

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

موسی بلالی اوصیاء^۱، سید جمال حسینی پور^{۲*}، محمد بخشی^۳، عبدالحمید گرجی^۴

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

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

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

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

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

چکیده

در سال های اخیر به دلیل مزایای عده صفحات دوقطبی فلزی استفاده از این صفحات در پیلهای سوتی مورد استقبال قرار گرفته است. پژوهش های گوناگونی پیرامون روش های مختلف شکل دهی این صفحات صورت گرفته است. عده 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 هیدروفرمینگ بطور تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه شامل اثر زاویه دیواره قالب، اندازه پیچ لبه پین، نسبت عمق به عرض پین و فشار شکل دهی بر روی توزیع ضخامت و درصد پرشده گروفیل 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 گروفیل قطعه شکل یافته شده است. همچنین محدوده مناسب برای هر یک از پارامترهای هندسی قالب تعیین گردید.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 بهمن 1393

پذیرش: 15 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 12 خرداد 1394

کلید واژگان:

صفحات دوقطبی فلزی

هیدروفرمینگ

زاویه دیواره

فشار شکل دهی

ابعاد پین

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

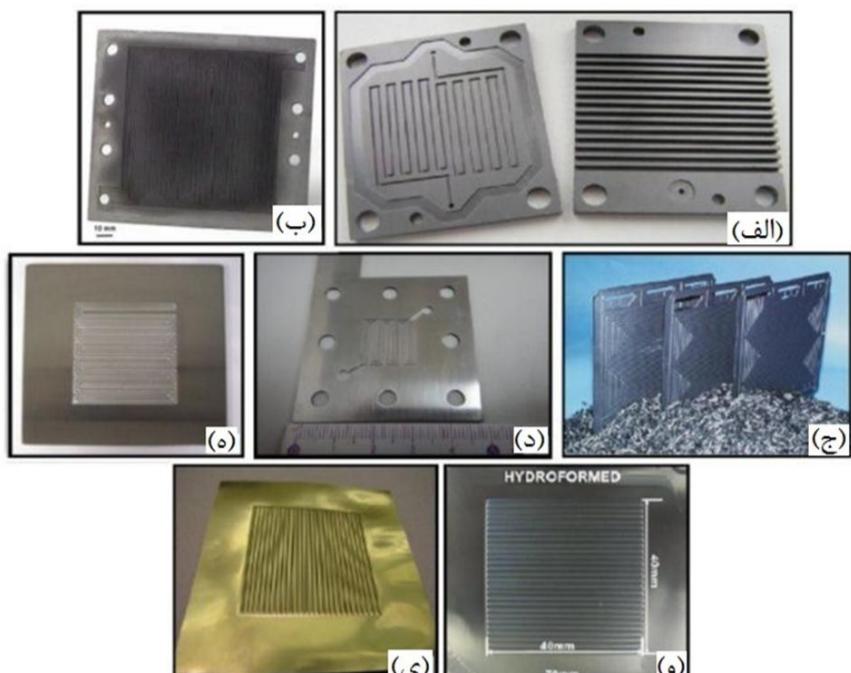
پیل سوتی را این صفحات تشکیل می دهند [1]. این صفحات از روش ها و جنس های مختلفی ساخته می شوند که در شکل 1 نشان داده شده است. از میان روش های مختلف، روش شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی به دلیل مزایایی همچون هزینه کم، خواص مکانیکی و الکتریکی عالی، خواص حرارتی

با افزایش کاربرد پیلهای سوتی 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 پیلهای سوتی بهینه گردد. یک مجموعه پیل سوتی از اجزای مختلفی ساخته شده است که مهمترین آن صفحات دوقطبی می باشند، زیرا که

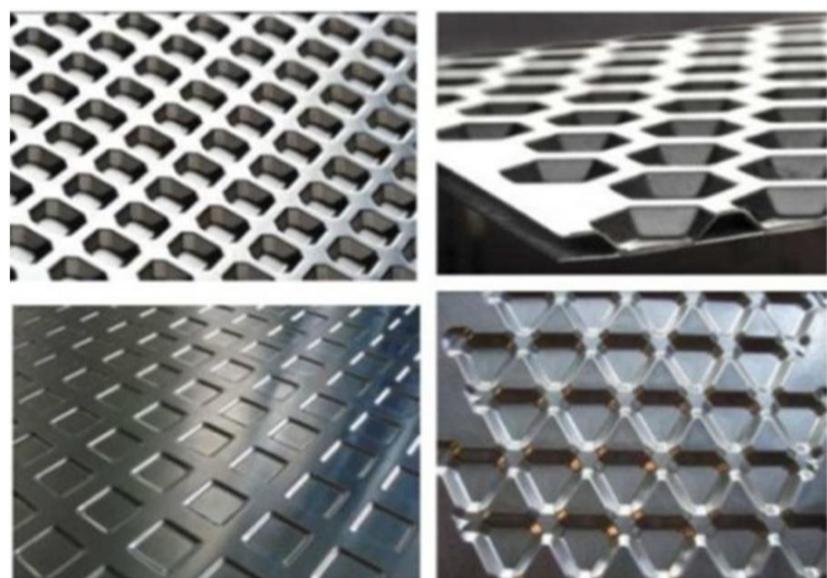
Please cite this article using:

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 بوریت [8]

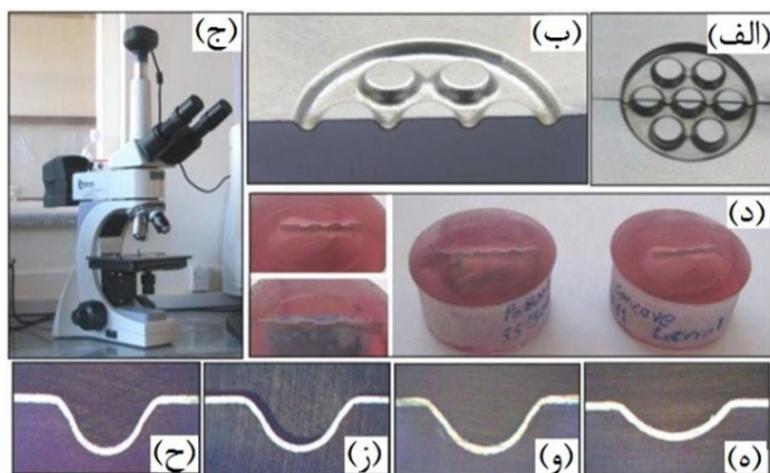
به این منظور ابتدا دو قالب با ابعاد هندسی متفاوت ساخته شده و به کمک آن در فشارهای مختلف چند نمونه شکل داده شدند. در ادامه نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج حاصل از تست های تجربی تایید شد. پس از تایید نتایج شبیه سازی، اثر پارامترهایی همچون زاویه دیواره و ابعاد پخ به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفت.

2- آزمایشات تجربی

الگوی تکرار شونده نمونه هی 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 (j)، 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 $0/25 \times 0/25$ میلی متر (Ch) می باشند. مجموعه (قالب) ساخته شده در شکل 4 نشان داده شده است. این قالب بصورت دو تکه با اینسترنی 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 موثر تر 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. آنها 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 آنها می توان به تحقیقات بلای اوصیاء و همکاران [5] اشاره کرد. آنها 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 بلای اوصیاء و همکاران [7] به بررسی اثر هندسه پین ها و فاصله بین آنها بر میزان پرشدگی و نازک شدگی نمونه های شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ در قالب محدب پرداختند. نتایج بررسی آنها 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 بوریت توانسته تا صفحاتی با هندسه نظیر صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی تولید کند ولی ابعاد آنها در مقایسه با ابعاد ریز موجود در صفحات دوقطبی مورد نظر بزرگ تر می باشند [8]. در شکل 2 تصویری از محصولات شرکت بوریت مشاهده می شود. با توجه به پیچیدگی بیشتر شکل دهی این الگو نسبت به الگوهای کانالی شکل (مارپیچ) و کارآیی 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 بلای 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

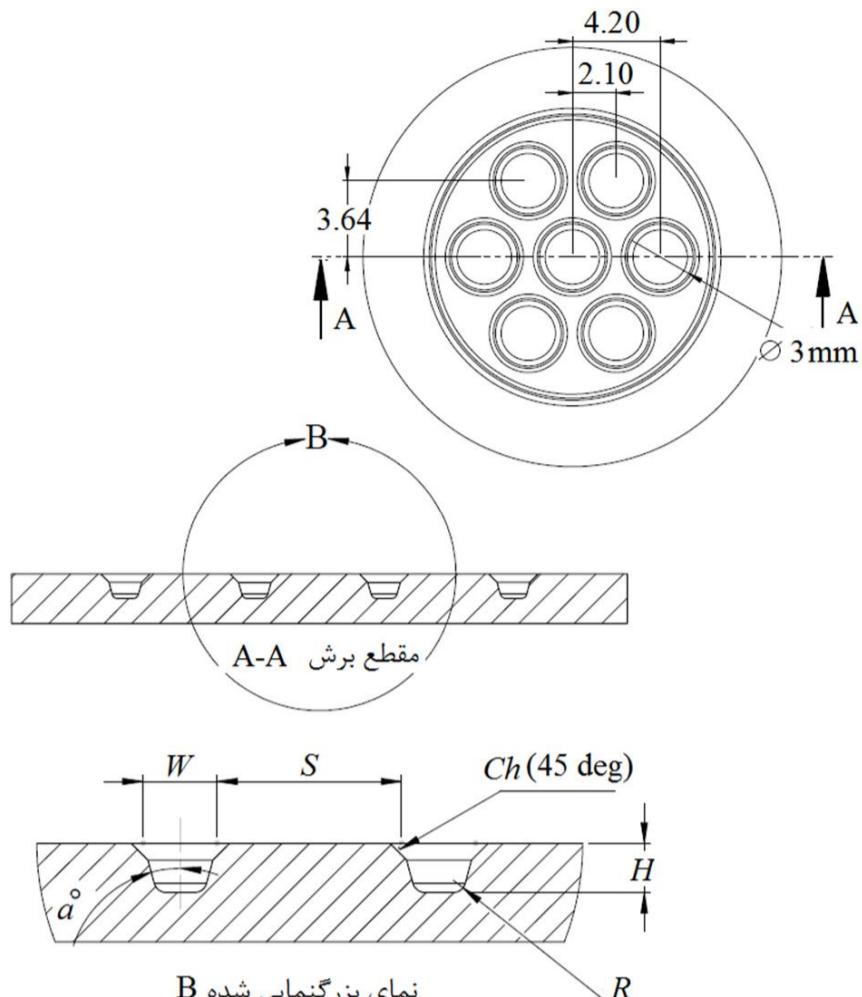
196	مدول الاستیک E (گیگا پاسکال)
0/3	ضریب پواسون ν
255	تنش تسليیم σ_y (مگا پاسکال)
1505	ضریب استحکام K
0/65	نمای کرنش سختی n
0/06	کرنش اولیه ϵ_0

$$\sigma = K(\epsilon + \epsilon_0)^n$$

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

3- شبیه سازی

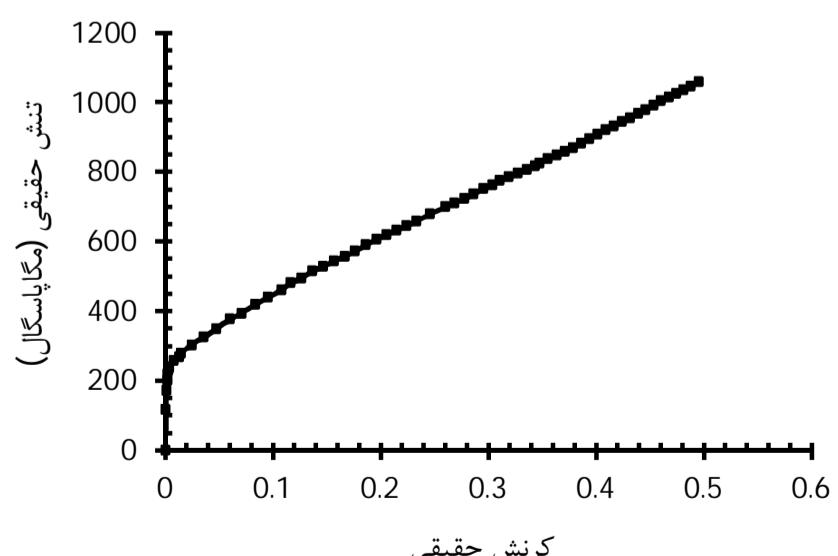
به منظور شبیه سازی از نرم افزار آباکوس 6.10 استفاده شده است. برای معرفی خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن 304 از نتایج حاصل از تست تک محوری انجام شده (جدول 1) استفاده گردید. نوع تحلیل از نوع دینامیک- ضربی¹ می باشد. به منظور دستیابی به دقت بالا در نتایج شبیه سازی، ورق به صورت سه بعدی توپر شکل پذیر² و همچنین قالبها بصورت سه بعدی صلب مجرای 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. ضربی 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 صخامت ورق از 5 المان استفاده شده است که در شکل 7-ب نشان داده شده است) و از نوع C3D8R، در نواحی پیخ 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 دومینیت⁵ در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی گستردگی تر در بحث شبیه سازی اثر پارامترهایی چون زاویه دیواره (صفرا - 5 - 10 - 15 درجه)، نسبت عمق به عرض (0/33 - 0/67 - 1)، ابعاد پیخ (0/1 - 0/2 - 0/3 - 0/4 میلی متر) و سطوح فشار مختلف (40 - 60 - 80 - 100 - 120 - 160 - 200 - 250 - 300 مگاپاسکال) بر روی درصد پرشدگی و نازک شدن 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)



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

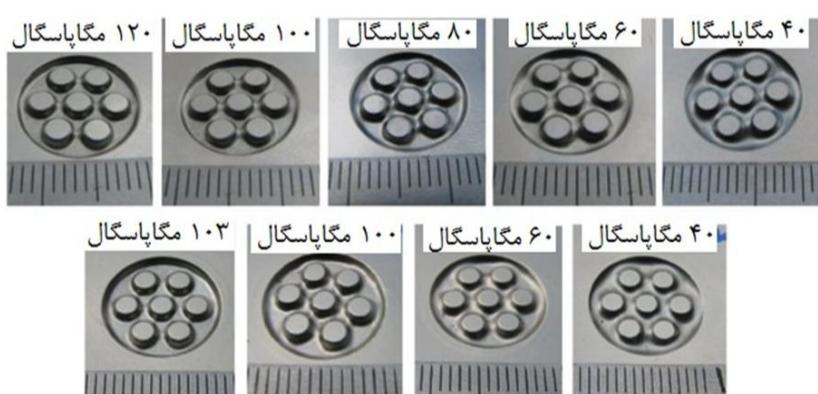
1-4- توزیع ضخامت

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

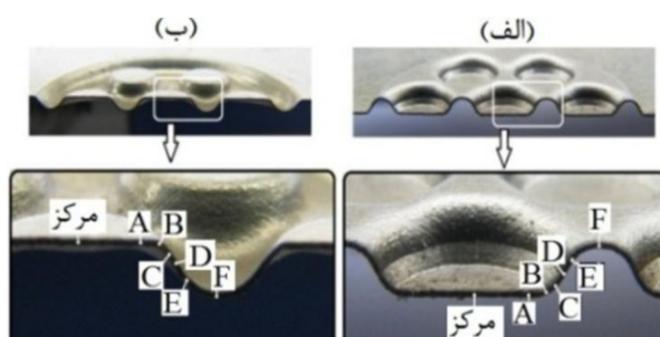
به منظور بررسی روند تغییرات توزیع ضخامت به کمک قالب های ساخته شده با پین هایی با زاویه دیواره صفر و 15 درجه (که در شکل 4 نشان داده شده است)، نمونه هایی در سطوح فشار 40- 60- 80- 100 و 120 مگاپاسکال شکل داده شدند که در شکل 10 نشان داده شده است. به منظور نام گذاری مقطع مورد بررسی، در شکل 11 نمایی از نمونه بریده شده آورده شده است که از مرکز پین تا پایین ترین نقطه شکل داده شده نام گذاری شده است.

شکل 12 نتایج توزیع ضخامت شبیه سازی و تجربی مربوط به نمونه هایی با زاویه دیواره صفر و 15 درجه و نسبت عمق به عرض 0/67 را مورد مقایسه قرار داده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود نتایج حاصل از شبیه سازی در فشارهای 60 و 103 مگاپاسکال برای نمونه با دیواره 15 درجه صفر درجه و در فشارهای 40 و 80 مگاپاسکال برای نمونه با دیواره 15 درجه با نتایج تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد. نتایج شبیه سازی بطور دقیق تغییرات محل نازک ترین ضخامت را نشان می دهد. نتایج حاصل از شبیه سازی در سایر فشارها نیز رفتاری مشابه با نمونه های تجربی از خود نشان می دهند. بیشترین اختلاف در بحث توزیع ضخامت بین نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی برای نمونه با زاویه دیواره صفر درجه 13/2% (نمونه در فشار 60 مگاپاسکال) و برای نمونه با دیواره زاویه 15 درجه 52/1% (نمونه در فشار 120 مگاپاسکال) می باشد.

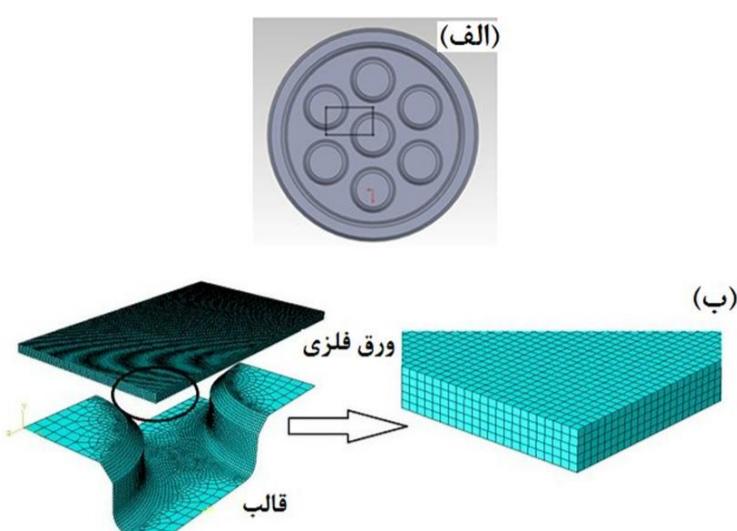
در رابطه با تغییرات محل نازک ترین نقطه قابل ذکر است که با افزایش فشار، نازک ترین ناحیه از نقطه B به نقطه D تغییر می یابد. همان طور که در شکل 12 مشاهده می شود در سطوح فشار کمتر از 80 مگاپاسکال، تمرکز کرنش در گوشه بالایی پخ یا همان نقطه B بوده؛ بنابراین نقطه B نازک ترین نقطه نمونه می باشد. با افزایش فشار تا 80 مگاپاسکال ورق بیشتر شکل قالب را بخود گرفته و در نقطه D به قالب چسبیده و خم می شود. بنابراین ضخامت نقطه D کاهش یافته تا در فشار 80 مگاپاسکال ضخامت دو نقطه B و D با یکدیگر برابر می شوند.



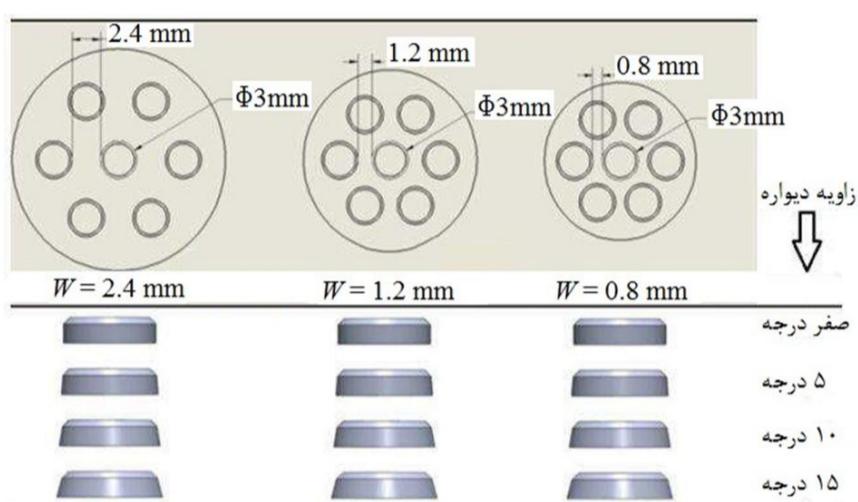
شکل 10 نمونه های شکل داده شده؛ ردیف بالا زاویه دیواره 15 درجه - ردیف پایین: زاویه دیواره صفر درجه



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 شبیه سازی



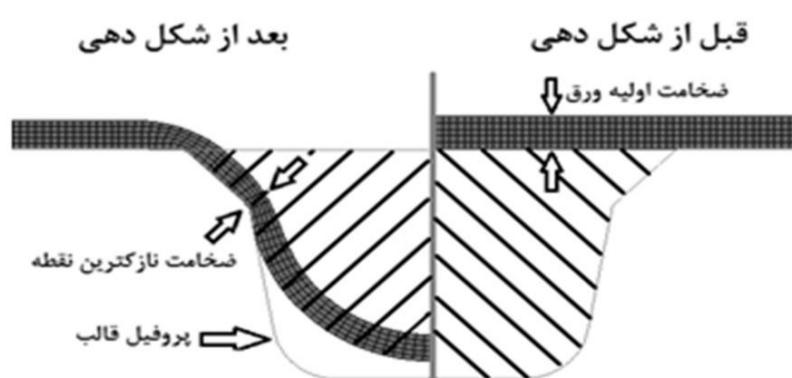
شکل 8 پارامترهای مورد بررسی در شبیه سازی (نسبت عمق به عرض و زاویه دیواره)

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

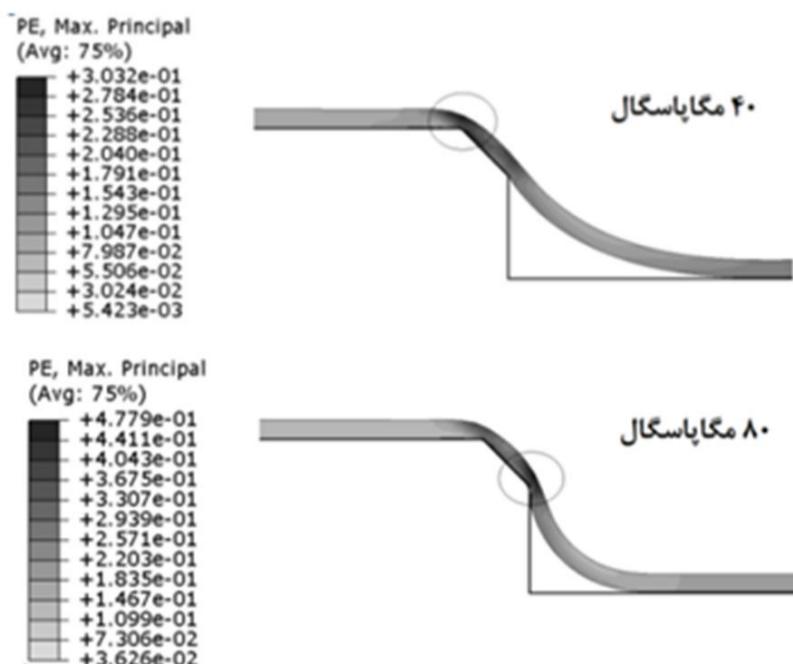
$$\frac{\text{نازک ترین ضخامت} - \text{ضخامت اولیه}}{\text{ضخامت اولیه}} \times 100 = \text{درصد نازک شدگی} \quad (1)$$

که منظور از نازک ترین ضخامت همان ضخامت بحرانی ترین نقطه از صفحه شکل داده شده می باشد که در شکل 9 مشاهده می شود. به دلیل هندسه سه بعدی الگوی پینی (برخلاف هندسه دوبعدی الگوی شیاری) تعیین درصد پر شدگی دشوارتر می شود. بصورت تجربی مشاهده شده است که در الگوهای پینی، بحرانی ترین ناحیه از قطعه به منظور پر شدگی، مربوط به ناحیه ای می باشد که کمترین فاصله بین پین ها وجود دارد. بنابراین در این پژوهش به منظور تعیین درصد پر شدگی، نواحی بحرانی اشاره شده بررسی گردیده است. معیار درصد پر شدگی 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 می باشد که در شکل 9 نشان داده شده است.

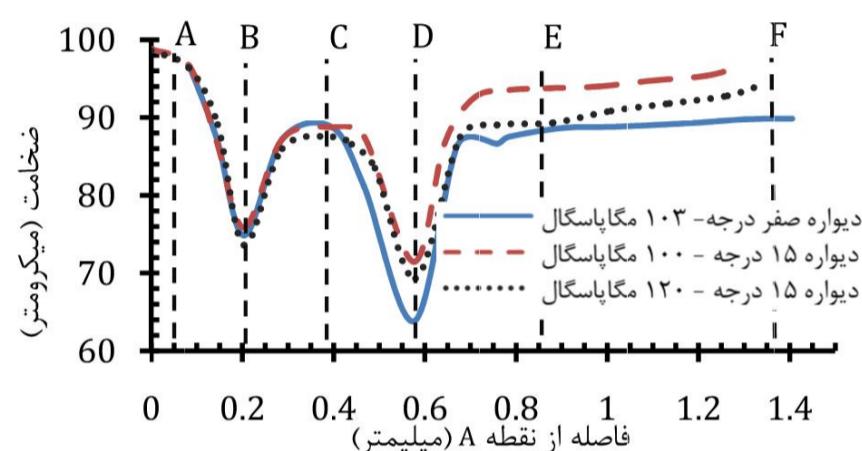
$$\frac{\text{مساحت جاروب شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \times 100 = \text{درصد پر شدگی} \quad (2)$$



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



شکل 13 نتایج شبیه سازی مربوط به کرنش پلاستیک در ناحیه پین 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

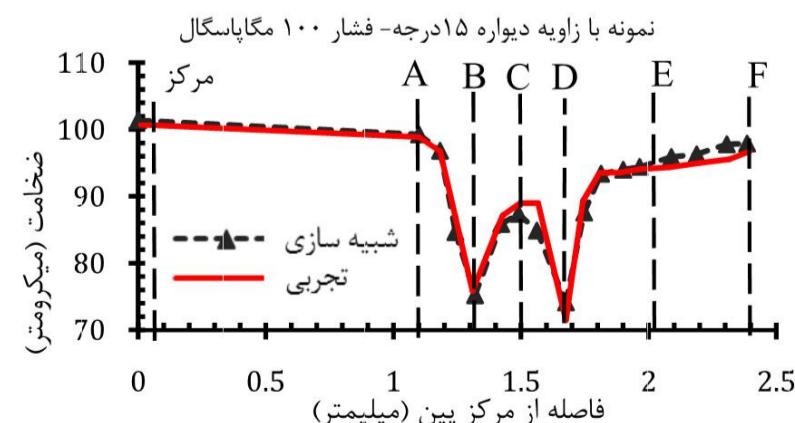
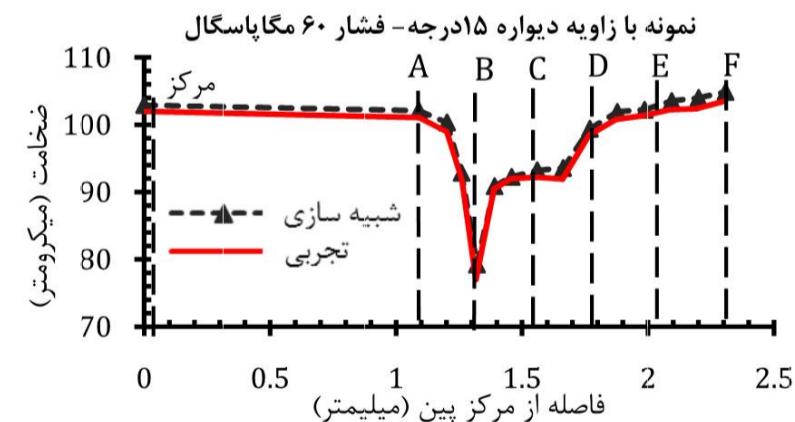
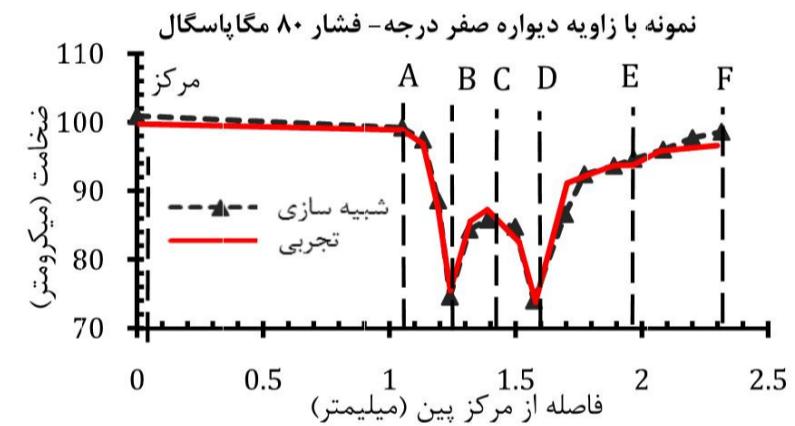
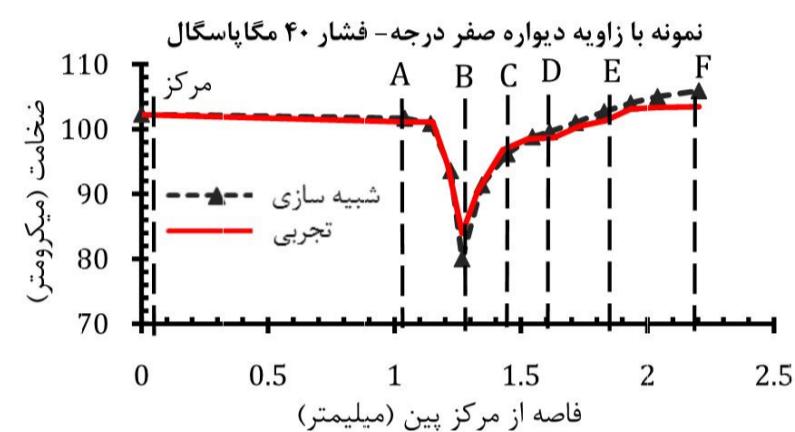
دلیل این رفتار، یکسان بودن ابعاد هندسی سطح پین و پین بوده که به تبع آن رفتار تماسی بین نمونه و پین قالب برای این دو حالت مشابه می‌باشد. اما به دلیل تفاوت در زاویه دیواره پین‌ها، رفتار تماس با دیواره پین برای دو حالت مختلف متفاوت است. این تفاوت خود را در نقاط D تا F بوضوح نشان می‌دهد. به دلیل عدم تماس 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 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 بسیاری در توزیع یکنواخت‌تر ضخامت در نمونه‌های شکل داده شده از خود نشان می‌دهد.

2-4- درصد نازک شدن

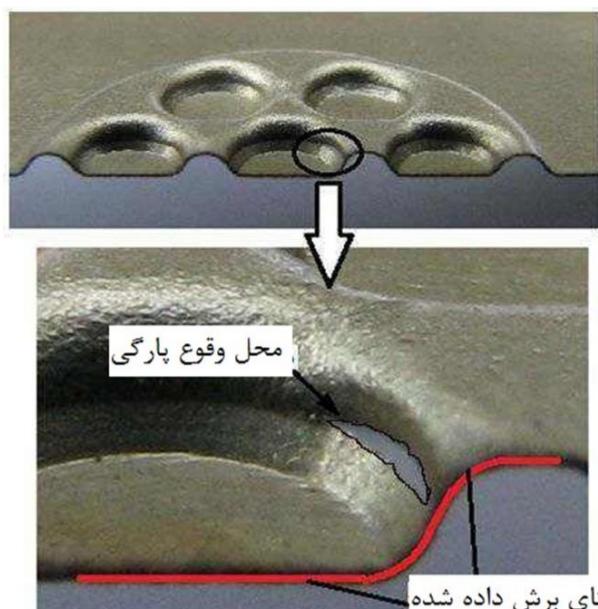
2-4-1- اثر زاویه دیواره بر درصد نازک شدن

در نمودار شکل 15، بیشترین درصد نازک شدن در مقطع عرضی برش داده شده از نمونه شکل داده شده بر حسب فشار شکل دهنده 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 شدن 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 پین (ناحیه بین دو نقطه B و D)، با افزایش فشار، نازک شدن در ناحیه B افزایش پیدا نکرده و تمرکز نازک شدن در نقطه D می‌باشد. در نتیجه، با افزایش فشار از 80 مگاپاسگال، محل نازک‌ترین نقطه از نقطه B به D انتقال می‌باید. نتایج شبیه سازی 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 سطح 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 عرض به عرض 0/67، ابعاد پخ 0/2 و زاویه دیواره صفر درجه.

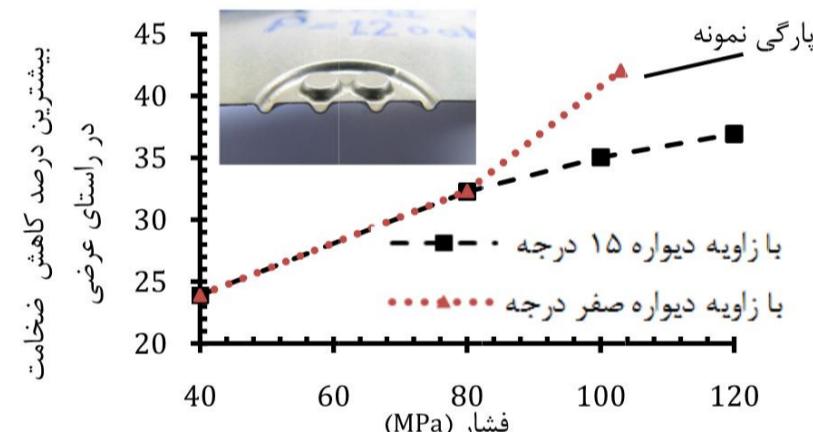
اما این ضخامت پس از وقوع پارگی می‌باشد و به منظور تعیین مقدار مجاز درصد نازک شدن می‌بایست مقداری انتخاب گردد که در آن محدوده نمونه سالم و به دور از هیچ گونه نازک شدن می‌باشد. در نتیجه ضخامت 60 میکرومتر یا به عبارتی درصد نازک شدن ۴۶٪ به عنوان حد مجاز نازک شدن معرفی می‌گردد. در شکل 18 درصد نازک شدن نازک شدن ن 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 نازک شدن ببهود می‌باید. در نسبت عمق به عرض ۱ بجز در زاویه دیواره ۱۵ درجه در سایر زوایای دیواره پارگی در فشارهای کمتر از ۱۵۰ مگاپاسگال اتفاق می‌افتد. البته باید ذکر کرد که در زاویه دیواره ۱۵ درجه نیز به دلیل عبور درصد نازک شدن از درصد نازک شدن حدی (۴۶ درصد نازک شدن) در فشارهای بیشتر از ۱۸۰ مگاپاسگال، رفتار نازک شدن قابل قبول نمی‌باشد.

در نسبت عمق به عرض 0/67 نیز بجز در زوایای ۱۵ و ۱۰ درجه، پارگی زود هنگام رخ می‌دهد و در زوایای ۱۵ و ۱۰ درجه درصد نازک شدن از حد مجاز عبور نکرده و قابل قبول می‌باشد. در نسبت عمق به عرض 0/33 در هیچ کدام از زوایای دیواره پارگی رخ نمی‌دهد و همچنان در کلیه حالت‌ها رفتار نازک شدن قابل قبول می‌باشد. در شکل 19 نمودار بیشترین فشار اعمالی نازک شدن مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه دیواره از ۱۵ درجه 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 ۱۰ درجه رفتار نازک شدن مشاهده می‌باید (خصوص در نسبت عمق به عرض 0/67)، در صورتی که با افزایش زاویه از ۱۰ درجه به ۱۵ درجه تغییر چندانی در رفتار نازک شدن مشاهده نمی‌شود. از آنجاییکه هدف از این پژوهش دستیابی به کمترین زاویه ممکن به منظور شکل دهنده صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد، بنابراین از بین زوایای دیواره مختلف، زاویه دیواره ۱۰ درجه به عنوان بهترین زاویه انتخاب شد و در ادامه به منظور بررسی ابعاد پخ، زاویه دیواره ۱۰ درجه ثابت درنظر گرفته می‌شود.

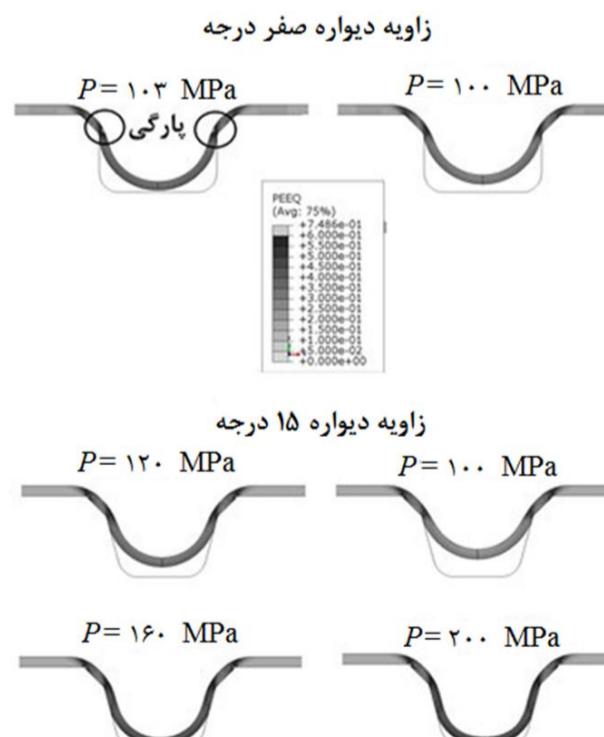
۲-۲-۴-۱ ابعاد پخ بر درصد نازک شدن

در شکل 20 رفتار نازک شدن در نسبت‌های عمق به عرض، ابعاد پخ و سطوح فشار مختلف در زاویه دیواره ۱۰ 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 نازک شدن می‌بشهود می‌باید. در نسبت عمق به عرض ۱ در ابعاد پخ ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر پارگی در فشارهای کمتر از

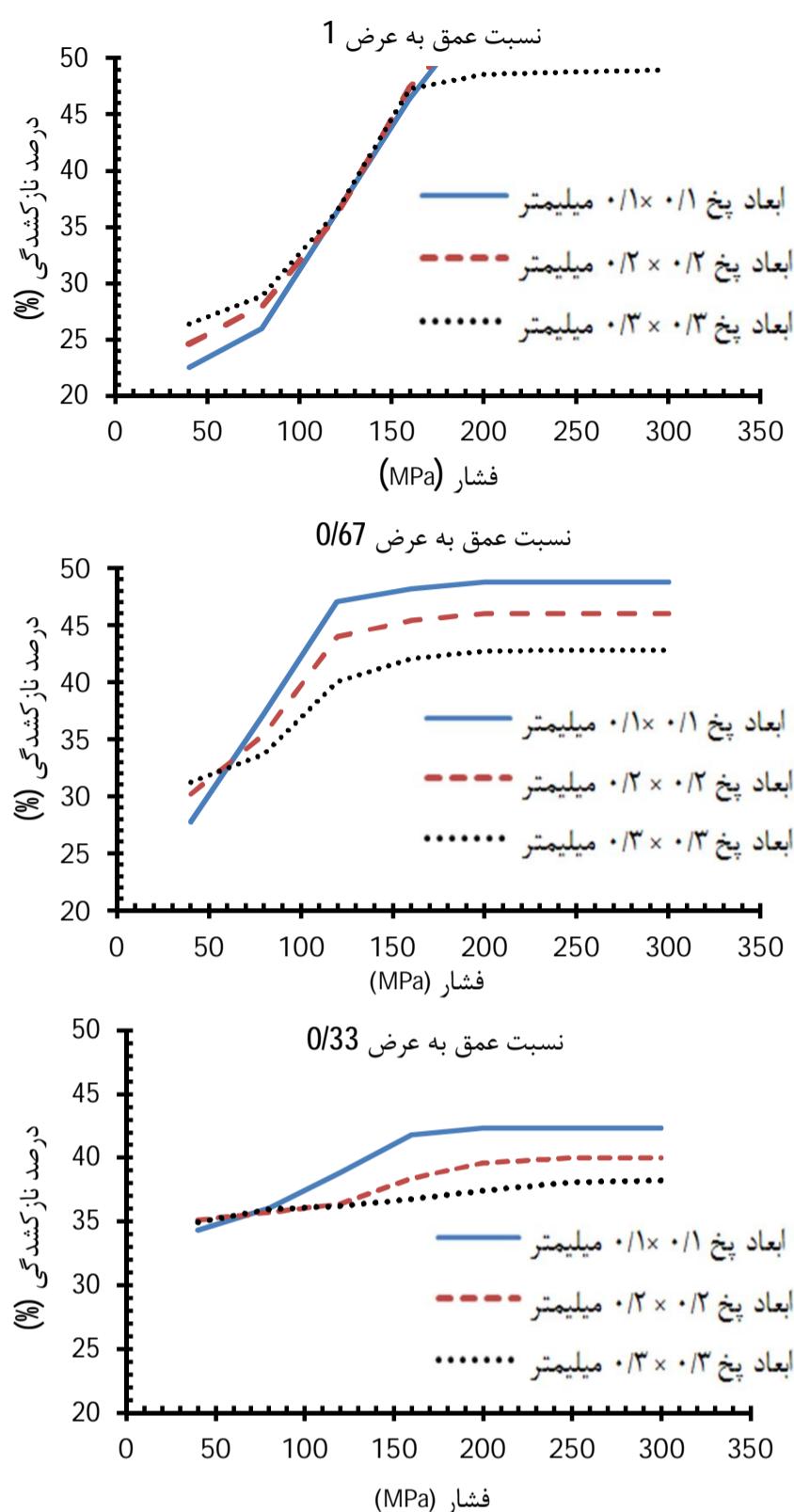
دقیقا در فشارهایی که نازک‌ترین نقطه از نقطه B به D انتقال می‌باید (شکل‌های 12 و 13) و متعاقب آن تماس ورق شکل داده شده به دیواره پین‌ها آغاز می‌گردد، رفتار نازک شدن در دو حالت زاویه دیواره ۱۵ درجه و زاویه دیواره صفر درجه از هم فاصله می‌گیرد و درصد نازک شدن در نمونه با دیواره صفر درجه بحرانی‌تر می‌شود. در ادامه مشاهده می‌شود که در نمونه شکل داده شده با دیواره صفر درجه در فشار ۱۰۳ مگاپاسگال پارگی رخ می‌دهد (شکل 15)، در صورتیکه در نمونه‌های با زاویه دیواره ۱۵ درجه تا فشار ۱۲۰ مگاپاسگال (فشار قابل اعمال در آزمایشگاه) اثری از پارگی مشاهده نمی‌شود. در شکل 16 که نتایج شبیه سازی مربوط به دو نمونه با زاویه دیواره صفر و ۱۵ درجه نشان داده شده است این رفتار بوضوح مشاهده می‌شود. در شکل 16 در فشار ۱۰۳ مگاپاسگال نمونه شکل داده شده با دیواره صفر درجه دچار پارگی شده ولی در نمونه با زاویه دیواره ۱۵ درجه در فشارهای ۱۰۰ مگاپاسگال، ۱۲۰ مگاپاسگال و بالاتر نیز به دلیل افزایش سطح تماس با دیواره اثری از نازک شدن مشاهده 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 نازک شدن 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 نازک شدن مجاز تعریف گردد. در بررسی‌های صورت گرفته از نمونه‌های شکل داده شده مشاهده شده است ضخامت ورق در ناحیه پاره شده در حدود ۵۵ 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 ۱۵ درجه



شکل 16 مقایسه نتایج شبیه سازی سطح تماس بین ورق و قالب در نسبت عمق به عرض 0/67 و با زاویه دیواره صفر و ۱۵ درجه



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

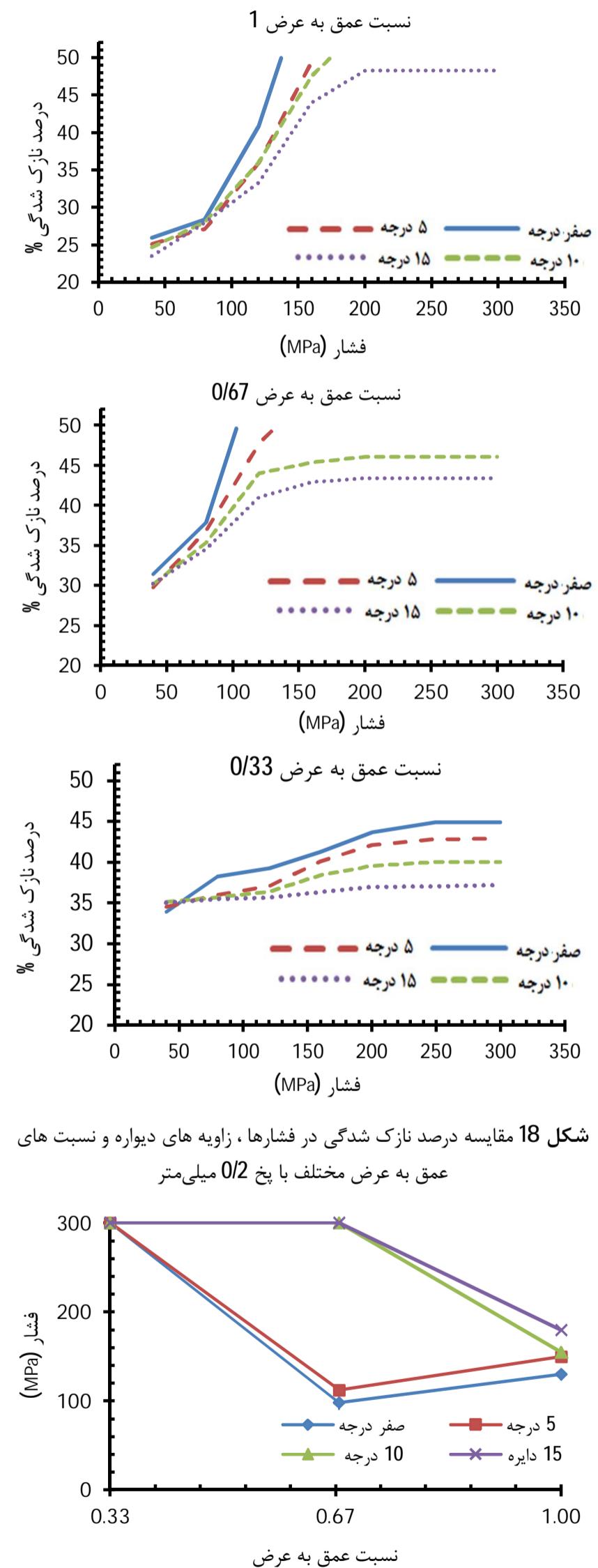
در ابسطه با نسبت عمق به عرض 0/67 مشاهده می‌شود که جز ابعاد پخ 1/1 میلی‌متر، سایر اندازه‌ها قابل قبول می‌باشند و از حد مجاز عبور نکرده‌اند. در ابسطه با نسبت عمق به عرض 0/33 مشاهده می‌شود که در هر سه ابعاد پخ 0/2، 0/3 و 0/1 میلی‌متر پارگی رخ نداده و با افزایش ابعاد پخ رفتار نازک شدگی بهبود می‌یابد. در نتیجه در صد نازک شدگی نمونه‌هایی با ابعاد پخ بیشتر از 0/2 میلی‌متر برای نسبت عمق به عرض کمتر از 0/67 و کلیه ابعاد پخ برای نسبت عمق به عرض 0/33 دارای شرایط مطلوبی می‌باشند.

3-4- پروفیل مقطع شکل داده شده

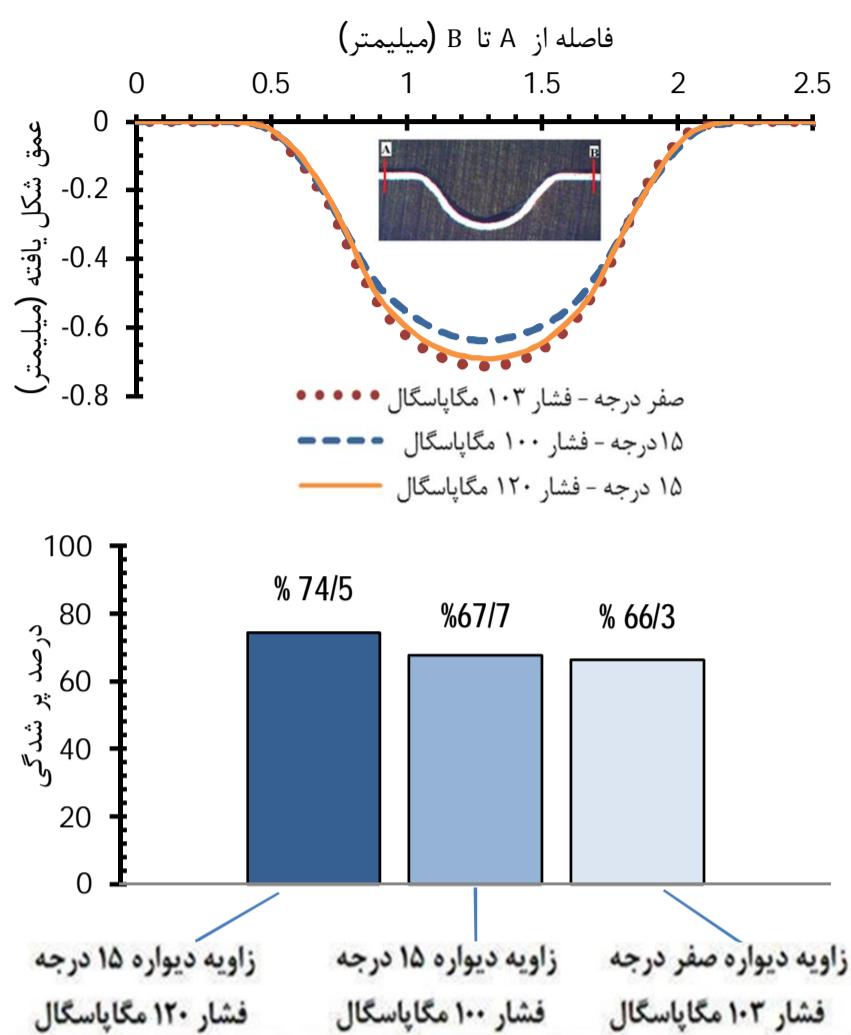
۱-۳-۴- اثر زاویه دیواره بر پروفیل مقطع

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

150 مگاپاسگال رخ می‌دهد ولی با افزایش ابعاد پخ تا $0/3$ میلی‌متر رفتار نازک‌شدگی بهبود می‌یابد ولی به دلیل عبور از حد مجاز نازک شدگی (46 درصد نازک‌شدگی) این ابعاد پخ نیز به منظور شکل‌دهی نمونه‌ای سالم، قابل قبول نمی‌باشد.



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

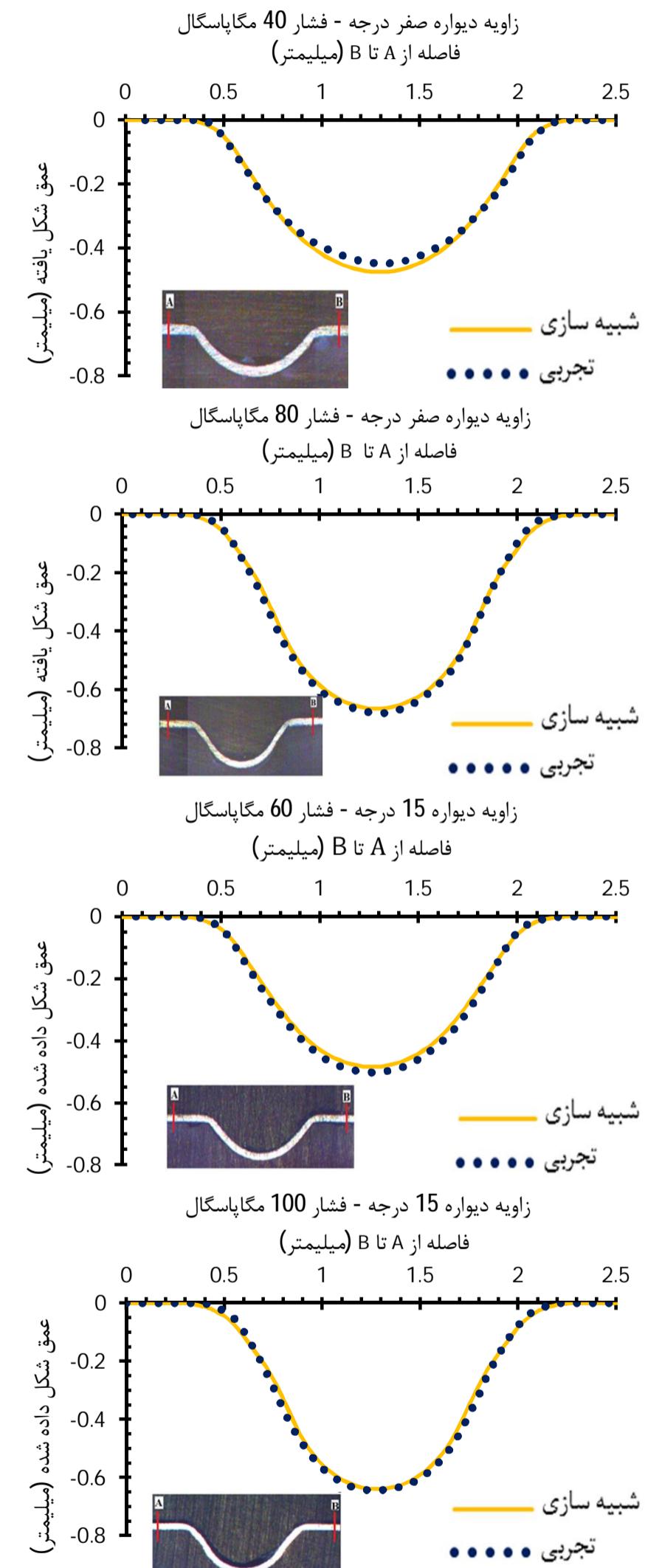


شکل 22 مقایسه عمق پرشدگی و درصد پرشدگی نمونه های با نسبت عمق به عرض ۰/۶۷ و ابعاد پخ ۰/۲ در فشار ۱۰۳ مگاپاسکال (نمونه با دیواره صفر درجه) و فشار ۱۰۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال (نمونه با دیواره ۱۵ درجه)

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در فشارهای تقریباً یکسان (حدود ۱۰۰ مگاپاسکال) قطعه شکل داده شده توسط قالب با دیواره صفر درجه عمیق بیشتری را نسبت به قطعات شکل داده شده با دیواره ۱۵ درجه پر می کند، این برتری حتی برای نمونه ها با دیواره صفر درجه که با فشار ۱۰۳ مگاپاسکال شکل گرفته اند بیشتر از نمونه های با دیواره ۱۵ درجه با فشار ۱۲۰ مگاپاسکال می باشند. قابل ذکر است که این افزایش در عمق پرشدگی توسط نمونه با دیواره صفر درجه با نازک شدن بیش از حد و حتی پارگی در برخی نقاط همراه است که مطلوب نمی باشد. از طرف دیگر عمق پرشدگی بیشتر دلیلی بر درصد پرشدگی بالاتر نمی باشد؛ زیرا که درصد پرشدگی نسبت مساحت مقطع پر شده توسط نمونه شکل داده شده به مساحت کل حفره می باشد (شکل 9).

به همین منظور درصد پرشدگی دو نمونه در فشار یکسان (حدود ۱۰۰ مگاپاسکال) در این شکل تعیین می گردد. پس از محاسبه درصد پرشدگی این دو نمونه، در نمودار شکل 22 مشاهده می شود که در فشار یکسان، با وجود عمق پرشدگی کمتر نمونه با دیواره ۱۵ درجه، درصد پرشدگی آن از نمونه با دیواره صفر درجه اندکی بیشتر می باشد. به دلیل ایجاد پارگی در نمونه های با دیواره صفر درجه در فشار ۱۰۳ مگاپاسکال، نمی توان به بررسی میزان پرشدگی در فشارهای بیش از آن پرداخت ولی در نمونه با دیواره ۱۵ درجه این امکان وجود دارد. درصد پرشدگی پرشدگی این نمونه در فشار ۱۲۰ مگاپاسکال از نمونه با دیواره صفر درجه در فشار ۱۰۳ مگاپاسکال حدود ۸ درصد بیشتر می باشد. به همین دلیل پروفیل نهایی نمونه هایی که توسط قالب با دیواره ۱۵ درجه شکل می گیرند در مقایسه با نمونه های با دیواره صفر درجه، به فرم موردنظر و مطلوب نزدیک ترند و از دقت ابعادی بالاتر به همراه توزیع ضخامت یکنواخت تری برخوردارند که این امر به نوبه خود می تواند بر بازده عملکرد و طول عمر صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده موثر باشد.

صفر درجه برابر با ۵/۸٪ (نمونه در فشار ۴۰ مگاپاسکال) و برای نمونه با زاویه دیواره ۱۵ درجه برابر با ۳/۷٪ (نمونه در فشار ۶۰ مگاپاسکال) می باشد. وجود زاویه در دیواره قالب بر عمق و درصد پرشدگی پروفیل شکل داده شده اثر می گذارد. شکل 22 مربوط به پروفیل شکل داده شده نمونه تجربی با دیواره صفر و ۱۵ درجه می باشد.



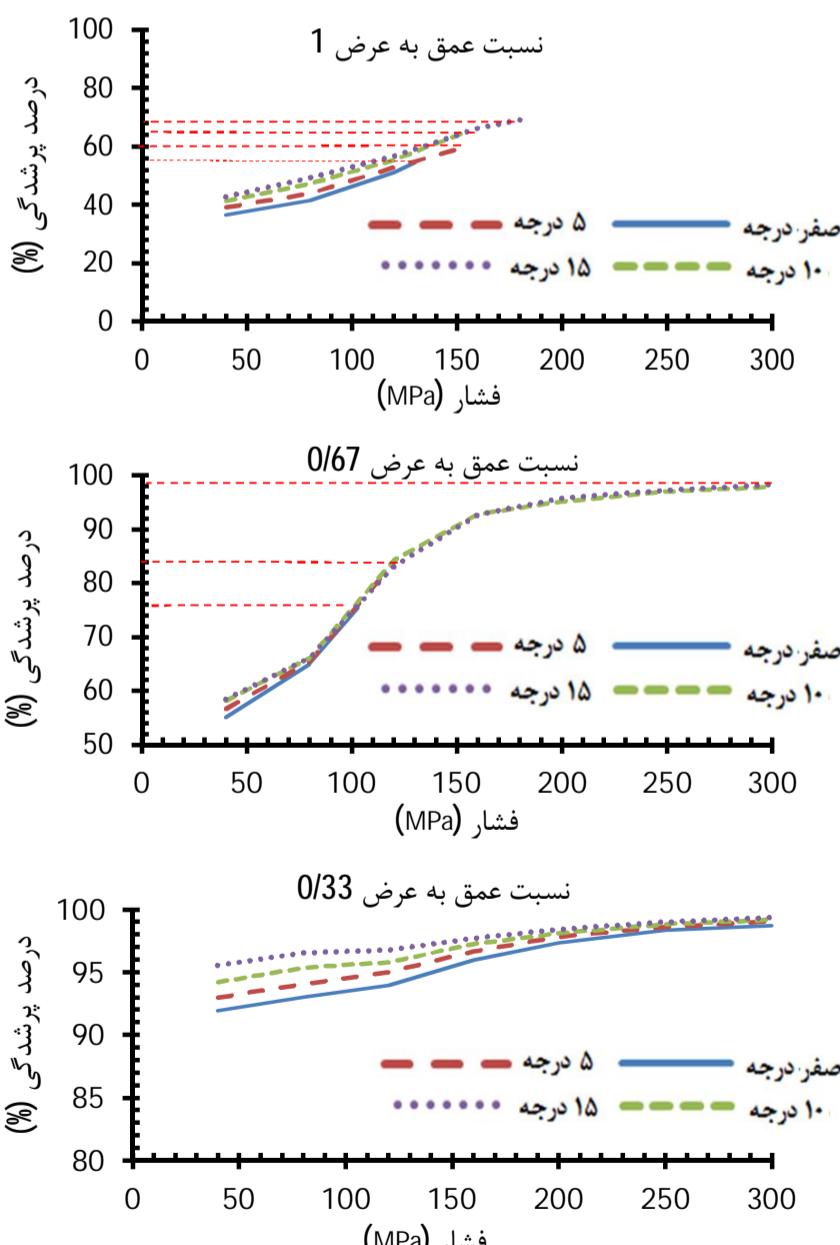
شکل 21 مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی میزان پرشدگی پروفیل شکل داده شده در فشارهای مختلف برای نمونه های دایروی با نسبت عمق به عرض ۰/۶۷ و با زاویه دیواره صفر و ۱۵ درجه

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

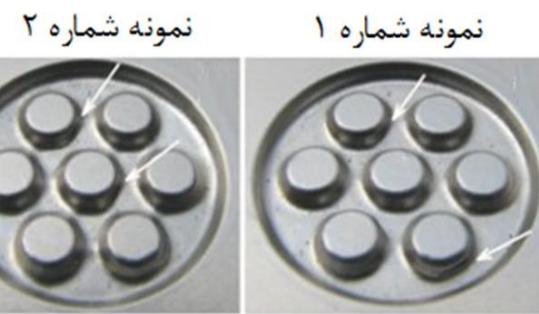
4-4- درصد پرشدگی

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

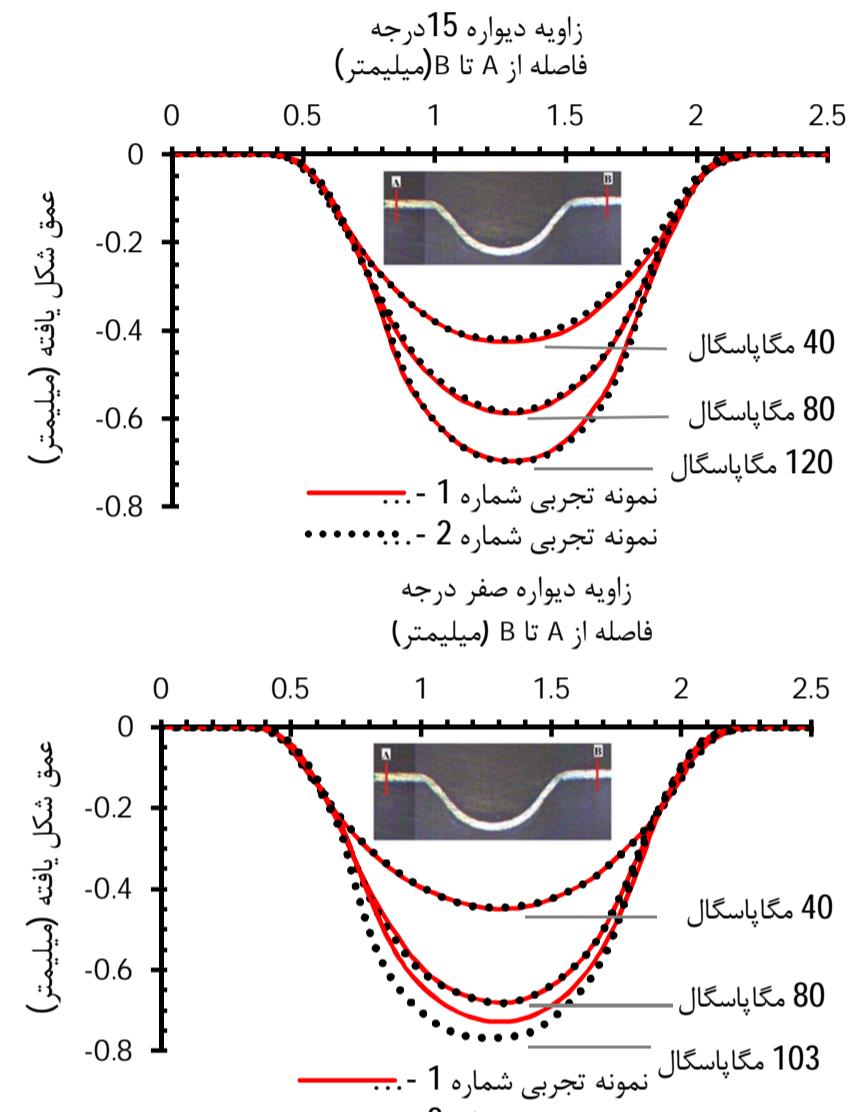
با تعریف درصد پرشدگی بیان شده در شکل 9، درصد پرشدگی معیاری از درصد نزدیکی پروفیل شکل داده شده به پروفیل قالب مورد نظر نیز می باشد. بنابراین هرچه این درصد بیشتر باشد به معنی آن است که پروفیل شکل داده شده به پروفیل مورد نظر نزدیک تر گشته، به عبارتی این نسبت می تواند معیاری از دقت ابعادی نیز باشد. در شکل 25 درصد پرشدگی مربوط به نسبت های عمق به عرض مختلف با زاویه دیواره مختلف و با ابعاد پخ $0/2$ میلی متر بصورت مجزا نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود میزان افزایش درصد پرشدگی تا لحظه ایست که ضخامت بحرانی ترین نقطه از نمونه به اندازه حدی ضخامت (60 میکرومتر) رسیده باشد. برای نمونه هایی که ضخامت آن ها به این حد مجاز نرسیده اند، فشار تا میزانی افزایش می یابد که روند تغییرات رفتار پرشدگی تقریبا ثابت گردد (تا فشار 300 مگاپاسگال).



شکل 25 مقایسه نتایج شبیه سازی درصد پرشدگی در فشارها، زاویه های دیواره و نسبت های عمق به عرض مختلف با پخ $0/2$ میلی متر



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



شکل 24 پرشدگی پروفیل در فشارهای مختلف برای قالب دایروی با نسبت عمق به عرض $0/2$ و زاویه دیواره صفر و 15 درجه.

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

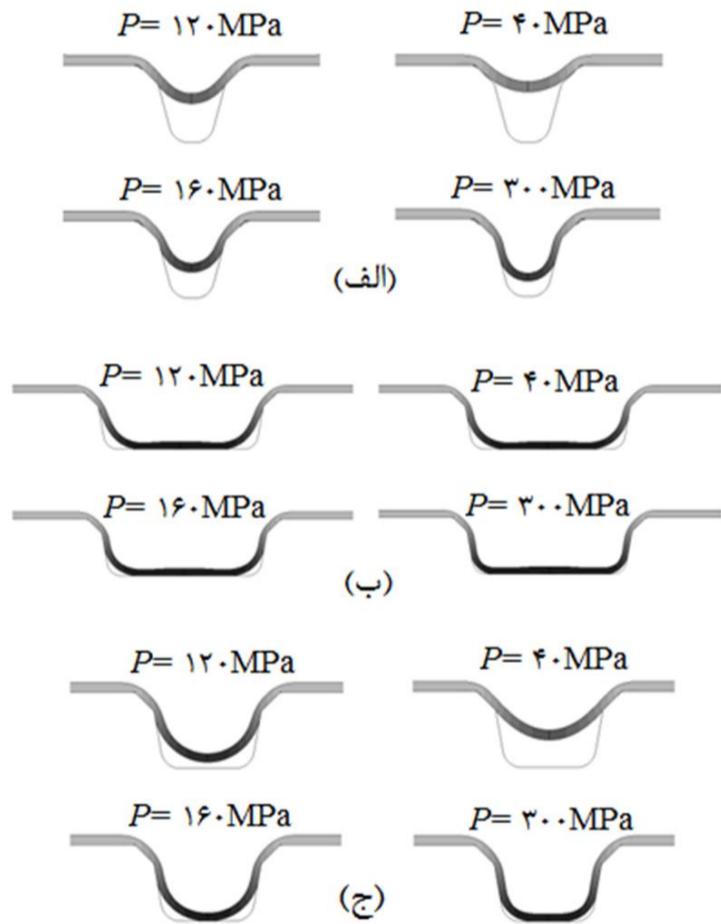
پس از بررسی پروفیل شکل داده شده مربوط به یک تک پین، به بحث امکان شکل دهنده پروفیل های یکسان در بین های مختلف موجود در یک صفحه دوقطبی فلزی پرداخته می شود. شکل 23 نمایی از دو نمونه شکل داده شده با زاویه پین صفر درجه در شرایط یکسان می باشد. همان طور که مشاهده می شود محل نازک شدگی شدید نمونه ها در دو شرایط یکسان با یکدیگر متفاوت می باشد. به منظور بررسی دقیق تر، دو نمونه با زاویه دیواره صفر و 15 درجه، در فشارهای مختلف شکل داده می شوند. شکل 24 مربوط به پروفیل شکل داده شده پین میانی شکل 23 در دو زاویه دیواره مختلف می باشد.

همان طور که مشاهده می شود در نمونه با زاویه دیواره صفر درجه در پین میانی، به محض وقوع نازک شدگی 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 شده اند) ایجاد می گردد و میزان این اختلاف در حدود $11/25\%$ می باشد که مقدار قابل ملاحظه ای است. این در حالیست که در نموداری که مربوط به نمونه با زاویه دیواره 15 درجه می باشد، به دلیل عدم وجود نازک شدگی شدید، حتی با افزایش فشار، تغییری

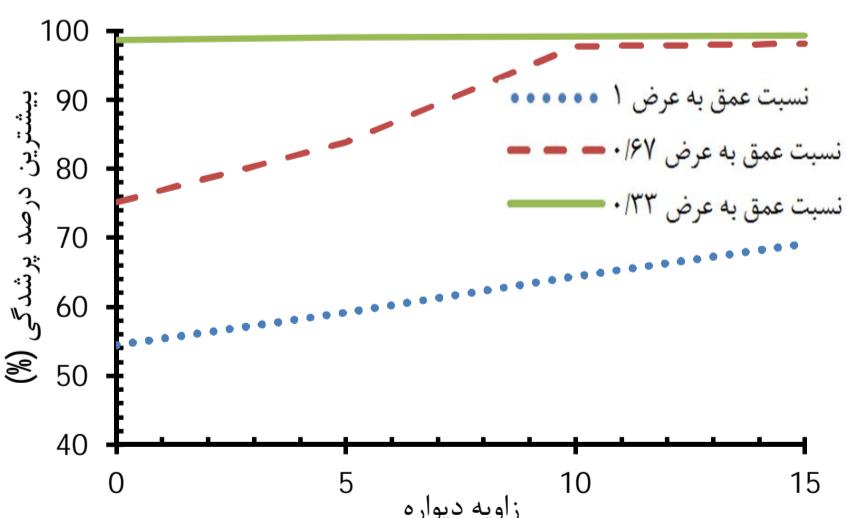
در نسبت عمق به عرض 1 با افزایش ابعاد پخ از 0/1 به 0/3 درصد پرشدگی افزایش یافته ولی همواره کمتر از 80 درصد بوده که قابل قبول نمی باشد. در نسبت عمق به عرض 0/67 رفتار متفاوت مشاهده می شود. در این نسبت در ابعاد پخ 0/1 میلی متر بیشترین درصد پرشدگی 80 درصد بوده است. با افزایش ابعاد پخ از 0/1 به 0/2 تغییرات عمده ای در درصد پرشدگی مشاهده شده و این مقدار از 80 درصد به حدود 99 درصد افزایش می باشد، ولی با افزایش از 0/2 به 0/3 درصد پرشدگی 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 باشد.

5-4- 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 دهنده صفحات دوقطبی با الگوی پینی این پارامترها بررسی گردد.



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)، (ب) و (ج) 0/67 و 0/33



شکل 27 مقایسه بیشترین درصد پرشدگی نمونه هایی با نسبت عمق به عرض 0/33 و 0/67 و 0/23 در زاویه های دیواره صفر، 5، 10 و 15 درجه با پخ 0/2 میلی متر

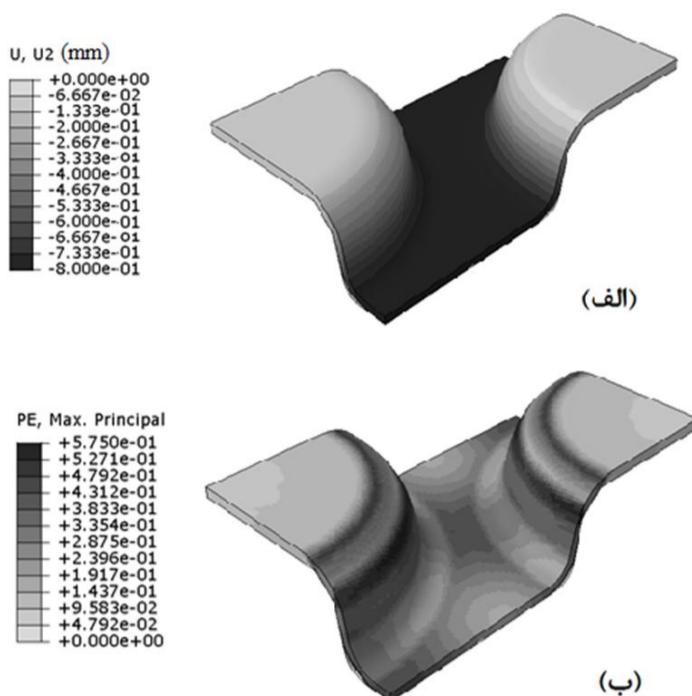
بطور کلی با کاهش نسبت عمق به عرض و افزایش زاویه دیواره رفتار پرشدگی مطلوب تر می شود. در نسبت عمق به عرض 1، با افزایش زاویه دیواره درصد پرشدگی افزایش می یابد؛ ولی در کلیه این حالت ها، درصد پرشدگی همواره کمتر از 70 درصد می باشد که مقدار مطلوبی نیست. در نسبت عمق به عرض 0/67 رفتاری متفاوت مشاهده می شود. 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 تقریبا 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 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 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 پرشدگی مطلوبی را بدست می آورند. شکل 27 نشان می دهد که کلیه زوایای دیواره نمونه با نسبت عمق به عرض 0/67 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 شدنگی بیان شد، هدف دستیابی به کمترین زاویه ممکن به منظور شکل دهنده 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- اثربعد پخ بر درصد پرشدگی

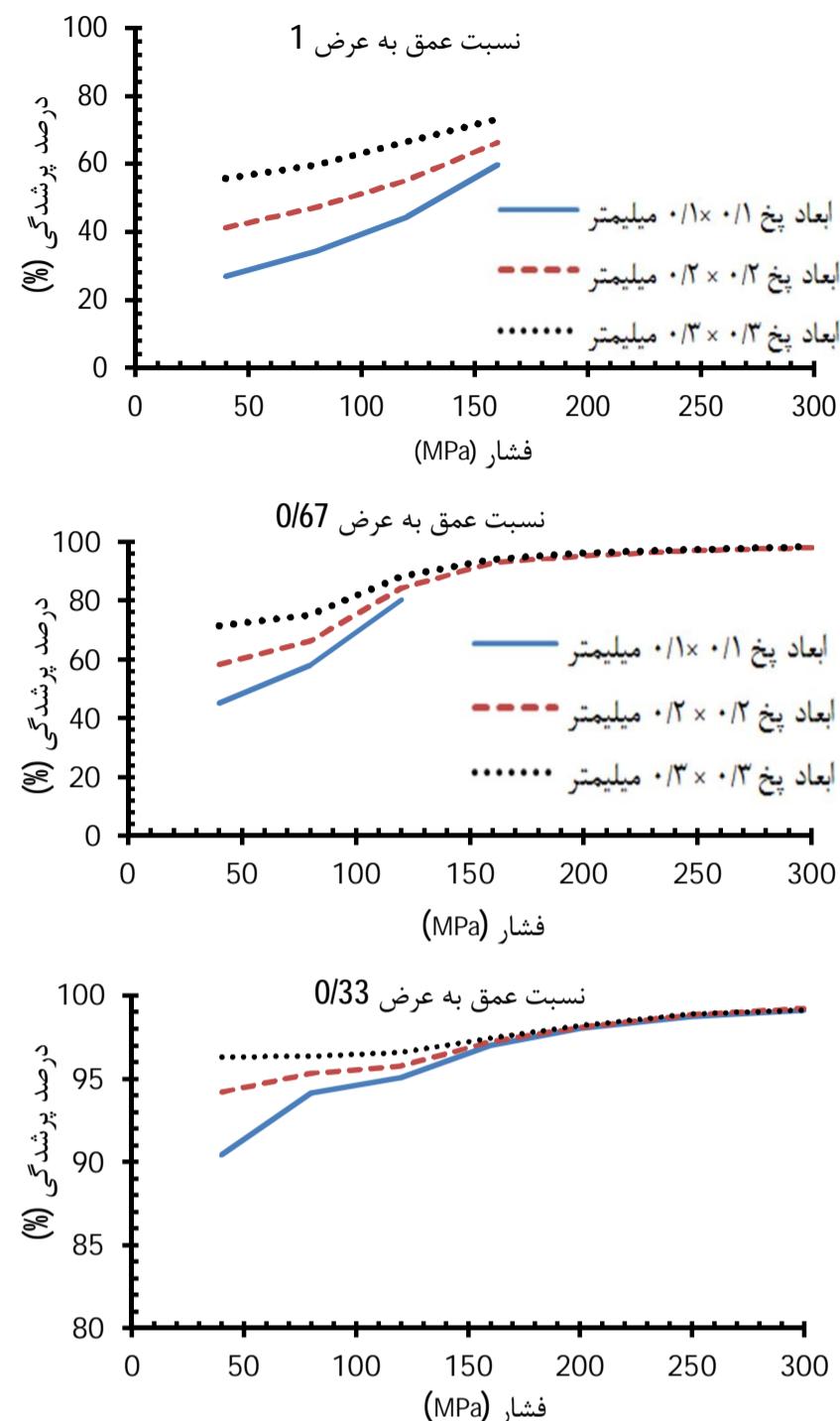
در شکل 28 درصد پرشدگی مربوط به نمونه هایی با ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض مختلف و با زاویه دیواره 10 درجه نشان داده شده است. بنابر شکل 28



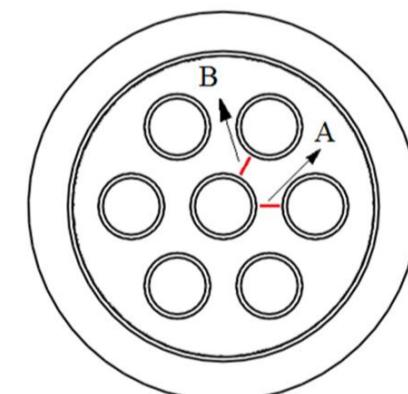
شکل 30 نتیجه شبیه سازی مربوط به نمونه صفحات دوقطبی فلزی با ابعاد منتخب،
الف- کانتور جابجایی در راستای ارتفاع، ب- کانتور کرنش پلاستیک.

در شکل 29 نمایی از نواحی بحرانی موجود در الگوی پینی نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هندسه دایروی دو ناحیه A و B به عنوان گلوگاه شکل دهی محاسب می‌شوند. جدول 2 خلاصه‌ای از نتایج نشان داده شده در نمودارهای پیشین را گردآوری کرده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که با تغییر زوایای دیواره و ابعاد پخ در نسبت عمق به عرض 1 نمی‌توان به نمونه‌ای 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، می‌توان 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 می‌شود که با استفاده از ابعاد پخ کوچک‌تر (کمتر از 0/2 میلی‌متر) درصد نازک شدگی افزایش یافته (بحرانی شده)، و از طرف دیگر ابعاد پخ بزرگ‌تر (بیشتر از 0/2 میلی‌متر) هیچ اثری بر روی درصد پرشدگی نخواهد داشت.

در بحث شکل دهی صفحات دوقطبی پینی، هرچه با فاصله بین پین‌های کمتر، زوایه دیواره پین‌های 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 کانال‌های مسیر حریان به هندسه مستطیل شکل نزدیکتر می‌گردند و این هندسه شرایط مطلوب‌تری در بحث راندمان پیل سوختی ایجاد می‌کند. بنابراین به منظور شکل دهی الگوی پینی با هندسه دایروی با میزان پرشدگی مطلوب و ضخامت مناسب در نقاط بحرانی، باید تا از حداقل نسبت عمق به عرض 0/67، حداقل زوایه دیواره 10 درجه و حداقل ابعاد پخ 0/2 میلی‌متر استفاده گردد. در شکل 30 نتیجه شبیه‌سازی نمونه‌ای از صفحات دوقطبی شکل داده با ابعاد بیان شده در سطح فشار 300 مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل (30-الف) مشاهده می‌شود که سطح آندی-کاتدی و کانال عبور حریان بطور کامل شکل گرفته‌اند. همچنین در شکل (30-ب) نیز مشاهده می‌شود که نازک‌ترین نقطه نمونه شکل داده شده (ناحیه‌ای با بیشترین کرنش پلاستیک) دارای کرنش پلاستیک 0/575 (ضخامت 0/0595 میلی‌متر برابر با درصد نازک شدگی 45/9 درصد) می‌باشد که ضخامتی قابل قبول است. در شکل 31 نمایی از نمونه‌ای که به کمک قالبی با همین ابعاد (نسبت عمق به عرض 0/67، زوایه دیواره 10 درجه و پخ 0/2 میلی‌متر) در فشار 120 مگاپاسکال بدون هیچ گونه آثاری از پارگی شکل داده شده است مشاهده می‌شود که به منظور شکل دهی کامل به یک مرحله استمپینگ نهایی نیاز دارد.



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



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

جدول 2 خلاصه‌ای از نتایج پارامترهای مختلف در نمودارهای پیشین

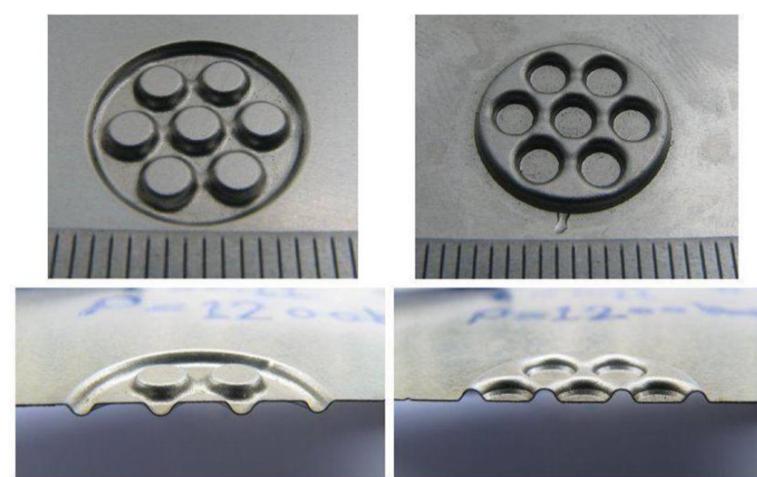
	نسبت عمق به عرض						
	درصد نازک شدگی		درصد پرشدگی		درصد نازک شدگی		
	1	0/67	0/33	1	0/67	0/33	
ابعاد پخ	x	x	✓	x	x	✓	0/1
	x	✓	✓	x	✓	✓	0/2
	x	✓	✓	x	✓	✓	0/3
زاویه دیواره	x	x	✓	x	x	✓	0
	x	x	✓	x	x	✓	5
	x	✓	✓	x	✓	✓	10
	x	✓	✓	x	✓	✓	15

پین های مختلف از خود نشان می دهد.

- در رابطه با درصد پرشدگی بررسی هایی صورت گرفت و نتایجی مشابه با درصد نازک شدگی به دست آمد؛ بدین صورت که بطور کلی با افزایش زاویه دیواره، افزایش ابعاد پخ و کاهش نسبت عمق به عرض درصد پرشدگی بهبود می یابد و همچنین مشخص شد که زاویه دیواره 10 درجه کمترین زاویه دیواره، ابعاد پخ 0/2 میلی متر کمترین ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض 0/67 بیشترین نسبت عمق به عرض به منظور دستیابی به نمونه مطلوب می باشد.
- در آخر می بایست 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 می باشد. این درصورتیست که در این پژوهش با وجود پیچیدگی بیشتر شکل دهی الگوی پینی و وجود گوشه های 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 پژوهش های انجام شده، در این پژوهش قابلیت شکل دهی چنین صفحاتی در ابعاد و شرایط بحرانی تر ارایه شده است که به نوبه خود گامی موثر در راستای استفاده از صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده در پیل های سوختی (PEM) می باشد.

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. Hosseiniipour, 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. Hosseiniipour, 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. Hosseiniipour, 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. Middelman, 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. Müller, 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.



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

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

5- نتیجه گیری

پس از بررسی گزارش های مختلف درمورد شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی، مشاهده شد که کلیه این پژوهش ها 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 سنبله سیال استفاده شد. ورق مورد نظر در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 با ضخامت 0/11 میلی متر می باشد. در ابتدا به منظور بررسی توانایی شکل دهی الگوی پینی به کمک روش هیدروفرمینگ، در چند سطح فشار، نمونه های تجربی شکل داده شد. سپس با ابعاد 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 نازک شدگی، پروفیل مقطع شکل داده شده و درصد پرشدگی بررسی گردید که نتایج آن به شرح زیر می باشد:

- در رابطه با بحث توزیع ضخامت مشاهده شد که وجود زاویه در دیواره پین ها باعث یکنواختی بیشتر توزیع ضخامت (اختلاف کمتر ضخامت نازک-ترین و ضخیم ترین ناحیه) شده است، تا حدی که ضخامت نمونه با زاویه دیواره 15 درجه در فشار شکل دهی 120 مگاپاسکال یکنواخت تر از نمونه با دیواره صفر درجه در فشار کمتر (103 مگاپاسکال) می باشد.

- در رابطه با درصد نازک شدگی مشاهده شد که بطور کلی با افزایش زاویه دیواره، افزایش ابعاد پخ و کاهش نسبت عمق به عرض میزان درصد نازک شدگی بهبود می یابد. در بحث شکل دهی صفحات دوقطبی فلزی بدليل محدودیت های موجود در شکل دهی چنین صفحاتی، تولید نمونه ای سالم به همراه درصد نازک شدگی مناسب با نسبت عمق به عرض بیشتر، زاویه دیواره کمتر و ابعاد پخ کمتر مطلوب تر است. پس از بررسی های صورت گرفته مشخص گردید که زاویه دیواره 10 درجه کمترین زاویه دیواره، ابعاد پخ 0/2 میلی متر کمترین ابعاد پخ و نسبت عمق به عرض 0/67 بیشترین نسبت عمق به عرض به منظور دست یابی به نمونه مطلوب می باشد.

- 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 می باشد ولی درصد پرشدگی یا به عبارتی نزدیکی پروفیل شکل داده شده به پروفیل قالب (پروفیل مورد نظر) در نمونه با دیواره 15 درجه بیشتر می باشد. در ادامه یکنواختی پروفیل در بین پین های مختلف نیز بررسی شد و مشاهده شد که وجود زاویه در دیواره اثر بسزایی در بحث یکنواختی پروفیل در بین