

انتخاب شرایط بهینه شکل‌دهی در ساخت صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران، v.modanloo@sirjantech.ac.ir

وحید مدانلو*

چکیده

این مقاله به بررسی ساخت صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری از جنس تیتانیوم با استفاده از فرآیند مهرزنی می‌پردازد. ابتدا فرآیند با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS شبیه‌سازی شد. سپس یک قالب مهرزنی ساخته شده و نتایج نازک‌شدگی تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه و صحت مدل عددی تایید شد. در ادامه، پانزده حالت مختلف برای انجام آزمایش‌های مهرزنی با در نظر گرفتن پارامترهای قالب، فرآیندی و سطح تماس طراحی شد. پس از اجرای عددی آزمایش‌ها، نتایج نرخ پرشدگی قالب و نرخ نازک‌شدگی صفحات دوقطبی شکل‌داده شده استخراج شد. از آنجا که در ساخت صفحات دوقطبی فلزی به روش مهرزنی پرشدگی بیشتر و نازک‌شدگی کمتر به صورت همزمان مطلوب می‌باشد، از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS برای انتخاب بهترین حالت شکل‌دهی استفاده و مشخص شد که آزمایشی با لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت شکل‌دهی ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ بهترین انتخاب خواهد بود. با انجام آزمایش مهرزنی در چنین شرایطی، بیشینه نرخ پرشدگی برابر با ۶۱/۳۳٪ و بیشینه نرخ نازک‌شدگی برابر با ۴/۶۹٪ خواهد بود. **واژه‌های کلیدی:** صفحه دوقطبی فلزی، پیل سوختی، شکل‌دهی، تیتانیوم، نازک‌شدگی، تصمیم‌گیری.

Selection of optimal forming conditions in the manufacturing of metallic bipolar plates for PEMFC

V. Modanloo

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

Abstract

In this paper, manufacturing metallic bipolar plates of polymer fuel cell made of titanium using the stamping process has been investigated. First, the process was simulated using ABAQUS finite element software. Then, a stamping die was fabricated, the experimental thinning results were compared with the simulation results, and the numerical model's accuracy was confirmed. Afterward, 15 different conditions were designed to perform stamping tests by considering the die, process, and contact surface parameters. After numerical experiments, the results of the die-filling rate and thinning rate of the formed bipolar plates were extracted. Since in the manufacturing of metallic bipolar plates by stamping method, a simultaneously higher filling and lower thinning are desired, the COPRAS multi-criteria decision-making technique was used to select the best forming condition, and it was found that an experiment with a die clearance of 0.2 mm, a forming speed of 3.5 mm/min, and a friction coefficient of 0.1 led to the best selection. By stamping under such condition, the maximum filling rate will be 61.33% and the maximum thinning rate will be 4.69%.

Keywords: Metallic bipolar plates, Fuel cell, Metal forming, Titanium, ThiDecision making.

۱- مقدمه

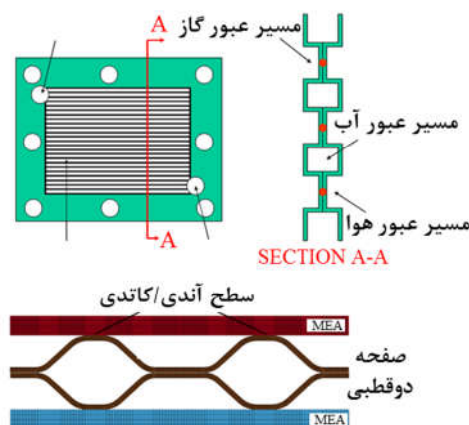
طی سالیان اخیر با افزایش تقاضای صنایع مختلف از یک سو و آلودگی زیاد سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک اهمیت فراوانی یافته است [۱]. پیل‌های سوختی پلیمری یکی از منابع انرژی پاک و دوست‌دار محیط زیست هستند که الکتریسیته را از انرژی شیمیایی با انتشار بسیار کم تولید می‌کنند [۲]. امروزه صفحات دوقطبی فلزی تولید شده با روش شکل‌دهی به عنوان جایگزین مناسبی برای صفحات دوقطبی گرافیتی و کامپوزیتی مطرح شده‌اند [۳]. دلیل این امر خواص برتر گرمایی و الکتریکی صفحات فلزی می‌باشد [۴]. همچنین از آنجا که صفحات دوقطبی نقش مهمی را در یک پیل سوختی پلیمری از نظر وزن و قیمت ایفا می‌کنند، مطالعات بسیاری در زمینه ساخت این صفحات جهت دستیابی به بهترین طراحی و بیشترین بازده انجام شده است [۵]. از جمله جنس‌های رایج در ساخت این صفحات می‌توان به ورق‌های فولاد ضدزنگ [۶]

آلومینیوم [۷] و تیتانیوم [۸] اشاره نمود. همچنین در بین روش‌های تولید این صفحات مانند شکل‌دهی با سیال [۹]، لاستیک [۱۰] و دمش گاز [۱۱]، فرآیند مهرزنی به دلیل برخورداری از مزایایی نظیر نرخ تولید بالا و عدم نیاز به تجهیزات زیاد کاربرد بیشتری در ساخت صفحات دوقطبی پیدا کرده است [۱۲]. بر روی این صفحات میکروکانال‌هایی وجود دارد که وظایف مختلفی دارند [۱۳]. هرچقدر عمق این میکروکانال‌ها بیشتر باشد حجم هیدروژن و اکسیژن بیشتری درون آن جریان یافته که منجر به افزایش بازده پیل سوختی می‌شود [۱۴]. از طرف دیگر، صفحات دوقطبی باید دارای عدم نازک‌شدگی موضعی (توزیع ضخامت یکنواخت) باشند تا عملکرد بهتر و طول عمر بیشتری داشته باشند [۱۵]. شکل ۱ قسمت‌های مختلف صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار را به صورت طرحواره نشان می‌دهد [۱۶].

* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۳۰



شکل ۱- قسمت‌های مختلف صفحات دوقطبی فلزی با الگوی شیار

[۱۶]

همکاران [۲۲] به مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ساخت صفحات دوقطبی از جنس ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر پرداختند. آنها به‌منظور دستیابی به شکل‌دهی کامل این صفحات از روش مهرزنی سه‌مرحله‌ای استفاده کردند. آنها به این موضوع پی بردند که با روش مهرزنی چندمرحله‌ای نسبت به مهرزنی تک‌مرحله‌ای، بیشینه عمق شکل‌دهی در حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین زمانیکه کانال‌های قالب موازی راستای نورد باشد عمق بیشینه در حدود ۱۳٪ بیشتر از حالتی است که عمود بر راستای نورد باشد. ژیه و همکاران [۲۳] با استفاده از فرآیند مهرزنی سه‌مرحله‌ای، به ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت ورق اولیه ۰/۱ میلی‌متر به‌صورت تجربی پرداختند. آنها بیان کردند که در مرحله اول شکل‌دهی برگشت فتری با جابجایی سنبه رابطه خطی دارد. زمانیکه جابجایی سنبه بین ۰/۳ تا ۰/۵۵ میلی‌متر است، میزان برگشت فتری صفحه بین ۱۳ تا ۲۰٪ است. همچنین، آنها گزارش کردند جهت دستیابی به عمق بیشتر میکروکانال، تا حد ممکن باید جابجایی سنبه در مراحل اولیه و ثانویه افزایش یابد. ژونگ و همکاران [۲۴] به مطالعه عددی و تجربی مهرزنی سه‌مرحله‌ای صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر پرداختند. آنها به بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند شامل شعاع گوشه سنبه و ماتریس، جابجایی سنبه و نسبت ابعاد میکروکانال بر روی میزان نازک‌شدگی پرداختند. آنها بیان کردند که ساخت قالب بهینه در مرحله اول مهرزنی منجر به کاهش بیشینه نازک‌شدگی تا ۲۲٪ می‌شود. با انتخاب شعاع گوشه بهینه به میزان ۰/۱۵ میلی‌متر، بیشینه نازک‌شدگی در مرحله سوم مهرزنی به میزان ۲۴٪ کاهش می‌یابد.

همانطور که مشاهده می‌شود، بخش بیشتر تحقیقات گذشته مربوط به عمق شکل‌دهی میکروکانال (نرخ پرشدگی) و نازک‌شدگی می‌باشد. در نتیجه می‌توان دریافت که موارد مذکور مهم‌ترین معیارها برای ساخت صفحات دوقطبی به روش شکل‌دهی می‌باشند. صفحات دوقطبی فلزی مهم‌ترین جز یک پیل سوختی پلیمری می‌باشند و چون در محیط مرطوب اسیدی کار می‌کنند باید مقاوم به خوردگی باشند [۲۵]. همچنین به‌منظور کاهش وزن وسیله نقلیه باید تا حد ممکن سبک باشند [۲۶]. از این‌رو تیتانیوم به‌دلیل برخورداری از مزایای همچون مقاومت در برابر خوردگی عالی و چگالی کم (حدود ۶۰٪ فولاد)، به‌عنوان یک گزینه مناسب برای ساخت صفحات دوقطبی به روش شکل‌دهی مطرح می‌شود [۲۷]. در نتیجه، نیاز به تحقیقی که در آن بهترین شرایط شکل‌دهی از میان گزینه‌های مختلف طراحی با در نظر گرفتن همزمان معیارهای پرشدگی و نازک‌شدگی انتخاب شود احساس می‌شود. این تحقیق به انتخاب بهترین حالت شکل‌دهی برای ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌پردازد. پانزده آزمایش (حالت) مختلف مهرزنی بر اساس ترکیب پارامترهای لقی بین سنبه و ماتریس، سرعت مهرزنی و ضریب اصطکاک به‌عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شدند. همچنین، بیشینه نرخ پرشدگی و نرخ نازک‌شدگی صفحه شکل‌داده شده به‌عنوان معیارهای انتخاب در نظر گرفته شدند. در پایان، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس، بهترین حالت مهرزنی برای ساخت صفحه دوقطبی تیتانیومی انتخاب خواهد شد.

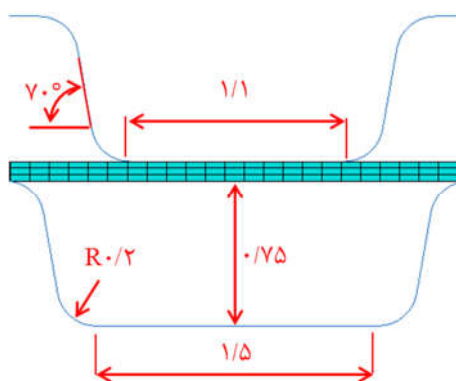
تاکنون تحقیقات مختلفی برای ساخت صفحات دوقطبی فلزی از جنس تیتانیوم به روش شکل‌دهی به‌ویژه مهرزنی گزارش شده است. جین و همکاران [۱۷] به ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی با استفاده از روش شکل‌دهی با لاستیک پرداختند. ضخامت اولیه ورق در پژوهش آنها ۰/۱ میلی‌متر بود. آنها با بررسی تجربی شرایط مختلف به این نتیجه رسیدند که بهترین حالت شکل‌دهی در شرایطی رخ می‌دهد که ضخامت لاستیک ۱۰ میلی‌متر، سختی لاستیک Shore A برابر با ۲۰، سرعت سنبه ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه، فشار سنبه ۵۵ مگاپاسکال و زاویه قالب ۳۰ درجه باشد. دونگ و همکاران [۱۸] از روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی برای ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی پرداختند. ضخامت اولیه ورق در پژوهش آنها ۰/۱ میلی‌متر بود. آنها دریافتند که عمق شکل‌دهی میکروکانال رابطه مستقیمی با سرعت برخورد دارد. آنها توانستند به یک صفحه دوقطبی سالم با بیشینه عمق شکل‌دهی ۰/۴ میلی‌متر و نرخ نازک‌شدگی ۱۵/۸۹٪ دست‌یابند. وانگ و وانگ [۱۹] به ساخت صفحات دوقطبی تیتانیومی (با ضخامت اولیه ورق ۰/۰۸ میلی‌متر) با روش شکل‌دهی الکترومغناطیسی به‌صورت تجربی پرداختند. آنها با فراهم کردن شرایط بهینه شکل‌دهی توانستند به متوسط عمق شکل‌دهی میکروکانال برابر با ۵۴٪ برسند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش انرژی شکل‌دهی منجر به بهبود پرشدگی قالب می‌شود. مدالو و همکاران [۲۰] به مطالعه شکل‌دهی صفحات دوقطبی تیتانیومی با ضخامت اولیه ورق ۰/۱ میلی‌متر به روش مهرزنی پرداختند. آنها در تحقیقات خود از هر دو روش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده کردند. آنها شروع پارگی در صفحات دوقطبی در حین فرآیند را با معیارهای مختلف آسیب (آیادا، رایس-تریسی و بروزو) مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که روش بروزو با خطای ۳/۶۸٪ دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی آسیب در مهرزنی صفحات دوقطبی تیتانیومی می‌باشد. مدالو و همکاران در پژوهشی دیگر [۲۱] پژوهش قبلی را توسعه داده و امکان ساخت صفحه دوقطبی تیتانیومی در شرایط مهرزنی گرم را مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، سرعت ۴/۸ میلی‌متر بر دقیقه و استفاده از دی‌سولفیدمولیبدن به‌عنوان روانکار به بیشینه عمق میکروکانال برابر با ۰/۴۹۴ میلی‌متر دست‌یابند. ژو و



شکل ۲- مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

$$\%Thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\%Filling = \frac{h}{H} \times 100 \quad (2)$$



شکل ۳- مدل اجزای محدود دوبعدی (ابعاد به میلی‌متر)

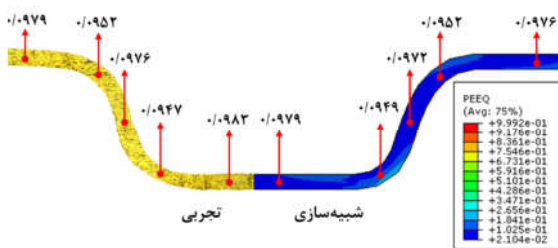
مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی طبق شکل ۴، حاکی از صحت مدل شبیه‌سازی می‌باشد. در ادامه، با ترکیب پارامترهای فرآیند شامل لقی بین سنبه و ماتریس، سرعت مه‌رزی و ضریب اصطکاک تعداد پانزده آزمایش مطابق با جدول ۲ طراحی شد. سپس، آزمایش‌ها به صورت شبیه‌سازی اجرا شده و مقادیر نرخ پرشدگی و نازک‌شدگی محاسبه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر در آزمایش‌های تجربی استفاده شد. خواص مکانیکی ورق با استفاده از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8M استخراج شد که در جدول ۱ ارائه شده است. برای انجام آزمایش‌های مه‌رزی، ابتدا یک قالب با الگوی موازی چهارکاناله از جنس فولاد H13 ساخته شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. سپس، قالب روی فک پایین دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۵۰ تن قرار گرفته و فک بالای دستگاه با سرعت ثابت ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده تا عملیات شکل‌دهی تکمیل شود. به منظور تکرارپذیری فرآیند، آزمایش تجربی سه بار تکرار شد. پس از انجام آزمایش‌ها صفحات دوقطبی ابتدا مانع شده و پس از پولیش کاری، زیر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰ برابر قرار گرفته و مقادیر نرخ پرشدگی و نرخ نازک‌شدگی آنها به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد [۲۸]. در این روابط، t_f و t_0 به ترتیب ضخامت اولیه ورق (۰/۱ میلی‌متر) و ضخامت صفحه دوقطبی شکل‌داده شده می‌باشند. همچنین، h و H به ترتیب عمق شکل‌دهی و عمق میکروکانال قالب (۰/۷۵ میلی‌متر) می‌باشند. برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و از گزینه حل صریح دینامیکی استفاده شد. فرآیند مه‌رزی به صورت دوبعدی مدل شده که در آن ورق و قالب به ترتیب به صورت شکل‌پذیر و صلب تحلیلی در نظر گرفته شدند. برای مش‌بندی ورق از المان CPE4R استفاده شد. در راستای ضخامت از تعداد سه المان استفاده شد که این عدد بر اساس همگرایی نیروی سنبه انتخاب شد. همچنین، از آنجاکه قالب به صورت صلب تحلیل مدل شد مش‌بندی نشد. قالب پایین به صورت کامل مقید شده و به قالب بالا سرعت ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. برای تعریف تماس بین ورق و قالب‌ها از گزینه پنالتی با ضریب ۰/۱ استفاده شد [۲۹]. در شکل ۳ مدل اجزای محدود در نظر گرفته شده نشان داده شده است. برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، از نتایج تجربی نازک‌شدگی استفاده شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق تیتانیوم استفاده شده

پارامتر (واحد)	مقدار
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۱۲۰
تنش نهایی (مگاپاسکال)	۶۸۵
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۴۵۱۰
ضریب پواسن	۰/۳۶



شکل ۴- نازک‌شدگی تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۲- طرح آزمایش‌ها به‌همراه خروجی‌های مربوطه

شماره آزمایش	لقی (mm)	سرعت (mm/min)	ضریب اصطکاک	پرش‌دگی (%)	نازک‌شدگی (%)
۱	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵	۵۴/۶۷	۳/۴۳
۲	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۰	۵۷/۳۳	۵/۱۵
۳	۰/۱۷۵	۲	۰/۲۰	۵۲/۰۰	۵/۱۶
۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۰	۶۰/۰۰	۴/۷۴
۵	۰/۲۰۰	۲	۰/۱۵	۵۸/۶۷	۴/۷۴
۶	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۲۰	۵۶/۰۰	۴/۷۲
۷	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۱۰	۵۸/۶۷	۴/۷۰
۸	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۲۰	۵۷/۳۳	۴/۳۵
۹	۰/۱۷۵	۰/۵	۰/۱۵	۵۳/۳۳	۵/۰۱
۱۰	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۲۰	۴۶/۶۷	۴/۴۳
۱۱	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۱۰	۵۷/۳۳	۵/۱۹
۱۲	۰/۱۷۵	۳/۵	۰/۱۵	۵۴/۶۷	۴/۹۲
۱۳	۰/۱۵۰	۲	۰/۱۵	۵۳/۳۳	۴/۹۱
۱۴	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۱۰	۶۱/۳۳	۴/۶۹
۱۵	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۲۰	۴۵/۳۳	۴/۲۸

۳- تصمیم‌گیری چندمعیاره

تصمیم‌گیری چندمعیاره یک ابزار کاربردی است و زمانی از آن استفاده می‌شود که معیارهای مختلفی برای رتبه‌بندی و ارزش‌گذاری گزینه‌ها وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، هرگاه هدف مساله انتخاب بهترین حالت (گزینه) ممکن با در نظر گرفتن همزمان همه معیارها باشد، از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود [۳۰]. در این تحقیق، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS برای انتخاب بهترین حالت مهرزنی استفاده شده است. دلیل انتخاب این روش از میان سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، سادگی محاسبات، رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها و در نظر گرفتن معیارهای مثبت و منفی می‌باشد. همچنین این روش ضمن مقایسه پیشنهادها، اولویت‌ها را با در نظر گرفتن شرایط متضاد معیارها بر اساس وزن معیارها تعیین می‌کند [۳۱]. مراحل این روش به‌صورت زیر است:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری. طبق جدول ۲، تعداد پانزده آزمایش به‌عنوان گزینه‌ها و تعداد دو خروجی (پرش‌دگی و نازک‌شدگی)

به‌عنوان معیارها در نظر گرفته شدند.

گام دوم: بی‌بعدسازی ماتریس تصمیم‌گیری. برای این کار از رابطه (۳) استفاده می‌شود که در آن X_{ij} درایه‌های ماتریس تصمیم است.

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (3)$$

گام سوم: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری موزون. برای این کار از رابطه (۴) استفاده می‌شود که در آن w_j وزن هر معیار است که در این پژوهش برابر با مقدار ۰/۵ می‌باشد.

$$D = [y_{ij}]_{m \times n} = r_{ij} \times w_j \quad (4)$$

گام چهارم: تعیین مجموع معیارهای مثبت (S_i^+) و مجموع معیارهای منفی (S_i^-) برای هر گزینه به‌ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶).

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n y_{ij}^+ \quad (5)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n y_{ij}^- \quad (6)$$

گام پنجم: محاسبه ارزیابی جامع هر گزینه (Q_i) با استفاده از رابطه (۷).

$$Q_i = S_i^+ + \frac{S_{\min}^- \sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^m (S_{\min}^- / S_i^-)} \quad (7)$$

گام ششم: محاسبه امتیاز جامع هر گزینه (U_i) با استفاده از رابطه (۸). بهترین گزینه مقدار ۱۰۰ را به خود اختصاص خواهد داد. در روابط فوق پارامتر i تعداد گزینه‌ها و پارامتر z تعداد معیارها می‌باشند [۳۱].

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (7)$$

۴- نتایج

نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش COPRAS در جدول ۳ آمده است. همچنین برای درک بهتر خواننده به‌صورت گرافیکی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، آزمایش شماره ۱۴ به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود. در این گزینه، لقی قالب، سرعت و ضریب اصطکاک به‌ترتیب برابر با ۰/۲ میلی‌متر، ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ۰/۱ است. شکل ۶ نتایج پرشدگی قالب در مدل اجزای محدود مربوط به آزمایش شماره ۱۴ را نشان می‌دهد. نتایج حاصل با نتایج تحقیقات گذشته همخوانی کامل دارد [۲۸ و ۲۹]. با افزایش لقی سیلان ورق بهبود یافته و جریان مواد به‌طور یکنواخت‌تری انجام شده و در نتیجه پارگی در ورق به تاخیر می‌افتد. همچنین از آنجاکه فرآیند شکل‌دهی در دمای محیط مستقل از سرعت می‌باشد، سرعت مهرزنی بیشتر منجر به افزایش نرخ تولید خواهد شد. ضریب اصطکاک کمتر نیز به معنی لغزش راحت‌تر ورق روی سطح قالب و در نتیجه کاهش میزان نازک‌شدگی می‌باشد. همچنین میزان پرشدگی و نازک‌شدگی برای این آزمایش به‌ترتیب برابر با ۶۱/۳۳٪ و ۴/۶۹٪ است. این گزینه در مقایسه با سایر گزینه‌ها (آزمایش‌ها)، دارای بیشترین میزان پرشدگی می‌باشد. به‌علاوه، آزمایش شماره ۴ به‌عنوان دومین گزینه برتر انتخاب شد. در این آزمایش، لقی برابر با ۰/۱۷۵ میلی‌متر، سرعت برابر با ۲ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱ است. همچنین، در این گزینه نرخ پرشدگی ۶۰٪ (دومین مقدار زیاد پرشدگی) و نرخ نازک‌شدگی برابر

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهترین حالت فرآیند مهرزنی برای ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری استفاده شد. از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا یک مدل اجزای محدود دوبعدی طراحی و در ادامه یک قالب تجربی با الگوی شیاری موازی ساخته شد. پس از تایید صحت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، از مدل عددی برای اجرای پانزده آزمایش مختلف مهرزنی استفاده شد. لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک به‌عنوان پارامترهای ورودی و همچنین بیشینه نرخ پرشدگی قالب و نازک‌شدگی صفحه دوقطبی شکل‌داده‌شده به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. در پایان، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره COPRAS، بهترین حالت مهرزنی از میان گزینه‌های موجود انتخاب شد. بهترین حالت مربوط به آزمایشی با لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ است که منجر به پرشدگی ۶۱/۳۳٪ و نازک‌شدگی ۴/۶۹٪ می‌شود.

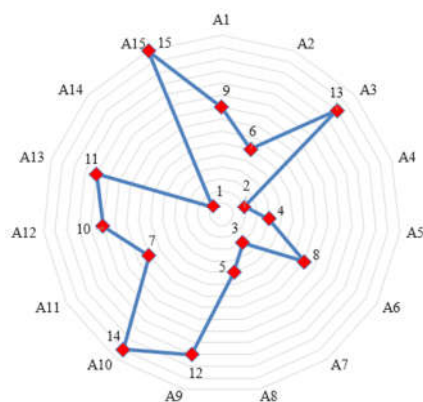
۶- مراجع

- [1] Gao X, Chen J, Xu R, Zhen Z, Zeng X, Chen X, Cui L. Research progress and prospect of the materials of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). International Journal of Hydrogen Energy. 2023 Sep 16.
- [2] Li Y, Liu Y, Liang Q, Han L, Wan N, Guo Z. Design and performance evaluation of an air-cooled PEMFC stack with metallic bipolar plates. International Journal of Hydrogen Energy. 2024 Mar 22;60:324-32.
- [3] Zhang R, Lan S, Xu Z, Qiu D, Peng L. Investigation and optimization of the ultra-thin metallic bipolar plate multi-stage forming for proton exchange membrane fuel cell. Journal of power sources. 2021 Feb 1;484:229298.
- [4] Ma X, Zhang X, Guo N, Qin L, Xiao Y, Yang D, Min J, Ming P, Zhang C. Forming of large scale bipolar plates for high power fuel cell stacks. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2024 May 1 (Vol. 1307, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
- [5] Tran MT, Lee DH, Lee HW, Kim DK. Formability improvement in multi-stage stamping of ultra-thin metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell. International journal of hydrogen energy. 2022 Dec 5;47(94):40008-25.
- [6] Guo N, Zhang X, Hou Z, Wang W, Yang D, Min J, Ming P, Zhang C. Hot stamping of ultra-thin stainless steel sheets for bipolar plates. Journal of Materials Processing Technology. 2023 Aug 1;317:117987.
- [7] Wilberforce T, Ijaodola O, Baroutaji A, Ogungbemi E, Olabi AG. Effect of bipolar plate material on proton exchange membrane fuel cell performance. Energies. 2022 Mar 3;15(5):1886.
- [8] 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.
- [9] Olayinka A, Emblom WJ. Numerical investigation of bipolar plates manufactured using hydroforming process. International Journal of Materials and Product Technology. 2021;63(1-2):109-22.
- [10] Talebi-Ghadikolaee H, Elyasi M, Mirmia MJ. Investigation of failure during rubber pad forming of metallic

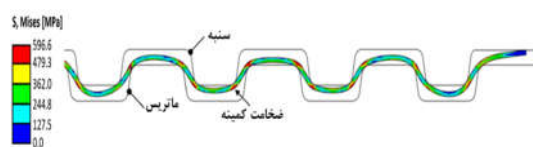
۴/۷۴٪ به‌دست آمد. از طرف دیگر، آزمایش شماره ۱۵ به‌عنوان بدترین گزینه انتخاب شد. در این آزمایش، مقادیر نرخ پرشدگی و نازک‌شدگی به‌ترتیب برابر با ۴۵/۳۳٪ و ۴/۲۸٪ است. پارامترهای این آزمایش نیز عبارت است از لقی برابر با ۰/۱۵ میلی‌متر، سرعت برابر با ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک برابر با ۰/۲.

جدول ۳- نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها

رتبه	گزینه
۹	۱
۶	۲
۱۳	۳
۲	۴
۴	۵
۸	۶
۳	۷
۵	۸
۱۲	۹
۱۴	۱۰
۷	۱۱
۱۰	۱۲
۱۱	۱۳
۱	۱۴
۱۵	۱۵



شکل ۵- نمایش رتبه‌بندی گزینه‌ها



شکل ۶- پرشدگی قالب در آزمایش شماره ۱۴

- exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024 Feb 22;56:894-902.
- [27] Gou Y, Chen H, Li R, Geng J, Shao Z. Nb–Cr–C coated titanium as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *Journal Of Power Sources*. 2022 Feb 1;520:230797.
- [28] 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.
- [29] Modanloo V, Mashayekhi A, Akhouni B. Analysis of formability in stamping of metallic bipolar plates with parallel flow field for proton exchange membrane fuel cells using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2024 Apr 1;15(2):170-6.
- [30] Akhouni B, Modanloo V. A multi-criteria decision-making analysis on the extrusion-based additive manufacturing of ABS/Cu composites. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023 Aug;17(4):1995-2003.
- [31] Fan D, Qi-hua M, Xue-hui G, Tianjun Z. Crashworthiness analysis of perforated metal/composite thin-walled structures under axial and oblique loading. *Polymer Composites*. 2021 Apr;42(4):2019-36.
- bipolar plates. Thin-walled structures. 2020 May 1;150:106671.
- [11] Kargar-Pishbijari H, Hosseinipour SJ, Aval HJ. A novel method for manufacturing microchannels of metallic bipolar plate fuel cell by the hot metal gas forming process. *Journal of manufacturing processes*. 2020 Jul 1;55:268-75.
- [12] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Multi-Objective Optimization of the Stamping of Titanium Bipolar Plates for Fuel Cell. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*. 2019 Dec 1;12(4).
- [13] Lee UG, Jin CK. A study on manufacturing of microchannel bipolar plate in fuel cell by FDM 3D printer. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*. 2021;24(2_1):103-10.
- [14] Wang W, Jia H, Li G, Sun W, Sun K, Bai S, Cheng H. Optimization of Cooling Channel Structure of Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on CFD Analysis. *Energies*. 2023 Aug 8;16(16):5858.
- [15] Porstmann S, Wannemacher T, Drossel WG. A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Dec 1;60:366-83.
- [16] Mahabunphachai S. A Hybrid Hydroforming and Mechanical Bonding Process for Fuel Cell Biopolar Plates (Doctoral dissertation).
- [17] Jin CK, Jeong MG, Kang CG. Fabrication of titanium bipolar plates by rubber forming and performance of single cell using TiN-coated titanium bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014 Dec 12;39(36):21480-8.
- [18] Dong P, Li Z, Feng S, Wu Z, Cao Q, Li L, Chen Q, Han X. Fabrication of titanium bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells by uniform pressure electromagnetic forming. *International journal of hydrogen energy*. 2021 Nov 11;46(78):38768-81.
- [19] Wang H, Wang Y. Investigation of bipolar plate forming with various die configurations by magnetic pulse method. *Metals*. 2019 Apr 17;9(4):453.
- [20] Modanloo V, Talebi-Ghadikolaei 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.
- [21] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M. Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Nov;45(11):9661-7.
- [22] 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.
- [23] Xie Y, Fang X, Wang C, Zhong Q, Wang Y, Hua R. Investigation into the Three-Stage Formation of Micro-Channels with Ultra-Thin Titanium Sheets Used for Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plates. *Materials*. 2024 Feb 26;17(5):1071.
- [24] Zhong Q, Hua R, Wang C, Cheng L, Ma Z, He H, Chen F. Investigation on three-stage stamping of micro-channels with titanium ultra-thin sheet used for PEM fuel cell bipolar plates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Jul;127(3):1377-89.
- [25] Fan HQ, Zhu X, Wang ZL, He ZK, Hu JF, Behnamian Y. High corrosion resistance and through-plane electrical conductivity of C/Ti and C/Cr coated metal bipolar plates used in PEMFC. *Energy*. 2024 Mar 15;291:130366.
- [26] Modanloo V, Mashayekhi A, Akhouni B. A comparative analysis of predictive models for estimating the formability of stamped titanium bipolar plates for proton