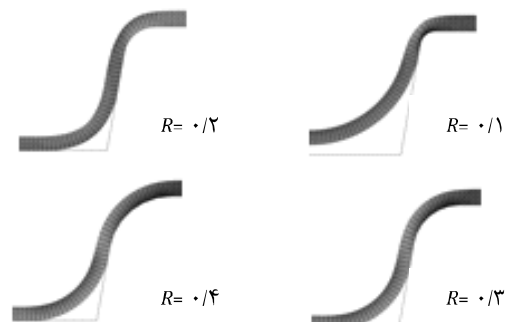
پس از دستیابی به شعاع فیلته خارجی (R) مطلوب، به بررسی اثر شعاع فیلته داخلی (r) بر شکل‌دهی ورق پرداخته شد. شکل‌های ۳۳ و ۳۴ به ترتیب



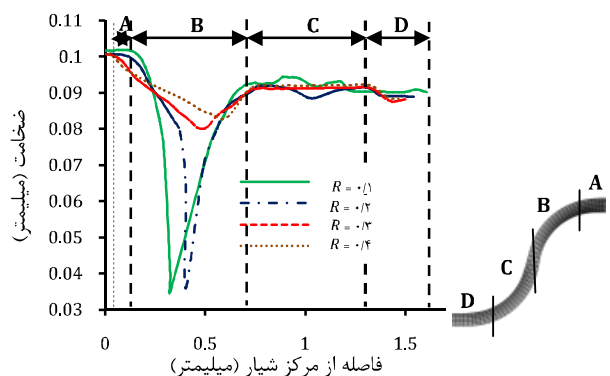
شکل ۲۸ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده در فشار ۱۵۰ مگاپاسکال بر حسب زاویه دیواره کانال (α)



شکل ۲۹ مقایسه درصد نازک‌شدگی ورق بر حسب زاویه دیواره کانال (α)



شکل ۳۰ نتایج شبیه‌سازی قالب‌هایی با شعاع فیلته خارجی r=۰



شکل ۳۱ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با قالب‌هایی با شعاع فیلته خارجی r=۰

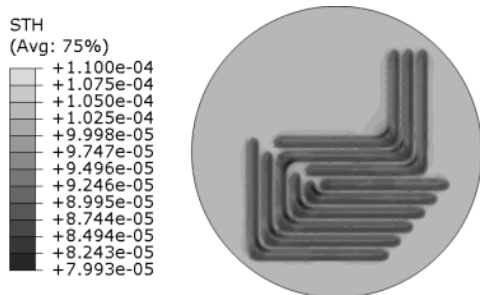
پس از بررسی درصد پرشدگی، توزیع ضخامت نمونه‌های شبیه‌سازی شده نیز بررسی شد. شکل‌های ۲۸ و ۲۹ به ترتیب منحنی توزیع ضخامت ورق‌های شکل داده شده و درصد کاهش ضخامت در ناحیه B ورق را نشان می‌دهد.

۴-۵- بررسی اثر فشار سیال بر شکل‌دهی ورق

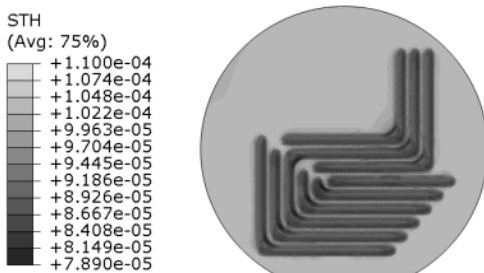
برای بررسی اثر فشار سیال بر تغییر شکل ورق، قالب‌هایی با ابعاد جدول ۴ در فشارهای ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال به صورت سبب‌دهی شبیه‌سازی شدند تا نتایج تجربی و شبیه‌سازی با هم تطبیق داده شوند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۳۵ نشان داده شده است. شکل‌های ۳۶ و ۳۷ به ترتیب منحنی توزیع ضخامت ورق در فشارهای ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال را در راستاهای شیاری و شعاعی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۳۶ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار تغییر چندانی در ضخامت نقاط A تا B رخ نمی‌دهد. علت این امر، افزایش سطح تماس بین ورق با قالب در این ناحیه در اثر افزایش فشار و وجود نیروی اصطکاکی بین ورق و قالب است که مانع از لغزش ورق بر روی قالب و نازک‌شدگی ورق در این ناحیه می‌شود. با افزایش فشار، ضخامت در دیگر نقاط کاهش می‌یابد و نقطه D، نقطه بحرانی و نازک‌ترین بخش ورق است. از شکل ۳۷ نیز می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش فشار تغییر در ضخامت نقاط A تا B رخ نمی‌دهد و با ادامه فرایند شکل‌دهی، ضخامت از B تا D کاهش می‌یابد که به سبب افزایش نسبت کشش ورق در اثر افزایش فشار سیال است و نیز کمترین ضخامت در نقطه D مشاهده می‌شود. در ناحیه D تا F نیز توزیع ضخامت روندی افزایشی دارد که به دلیل کاهش تنش‌های کششی در این ناحیه نسبت به ناحیه قبل است.

جدول ۴ مقادیر پارامترهای قالب (برحسب میلی‌متر)

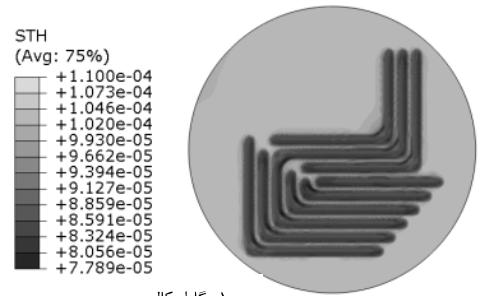
h/w	w/s	R/r	w	s	R	r	α
۰/۵۳	۲/۳	۱/۵	۱/۵	۰/۶۵	۰/۳	۰/۲	۱۰



۸۰ مگاپاسکال



۹۰ مگاپاسکال

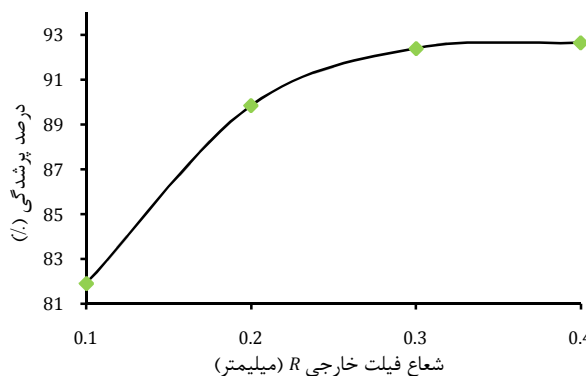


۱۰۰ مگاپاسکال

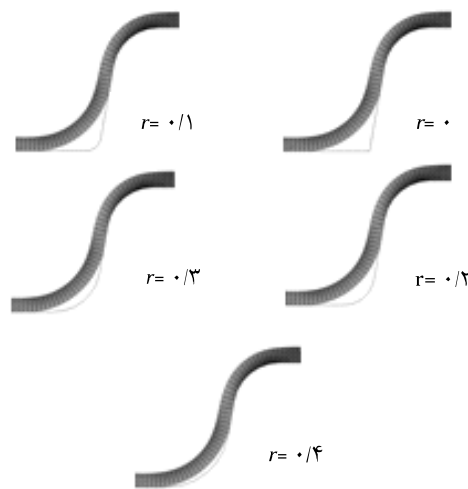
شکل ۳۵ نتایج شبیه‌سازی‌های سبب‌دهی در فشار ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و نمودار توزیع ضخامت ورق شکل داده شده را نشان می‌دهد. از شکل ۳۴ می‌توان مشاهده کرد که افزایش شعاع فیلت داخلی (r)، تأثیری بر ضخامت ورق شکل داده ندارد و در تمامی شعاع‌ها، ناحیه B ناحیه بحرانی است که در آن ضخامت ورق به ۰/۰۸ میلی‌متر می‌رسد.

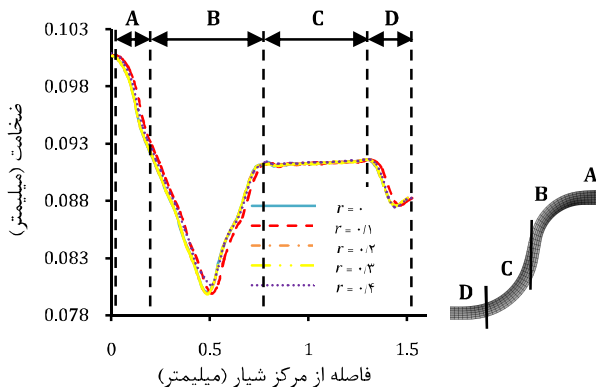
در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که افزایش شعاع در ناحیه کف قطعه (ناحیه مقعر) r در کاهش ضخامت قطعه تأثیری ندارد و تنها باعث می‌شود قطعه در فشار کمتری قالب را بطور کامل پر کند، اما افزایش شعاع قسمت بالای قالب (ناحیه محدب) R ، باعث راحت‌تر جاری شدن ورق و همچنین شکل‌دهی بهتر قطعه می‌شود.



شکل ۳۲ مقایسه درصد پرشدگی قالب برای کانال‌هایی با شعاع فیلت داخلی $r = 0$

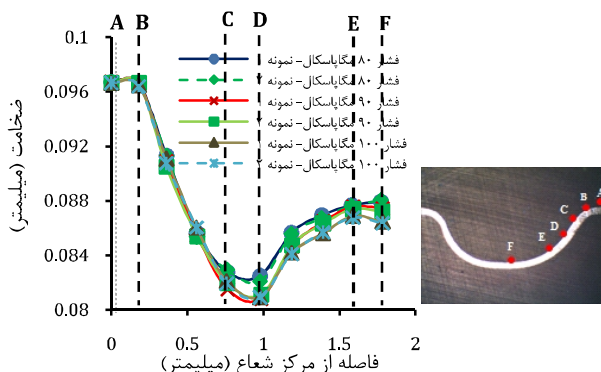


شکل ۳۳ نتایج شبیه‌سازی قالب‌هایی با شعاع فیلت خارجی $R = 0/3$ mm

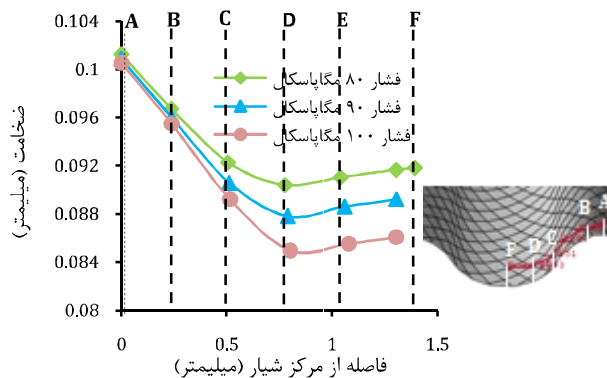


شکل ۳۴ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده با قالب‌هایی با شعاع فیلت خارجی $R = 0/3$

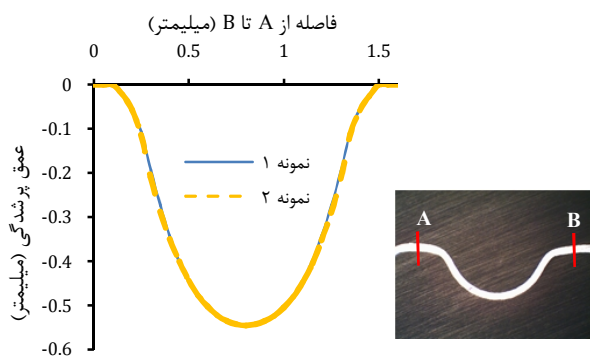
ملاحظه نمود که با افزایش فشار سیال، میزان عمق پرشدگی کانال‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل کشش بیشتر ورق به درون حفره قالب در اثر افزایش فشار است. بر اساس این نتایج می‌توان بیان کرد که با کمک فرایند هیدروفورمینگ می‌توان صفحات دوقطبی فلزی را با دقت و تکرارپذیری بالا تولید کرد.



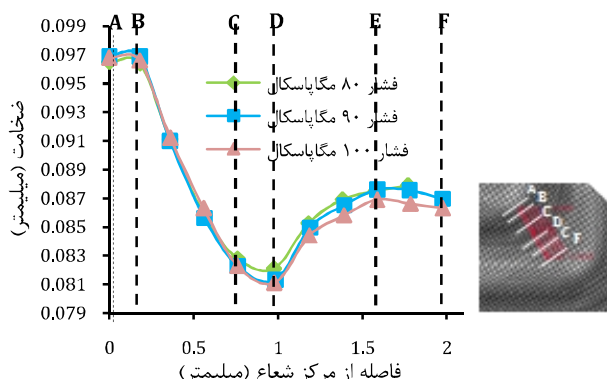
شکل ۳۶ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده در راستای شیاری



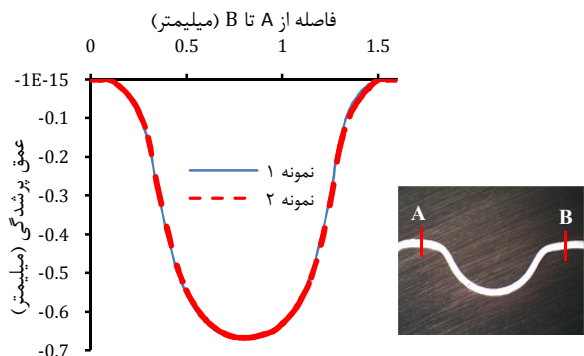
شکل ۳۷ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده در راستای شعاعی



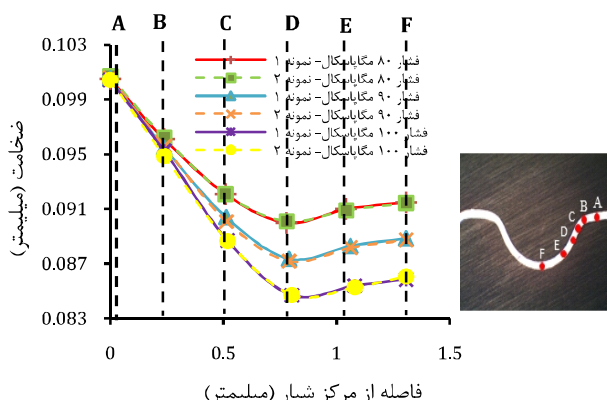
شکل ۳۸ منحنی توزیع ضخامت ورق شکل داده شده در راستای شعاعی



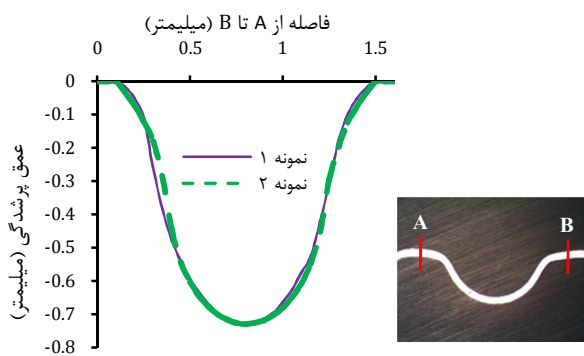
شکل ۳۹ منحنی پرشدگی دو نمونه در فشار ۸۰ مگاپاسکال



شکل ۴۰ منحنی پرشدگی دو نمونه در فشار ۹۰ مگاپاسکال



شکل ۴۱ منحنی پرشدگی دو نمونه در فشار ۱۰۰ مگاپاسکال



شکل ۴۲ منحنی پرشدگی دو نمونه در فشار ۱۰۰ مگاپاسکال

۴-۶- تکرارپذیری

به دلیل اهمیت بالایی دقت ابعادی پروفیل شکل داده شده بر روی صفحات دوقطبی فلزی و ضخامت نقاط بحرانی این صفحات بر عملکرد آنها، قابلیت تکرارپذیری هندسه‌های شکل داده شده بر روی این صفحات از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور بررسی قابلیت تکرارپذیری روش هیدروفورمینگ، به ازای هر فشار بیشینه معین، چندین آزمایش انجام شد. به دلیل اختلاف ناچیز بین منحنی‌های توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده، توزیع ضخامت و پروفیل فقط دو نمونه در شکل‌های ۳۸ تا ۴۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، در هر سطح فشار، پروفیل و توزیع ضخامت هر دو نمونه با خطای بسیار کمی در حدود ۰/۱۵٪ مشابه یکدیگرند. همچنین شکل‌های ۳۸ و ۳۹ نشان می‌دهند که با افزایش فشار، توزیع ضخامت دو نمونه در فشارهای مختلف تقریباً یکسان تکرار می‌شوند. از منحنی‌های پرشدگی پروفیل نمونه‌ها (شکل‌های ۴۰ تا ۴۲) نیز می‌توان

- پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و دست‌یابی به نتایج مطلوب، یک قالب ساخته شد و تست‌های تجربی برای تأیید نتایج شبیه‌سازی‌ها انجام شد. با انجام تست‌های تجربی مشاهده شد که شکل مطلوب حاصل گردید و حداکثر نسبت عمق به عرض کانال که در این پژوهش حاصل شد، 0.53 است که در مقایسه با پژوهش‌های قبلی $13/3$ درصد افزایش یافته است.

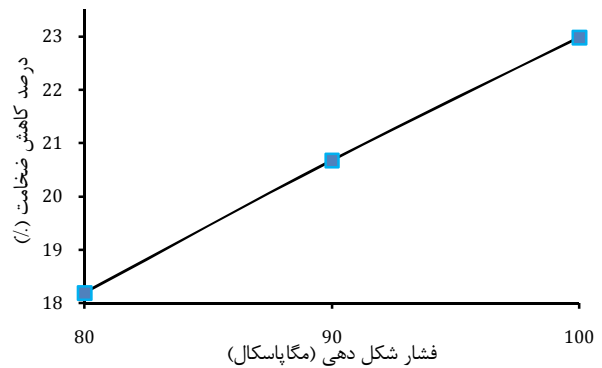
- در این مطالعه، اثر پارامترهای فرایندی بر توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با تکرار آزمایش‌های تجربی، قابلیت تکرارپذیری فرایند هیدروفرمینگ نیز بررسی شد.

- با انجام آزمایش‌های مورد نظر و بررسی نتایج مشخص گردید که با افزایش فشار شکل‌دهی، پرشدگی قالب افزایش می‌یابد که حداکثر پرشدگی بدست آمده 75 درصد است. همچنین با افزایش فشار، به دلیل افزایش نسبت کشش، ضخامت ناحیه بحرانی بیشتر کاهش می‌یابد.

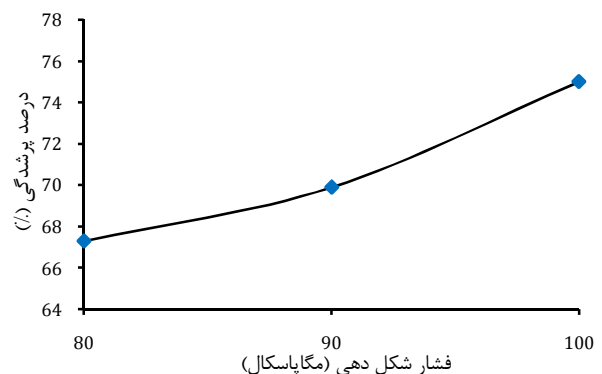
در نهایت می‌بایست اشاره کرد که به کمک روش هیدروفرمینگ می‌توان صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار مارپیچ موازی با نسبت عمق به عرض بالا و با دقت و تکرارپذیری بالایی شکل داد.

۶- مراجع

- [1] M. A. Khorasani, S. Asghari, B. F. Imani, Engineering Research Center of Isfahan, *The Fourteenth International Conference on Mechanical Engineering*, Isfahan University of Technology, April 25, 2006. (In Persian)
- [2] S. Mahabunphachai, *A hybrid hydroforming and mechanical bonding process for fuel cell bipolar plates*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Michigan University, 2008.
- [3] A. Heinzl, F. Mahlendorf, C. Jansen, *Bipolar Plates*, Duisburg- Essen University, Duisburg, Germany, 2009.
- [4] S. Mahabunphachai, O. 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, pp. 5269-5277, 2010.
- [5] 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.
- [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] M. Koc, S. Mahabunphachai, Feasibility investigations on a novel micro-manufacturing process for fabrication of fuel cell bipolar plates: internal pressure-assisted embossing of micro-channels with in-die mechanical bonding, *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 725-733, 2007.
- [8] M. B. Osia, S. J. Hosseini, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorgi, Forming Metallic Micro-Feature Bipolar Plates for Fuel Cell Using Combined Hydroforming and Stamping Processes, *Iranica Journal of Energy & Environment* 4 (2): pp. 91-98, 2013.
- [9] ASTM-E 8M- 04 (metric), p. 3, Fig. 1
- [10] L. Peng, D. Liu, P. Hu, X. Lai, J. Ni, Fabrication of Metallic Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Flexible Forming Process- Numerical Simulations and Experiments, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, pp. 031009-1, 2010.
- [11] L. Peng, X. Lai, P. Yi, J. Mai, J. Ni, Design, optimization and fabrication of slotted-interdigitated thin metallic bipolar plates for PEM fuel cells, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 8, pp. 011002-1, 2011.
- [12] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 137-143, 2004.



شکل ۴۳ تغییرات درصد کاهش ضخامت بحرانی‌ترین نقطه بر حسب فشار شکل‌دهی در نمونه‌های تجربی



شکل ۴۴ اثر فشار شکل دهی بر درصد پر شدگی پروفیل در نمونه‌های تجربی

۴-۷- اثر فشار شکل‌دهی بر درصد کاهش ضخامت و درصد پرشدگی

شکل‌های ۴۳ و ۴۴ به ترتیب اثر فشار شکل‌دهی بر درصد کاهش ضخامت و درصد پرشدگی قالب را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های ۳۸ و ۳۹ مشاهده شد، در فشارهای شکل‌دهی ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال، کمترین ضخامت در نقطه D رخ می‌دهد. شکل ۴۳ نشان می‌دهد که با افزایش فشار، به دلیل افزایش نسبت کشش ورق در این ناحیه، کاهش ضخامت ناحیه بحرانی بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش فشار، درصد پرشدگی افزایش می‌یابد و حداکثر پرشدگی بدست آمده 75 درصد می‌باشد که در شکل ۴۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج می‌توان دریافت، با انتخاب درست پارامترهای هندسی و فرایندی، روش هیدروفرمینگ با فشار بالا، قادر به شکل‌دهی هندسه‌های پیچیده صفحات دوقطبی فلزی با نسبت‌های عمق به عرض بالا و بدون هیچ‌گونه اثر پارگی و با توزیع ضخامت قابل قبول است.

۵- نتیجه‌گیری

- در این مقاله شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با الگوی شیار مارپیچ موازی و با ورق به ضخامت 0.11 میلی‌متر با استفاده از روش هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور دست‌یابی به هندسه مطلوب، پارامترهای هندسی قالب به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفتند.