مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1393، دوره 14، شماره 10، ص‌ص 150-158

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با الگوی پینی به‌کمک فرآیند هیدروفرمینگ در قالب‌های محدب

موسی بلالی اوصیا[1]، سید جمال حسینی پور[2*]، محمد بخشی جویباری[3]، عبدالحمید گرجی[4]

1- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
4- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
* بابل، صندوق پستی 484، j.hosseini@ nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 اسفند 1392
پذیرش: 29 فروردین 1393
ارائه در سایت: 05 مهر 1393

کلید واژگان:
صفحات دوقطبی فلزی
هیدروفرمینگ
درصد پرشدگی
درصد نازک‌شدگی

چکیده

صفحات دوقطبی یکی از مهم‌ترین اجزای پیل‌های سوختی هستند. این صفحات از روش‌های مختلف نظیر ماشینکاری، قالب‌گیری و شکل‌دهی و همچنین از جنس‌های مختلفی نظیر صفحات گرافیتی، کامپوزیتی و فلزی ساخته می‌شوند. در این پژوهش، شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با ضخامت 0/11 میلیمتر و با الگوی پینی به کمک فرآیند هیدروفرمینگ در قالب محدب به‌طور تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا پارامترهای مختلفی نظیر سطح فشار اعمالی، هندسه پین و نسبت عمق به عرض تغییر داده شده و نتایجی همچون پروفیل شکل داده شده، درصد پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی نمونه‌های شکل داده شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که در نسبت عمق به عرض 1 هیچ نمونه سالمی به‌دست نیامده، درصورتی که در نسبت عمق به عرض 0/67 برای نمونه‌های دایروی (a/b=1) و بیضوی (a/b=0.7) و در نسبت عمق به عرض 0/33 برای هر سه نمونه دایروی (a/b=1)، بیضوی (a/b=0.7) و بیضی کشیده (a/b=0.4) نمونه سالمی در فشار 300 مگاپاسگال از نظر درصد پرشدگی و نازک‌شدگی حاصل می‌شود. به‌طور کلی با افزایش نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ (a/b) و کاهش نسبت عمق به عرض (h/w) درصد پرشدگی و نازک‌شدگی رفتار مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند.

Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die

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 20 February 2014
Accepted 18 April 2014
Available Online 27 September 2014

Keywords:
Metallic Bipolar Plates
Hydroforming,
Filling Percent
Thinning Percen

ABSTRACT

Bipolar plates are the most important of fuel cells components. These plates are made with different methods such as machining, molding and forming and they are made of variety materials such as graphite, composite and metal plates. In this research, forming of metallic bipolar plates with pin-type pattern from stainless steel 304 with 0.11mm thickness is investigated numerically and experimentally using hydroforming process in convex die. In this regard, several parameters such as applied pressure, pin geometry, and depth to width ratio of the profiles has been changed and the experimental and simulation results of formed profiles, filling percent, thickness distribution and thinning percent of the formed parts have been compared. The results have been shown that no safe sample has been reached in depth to width ratio 1, while safe samples have been formed in depth to width ratio 0.67 in circle (a/b=1) and ellipse (a/b=0.7) samples and all samples in depth to width ratio 0.33 at 300 MPa pressure level in viewpoint of filling and thinning percentage. In general, increasing the small diameter to big diameter ratio (a/b) and decreasing the depth to width ratio (h/w) makes the thinning percent and filling percent more desirable.

1- مقدمه

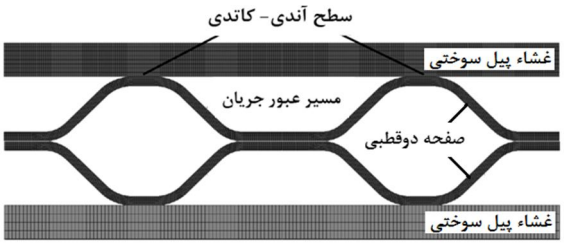
در سال‌های اخیر، به‌دلیل مزایای استفاده از پیل‌های سوختی، تحقیقات در این زمینه گسترش چشم‌گیری داشته و از اهمیت بالایی برخوردار است. در آینده پیل‌های سوختی می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای موتورهای احتراق داخلی محسوب شوند. هر پیل سوختی از اجزای مختلفی تشکیل می‌شود که مهم‌ترین آن صفحات دوقطبی هستند، زیرا که 60-80 درصد از وزن استک، 50 درصد از حجم استک و 35-45 درصد از هزینه استک را صفحات دوقطبی تشکیل می‌دهند[1]. این صفحات از جنس‌های مختلفی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

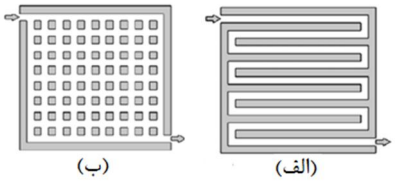
Please cite this article using:
M. Belali Owsia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 150-158, 2014 (In Persian)

ساخته می‌شود که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی صفحات گرافیتی[2]، صفحات کامپوزیتی[3] و صفحات فلزی[4] دسته‌بندی کرد. از میان آن‌ها، صفحات دوقطبی فلزی به‌دلیل هزینه کمتر، خواص مکانیکی و الکتریکی عالی، خواص حرارتی مناسب، سهولت ساخت و زمان تولید کوتاه‌تر به‌عنوان بهترین انتخاب هستند[1]. روش‌های ساخت صفحات دوقطبی فلزی به دو روش کلی ماشینکاری و شکل‌دهی دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های ماشینکاری به‌دلیل داشتن زبری سطح بالا، وزن بالا، دور ریز مواد زیاد و زمان تولید زیاد نامناسب هستند[5،6]. در شکل 1، نمایی از چگونگی قرارگیری صفحات دوقطبی فلزی شکل داده شده در مجموعه یک تک‌سل پیل سوختی نشان داده شده است. همچنین، بسته به کاربرد پیل‌های سوختی و به تبع آن طراحی مسیرهای جریان موجود در صفحات دوقطبی، هندسه‌هایی که می‌بایست بر روی این صفحات شکل گیرد متفاوت هستند. این هندسه‌ها می‌توانند ساده (مسیر جریان‌های کانالی شکل یا مارپیچ) و یا پیچیده (مسیر جریان‌های با الگوی حفره‌ای یا پینی تکرارشونده) باشند (شکل 2) [7].

روش‌های مرسوم شکل‌دهی این صفحات عبارت است از استمپینگ[8،9]، رابرپد فرمینگ[10] و هیدروفرمینگ[11،9-14]. اما، در میان روش‌های مرسوم شکل‌دهی چنین صفحاتی، قابلیت شکل‌پذیری روش رابرپد فرمینگ به‌دلیل محدودیت سیالیت لایه لاستیکی چندان مناسب نبوده و به‌دلیل وجود اصطکاک بین لایه لاستیکی و ورق شکل داده شده، سطوح نمونه‌های شکل داده شده دارای کیفیت مناسبی نیستند. همچنین، به‌دلیل از بین رفتن لایه لاستیکی پس از چند ضرب تولید، قابلیت استفاده صنعتی از این روش وجود ندارد[10]. در روش استمپینگ، به‌دلیل صلب بودن سنبه و وجود اصطکاک بین ورق و سنبه، نیروهای اصطکاکی اثر منفی بر نسبت کشش گذاشته و نازک‌شدگی به‌سرعت افزایش یافته که باعث پارگی نمونه می‌شود. همچنین، در روش استمپینگ به‌دلیل وجود دو کفه قالب و هزینه‌های مونتاژی، هزینه نهایی قالب و به تبع آن نمونه افزایش می‌یابد[8]. در این میان روش هیدروفرمینگ به‌دلیل مزایای از جمله شکل‌دهی یکنواخت، صافی سطح بالا، قابلیت تکرارپذیری و تولید صنعتی خوب مورد توجه قرار گرفته است[15].



شکل 1 موقعیت صفحات دوقطبی در یک تک‌سل پیل سوختی.



شکل 2 شمایی از مسیرهای جریان موجود برروی صفحات دوقطبی الف) مسیر جریان کانالی شکل (مارپیچ) ب) مسیر جریان پین شکل (حفره ای) تکرارشونده[7]

ماهابانفاچای و همکاران[9] دو روش استمپینگ و هیدروفرمینگ را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد نسبت عمق به عرض نمونه‌های شکل داده شده با روش هیدروفرمینگ در مقایسه با نمونه‌های شکل داده شده به روش استمپینگ بیشتر است. همچنین، مشاهده شد که تغییرات ابعادی بین کانال‌های مختلف شکل داده شده در روش هیدروفرمینگ به مراتب کمتر از روش استمپینگ است. آن‌ها همچنین زبری سطح نمونه‌های شکل داده شده به دو روش را بررسی کردند. مشاهده شد که زبری سطح ناحیه در تماس با قالب در نمونه‌های هیدروفرم شده از نمونه‌های استمپ شده مطلوب‌تر است.کوچ و همکاران[11] تاثیر روش ساخت را بر روی خوردگی صفحات در محیط آزمایشگاهی بررسی و مشاهده کردند که برخلاف نمونه‌های شکل داده شده به روش استمپینگ که میزان خوردگی‌شان از صفحات شکل داده نشده بیشتر است، میزان خوردگی نمونه‌های شکل داده شده به روش هیدروفرمینگ حتی از خوردگی صفحات شکل داده نشده نیز کمتر است. در پژوهشی دیگر کوچ و ماهابانفاچای[13] تحقیقاتی را بر روی شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با هندسه میکرو به کمک روش هیدروفرمینگ انجام دادند. در ابتدا چند نمونه به کمک قالب‌های تک‌شیار و سه‌شیار شکل داده شد و مشاهده شد که عمق شکل داده شده نمونه‌های سه‌شیار به‌دلیل اثر شیارهای مجاور کمتر از عمق نمونه تک شیار است. همچنین، مشاهده شد که عرض شیار در مقایسه با عمق آن اثر بیشتری بر پرشدگی شیارها دارد. هانگ و همکاران[16] با ساخت محفظه فشاری با ظرفیت اعمال فشار 250 مگاپاسگال نمونه‌هایی از صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 را به روش هیدروفرمینگ در سطوح مختلف فشار شکل دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش فشار، به‌صورت تقریبا خطی عمق شکل داده شده افزایش می‌یابد.

کلیه پژوهش‌های انجام شده در زمینه شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی، بر روی الگوی جریان کانال شکل مورد بررسی قرار گرفت و تاکنون گزارشی در خصوص شکل‌دهی صفحات دوقطبی با الگوی جریان پین شکل یافت نشده است. براساس تحقیقات صورت گرفته الگوی جریان پین شکل دارای مزایایی نسبت به مسیر جریان‌های مرسوم است.گیو و همکاران[17] مسیر جریان پین شکل بهینه شده‌ای را ارائه کردند و به کمک نرم‌فزار المان محدود این مسیر جریان و مسیرهای جریان مرسوم کانال‌های موازی و مارپیچ را شبیه‌سازی کردند. نتایج این شبیه سازی‌ها نشان داد که مسیر جریان پین شکل بهینه شده دارای چگالی توان بالا به همراه افت فشار کمتر، توزیع یکنواخت‌تر فشار، و انتقال جرم موثرتر در مقابل مسیر جریان‌های مرسوم موازی و مارپیچ است. همچنین، این مسیر جریان پین شکل به پیل سوختی اجازه می‌دهد تا در چگالی جریان بالاتر کار کند. با توجه به پیچیدگی بیشتر شکل‌دهی این الگو نسبت به الگوهای کانالی شکل، تحقیقات در این رابطه از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این پژوهش، شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوهای پینی به کمک فرایند هیدروفرمینگ در قالب محدب بررسی می‌شود. نسبت عمق به عرض و هندسه پین به‌منظور دستیابی به درصد پرشدگی بیشتر، پروفیل دقیق‌تر و توزیع ضخامت مناسب‌تر انجام می‌گیرد. بدین منظور در ابتدا قالبی با الگوی پینی (بیضوی) تهیه شد، سپس، به کمک واحد اعمال فشار نمونه‌هایی در سطوح فشار مختلف (40 و 80 مگاپاسگال) به کمک روش هیدروفرمینگ شکل داده شد. در ادامه توزیع ضخامت و پروفیل مقطع نمونه‌های شکل داده شده بررسی شده و با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مقایسه شد. پس از حصول اطمینان از دقت نتایج شبیه‌سازی،

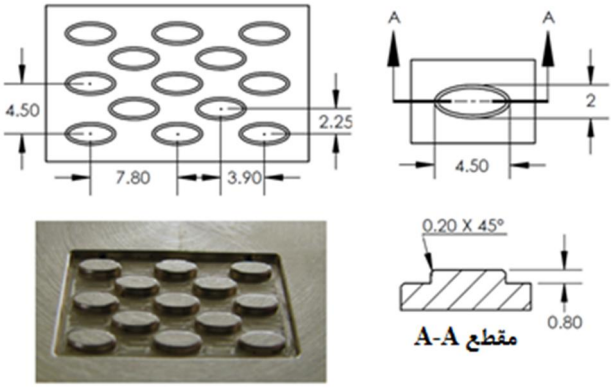
پارامترهای هندسی (هندسه پین و نسبت عمق به عرض) و فرآیندی (فشار شکل‌دهی) مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا در نهایت مشخص شود که به‌منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پینی از نقطه نظر پروفیل شکل داده شده، درصد پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی، کدامیک مناسب‌تر هستند.

2- آزمایش‌های تجربی

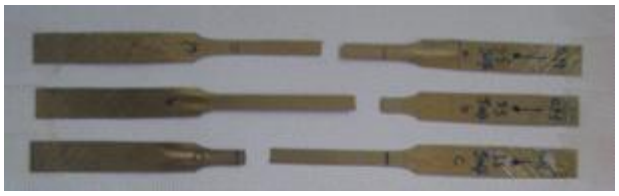
الگوی تکرارشونده نمونه‌ای که به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است در شکل 3 نشان داده شده است. این الگو دارای پروفیل بسیار دقیق و پیچیده و با اندازه‌های بسیار کوچک است. هندسه پیچیده و فاصله اندکی که بین پین‌های این هندسه وجود دارد، شکل‌دهی این صفحات را دشوار می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور کاهش زمان و هزینه ساخت قالب، از تعداد محدودی پین و یا حفره استفاده شده است. از طرف دیگر به‌منظور بررسی اثر متقابل پین‌های اطراف بر روی یکدیگر و نزدیک بودن رفتار شکل‌دهی نمونه‌های آزمایشگاهی با نمونه واقعی، سعی شده تا از یک پین مرکزی به‌همراه چند پین در اطراف آن استفاده شود. در شکل 3، نمایی از قالب محدب ماشینکاری شده مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که به‌دلیل دشوار بودن ایجاد شعاع در لبه تیز پین‌ها و عدم وجود ابزار با شعاع معکوس 0/2 میلیمتر در بازار داخلی، از ابزار فرز فرم با زاویه رأس 90 درجه، به‌منظور ایجاد پخ یکنواخت، با ابعاد 0/2×0/2 میلیمتر، در لبه پین‌ها استفاده شده است.

جنس ورق از فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 به ضخامت 0/11 میلیمتر است. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی، نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد[18] تهیه شده و سپس به کمک دستگاه کشش کشیده شدند (شکل 4). در شکل 5، منحنی تنش-کرنش حقیقی حاصل از تست کشش نشان داده شده است.

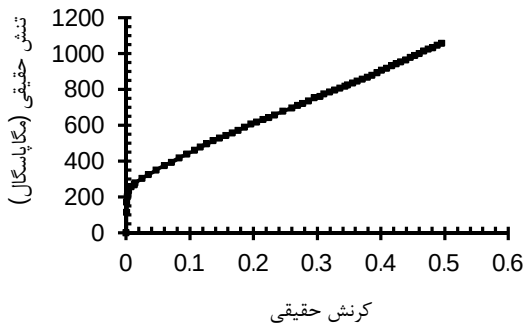
به‌منظور بررسی توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده، نمونه‌ها پس از شکل‌دهی در فشارهای مختلف، به کمک دستگاه وایرکات در



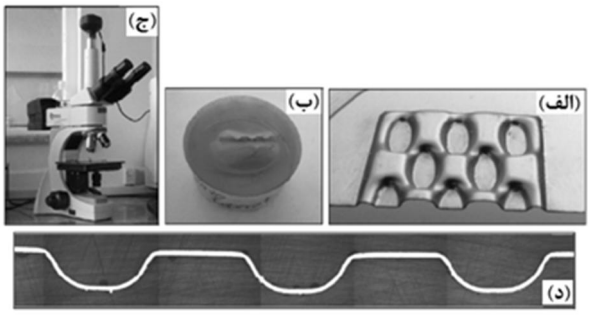
شکل 3 ابعاد قالب محدب ماشینکاری شده (برحسب میلیمتر)



شکل 4 نمونه‌های تست کشش تک‌محوری



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

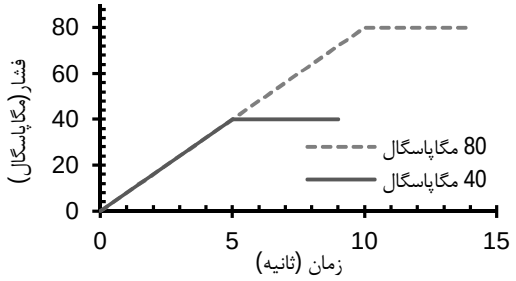


شکل 6 روند آماده‌سازی نمونه‌های شکل داده شده به‌منظور بررسی توزیع ضخامت و پروفیل شکل داده شده، الف- نمونه وایرکات شده در راستای عرضی، ب- نمونه مانت سرد شده، ج- میکروسکوپ نوری، د- تصویر مقطع نمونه شکل داده شده در راستای عرضی

راستای قطری برش داده شدند. سپس، نمونه‌های برش داده شده، مانت و پولیش شدند و در نهایت در زیر میکروسوپ نوری قرار داده شد و توزیع ضخامت و پروفیل نمونه‌های شکل داده شده تعیین شدند. شکل 6 روند این روش و تصویر مقطع نمونه‌ای از صفحات شکل داده شده را نشان می‌دهد.

در شکل 7، واحد اعمال فشار با توان اعمال فشار 140 مگاپاسکال و یک پرس هیدرولیک با ظرفیت 40 تن به همراه قالب شکل‌دهی مورد نظر نشان داده شده است. به‌منظور اعمال فشار برای شکل‌دهی نمونه‌های مورد نظر از مسیر فشار شکل 8 استفاده شد. در نتیجه به کمک قالب موجود در شکل 3 و تجهیزات شکل 7 دو نمونه در سطوح فشار 40 و 80 مگاپاسکال با مسیر فشار شکل 8 شکل داده شدند.

شکل 7 واحد اعمال فشار، پرس و تجهیزات مورد نیاز



شکل 8 نمایی از مسیر فشار اعمالی در آزمایش‌های تجربی

3- شبیه‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس 6.10 استفاده شده است. خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن 304 حاصل از آزمون کشش که در شبیه‌سازی استفاده شده، در جدول 1 آورده شده است. در این شبیه‌سازی ورق همسانگرد فرض شده است. همچنین، رفتار تغییر شکل پلاستیک ماده به کمک رابطه (1) تقریب زده شد[10].

$$\sigma = K\left(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon_p}\right)^n \qquad (1)$$

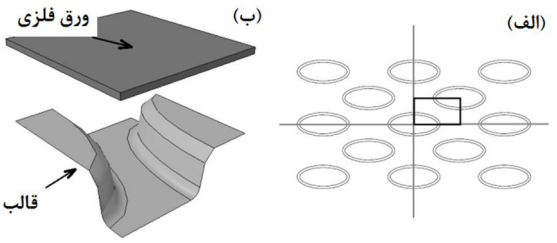
به‌منظور کاهش زمان تحلیل مدل ایجاد شده همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود به‌صورت متقارن محوری درنظر گرفته شده است. جهت دستیابی به دقت بالا در نتایج شبیه‌سازی، ورق به‌صورت سه‌بعدی، شکل‌پذیر و توپر مش‌بندی شده است. همچنین، برای شبکه‌بندی از المان هشت گره‌ای و سه‌بعدی C3D8R با ابعاد مش 0/02 میلیمتر استفاده شده است. سطوح قالب به‌صورت پوسته‌ای مدل شده‌اند و از المان‌های چهار گره‌ای R3D4 از خانواده المان‌های صلب گسسته استفاده شده است. اندازه کلی المان‌های قالب 0/2 میلیمتر است. در ناحیه پخ بالای پین‌ها، دیواره و شعاع گوشه پایین پین‌ها به‌منظور افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی، ابعاد المان‌ها ریزتر و برابر با 0/04 میلیمتر درنظر گرفته شده است. نمایی از قالب محدب گسسته‌سازی شده، که به‌دلیل وجود تقارن به‌صورت دو ربع پین (پین‌های بیضوی و دایروی) مدل شده است، در شکل 10 مشاهده می‌شود. ضریب اصطکاک بین ورق و اجزای قالب 0/1 درنظر گرفته شده است[10].

به‌منظور تعیین مناسب‌ترین حالت شکل‌دهی، اثر متغیرهایی نظیر فشار شکل‌دهی، هندسه پین، فاصله بین پین‌ها بر پروفیل شکل داده شده، درصد پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این رابطه، بررسی‌ها به سه دسته کلی براساس نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ پین‌ها تقسیم می‌شوند؛ دایره کامل ($a/b = 1$)، بیضی ($a/b = 0.7$) و بیضی کشیده ($a/b = 0.4$). در شکل 11، نمایی از نسبت‌های قطر کوچک به قطر بزرگ مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام حالت‌ها سعی شده است تا مساحت مقطع پین‌ها (A) ثابت بماند، به‌نحوی که قطر موثر پین (S) ثابت و برابر 3 در نظر گرفته شده است. در

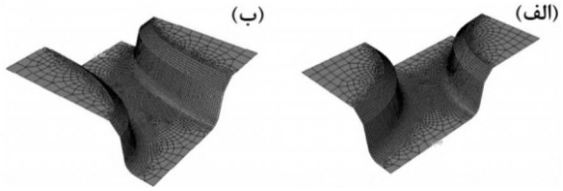
جدول 1 خواص مکانیکی ورق فولادی زنگ نزن 304

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

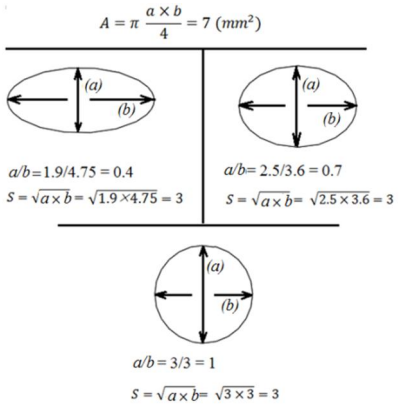
هریک از این سه دسته فوق، از سه فاصله بین پین (W) 0/8، 1/2 و 2/4 میلیمتر استفاده شده است. از آنجایی که عمق کلیه حالات‌ها (H) 0/8 ثابت درنظر گرفته شده است، بنابراین، به‌منظور بی‌بعد سازی، این پارامتر به‌صورت نسبت‌های عمق به عرض (h/w) مختلف به‌ترتیب 1، 0/67، 0/33 درنظر گرفته شده است. در شکل12، نمایی از کلیه حالت های مورد بررسی مشاهده می‌شود.



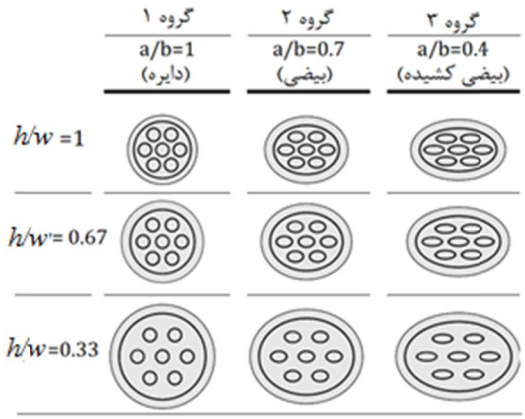
شکل 9 (الف) نمای شماتیک الگوی پینی به همرا خطوط تقارن هندسی، (ب) نمایی از مدل شبیه‌سازی شده قالب محدب مربوط به ناحیه مستطیل سیاه رنگ شکل (الف)



شکل 10 مدل کلی پین، الف) دایروی، ب) بیضوی



شکل 11 نمایی از سه دسته مختلف پین دایره، بیضی و بیضی کشیده



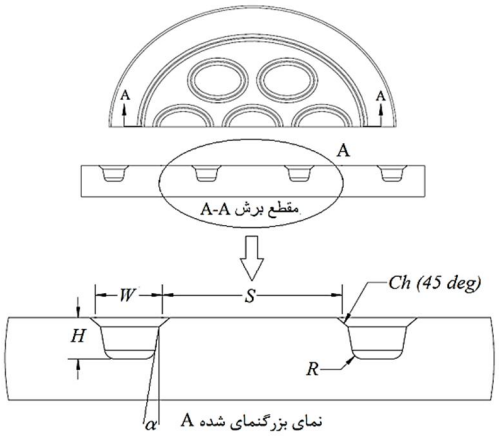
شکل 12 حالت‌های مختلف مورد بررسی در شبیه‌سازی از نظر هندسه پین (a/b) و نسبت عمق به عرض (h/w)

همان‌طور که در شکل 13 مشخص است، زاویه دیواره (α) در همه موارد 10 درجه[۹،13]، و ابعاد پخ لبه پین‌ها (Ch) 0/2×0/2 میلیمتر و شعاع پایینی پین‌ها (R) 0/2 میلیمتر، ثابت درنظر گرفته شده است. مقادیر مختلف پارامترهای مورد بررسی در جدول 2 آورده شده است.

در این پژوهش، درصد نازک‌شدگی مطابق معادله (2) تعریف شده است:

$$\text{درصد نازک شدگی} = \frac{\text{ضخامت نازکترین نقطه} - \text{ضخامت اولیه}}{\text{ضخامت اولیه}} \times 100 \qquad (2)$$

که منظور از نازک‌ترین ضخامت همان ضخامت بحرانی‌ترین نقطه از صفحه شکل داده شده است که در شکل 14 مشاهده می‌شود. به‌دلیل هندسه سه-بعدی الگوی پینی (بر خلاف هندسه دوبعدی الگوی شیاری) تعیین درصد پرشدگی دشوارتر می‌شود. به‌صورت تجربی مشاهده شده است که در الگوهای پینی، بحرانی‌ترین ناحیه از قطعه به‌منظور پرشدگی، مربوط به ناحیه ایست که کمترین فاصله بین پین‌ها وجود دارد. بنابراین، در این پژوهش، به‌منظور تعیین درصد پرشدگی، نواحی بحرانی اشاره شده بررسی شده است.



H = 0.8 mm
W = 0.8 – 1.2 – 2.4 mm
α =10 deg
R =0.2 mm
Ch =0.2×0.2 mm
S = 3 mm

شکل 13 جزئیات ابعادی پین‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی

جدول 2 مقادیر پارامترهای مختلف به‌منظور بررسی شبیه‌سازی

پارامترهای متغیر	
هندسه پین (نسبت a/b)	1 – 0/7 – 0/4
نسبت عمق به عرض (h/w)	1 – 0/67 – 0/33
سطح فشار اعمال شده (مگاپاسکال)	120 – 100 – 80 – 60 – 40 300 – 250 – 200–160
پارامترهای ثابت	
ابعاد پخ (میلیمتر)	0/2×0/2
شعاع گوشه پایین (میلیمتر)	0/2
ارتفاع پین (میلیمتر)	0/8
قطر موثر پین (میلیمتر)	3

معیار درصد پرشدگی در معادله 3 تعریف شده است که عبارت از مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده (بخش هاشور خورده سمت چپ شکل 14) به مساحت کل حفره قالب (بخش هاشور خورده سمت راست شکل 14) در ناحیه بحرانی است که در شکل14 نشان داده شد.

$$\text{درصد پر شدگی} = \frac{\text{مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \times 100 \qquad (3)$$

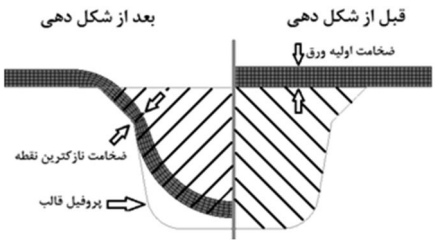
4- نتایج و بحث

4-1- مقایسه پروفیل نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی

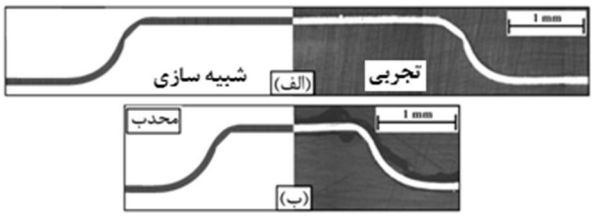
به‌منظور تایید نتایج شبیه‌سازی، نمونه‌هایی در سطوح فشار مختلف (40 و80 مگاپاسگال) براساس مسیر فشار شکل 8 شکل داده شدند. شکل 15 مربوط به نتایج تجربی و شبیه‌سازی پروفیل شکل داده شده در دو راستای طولی و عرضی در سطح فشار80 مگاپاسگال است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد. به‌منظور بررسی دقیق-تر در شکل 16 نمودار پروفیل نمونه‌های شبیه‌سازی و تجربی در راستای عرضی و طولی آورده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در فشار 80 مگاپاسگال با نتایج تجربی همخوانی بسیار خوبی دارند. نتایج شبیه‌سازی مربوط به سطح فشار 40 مگاپاسگال نیز بررسی شد و مشاهده شد که همخوانی مناسبی با نتایج تجربی وجود دارد. پس از حصول اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار شکل‌دهی ورق فلزی در زمینه پروفیل شکل داده شده، به‌منظور بررسی تاثیر سایر پارامترهای این فرآیند نظیر اثر نسبت عمق به عرض (h/w) و اثر هندسه پین (a/b) از نتایج شبیه-سازی استفاده شد.

4-2- درصد پرشدگی

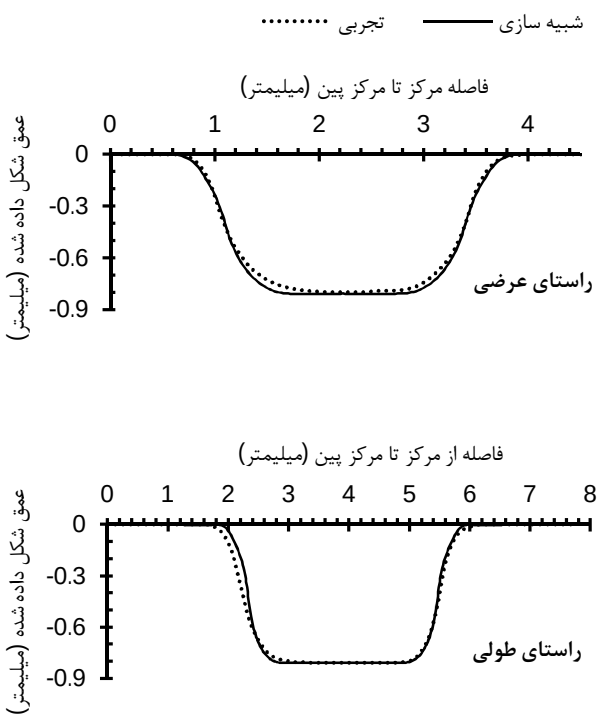
در شکل 17، نتایج شبیه‌سازی مربوط به درصد پرشدگی در هندسه پین (نسبت a/b) و نسبت عمق به عرض (نسبت h/w) مختلف نشان داده شده است. به‌منظور دست‌یابی به نمونه مطلوب، درصد پرشدگی مربوط به هر سه راستای طولی، عرضی و مورب به‌دست آمد و درصد پرشدگی موجود در شکل



شکل 14 نمایی از مساحت پر شده و ضخامت اولیه و نهایی در تعیین درصد پرشدگی و نازک‌شدگی

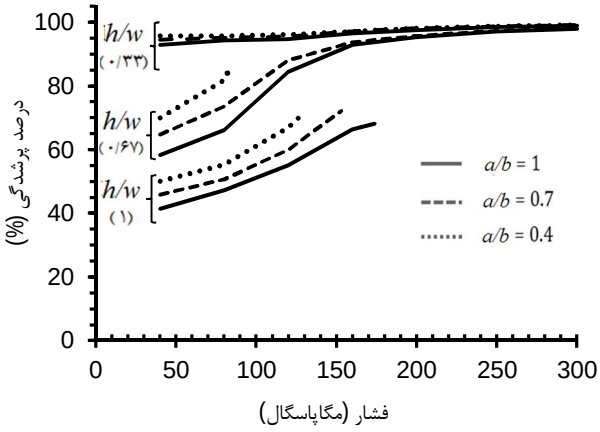


شکل 15 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی توزیع ضخامت و عمق شکل داده شده نمونه‌ها در فشار 80 مگاپاسگال و در راستای الف) طولی، ب)عرضی

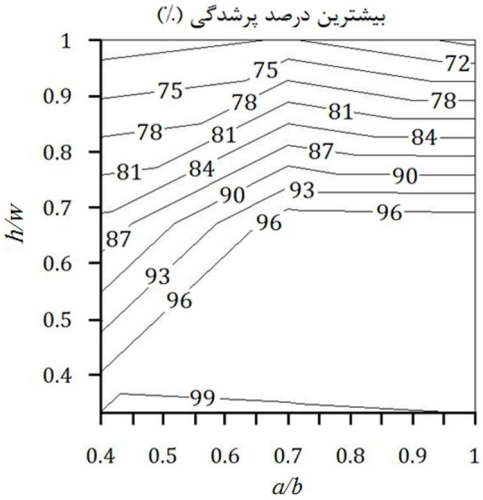


شکل 16 مقایسه منحنی‌های پروفیل شکل داده شده شبیه‌سازی و تجربی در فشار 80 مگاپاسگال در راستای عرضی و طولی

16 مربوط به کمترین (بحرانی‌ترین) درصد پرشدگی از بین سه راستای مختلف است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فشار شکل‌دهی درصد پرشدگی افزایش می‌یابد. رفتار درصد پرشدگی نمونه‌هایی با نسبت عمق به عرض(h/w) یکسان، مشابه هم هستند. همچنین، مشاهده می‌شود که با نسبت عمق به عرض یکسان در یک سطح فشار معین، درصد پرشدگی مربوط به نمونه‌های شکل داده شده در نسبت عمق به عرض 1 برای هر سه هندسه دایره، بیضی و بیضی کشیده و در نسبت عمق به عرض 0/67 برای هندسه بیضی کشیده، به‌دلیل وقوع پارگی در فشارهای پایین و عدم توانای اعمال فشارهای بالاتر، کمتر از میزان مطلوب است. در شکل 18، مشاهده می‌شود که بیشترین درصد پرشدگی‌ها مربوط به نسبت‌های (h/w) کمتر از 0/67 و نسبت‌های (a/b) بیشتر از 0/7 است. همچنین، نمونه‌های شکل داده شده نسبت به پارامتر (h/w) (پارامتر الگو) حساس‌تر هستند.



شکل 17 نتایج شبیه‌سازی درصد پرشدگی در فشارها و نسبت‌های عمق به عرض و هندسه پین مختلف

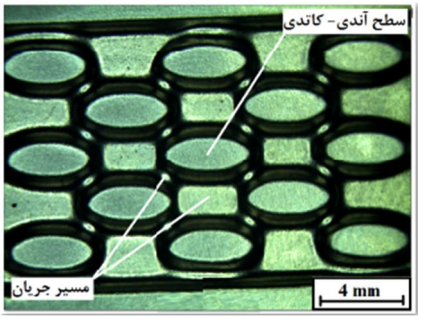


شکل 18 نتایج شبیه‌سازی بیشترین درصد پرشدگی در نسبت‌های عمق به عرض و هندسه پین مختلف.

شکل 19 مربوط به نمونه تجربی شکل داده شده با فشار 80 مگاپاسگال است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نواحی با کمترین فاصله بین پین‌ها که دارای نسبت عمق به عرض (h/w) زیادی هستند به‌خوبی شکل نگرفته اند درصورتی که در نواحی که فاصله بین پین‌ها افزایش می‌یابد یا به‌عبارتی در نسبت‌های عمق به عرض (h/w) کمتر از 0/8، نمونه به‌طور کامل شکل قالب را گرفته است. همان‌طور که در شکل 19 مشاهده می‌شود سطوح آندی-کاتدی نسبت به مسیر عبور جریان کامل‌تر شکل گرفته اند.

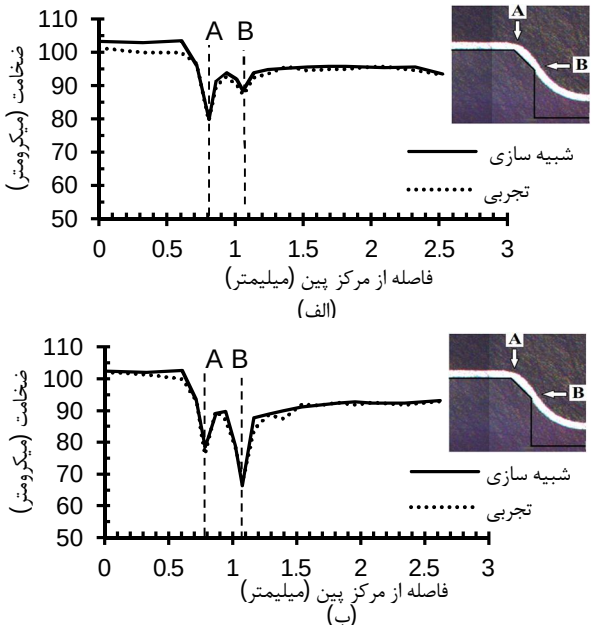
4-3- توزیع ضخامت

شکل‌های 20 و 21 نتایج توزیع ضخامت شبیه‌سازی و تجربی را مورد مقایسه قرار می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه سازی در فشارهای 40 و 80 مگاپاسگال در راستای طولی و عرضی با نتایج تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد. در شکل 20، که مربوط به راستای عرضی می‌باشد، درصد خطای نتایج شبیه‌سازی نسبت نتایج تجربی در فشار 40 مگاپاسگال 3/62% و در فشار 80 مگاپاسگال 2/55% است. همچنین، در شکل 21 که مربوط به راستای طولی است، درصد خطای نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی در فشار 40 مگاپاسگال 4/3% و در فشار 80 مگاپاسگال 6/76% است. نتایج مربوط به سایر راستاها نیز به‌دست آمد و مشاهده شد که با نتایج تجربی مربوطه همخوانی دارند، ولی، به‌دلیل اهمیت بالای راستای طولی و عرضی، در اینجا فقط نتایج مربوط به آن‌ها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های شکل داده شده همواره دو نقطه کمینه وجود دارد که با نام‌های A و B معرفی شده است. دلیل این رفتار وجود پخ در لبه پین‌ها است که در شکل 22 مشاهده می‌شود.

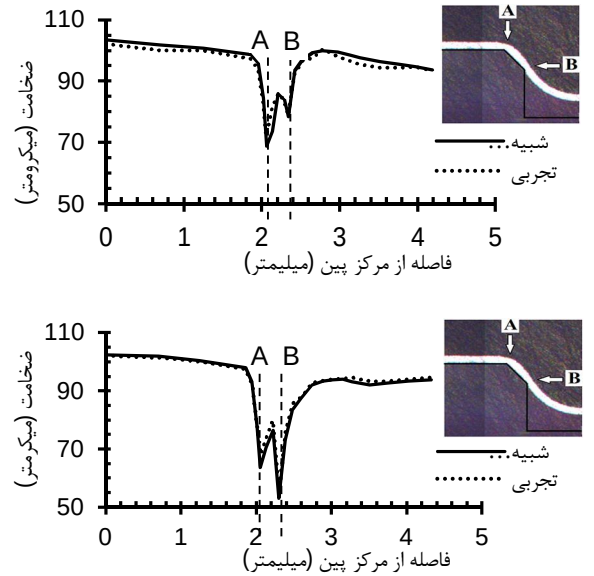


شکل 19 تصویر با بزرگنمایی 8 برابر از نمونه شکل داده شده به روش محدب

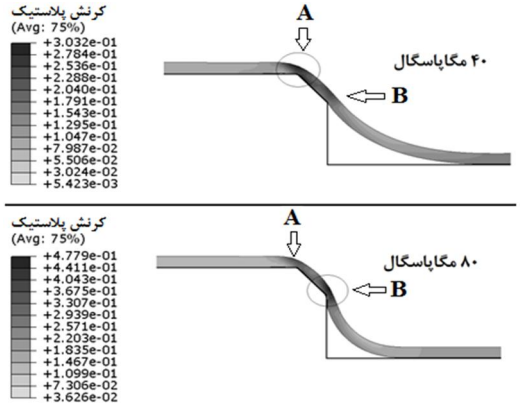
در شکل های 20- (الف) و 21- (الف) در فشار 40 مگاپاسگال، ضخامت کمینه اول (ناحیه A) بحرانی‌تر از کمینه دوم (ناحیه B) است. در شکل 22، نیز مشاهده می‌شود که تمرکز کرنش پلاستیک بیشتر بر روی لبه بالایی پخ (ناحیه A) است. همان‌طور که در شکل 22 مشاهده می‌شود، دلیل این امر شکل نگرفتن کامل ورق است که باعث تماس ورق تنها با لبه بالایی پخ (ناحیه A) است. با افزایش فشار از 40 به 80 مگاپاسگال در شکل‌های 20- (ب) و 21- (ب) مشاهده می‌شود که ضخامت درکمینه دوم (ناحیه B) بحرانی‌تر از کمینه اول (ناحیه A) شده است. این رفتار در شکل 22 به‌وضوح مشاهده می‌شود که تمرکز کرنش پلاستیک از لبه بالا به لبه پایین منتقل شده است. به‌دلیل شکل‌گیری کامل‌تر نمونه، ورق با لبه پایینی (ناحیه B) تماس پیدا کرده و کمینه دوم شکل می‌گیرد.



شکل 20 مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌های شکل داده شده در راستای عرضی در فشار، (الف) 40 مگاپاسگال، (ب) 80 مگاپاسگال



شکل 21 مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت شبیه‌سازی و تجربی نمونه‌های شکل داده شده در راستای طولی در فشار ، (الف) 40 مگاپاسگال، (ب) 80 مگاپاسگال



شکل 22 نتایج شبیه‌سازی مربوط به کرنش پلاستیک در ناحیه پخ لبه در فشارهای 40 و 80 مگاپاسگال

4-4- درصد نازک‌شدگی

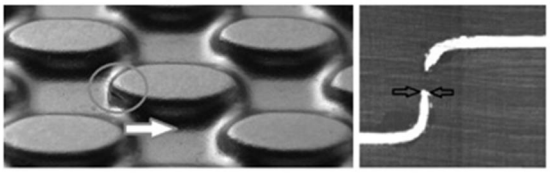
به‌منظور تعیین محدوده وقوع پارگی، ضخامت محل وقوع پارگی در نمونه شکل داده شده تعیین و با ضخامت اولیه ورق مقایسه شد. در نتیجه مشاهده شد که پارگی در نقطه‌ای با ضخامت حدود 55 میکرومتر یا به عبارتی بنا به معادله (2)، در درصد نازک‌شدگی٪50 رخ می‌دهد که در جدول 3 بیان شده است. در شکل 23، نمایی از محل پارگی در نمونه پین بیضوی مشاهده می‌شود. در بررسی‌های شبیه‌سازی، فشار تا حدی که ورق به درصد حدی نازک‌شدگی (50 درصد نازک‌شدگی) برسد افزایش می‌یابد که این فشار برابر با 300 مگاپاسگال است.

شکل 24 مربوط به نتایج شبیه‌سازی درصد نازک‌شدگی نمونه‌هایی با پین‌های دایروی، بیضوی با نسبت (a/b) (0/7) و (0/4) و با نسبت‌های عمق به عرض 1، 0/67 و 0/33 هستند. در این شکل نتایج درصد نازک‌شدگی نمونه‌های شکل داده شده در نسبت‌های عمق به عرض یکسان به‌طور مجزا نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی با نسبت عمق به عرض یکسان رفتار تقریبا مشابهی از خود نشان می‌دهند. همچنین، در کلیه نمونه‌ها با کاهش نسبت (a/b)، رفتار نازک‌شدگی بحرانی‌تر و احتمال پارگی در سطوح فشار کمتر افزایش می‌یابد. رفتار نمودارهای شکل 24 با یکدیگر متفاوت هستند. دلیل این تفاوت نسبت عمق به عرض مختلف نمودارهای (الف)، (ب) و (ج) است. در نمودار شکل 24- (الف) به دلیل وجود نسبت عمق به عرض بالا (h/w=1)، نمونه به‌خوبی شکل نگرفته و ورق به کف قالب تماس پیدا نکرده، در نتیجه نازک‌شدگی به‌صورت تقریبا یکنواخت افزایش می‌یابد. در شکل 24- (ب) نمودار درصد نازک‌شدگی رفتار نمایی از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر تماس ورق با کف قالب در فشار حدود 160 مگاپاسگال و در نتیجه کشیدگی کمتر ورق و متعاقب آن کندتر شدن روند نازک‌شدگی است، اما در نمودار شکل 24- (ج) تغییرات درصد نازک‌شدگی تقریبا یکنواخت بوده و با افزایش فشار درصد نازک‌شدگی به میزان کمی تغییر می‌کند. این اتفاق به‌دلیل کم بودن نسبت عمق به عرض (h/w=0.33) است، چون با کاهش این نسبت، در سطوح فشار پایین نمونه تقریبا شکل قالب را به‌خود گرفته و دیگر با افزایش سطح فشار اعمالی کشیدگی چندانی در ورق اتفاق نیافتاده و به‌دنبال آن ضخامت چندان کاهش نمی‌یابد. شکل 25 مربوط به نتایج پرشدگی نمونه‌های شبیه‌سازی است و نشان‌دهنده صحت توضیحات صورت گرفته است.

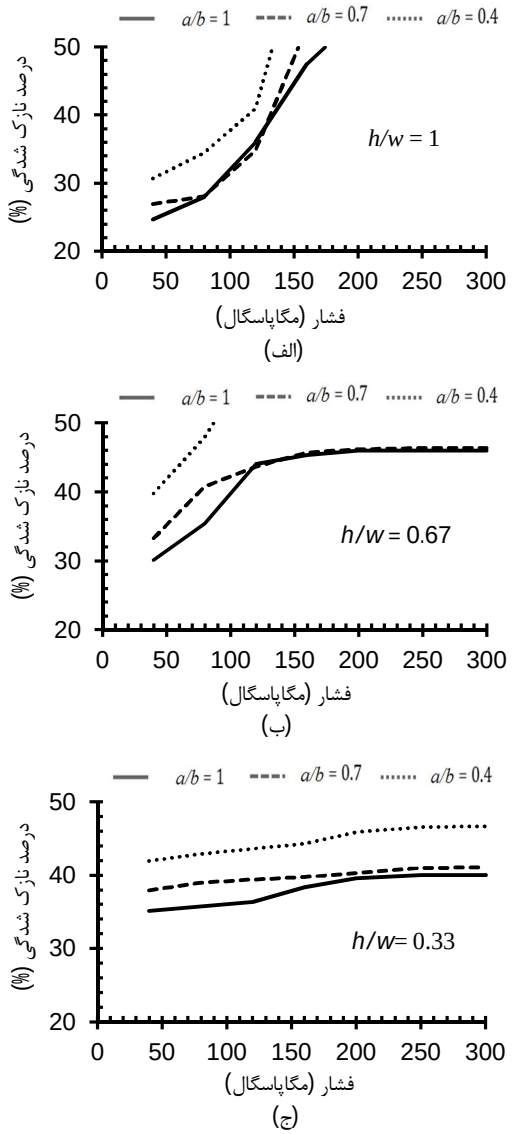
جدول 3 اندازه ضخامت بحرانی نمونه در لحظه پارگی

ضخامت بحرانی در لحظه پارگی ورق (میکرومتر)	درصد نازک‌شدگی
55 میکرومتر	50%

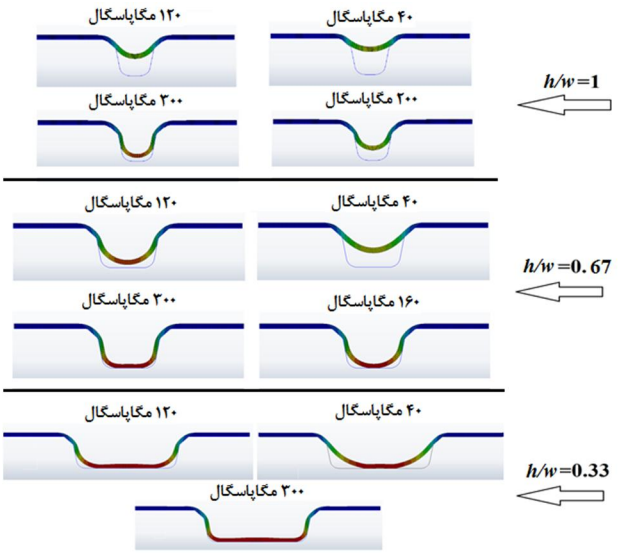
به‌منظور بررسی بیشترین درصد نازک‌شدگی در نمونه‌های شکل داده شده، نتایج شبیه‌سازی‌ها در درصد پرشدگی 95% درنظر گرفته شد که در شکل 26 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر نسبت عمق به عرض رفتار بیشترین درصد نازک‌شدگی تغییر می‌کند. درصورتی که با تغییر هندسه پین‌ها تغییری در رفتار بیشترین درصد نازک‌شدگی مشاهده نمی‌شود. حالت‌هایی که در آن‌ها پیش از رسیدن به این درصد پرشدگی پارگی رخ داده با ستون سفید تو خالی نشان داده شده است. در نمونه‌های با



شکل 23 نمایی از محل وقوع پارگی در نمونه شکل داده شده



شکل 24 نتایج شبیه‌سازی درصد نازک‌شدگی نمونه‌ها در فشارهای مختلف

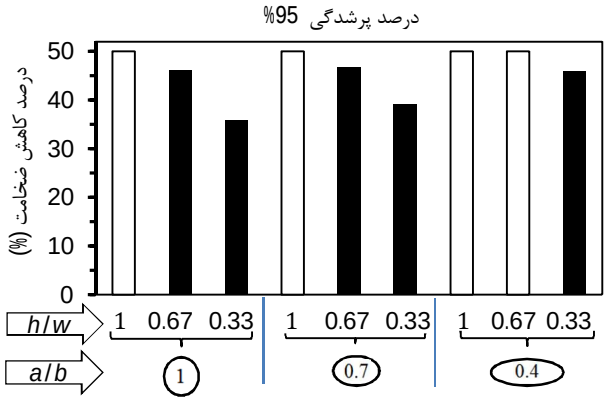


شکل 25 نمایی از نتایج شبیه‌سازی عمق پرشدگی برای نمونه‌های دایروی با زاویه دیواره 10درجه، ابعاد پخ 0/2 و نسبت عمق به عرض 1، 0/67 و 0/33

پین بیضوی کشیده، تنها نسبت (h/w)0/33 است که در درصد پرشدگی 95% پارگی رخ نداده است. همچنین، در نمونه‌هایی با پین دایروی و بیضوی با نسبت (0/7)، در نسبت های (h/w) 0/67 و 0/33، پارگی رخ نداده و نمونه سالم به‌دست می‌آید. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش نسبت (a/b) و کاهش نسبت (h/w) درصد نازک‌شدگی کاهش یافته و نمونه‌های مطلوب‌تری به‌دست می‌آید.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 304 با ضخامت 0/11 میلیمتر با الگوی پینی تکرارشونده به کمک فرایند هیدروفرمینگ در قالب محدب، پارامترهای مختلفی نظیر سطح فشار اعمالی، هندسه پین (نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ) و نسبت عمق به عرض تغییر داده شده و نتایجی همچون پروفیل، درصد پرشدگی، توزیع ضخامت و درصد نازک‌شدگی نمونه‌های شکل داده شده به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شدند. بدین منظور ابتدا در چند حالت مختلف تست‌های تجربی به عمل آمد و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. پس از تایید صحت نتایج شبیه‌سازی در ادامه از نرم‌افزار المان محدود آباکوس 6.10



شکل 26 نتایج درصد نازک‌شدگی مربوط به نمونه‌های شبیه‌سازی شده در نسبت‌های (h/w) و (a/b) مختلف در درصد پرشدگی 95%

به‌منظور بررسی حالت‌های مختلف استفاده شد. نتایج به‌دست آمده عبارت‌اند از:

- در بحث پروفیل شکل داده شده مشاهده شد که سطوح آندی-کاتدی نسبت به مسیر عبور جریان کامل‌تر شکل گرفتند (سطوح آندی-کاتدی در عملکرد صفحات دو قطبی فلزی نقش بسزایی دارند). همچنین، در نواحی که نسبت عمق به عرض بیشتر از 0/8 است کانال‌های عبور جریان به‌خوبی شکل گرفتند.
- در بحث درصد نازک‌شدگی و درصد پرشدگی مشاهده شد که به‌طور کلی نمونه‌هایی با الگوی یکسان (نسبت عمق به عرض h/w یکسان) رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند.
- با کاهش نسبت عمق به عرض(h/w) تغییرات درصد پرشدگی با روند کندتری نسبت به تغییرات فشار شکل‌دهی افزایش می‌یابد.
- به‌طورکلی در نسبت‌های عمق به عرض (h/w) 0/67 و کمتر درصد پرشدگی مربوط به نمونه‌های شکل داده شده مناسب‌تر هستند.
- از بین حالت‌های مختلف بررسی شده، برای پین‌های دایروی و بیضوی با نسبت (a/b) 0/7 نمونه‌هایی با نسبت عمق به عرض 0/33 و 0/67 و برای پین بیضوی با نسبت (a/b) 0/4 تنها نمونه با نسبت عمق به عرض 0/33 دارای درصد پرشدگی و نازک شدگی مطلوب هستند.

6- مراجع

[1] S. Mahabunphachai, *A hybrid hydroforming and mechanical bonding process for fuel cell bipolar plates,* PhD Thesis, Mechanical Engineering, The University of Michigan, 2008.

[2] H. Blunk, D. J. Lisi, Y. E. Yoo, C. L. Tucker, Enhanced conductivity of fuel cell plates through controlled fiber orientation, *AIChE J.*, Vol. 49 , pp. 18–29, 2003.

[3] A. Muller, P. Kauranen, A. von Ganski, B. Hell, Injection moulding of graphite composite bipolar plates, *Journal of Power Sources,* Vol. 154, pp. 467–471, 2006.

[4] 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,* PhD Thesis, Mechanical Engineering, Virginia Commonwealth University, May 2012.

[5] J. C. Hung, T. C. Yang, K. C. Li, Studies on the fabrication of metallic bipolar plates-using micro electrical discharge machining milling, *Journal of Power Sources,* Vol. 196, pp. 2070–2074, 2011.

[6] Y. M. Lee, S. J. Lee, C. Y. Lee, D. Y. Chang, The multi physics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process, *Journal of Power Sources,* Vol. 193, pp. 227–232, 2009.

[7] A. Heinzel, F. Mahlendorf, C. Jansen, *Bipolar Plates,* University of Duisburg–Essen, Duisburg, Germany: Elsevier, 2009.

[8] R. T. Backes, A. M. Herring, J. R. Berger, J. A. Turner, H. Wang, Evaluation of stamping methods for stainless steel bipolar plates using finite element analysis, *Journal of material Processing Technology,* Vol. 171, pp. 567-574, 2009.

[9] S. Mahabunphachai, Ö. N. Cora, M. Koc, Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources,* Vol. 195, pp. 5269–5277, 2010.

[10] L. Peng, D. Liu, P. Hu , X. Lai , J. Ni, Fabrication of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell by flexible forming process-numerical simulations and experiments, *Journal of Fuel Cell Science and Technology,* Vol. 7 / 031009-1, pp. 1-9, JUNE 2010.

[11] M. Koç, S. Mahabunphachai, F. Dundar, PEMFC metallic bipolar plates-effect of manufacturing method on corrosion resistance, *ECS Transactions,* Vol. 25, No. 1, pp. 1773-1782, 2009.

[12] M. Balali-Osia, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorgi, Forming metallic micro-feature bipolar plates for fuel cell using combined hydroforming and stamping processes, *Iranica Journal of Energy & Environment ,* Vol. 4, No. 2, pp. 87-94, 2013.

[13] M. Koc, S. Mahabunphachai, Feasibility investigations on a novel micro-manufacturing process for fabrication of fuel cell bipolar plates: Internal pressure-assisted embossing of micro-channels with in-die mechanical bonding, *Journal of Power Sources,* Vol. 172, pp. 725–733, 2007.

[14] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A.H. Gorji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Journal of Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (In Persian)

[15] R. Ghafori-Ahangar, F. Javanrodi, M. Pakbaz, Effect of hydroforming deep drawing parametersand comparing with traditional deep drawing process by finite element method, *Journal of Tarbiat Modares,* Vol. 38, pp. 69-86, 2008. (In Persian)

[16] J. C. Hung, C. C. Lin, Fabrication of micro-flow channels for metallic bipolar plates by a high-pressure hydroforming apparatus, *Journal of Power Sources,* Vol. 206, pp. 179-184, 2012.

[17] J. Lobato, P. Canizares, M. A. Rodrigo, F. J. Pinar, D. Úbeda, Study of flow channel geometry using current distribution measurement in a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell, *Journal of Power Sources,* Vol. 196, pp. 4209–4217, 2011.

[18] ASTM-E 8M- 04 (metric) - page 3-Fig 1.