

# مقایسه روش‌های رگرسیون، کلونی زنبورعسل و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پرشدگی قالب در مهرزنی صفحات دوقطبی پیل سوختی

## چکیده فارسی

افزایش عمق میکروکانال‌های صفحات دوقطبی فلزی در پیل‌های سوختی غشاء پروتون منجر به افزایش بازده خواهد شد. در این پژوهش، از فرآیند مهرزنی برای ساخت صفحات دوقطبی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با الگوی شیاری موازی مستقیم استفاده شده است. تأثیر پارامترهای فرآیند شامل لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب بر روی نرخ پرشدگی و میزان نازک‌شدگی صفحات دوقطبی بررسی شد. آزمایش‌های لازم با استفاده از روش رویه پاسخ طراحی، با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا و خروجی‌های موردنظر استخراج شدند. سپس با استفاده از روش رگرسیون، یک معادله درجه دوم برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی بر اساس پارامترهای ورودی ارائه شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، ضرایب معادله مذکور بهبودیافته و میزان خطای آن در حدود ۵۳٪ کاهش یافت. در پایان نیز از یک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پیشنهادی بسیار مؤثر بوده و با دقت بسیار بالایی نرخ پرشدگی میکروکانال را تقریب می‌زند.

**واژه‌های کلیدی:** صفحات دوقطبی تیتانیومی، عمق شکل‌دهی، فرآیند مهرزنی، الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، شبکه عصبی مصنوعی

# Comparison of regression, artificial bee colony, and neural network for predicting die filling in stamping of bipolar plates fuel cell

## Abstract

Increasing the depth of microchannels on metallic bipolar plates (BPPs) in PEM fuel cells leads to an increase in the efficiency. In this research, the stamping process has been applied for manufacturing of the BPPs made of commercially pure titanium with a direct parallel flow field. The effect of process parameters including die clearance, forming speed, and sheet/die friction coefficient on the filling rate and thinning of the BPPs was investigated. The required tests were designed via the response surface method (RSM), implemented by a validated finite elements (FE) model, and the desired outputs were extracted. Then, a quadratic equation was presented for predicting the filling rate based on the input parameters using the regression method. In the following, using the artificial bee colony algorithm, the coefficients of the mentioned equation were enhanced and its error was decreased almost by 53%. Finally, an artificial neural network (ANN) was used to predict the filling rate. The results demonstrated that the proposed ANN model is very effective and approximates the filling rate of the microchannel with high accuracy.

**Keyword:** Titanium bipolar plates, Forming depth, Stamping process, Artificial bee colony algorithm, Artificial neural network

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی از سوی محققان مطرح شده‌اند [۱]. یکی از این منابع انرژی، پیل‌های سوختی هستند که انرژی الکتریکی با بازده بالا و بدون آلودگی زیست‌محیطی تولید می‌کنند [۲]. پیل‌های سوختی بر اساس متغیرهایی نظیر نوع الکترولیت، دما و فشار کاری، نوع واکنش‌دهنده، استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از سوخت به انواع مختلفی مانند پیل سوختی قلیایی، پیل سوختی اکسید جامد و پیل سوختی غشاء پروتون دسته‌بندی می‌شوند [۳]. از میان گزینه‌های مذکور، پیل‌های سوختی غشاء پروتون به دلیل قدرت بالا، راه‌اندازی سریع و دمای کاری کم با اقبال بیشتری از سوی پژوهشگران مواجه شده‌اند [۴]. یکی از اجزای مهم این نوع پیل سوختی صفحات دوقطبی می‌باشند که وظیفه میکروکانال‌های روی آن‌ها توزیع بهتر هیدروژن و اکسیژن، خروج آب تولیدشده ناشی از واکنش‌ها، انتقال الکترون‌های تولیدی، خنک‌کاری و کاهش دمای مجموعه پیل سوختی به‌منظور افزایش بازده است [۵]. به‌منظور کاهش وزن و سبیله نقلیه، صفحات دوقطبی باید تا حد ممکن سبک باشند. [۶]. همچنین از آنجاکه صفحات دوقطبی در محیط اسیدی کار می‌کنند، باید مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشند [۷]. جنس‌هایی که تاکنون برای ساخت این صفحات استفاده شده‌اند عبارت است از گرافیت [۸]، کامپوزیت [۹] و فلز [۱۰]. تاکنون پژوهشگران از روش‌های گوناگونی برای ساخت این صفحات استفاده کرده‌اند که از جمله این روش‌ها می‌توان به شکل‌دهی لاستیکی [۱۱]، شکل‌دهی با سیال [۱۲] و مهرزنی [۱۳] اشاره نمود. از یک‌سو، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد صفحات دوقطبی فلزی مانند خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی خوب [۱۴] و از سوی دیگر، به دلیل هزینه تولید پایین و سهولت اجرای فرآیند مهرزنی [۱۵]، در این تحقیق ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از فرآیند مهرزنی بررسی شده است. از نکات مهم که در ساخت صفحات دوقطبی فلزی می‌توان به آن‌ها اشاره نمود دستیابی به بیشترین عمق میکروکانال با توزیع ضخامت یکنواخت است [۱۶]. عمق بیشتر میکروکانال منجر به توزیع بیشتر اکسیژن و هیدروژن و در نتیجه افزایش بازده پیل سوختی می‌شود [۱۲]. همچنین عدم توزیع ضخامت منجر به تمرکز تنش و در نتیجه وقوع پدیده پارگی در ورق می‌شود [۱۷]. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده نیز در مهرزنی صفحات دوقطبی پیل سوختی با تمرکز بر روی بهبود شکل‌پذیری این صفحات انجام‌شده که جدول ۱ خلاصه‌ای از آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه‌ای از پژوهش‌های گزارش شده در زمینه مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی

شماره مرجع	نویسندگان (سال)	جنس ورق (ضخامت: میلی‌متر)	هسته اصلی تحقیق
[۱۸]	ماهابونیاچای و همکاران (۲۰۱۰)	فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴، ۳۱۶L	بررسی تأثیر سرعت و نیروی شکل‌دهی بر روی شکل‌پذیری کانال، زبری سطح، مقاومت به خوردگی و مقایسه فرآیند مهرزنی با فرآیند هیدروفورمینگ
[۱۹]	کو و همکاران (۲۰۱۳)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱) و آلومینیوم ۵۰۵۲ (۰/۳)	ارزیابی عمق کانال و نازک‌شدگی از طریق مقایسه فرآیند مهرزنی با نیروی استاتیکی و دینامیکی با دامنه‌های سینوسی، مربعی و شیب‌دار

[۲۰]	پارک و همکاران (۲۰۱۶)	فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ (۰/۱)	بررسی پارامترهای فرآیند مهرزنی مانند جهت قرار گرفتن ورق روی قالب، عملیات حرارتی و نوع نیروی استاتیکی یا دینامیکی بر روی نسبت نازک‌شدگی و عمق شکل‌دهی
[۲۱]	نتو و همکاران (۲۰۱۹)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱)	مطالعه شبیه‌سازی پارامترهای هندسی قالب مهرزنی بر روی پیشینه نازک‌شدگی در دو ناحیه صفحات دوقطبی (سطح مقطع مستقیم و خم‌شده)
[۲۲]	ژائو و پنگ (۲۰۱۹)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱)	به‌کارگیری یک مدل تحلیلی با توجه به اثر اندازه برای برقراری ارتباط بین عمق شکل‌دهی و پارامترهای هندسی قالب
[۲۳]	کاراچان و همکاران (۲۰۲۰)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، تیتانیوم گرید ۲، آلومینیوم ۶۰۱۶ و ۳۱۰۴ (۰/۱)	ارزیابی شکل‌پذیری کانال از نقطه‌نظر عمق شکل‌دهی در ۱۶ حالت مختلف با دو عرض کانال و چهار عمق کانال متفاوت
[۲۴]	ژو و همکاران (۲۰۲۱)	تیتانیوم TA2 (۰/۱۵)	به‌کارگیری فرآیند مهرزنی چندمرحله‌ای به‌منظور افزایش عمق شکل‌دهی و دستیابی به عمق حداکثر ۰/۶۲۱ میلی‌متر و مقایسه فرآیند با مهرزنی تک‌مرحله‌ای
[۲۵]	ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	بررسی تجربی شروع شکست میکروکانال‌ها با استفاده از مدل اجزای محدود دوبعدی با استفاده از منحنی حد شکل‌دهی جهت پیش‌بینی نازک‌شدگی
[۲۶]	ونگ و همکاران (۲۰۲۲)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	به‌کارگیری مدل Yld2000 جهت افزایش دقت مدل اجزای محدود با انجام آزمون کشش دومحوره جهت پیش‌بینی برگشت فزنی و توزیع ضخامت
[۲۷]	گو و همکاران (۲۰۲۳)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	بررسی اثر پارامترهای فرآیند شامل دما، شرایط روانکاری و اثر اندازه بر روی شکل‌پذیری و دقت ابعادی صفحات دوقطبی در مهرزنی گرم

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشتر پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در خصوص با صفحات فولادی است. از آنجا که چگالی تیتانیوم در حدود ۶۰٪ فولاد بوده و نیز صفحات دوقطبی ۶۰ تا ۸۰٪ از وزن مجموعه پیل سوختی را شامل می‌شوند [۲۸]، با تولید صفحات دوقطبی تیتانیومی وزن مجموعه پیل سوختی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه قرار داشتن صفحات دوقطبی در محیط مرطوب و به‌شدت اسیدی، صفحات دوقطبی فلزی فولادی معمولاً پس از تولید پوشش‌دهی می‌شوند [۲۹].

با توجه به خواص مقاومت به خوردگی استثنایی تیتانیوم نسبت به فولاد (در حدود ۱۲۰ برابر)، هزینه‌های اعمال پوشش بسیار کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، تیتانیوم به دلیل ساختار بلوری منشوری فشرده (HCP)، میزان شکل‌پذیری کمتری نسبت به فولاد و آلومینیوم در دمای محیط دارد. از همین رو پارامترهای شکل‌دهی باید در مهرزنی صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری به نحوی بهینه کنترل شوند تا ضمن عدم وقوع پارگی، صفحه‌ای سالم با حداکثر عمق شکل‌دهی ساخته شود.

در این مقاله، ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ورق اولیه ۰/۱ میلی‌متر با استفاده از فرآیند مهرزنی بررسی شده است. پس از ارزیابی خواص مکانیکی ورق تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، فرآیند مهرزنی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود

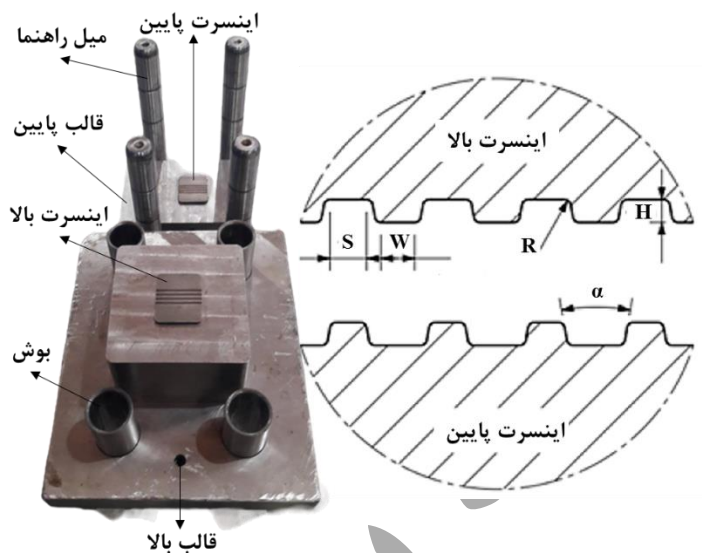
انجام خواهد شد. یک مدل رگرسیون برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب بر اساس پارامترهای شکل‌دهی ارائه خواهد شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی، رابطه مذکور بهینه‌شده و میزان خطای آن کاهش خواهد یافت. در پایان نیز با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی، میزان نرخ پرشدگی قالب با دقت قابل قبولی تخمین زده خواهد شد.

## ۲- مراحل تجربی

در این تحقیق برای ساخت صفحات دوقطبی پیل سوختی غشاء پروتون، از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. تیتانیوم به دلیل مقاومت به خوردگی بالا و چگالی پایین گزینه مناسبی برای ساخت صفحات دوقطبی فلزی است [۳۰]. برای استخراج خواص مکانیکی و فیزیکی ورق، نمونه‌های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8M با استفاده از دستگاه وایرکات آماده شدند. برای انجام آزمون کشش از دستگاه سنتام با ظرفیت ۲۵ تن استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های تجربی یک قالب مهرزنی با الگوی چهار کانال موازی مستقیم به صورت درون چین (Insert) ساخته شد. این امر امکان بررسی سایر الگوها برای پژوهش‌های آتی را فراهم می‌کند. برای ساخت اینسرت‌ها از فولاد H13 به دلیل خواص مقاومت به سایش بالای این جنس استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های مهرزنی از یک دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۵۰ تن استفاده شد. شکل ۱ مجموعه قالب استفاده‌شده را نشان می‌دهد. همچنین، ابعاد هندسی قالب مهرزنی در جدول ۲ ارائه شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، صفحات دوقطبی شکل داده‌شده درون رزین اپوکسی مانت شدند و پس از پولیش کاری با استفاده از سمباده چرخان، زیر میکروسکوپ نوری با میزان بزرگنمایی ۴۰ برابر مشاهده و میزان عمق پرشدگی و ضخامت نهایی آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نرخ پرشدگی قالب از رابطه (۱) استفاده شد که در آن  $h$  میزان عمق شکل داده‌شده و  $H$  نیز عمق قالب (۰/۷۵ میلی‌متر) است [۳۱]. برای بررسی میزان نازک شدگی نیز از رابطه ۲ استفاده شد که در آن  $t_f$  و  $t_0$  به ترتیب ضخامت اولیه ورق و ضخامت نهایی صفحه دوقطبی شکل داده‌شده می‌باشند [۳۱].

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

$$\%Thining\ rate = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (2)$$



شکل ۱. قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

جدول ۲. ابعاد هندسی قالب مهرزنی

S	W	R	$\alpha$	H	پارامتر
۱/۲	۱/۱	۰/۲	۲۰	۰/۷۵	مقدار
(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(درجه)	(میلی‌متر)	(واحد)

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای شبیه‌سازی فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی استفاده شد. از یک مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای با فرض قطعه شکل‌پذیر و قالب صلب تحلیلی استفاده شد. در نتیجه، ورق با المان CPE4R مش‌بندی شد. تعداد المان‌ها در راستای ورق ۴ عدد انتخاب شد که بر اساس پژوهش‌های پیشین و شبیه‌سازی‌های اولیه انتخاب شد [۱۵]. سرعت شکل‌دهی به مقدار ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از نقطه مرجع به اینسرت بالا اعمال شد. همچنین اینسرت پایین به‌طور کامل در جای خود مقید شد. برای اطمینان از در نظر گرفتن پدیده برگشت فنی، یک تحلیل ثانویه برای برگشت سنبه نیز در نظر گرفته شد. مطابق با مرجع [۱۵]، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب نیز مقدار ۰/۱ انتخاب شد. با توجه به اینکه ورق تیتانیوم به‌صورت کوئل رول شده خریداری شد، فرض ناهمسانگرد بودن آن معقول بوده و باید در شبیه‌سازی لحاظ شود. از همین رو، ضرایب ناهمسانگردی در راستاهای نورد ( $T_0$ )، عمود بر نورد

( $r_{90}$ )، و قطری ( $r_{45}$ )، با استفاده از آزمون کشش استخراج شد. در ادامه نسبت‌های تنش‌های تسلیم موردنیاز برای شبیه‌سازی محاسبه شد که در جدول ۳ این مقادیر نشان داده شده است.

جدول ۳. نسبت‌های تنش تسلیم ورق استفاده شده در شبیه‌سازی

$R_{11}$	$R_{22}$	$R_{33}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{23}$	نسبت
۱	۰/۹۱۱	۱/۲۸۴	۰/۰۲	۰/۸۱۵	۱	مقدار

#### ۴- روش‌های مدل‌سازی فرآیند

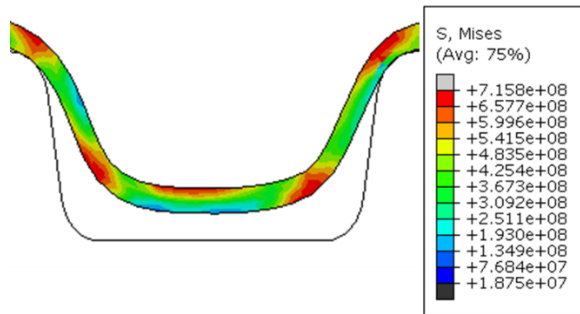
##### ۴-۱- روش رویه پاسخ

در مرحله اول تحقیق، از روش آماری رویه پاسخ برای طراحی آزمایش و یافتن پاسخ بهینه نرخ شکل‌دهی استفاده شد. در این روش از یک معادله درجه دوم کامل برای برازش (رگرسیون) تابع خروجی بر اساس متغیرهای ورودی استفاده می‌شود [۳۲]. با استفاده از سه پارامتر لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب، تعداد ۲۰ آزمایش طراحی شد که در جدول ۴ آمده است. از نرم‌افزار مینی‌تب برای طراحی آزمایش استفاده شد [۳۳]. آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا و میزان نرخ پرشدگی و نازک‌شدگی هر آزمایش استخراج شد. در شکل ۲ یک نمونه پرشدگی قالب به‌صورت شبیه‌سازی نشان داده شده است.

جدول ۴. طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ

شماره آزمایش	لقی قالب (میلی‌متر)	سرعت شکل‌دهی (میلی‌متر/دقیقه)	ضریب اصطکاک
۱	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۲	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۳	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۰
۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۳۰
۵	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۰
۶	۰/۲۰۰	۲	۰/۱۵
۷	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۸	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۳۰
۹	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۱۰
۱۰	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۳۰
۱۱	۰/۱۷۵	۰/۵	۰/۱۵
۱۲	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۳۰
۱۳	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۱۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۱۵	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۱۰
۱۶	۰/۱۷۵	۳/۵	۰/۱۵
۱۷	۰/۱۵۰	۲	۰/۱۵

۰/۱۰	۳/۵	۰/۲۰۰	۱۸
۰/۲۰	۰/۵	۰/۱۵۰	۱۹
۰/۱۵	۲	۰/۱۷۵	۲۰



شکل ۲. نمایش پرشدگی قالب به صورت شبیه سازی

#### ۴-۲- الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

در مرحله دوم تحقیق، از روش بهینه سازی زنبور عسل مصنوعی برای تخمین نرخ پرشدگی استفاده شده است. این روش بر مبنای کارکرد واقعی زنبورهای عسل دریافتن بهترین شهد استوار شده است [۳۴]. در واقع برای یافتن بهترین شهد (بهترین جواب) زنبورها به صورت اتفاقی در فضای اطراف کندو (فضای جستجوی مسئله) پخش می شوند و مقداری از شهد را با خود به کندو می آورند و مکان دستیابی به شهد را نیز به خاطر می سپارند. سپس کیفیت تمامی شهدها (کیفیت جوابها) در کندو با یکدیگر مقایسه می شود. در کاوشهای بعدی زنبورها برای یافتن شهد، زنبورها با احتمال بیشتری به سمت جایی می روند که پیش تر قبلاً بهترین شهد (بهترین جواب) را داشته است. به این ترتیب زنبورها آرام آرام به سمت جایی می روند که بهترین شهد (بهترین جواب) در آن قرار دارد؛ ضمن اینکه به دلیل ماهیت اتفاقی دریافتن شهدهای جدید (جوابهای جدید)، همواره شهدهای جدید (جوابهای جدید) را نیز بررسی می کنند؛ لذا شهد بهینه نهایی (جواب بهینه نهایی) از کیفیت بالایی برخوردار خواهد بود [۳۵].

#### ۴-۳- الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

در مرحله سوم تحقیق، از روش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین نرخ پرشدگی استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی یک مدل ریاضی است که الهام گرفته از ساختار عصبی مغز انسان است. این شبکه ها از واحدهای کوچکی به نام نورون تشکیل شده اند که با یکدیگر ارتباط برقرار می کنند. هر نورون ورودی های خود را دریافت کرده، آن ها را پردازش می کند و خروجی تولید می کند. این خروجی عموماً ضربی از ورودی ها به علاوه مقداری است و می تواند در نورونی دیگر وارد شده تا خروجی های بعدی را تولید کند. با ترکیب صدها یا حتی هزاران نورون در یک شبکه، قدرت محاسباتی بسیار زیادی به دست می آید. سپس خروجی نهایی شبکه با خروجی مورد نظر قیاس شده، خطای بین این دو تعیین شده، و به صورت انتشار به عقب در تمامی

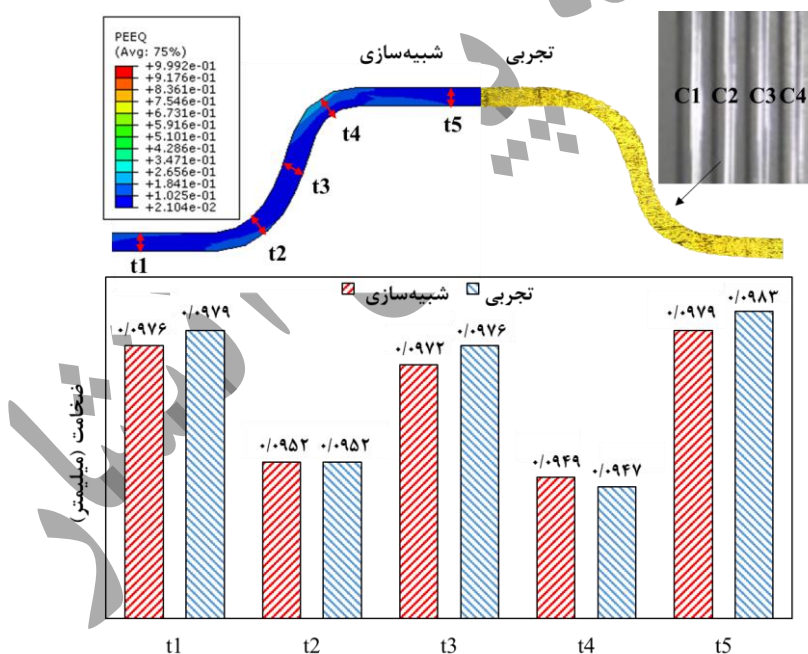


نورون‌ها اعمال می‌شود تا تمامی ضرایب بهبود یابند. این کار چندین بار انجام می‌شود تا شبکه عصبی مصنوعی بتواند با خروجی‌های موردنظر را به خوبی تخمین بزند. این الگوریتم در کاربردهای زیادی از قبیل پیش‌بینی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود [۳۶-۳۸].

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- صحت سنجی مدل شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی زمانی معتبر هستند که با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت آن‌ها تأیید شود [۳۹]. در این مقاله برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، نتایج عددی نازک‌شدگی صفحه دوقطبی مهرزنی شده با نتایج تجربی (میکروکانال شماره ۲) مقایسه شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با شکل، بین نتایج عددی و تجربی مطابقت خوبی برقرار بوده، در نتیجه صحت مدل اجزای محدود تأیید و از آن برای اجرای آزمایش‌های طراحی‌شده با روش رویه پاسخ استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است که در این شکل منظور از C1-C4 میکروکانال‌های یک تا چهار می‌باشد که مقایسه ضخامت میکروکانال شماره دو ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه ضخامت صفحه دوقطبی مهرزنی شده در حالت تجربی و شبیه‌سازی

### ۵-۲- پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش رویه پاسخ

جدول ۵ نتایج نرخ پرشدگی قالب را برای آزمایش‌های طراحی شده نشان می‌دهد. مدل رگرسیون خروجی مطابق با رابطه (۳) با کفایت مدل ( $R^2$ ) ۹۸/۹۵٪ به دست آمد که رضایت‌بخش است. همچنین میزان میانگین قدر مطلق خطا در تخمین نرخ پرشدگی برای این مدل  $82.16 \times 10^{-3}$  حاصل شد. به‌علاوه، آزمایش شماره ۱۸ با لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت شکل‌دهی ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ منجر به بهترین درصد پرشدگی قالب (۴۶٪) خواهد شد. همچنین در این آزمایش، میزان نازک شدگی برابر با ۴/۶۹٪ حاصل شد.

جدول ۵. نتایج نرخ پرشدگی قالب

شماره آزمایش	نرخ پرشدگی (%)	شماره آزمایش	نرخ پرشدگی (%)
۱	۴۱	۱۱	۴۰
۲	۴۱	۱۲	۳۵
۳	۴۳	۱۳	۴۱
۴	۳۹	۱۴	۴۱
۵	۴۵	۱۵	۴۳
۶	۴۴	۱۶	۴۱
۷	۴۱	۱۷	۴۰
۸	۴۴	۱۸	۴۶
۹	۴۴	۱۹	۳۴
۱۰	۴۳	۲۰	۴۱

$$\begin{aligned} \text{Filling rate}(\%) = & 1.191 - 7.37 C + 0.0242 V - 2.811 \mu + 20.36 C^2 \\ & - 0.00545 V^2 + 1.09 \mu^2 - 0.0667C \times V + 10.00C \times \mu \\ & + 0.0667V \times \mu \end{aligned} \quad (۳)$$

### ۳-۵- پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش کلونی زنبورعسل مصنوعی

در این قسمت معادله (۳) که پیش‌تر توسط روش رگرسیون به‌دست‌آمده بود، برای بهبود پیش‌بینی میزان نرخ پرشدگی، توسط روش کلونی زنبورعسل مصنوعی بهینه‌سازی شده است. برای این منظور ۱۰ ضریب عددی در این معادله به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته‌شده و توسط این روش به‌گونه‌ای به‌دست‌آمده‌اند که جمع قدر مطلق خطای بین مقدار نرخ پرشدگی پیش‌بینی‌شده و مقدار به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها کمینه شود. برای این منظور از تعداد ۴۰ زنبورعسل مصنوعی استفاده شد. نتیجه این بهینه‌سازی در معادله (۴) قابل‌رویت است؛ با استفاده از این معادله خطای تعریف‌شده به  $45.98 \times 10^{-3}$  کاهش پیدا می‌کند.

$$\begin{aligned} \text{Filling rate} (\%) = & 1.191 - 7.37 C + 0.0242 V - 2.811 \mu + 10.0644C^2 \\ & - 0.00487V^2 + 2.1800\mu^2 - 0.0077C \times V \\ & + 11.4489C \times \mu + 0.02243V \times \mu \end{aligned} \quad (۴)$$

#### ۵-۴- پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش شبکه عصبی مصنوعی

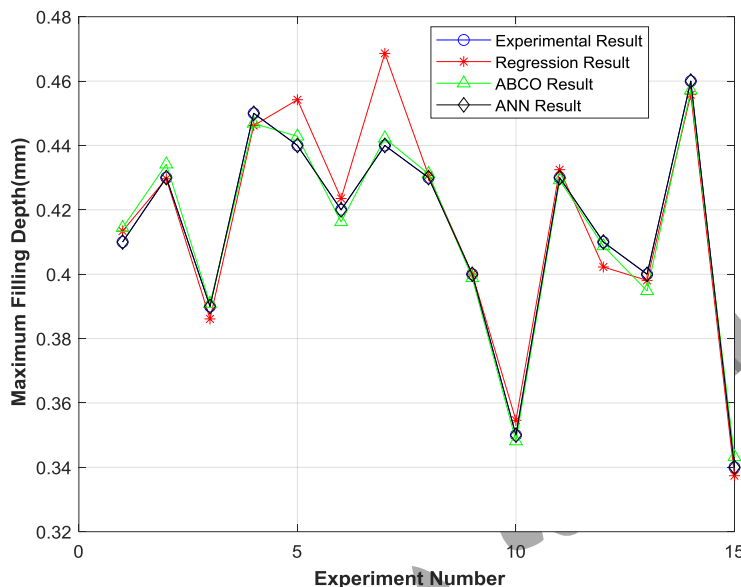
پیش‌بینی نرخ پرشدگی با الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در این بخش انجام شده است. برای این منظور، سه پارامتر لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک به‌عنوان ورودی و نرخ پرشدگی به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده است. در ادامه یک شبکه عصبی مصنوعی با سه ورودی، شش لایه مخفی و یک خروجی طراحی و اعداد جداول ۴ و ۵ به‌عنوان ورودی و خروجی‌ها برای آموزش آن استفاده شد. بعد از شش دوره آموزش دادن به این شبکه عصبی مصنوعی، خروجی با دقت خوبی به‌دست آمد و مقدار قدر مطلق خطای پیش‌بینی نرخ پرشدگی به میزان  $0.0097 \times 10^{-3}$  کاهش یافت.

#### ۵-۵- مقایسه روش‌ها

روش‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی از جهات مختلف با یکدیگر قابل قیاس هستند. شاید اولین فاکتور مقایسه، مقدار جمع قدر مطلق خطا در پیش‌بینی نرخ پرشدگی باشد. این خطا برای سه روش رگرسیون، زنبورعسل مصنوعی و شبکه عصبی مصنوعی در جدول ۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین مقایسه‌ای تصویری بین میزان نرخ پرشدگی واقعی و نرخ پرشدگی به‌دست‌آمده از روش‌های مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل نرخ پرشدگی حاصل از آزمایش‌ها با (خط دایره آبی)، با نرخ پرشدگی به‌دست‌آمده توسط روش رگرسیون (خط ستاره قرمز)، روش کلونی زنبورعسل مصنوعی (خط مثلث سبز)، و شبکه عصبی مصنوعی (خط لوزی مشکی) مقایسه شده است.

جدول ۶. میزان خطای روش‌ها در پیش‌بینی نرخ پرشدگی میکروکانال

نام روش	جمع قدر مطلق خطا (%)
رگرسیون	$82.16 \times 10^{-3}$
کلونی زنبورعسل مصنوعی	$45.98 \times 10^{-3}$
الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی	$0.0097 \times 10^{-3}$



شکل ۴. مقایسه میزان پرشدگی به دست آمده از آزمایش‌ها، روش رگرسیون، روش کلونی زنبورعسل و شبکه عصبی مصنوعی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌سازی فرآیند مهرزنی صفحات دوقطبی تیتانیومی پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی شد. در ابتدا فرآیند به صورت تجربی با استفاده از یک قالب با الگوی شیاری موازی انجام شد. سپس، با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی اجزای محدود صحت‌سنجی شده با نتایج تجربی، فرآیند با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ مدل‌سازی شد. سپس برای پیش‌بینی میزان نرخ پرشدگی میکروکانال، از سه روش مختلف استفاده شد. اولین روش مبتنی بر رگرسیون بوده و یک معادله درجه دوم برحسب میزان لقی، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی ارائه شد. در ادامه، با استفاده از روش زنبورعسل مصنوعی ضرایب معادله ایجادشده توسط روش رگرسیون بهبود یافت. در ادامه با استفاده از یک شبکه عصبی شش لایه، بهترین تطابق برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب (بدون ارائه فرمول) ایجاد شد. نتایج حاصل نشان داد که:

۱. لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت شکل‌دهی ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ منجر به بهترین درصد پرشدگی قالب (۴۶٪) خواهد شد.
۲. جمع قدر مطلق خطا با استفاده از روش کلونی زنبورعسل مصنوعی در مقایسه با روش رگرسیون، از مقدار  $82.16 \times 10^{-3}$  به  $38.76 \times 10^{-3}$  کاهش می‌یابد.

۳. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، بهترین تطابق برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب (بدون ارائه فرمول) به‌دست می‌آید.

۴. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد شده، یک شبکه با سه ورودی و یک خروجی می‌تواند با دقت بالایی نرخ پرشدگی را پیش‌بینی کرده و مقدار خطا را به  $0.0097 \times 10^{-3}$  کاهش دهد.

## واژه‌نامه

Insert	درون چین
HCP	ساختار بلوری منشوری فشرده
Response surface methodology	روش رویه پاسخ
Artificial bee colony algorithm	الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی
Artificial neural network	شبکه عصبی مصنوعی

## فهرست منابع

- [1] V. Modanloo and M. Elyasi, "Formability of Commercial Pure Titanium in Microchannel Bipolar Plates Using Warm Stamping Process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, pp. 1593-1599, (2020).
- [2] H. Hassanzadeh, A. Ferdowsara, and M. Barzagary, "Modeling of two phase flow in the cathode of gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 55-62, (2014).
- [3] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, "Investigation on forming of titanium bipolar plates using micro-stamping process," *International Journal of Engineering*, vol. 33, pp. 344-349, (2020).
- [4] F. A. Khatir, M. Barzegari, H. Talebi-Ghadikolaee, and S. Seddighi, "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*, vol. 46, pp. 39469-39482, (2021).
- [5] M. M. Barzegari and F. A. Khatir, "Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 31360-31371, (2019).
- [6] F. A. Khatir, M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee, and M. Hosseinzadeh, "Evaluation of effective parameters on stamping of metallic bipolar plates," *Procedia Engineering*, vol. 183, pp. 322-329, (2017).

- [7] M. Elyasi, H. Talebi Ghadikolaee, and M. Hosseinzadeh, "Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, pp.461 . 471, (2016).
- [8] Y.-D. Kuan, C.-W. Ciou, M.-Y. Shen, C.-K. Wang, R. Z. Fitriani, and C.-Y. Lee, "Bipolar plate design and fabrication using graphite reinforced composite laminate for proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 16801-16814, (2021).
- [9] C. Mathew, S. Naina Mohamed, and L. S. Devanathan, "A comprehensive review of current research on various materials used for developing composite bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells ",*Polymer Composites*, vol. 43, pp. 4100-4114, (2022).
- [10] Y. Leng, P. Ming, D. Yang, and C. Zhang, "Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, flow channel design and forming processes," *Journal of Power Sources* ,vol. 451, p. 227783, (2020).
- [11] H. Talebi-Ghadikolaee, M. Elyasi, and M. J. Mirnia, "Investigation of failure during rubber pad forming of metallic bipolar plates," *Thin-Walled Structures*, vol. 150, p. 106671, (2020).
- [12] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S. Hosseinipour, and A. Gorji, "Feasibility study of a double-step hydroforming process for fabrication of fuel cell bipolar plates with slotted interdigitated serpentine flow field," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* ,vol. 85, pp. 765-777, (2016).
- [13] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, "Multi-objective optimization of the stamping of titanium bipolar plates for fuel cell," *ADMT Journal*, vol. 12, pp. 1-8, (2019).
- [14] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee, and M. Hosseinzadeh, "Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 765-776, (2017).
- [15] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, "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*, vol. 45, pp. 1097-1107, (2020).
- [16] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee, and M. Hosseinzadeh, "Investigation of dimensional accuracy in forming of metallic bipolar plates with serpentine flow field," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 1045-1060, (2018).

- [17] M. Elyasi, F. Ahmadi, and M. Hosseinzadeh, "Investigation of lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 450-460, (2016).
- [18] S. Mahabunphachai, Ö. N. Cora, and M. Koç, "Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 5269-5277, (2010).
- [19] J.-Y. Koo, Y.-P. Jeon, and C.-G. Kang, "Effect of stamping load variation on deformation behaviour of stainless steel thin plate with microchannel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, pp. 1121-1128, (2013).
- [20] W. T. Park, C. K. Jin, and C. G. Kang, "Improving channel depth of stainless steel bipolar plate in fuel cell using process parameters of stamping," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, pp. 1677-1684, (2016).
- [21] D. M. Neto, M. C. Oliveira, J. L. Alves, and L. F. Menezes, "Numerical study on the formability of metallic bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) fuel cells," *Metals*, vol. 9, p. 810, (2019).
- [22] Y. Zhao and L. Peng, "Formability and flow channel design for thin metallic bipolar plates in PEM fuel cells: Modeling," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 2592-2604, (2019).
- [23] K. Karacan, S. Celik, S. Toros, M. Alkan, and U. Aydin, "Investigation of formability of metallic bipolar plates via stamping for light-weight PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 35149-35161, (2020).
- [24] Z. Xu, Z. Li, R. Zhang, T. Jiang, and L. Peng, "Fabrication of micro channels for titanium PEMFC bipolar plates by multistage forming process," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 11092-11103, (2021).
- [25] P. Zhang, M. P. Pereira, B. F. Rolfe, D. E. Wilkosz, P. Hodgson, and M. Weiss, "Investigation of material failure in micro-stamping of metallic bipolar plates," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 73, pp. 54-66, (2022).
- [26] W. Wang, Y. Xiao, N. Guo, and J. Min, "Finite element analysis of bipolar plate stamping based on a Yld2000 yield model," *Computer Methods in Materials Science*, vol. 22, (2022).
- [27] N. Guo, X. Zhang, Z. Hou, W. Wang, D. Yang, J. Min, et al., "Hot stamping of ultra-thin stainless steel sheets for bipolar plates," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 317, p. 117987, (2023).

- [28] V. Modanloo, H. Talebi-Ghadikolaee, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, "Fracture prediction in the stamping of titanium bipolar plate for PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 5729-5739, (2021).
- [29] M. Belali Owsia, S. Jamal Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, and A. Gorji, "Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, (2015).
- [30] J. Bi, J. Yang, X. Liu, D. Wang, Z. Yang, G. Liu, *et al.*, "Development and evaluation of nitride coated titanium bipolar plates for PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 1144-1154, (2021).
- [31] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, "Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 9661-9667, (2020).
- [32] V. Modanloo and V. Alimirzaloo, "Minimization of the sheet thinning in hydraulic deep drawing process using response surface methodology and finite element method," *International Journal of Engineering*, vol. 29, pp. 264-273, (2016).
- [33] V. Alimirzaloo and V. Modanloo, "Investigation of the forming force in torsion extrusion process of aluminum alloy 1050," *International Journal of Engineering*, vol. 30, pp. 920-925, (2017).
- [34] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," Technical report-tr06, Erciyes university, Computer engineering department, vol. 200, pp. 1-10, (2005).
- [35] A. Mashayekhi, M. Mashayekhi, and B. Siciliano, "Identification and optimization of the operator's hand and a haptic device dynamic, using artificial intelligence methods," *International Journal of Dynamics and Control*, pp. 1-10, (2023).
- [36] T. Calisir, A. B. Colak, D. Aydin, A. S. Dalkilic, and S. Baskaya, "Artificial neural network approach for investigating the impact of convector design parameters on the heat transfer and total weight of panel radiators," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 183, p. 107845, (2023).
- [37] M. Hema, D. Toghraie, and F. Amoozad, "Prediction of viscosity of MWCNT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20: 80)/SAE40 nano-lubricant using multi-layer artificial neural network (MLP-ANN) modeling," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 121, p. 105948, (2023).
- [38] E. T. Sayed, H. Rezk, M. A. Abdelkareem, and A. Olabi, "Artificial neural network based modelling and optimization of microalgae microbial fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, (2023).



- [39] V. Modanloo, A. Gorji, and M. Bakhshi-Jooybari, "A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 43, pp. 487-494, (2019).

نسخه پیش انتشار