



Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Geometrical Parameters on the Springback of Metallic Bipolar Plates in the Stamping Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ahmadi Khatir F.¹ MSc,
Barzegari M.^{*2} PhD

How to cite this article

Ahmadi Khatir F, Barzegari M. Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Geometrical Parameters on the Springback of Metallic Bipolar Plates in the Stamping Process. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(11):2617-2628.

ABSTRACT

Today, the use of metallic bipolar plates in the fuel cell industry has attracted the attention of many researchers due to its much lower cost than thick graphite plates produced by machining. The best method for the production of metallic bipolar plates is the forming process. Among the different forming methods, the stamping process has a higher production rate, simpler process, and lower production cost. One of the major problems in the formation of the metallic bipolar plates is the springback of the sheet after forming, which causes distortion and non-uniformity in the formed channels. In this study, the effects of geometrical parameters such as draft angle, corner radius, depth of the channel, and process parameter such as lubricant on filling a profile as well as springback of a formed sheet made of stainless steel 304 with a thickness of 0.1mm were investigated. For this purpose, the simulation was performed using ABAQUS finite element software and the results were verified by experimental analysis. Then the outputs were evaluated by changing the input parameters in the simulation. The results showed that the draft angle and channel width had the most influence on the springback value of the formed plates. The results related to the process parameter such as the lubricant effect showed that the springback value is almost independent of the lubricant parameter. However, in quite equal conditions, the stress distribution in the corners and channel walls is much more uniform when using the lubricant.

Keywords PEM Fuel Cell; Metallic Bipolar Plate; Stamp Forming; Springback, ABAQUS Simulation

CITATION LINKS

- [1] Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack
- [2] Grey-box modeling and model predictive control for cascade-type PEMFC. Energy
- [3] Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field
- [4] PEM fuel cells: Theory and practice
- [5] A novel cooling flow field design for polymer electrolyte membrane fuel cell stack
- [6] Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H₂/O₂ PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator
- [7] Quasi-three-dimensional dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell with consideration of two-phase water transport through a gas diffusion layer
- [8] Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing
- [9] A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection
- [10] Study of different aluminum alloy substrates coated with Ni-Co-P as metallic bipolar plates for PEM fuel cell applications
- [11] Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process
- [12] Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell-numerical simulation and experiments
- [13] Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates
- [14] Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for producing of metallic bipolar plates
- [15] Investigation of lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process
- [16] Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through rubber pad forming process
- [17] Stamping and springback of PEMFC metal bipolar plate
- [18] Evaluation of forming quality and spring-back of fuel cell metallic bipolar plate during stamping via simulations
- [19] Effect of manufacturing conditions on the corrosion resistance behavior of metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells
- [20] Metal forming: Mechanics and metallurgy

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²North Institute of Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Fereydoonkenar, Iran

*Correspondence

Address: Malek Ashtar University of Technology, Malek-Ashtar Avenue, Fereydoonkenar, Mazandaran, Iran.
Postal Code: 4751933366.
Phone: +98 (11) 35671601
Fax: +98 (11) 35671600
barzegari@mut.ac.ir

Article History

Received: March 02, 2020

Accepted: September 07, 2020

ePublished: November 14, 2020

شبیه‌سازی و مطالعه تجربی اثر پارامترهای هندسی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی بر پروفیل برگشت فنی در فرآیند شکل‌دهی استمپینگ

فرزاد احمدی‌خطیر MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد مهدی بزرگری PhD

پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

چکیده

امروزه استفاده از صفحات دوقطبی فلزی در صنعت پیل سوختی به دلیل هزینه بسیار پایین‌تر آن نسبت به صفحات ضخیم گرافیتی که با روش ماشین‌کاری تولید می‌شوند، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. بهترین روش برای تولید صفحات دوقطبی فلزی، استفاده از فرآیند شکل‌دهی است. در میان انواع روش‌های شکل‌دهی، فرآیند شکل‌دهی استمپینگ از سرعت تولید بالاتر، سادگی فرآیند و هزینه تولید پایین‌تری برخوردار است. یکی از مشکلات عمده شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی، برگشت فنی ورق بعد از شکل‌دهی است که موجب اعوجاج و عدم یکنواختی در کانال‌های شکل گرفته می‌شود. در این پژوهش تأثیر پارامترهای هندسی همچون ابعاد و زاویه دیواره کانال، شعاع گوشه، عمق کانال و تأثیر پارامتر فرآیندی همچون روانکار بر پروفیل پرشدگی و برگشت فنی ورق شکل‌دهی شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر بررسی شد. به همین منظور، در ابتدا به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس، شبیه‌سازی انجام شد و صحت نتایج به کمک آزمایش‌های تجربی بررسی شد. در ادامه با تغییر پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی، خروجی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که زاویه دیواره و پهنای کانال بیشترین تأثیر را بر مقدار برگشت فنی صفحات شکل‌دهی شده دارند. نتایج در ارتباط با پارامتر فرآیندی چون تأثیر روانکار نشان داد که مقدار برگشت فنی تقریباً مستقل از پارامتر روانکار است، اما در شرایط کاملاً برابر، در حالت استفاده از روانکار، توزیع تنش در گوشه‌ها و دیواره کانال بسیار یکنواخت‌تر است.

کلیدواژه‌ها: پیل سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی فلزی، شکل‌دهی استمپینگ، برگشت فنی، شبیه‌سازی المان محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

نویسنده مسئول: barzegari@mut.ac.ir

مقدمه

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که به‌صورت مستقیم انرژی شیمیایی سوخت را به جریان مستقیم برق تبدیل می‌نماید. تمام فرآیندهای گذار و تولید برق در پیل سوختی بدون دخالت هر گونه جزء متحرک و تنها در یک مرحله انجام می‌شود. واکنش‌دهنده‌های معمول برای پیل‌های سوختی، هیدروژن و اکسیژن هستند. البته، استفاده از این گازها با کمی ناخالصی نیز امکان‌پذیر است [1-4].

پیل سوختی پلیمری یکی از انواع پیل‌های سوختی است که ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل بازده بالا، تولید گازهای گلخانه‌ای کم یا در حد صفر، سادگی و هزینه‌های پایین، نداشتن

قطعات متحرک و عمر طولانی، مازولاریون، بی‌سروصدایی و اندازه و وزن پایین را دارا هستند که باعث جذابیت آنها می‌شود [5-7].

یک مجموعه پیل سوختی از اجزای مختلفی تشکیل شده است که از میان آنها، صفحات دوقطبی از لحاظ حجم و وزن (در حدود ۶۰ تا ۸۰٪) و همچنین هزینه (در حدود ۳۰ تا ۴۵٪) از اهمیت بالایی برخوردار است [8]. صفحات دوقطبی در هر دو سمت خود دارای گذرگاه‌هایی (اصطلاحاً میدان‌های شارش) برای شارش گازهای واکنش‌دهنده و پخش آنها بر روی سطح کاتالیست و همچنین مدیریت حرارت و آب است [4].

نیاز به حداکثر چگالی توان پیل سوختی و حداقل هزینه موجب شده است تا انتخاب جنس و روش تولید صفحات دوقطبی به موضوع بسیار مهمی تبدیل شود [9]. انتخاب جنس، هندسه میدان شارش و توسعه روش‌های ساخت صفحات دوقطبی، نمونه‌هایی از حوزه‌های علمی در شرکت‌ها و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی مرتبط با پیل سوختی مختلف است. از جمله روش‌های تولید صفحات دوقطبی، ماشین‌کاری صفحات کامپوزیت گرافیتی، استمپینگ و هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی، قالب‌گیری صفحات کامپوزیت کربن- پلیمر و کربن- کربن است [8].

در سال‌های اخیر، صفحات دوقطبی فلزی به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی عالی، هزینه پایین و قابلیت ساخت خوب توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [10]. روش‌های ساخت صفحات دوقطبی فلزی به‌طور کلی به دو دسته ماشین‌کاری و شکل‌دهی تقسیم می‌شوند. روش ماشین‌کاری با توجه به زمان‌بر بودن فرآیند و همچنین ضخامت، وزن و هزینه بالا مورد استقبال قرار نگرفته است. در مقابل، صفحات دوقطبی فلزی شکل‌داده‌شده به دلیل ضخامت و وزن کم صفحات و همچنین زمان تولید بسیار کوتاه و هزینه تولید پایین در سال‌های اخیر با استقبال زیادی مواجه شده است.

برای شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آنها شکل‌دهی با لایه لاستیکی، روش هیدروفرمینگ و استمپینگ است.

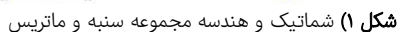
جوی و همکاران [11]، به دلیل پیچیدگی هندسی و عدم امکان ساخت صفحات دوقطبی فلزی در یک مرحله، فرآیند استمپینگ چندمرحله‌ای (شامل عملیات حرارتی با هدف بهبود شکل‌پذیری) را بررسی نمودند. نتایج کار این محققان نشان داد که عمق پرشدگی صفحات تولیدشده از شکل‌دهی دومرحله‌ای ۴۲٪ افزایش یافته است.

هو و همکاران [12]، شکل‌دهی صفحات دوقطبی با روش استمپینگ را مطالعه نمودند. آنها به کمک شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی به بررسی توزیع ضخامت نمونه پرداختند. همچنین، ابعاد کانال‌های جریان، سرعت پانچ، شعاع گوشه و زاویه دیواره را مورد بررسی قرار دادند و با نتایج تجربی مقایسه نمودند.

ماهاپانفاجای و همکاران [13]، اثر فرآیندهای شکل‌دهی استمپینگ و هیدروفرمینگ را بر شکل‌پذیری و زبری سطح صفحات دوقطبی فلزی بررسی کردند. نتایج کار نشان داد که قابلیت تکرارپذیری فرآیند

این بخش به شرح تجهیزات آزمایشگاهی برای شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با الگوی مارپیچ موازی به‌کمک فرایند شکل‌دهی استمپینگ می‌پردازد. قالب‌های لازم جهت شکل‌دهی این صفحات، جنس ورق و نحوه به‌دست‌آوردن خواص مکانیکی آن توضیح داده شده است. نحوه اندازه‌گیری خروجی‌های مهمی که مورد بررسی قرار گرفته (پروفیل پرشدگی کانال و دنده و همچنین میزان برگشت فنی ورق) در این بخش بررسی می‌شود.

نقشه اولیه قطعه‌ای که مورد مطالعه قرار گرفته است در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است، قطعه مورد نظر صفحه دوقطبی با الگوی شیری ماریچ موازی با الگوی تکرارشونده را نشان می‌دهد. در جدول ۱ پارامترهای هندسی و ابعاد و اندازه صفحه دوقطبی مورد نظر ذکر شده است.

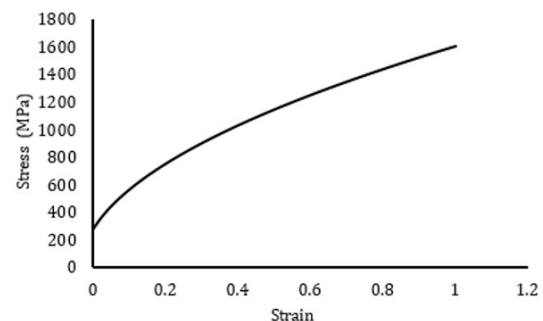


مطالعات نشان می‌دهد که فرآیند شکل‌دهی استمپینگ نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی دارای مزایایی همچون سرعت تولید بالا، هزینه تولید پایین و سادگی در نصب و راه‌اندازی است [19].

پارامتر هندسی	مقدار (میلی‌متر)
عمق کانال (h)	۰/۶۵
زاویه دیواره کانال (α)	۱۰°
شعاع سر دنده (R)	۰/۲
شعاع سر کانال (r)	۰/۲
پهنای کانال (W)	۰/۴۸۲
پهنای دنده (S)	۱/۲
ضخامت ورق (t)	۰/۱

خواص مکانیکی ورق

از ورق فولادی زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور تعیین خواص مکانیکی این ورق از آزمون کشش تک‌محوره استفاده شد. نمودار ۱ منحنی تنش-کرنش حقیقی این ورق را نشان می‌دهد.



نمودار (۱) منحنی تنش-کرنش ورق ۳۰۴

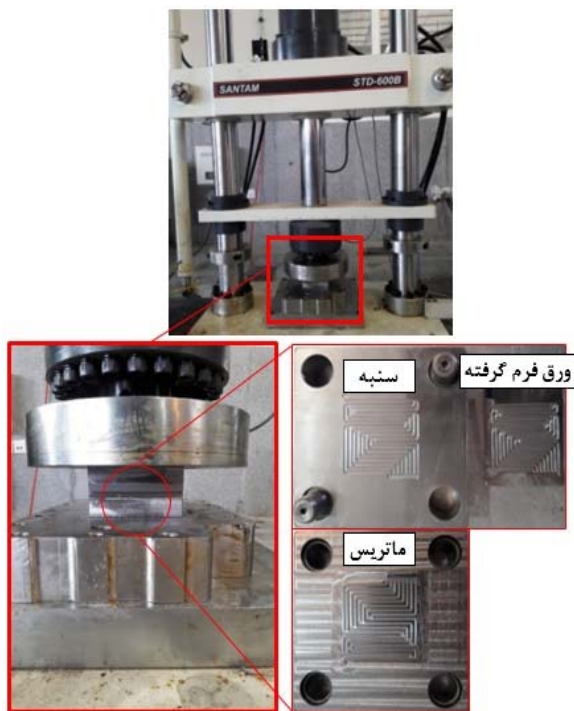
روانکار

در فرآیند شکل‌دهی استمپینگ از دو قالب صلب برای شکل‌دهی استفاده می‌شود که احتمال پارگی در ورق محتمل است. لذا وجود یک‌لایه روانکار موجب سهولت در جریان‌یافتن ورق به داخل کانال‌های صفحه دوقطبی می‌شود. روانکار استفاده شده اولاً باید ضخامت بسیار کمی داشته باشد تا مانع از پرشدگی ورق در کانال‌های قالب نشود. دوماً مقاومت کششی بالایی داشته باشد تا در حین کشش پاره نشود. لذا از روانکار فیلم جامد نایلون پلی‌پروپیلن استفاده شده است. علت استفاده از این روانکار، ضخامت بسیار کم آن و همچنین مقاومت کششی بسیار بالا بوده که موجب می‌شود همراه با ورق به درون کانال‌ها جریان یابد، بدون آنکه پارگی در داخل آن رخ دهد.

مراحل انجام آزمایش

نحوه عملکرد فرآیند شکل‌دهی استمپینگ به این صورت است که در ابتدا دو کفه قالب به‌طور کامل با محلول شوینده تمیز شده تا از کثیفی‌ها و گردوغبار عاری شود. با قراردادن ورق بین سنبه و ماتریس، سنبه به کمک میله راهنماها بر روی ماتریس می‌نشیند. مجموعه مونتاژی به مجموعه انتقال نیرو (دستگاه پرس) منتقل شده و عمل شکل‌دهی انجام می‌شود. با توجه به اینکه هدف

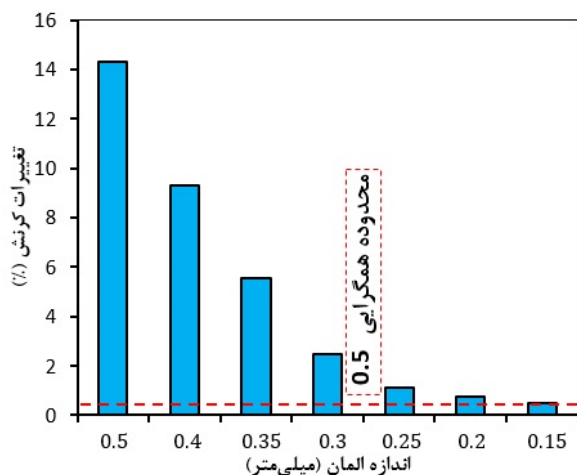
اندازه‌گیری دقیق پروفیل پرشدگی و میزان برگشت فنری ورق شکل‌دهی شده است، لذا باید از یک پرس هیدرولیکی با دقت بسیار بالا که مجهز به سیستم اندازه‌گیری نیرو است، استفاده کرد. به همین منظور از پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰ تن (شرکت سنتام؛ ایران) استفاده شده است. شکل ۲ نمایی از پرس که مجموعه قالب بر روی آن سوار شده است، را نشان می‌دهد. از مزیت‌های این پرس می‌توان به اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی اعمالی به مجموعه قالب با اندازه‌گیری مقدار نیروی پرس نام برد. حد جابه‌جایی برای شکل‌گیری صفحه دوقطبی مورد مطالعه به‌صورت تجربی با این دستگاه اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۲) نمایی از پرس هیدرولیکی و مجموعه قالب سوار شده بر روی آن

پس از شکل‌دهی، به منظور ارزیابی پارامترهایی مانند پروفیل پرشدگی و مقدار برگشت فنری، لازم است صفحات تولید شده برش زده شوند. به همین منظور، نمونه‌ها به کمک دستگاه برش سیمی، برش می‌خورند. پس از برش نمونه‌ها، به منظور مشاهده دقیق پروفیل مقطع در زیر میکروسکوپ نیاز است که سطح برش نمونه‌ها صاف و عاری از پلیسه باشد. به همین منظور نمونه‌ها مانت می‌شوند تا عمل سنباده‌زنی و پولیش‌کاری بر روی سطح نمونه‌ها انجام گیرد. بعد از فرآیند آماده‌سازی، پروفیل نمونه‌ها در دستگاه میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود. همچنین از نرم‌افزار اندازه‌گیری که بر روی سیستم کامپیوتر نصب بوده و سیستم کامپیوتر به میکروسکوپ متصل است، برای اندازه‌گیری مقدار برگشت فنری استفاده شده است. در شکل ۳ مراحل آماده‌سازی اندازه‌گیری نشان داده شده است.

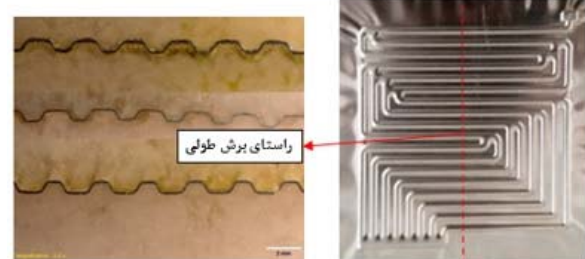
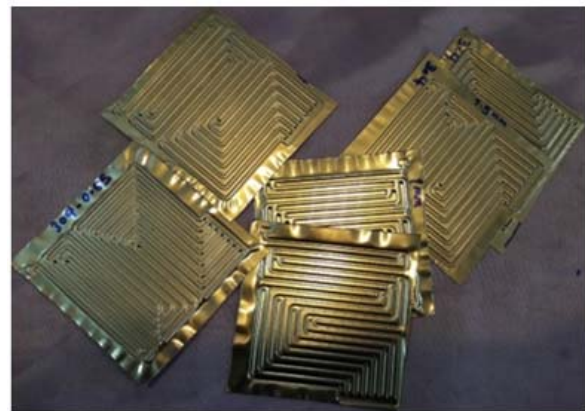
قرار می‌گیرد. به منظور صحت‌سنجی مدل المان محدود، یک قالب با پارامترهای ثابت ساخته شده و نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه و صحت‌سنجی می‌شود. سپس مدل صحت‌سنجی شده برای سایر قالب‌ها با ابعاد مختلف شبیه‌سازی می‌شود. جدول ۲ مقادیر متغیرها را نشان می‌دهد. در شکل ۴ ابعاد و تغییرات هر قالب به‌وضوح نشان داده شده است.



نمودار ۲) تغییرات مقدار کرنش به‌ازای ابعاد المان

جدول ۲) مقادیر متغیرهای هر نمونه آزمایش

شماره آزمون	ابعاد کانال (میلی‌متر)	ابعاد دنده (میلی‌متر)	عمق کانال (میلی‌متر)	زاویه دیواره کانال (درجه)	شعاع گوشه (میلی‌متر)	روانکار
۱	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۳	نایلون پلی‌پروپیلن
۲	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۳	۰/۴۸۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۴	۰/۸۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۵	۰/۹۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۶	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۵	۰/۳	فاقد روانکار
۷	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۵	۰/۳	فاقد روانکار
۸	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۹	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۸۵	۱۰	۰/۳	فاقد روانکار
۱۰	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۲	فاقد روانکار
۱۱	۰/۶۳۲	۱/۲	۰/۶۵	۱۰	۰/۱	فاقد روانکار



شکل ۳) ورق‌های فلزی شکل‌داده شده تحت شرایط برشی مختلف و همچنین راستاهای برش ورق

شبیه‌سازی اجزای محدود

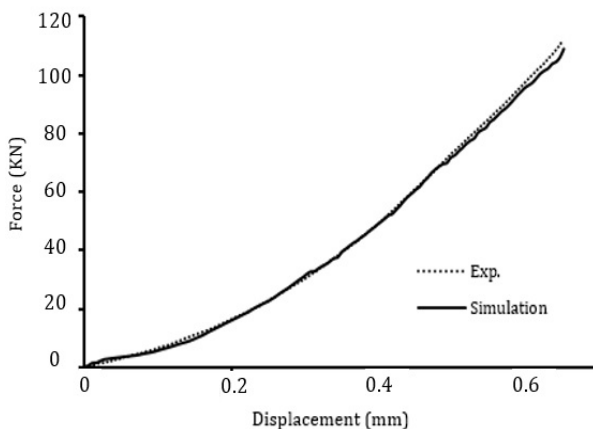
به منظور شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و از مدل سه‌بعدی به منظور شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دوقطبی استفاده شده است. اجزای قالب در فرآیند شکل‌دهی استمپینگ شامل سنبه، ورق و ماتریس است. از آنجایی که در آزمایشات تجربی سنبه و ماتریس هیچ گونه تغییر شکلی ندارند، لذا در شبیه‌سازی به صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند. در آزمون‌های تجربی نحوه شکل‌گیری ورق مورد بررسی است، لذا از مدل سه‌بعدی، شکل‌پذیر و از نوع پوسته‌ای استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از المان‌های مربعی با ابعاد ۰/۱۵ و ۰/۰۶۵ میلی‌متر، به ترتیب برای شبکه‌بندی هندسه ورق و قالب به کار گرفته شدند. روش همگرایی مش به منظور تعیین ابعاد المان‌های ورق به کار گرفته شده و محدوده تغییرات ۰/۵٪ (تغییر مقدار کرنش) به منظور حد همگرایی در نظر گرفته شد. منحنی همگرایی مش در نمودار ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج، المان‌های با ابعاد ۰/۱۵ میلی‌متر گزینه مناسبی برای شبکه‌بندی ورق هستند. لازم به ذکر است که المان‌های R3D4 و S4R به ترتیب برای شبکه‌بندی هندسه ورق و قالب در نظر گرفته شدند.

هدف، بررسی تاثیر پارامترهای همچون ابعاد کانال، عمق کانال، شعاع گوشه، زاویه دیواره و تاثیر روانکار بر روی پارامتر پخش‌دهی عمق کانال و برگشت فنی ورق شکل گرفته است. از آنجایی که تاثیر این پارامترهای ذکر شده به صورت تجربی نیازمند ساخت قالب‌های متعدد و انجام آزمایش‌های متفاوت برای هر قالب است، لذا به دلیل هزینه بسیار بالا در ساخت و انجام آزمایش‌ها، پارامترهای مذکور در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی شده و تاثیر هر پارامتر مورد ارزیابی

اصطکاکی کلمب و از نوع پنالیتی انتخاب شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب اصطکاک براساس صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با نتایج آزمایش‌های تجربی و با استفاده از اندازه‌گیری توزیع ضخامت ورق و مقایسه منحنی نیرو- جابه‌جایی مدل شبیه‌سازی با نمودار مستخرج از دستگاه پرس هیدرولیک (نمودار ۳) محاسبه می‌شود. از این‌رو، با تغییر مقدار ضریب اصطکاک در مدل اجزای محدود، منحنی نیرو- جابه‌جایی و توزیع ضخامت ورق مورد بررسی قرار داده می‌شود تا در نهایت مقدار ضریب اصطکاک تعیین شود. بر این اساس، ضریب اصطکاک مقدار ۰/۲ برای حالت بدون استفاده از روانکار و مقدار ۰/۸ برای حالت با استفاده از روانکار برای تماس بین سطوح محاسبه شده است.

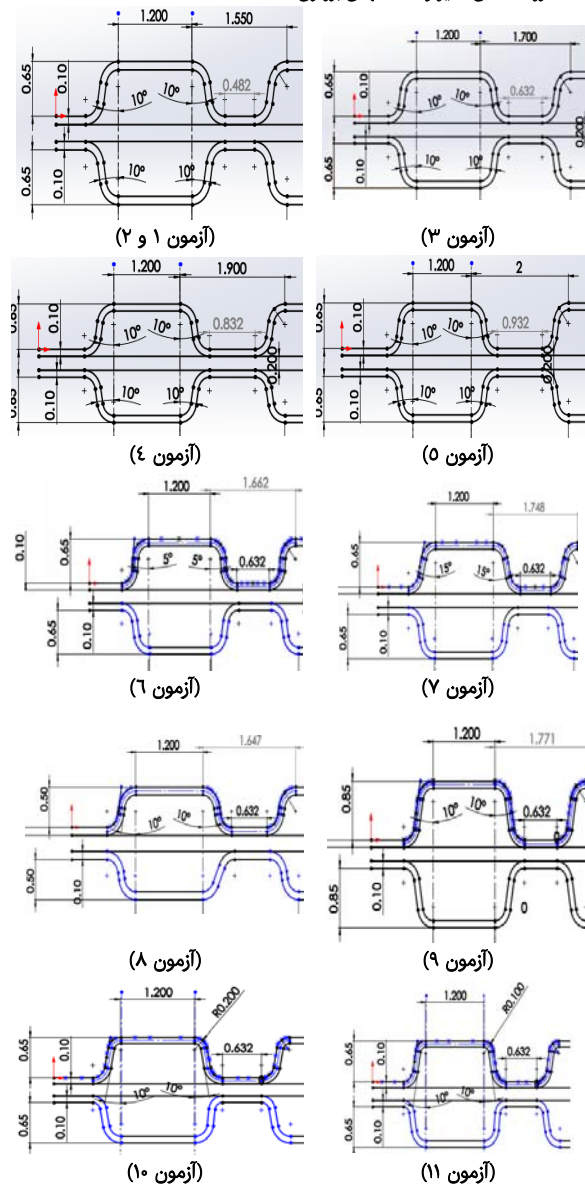
جدول ۳) خواص مکانیکی ورق SS304

مقدار	پارامتر
۲۰۰	ضریب کشسانی (GPa)
۲۷۱	تنش تسلیم (MPa)
۱۵۷۶	ضریب استحکام (MPa)
۰/۵۱	توان کرنش سختی
۰/۰۳۱۵	ϵ_0



نمودار ۳) منحنی نیرو- جابه‌جایی تجربی و شبیه‌سازی صفحه دوقطبی فلزی SS304

به‌منظور مشاهده پارگی در صفحات دوقطبی شبیه‌سازی شده لازم است تا حد پارگی ورق مشخص شود. با توجه به اینکه از آزمایش‌های تجربی استفاده شده است، لذا ورق شکل‌دهی شده که پارگی در آن رخ داده است، در ابتدا برش و مانت شده و در نهایت پس از سنباده‌زنی و پولیش‌کاری، سطح مقطع آن در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت ورق در ناحیه پارگی با دقت بالا به کمک نرم‌افزار اندازه‌گیری که بر روی سیستم متصل به میکروسکوپ نصب است، اندازه‌گیری شده است. این مقدار ضخامت اندازه‌گیری شده معیاری برای پارگی ورق در شبیه‌سازی است. به‌طوری که ضخامت ورق در کمتر از مقدار ۰/۶۵ میلی‌متر نشان‌دهنده پارگی در صفحات شکل‌داده شده است.

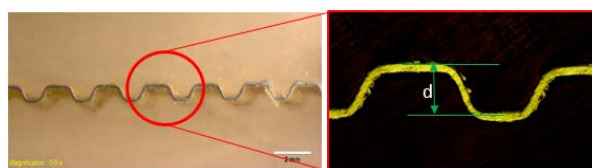


شکل ۴) ابعاد و تغییرات هر قالب

خواص فیزیکی و مکانیکی ورق فولادی زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ مطابق جدول ۳ به نرم‌افزار معرفی می‌شود. در ادامه این مشخصات، به‌صورت پوسترهای و همگن به ورق اعمال شده است. هدف مهم اندازه‌گیری میزان برگشت فنری ورق شکل‌گرفته است. لذا لازم است تا مساله در دو گام حل شود. گام اول در ارتباط با بارگذاری مجموعه قالب و گام دوم باربرداری از مجموعه است. حرکت سنبه قالب، براساس سرعت ثابت و جابه‌جایی معین انجام می‌گیرد. با توجه به نوع فرآیند که در حالت سرد انجام می‌شود و تغییر شکل زیاد ماده، از گزینه حل صریح دینامیکی استفاده شد. به‌منظور یافتن زمان مناسب برای شکل‌دهی همواره دقت شد تا مقدار انرژی جنبشی تغییر شکل از یک درصد مجموع انرژی داخلی شکل‌دهی تجاوز نکند تا آنکه طبیعت شبه‌استاتیکی مساله حفظ شود. نوع تماس بین اجزای مجموعه از نوع سطح به سطح تعریف شده است. همچنین شرایط تماس نیز از نوع تماس مکانیکی با رفتار مماسی، با مدل

صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

هدف از این بخش، صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی است. همان طور که در بخش‌های گذشته عنوان شد، مجموعه قالبی با ابعاد مشخص ساخته شد و آزمایش‌های لازم بر روی آن انجام گرفت. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی که از شکل‌دهی صفحه دوقطبی از جنس SS304 با ضخامت ۱/۰ میلی‌متر به‌دست آمده با نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی المان محدود مقایسه شد. نمودار ۳ نشان می‌دهد که مدل المان محدود از دقت بالایی برخوردار بوده و رفتار کشسانی ورق را با خطای اندکی توصیف می‌نماید. علاوه بر نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی، میزان درصد پرشدگی و همچنین برگشت فنری ورق نیز در حالت تجربی اندازه‌گیری شد. شکل ۵ پروفیل پرشدگی ورق شکل‌دهی‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵) پروفیل پرشدگی صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده و تعیین درصد پرشدگی و برگشت فنری (D برابر با ۷۵٪ و d برابر با ۰/۶۳ میلی‌متر، مقدار پرشدگی ۹۷٪)

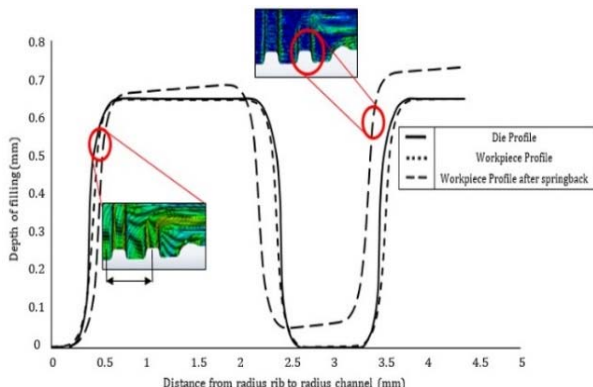
بررسی تاثیر زاویه دیواره کانال بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری

در این بخش به بررسی تاثیر زاویه دیواره کانال بر شکل و مقدار پروفیل پرشدگی و همچنین تاثیر این پارامتر بر مقدار و شکل پروفیل برگشت فنری پرداخته می‌شود. بدین منظور مطابق جدول ۲، مقایسه بین نمونه‌های ۶، ۷ و ۸ انجام گرفت که به‌ترتیب دارای زوایای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه هستند. نتایج حاصل در ارتباط با تاثیر زاویه دیواره در نمودارهای ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

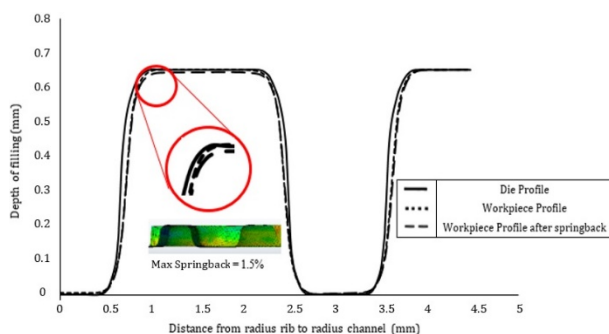
همان طور که در نمودار ۴ (شکل‌دهی ورق با زاویه دیواره ۵ درجه) نشان داده شده است، به‌منظور اندازه‌گیری دقیق مقدار پرشدگی، از معیار مساحت ناحیه پرشدگی استفاده شد. لذا به‌کمک کدنویسی در نرم‌افزار متلب، مساحت زیر نمودار با دقت بالایی اندازه‌گیری شد. مقدار پرشدگی برای دنده و کانال به‌ترتیب ۹۲/۱۳ و ۹۰/۹۶٪ به‌دست آمده است. در ادامه این نمودار، پروفیل برگشت فنری ورق نشان داده شده است. همان طور که از نمودار پیدا است، با جداسدن قالب سنبه و ماتریس از یکدیگر، پروفیل ورق دچار اعوجاج و عدم تختی شده که نشان از آسیب وارده به ورق شکل‌گرفته است.

نمودار ۵ شکل‌دهی ورق را برای زاویه دیواره ۱۰ درجه نشان می‌دهد. در این نمودار پروفیل قالب، ورق شکل‌دهی‌شده و ورق شکل‌دهی‌شده بعد از باربرداری (برگشت فنری) نشان داده شده است. همان طور که از مشخص است، نسبت به حالت زاویه دیواره کانال ۵ درجه، مقدار پرشدگی بهبود قابل توجهی داشته که برای دنده و کانال به‌ترتیب ۹۶/۳۱ و ۹۲/۴۴٪ اندازه گرفته شده است. از آنجایی که شیب دیواره به مقداری بوده که قالب سنبه و ماتریس نسبت به

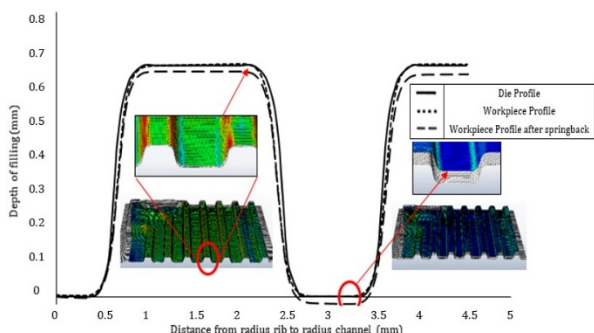
حالت شیب تند (زاویه ۵ درجه) راحت‌تر از یکدیگر جدا شده‌اند، لذا میزان تخت‌شدگی و اعوجاج در ورق به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. مقدار پرشدگی ورق پس از برگشت فنری برای دنده و کانال به‌ترتیب ۹۴/۸۵ و ۹۲/۰۸٪ اندازه‌گیری شد که ماکزیمم مقدار برگشت فنری در حدود ۱/۵٪ محاسبه شده است.



نمودار ۴) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در زاویه دیواره کانال ۵ درجه

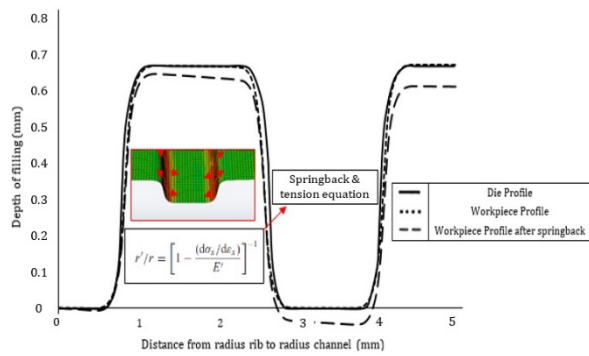


نمودار ۵) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در زاویه دیواره کانال ۱۰ درجه

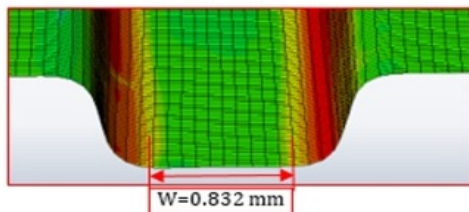
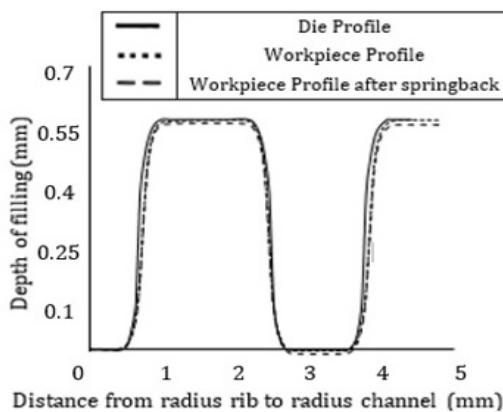


نمودار ۶) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در زاویه دیواره کانال ۱۵ درجه

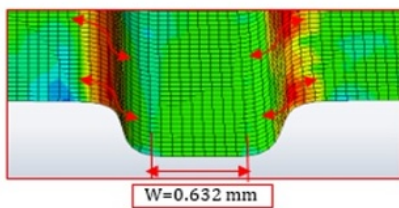
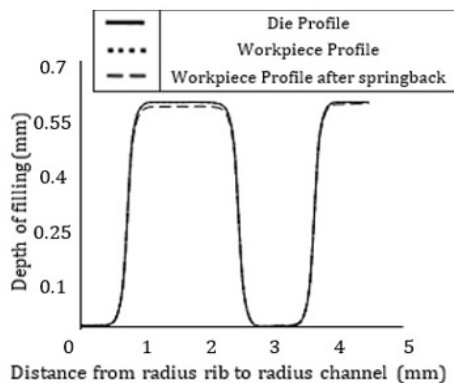
پروفیل پرشدگی ورق در حالت بارگذاری (شکل‌دهی) و باربرداری (برگشت فنری) در نمودار ۶ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص است، پرشدگی ورق به‌علت افزایش زاویه دیواره و سهولت جریان ورق به داخل مجموعه قالب، نسبت به زوایای ۱۰ و ۵ درجه بهبود داشته است. به‌طوری که مقدار پرشدگی برای دنده و کانال به ۹۶/۸۶ و ۹۲/۴۴٪ رسیده که نسبت به قالب با زاویه ۱۰ درجه،



نمودار ۸) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در پهنای کانال ۹۳۲/۰ میلی‌متر



(الف)

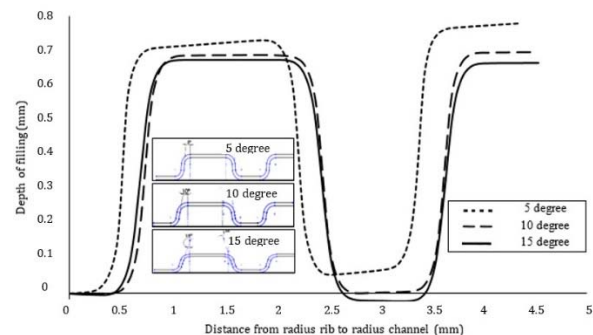


(ب)

نمودار ۹) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در پهنای کانال: الف) ۸۳۲/۰ میلی‌متر، ب) ۶۳۲/۰ میلی‌متر

ماکزیمم ۵۵/۰٪ افزایش داشته است. اگر چه با افزایش زاویه دیواره مقدار درصد پرشدگی اندکی افزایش یافته اما به علت کاهش در میزان کشیدگی ورق نسبت به قالب با زاویه دیواره ۱۰ درجه، برگشت فنری ورق افزایش داشته که مقدار پرشدگی برای دنده و کانال به ۹۲/۷۱ و ۸۴/۸۱٪ تقلیل یافته است. در مجموع میزان برگشت فنری ورق ۷/۵٪ در حالت ماکزیمم محاسبه شده است. همچنین مشاهده شد که ورق اندکی اعوجاج داشته و نشان از آسیب برگشت فنری به ورق شکل‌دهی‌شده است.

مقایسه پروفیل برگشت فنری ورق در سه زاویه دیواره کانال ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در نمودار ۷ پرداخته شده است. با توجه به این نمودار و نتایج به دست آمده از مقادیر درصد پرشدگی و همچنین اعوجاج و تختی کانال و دنده مشخص شد که زاویه دیواره ۱۰ درجه مناسب‌ترین زاویه برای شکل‌دهی صفحه دوقطبی است. چرا که کاهش و همچنین افزایش در مقدار شیب دیواره کانال منجر به عدم پرشدگی کامل و همچنین عدم تختی مناسب برای ورق شکل‌دهی‌شده می‌شود.



نمودار ۷) مقایسه برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی‌شده در سه زاویه دیواره کانال ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه

بررسی تاثیر ابعاد کانال بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری

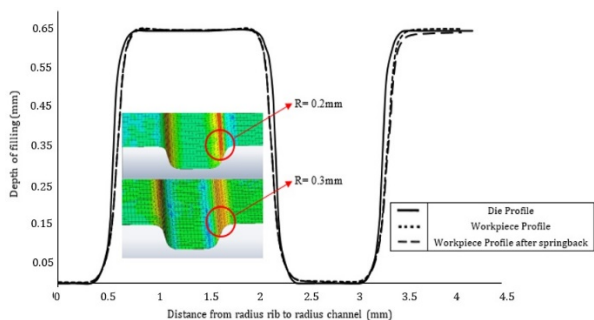
در این بخش با ثابت نگه داشتن پارامتر زاویه دیواره به مقدار ۱۰ درجه، به تاثیر ابعاد کانال در اندازه‌های مختلف مطابق شماره آزمون‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ پرداخته شده است. مقادیری که برای ابعاد کانال در نظر گرفته شده است، ۴۸۲/۰، ۶۳۲/۰، ۸۳۲/۰ و ۹۳۲/۰ میلی‌متر انتخاب شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر براساس شبیه‌سازی‌ها و تجربیات حاصل از عملکرد میدان شارش در مجموعه پیل سوختی به دست آمده است.

تئوری مطرح شده در ارتباط با مساله برگشت فنری ورق بدین صورت است که با اعمال کشش، برگشت فنری کاهش می‌یابد. چرا که طبق رابطه ۱ مقدار $\frac{d\sigma_x}{d\epsilon_x}$ بسیار کوچک‌تر از E است. هر چقدر که کشش بیشتر باشد، سبب جابه‌جاشدن صفحه خنثی به طرف داخل خم شده و در صورت کافی نبودن، این صفحه را کاملاً به بیرون از ورق می‌راند. در این حالت سرتاسر مقطع به حالت کششی تسلیم می‌شود [20]. این مهم در نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ به وضوح نشان داده شده است.

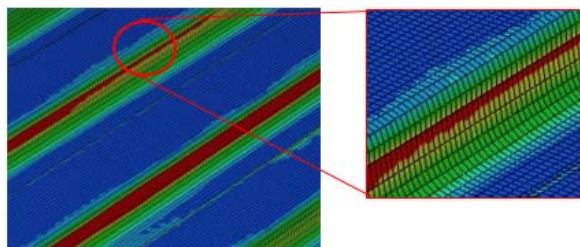
$$\frac{r_2}{r_1} = \left[1 - \frac{d\sigma_x}{d\epsilon_x} \right]^{-1} \quad (1)$$

۱/۰ میلی‌متر برای شعاع گوشه در نظر گرفته شد. در نمودار ۱۱ تاثیر شعاع گوشه برای مقدار ۲/۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار شعاع، میزان برگشت فنری اندکی افزایش می‌یابد. چرا که مقدار برگشت فنری ورق به نسبت حالتی که شعاع به مقدار ۳/۰ میلی‌متر است (نمودار ۴)، در حدود یک درصد افزایش یافته است. مساله مهم‌تر از مقدار برگشت فنری در تاثیر شعاع، مقدار تنش اعمالی به ورق است. در این نمودار، مقدار شعاع در دو حالت ۲/۰ و ۳/۰ با یکدیگر مقایسه شده است. نشان داده شده که تنش‌های اعمالی در حالتی که شعاع ورق افزایش می‌یابد، از توزیع یکنواخت‌تری برخوردار است.

در ادامه، مقدار شعاع به ۱/۰ میلی‌متر کاهش یافته و تاثیر آن بر شکل‌دهی ورق مورد بررسی قرار گرفته است. اما همان طور که از شکل ۶ و همچنین با استناد به بخش شبه‌سازی که نمودار پارگی ورق را برحسب کرنش اعمالی به ورق نشان می‌دهد، مشخص است که تنش‌های اعمالی به ورق به حدی افزایش یافته است که سبب پارگی ورق پس از فرآیند شکل‌دهی می‌شود.



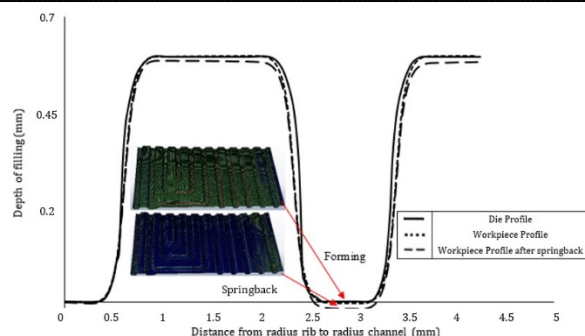
نمودار ۱۱) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی شده در شعاع گوشه ۲/۰ میلی‌متر



شکل ۱۶) تنش اعمالی به ورق در شعاع ۱/۰ میلی‌متر و پارگی در شعاع گوشه و دیواره

بررسی تاثیر عمق کانال بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری

در این بخش تاثیر عمق کانال بر نحوه پرشدگی ورق و برگشت فنری آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور مقادیر ۵/۰، ۶۵/۰ و ۸۵/۰ میلی‌متر برای عمق قالب در نظر گرفته شده است. نمودار ۱۲ مقدار پرشدگی و برگشت فنری ورق را برای عمق قالب ۵/۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار پرشدگی در این عمق از کانال به مقدار ۳/۹۹٪ اندازه‌گیری شده است که نشان از پرشدگی تقریباً کامل ورق در این عمق کانال است. همچنین مشاهده شده که میزان برگشت فنری ورق نیز بسیار ناچیز بوده، به‌طوری که عمق



نمودار ۱۰) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی شده در پهنای کانال ۴۸۲/۰ میلی‌متر

نمودار ۸ منحنی درصد پرشدگی و برگشت فنری ورق شکل‌دهی شده را در حالتی که پهنای کانال به مقدار ۳۲۰/۹۳ میلی‌متر است را نشان می‌دهد. پروفیل پرشدگی در این نمودار نشان می‌دهد که به‌علت زیادبودن پهنای کانال، ورق به راحتی به درون کانال جریان یافته؛ به‌طوری که میزان پرشدگی به مقدار ۸۸/۹۵٪ اندازه‌گیری شده است. مساله‌ای که اهمیت دارد، مقدار زیاد برگشت فنری ورق برای این حالت و همچنین نیرویی که برگشت فنری ورق باعث ایجاد اعوجاج و عدم تختی می‌شود. همان طور که از این نمودار مشخص است، ماکزیمم مقدار برگشت فنری ورق در حدود ۹٪ اندازه‌گیری شده است. علت مقدار زیاد برگشت فنری ورق در این حالت را می‌توان به کشیدگی کم ورق به‌علت پهنای زیاد کانال اشاره کرد.

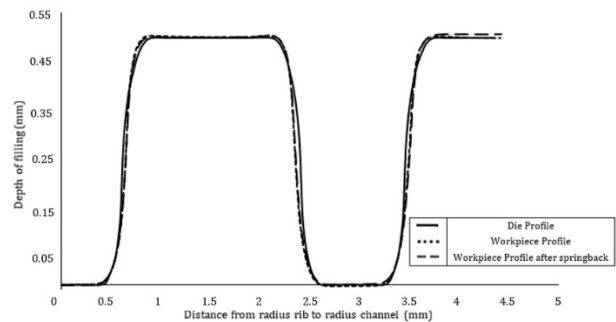
در ادامه، پهنای کانال تا مقدار ۳۲۰/۸۳ میلی‌متر کاهش یافت. به‌طوری که پروفیل پرشدگی و برگشت فنری ورق در نمودار ۹- الف نشان داده شد. همان طور که از نمودار مشخص است، درصد پرشدگی تفاوت چندانی با حالت قبلی نداشته، چرا که مقدار پرشدگی ۵۴/۹۵٪ به‌دست آمده است. اما مقدار برگشت فنری ورق در این حالت کاهش قابل توجهی داشته که میزان آن در حدود ۲٪ به‌دست آمده است. علاوه‌بر این مقدار اعوجاج و عدم تختی ورق نیز بهبود چشم‌گیری نسبت به حالت قبلی داشته است. با کاهش پهنای کانال (نمودار ۹- ب) تا مقدار ۳۲۰/۶۳ میلی‌متر و به دنبال آن افزایش در میزان کشیدگی ورق، ملاحظه می‌شود که مقدار برگشت فنری ورق به ۵/۱٪ کاهش یافته و بهبود بسیار زیادی در تختی کانال‌های ورق شکل‌دهی شده حاصل شده است.

در نمودار ۱۰ پهنای کانال ۴۸۲/۰ میلی‌متر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده اگر چه میزان کشیدگی ورق با کاهش پهنای کانال افزایش می‌یابد، اما به‌علت کم‌بودن فضای لازم برای جریان‌یافتن ورق، مقدار برگشت فنری اندکی افزایش یافته و به مقدار ۳٪ رسیده است. نتایج به‌دست‌آمده از تاثیر ابعاد کانال بر روی شکل‌گیری ورق نشان داد که مقدار ۳۲۰/۶۳ میلی‌متر مناسب‌ترین مقدار از لحاظ پروفیل پرشدگی و مقدار بسیار کم برگشت فنری است.

بررسی تاثیر شعاع گوشه بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری

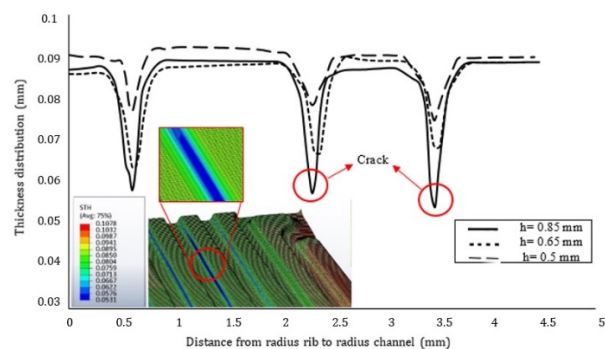
در این بخش تاثیر شعاع گوشه بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری ورق بررسی شده است. بدین منظور سه مقدار ۳/۰، ۲/۰ و

پرشدگی ورق شکل‌دهی شده پس از برگشت فنری در حدود ۹۸/۲۹٪ اندازه گرفته شده است.



نمودار ۱۲) پروفیل پرشدگی و برگشت فنری صفحه دوقطبی شکل‌دهی شده در عمق کانال ۵/۵ میلی‌متر

از نتایج به‌دست‌آمده برای عمق کانال ۵/۶ میلی‌متر که در نمودار ۵ نشان داده شده است، مشخص است که افزایش در عمق کانال تاثیر چشم‌گیری بر میزان برگشت فنری ورق ندارد. اما زمانی که عمق کانال افزایش می‌یابد، مقدار کشیدگی ورق در قسمت شعاع گوشه‌ها و دیواره ورق افزایش می‌یابد که موجب پارگی در صفحه شکل‌داده‌شده می‌شود. نمودار ۱۳ توزیع ضخامت ورق را برای سه عمق کانال با یکدیگر مقایسه نموده است. نتایج نشان داد که با افزایش در عمق کانال، مقدار نازک‌شدگی افزایش یافته است. مقادیر کانتور توزیع ضخامت نشان‌داده‌شده در نمودار برای عمق کانال ۸۵/۸ میلی‌متر نشان می‌دهد که در نواحی آبی‌رنگ مقدار ضخامت به زیر ۶۳/۰ میلی‌متر رسیده است که مقدار نازک‌شدگی ۳۷٪ اندازه‌گیری شده است. لذا نشان از پارگی در دیواره کانال است.

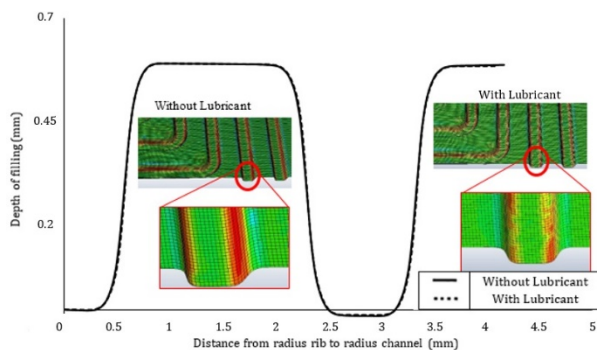


نمودار ۱۳) مقایسه توزیع ضخامت در سه عمق کانال ۵/۵، ۶/۵ و ۸/۵ میلی‌متر

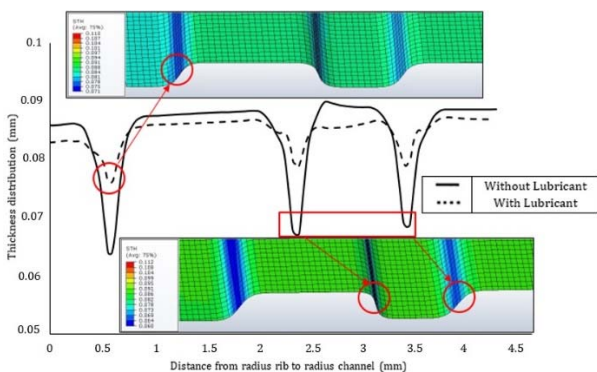
بررسی تاثیر روانکار بر روی پروفیل پرشدگی و برگشت فنری

در این بخش به تاثیر پارامتر مهم فرآیندی همچون روانکار بر پروفیل پرشدگی و برگشت فنری ورق پرداخته شده است. در نمودار ۱۴ پروفیل برگشت فنری ورق در دو حالت استفاده از روانکار و بدون استفاده از روانکار با یکدیگر مقایسه شد. همان‌طور که از نمودار پیدا است، مقدار برگشت فنری تقریباً مستقل از پارامتر روانکار است. اما نکته‌ای که در ارتباط با استفاده از روانکار اهمیت دارد، توزیع کانتور تنش و توزیع ضخامت است. از نمودار مشخص است،

هنگامی که از روانکار استفاده می‌شود، در شرایط کاملاً برابر، توزیع تنش در گوشه‌ها و دیواره کانال بسیار یکنواخت‌تر است. همچنین اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از توزیع ضخامت که در نمودار ۱۵ نشان داده شده است، نشان از توزیع بهتر ضخامت در هنگام استفاده از روانکار است. چرا که توزیع به‌دست‌آمده از حالت بدون روانکار، حاکی از نازک‌شدگی شدید در دیواره و شعاع گوشه ورق است. اما هنگامی که از روانکار استفاده می‌شود، ورق راحت‌تر سیلان پیدا کرده و توزیع یکنواخت‌تری از ضخامت مشاهده می‌شود.



نمودار ۱۴) مقایسه پروفیل برگشت فنری و توزیع تنش در دو حالت با استفاده از روانکار و بدون استفاده از آن



نمودار ۱۵) مقایسه توزیع ضخامت در دو حالت با استفاده از روانکار و بدون استفاده از آن

نتیجه‌گیری

هدف، بررسی تاثیر پارامترهای ابعادی و فرآیندی بر روی پروفیل پرشدگی و میزان برگشت فنری ورق است. پارامترهای ابعادی مورد نظر اعم از تاثیر پهنای کانال، عمق کانال، زاویه دیواره کانال و شعاع گوشه و همچنین پارامتر فرآیندی همچون روانکار بر نحوه شکل‌گیری و برگشت فنری ورق مورد ارزیابی قرار گرفته است. پژوهش‌های بسیار کمی به بررسی پارامتر مهم برگشت فنری در صفحات دوقطبی پیل سوختی پرداخته‌اند. مساله‌ای که در اکثر این پژوهش‌ها بررسی شد، تنها یک کانال از صفحات دوقطبی بوده که مقدار برگشت فنری در آن بررسی شده است. در حالی که این بررسی نمی‌تواند معیار دقیق و درستی از برگشت فنری باشد. چرا که مشخص شد که صفحات دوقطبی از پیچیدگی زیادی برخوردارند که این پیچیدگی کانال‌های میدان شارش در نحوه شکل‌دهی آن بسیار

تعارض منافع: از پروژه سرباز نخبگی آقای فرزاد احمدی خطیر با عنوان مطالعه عددی و آزمایشگاهی تولید صفحات دوقطبی فلزی با ابعاد نهایی در فرآیند شکل‌دهی استمپینگ، در دانشگاه صنعتی مالک اشتر استخراج شده است.

سهم نویسندگان: فرزاد احمدی خطیر (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۷۰٪)؛ محمدمهدی بزرگری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪).

منابع مالی: تمامی هزینه‌ها از دانشگاه صنعتی مالک اشتر تامین شده است.

منابع

- 1- Alizadeh E, Barzegari MM, Momenifar M, Ghadimi M, Saadat SHM. Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(4):3062-3071.
- 2- Barzegari MM, Alizadeh E, Pahnabi AH. Grey-box modeling and model predictive control for cascade-type PEMFC. *Energy*. 2017;127:611-622.
- 3- Rahimi-Esbo M, Ranjbar AA, Ramiar A, Alizadeh E, Aghaee M. Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(4):3023-3037.
- 4- Barbir F. PEM fuel cells: Theory and practice. Cambridge: Academic Press; 2012.
- 5- Alizadeh E, Rahgoshay SM, Rahimi-Esbo M, Khorshidian M, Saadat SHM. A novel cooling flow field design for polymer electrolyte membrane fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(20):8525-8532.
- 6- Barzegari MM, Dardel M, Alizadeh E, Ramiar M. Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H₂/O₂ PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator. *Applied Energy*. 2016;177:298-308.
- 7- Kang S. Quasi-three-dimensional dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell with consideration of two-phase water transport through a gas diffusion layer. *Energy*. 2015;90:1388-1400.
- 8- Mehta V, Cooper JS. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources*. 2003;114(1):32-53.
- 9- Taherian R. A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. *Journal of Power Sources*. 2014;265:370-390.
- 10- Fetohi AE, Abdel Hameed RM, El-Khatib KM, Souaya ER. Study of different aluminum alloy substrates coated with Ni-Co-P as metallic bipolar plates for PEM fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(14):10807-10817.
- 11- Choi SW, Park SH, Jeong HS, Cho JR, Park S, Ha MY. Improvement of formability for fabricating thin continuously corrugated structures in sheet metal forming process. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012;26(8):2397-2403.
- 12- Hu Q, Zhang D, Fu H, Huang KK. Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell-numerical simulation and experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014;39(25):13770-13776.

تأثیرگذار است. نکته دیگری که بسیار مهم است، ترکیب صحیح از پارامترهای صفحات دوقطبی است که باید از دیدگاه میدان شارش و بررسی عملکرد مجموعه پیل سوختی مورد قبول واقع شود. بنابراین، نمی‌توان صرفاً با طراحی آزمایش و ایجاد ترکیبات تصادفی، شکل‌دهی صفحه دوقطبی را مورد بررسی قرار داد. ترکیبی از پارامترها را مورد بررسی قرار گرفت که از دیدگاه میدان شارش و عملکرد صفحه دوقطبی در مجموعه پیل سوختی مورد تایید است.

به‌منظور کاهش در هزینه‌های ساخت قالب و انجام آزمایش، از فرآیند شبیه‌سازی المان محدود به همراه آزمایش‌های تجربی استفاده شده که نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل عنوان می‌شود.

۱- زاویه دیواره کانال در سه مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش در میزان زاویه دیواره کانال، به‌علت سهولت در جریان ورق، مقدار عمق پرشدگی افزایش می‌یابد. ۲- نتایج بررسی پهنای کانال نشان می‌دهد که افزایش در پهنای کانال سبب سهولت در جریان ورق و افزایش در میزان درصد پرشدگی ورق می‌شود. اما در ارتباط با برگشت فنی، طبق تئوری مطرح‌شده مطابق رابطه ۱ که حاکی از ارتباط کشش با برگشت فنی است، مقدار برگشت فنی برای پهنای کانال ۹۳۲/۰ میلی‌متر، در حدود ۹٪ است. اما با کاهش در مقدار پهنای کانال تا مقدار ۸۳۲/۰ و ۶۳۲/۰ میلی‌متر، مقدار برگشت فنی به‌ترتیب ۲ و ۱/۵٪ کاهش یافته که موجب بهبود در تختی و عدم اعوجاج در کانال‌های قالب می‌شود. برای پهنای ۴۸۲/۰ میلی‌متر مشاهده شده که مقدار برگشت فنی به‌علت کم‌بودن فضای لازم برای جریان‌یافتن ورق، اندکی افزایش یافته و به مقدار ۳٪ رسیده است.

۳- در ارتباط با تأثیر شعاع گوشه بر مقدار برگشت فنی مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار شعاع، میزان برگشت فنی اندکی افزایش می‌یابد. مساله مهم‌تر از مقدار برگشت فنی در تأثیر شعاع، مقدار تنش اعمالی به ورق است. تنش‌های اعمالی در حالتی که شعاع ورق افزایش می‌یابد، از توزیع یکنواخت‌تری برخوردار است.

۴- نتایج حاصل از تأثیر عمق کانال بر نحوه پرشدگی ورق و برگشت فنی نشان داد که عمق کانال تأثیر چشم‌گیری بر میزان برگشت فنی ورق ندارد. اما زمانی که عمق کانال افزایش می‌یابد، مقدار کشیدگی ورق در قسمت شعاع گوشه‌ها و دیواره ورق افزایش پیدا می‌کند که موجب پارگی در صفحه شکل‌داده‌شده می‌شود.

۵- پارامتر فرآیندی چون تأثیر روانکار نشان داد که مقدار برگشت فنی تقریباً مستقل از پارامتر روانکار است. اما نکته‌ای که در ارتباط با استفاده از روانکار اهمیت دارد، توزیع کانتور تنش و توزیع ضخامت است. هنگامی که از روانکار استفاده می‌شود، در شرایط کاملاً برابر، توزیع تنش در گوشه‌ها و دیواره کانال بسیار یکنواخت‌تر است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از کارکنان دانشگاه صنعتی مالک اشتر و پژوهش‌کده علوم و فناوری شمال تشکر نمایند. **تاییدیه اخلاقی:** کلیه حقوق متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر است.

rubber pad forming process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;89:3257-3269.

17- Chen T, Gu YF, Li CP, Qiao YQ. Stamping and springback of PEMFC metal bipolar plate. Advanced Materials Research. 2011;215:1-4.

18- Huang KJ, Hwang SJ, Lai WH. Evaluation of forming quality and spring-back of fuel cell metallic bipolar plate during stamping via simulations. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation. 2015;47(2):131-141.

19- Dur E, Cora ON, Koc M. Effect of manufacturing conditions on the corrosion resistance behavior of metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources. 2011;196(3):1235-1241.

20- Hosford WF, Caddell RM. Metal forming: Mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.

13- Mahabunphachai S, Cora ON, Koc M. Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. Journal of Power Sources. 2010;195(16):5269-5277.

14- Elyasi M, Ahmadi Khatir F, Hosseinzadeh M. Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for producing of metallic bipolar plates. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(9):179-186. [Persian]

15- Elyasi M, Ahmadi F, Hosseinzadeh M. Investigation of lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(12):450-460. [Persian]

16- Elyasi M, Ahmadi Khatir F, Hosseinzadeh M. Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through