



Prediction of Formability of the Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cell in Stamping Process Using Meta-Heuristics Algorithms

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Modanloo V.^{1*},
Mashayekhi A.¹,
Akhoundi B.¹

How to cite this article

Modanloo V., Mashayekhi A., Akhoundi B. Prediction of Formability of the Metallic Bipolar Plates for PEM Fuel Cell in Stamping Process Using Meta-Heuristics Algorithms. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(09):521-530.

¹ Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

*Correspondence

Address: Sirjan University of Technology, Mechanical Engineering Department, Sirjan, Iran

v.modanloo@sirjantech.ac.ir

Article History

Received: May 5, 2023

Accepted: July 25, 2023

ePublished: October 24, 2023

ABSTRACT

In addition to the need for lightweight properties, the metallic bipolar plates in the PEM fuel cells should work in a humid and acidic environment. Due to its low density and excellent corrosion resistance, titanium is a proper candidate for manufacturing bipolar plates. In this paper, the manufacturing of bipolar plates made of commercially pure titanium with an initial thickness of 0.1 mm was investigated using the stamping process. A four-channel die with a parallel flow field was used in the experiments. To estimate the formability of microchannels of the bipolar plates, the response surface method, genetic algorithm, and adaptive neural fuzzy inference system were employed. Die clearance, stamping speed, and friction coefficient between the sheet and die were considered input variables, whereas the die filling rate was as output. The designed experiments using the response surface method were used to train the meta-heuristic techniques. The results showed that the regression model obtained from the response surface method predicts the die filling rate with acceptable accuracy. Furthermore, the coefficients of the equation obtained from the regression have been improved using the genetic algorithm and the error rate has been reduced by about 53%. Finally, an adaptive neural fuzzy inference system was used to predict the die filling. The results showed that the proposed system is very feasible and approximates the maximum filling rate with high accuracy.

Keywords Die Filling, Stamping Process, Bipolar Plates, PEM Fuel Cell, Meta-Heuristics Algorithms

CITATION LINKS

1- Modeling of Laminar Fully ... 2- New interior design for ... 3- Forming of metallic bipolar ... 4- Investigation of dimensional accuracy ... 5- The Study of effective parameters ... 6- Investigation on forming of titanium ... 7- Formability of Commercial Pure Titanium in ... 8- Integration of design of experiment ... 9- Investigation of lubricant effect ... 10- Multi-objective optimization of ... 11- Corrosion resistance characteristics of ... 12- Fabrication of micro-channel arrays on thin ... 13- Alloy selection and die design ... 14- Investigation of stamping process of ... 15- Comparison of formabilities of stainless ... 16- Fabrication of stainless steel bipolar ... 17- Study of thickness distribution and ... 18- Numerical-experimental investigation of ... 19- Fracture prediction in the stamping ... 20- Fabrication of micro channels for ... 21- Optimal design of stamping ... 22- Manufacturing of titanium bipolar ... 23- Investigation of the forming force in ... 24- Optimum shape design of space ... 25- A novel multiscale ensemble carbon ... 26- Prediction of Indonesian inflation rate ... 27- Shared control based on ANFIS for ... 28- Revolutionizing Low-Carbon Marine ... 29- Numerical investigation of formed...

پیش‌بینی شکل‌پذیری صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری در فرآیند مهرزنی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

وحید مدالو^{۱*}، احمد مشایخی^۱، بهنام آخوندی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

چکیده

صفحات دوقطبی فلزی در پیل‌های سوختی پلیمری، علاوه بر سبک بودن باید در محیط مرطوب و اسیدی کار کنند. تیتانیوم به دلیل چگالی کم و مقاومت به خوردگی عالی، یک گزینه مناسب برای ساخت صفحات دوقطبی است. در این مقاله، ساخت صفحات دوقطبی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر با استفاده از فرآیند مهرزنی بررسی شده است. از یک قالب چهار کاناله با الگوی شیارهای موازی مستقیم در آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. به منظور تخمین شکل‌پذیری میکروکانال‌های صفحات دوقطبی، از روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی استفاده شد. لقی قالب، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به عنوان متغیرهای ورودی و میزان پرشدگی قالب به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از روش سطح پاسخ، به منظور آموزش روش‌های فرا ابتکاری استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون حاصل از روش سطح پاسخ با دقت قابل‌قبولی میزان پرشدگی قالب را پیش‌بینی می‌کند. همچنین، ضرایب معادله حاصل از رگرسیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته و میزان خطای آن در حدود ۵۳٪ کاهش یافت. در پایان نیز از یک سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب استفاده شد. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی بسیار مؤثر بوده و با دقت بسیار بالایی بیشینه میزان پرشدگی را تقریب می‌زند.

کلیدواژه‌ها: پرشدگی قالب، فرآیند مهرزنی، صفحات دوقطبی، پیل سوختی پلیمری، الگوریتم‌های فرا ابتکاری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

*نویسنده مسئول: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

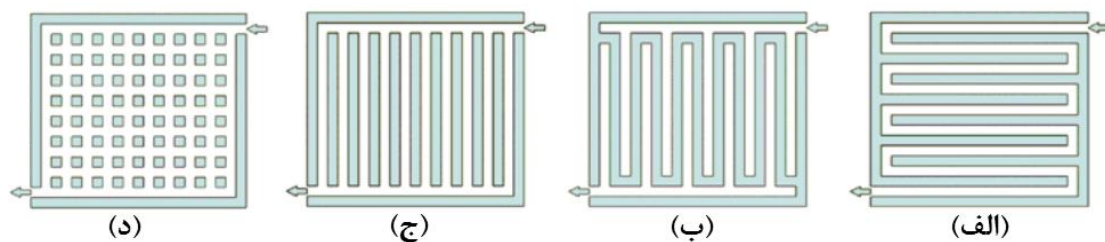
۱- مقدمه

با توجه به تجدیدناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی و حجم آلاینده‌های تولیدشده با استفاده از آن‌ها، طی سال‌های اخیر تمایل فزاینده‌ای به سمت استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر از سوی محققان مشاهده شده است. پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که می‌تواند مستقیماً انرژی واکنش‌های شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. پیل‌های سوختی نقش بسزایی در کاهش آلودگی محیط‌زیست دارند و به دلیل اینکه اجزای زیادی در ساختار آن‌ها وجود ندارد، آلودگی صوتی ندارند. پیل سوختی غشاء مبادله پروتون (PEMFC) یکی از انواع رایج و پرکاربرد پیل‌های سوختی است که به دلیل دمای عملیاتی پایین‌تر، توجه بیشتری را از سوی پژوهشگران به خود جلب کرده است. پیل سوختی غشاء مبادله پروتون از اجزای مختلفی شامل

غشاهای پلیمری متخلخل، الکترودها و صفحات دوقطبی (Bipolar Plates) تشکیل شده‌اند. در این میان، صفحات دوقطبی درصد بالایی از وزن و هزینه یک پیل سوختی پلیمری را تشکیل می‌دهند و یکی از اجزای مهم در ساختار آن‌ها هستند. در دو سمت صفحات دوقطبی، کانال‌های بسیار ریزی وجود دارد که به عنوان میکروکانال شناخته می‌شوند. وظیفه این میکروکانال‌ها توزیع بهتر هیدروژن و اکسیژن بر روی صفحات دوقطبی، خروج آب تولیدشده ناشی از واکنش‌ها، انتقال الکترون‌های تولیدی، خنک‌کاری و کاهش دمای مجموعه پیل سوختی جهت افزایش بازده سیستم است [1-4]. هندسه کانال جریان بر روی صفحات دوقطبی بر اساس نوع کاربرد پیل سوختی متفاوت بوده و به چهار دسته الگوی مارپیچ، متصل به هم، موازی و پینی تقسیم می‌شوند که در شکل ۱ نشان داده شده است [5].

به منظور افزایش بازده مجموعه پیل سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی باید دارای چندین ویژگی از جمله مقاومت در برابر خوردگی بالا، وزن کم و ضخامت یکنواخت باشند [6]. از این رو برای ساخت این صفحات از مواد مختلفی استفاده شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به گرافیت، کامپوزیت و فلز اشاره کرد. در این میان، صفحات دوقطبی فلزی دارای ویژگی‌های خاصی نظیر خواص مکانیکی عالی، خواص الکتریکی مطلوب، و خواص حرارتی مناسب هستند که آن‌ها را به یک گزینه ایده‌آل برای استفاده در پیل‌های سوختی پلیمری تبدیل می‌کند [7]. از این رو، طی سالیان اخیر پژوهش‌های متعددی جهت دستیابی به روشی مناسب برای ساخت صفحات دوقطبی فلزی انجام شده که در یک دسته‌بندی کلی به فرآیندهای ماشین‌کاری و شکل‌دهی تقسیم می‌شوند. صفحات دوقطبی تولیدشده با روش ماشین‌کاری به دلیل ضخامت، وزن و هزینه بالای نهایی چندان مورد استقبال محققان قرار نگرفته‌اند [8]. از سوی دیگر، صفحات دوقطبی تولیدشده با روش شکل‌دهی با توجه به تولید سریع و باکیفیت، طی سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [9]. فرآیند مهرزنی (Stamping) یکی از روش‌های شکل‌دهی فلزات ورقی است که به دلیل هزینه تولید پایین و سهولت اجرا در ساخت صفحات دوقطبی فلزی به طور گسترده استفاده می‌شود [10].

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی از سوی پژوهشگران گزارش شده است. دوندار و همکاران [11] به بررسی تأثیر سرعت سنبه و نیروی مهرزنی بر روی صافی سطح و مقاومت به خوردگی صفحات دوقطبی پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۵۱ میلی‌متر استفاده نمودند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که سرعت مهرزنی کمتر منجر به کاهش صافی سطح و مقاومت به خوردگی صفحات دوقطبی خواهد شد. چن و یی [12] با استفاده از یک مدل اجزای محدود بر مبنای فرمولاسیون لاگرانژ پیشرفته، موفق شدند فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی را با دقت

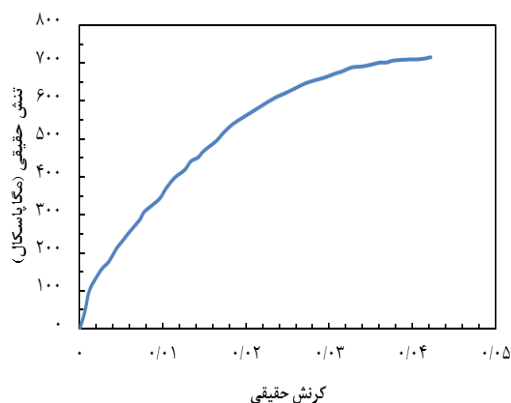


شکل ۱) الگوهای رایج مسیر جریان بر روی صفحات دوقطبی، الف: مارپیچ، ب: متصل، ج: موازی، د: پینی [5].

دستیابی به سطح بهینه نیروی مهرزنی ضروری است. صدیقی و همکاران [18] به بررسی تجربی و عددی استفاده از ورق‌گیر لاستیکی در فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر پرداختند. آن‌ها تأثیر پارامترهای هندسی ورق‌گیر لاستیکی را بر روی پدیده چروکیدگی حین فرآیند مهرزنی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی نمودند. مدائلو و همکاران [19] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر پرداختند. آن‌ها با استفاده از معیارهای رایس-تریسی، بروزو و آیادا به پیش‌بینی شکست در حین فرآیند مهرزنی پرداختند. همچنین از یک معیار شکست بر پایه کرنش که اثر اندازه را در نظر می‌گرفت استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که معیار آسیب بروزو با خطای ۳/۶۸٪ نسبت به نتایج تجربی، بهترین معیار برای پیش‌بینی شروع شکست در مهرزنی صفحات دوقطبی تیتانیومی است. ژو و همکاران [20] به منظور ساخت صفحات دوقطبی از جنس تیتانیوم خالص تجاری و با ضخامت اولیه ورق ۰/۱۵ میلی‌متر، از فرآیند مهرزنی چندمرحله‌ای استفاده نمودند. آن‌ها توانستند نسبت به فرآیند مهرزنی یک مرحله‌ای، عمق میکروکانال را در حدود ۴۲٪ افزایش دهند.

بررسی پیشینه پژوهش در زمینه ساخت صفحات دوقطبی فلزی به روش مهرزنی نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از مطالعات بر بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر نازک‌شدگی میکروکانال، دقت ابعادی و عمق شکل‌دهی متمرکز شده‌اند. با توجه به بهترین تجربه نویسندگان، یک تحقیق جامع در خصوص مدل‌سازی و پیش‌بینی میزان شکل‌پذیری (درصد پرشدگی قالب) صفحات دوقطبی تیتانیومی ساخته‌شده با روش مهرزنی با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری تاکنون گزارش نشده است. ساخت صفحات دوقطبی با عمق میکروکانال بیشتر به دلیل توزیع بیشتر اکسیژن و هیدروژن منجر به افزایش بازده پیل سوختی خواهد شد. صفحات دوقطبی تیتانیومی به دلیل خواص مقاومت به خوردگی عالی نسبت به صفحات فولادی، می‌توانند گزینه مناسبی برای ساخت و استفاده در محیط اسیدی پیل سوختی پلیمری باشند. همچنین از آنجاکه چگالی تیتانیوم کمتر از فولاد است، ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی منجر به کاهش وزن مجموعه پیل سوختی و در نتیجه کاهش وزن وسیله نقلیه خواهد

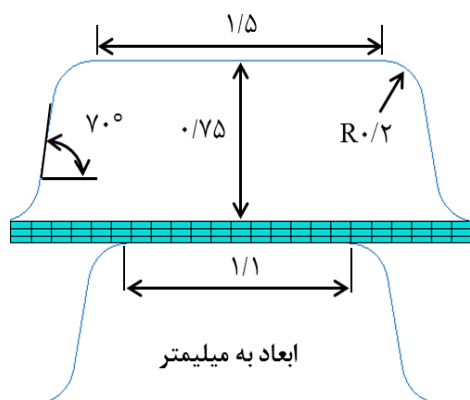
بالایی شبیه‌سازی کنند. ورق استفاده‌شده در آزمایش‌های آن‌ها از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۰۵ میلی‌متر بود. آن‌ها در فرآیند شبیه‌سازی پیشنهادی، عمق پرشدگی و نازک‌شدگی صفحات را ارزیابی نمودند. اسمیت و همکاران [13] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر پارامترهای مهرزنی مانند لقی قالب، شعاع گوشه و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب را بر روی میزان برگشت فنی و عمق پرشدگی بررسی نمودند. آن‌ها در پژوهش خود از دو نوع فولاد فریتی کروم دار و زنگ نزن ۳۱۶، دو نوع آلیاژ آلومینیوم آنیل شده ۵۰۸۶ و ۱۱۰۰، و همچنین تیتانیوم خالص تجاری استفاده کردند. ضخامت اولیه ورق‌های مذکور نیز ۰/۰۵ میلی‌متر بود. آن‌ها گزارش دادند که با توجه به معیارهای مذکور، فولاد زنگ نزن ۳۱۶ بهترین گزینه برای ساخت صفحات دوقطبی است. هو و همکاران [14] تأثیر پارامترهای مهرزنی مانند ابعاد، شعاع گوشه و زاویه قالب و نیز سرعت را بر روی پیشینه نازک‌شدگی و پرشدگی میکروکانال‌ها از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ بررسی نمودند. ضخامت اولیه ورق در پژوهش آن‌ها ۰/۱۵ میلی‌متر بود. آن‌ها از منحنی‌های حد شکل‌دهی به‌منظور یافتن محدوده امن شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی پرداختند. شکل-پذیری میکروکانال‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر توسط کیم و همکاران [15] بررسی شد. آن‌ها به مقایسه نیروی استاتیکی و دینامیکی در فرآیند مهرزنی پرداختند. تأثیر نوع نیرو، اندازه نیرو و تعداد سیکل در نیروی دینامیکی بر روی شکل‌پذیری صفحات دوقطبی بررسی شد. در تحقیقی مشابه، جین و همکاران [16] به مقایسه نیروی استاتیکی و نیروی مهرزنی دینامیکی با موج مربعی با در نظر گرفتن عمق شکل‌دهی میکروکانال پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای دستیابی به شرایط بهینه شکل‌دهی، به شعاع گوشه ۰/۳ میلی‌متر و یک موج مربعی با ۵ سیکل نیاز است. تأثیر نیروی مهرزنی بر روی شکل‌پذیری و دقت ابعادی صفحات دوقطبی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر توسط برزگری و احمدی خطیر [17] بررسی شد. آن‌ها دریافتند که با افزایش نیروی مهرزنی، اگرچه عمق شکل‌دهی افزایش می‌یابد؛ اما از طرف دیگر میزان نازک‌شدگی نیز افزایش‌یافته که مطلوب نیست. در نتیجه



شکل ۲) قالب نمودار تنش-کرنش ورق تیتانیومی استفاده شده

جدول ۱) خواص مکانیکی ورق تیتانیومی

نسبت پواسون	چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	تنش حد نهایی (مگاپاسکال)	پارامتر (واحد)
۰/۳۶۱	۴۵۱۰	۱۲۰	۶۸۷	مقدار



شکل ۳) مدل هندسی دوبعدی به همراه ابعاد هندسی میکروکانال

۳- مراحل تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی مهرزنی، یک قالب با الگوی شیاری موازی مستقیم با چهار کانال ساخته شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور بررسی سایر الگوها در پژوهش‌های آتی، الگوی میکروکانال به صورت اینسرتی و از جنس فولاد H13 ساخته شد. آزمایش‌های تجربی مهرزنی با استفاده از یک دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۵۰ تن انجام شد. در این مقاله، از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر برای ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری استفاده شد که خواص شیمیایی آن در جدول ۲ آمده است. پس از اجرای تجربی آزمایش‌های مهرزنی، صفحات دوقطبی با استفاده از رزین اپوکسی مانت و با استفاده از سنباده چرخان پولیش کاری شدند.

شد. با وجود ویژگی‌های مثبت تیتانیوم، این فلز به دلیل ساختار بلوری منشوری فشرده (HCP)، شکل‌پذیری کمتری نسبت به فولاد در دمای محیط از خود نشان می‌دهد. این موضوع ایجاب می‌نماید که در ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی به روش مهرزنی، فرآیند باید به طور مؤثری کنترل و مدل‌سازی شده تا صفحات دوقطبی با حداکثر عمق شکل‌دهی و بدون پارگی تولید شوند.

در این مقاله، از فرآیند مهرزنی به منظور ساخت صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری استفاده شده است. به دلیل خواص مقاومت به خوردگی عالی تیتانیوم و همچنین چگالی کمتر آن نسبت به فولاد، از ورق تیتانیوم خالص تجاری برای ساخت صفحات دوقطبی با الگوی شیاری موازی مستقیم استفاده شده است. فرآیند مهرزنی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و صحت مدل اجزای محدود در مقایسه با نتایج تجربی تایید خواهد شد. در ادامه با استفاده از روش سطح پاسخ و با در نظر گرفتن پارامترهای لقی قالب، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به عنوان متغیرهای ورودی و همچنین میزان پرشدگی قالب به عنوان خروجی، میزان شکل‌پذیری میکروکانال‌های صفحات دوقطبی ارزیابی خواهد شد. به منظور پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب بر اساس پارامترهای ورودی، از روش‌های رگرسیون، الگوریتم ژنتیک و مدل ANFIS استفاده خواهد شد. در نهایت، میزان دقت روش‌های مذکور به منظور تخمین شکل‌پذیری صفحات دوقطبی تیتانیومی باهم مقایسه خواهد شد.

۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی تیتانیومی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. ورق به صورت شکل‌پذیر و مجموعه قالب به صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شدند. برای تعیین خواص مکانیکی و رفتار تغییرشکل ورق، از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8M استفاده شد. شکل ۲ منحنی تنش-کرنش حقیقی ورق را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۱، سایر خواص مکانیکی ورق استفاده شده را نشان می‌دهد. برای اطمینان از در نظر گرفتن پدیده برگشت فنی، یک تحلیل ثانویه برای برگشت سنبه در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک ۰/۱ در سطح تماس بین ورق و قالب با استفاده از گزینه پنالته تعریف شد [21]. قالب پایین به طور کامل در جای خود مقید شده و قالب بالا نیز با سرعت ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت می‌کند. برای مش بندی ورق از المان CPE4R و تعداد ۴ المان در راستای ضخامت ورق استفاده شد. از طرف دیگر، برای مجموعه قالب (به دلیل فرض صلب تحلیلی) مش بندی در نظر گرفته نشد. شکل ۳، مدل هندسی دوبعدی به همراه ابعاد هندسی میکروکانال را نشان می‌دهد.

به این صورت است که درست مانند طبیعت، یک الگوریتم ژنتیک با جمعیتی از جواب‌های بالقوه برای یک مسئله شروع می‌شود. هر جواب به‌عنوان مجموعه‌ای از پارامترها یا "ژن‌ها" نشان داده می‌شود و یک کروموزوم را تشکیل می‌دهد. سپس این کروموزوم‌ها در طی یک سری از نسل‌ها تکامل می‌یابند و بهترین کروموزوم (بهترین جواب) ساخته می‌شود. در هر نسل، برابری هر کروموزوم (کیفیت هر جواب) توسط توابعی تعیین شده و بهترین کروموزوم‌ها (بهترین جواب‌ها) با احتمال بیشتری در نسل بعدی استفاده می‌شوند. برای این منظور بخشی از کروموزوم‌های خوب عیناً در نسل بعد استفاده شده، برخی برای تولیدمثل و ایجاد کروموزوم‌های نسل بعدی استفاده می‌شوند و توسط عملیاتی مانند تقاطع (ترکیب دو کروموزوم) و جهش (تغییری اتفاقی در یک کروموزوم) نسل بعدی ایجاد می‌شود. بدین‌وسیله، نسل بعدی شامل کروموزوم‌های خوب نسل قبلی، ترکیبی از آن‌ها و همچنین کروموزوم‌هایی جدید هستند که می‌توانند جواب‌های بهینه جدید را ایجاد کنند. در طول چندین نسل، الگوریتم ژنتیک به تدریج به سمت یک‌راه حل بهینه یا نزدیک به بهینه همگرا می‌شود. این الگوریتم یک رویکرد جذاب است که می‌تواند در حوزه‌های مختلفی مانند مسائل بهینه‌سازی در مهندسی، پیش‌بینی قیمت و پیش‌بینی تورم استفاده شود [24]

26]

۳-۴- سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی

در مرحله سوم، از سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) برای تخمین میزان پرشدگی قالب استفاده شد. این تکنیک بر اساس سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو استوار است و از آنجایی که هم شبکه‌های عصبی و هم اصول منطق فازی را ادغام می‌کند، مزایای هر دو را در بر دارد [27]. هر مدل ANFIS دارای پنج لایه که در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با شکل، فرض شده که ۳ ورودی و یک خروجی وجود دارد. لایه اول به لایه فازی‌ساز معروف بوده، ورودی‌ها را گرفته و آن‌ها را به مجموعه قوانین فازی "اگر-آنگاه" تبدیل می‌کند. توابع عضویت در این لایه انواع زیادی دارند، اگر از نوع زنگوله‌ای استفاده شود، معادلات (۲) تا (۴) می‌توانند بیانگر ورودی‌های اول تا سوم باشند [28].

$$\mu A_i(I_1) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_1 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (2)$$

$$\mu B_i(I_2) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_2 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (3)$$



شکل ۴) قالب مهرزنی با الگوی شیری موازی مستقیم

جدول ۲) خواص شیمیایی ورق استفاده شده در آزمایش‌های تجربی (درصد وزنی)

تیتانیوم	آهن	سیلیسیوم	آنتیموان	منگنز	قلع
پایه	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲

در ادامه، با استفاده از یک میکروسکوپ نوری (با بزرگنمایی ۴۰ برابر)، ضخامت نهایی و عمق پرشدگی آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری میزان پرشدگی قالب از رابطه (۱) استفاده شد که در آن h میزان عمق شکل داده شده و H نیز عمق قالب (۰/۷۵ میلی‌متر) است [22].

$$\%Filling = \frac{h}{H} \times 100 \quad (1)$$

۴- طراحی آزمایش و الگوریتم‌های فرا ابتکاری

۴-۱- روش سطح پاسخ

در ابتدا، برای طراحی آزمایش و پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب از روش آماری سطح پاسخ استفاده شد. تعداد ۲۰ آزمایش به‌صورت طرح مرکب مرکزی طراحی شدند که در آن‌ها پارامترهای لقی قالب، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به‌عنوان متغیرهای ورودی و همچنین میزان پرشدگی قالب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. از نرم‌افزار مینی‌تب برای طراحی آزمایش استفاده شد [23]. سپس، آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از شبیه‌سازی انجام و میزان پرشدگی قالب برای هر آزمایش استخراج شد. جدول ۳ طراحی آزمایش به همراه خروجی موردنظر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که آزمایش‌های طراحی شده برای آموزش الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده خواهد شد که در ادامه تشریح خواهند شد.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک

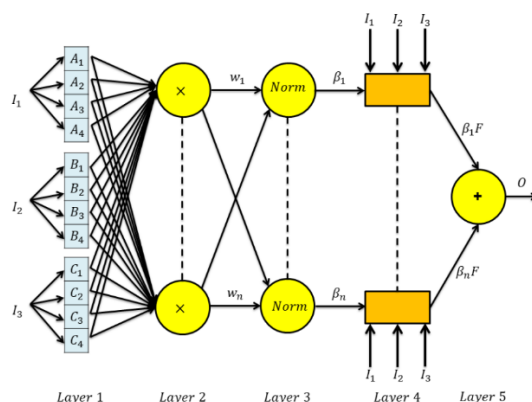
در مرحله دوم، از روش الگوریتم ژنتیک برای تخمین میزان پرشدگی قالب استفاده شد. این الگوریتم یک تکنیک جستجو و بهینه‌سازی است که از اصول تکامل طبیعی الهام گرفته شده است. این روش راهی برای حل مسائل پیچیده با تقلید از فرآیند انتخاب طبیعی برای یافتن بهترین جواب ممکن است. روش کار

جدول ۳) طرح آزمایش‌ها به همراه خروجی موردنظر (میزان پرشدگی قالب)

شماره آزمایش	لقی قالب (میلی‌متر)	سرعت مهرزنی (میلی‌متر/دقیقه)	ضریب اصطکاک	میزان پرشدگی (%)
۱	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱
۲	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱
۳	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۰	۴۳
۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۲۰	۳۹
۵	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۰	۴۵
۶	۰/۲۰۰	۲	۰/۱۵	۴۴
۷	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱
۸	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۲۰	۴۲
۹	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۱۰	۴۴
۱۰	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۲۰	۴۳
۱۱	۰/۱۷۵	۰/۵	۰/۱۵	۴۰
۱۲	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۲۰	۳۵
۱۳	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱
۱۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱
۱۵	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۱۰	۴۳
۱۶	۰/۱۷۵	۳/۵	۰/۱۵	۴۱
۱۷	۰/۱۵۰	۲	۰/۱۵	۴۰
۱۸	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۱۰	۴۶
۱۹	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۲۰	۳۴
۲۰	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۴۱

$$\mu C_i(I_3) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{I_3 - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \times b_i} \quad (۴)$$

در این معادلات μA_i ، μB_i و μC_i توابع عضویت ورودی‌های I_1 ، I_2 و I_3 می‌باشند. همچنین a_i ، b_i و c_i پارامترهای توابع عضویت بوده و در بازه صفر تا یک قرار دارند. این توابع عضویت ثابت نیستند و با توجه به تغییرات ورودی‌ها تغییر پیدا می‌کنند. در لایه دوم، ورودی‌ها پس از فازی شدن در یکدیگر ضرب شده و



شکل ۵) ساختار کلی یک شبکه ANFIS با ۳ ورودی و ۱ خروجی

$$\begin{aligned}
 \text{Filling (\%)} = & 1.191 - 7.37 C \\
 & + 0.0242 V - 2.811 \mu \\
 & + 20.36 C^2 \\
 & - 0.00545 V^2 \\
 & + 1.09 \mu^2 \\
 & - 0.0667 C \times V \\
 & + 10.00 C \times \mu \\
 & + 0.0667 V \times \mu
 \end{aligned} \quad (9)$$

۳-۵- پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در این بخش، معادله (۹) که پیش‌تر توسط روش سطح پاسخ به‌دست‌آمده بود، برای بهبود پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب، با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. برای این منظور ۱۰ ضریب عددی در این معادله به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و توسط این روش به گونه‌ای به‌دست آمده‌اند که جمع قدرمطلق خطای بین مقدار پرشدگی تئوری و مقدار پرشدگی به‌دست آمده از آزمایشات کمینه شود. جمعیت نسل اولیه برابر با ۵۰۰ فرد (۵۰۰ کروموزوم) در نظر گرفته شد که در هر نسل ۱۰٪ از بهترین کروموزوم‌ها برای ترکیب و ایجاد نسل‌های جدید استفاده شده و بقیه برای ایجاد جهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پس از گذشت بیست هزار نسل و انجام بهینه‌سازی، معادله (۱۰) برای پیش‌بینی میزان پرشدگی به‌دست آمد. با استفاده از این معادله خطای مورد نظر به میزان 38.76×10^{-3} درصد به‌دست آمد.

$$\begin{aligned}
 \text{Filling (\%)} = & 0.9011 - 3.4623 C \\
 & + 0.01043 V \\
 & - 3.1933 \mu \\
 & + 7.1113 C^2 \\
 & - 0.0047 V^2 \\
 & + 1.7776 \mu^2 \\
 & + 0.0667 CV \\
 & + 12.000 C\mu + 0 V\mu
 \end{aligned} \quad (10)$$

۴-۵- پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب با استفاده سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی

در این بخش، پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب با استفاده سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی انجام شده است. برای این منظور، پارامترهای لقی قالب، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به عنوان متغیرهای ورودی و همچنین میزان پرشدگی قالب به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. برای این منظور تابع عضویت گاوسین برای هر ورودی، همچنین تعداد ۷۲ گره، ۲۷ پارامتر خطی، ۲۷ پارامتر غیر خطی، و ۲۷ قانون فازی استفاده شد. بعد از ۱۰ دوره آموزش این سیستم استنباط فازی

سپس میزان قدرت هر ورودی مشخص می‌شود. به دلیل کارکرد این لایه، لایه دوم به "لایه قانون" شهرت دارد. خروجی این لایه از ضرب ورودی‌ها در عملگرهای فازی مطابق معادله (۵) به‌دست می‌آید که در این معادله w_i قدرت قانون فازی موردنظر است.

$$w_i = \mu A_i(I_1) \times \mu B_i(I_2) \times \mu C_i(I_3); \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

لایه سوم وظیفه نرمال کردن خروجی‌های لایه قبلی را بر عهده دارد. برای این کار قدرت هر گره، بر جمع قدرت کل گره‌ها تقسیم می‌شود (معادله (۶)). در لایه چهارم کمیت‌های فازی، به عدد تبدیل می‌شوند. برای این منظور هر گره دارای یک تابع است که قوانین فازی را با توابع عضویت به‌صورت معادله (۷) ترکیب کرده تا خروجی عددی تولید شود که در آن N_i قدرت نرمال شده گره، F_i قانون فازی، و نهایتاً q_i ، p_i و r_i بیانگر پارامترها در هر گره هستند.

$$N_i = \frac{w_i}{\sum w_i}; \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 N_i \times F_i = & N_i \cdot (p_i \cdot (I_1) + q_i \cdot (I_2) \\
 & + r_i \cdot (I_3)); \quad i \\
 & = 1, 2, 3, \dots
 \end{aligned} \quad (7)$$

درنهایت، خروجی در لایه پنجم بر اساس جمع ورودی‌های این لایه (از لایه چهارم) با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$O = \sum_i N_i \times F_i \quad (8)$$

با توجه به ساختار ANIFS و اینکه این روش از مزایای شبکه عصبی و منطق فازی به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌کند، کاربردهای وسیعی از قبیل طراحی واپایشگر، پیش‌بینی پارامترهای مختلف و استفاده در صنایع غذایی را دارد.

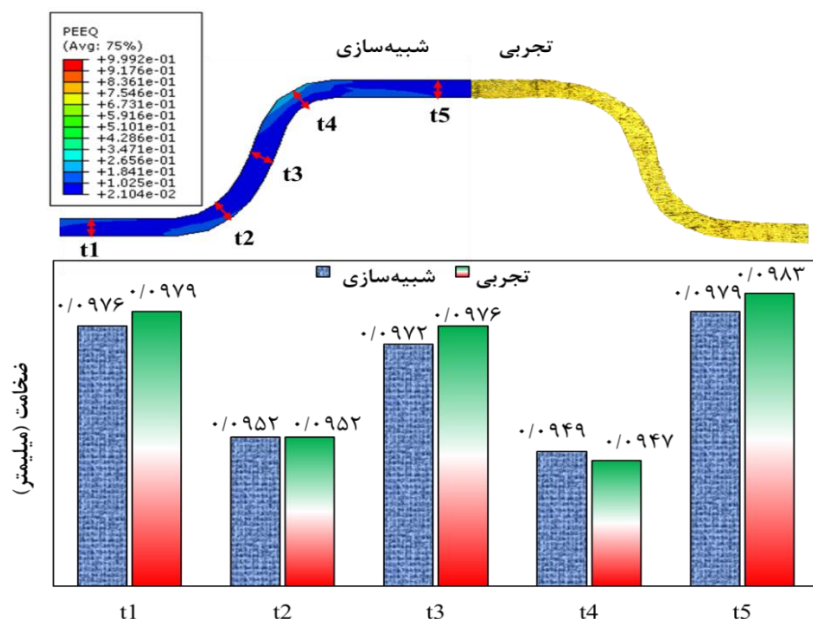
۵- نتایج و بحث

۱-۵- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

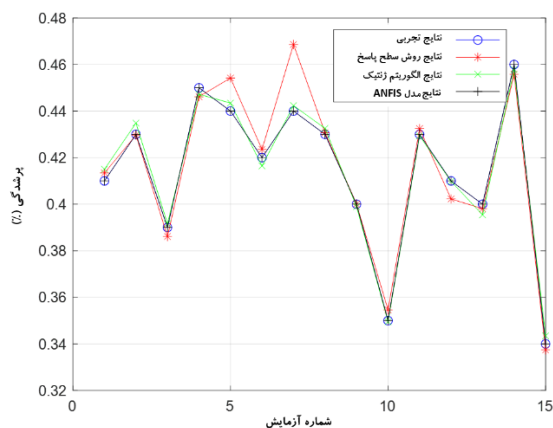
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی مطابق با مرجع [29]، نتایج تجربی ضخامت صفحه دوقطبی شکل داده‌شده با نتایج عددی مطابق با شکل ۶ مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج عددی و تجربی مطابقت قابل قبولی برقرار بوده و در نتیجه صحت مدل اجزای محدود تایید شد.

۲-۵- پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب با روش سطح پاسخ

رابطه (۹) مدل رگرسیون خروجی حاصل از روش سطح پاسخ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میزان کفایت مدل (R^2) ۹۸/۹۰٪ به‌دست‌آمده که مطلوب است. همچنین میزان میانگین قدر مطلق خطا در تخمین میزان پرشدگی قالب برای این مدل 82.16×10^{-3} درصد به‌دست آمد.



شکل ۶) صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی



شکل ۷) مقایسه میزان پرشدگی حاصل از نتایج تجربی، روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و مدل ANIFS

آزمایش‌ها مهرزنی با استفاده از یک قالب چهار کاناله با الگوی شیاری موازی مستقیم به‌صورت تجربی انجام و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. پس از صحت-سنجی مدل شبیه‌سازی، از آن برای اجرای آزمایش‌ها طراحی شده به روش سطح پاسخ استفاده شد. پارامترهای لقی قالب، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به‌عنوان متغیرهای ورودی و همچنین میزان پرشدگی قالب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. سپس نتایج پرشدگی قالب حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج حاصل از پیش‌بینی به سه روش رگرسیون، الگوریتم ژنتیک و مدل ANIFS مقایسه شد. با بررسی نتایج مشخص شد که:

۱. مدل رگرسیون حاصل از روش سطح پاسخ، میزان پرشدگی قالب در ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی پیل سوختی پلیمری را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی

عصبی تطبیقی، مقدار جمع قدرمطلق خطای پیش‌بینی به میزان 0.0062×10^{-3} درصد به‌دست آمد.

۵-۵- مقایسه روش‌ها

جدول ۴ میزان خطای به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی پرشدگی قالب با استفاده از سه روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک و سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی را مقایسه می‌کند. همچنین به‌منظور درک بهتر، مقایسه‌ای تصویری بین میزان پرشدگی تجربی و میزان پرشدگی حاصل از روش‌های مذکور در شکل ۷ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان خطای روش سطح پاسخ با استفاده از الگوریتم ژنتیک و سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی به ترتیب در حدود ۵۳ و ۹۹٪ کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر، مدل ANIFS استفاده‌شده با دقت بسیار بالایی پرشدگی قالب را پیش‌بینی می‌نماید.

جدول ۴) میزان خطای هر روش در پیش‌بینی پرشدگی قالب

نام روش	جمع قدرمطلق خطا (%)
سطح پاسخ	82.16×10^{-3}
الگوریتم ژنتیک	38.76×10^{-3}
مدل ANIFS	0.0062×10^{-3}

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله، به پیش‌بینی شکل‌پذیری میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری پرداخت. ورق اولیه از جنس تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و فرآیند مهرزنی به‌عنوان روش ساخت صفحات دوقطبی انتخاب شد.

- 8- Khatir FA, Barzegari MM, Talebi-Ghadikolaee H, Seddighi S. Integration of design of experiment and finite element method for the study of geometrical parameters in metallic bipolar plates for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Nov 16;46(79):39469-82.
- 9- 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 Feb 10;15(12):450-60.
- 10- Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Multi-objective optimization of the stamping of titanium bipolar plates for fuel cell. *ADMT Journal*. 2019 Dec 1;12(4):1-8.
- 11- Dundar F, Dur E, Mahabunphachai S, Koc M. Corrosion resistance characteristics of stamped and hydroformed proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. *Journal of Power sources*. 2010 Jun 1;195(11):3546-52.
- 12- Chen TC, Ye JM. Fabrication of micro-channel arrays on thin stainless steel sheets for proton exchange membrane fuel cells using micro-stamping technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013 Feb;64:1365-72.
- 13- Smith TL, Santamaria AD, Park JW, Yamazaki K. Alloy selection and die design for stamped Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) bipolar plates. *Procedia CIRP*. 2014 Jan 1;14:275-80.
- 14- Hu Q, Zhang D, Fu H, Huang K. Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell—Numerical simulation and experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014 Aug 22;39(25):13770-6.
- 15- Kim MJ, Jin CK, Kang CG. Comparison of formabilities of stainless steel 316L bipolar plates using static and dynamic load stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Nov;75:651-7.
- 16- Jin CK, Koo JY, Kang CG. Fabrication of stainless steel bipolar plates for fuel cells using dynamic loads for the stamping process and performance evaluation of a single cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014 Dec 12;39(36):21461-9.
- 17- Barzegari MM, Khatir FA. Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019 Nov 29;44(59):31360-71.
- 18- Seddighi S, Barzegari MM, Talebi-Ghadikolaee H. Numerical-experimental investigation of using rubber blank holder on wrinkling of metallic bipolar plates formed by stamping process. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023 Mar 31.
- 19- Modanloo V, Talebi-Ghadikolaee H, Alimirzaloo V, Elyasi M. Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Jan 27;46(7):5729-39.
- 20- Xu Z, Li Z, Zhang R, Jiang T, Peng L. Fabrication of micro channels for titanium PEMFC bipolar plates by multistage forming process. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Mar 16;46(19):11092-103.

می‌کند. میزان خطای رابطه ارائه‌شده به‌منظور پیش‌بینی پرشدگی قالب با این روش 82.16×10^{-3} درصد به‌دست آمد.

۲. دقت الگوریتم ژنتیک، برای پیش‌بینی میزان پرشدگی قالب بیشتر از روش رگرسیون است. با استفاده از این الگوریتم، میزان خطای رابطه پیش‌بینی کننده پرشدگی قالب برابر با 38.76×10^{-3} درصد به‌دست آمد.

۳. مدل ANIFS به دلیل برخورداری از مزایای شبکه عصبی و منطق فازی به‌صورت هم‌زمان، با دقت بسیار بالایی میزان پرشدگی قالب را پیش‌بینی می‌کند. میزان خطای رابطه پیش‌بینی کننده پرشدگی قالب 0.0062×10^{-3} درصد به‌دست آمد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: بدین‌وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر، هیچ‌گونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

منابع

- 1- Maghsudi P, Mirbozorgi SA, Hassanzadeh H. Modeling of Laminar Fully Developed Flow in the Presence of Mass and Heat Transfer inside the Fuel Cell Channel. *Modares Mechanical Engineering*. 2019 Jun 10;19(6):1363-74.
- 2- Abdoli A, Dehghan Manshadi M, Afshari E. New interior design for polymer flow membrane fuel cell flow field to improve performance for use in an aerial vehicle. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Feb 10;17(12):297-308.
- 3- Belali Owsia M, Jamal Hosseinipour S, Bakhshi Jooybari M, Gorji A. Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Jan 1;14(10).
- 4- Elyasi M, Talebi Ghadikolaee H, Hosseinzadeh M. Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Feb 10;15(12):461-71.
- 5- Bakhshi M, Hosseinipour SJ, Gorji A. The Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field. *Modares Mechanical Engineering*. 2014 Nov 10;14(8):17-27.
- 6- Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Investigation on forming of titanium bipolar plates using micro-stamping process. *International Journal of Engineering*. 2020 Feb 1;33(2):344-9.
- 7- Modanloo V, Elyasi M. Formability of Commercial Pure Titanium in Microchannel Bipolar Plates Using Warm Stamping Process. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 Jun 10;20(6):1593-9.

- 21- Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Optimal design of stamping process for fabrication of titanium bipolar plates using the integration of finite element and response surface methods. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Feb;45:1097-107.
- 22- Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Nov;45:9661-7.
- 23- Alimirzaloo V, Modanloo V. Investigation of the forming force in torsion extrusion process of aluminum alloy 1050. *International Journal of Engineering*. 2017 Jun 1;30(6):920-5.
- 24- Salajegheh E, Mashayekhi M, Khatibinia M, Kaykha M. Optimum shape design of space structures by genetic algorithm. *International Journal of Space Structures*. 2009 Mar;24(1):45-57.
- 25- Zhu B. A novel multiscale ensemble carbon price prediction model integrating empirical mode decomposition, genetic algorithm and artificial neural network. *Energies*. 2012 Feb 17;5(2):355-70.
- 26- Dharma F, Shabrina S, Noviana A, Tahir M, Hendrastuty N, Wahyono W. Prediction of Indonesian inflation rate using regression model based on genetic algorithms. *Jurnal Online Informatika*. 2020 Jul 16;5(1):45-52.
- 27- Dong N, Wu Z, Gao Z. Shared control based on ANFIS for brain-controlled driving. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2023 Jul 5:01423312231183028.
- 28- Abbas M, Zhang D. Revolutionizing Low-Carbon Marine Transportation: Prediction of Wave Energy via Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Framework in East China Sea. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023 Nov;48(11):15353-75.
- 29- Xu S, Li K, Wei Y, Jiang W. Numerical investigation of formed residual stresses and the thickness of stainless steel bipolar plate in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016 May 4;41(16):6855-63.