



بررسی تجربی و شبیه سازی پارامترهای فرآیندی و هندسی به منظور شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پین شکل

موسی بلالی اوصیاء¹، سید جمال حسینی پور^{2*}، محمد بخشی³، عبدالحمید گرجی⁴

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

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

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

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

* بابل، صندوق پستی 484، j.hosseini@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 بهمن 1393

پذیرش: 15 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 12 خرداد 1394

کلید واژگان:

صفحات دوقطبی فلزی

هیدروفورمینگ

زاویه دیواره

فشار شکل دهی

ابعاد پخ

چکیده

در سال های اخیر به دلیل مزایای عمده صفحات دوقطبی فلزی استفاده از این صفحات در پیل های سوختی مورد استقبال قرار گرفته است. پژوهش های گوناگونی پیرامون روش های مختلف شکل دهی این صفحات صورت گرفته است. عمده این پژوهش ها بر روی الگوی مسیر جریان شیاری بوده است. در حالی که در برخی از موارد که میزان افت فشار در مسیر جریان از اهمیت بالایی برخوردار می باشد، الگوی مسیر جریان پین شکل عملکرد مناسبی از خود نشان می دهد. در این پژوهش شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با ضخامت 0/11 میلی متر و با الگوی پینی به کمک فرآیند هیدروفورمینگ بطور تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه شامل اثر زاویه دیواره قالب، اندازه پخ لبه پین، نسبت عمق به عرض پین و فشار شکل دهی بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل می باشد. به این منظور دو قالب با زاویه دیواره صفر و 15 درجه با مقطع دایره ای تهیه شد. سپس به کمک واحد اعمال فشار در فشارهای مختلف تست های آزمایشگاهی انجام شد. پس از انجام آزمایش های مورد نظر و بررسی نتایج مشخص گردید که وجود زاویه در دیواره قالب باعث توزیع یکنواخت تر ضخامت و دقت بالاتر پروفیل قطعه شکل یافته شده است. همچنین محدوده مناسب برای هر یک از پارامترهای هندسی قالب تعیین گردید.

The Experimental and Simulation Investigation of Process and Geometrical Parameters for Hydroforming of Pin-type Metallic Bipolar plates

Moosa Belali Owsia, Seyed Jamal Hosseinipour*, Mohammad Bakhshi Jooybari, Abdolhamid Gorji

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 February 2015

Accepted 05 May 2015

Available Online 02 June 2015

Keywords:

Metallic bipolar plates

Hydroforming

Wall angle

Forming pressure

Chamfer dimension

ABSTRACT

In recent years the use of metallic bipolar plates for fuel cells has been considered. Several studies have been conducted on the various methods of forming these plates. Most of this research has been done on the serpentine flow fields. In some cases where the pressure drop is an important factor the pin-type flow fields shows good performance. In this research, hydroforming of metallic bipolar plates with circular pin-type pattern from stainless steel 304 with 0.11mm thickness is investigated experimentally and numerically. For this purpose, the effect of geometrical parameters such as the die wall angle, the die chamfer dimension, the depth-to-width ratio of the die, and forming pressure on the profiles, filling percent, thickness distribution and thinning percent of the formed parts are investigated. In this regard, two dies with wall angle of 0 and 15 degree were prepared. Then experimental tests were done at different pressures. After performing the required tests, the results show that the die wall angle leads to a more uniform thickness distribution and higher precision of the parts profile. Also, the suitable range of die geometrical parameters was determined.

1- مقدمه

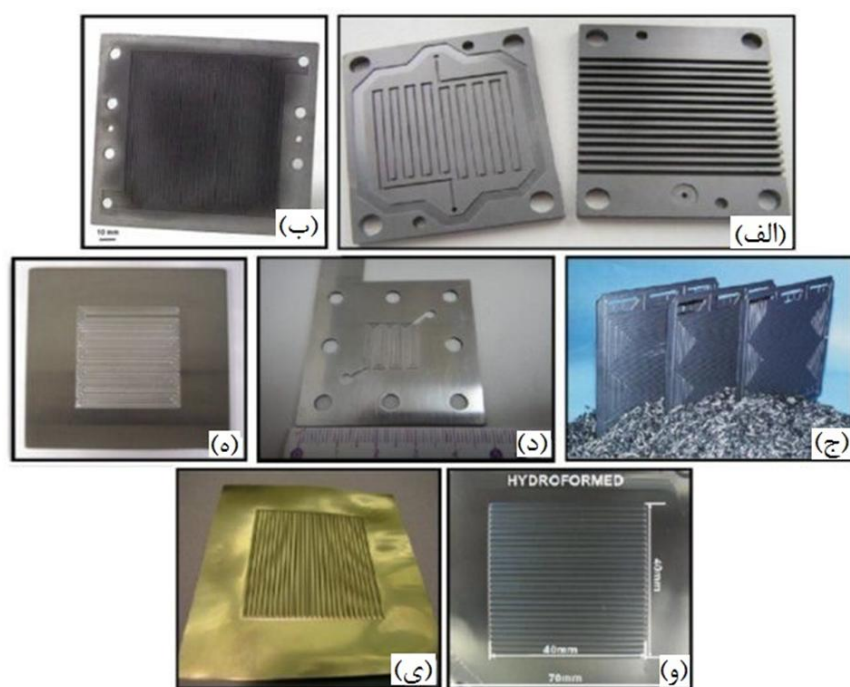
با افزایش کاربرد پیل های سوختی در صنایع امروز و گسترش روز افزون استفاده از آن، در سال های اخیر سعی شده است تا به کمک روش های گوناگون اجزای مختلف پیل های سوختی بهینه گردند. یک مجموعه پیل سوختی از اجزای مختلفی ساخته شده است که مهمترین آن صفحات دوقطبی می باشند، زیرا که

80-60 درصد از وزن، 50 درصد از حجم و 35 – 45 درصد از هزینه مجموعه پیل سوختی را این صفحات تشکیل می دهند [1]. این صفحات از روش ها و جنس های مختلفی ساخته می شوند که در شکل 1 نشان داده شده است. از میان روش های مختلف، روش شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی به دلیل مزایایی همچون هزینه کم، خواص مکانیکی و الکتریکی عالی، خواص حرارتی

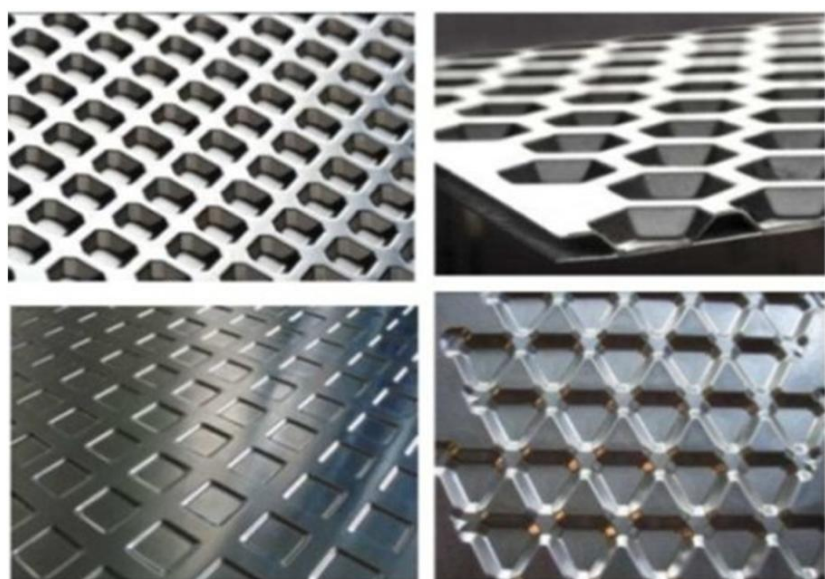
Please cite this article using:

M. Belali Owsia, S.J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, A.H. Gorji, The Experimental and Simulation Investigation of Process and Geometrical Parameters for Hydroforming of Pin-type Metallic Bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 215-226, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 صفحات دوقطبی از جنس، الف - گرافیت [9]، ب - کامپوزیت کربن - پلیمر [10]، ج - صفحه کربن - کربن [11]، د، ه، و، ی - ورق فولادی زنگ نزن [12-14].



شکل 2 چند نمونه از قطعات شکل داده شده با الگوی پین شکل در مقیاس بزرگ توسط شرکت بوریست [8]

به این منظور ابتدا دو قالب با ابعاد هندسی متفاوت ساخته شده و به کمک آن در فشارهای مختلف چند نمونه شکل داده شدند.

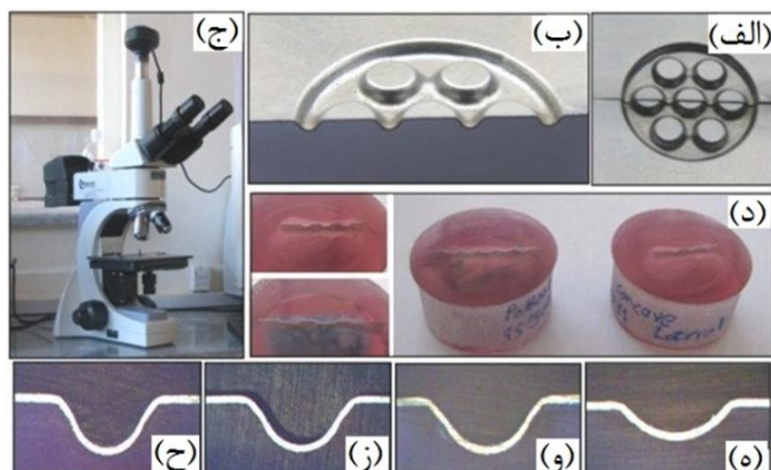
در ادامه نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج حاصل از تست های تجربی تایید شد. پس از تایید نتایج شبیه سازی، اثر پارامترهایی همچون زاویه دیواره و ابعاد پخ به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفت.

2- آزمایشات تجربی

الگوی تکرار شونده نمونه ی مورد بررسی در شکل 3 نشان داده شده است. هندسه پیچیده و نسبت عمق به عرض زیاد، شکل دهی این صفحات را دشوار می سازد. همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود، قطر پین ها 3 میلی متر (S)، کمترین فاصله بین دو پین مجاور 1/2 میلی متر (W)، ارتفاع پین ها 0/8 میلی متر (h)، زاویه دیواره صفر و 15 درجه (α) و ابعاد پخ ها 0/25×0/25 میلی متر (Ch) می باشند. مجموعه (قالب) ساخته شده در شکل 4 نشان داده شده است. این قالب بصورت دو تکه با اینسرتی از جنس برنج می باشد. جنس ورق از فولاد زنگ نزن آستینیتی 304 و ضخامت این صفحات بسیار نازک و برابر 0/11 میلی متر می باشند. به منظور تعیین خواص مکانیکی ورق فلزی مورد نظر، تست کشش تک محوری انجام شد و خواص مکانیکی ورق استخراج گردید. در شکل 5 نمودار تنش - کرنش حقیقی ورق و در جدول 1 خواص مکانیکی این ورق آورده شده است.

مناسب، سهولت ساخت و زمان تولید کوتاه تر مطلوب تر می باشد. در تحقیقات صورت گرفته پیرامون شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی که از سال 2007 توسط کوچ و همکاران [2] آغاز شد، اکثر تحقیقات بر روی بررسی صفحات دوقطبی با مسیر جریان شیاری بوده است، درحالی که در برخی از موارد و در کاربردهای خاصی که میزان افت فشار در مسیر جریان از اهمیت بالایی برخوردار می باشد، الگوی مسیر جریان پین شکل راندمان مناسب تری از خود نشان می دهد. در این زمینه تحقیقاتی پیرامون راندمان و عملکرد مسیرهای جریان پین شکل صورت گرفته است. پیرو تحقیقاتی که اخیراً صورت گرفت، مسیر جریان پین شکل دارای مزایایی نسبت به مسیرهای جریان مرسوم می باشد. آقای گیو و همکاران [3] مسیر جریان پین شکل بهینه شده ای را ارائه کردند که دارای چگالی توان بالا به همراه افت فشار کمتر، توزیع یکنواخت تر فشار، و انتقال جرم موثرتر در مقابل مسیر جریان های مرسوم موازی و مارپیچ می باشد. همچنین مسیر جریان پین شکل به پیل سوختی اجازه می دهد تا در چگالی جریان بالاتر کار کند. آقای لباتو و همکاران [4] چهار مسیر جریان مختلف مارپیچ، پین شکل، موازی و بهم متصل را مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که از میان این چهار الگو، به کمک الگوی پینی در شرایط کاری دما بالا می توان انتظار عملکرد مناسب تری داشت. همچنین افت فشار ناشی از الگوی پینی در میان این چهار الگو کمترین مقدار می باشد که در مورد هزینه پمپ کردن سیال حائز اهمیت است. ولی در خصوص بحث شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پین شکل گزارش های بسیار محدودی به دست آمده است. از جمله آن ها می توان به تحقیقات بلالی اوصیاء و همکاران [5,6] اشاره کرد. آن ها در این پژوهش روش هیدروفرمینگ، استمپینگ و روش ترکیبی هیدروفرمینگ و استمپینگ را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که روش ترکیبی قادر است تا نمونه هایی با توزیع ضخامت و درصد پرشدگی مطلوب تر به همراه فشار شکل دهی کمتر تولید کند. در پژوهشی دیگر بلالی اوصیاء و همکاران [7] به بررسی اثر هندسه پین ها و فاصله بین آن ها بر میزان پرشدگی و نازک شدگی نمونه های شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ در قالب محدب پرداختند. نتایج بررسی آن ها نشان داد که با تغییر هندسه پین ها از حالت بیضوی به حالت دایروی و با کاهش نسبت عمق به عرض، درصد پرشدگی و درصد نازک شدگی رفتار مطلوب تری از خود نشان می دهند. همچنین مشاهده شد که نمونه های دایروی با نسبت عمق به عرض 0/67 بهینه ترین حالت در میان هندسه های مختلف به حساب می آیند. در پژوهشی دیگر، شرکت بوریست توانسته تا صفحاتی با هندسه نظیر صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی تولید کند ولی ابعاد آن ها در مقایسه با ابعاد ریز موجود در صفحات دوقطبی مورد نظر بزرگتر می باشند [8]. در شکل 2 تصویری از محصولات شرکت بوریست مشاهده می شود. با توجه به پیچیدگی بیشتر شکل دهی این الگو نسبت به الگوهای کانالی شکل (مارپیچ) و کارایی بهتر این الگو در کاربردهای خاص در مقایسه با الگوهای مارپیچ مرسوم، تحقیقات در این رابطه از اهمیت بالایی برخوردار است.

در پژوهش پیشین که توسط بلالی اوصیاء و همکاران [7] انجام گرفت مشاهده شد که در بین هندسه های مختلف حالت محدب، مناسب ترین توزیع ضخامت و درصد پرشدگی مربوط به پین های دایروی بوده است. در این پژوهش که در ادامه پژوهش پیشین می باشد، پارامترهای مختلف شکل دهی الگوهای پینی دایروی صفحات دوقطبی فلزی به کمک روش هیدروفرمینگ بررسی می گردد. در این رابطه اثر پارامترهای هندسی و فرآیندی مختلف بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی صفحات شکل داده شده با الگوی پینی شکل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل 6 روند آماده سازی نمونه های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و درصد پرشدگی پروفیل

جدول 1 خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن 304

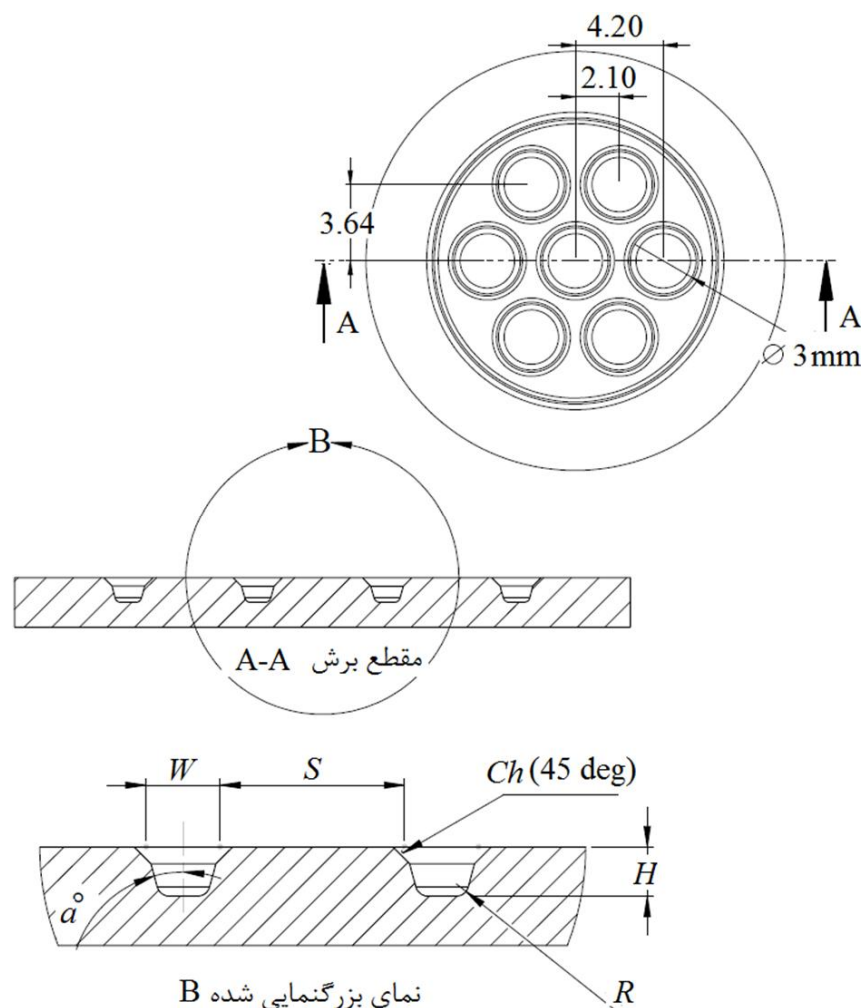
196	مدول الاستیک E (گیگا پاسگال)
0/3	ضریب پواسون ν
255	تنش تسلیم σ_y (مگا پاسگال)
1505	ضریب استحکام K
0/65	نمای کرنش سختی n
0/06	کرنش اولیه ϵ_0

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

در شکل 6 روند تهیه نمونه های شکل داده شده به منظور بررسی توزیع ضخامت و پروفیل نشان داده شده است. در این پژوهش از واحد اعمال فشار با توان اعمال فشار 140 مگاپاسگال و پرس هیدرولیک با ظرفیت 40 تن استفاده شده است.

3- شبیه سازی

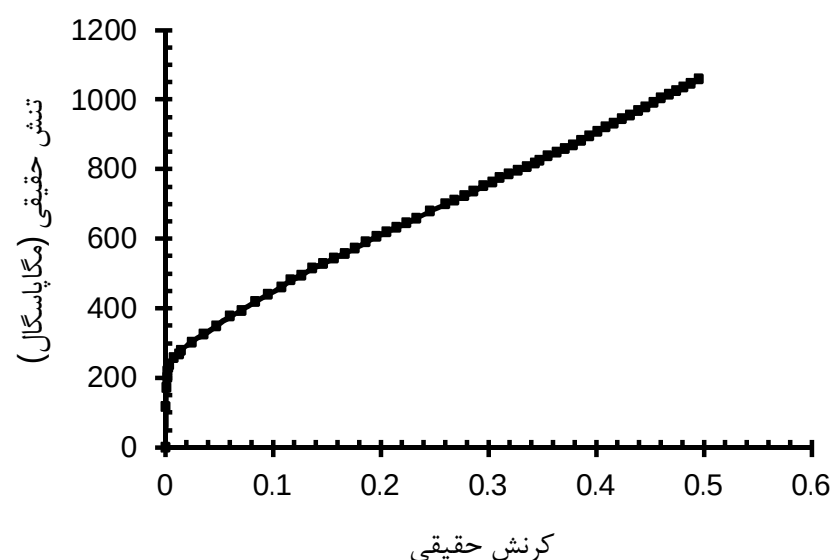
به منظور شبیه سازی از نرم افزار آباکوس 6.10 استفاده شده است. برای معرفی خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن 304 از نتایج حاصل از تست تک محوری انجام شده (جدول 1) استفاده گردید. نوع تحلیل از نوع دینامیک - صریح¹ می باشد. به منظور دستیابی به دقت بالا در نتایج شبیه سازی، ورق به صورت سه بعدی توپر شکل پذیر² و همچنین قالب ها بصورت سه بعدی صلب مجزای پوسته - ای³ مدل شده اند. به دلیل تقارن مدل، بخشی از مدل در نرم افزار ترسیم گردید که در شکل 7 الف بصورت مستطیل سیاه رنگ و در شکل 7 ب بصورت سه بعدی نشان داده شده است. ضریب اصطکاک موجود بین ورق و اجزای قالب برای فرآیند هیدروفرمینگ 0/1 و از نوع حالت تماسی کینماتیک⁴ در نظر گرفته شده است [15]. به منظور مش بندی، ابعاد المان ها در ورق 0/022 میلی متر (در راستای ضخامت ورق از 5 المان استفاده شده است که در شکل 7 ب نشان داده شده است) و از نوع C3D8R، در نواحی پخ و دیواره قالب 0/04 میلی متر از نوع R3D4 و در سایر نقاط قالب 0/2 میلی متر از نوع R3D4 و همگی المان ها از نوع کواد - دومینیتد⁵ در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی گسترده تر در بحث شبیه سازی اثر پارامترهایی چون زاویه دیواره (صفر - 5 - 10 - 15 درجه)، نسبت عمق به عرض (0/33 - 0/67 - 1)، ابعاد پخ (0/1 - 0/2 - 0/3 میلی متر) و سطوح فشار مختلف (40 - 60 - 80 - 100 - 120 - 160 - 200 - 250 - 300 مگاپاسگال) بر روی درصد پرشدگی و نازک شدگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل 8 پارامترهای نسبت عمق به عرض و زاویه دیواره نشان داده شده است.



شکل 3 ابعاد هندسی پین های مورد نظر (برحسب میلی متر) نمای بزرگنمایی شده B



شکل 4 مجموعه قالب به منظور شکل دهی پین های تکرار شونده با الگوی پینی



شکل 5 منحنی تنش - کرنش حقیقی نمونه فولادی زنگ نزن 304

1- Dynamic, Explicit
2- 3D Solid Deformable
3- Shell Discrete Rigid
4- Kinematic contact method
5- Quad-dominated

4- نتایج و بحث

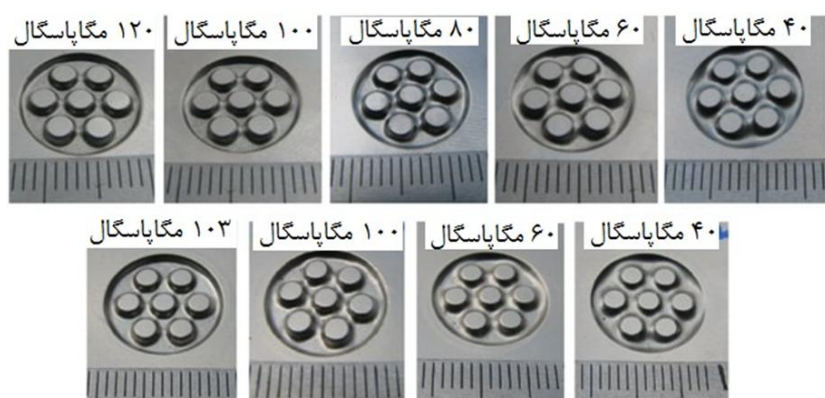
4-1- توزیع ضخامت

4-1-1- اثر زاویه دیواره و فشار بر توزیع ضخامت

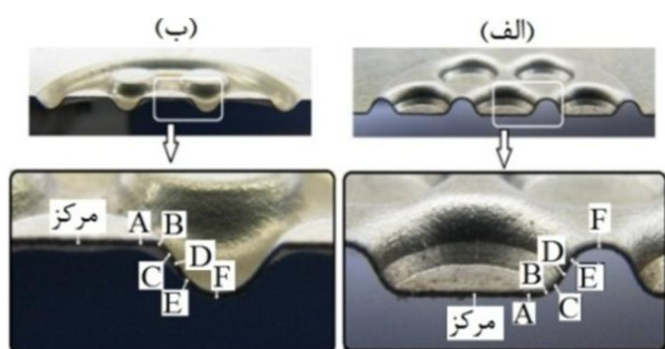
به منظور بررسی روند تغییرات توزیع ضخامت به کمک قالب‌های ساخته شده با پین‌هایی با زاویه دیواره صفر و 15 درجه (که در شکل 4 نشان داده شده است)، نمونه‌هایی در سطوح فشار 40-60-80-100 و 120 مگاپاسگال شکل داده شدند که در شکل 10 نشان داده شده است. به منظور نام‌گذاری مقطع مورد بررسی، در شکل 11 نمایی از نمونه بریده شده آورده شده است که از مرکز پین تا پایین‌ترین نقطه شکل داده شده نام‌گذاری شده است.

شکل 12 نتایج توزیع ضخامت شبیه سازی و تجربی مربوط به نمونه‌هایی با زاویه دیواره صفر و 15 درجه و نسبت عمق به عرض 0/67 را مورد مقایسه قرار داده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی در فشارهای 60 و 103 مگاپاسگال برای نمونه با دیواره صفر درجه و در فشارهای 40 و 80 مگاپاسگال برای نمونه با دیواره 15 درجه با نتایج تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد. نتایج شبیه‌سازی بطور دقیق تغییرات محل نازک‌ترین ضخامت را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سایر فشارها نیز رفتاری مشابه با نمونه‌های تجربی از خود نشان می‌دهند. بیشترین اختلاف در بحث توزیع ضخامت بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای نمونه با زاویه دیواره صفر درجه 2/13% (نمونه در فشار 60 مگاپاسگال) و برای نمونه با دیواره 15 درجه 1/52% (نمونه در فشار 120 مگاپاسگال) می‌باشد.

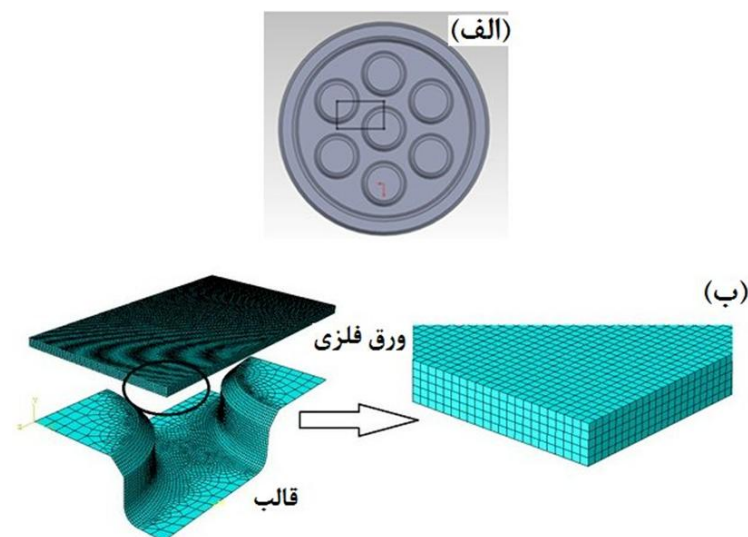
در رابطه با تغییرات محل نازک‌ترین نقطه قابل ذکر است که با افزایش فشار، نازک‌ترین ناحیه از نقطه B به نقطه D تغییر می‌یابد. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌شود در سطوح فشار کمتر از 80 مگاپاسگال، تمرکز کرنش در گوشه بالایی پخ یا همان نقطه B بوده؛ بنابراین نقطه B نازک‌ترین نقطه نمونه می‌باشد. با افزایش فشار تا 80 مگاپاسگال ورق بیشتر شکل قالب را بخود گرفته و در نقطه D به قالب چسبیده و خم می‌شود. بنابراین ضخامت نقطه D کاهش یافته تا در فشار 80 مگاپاسگال ضخامت دو نقطه B و D با یکدیگر برابر می‌شوند.



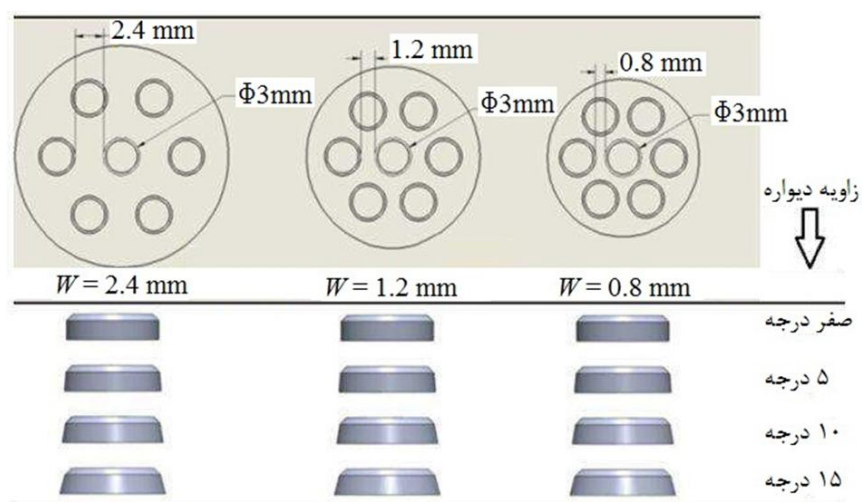
شکل 10 نمونه‌های شکل داده شده؛ ردیف بالا: زاویه دیواره 15 درجه - ردیف پایین: زاویه دیواره صفر درجه



شکل 11 سطح برش خورده نمونه شکل داده شده با نسبت عمق به عرض 0/67 و زاویه دیواره 15 درجه، الف- سطح پشت نمونه، ب- سطح روی نمونه



شکل 7 الف) مدل کلی قالب ب) مدل المان بندی شده به منظور شبیه‌سازی



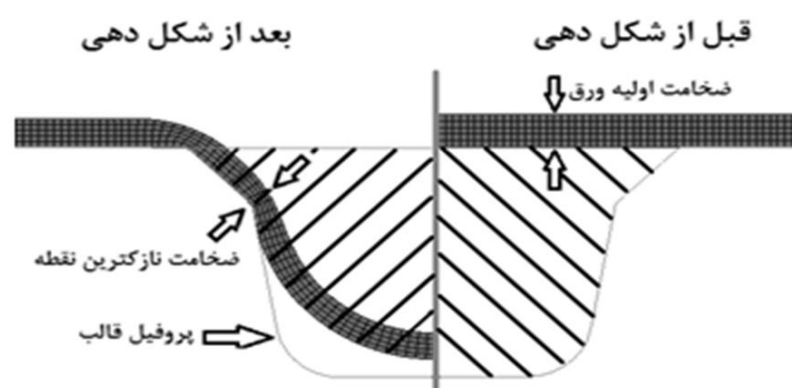
شکل 8 پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی (نسبت عمق به عرض و زاویه دیواره)

در این پژوهش، درصد نازک شدگی مطابق معادله (1) تعریف شده است:

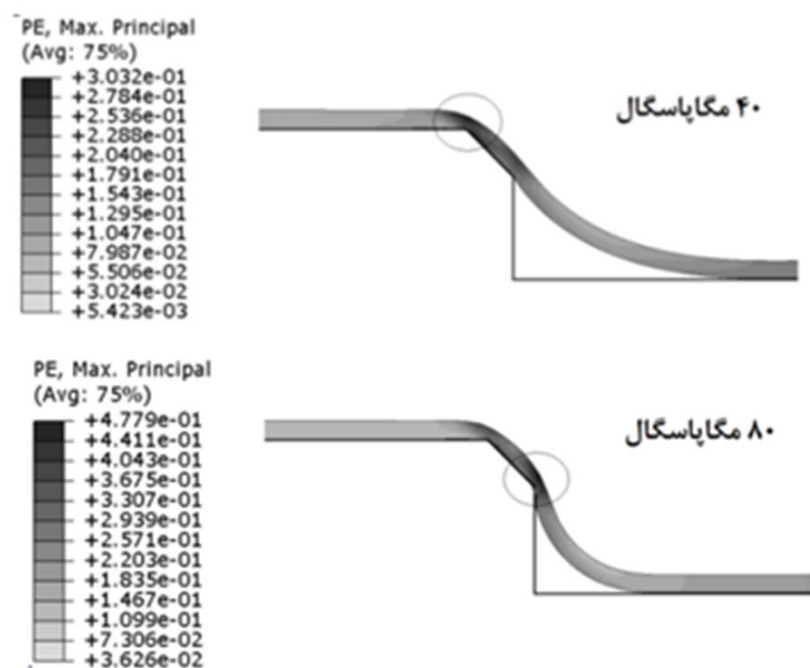
$$(1) \quad \text{نازک‌ترین ضخامت} - \text{ضخامت اولیه} \times 100 = \text{درصد نازک شدگی} \quad \text{ضخامت اولیه}$$

که منظور از نازک‌ترین ضخامت همان ضخامت بحرانی‌ترین نقطه از صفحه شکل داده شده می‌باشد که در شکل 9 مشاهده می‌شود. به دلیل هندسه سه بعدی الگوی پینی (برخلاف هندسه دوبعدی الگوی شیاری) تعیین درصد پرشدگی دشوارتر می‌شود. بصورت تجربی مشاهده شده است که در الگوهای پینی، بحرانی‌ترین ناحیه از قطعه به منظور پرشدگی، مربوط به ناحیه‌ای می‌باشد که کمترین فاصله بین پین‌ها وجود دارد. بنابراین در این پژوهش به منظور تعیین درصد پرشدگی، نواحی بحرانی اشاره شده بررسی گردیده است. معیار درصد پرشدگی در معادله 2 تعریف شده است که عبارت از مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده (بخش هاشور خورده سمت چپ شکل 10) به مساحت کل حفره قالب (بخش هاشور خورده سمت راست شکل 10) در ناحیه بحرانی می‌باشد که در شکل 9 نشان داده شده است.

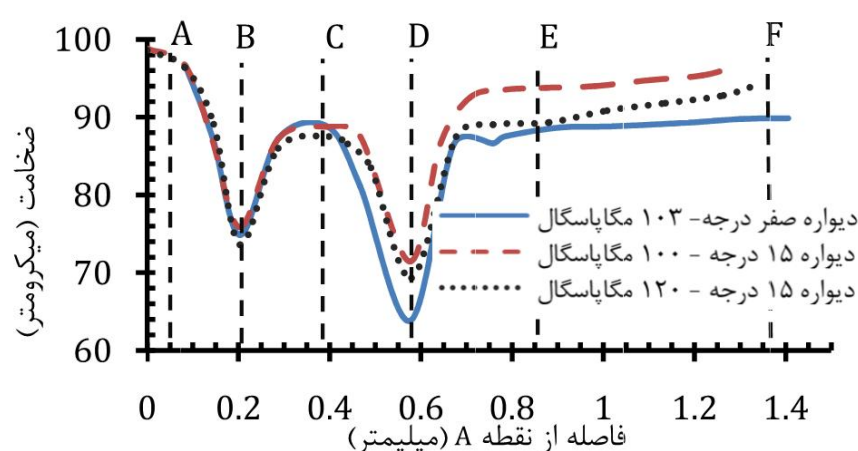
$$(2) \quad \text{مساحت جاروب شده} \times 100 = \text{درصد پرشدگی} \quad \text{مساحت کل حفره قالب}$$



شکل 9 نمایی از مساحت پر شده و ضخامت اولیه و نهایی در تعیین درصد پرشدگی و نازک شدگی



شکل 13 نتایج شبیه سازی مربوط به کرنش پلاستیک در ناحیه پخ لبه در فشارهای 40 و 80 مگاپاسگال



شکل 14 توزیع ضخامت صفحات شکل داده شده با زاویه دیواره صفر درجه در فشار 103 مگاپاسگال و نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در فشار 100 و 120 مگاپاسگال

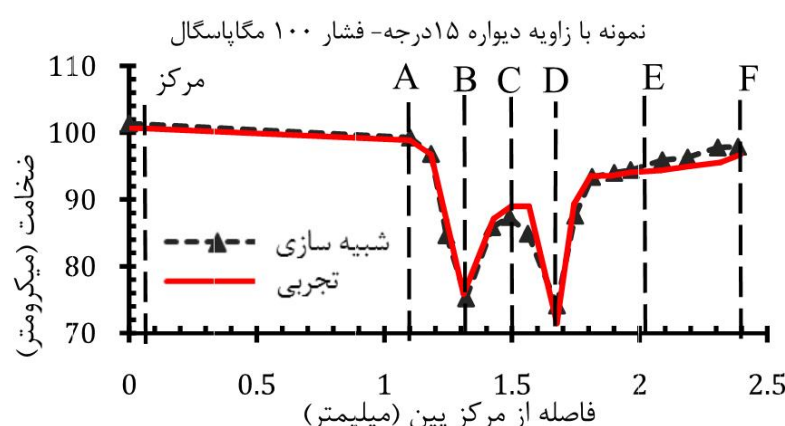
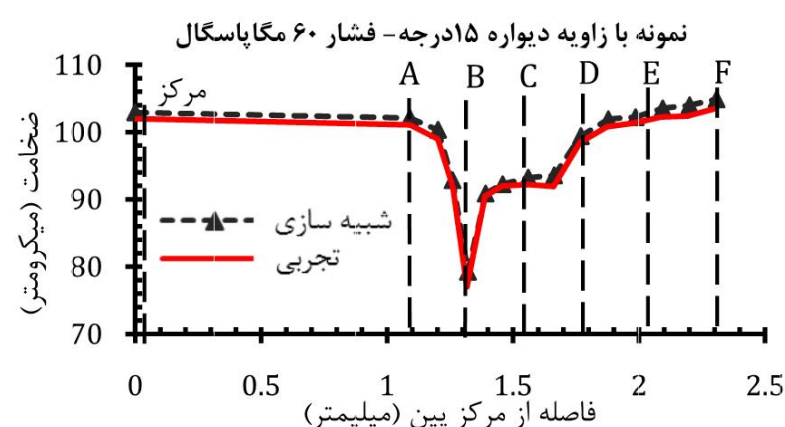
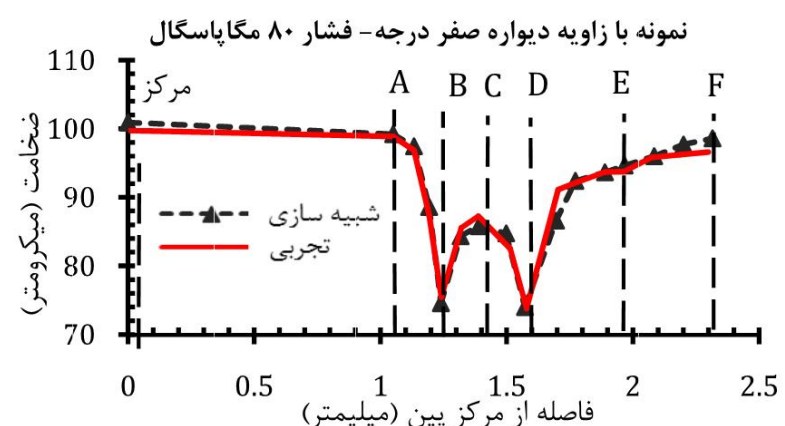
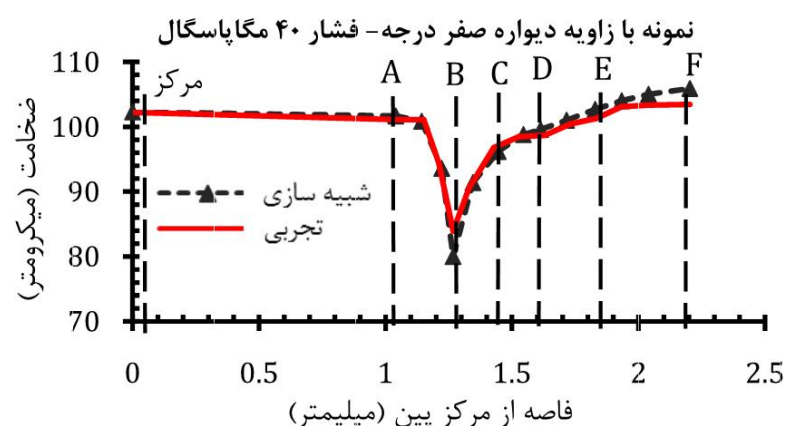
دلیل این رفتار، یکسان بودن ابعاد هندسی سطح پین و پخ بوده که به تبع آن رفتار تماسی بین نمونه و پین قالب برای این دو حالت مشابه می‌باشد، اما به دلیل تفاوت در زاویه دیواره پین‌ها، رفتار تماس با دیواره پین برای دو حالت مختلف متفاوت است. این تفاوت خود را در نقاط D تا F بوضوح نشان می‌دهد. به دلیل عدم تماس کافی نمونه شکل داده شده با دیواره پین با زاویه صفر درجه، ضخامت در نقاط D تا F مربوط به این نمونه به میزان زیادی کمتر از نمونه با زاویه دیواره 15 درجه می‌باشد. این کاهش ضخامت در نمونه با زاویه دیواره صفر درجه به اندازه‌ای زیاد است که حتی ضخامت این نمونه از نمونه با زاویه دیواره 15 درجه که در فشار 120 مگاپاسگال شکل داده شده است نیز کمتر می‌باشد. همچنین با مقایسه دو نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در سطوح فشار فشار 100 و 120 مگاپاسگال، اثر مثبت زاویه دیواره بر کاهش ضخامت نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در نقاط بحرانی (نقاط B و D) وجود زاویه دیواره از ادامه روند کاهش ضخامت در این نواحی جلوگیری می‌کند. در نتیجه مشاهده می‌شود که وجود زاویه در دیواره اثر بسزایی در توزیع یکنواخت‌تر ضخامت در نمونه‌های شکل داده شده از خود نشان می‌دهد.

2-4- درصد نازک شدگی

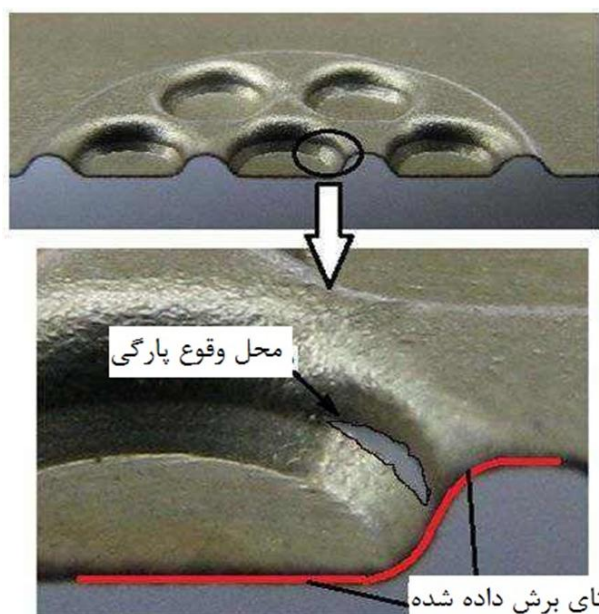
2-4-1- اثر زاویه دیواره بر درصد نازک شدگی

در نمودار شکل 15، بیشترین درصد نازک شدگی در مقطع عرضی برش داده شده از نمونه شکل داده شده بر حسب فشار شکل دهی برای دو حالت قالب با زاویه دیواره صفر درجه و قالب با زاویه دیواره 15 درجه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تا فشار 80 مگاپاسگال، درصد نازک شدگی در دو نمونه با زاویه دیواره صفر و 15 درجه یکسان می‌باشد، ولی در فشارهای بالاتر یعنی

در این سطح فشار، به دلیل تماس کافی ورق شکل یافته با قالب در ناحیه پخ (ناحیه بین دو نقطه B و D)، با افزایش فشار، نازک شدگی در ناحیه B افزایش پیدا نکرده و تمرکز نازک شدگی در نقطه D می‌باشد. در نتیجه، با افزایش فشار از 80 مگاپاسگال، محل نازک‌ترین نقطه از نقطه B به D انتقال می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی موجود در شکل 13 نیز این نکته را نشان می‌دهد. به منظور بررسی اثر زاویه دیواره بر توزیع ضخامت، در شکل 14 توزیع ضخامت نمونه تجربی شکل داده شده با دیواره صفر درجه در سطح فشار 103 مگاپاسگال و نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در سطوح فشار 100 و 120 مگاپاسگال نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی با زاویه دیواره صفر و 15 درجه در سطح فشار تقریباً یکسان (100 مگاپاسگال) ضخامت در نقاط مرکز پین تا نقطه C تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل 12 مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت شبیه سازی و تجربی نمونه‌های شکل داده شده با زوایای دیواره صفر و 15 درجه در فشارهای مختلف.



شکل 17: نمایی از موقعیت نسبی محل وقوع پارگی نمونه شکل داده شده با نسبت عمق به عرض 0/67، ابعاد پخ 0/2 و زاویه دیواره صفر درجه.

اما این ضخامت پس از وقوع پارگی می‌باشد و به منظور تعیین مقدار مجاز درصد نازک‌شدگی می‌بایست مقداری انتخاب گردد که در آن محدوده نمونه سالم و به دور از هیچ گونه نازک‌شدگی شدید و پارگی باشد. در نتیجه ضخامت 60 میکرومتر یا به عبارتی درصد نازک‌شدگی 46% به عنوان حد مجاز نازک‌شدگی معرفی می‌گردد. در شکل 18 درصد نازک‌شدگی نازک‌ترین نقطه مربوط به هر یک از این نسبت‌های عمق به عرض بصورت مجزا نشان داده شده است. بطور کلی مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت عمق به عرض و افزایش زاویه دیواره رفتار نازک‌شدگی بهبود می‌یابد. در نسبت عمق به عرض 1 بجز در زاویه دیواره 15 درجه در سایر زوایای دیواره پارگی در فشارهای کمتر از 150 مگاپاسکال اتفاق می‌افتد. البته باید ذکر کرد که در زاویه دیواره 15 درجه نیز به دلیل عبور درصد نازک‌شدگی از درصد نازک‌شدگی حدی (46 درصد نازک‌شدگی) در فشارهای بیشتر از 180 مگاپاسکال، رفتار نازک‌شدگی قابل قبول نمی‌باشد.

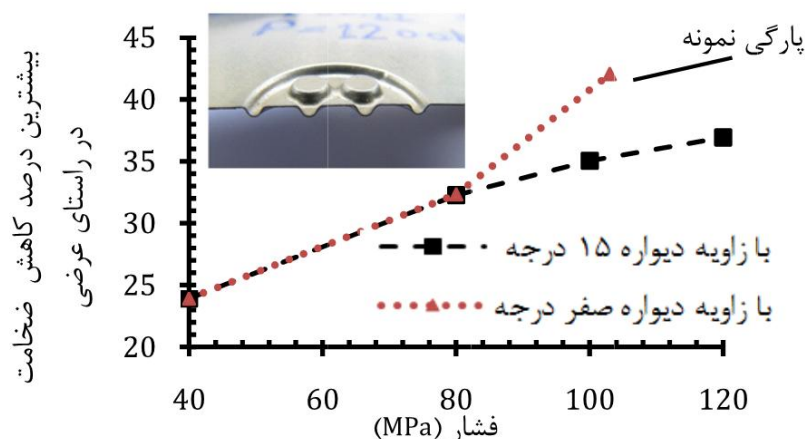
در نسبت عمق به عرض 0/67 نیز بجز در زوایای 15 و 10 درجه، پارگی زود هنگام رخ می‌دهد و در زوایای 15 و 10 درجه درصد نازک‌شدگی از حد مجاز عبور نکرده و قابل قبول می‌باشد. در نسبت عمق به عرض 0/33 در هیچ‌کدام از زوایای دیواره پارگی رخ نمی‌دهد و همچنین در کلیه حالت‌ها رفتار نازک‌شدگی قابل قبول می‌باشد. در شکل 19 نمودار بیشترین فشار اعمالی برحسب نسبت عمق به عرض در زوایای دیواره مختلف رسم شده است. با توجه به شکل‌های 18 و 19 مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه دیواره از صفر درجه به 10 درجه رفتار نازک‌شدگی بهبود می‌یابد (بخصوص در نسبت عمق به عرض 0/67)، در صورتی که با افزایش زاویه از 10 درجه به 15 درجه تغییر چندانی در رفتار نازک‌شدگی مشاهده نمی‌شود. از آنجاییکه هدف از این پژوهش دستیابی به کمترین زاویه ممکن به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد، بنابراین از بین زوایای دیواره مختلف، زاویه دیواره 10 درجه به عنوان بهترین زاویه انتخاب شد و در ادامه به منظور بررسی ابعاد پخ، زاویه دیواره 10 درجه ثابت در نظر گرفته می‌شود.

4-2-2- اثر ابعاد پخ بر درصد نازک‌شدگی

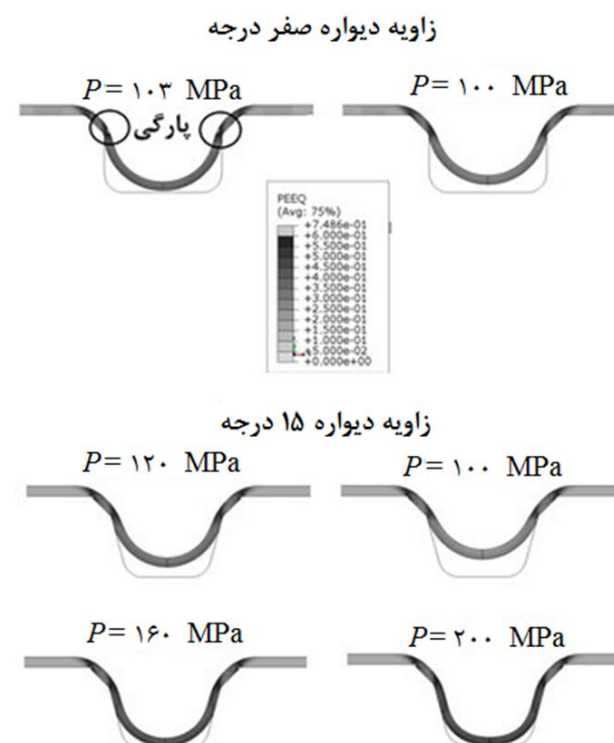
در شکل 20 رفتار نازک‌شدگی در نسبت‌های عمق به عرض، ابعاد پخ و سطوح فشار مختلف در زاویه دیواره 10 درجه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مانند شکل 18، بطور کلی با کاهش نسبت عمق به عرض و افزایش ابعاد پخ، رفتار نازک‌شدگی بهبود می‌یابد. در نسبت عمق به عرض 1 در ابعاد پخ 0/1 و 0/2 میلی‌متر پارگی در فشارهای کمتر از

دقیقا در فشارهایی که نازک‌ترین نقطه از نقطه B به D انتقال می‌یابد (شکل‌های 12 و 13) و متعاقب آن تماس ورق شکل داده شده به دیواره پین‌ها آغاز می‌گردد، رفتار نازک‌شدگی در دو حالت زاویه دیواره 15 درجه و زاویه دیواره صفر درجه از هم فاصله می‌گیرد و درصد نازک‌شدگی در نمونه با دیواره صفر درجه بحرانی‌تر می‌شود. در ادامه مشاهده می‌شود که در نمونه شکل داده شده با دیواره صفر درجه در فشار 103 مگاپاسکال پارگی رخ می‌دهد (شکل 15)، در صورتیکه در نمونه‌های با زاویه دیواره 15 درجه تا فشار 120 مگاپاسکال (فشار قابل اعمال در آزمایشگاه) اثری از پارگی مشاهده نمی‌شود. در شکل 16 که نتایج شبیه‌سازی مربوط به دو نمونه با زاویه دیواره صفر و 15 درجه نشان داده شده است این رفتار بوضوح مشاهده می‌شود. در شکل 16 در فشار 103 مگاپاسکال نمونه شکل داده شده با دیواره صفر درجه دچار پارگی شده ولی در نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در فشارهای 100 مگاپاسکال، 120 مگاپاسکال و بالاتر نیز به دلیل افزایش سطح تماس با دیواره اثری از نازک‌شدگی شدید مشاهده نمی‌شود. در شکل 17 محل وقوع پارگی در نمونه با زاویه دیواره صفر درجه و راستای اندازه‌گیری ضخامت ورق بوضوح نشان داده شده است.

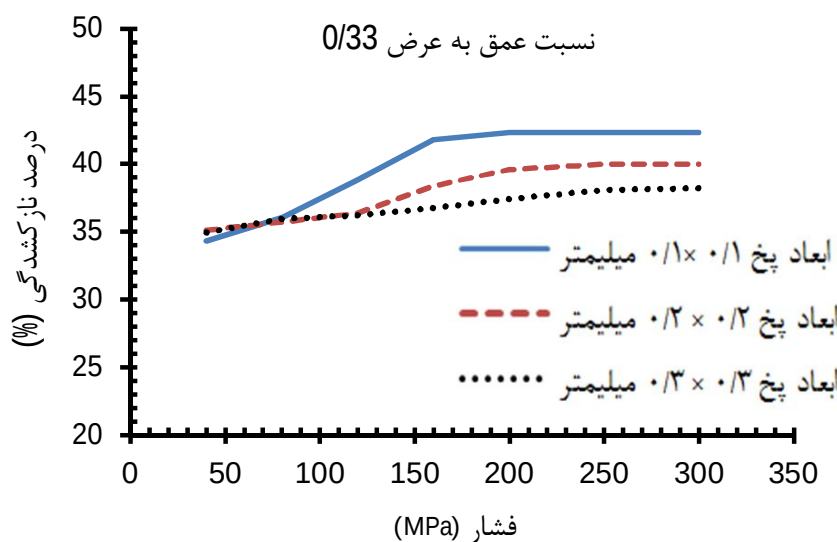
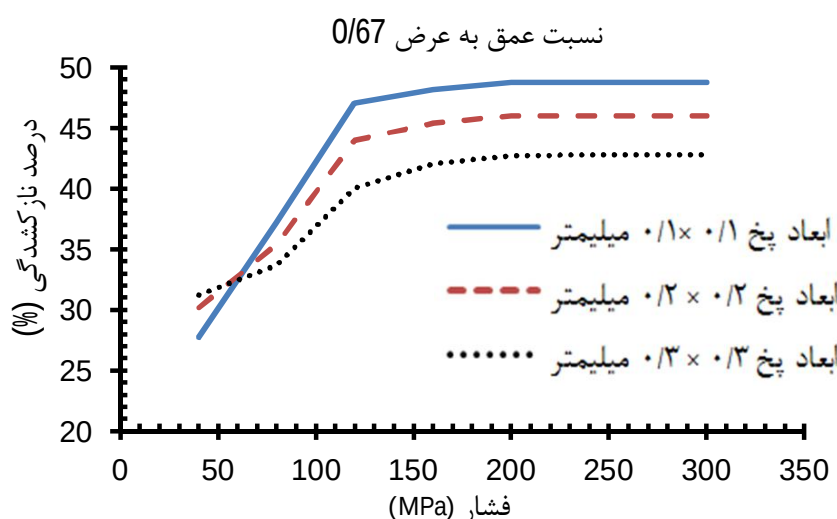
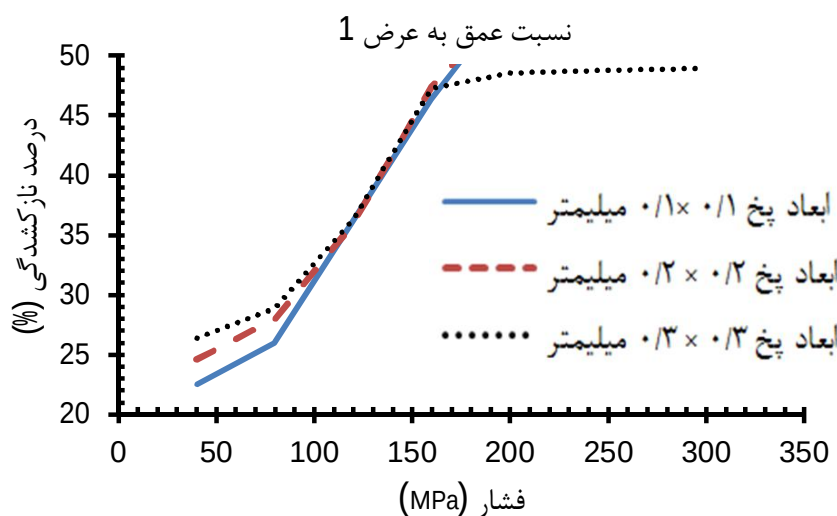
به منظور بررسی درصد نازک‌شدگی و اثر پارامتر زاویه دیواره، در هر نسبت عمق به عرض، چهار زاویه و در هر حالت هفت سطح فشار مختلف بررسی گردید. در ابتدا می‌بایست تا درصد نازک‌شدگی مجاز تعریف گردد. در بررسی‌های صورت گرفته از نمونه‌های شکل داده شده مشاهده شده است ضخامت ورق در ناحیه پاره شده در حدود 55 میکرومتر می‌باشد. این موضوع در پژوهش پیشین نیز ذکر شده است [7].



شکل 15: تغییرات درصد بیشترین کاهش ضخامت نمونه‌های تجربی با نسبت عمق به عرض 0/67، ابعاد پخ 0/2 و زاویه دیواره صفر و 15 درجه



شکل 16: مقایسه نتایج شبیه‌سازی سطح تماس بین ورق و قالب در نسبت عمق به عرض 0/67 و با زاویه دیواره صفر و 15 درجه



شکل 20 مقایسه درصد نازک شدگی در فشارها، ابعاد پین، نسبت های عمق به عرض و نسبت های قطر کوچک به قطر بزرگ مختلف با زاویه دیواره 10 درجه

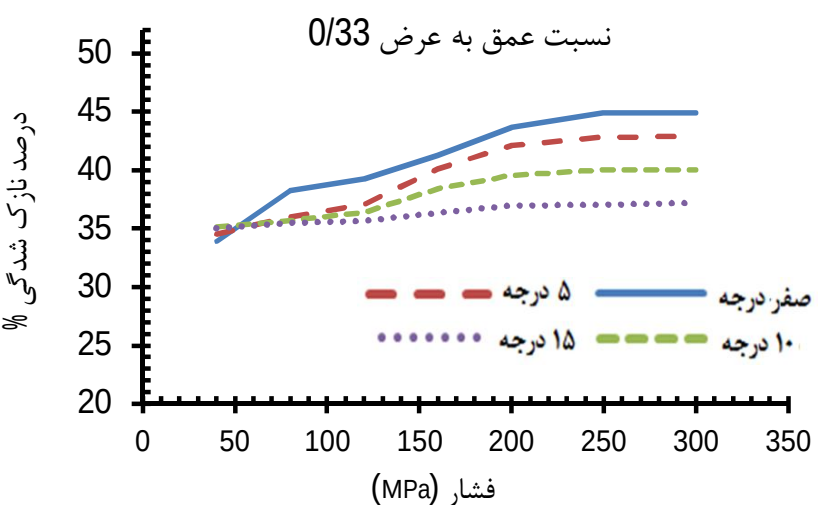
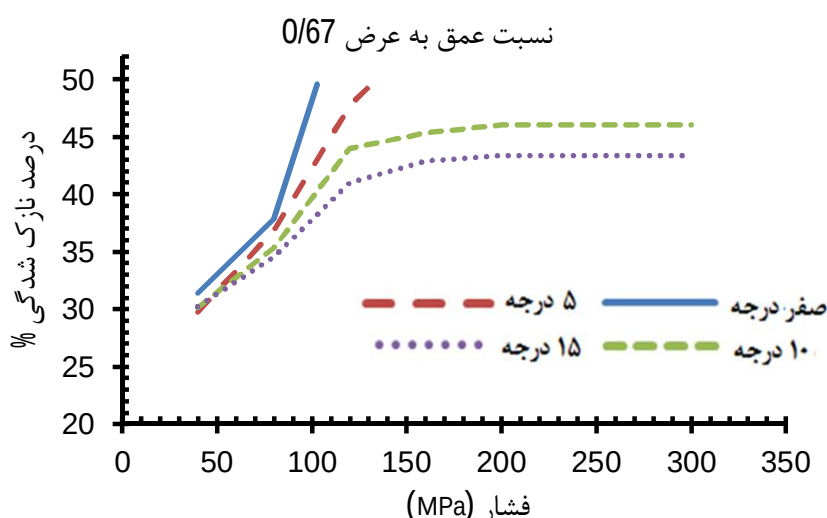
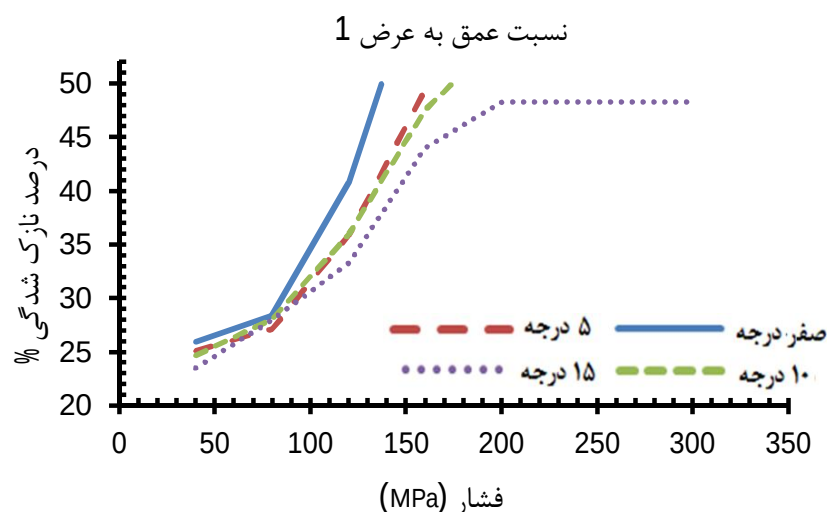
در رابطه با نسبت عمق به عرض 0/67 مشاهده می شود که جز ابعاد پین 0/1 میلی متر، سایر اندازه ها قابل قبول می باشند و از حد مجاز عبور نکرده اند، در رابطه با نسبت عمق به عرض 0/33 مشاهده می شود که در هر سه ابعاد پین 0/1، 0/2 و 0/3 میلی متر پارگی رخ نداده و با افزایش ابعاد پین رفتار نازک شدگی بهبود می یابد، در نتیجه درصد نازک شدگی نمونه هایی با ابعاد پین بیشتر از 0/2 میلی متر برای نسبت عمق به عرض کمتر از 0/67 و کلیه ابعاد پین برای نسبت عمق به عرض 0/33 دارای شرایط مطلوبی می باشند.

3-4- پروفیل مقطع شکل داده شده

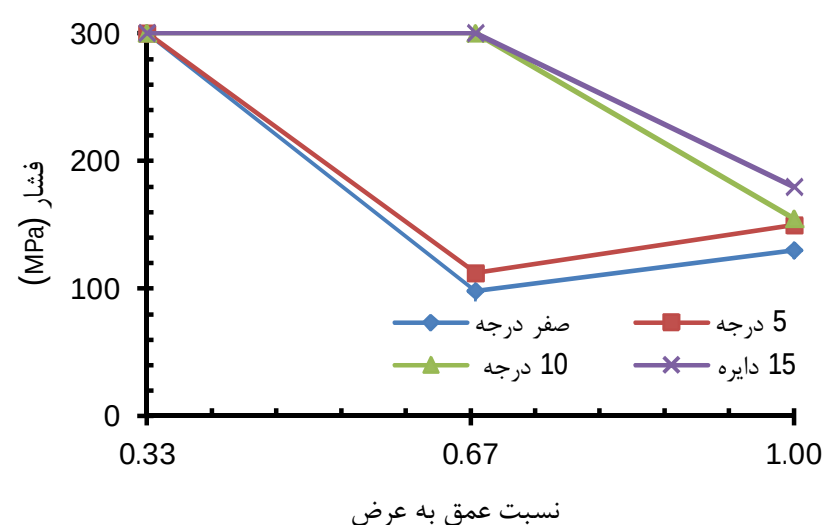
3-4-1- اثر زاویه دیواره بر پروفیل مقطع

در شکل 21 نتایج پروفیل مقطع عرضی نمونه های تجربی و نتایج شبیه سازی مربوط به نمونه های شکل داده شده در فشارهای 60 و 100 مگاپاسکال برای نمونه با زاویه دیواره 15 درجه و در فشارهای 40 و 80 مگاپاسکال برای نمونه با دیواره صفر درجه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی و تجربی تطابق خوبی دارند. بیشترین اختلاف پروفیل شکل داده شده بین نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی برای نمونه با زاویه دیواره

150 مگاپاسکال رخ می دهد ولی با افزایش ابعاد پین تا 0/3 میلی متر رفتار نازک شدگی بهبود می یابد ولی به دلیل عبور از حد مجاز نازک شدگی (46 درصد نازک شدگی) این ابعاد پین نیز به منظور شکل دهی نمونه ای سالم، قابل قبول نمی باشد.



شکل 18 مقایسه درصد نازک شدگی در فشارها، زاویه های دیواره و نسبت های عمق به عرض مختلف با پین 0/2 میلی متر



شکل 19 بررسی روند تغییرات بیشترین فشار اعمالی برحسب نسبت عمق به عرض در زوایای دیواره مختلف

فاصله از A تا B (میلیمتر)

عمق شکل یافته (میلیمتر)

● ● ● ● ● صفر درجه - فشار ۱۰۳ مگاپاسکال

- - - - - ۱۵درجه - فشار ۱۰۰ مگاپاسکال

— — — — — ۱۵ درجه - فشار ۱۲۰ مگاپاسکال

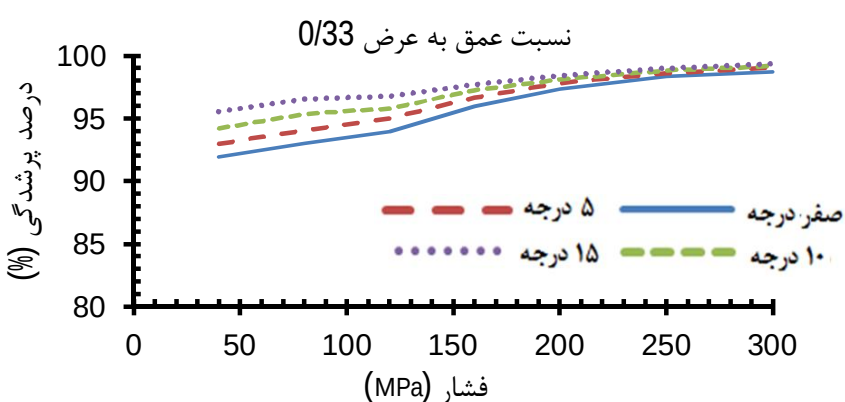
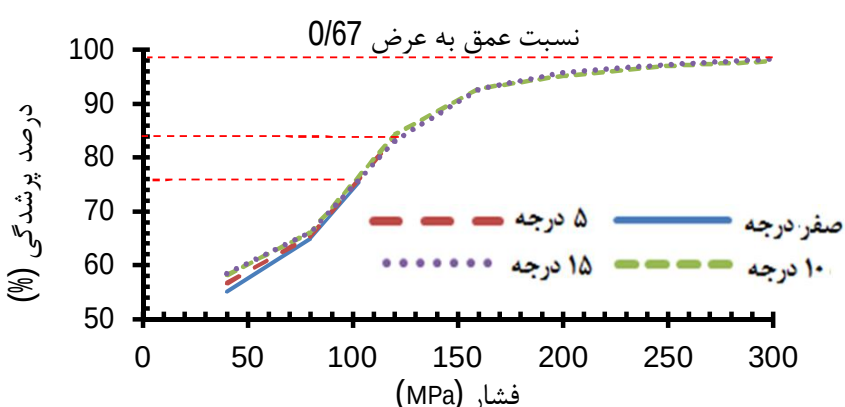
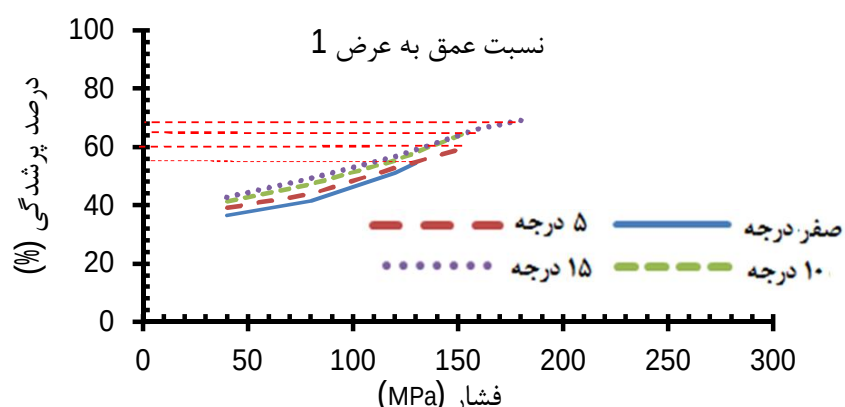


در پروفیل شکل داده شده دو نمونه مختلف مشاهده نمی‌شود. میزان این اختلاف 2/28 % می‌باشد که در مقایسه با حالت قبلی (11/25%) مقدار ناچیز و قابل قبولی می‌باشد. اهمیت یکنواختی پروفیل در بین پین‌های مختلف از این نظر است که در شرایط عدم وجود یکنواختی، امکان اختلاف ابعادی در پروفیل‌های شکل داده شده افزایش یافته و این امر به نوبه خود باعث اختلاف ابعادی در مسیر کانال‌های عبور جریان شده و در عملکرد این صفحات اثر منفی بر جای می‌گذارد. در نتیجه وجود زاویه دیواره اثر مثبتی بر روی یکنواختی پروفیل شکل داده شده در بین پین‌های مختلف دارد.

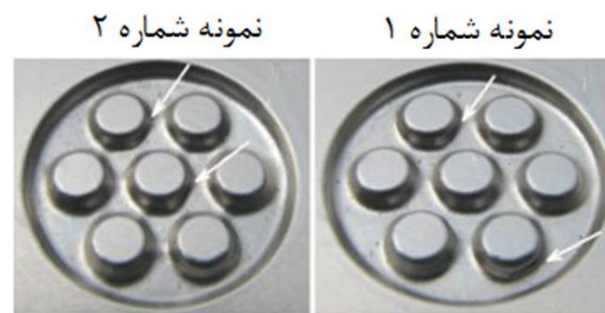
4-4- درصد پرشدگی

4-4-1- اثر زاویه دیواره بر درصد پرشدگی

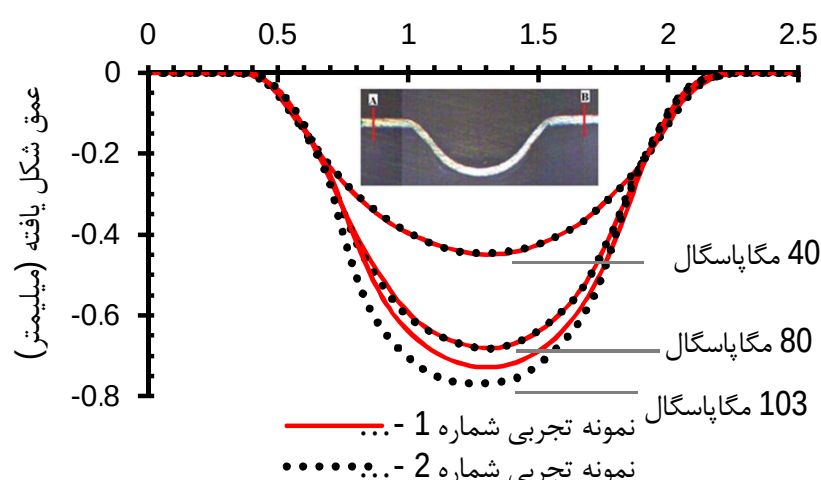
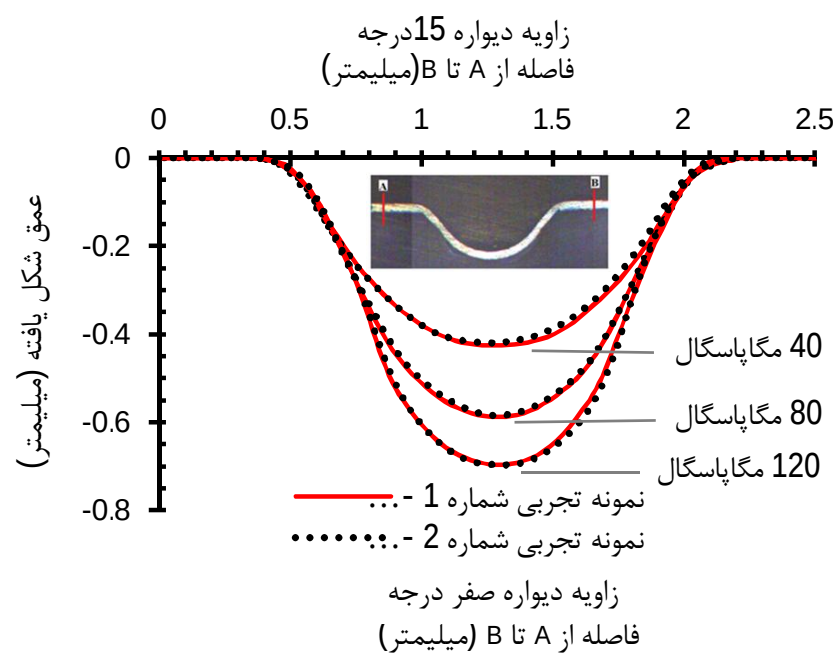
با تعریف درصد پرشدگی بیان شده در شکل 9، درصد پرشدگی معیاری از درصد نزدیکی پروفیل شکل داده شده به پروفیل قالب مورد نظر نیز می‌باشد. بنابراین هرچه این درصد بیشتر باشد به معنی آن است که پروفیل شکل داده شده به پروفیل مورد نظر نزدیک‌تر گشته، به عبارتی این نسبت می‌تواند معیاری از دقت ابعادی نیز باشد. در شکل 25 درصد پرشدگی مربوط به نسبت‌های عمق به عرض مختلف با زاویه دیواره مختلف و با ابعاد پخ 0/2 میلی‌متر بصورت مجزا نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان افزایش درصد پرشدگی تا لحظه ایست که ضخامت بحرانی‌ترین نقطه از نمونه به اندازه حدی ضخامت (60 میکرومتر) رسیده باشد، برای نمونه‌هایی که ضخامت آن‌ها به این حد مجاز نرسیده‌اند، فشار تا میزانی افزایش می‌یابد که روند تغییرات رفتار پرشدگی تقریباً ثابت گردد (تا فشار 300 مگاپاسگال).



شکل 25 مقایسه نتایج شبیه‌سازی درصد پرشدگی در فشارها، زاویه های دیواره و نسبت های عمق به عرض مختلف با پخ 0/2 میلی‌متر



شکل 23 آثار نازک‌شدگی شدید در نمونه های شکل داده شده با دیواره صفر درجه در فشار 103 مگاپاسگال



شکل 24 پر شدگی پروفیل در فشارهای مختلف برای قالب دایروی با نسبت عمق به عرض 0/67، ابعاد پخ 0/2 و زاویه دیواره صفر و 15 درجه.

4-3-2- بررسی یکنواختی پروفیل در بین پین های مختلف

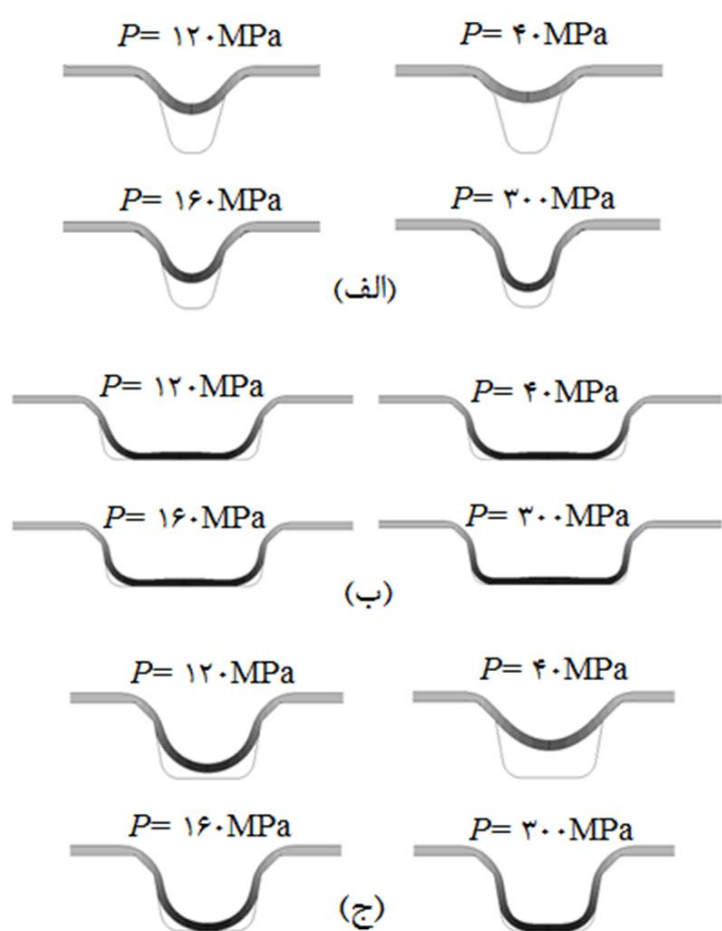
پس از بررسی پروفیل شکل داده شده مربوط به یک تک پین، به بحث امکان شکل دهی پروفیل‌های یکسان در پین‌های مختلف موجود در یک صفحه دوقطبی فلزی پرداخته می‌شود. شکل 23 نمایی از دو نمونه شکل داده شده با زاویه پین صفر درجه در شرایط یکسان می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود محل نازک‌شدگی شدید نمونه‌ها در دو شرایط یکسان با یکدیگر متفاوت می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر، دو نمونه با زاویه دیواره صفر و 15 درجه، در فشارهای مختلف شکل داده می‌شوند. شکل 24 مربوط به پروفیل شکل داده شده پین میانی شکل 23 در دو زاویه دیواره مختلف می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه با زاویه دیواره صفر درجه در پین میانی، به محض وقوع نازک‌شدگی شدید (در فشار 103 مگاپاسگال) اختلافی بین پروفیل شکل داده شده نمونه شماره 2 با پروفیل شکل داده شده نمونه شماره 1 (که در شکل 23 معرفی شده‌اند) ایجاد می‌گردد و میزان این اختلاف در حدود 11/25 % می‌باشد که مقدار قابل ملاحظه‌ای است. این درحالیست که در نموداری که مربوط به نمونه با زاویه دیواره 15 درجه می‌باشد، به دلیل عدم وجود نازک‌شدگی شدید، حتی با افزایش فشار، تغییری

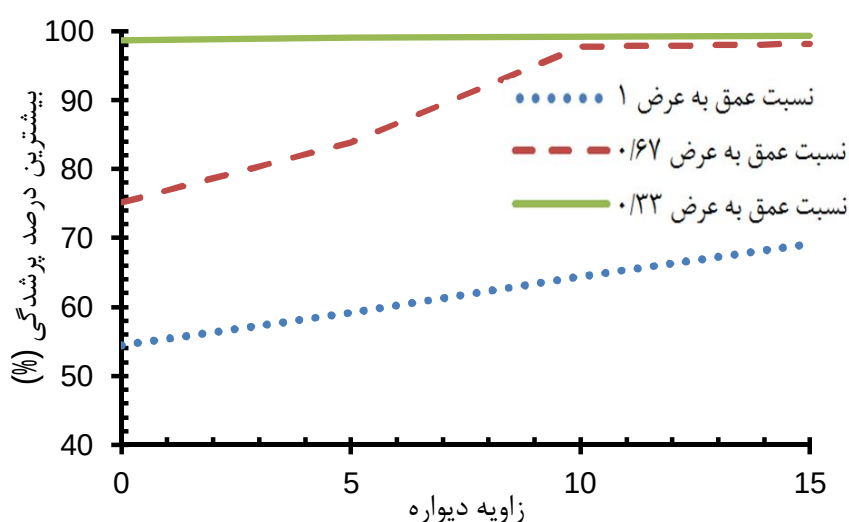
در نسبت عمق به عرض 1 با افزایش ابعاد پخ از 0/1 به 0/3 درصد پرشدگی افزایش یافته ولی همواره کمتر از 80 درصد بوده که قابل قبول نمی باشد. در نسبت عمق به عرض 0/67 رفتار متفاوتی مشاهده می شود. در این نسبت در ابعاد پخ 0/1 میلی متر بیشترین درصد پرشدگی 80 درصد بوده است. با افزایش ابعاد پخ از 0/1 به 0/2 تغییرات عمده ای در درصد پرشدگی مشاهده شده و این مقدار از 80 درصد به حدود 99 درصد افزایش می یابد، ولی با افزایش از 0/2 به 0/3 درصد پر شدگی تغییرات چندانی از خود نشان نمی دهد. در نسبت عمق به عرض 0/33 تغییرات ابعاد پخ در فشارهای بالا اثری بر روی درصد پرشدگی نداشته و هر سه ابعاد پخ به درصد پرشدگی بالایی (99 درصد) دست یافته اند؛ در حالی که در فشارهای کمتر از 160 مگاپاسگال با افزایش ابعاد پخ، درصد پرشدگی نیز افزایش می یابد.

4-5- تعیین مناسب ترین پارامترها

حال پس از بررسی تغییرات نسبت عمق به عرض، زاویه دیواره و ابعاد پخ، باید به منظور تعیین بهترین ابعاد هندسی برای شکل دهی صفحات دوقطبی با الگوی پینی این پارامترها بررسی گردند.



شکل 26 نمایی از نتایج عمق پرشدگی در فشارهای مختلف برای نمونه های با زاویه دیواره 10 درجه، ابعاد پخ 0/2 و نسبت عمق به عرض الف) 1، ب) 0/33 و ج) 0/67



شکل 27 مقایسه بیشترین درصد پرشدگی نمونه هایی با نسبت عمق به عرض 0/33، 0/67 و 1 در زاویه های دیواره صفر، 5، 10 و 15 درجه با پخ 0/2 میلی متر

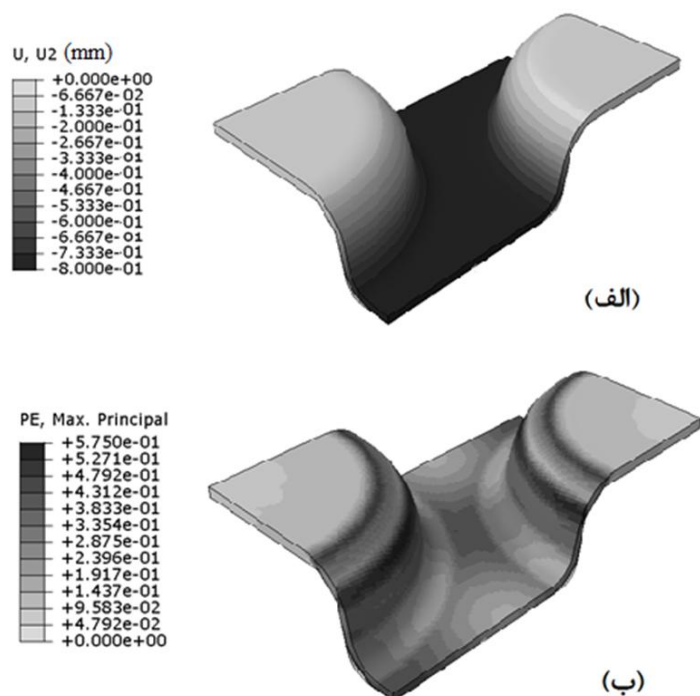
بطور کلی با کاهش نسبت عمق به عرض و افزایش زاویه دیواره رفتار پرشدگی مطلوب تر می شود. در نسبت عمق به عرض 1، با افزایش زاویه دیواره درصد پرشدگی افزایش می یابد؛ ولی در کلیه این حالت ها، درصد پرشدگی همواره کمتر از 70 درصد می باشد که مقدار مطلوبی نیست. در نسبت عمق به عرض 0/67 رفتاری متفاوت مشاهده می شود. در این نسبت با افزایش زاویه دیواره از صفر تا 10 درجه درصد پرشدگی از حدود 76 درصد به 99 درصد افزایش می یابد ولی با افزایش زاویه دیواره از 10 به 15 درجه تغییر ملموسی در رفتار پرشدگی مشاهده نمی شود. در رابطه با نسبت عمق به عرض 0/33، مانند نسبت عمق به عرض 1 در کلیه زوایا رفتار مشابهی مشاهده می شود با این تفاوت که در کلیه زوایا، درصد پرشدگی مطلوبی بدست آمده است.

در نسبت های عمق به عرض 1 و 0/33 روند تغییرات درصد پرشدگی تقریباً خطی بوده است. دلیل این رفتار در شکل 26 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در نسبت عمق به عرض 1 با افزایش سطح فشار اعمالی از 40 تا 300 مگاپاسگال حجم مواد شرکت کننده در تغییر شکل تغییر چندانی نمی یابد (به دلیل عدم تماس ورق شکل داده شده با کف قالب)، بنابراین با افزایش سطح فشار تغییرات درصد پرشدگی بصورت خطی افزایش می یابد. در نسبت عمق به عرض 0/33 رفتاری برخلاف حالت قبلی مشاهده می شود. در این نسبت از لحظه اعمال کمترین فشار (40 مگاپاسگال) ورق شکل داده شده با کف قالب تماس پیدا کرده و با افزایش فشار به دلیل کاهش حجم مواد شرکت کننده در تغییر شکل، روند درصد پرشدگی به کندی ادامه می یابد. بنابراین از کمترین تا بیشترین سطح فشار (40 مگاپاسگال تا 300 مگاپاسگال) روند تغییرات درصد پرشدگی با روند کندی بصورت خطی افزایش می یابد. در نسبت عمق به عرض 0/67 با افزایش سطح فشار، درصد پرشدگی رفتاری نمایی از خود نشان می دهد. دلیل آن در شکل 26 بوضوح مشاهده می شود. از فشار 40 مگاپاسگال تا حدود 160 مگاپاسگال با افزایش سطح فشار، تغییر چندانی در حجم ماده شرکت کننده در تغییر شکل مشاهده نمی شود. در فشار حدود 160 مگاپاسگال ورق شکل داده شده به کف قالب تماس پیدا می کند و از این فشار به بالاتر حجم مواد شرکت کننده در فرآیند تغییر شکل کاسته شده و تغییرات درصد پرشدگی با روند کندتری ادامه می یابد. در نهایت و پس از بررسی درصد پرشدگی مشاهده شد که در نسبت عمق به عرض 0/33 تغییرات زاویه دیواره اثری بر بیشترین درصد پرشدگی ندارد. همچنین در نسبت عمق به عرض 1 با وجود اینکه با افزایش زاویه دیواره بیشترین درصد پرشدگی افزایش می یابد ولی با میزان مطلوب فاصله داشته و قابل قبول نمی باشد. در نسبت عمق به عرض 0/67 نیز تنها زوایای 10 و 15 درجه درصد پر شدگی مطلوبی را بدست می آورند. شکل 27 نشان می دهد که کلیه زوایای دیواره نمونه با نسبت عمق به عرض 0/33 و زوایای 10 و 15 درجه نمونه با نسبت عمق به عرض 0/67 دارای درصد پرشدگی مطلوب می باشند.

همان طور که پیشتر در بخش اثر زاویه دیواره بر درصد نازک شدگی بیان شد، هدف دستیابی به کمترین زاویه ممکن به منظور شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی می باشد. در نتیجه از بین زوایای دیواره مختلف، زاویه دیواره 10 درجه بهترین انتخاب می باشد و در ادامه به منظور بررسی اثر ابعاد پخ، زاویه دیواره 10 درجه ثابت در نظر گرفته می شود.

4-4-2- اثر ابعاد پخ بر درصد پرشدگی

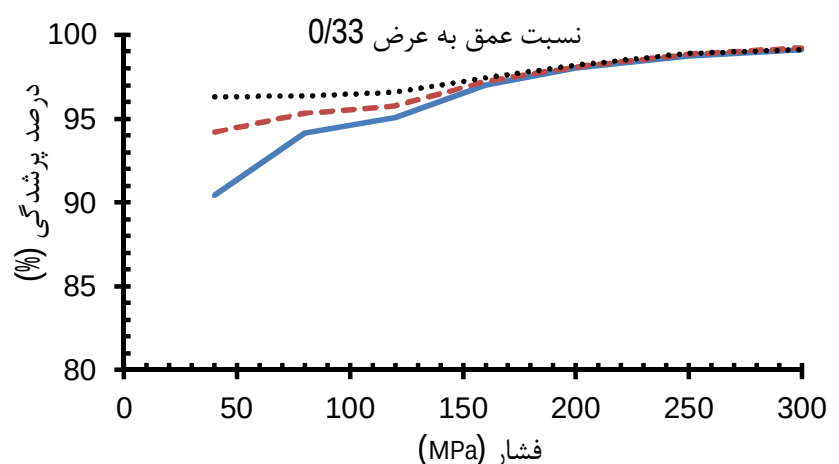
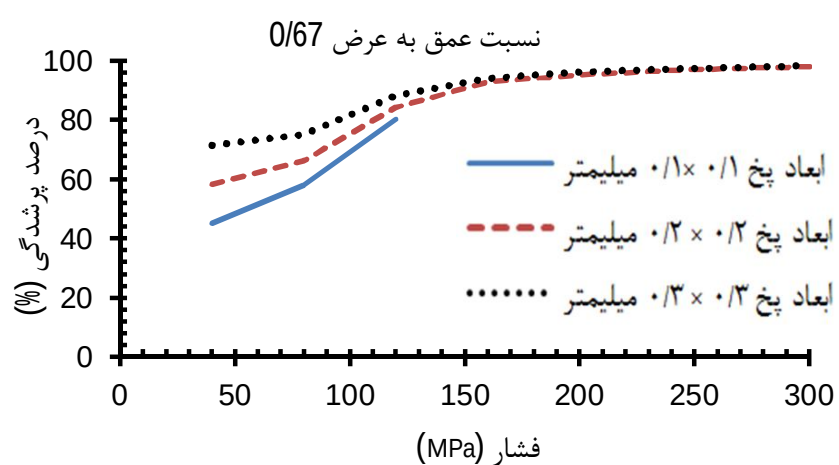
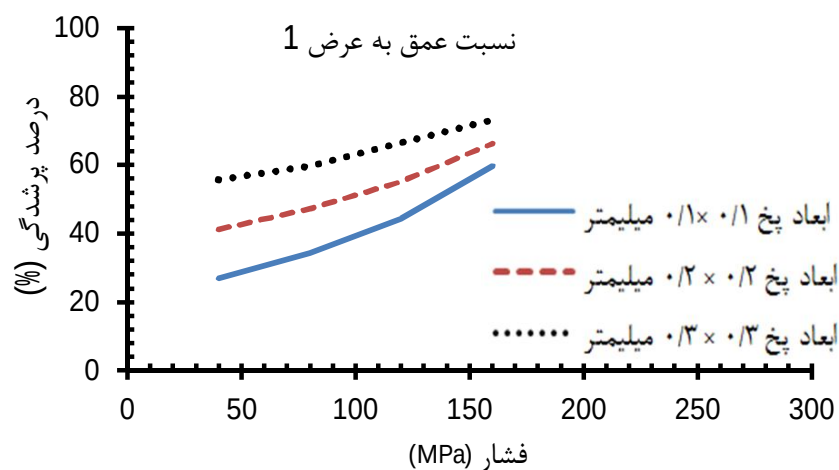
در شکل 28 درصد پرشدگی مربوط به نمونه هایی با ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض مختلف و با زاویه دیواره 10 درجه نشان داده شده است. بنابر شکل 28



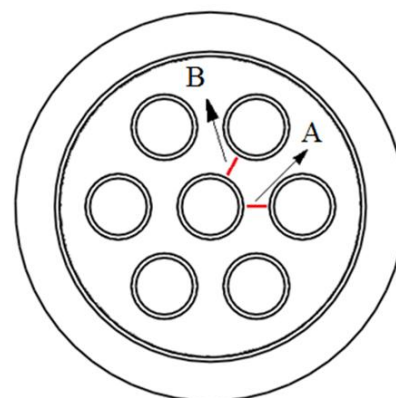
شکل 30 نتیجه شبیه سازی مربوط به نمونه صفحات دوقطبی فلزی با ابعاد منتخب، الف- کانتور جابجایی در راستای ارتفاع، ب- کانتور کرنش پلاستیک.

در شکل 29 نمایی از نواحی بحرانی موجود در الگوی پینی نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود، برای هندسه دایروی دو ناحیه A و B به عنوان گلوگاه شکل دهی محسوب می شوند. جدول 2 خلاصه ای از نتایج نشان داده شده در نمودارهای پیشین را گردآوری کرده است. نتایج جدول نشان می دهد که با تغییر زوایای دیواره و ابعاد پخ در نسبت عمق به عرض 1 نمی توان به نمونه ای سالم و بدون وجود پارگی و با درصد پرشدگی مناسب دست یافت. به منظور دستیابی به بیشترین درصد پرشدگی به همراه ضخامت مناسب در ناحیه بحرانی، می توان از زوایای دیواره 10 الی 15 درجه (حداقل 10 درجه) برای نسبت عمق به عرض 0/67 و از کلیه زوایای دیواره برای نسبت عمق به عرض 0/33 استفاده نمود. همچنین مشاهده می شود که با استفاده از ابعاد پخ کوچک تر (کمتر از 0/2 میلی متر) درصد نازک شدگی افزایش یافته (بحرانی شده)، و از طرف دیگر ابعاد پخ بزرگتر (بیشتر از 0/2 میلی متر) هیچ اثری بر روی درصد پرشدگی نخواهند داشت.

در بحث شکل دهی صفحات دوقطبی پینی، هرچه با فاصله بین پین های کمتر، زاویه دیواره پین های کمتر و ابعاد پخ کوچکتر به درصد پرشدگی مطلوب و رفتار نازک شدگی مناسب دست یافت، به هندسه مطلوب نزدیکتر است، چون با این وجود مقطع کانال های مسیر جریان به هندسه مستطیل شکل نزدیکتر می گردند و این هندسه شرایط مطلوبتری در بحث راندمان پیل سوختی ایجاد می کند. بنابراین به منظور شکل دهی الگوی پینی با هندسه دایروی با میزان پرشدگی مطلوب و ضخامت مناسب در نقاط بحرانی، باید تا از حداکثر نسبت عمق به عرض 0/67، حداقل زاویه دیواره 10 درجه و حداقل ابعاد پخ 0/2 میلی متر استفاده گردد. در شکل 30 نتیجه شبیه سازی نمونه ای از صفحات دوقطبی شکل داده با ابعاد بیان شده در سطح فشار 300 مگاپاسگال نشان داده شده است. در شکل (30-الف) مشاهده می شود که سطح آندی- کاتدی و کانال عبور جریان بطور کامل شکل گرفته اند. همچنین در شکل (30-ب) نیز مشاهده می شود که نازک ترین نقطه نمونه شکل داده شده (ناحیه ای با بیشترین کرنش پلاستیک) دارای کرنش پلاستیک 0/575 (ضخامت 0/595 میلی متر برابر با درصد نازک شدگی 45/9 درصد) می باشد که ضخامتی قابل قبول است. در شکل 31 نمایی از نمونه ای که به کمک قالبی با همین ابعاد (نسبت عمق به عرض 0/67، زاویه دیواره 10 درجه و پخ 0/2 میلی متر) در فشار 120 مگاپاسگال بدون هیچ گونه آثاری از پارگی شکل داده شده است مشاهده می شود که به منظور شکل دهی کامل به یک مرحله استمپینگ نهایی نیاز دارد.



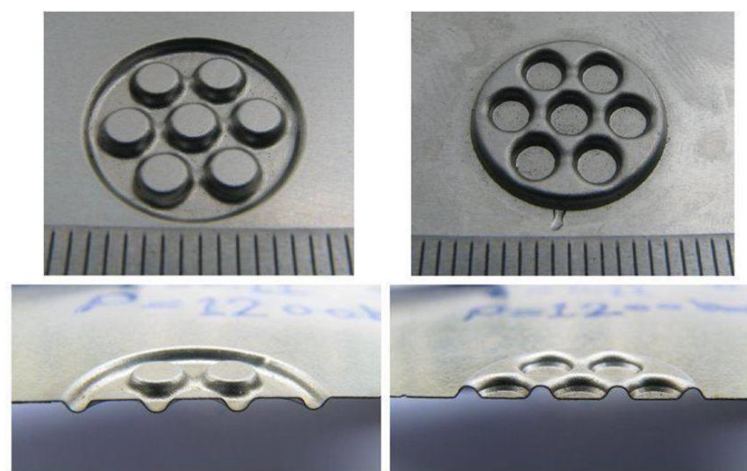
شکل 28 مقایسه نتایج شبیه سازی درصد پرشدگی در فشارها، ابعاد پخ و نسبت های عمق به عرض مختلف با زاویه دیواره 10 درجه.



شکل 29 نواحی بحرانی در شکل دهی نمونه با الگوی پینی با هندسه دایروی

جدول 2 خلاصه ای از نتایج پارامترهای مختلف در نمودارهای پیشین

نسبت عمق به عرض						
		درصد پرشدگی			درصد نازک شدگی	
		1	0/67	0/33	0/67	0/33
ابعاد پخ	0/1	x	x	✓	x	x
	0/2	x	✓	✓	x	✓
	0/3	x	✓	✓	x	✓
	0	x	x	✓	x	x
زاویه دیواره	5	x	x	✓	x	x
	10	x	✓	✓	x	✓
	15	x	✓	✓	x	✓
	1	x	x	✓	x	x



شکل 31 نمونه‌ای سالم شکل داده شده به کمک روش هیدروفرمینگ.

دلیل استفاده از فرآیند استمپینگ به عنوان یک فرآیند تکمیلی و صرفاً جهت کامل کردن شکل دهی در پژوهش پیشینی که توسط نویسندگان این مقاله صورت گرفته بیان شده است [5].

5- نتیجه گیری

پس از بررسی گزارش‌های مختلف درمورد شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی، مشاهده شد که کلیه این پژوهش‌ها در رابطه با شکل دهی الگوی شیاری بوده و تاکنون گزارشی مبنی بر شکل دهی الگوی پینی یافت نشده است. در این مقاله به منظور شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی از روش هیدروفرمینگ سنبه سیال استفاده شد. ورق مورد نظر در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با ضخامت 0/11 میلی‌متر می‌باشد. در ابتدا به منظور بررسی توانایی شکل دهی الگوی پینی به کمک روش هیدروفرمینگ، در چند سطح فشار، نمونه‌های تجربی شکل داده شد. سپس با ابعادی مشابه با نمونه تجربی و اعمال خواص مکانیکی ورق فلزی مورد نظر به نرم افزار اجزا محدود آباکوس، فرآیند شکل دهی چنین صفحاتی شبیه سازی شد. مشاهده شد که نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارد. در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر روی توزیع ضخامت، درصد نازک‌شدگی، پروفیل مقطع شکل داده شده و درصد پرشدگی بررسی گردید که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

- در رابطه با بحث توزیع ضخامت مشاهده شد که وجود زاویه در دیواره پین‌ها باعث یکنواختی بیشتر توزیع ضخامت (اختلاف کمتر ضخامت نازک-ترین و ضخیم‌ترین ناحیه) شده است، تا حدی که ضخامت نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در فشار شکل دهی 120 مگاپاسگال یکنواخت‌تر از نمونه با دیواره صفر درجه در فشار کمتر (103 مگاپاسگال) می‌باشد.

- در رابطه با درصد نازک‌شدگی مشاهده شد که بطور کلی با افزایش زاویه دیواره، افزایش ابعاد پخ و کاهش نسبت عمق به عرض میزان درصد نازک‌شدگی بهبود می‌یابد. در بحث شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی بدلیل محدودیت‌های موجود در شکل دهی چنین صفحاتی، تولید نمونه ای سالم به همراه درصد نازک‌شدگی مناسب با نسبت عمق به عرض بیشتر، زاویه دیواره کمتر و ابعاد پخ کمتر مطلوب‌تر است. پس از بررسی‌های صورت گرفته مشخص گردید که زاویه دیواره 10 درجه کمترین زاویه دیواره، ابعاد پخ 0/2 میلی‌متر کمترین ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض 0/67 بیشترین نسبت عمق به عرض به منظور دستیابی به نمونه مطلوب می‌باشد.

- در رابطه با پروفیل مقطع شکل داده شده مشاهده شد با وجود اینکه عمق پر شده نمونه با دیواره صفر درجه بیشتر از نمونه با دیواره 15 درجه می‌باشد ولی درصد پرشدگی یا به عبارتی نزدیکی پروفیل شکل داده شده به پروفیل قالب (پروفیل مورد نظر) در نمونه با دیواره 15 درجه بیشتر می‌باشد. در ادامه یکنواختی پروفیل در بین پین‌های مختلف نیز بررسی شد و مشاهده شد که وجود زاویه در دیواره اثر بسزایی در بحث یکنواختی پروفیل در بین

پین‌های مختلف از خود نشان می‌دهد.

- در رابطه با درصد پرشدگی بررسی‌های صورت گرفت و نتایجی مشابه با درصد نازک‌شدگی به دست آمد؛ بدین صورت که بطور کلی با افزایش زاویه دیواره، افزایش ابعاد پخ و کاهش نسبت عمق به عرض درصد پرشدگی بهبود می‌یابد و همچنین مشخص شد که زاویه دیواره 10 درجه کمترین زاویه دیواره، ابعاد پخ 0/2 میلی‌متر کمترین ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض 0/67 بیشترین نسبت عمق به عرض به منظور دستیابی به نمونه مطلوب می‌باشد. در آخر می‌بایست خاطر نشان کرد که بیشترین نسبت عمق به عرضی که محققان توانستند تا به آن دست یابند، نسبت عمق به عرض 0/5 و همچنین کمترین نسبت شعاع گوشه به عمق 0/267 می‌باشد. این در صورتیست که در این پژوهش با وجود پیچیدگی بیشتر شکل دهی الگوی پینی و وجود گوشه‌های تیز در این الگو، صفحات دوقطبی فلزی سالمی به درصد پرشدگی کامل با نسبت عمق به عرض 0/67 و با نسبت اندازه پخ به عمق 0/25 شکل داده شد که در مقایسه با پژوهش‌های انجام شده، در این پژوهش قابلیت شکل دهی چنین صفحاتی در ابعاد و شرایط بحرانی‌تر ارایه شده است که به نوبه خود گامی موثر در راستای استفاده از صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده در پیل‌های سوختی (PEM) می‌باشد.

6- مراجع

- [1] S. Mahabunphachai, "A hybrid hydroforming and mechanical bonding process for fuel cell bipolar plates", A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) in The University of Michigan, 2008
- [2] M. Koc, S. Mahabunphachai; *J. Power Sources*, 172, pp. 725–733, 2007.
- [3] N. Guo, M. C. Leu, M. Wu; "Bio-inspired design of bipolar plate flow fields for polymer electrolyte membrane fuel cells"; Missouri University of Science and Technology; 2011
- [4] J. Lobato, P. Canizares, M-A. Rodrigo, F-J. Pinar, E. Mena, D. Ubeda; "Three-dimensional model of a 50 cm² high temperature PEM fuel cell. Study of the flow channel geometry influence"; *Int. J. Hydrogen Energy* (2010) 35, 5510–5520.
- [5] M. Belali-Owsia, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. H. Gorji; "A New Process of Forming Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cell with Pin-type Pattern"; *Int J Adv Manuf Technol*, DOI 10.1007/s00170-014-6563-3, 2014.
- [6] M. Belali-Owsia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji, "Forming metallic micro-feature bipolar plates for fuel cell using combined hydroforming and stamping processes"; *Iranica Journal of Energy & Environment* 4 (2), pp. 87-94, 2013
- [7] M. Belali-Owsia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi-Jooybari, A. H. Gorji; "Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die"; *Journal of Modares Mechanical Engineering*, 1393-Day, vol 14 (10), pp 150-158.
- [8] Borit, Accessed 2 Feb. 2015; <http://www.ocas.be/borit>
- [9] MGM-Carbon Industrial Company, Accessed 2 Feb. 2015; <http://mgmcarbon.en.ec21.com/Products--3059727.html>
- [10] E. Middelmann, W. Kout, B. Vogelaar, J. Lenssen, E. De Waal, "bipolar plates for fuel cells"; *J. Power Sources*, v. 118 (1–2) (2003) pp. 44–46.
- [11] A. M'uller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, "Injection moulding of graphite composite bipolar plates"; *J. Power Sources*, 154 (2006) 467–471.
- [12] J-C. Hung, T-C. Yang, K-C. Li; "Studies on the fabrication of metallic bipolar plates-Using micro electrical discharge machining milling"; *J. Power Sources*, 196 (2011) 2070–2074
- [13] E. DUR, "Investigations on the corrosion resistance of metallic bipolar plates (BPP) in proton exchange membrane fuel cells-(PEMFC) – understanding the effects of material, coating and manufacturing"; A Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy at Virginia Commonwealth University, December 2011
- [14] M. F. Peker, "investigations on the micro-scale surface interactions at the tool and workpiece interface in micro- manufacturing of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells"; A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy at Virginia Commonwealth University, May 2012.
- [15] 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.7/031009-1, JUNE 2010.