



Dynamic Modeling and Parameter Identification of Hydrogen-Oxygen PEM Fuel Cell Model with Integrated Humidifier

M. M. Barzegari*, A. h. Pahnabi

Northern Research Center for Science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Fuel cell is a type of electrochemical energy converter that converts chemical energy stored in fuel into electrical energy. Nonlinear structure, time-varying dynamics and uncertain physical parameters are the challenges of working with polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells. In this paper, grey box modeling and system identification of flow-through H₂/O₂ PEM fuel cell with three cells and integrated humidifier is investigated. First, zero-dimensional nonlinear fluidic, thermodynamic and electrochemical modeling of PEM fuel cell is performed. The fuel cell model presented in this research is Multi-Input-Single-Output type. In the following, constant parameters of the studied fuel cell are determined. The system identification process as a multi-input-single-output system is done based on the Prediction-Error minimization, using the method of Trust-Region Reflective Newton. Finally, validation of the obtained model is done with experimental data that not used in modeling. The considered PEM fuel cell was tested under different conditions of temperature, reactant gas inlet pressure and stack current, and 329,420 experimental data were obtained. According to test conditions, data was classified into 189 different modes. The results show that the average voltage error of the identified model compared to the experimental data is equal to 1.03%. Moreover, the correlation between voltage and identified model parameters has been investigated, and the results showed that correlation between voltage and the contact resistance equivalent is higher than coefficients of orifices.

Review History:

Received: Oct. 31, 2022

Revised: Mar. 07, 2023

Accepted: Mar. 09, 2023

Available Online: Apr. 20, 2023

Keywords:

PEM fuel cell
parameter identification
grey box modeling
integrated humidifier
experimental data

1- Introduction

A fuel cell is a type of electrochemical converter that directly converts the energy resulting from the chemical reaction of fuel into electrical energy. One of the most important and widely used types of fuel cell is the polymer electrolyte membrane fuel cell, whose unique features such as high efficiency, fast start-up, and noiselessness attract attention. Considering the complexity of polymer fuel cells, it is beneficial to have appropriate mathematical models to analyze and predict their dynamic behavior.

A model represents a physical system with a complex structure. Each model is described by various parameters that are often unknown. To ensure the accuracy of the model, these parameters should be properly identified and validated. Different models can be used, including white box model, black box model, and grey box model [1]. Analytical models, which are also known as white box models, use differential equations to simulate the behavior of the system. These models are very accurate and based on theoretical relationships. Due to the complexity of fuel cells, it is very difficult to use white box models online. Models derived directly from experiments are also known as black box models. Black box models are based on statistical data. In this model, the relationships

between the inputs and outputs of the system are not based on physical equations like analytical models, but are inferred through suitable experimental data. The disadvantage of the black box model is the dependence on performing many tests for identification.

Grey box modeling can be used to take advantage of both white box and black box methods at the same time, i.e. more generalizability as well as the use of simpler relationships. Normally, in grey box models, zero-dimensional or discrete models are used due to the simplicity in calculations and less calculation time to control the system online and in real time [2].

Zeller et al. [3] developed a model based on current circuit using parameter identification method for fuel cell monitoring and control. In this model, the activation and concentration losses are modeled as two voltage sources with the opposite sign of the Nernst voltage. Hernandez et al [4] presented a model that has the ability to identify the behavior of the system in the flooded state. Their model allows studying the composition and partial pressure of gases. Carnes and Djilali [5] estimated the ion conductivity coefficients of the membrane, the current density exchange in the cathode and anode, and the oxygen penetration in the gas diffusion

*Corresponding author's email: barzegari@mut.ac.ir





Fig. 1. The PEM fuel cell with integrated humidifier

layers and the catalyst using the constrained nonlinear least squares algorithm and the experimental data available in other researches. Barzegari *et al.* [6] modeled an dead-ended cascade polymer electrolyte membrane fuel cell with integrated humidifier and water separator. Their model was based on grey box model based on parameter identification.

By reviewing previous researches, we can consider that the modeling and identification of polymer fuel cell system and the use of models in fault identification and performance control of fuel cells have been investigated by various researchers and a lot of progress has been achieved. Multidimensional modeling of fuel cell to analyze the behavior of the system has very high computational costs and it is not possible to use these models in online applications. Therefore, the use of zero-dimensional grey box models has attracted the attention of many researchers. In this research, in order to obtain the grey box model of the polymer electrolyte membrane fuel cell stack with integrated humidifier, the nonlinear equations governing the fuel cell were obtained. The fuel cell consists of three cells, and the equations governing it, in addition to electrochemical equations, also include fluid dynamics equations and thermodynamic relationships. The unknown parameters of the model have been determined based on the parameter identification method. In order to obtain these parameters, experimental data such as pressure, temperature and current have been measured and recorded as fuel cell input and voltage as fuel cell output.

2- Modeling of Flow-through Hydrogen-Oxygen Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Integrated Humidifier

In this research, the fuel cell stack is flow-through and has three cells, where hydrogen flows on the anode side of the fuel cell and oxygen flows on the cathode side. Appropriate humidity of the reactants to minimize the risk of membrane dryness is obtained through a membrane humidifier with a serpentine flow field. Two humidifying cells is considered, each cell is used to humidify one of the dry reactant gases.

The model used for the research is zero-dimensional and includes three main parts of fluid dynamics, thermodynamics and electrochemical. In this research, the modeling of the desired polymer electrolyte membrane fuel cell is based on

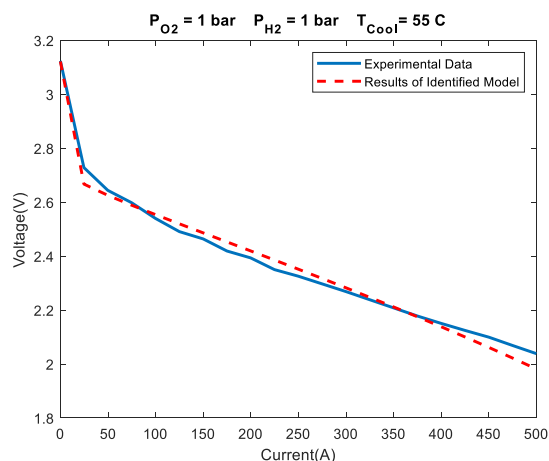


Fig. 2. Comparison of simulation results and experimental data of polarization curve

the following assumptions [2]:

All gases are considered to be ideal gas.

Inlet gases are completely dry and pure.

Heat distribution in all parts of the humidifier and fuel cell stack is considered to be uniform.

System Identification of the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Integrated Humidifier

The fuel cell stack shown in Figure 1 was investigated under different conditions of temperature, gas inlet pressure, and current, and 329,420 experimental data were classified into 189 different conditions according to the test conditions.

135 modes of experimental data were used to train the model and 54 modes were also used to validate the identified model. Using experimental data, the value of unknown and unmeasurable parameters of the model is identified and model calibration is performed.

3- Results and discussion

After the system identification process, the obtained parameters are placed in the main equations and the output voltage extracted from the numerical simulation results is compared and validated with the experimental data. The average voltage error of the fuel cell model detected in 189 cases is equal to 1.03%.

In order to validate the identified fuel cell model, comparing the results of the fuel cell polarization curve obtained from this model and the experimental values, as well as the square of errors between the estimated fuel cell voltage and the experimental data are demonstrated in Figure 2 and Figure 3, respectively. As shown, the maximum square error is less than 0.4%.

4- Conclusions

In this article, grey-box modeling and system identification of three-cell open-ended hydrogen-oxygen polymer electrolyte membrane fuel cell with integrated humidifier is investigated. The unknown parameters of the

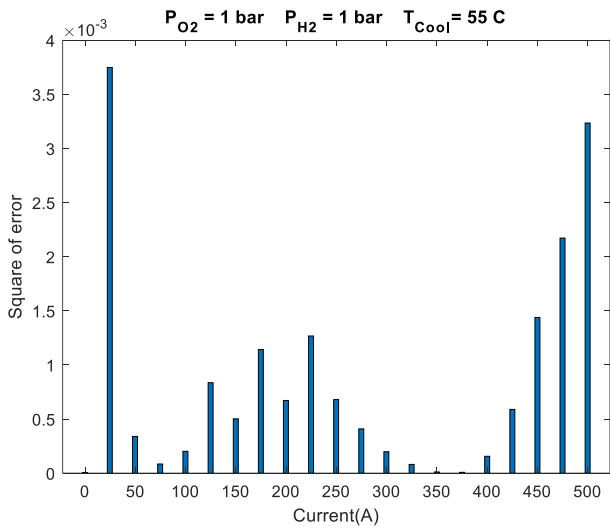


Fig. 3. Error square between estimated voltage and experimental data

studied fuel cell model were determined by using the multi input-single output parameter identification method. Finally, the validation of the obtained model has been investigated using experimental data.

References

- [1] R. Petrone, Z. Zheng, D. Hissel, M.-C. Péra, C. Pianese, M. Sorrentino, M. Béchérif, N. Yousfi-Steiner, A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(17) (2013) 7077-7091.
- [2] I. Arsie, A. Di Domenico, C. Pianese, M. Sorrentino, A multilevel approach to the energy management of an automotive polymer electrolyte membrane fuel cell system, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 7(1) (2010).
- [3] A. Zeller, O. Rallières, J. Régnier, C. Turpin, Diagnosis of a hydrogen/air fuel cell by a statistical model-based method, in: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, 2010, pp. 1-6.
- [4] A. Hernandez, D. Hissel, R. Outbib, Modeling and fault diagnosis of a polymer electrolyte fuel cell using electrical equivalent analysis, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(1) (2009) 148-160.
- [5] B. Carnes, N. Djilali, Systematic parameter estimation for PEM fuel cell models, *Journal of Power Sources*, 144(1) (2005) 83-93.
- [6] M.M. Barzegari, M. Dardel, E. Alizadeh, A. Ramiar, Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H₂/O₂ PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator, *Applied energy*, 177 (2016) 298-308.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. M. Barzegari, A. h. Pahnabi, *Dynamic Modeling and Parameter Identification of Hydrogen-Oxygen PEM Fuel Cell Model with Integrated Humidifier*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 55(3) (2023) 75-78.

DOI: 10.22060/mej.2023.21898.7537





مدلسازی دینامیکی و شناسایی پارامترهای مدل پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن با رطوبت زن یکپارچه

محمد مهدی برزگری^{*}، امیرحسین پهنایی

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری
شناسایی پارامتر
مدلسازی جعبه خاکستری
رطوبت زن یکپارچه
داده آزمایشگاهی

خلاصه: پیل سوختی نوعی مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی ذخیره شده در سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. ساختار غیرخطی، دینامیک متغیر با زمان و پارامترهای فیزیکی نامعین از چالش‌های کار با پیل‌های سوختی پلیمری می‌باشد. در این مقاله، مدلسازی جعبه خاکستری و شناسایی سیستم پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن سه سلولی انتها باز با رطوبت زن یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مدلسازی صفر بعدی غیرخطی سیالاتی، ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی پیل سوختی انجام شده است. مدل پیل سوختی ارائه شده در این پژوهش از نوع چند ورودی-یک خروجی می‌باشد. در ادامه، پارامترهای ثابت پیل سوختی مورد مطالعه با استفاده از روش شناسایی پارامتر تعیین گردید. فرآیند شناسایی سیستم بر اساس کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی، به روش ناحیه‌های صحیح انعکاسی نیوتن انجام شده است. پیل سوختی مورد نظر تحت شرایط مختلف دمای سری، فشار ورودی گازهای واکنش‌دهنده و جریان سری مورد آزمون قرار گرفت و ۳۲۹۴۲۰ داده آزمایشگاهی بدست آمده است که با توجه به شرایط آزمایش دسته‌بندی داده‌ها به ۱۸۹ حالت مختلف صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطای ولتاژ مدل پیل سوختی شناسایی شده در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برابر با ۱/۰۳ درصد می‌باشد. همچنین، همبستگی میان ولتاژ پیل سوختی و پارامترهای مدل شناسایی شده بررسی و تحلیل شده است که نتایج نشان داد که همبستگی ولتاژ پیل سوختی به مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون بیشتر از ضرایب اریفیس‌ها می‌باشد.

۱- مقدمه

تولید انرژی الکتریکی و حرارت به صورت هم‌زمان کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند.

به طور معمول، غشاء پیل سوختی برای انجام واکنش الکتروشیمیایی از نفیون ساخته می‌شود. نفیون تنها در حضور آب توانایی هدایت پروتون را دارا می‌باشد. بنابراین، برای تضمین انتقال مناسب پروتون نیاز به رطوبت زنی گازهای واکنش‌دهنده می‌باشد. اگرچه، انباشته شدن بیش از حد آب در لایه نفوذ گازی منجر به افزایش مقاومت غلظتی و کاهش عملکرد و طول عمر پیل سوختی پلیمری می‌گردد [۲]. برای رطوبت زنی گازهای واکنش‌دهنده می‌توان از رطوبت‌زن‌های خارجی و همچنین رطوبت‌زن‌های یکپارچه با پیل سوختی استفاده نمود. بهارلو و افشاری [۳] مقایسه روش‌های مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر سمت آند و کاتد را مورد بررسی قرار دادند. از جمله معایب رطوبت‌زن خارجی افزایش تعداد اتصالات و اجزاء، تعداد نقاط در معرض نشستی و حجم سیستم می‌باشد که در نتیجه آن قابلیت اعتماد سیستم نیز کاهش می‌یابد [۴]. همچنین، کنترل دشوار رطوبت خروجی از رطوبت‌زن یکپارچه

پیل سوختی نوعی مبدل الکتروشیمیایی است که انرژی حاصل از واکنش شیمیایی سوخت را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. در یک پیل سوختی، سوخت به صورت منظم و پیوسته به الکتروود آند و اکسیژن به الکتروود کاتد وارد می‌شود و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکتروودها صورت می‌پذیرد. معمولاً گاز هیدروژن به دلیل چگالی انرژی بالا به عنوان سوختی پرکاربرد در پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع پیل سوختی، پیل سوختی پلیمری می‌باشد که ویژگی‌های منحصر به فردی از قبیل بازدهی بالا، عدم تولید گاز گلخانه‌ای، راه‌اندازی سریع و آسان، عمر طولانی به دلیل نداشتن قطعات متحرک، ماژولار بودن و بی صدا بودن باعث جلب توجه پژوهشگران و صنایع مختلف به آن شده است [۱]. پیل‌های سوختی در محدوده وسیع توان الکتریکی (از چند وات تا مگاوات) توان الکتریکی تولید می‌نمایند و در زمینه‌های متنوع

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir



نیز از معایب این نوع از رطوبت‌زن‌ها به شمار می‌رود. خورشیدیان و همکاران [۵] عملکرد سیستم توان یکپارچه سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته هیدروژن-اکسیژن با سطح فعال بزرگ و سیستم رطوبت‌زن داخلی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به پیچیدگی پیل‌های سوختی پلیمری، داشتن مدل‌های ریاضی مناسب برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار دینامیکی آن‌ها سودمند می‌باشد. علاوه بر این، مدل‌های دقیق را می‌توان برای بهینه‌سازی طراحی، کنترل شرایط عملیاتی و تشخیص عیب پیل‌های سوختی پلیمری نیز بکار برد.

یک مدل بیانگر سیستمی فیزیکی با ساختار پیچیده می‌باشد. هر مدل به واسطه پارامترهای مختلفی که اغلب نامعلوم می‌باشند توصیف می‌گردد. برای تضمین صحت مدل، باید این پارامترها به طور مناسب شناسایی شده و قبل از بکارگیری صحت‌سنجی گردند. رفتار پیل‌های سوختی پلیمری معمولاً از طریق منحنی قطبیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با این وجود، تکنیک‌های دیگری از جمله ولتامتری سیکلی، وقفه جریان یا طیف‌سنجی آمپدانس الکتروشیمیایی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. فرایند صحت‌سنجی به عنوان گام نهایی در مدلسازی سیستم به شمار می‌رود و شامل مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌باشد. صحت‌سنجی می‌بایست با استفاده از داده‌های جدید که در قسمت شناسایی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند انجام پذیرد. پس از صحت‌سنجی مدل بدست‌آمده، پیش‌بینی رفتار پیل سوختی در شرایط مختلف امکان‌پذیر می‌باشد. با توجه به نوع پژوهش و نیاز پژوهشگران می‌توان از مدل‌های مختلفی از جمله مدل جعبه سفید، مدل جعبه سیاه و مدل جعبه خاکستری استفاده نمود که مدل‌های بدست‌آمده را می‌توان جهت تحلیل، کنترل، عیب‌یابی و پیش‌بینی عملکرد پیل سوختی بکار گرفت [۶].

مدل‌های تحلیلی که مشهور به مدل‌های جعبه سفید نیز می‌باشند، از معادلات دیفرانسیلی استفاده نموده تا رفتار سیستم را شبیه‌سازی نماید. این مدل‌ها معمولاً بسیار دقیق بوده و بر پایه روابط تئوری می‌باشد. در مدلسازی پیل سوختی پلیمری، به طور معمول برای نمایش پدیده‌های انتقال بار (الکتریکی و یونی) و انتقال جرم از قوانین نرنست-پلانک، باتلر-ولمر و فیک استفاده می‌گردد. با توجه به پیچیدگی پیل سوختی، استفاده از مدل‌های جعبه سفید به صورت آنالاین بسیار دشوار می‌باشد. به همین دلیل از مدل‌های جعبه سفید در جهت طراحی سیستم و طراحی الگوریتم‌های عیب‌یابی بهره‌برداری می‌گردد. مدل‌هایی که به طور مستقیم از آزمایشات بدست می‌آید با نام جعبه سیاه نیز شناخته می‌شوند. مدل‌های جعبه سیاه بر اساس داده‌های آماری می‌باشد. در این مدل، روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم

همانند مدل‌های تحلیلی بر اساس معادلات فیزیکی نبوده، بلکه از طریق داده‌های آزمایشگاهی مناسب استنباط می‌گردد. داده‌های آزمایشگاهی به دو مجموعه مختلف تقسیم‌بندی می‌گردد، که مجموعه اول جهت شناسایی روابط ورودی/خروجی و دیگری جهت صحت‌سنجی استفاده می‌شوند. پیاده‌سازی مدل‌های جعبه سیاه برای کاربردهای مانیتورینگ آنالاین، کنترل و عیب‌یابی سیستم‌های غیرخطی همانند پیل سوختی پلیمری به دلیل عدم نیاز به محاسبات عددی بسیار مناسب می‌باشد. عیب مدل جعبه سیاه وابستگی به انجام آزمایشات زیاد برای شناسایی می‌باشد که عمومیت این مدل را نسبت به مدل جعبه سفید کاهش می‌دهد.

در زمان نیاز به عمومیت بالا، مدل‌های جعبه خاکستری که دربردارنده مزایای هر دو مدل تجربی و فیزیکی می‌باشد راه حل جایگزین مناسبی به شمار می‌رود. مدل‌های جعبه خاکستری بر پایه قوانین فیزیکی می‌باشند که از دانش پیشین (همانند داده‌ها) بدست آمده و جایگزین برخی از معادلات ریاضی پیچیده می‌گردد. بنابراین، این روش مشکل محاسبات زیاد مربوط به مدل‌های جعبه سفید را حل می‌نماید.

جهت بهره‌گیری هم‌زمان از محاسن دو روش جعبه سفید و جعبه سیاه یعنی تعمیم‌پذیری بیشتر و همچنین بکارگیری روابط ساده‌تر می‌توان از مدلسازی جعبه خاکستری استفاده نمود. بطور معمول، در مدل‌های جعبه خاکستری از مدل‌های صفر بعدی یا گسسته به دلیل سادگی در محاسبات و زمان محاسبات کمتر جهت کنترل سیستم به صورت برخط و زمان واقعی استفاده می‌شود [۷]. مدلسازی جعبه خاکستری هم‌زمان دارای مزایای روش‌های فیزیکی (روابط ریاضی قوانین فیزیکی) و تجربی (داده‌های آزمایشگاهی) می‌باشد. مدل‌هایی که براساس روش جعبه خاکستری بدست آمده‌اند، بر پایه قوانین فیزیکی می‌باشند که بر اساس اطلاعات قبلی بدست آمده و جایگزین برخی از معادلات ریاضی پیچیده می‌گردد.

زلر و همکاران [۸] مدل بر پایه مدار جریان را با استفاده از روش شناسایی پارامتر جهت مانیتورینگ و کنترل پیل سوختی توسعه دادند. در این مدل، اتلاف‌های فعال‌سازی و غلظتی به عنوان دو منبع ولتاژ با علامت مخالف ولتاژ نرنست (ولتاژ مدار باز) مدل می‌شوند. همچنین، مقاومت نیز بیان‌کننده اتلاف اهمی سیستم می‌باشد. هراندز و همکاران [۹] مدلی را ارائه نمودند که توانایی شناسایی رفتار سیستم در حالت غرقابی را داراست. مدل آن‌ها امکان مطالعه بر روی ترکیب و فشار جزئی گازها را می‌دهد. غشاء و لایه نفوذ گاز نیز در این مدل شبیه‌سازی دخالت داده شده‌اند. با این وجود، مدل الکتریکی به تنهایی برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در شرایط خاص کافی نمی‌باشد. به

چاوان و تالانگ [۱۶] شناسایی سیستم پیل سوختی با سطح فعال ۲۵ سانتیمتر مربع را با استفاده از روابط ساده برای شرایط مختلف عملکردی انجام دادند. مدل بدست آمده در پیش‌بینی منحنی قطبیت پیل سوختی پلیمری تحت شرایط مختلف بار بکار گرفته می‌شود. کلووانی و همکاران [۱۷] بر روی روش کنترل تطبیقی با هدف دستیابی به بیشینه کارایی پیل سوختی پلیمری تحقیق نمودند. روش کنترل تطبیقی مورد نظر دارای شناسایی سیستم برخط بوده که نیازی به مدل دینامیکی دقیق پیل سوختی پلیمری نداشته و پارامترهای مرتبط با کارایی پیل سوختی را تخمین می‌زند. پیناگاپانی و همکاران [۱۸] روی مدل‌سازی دینامیکی و شبیه‌سازی پیل سوختی پلیمری تحقیق نمودند. آن‌ها مدل ولتاژ پیل سوختی پلیمری را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و نیز با استفاده از شناسایی سیستم در نرم‌افزار متلب توسعه دادند. صحت‌سنجی مدل بدست آمده از طریق مقایسه پاسخ مدل تخمینی و داده‌های واقعی مورد بررسی قرار گرفت.

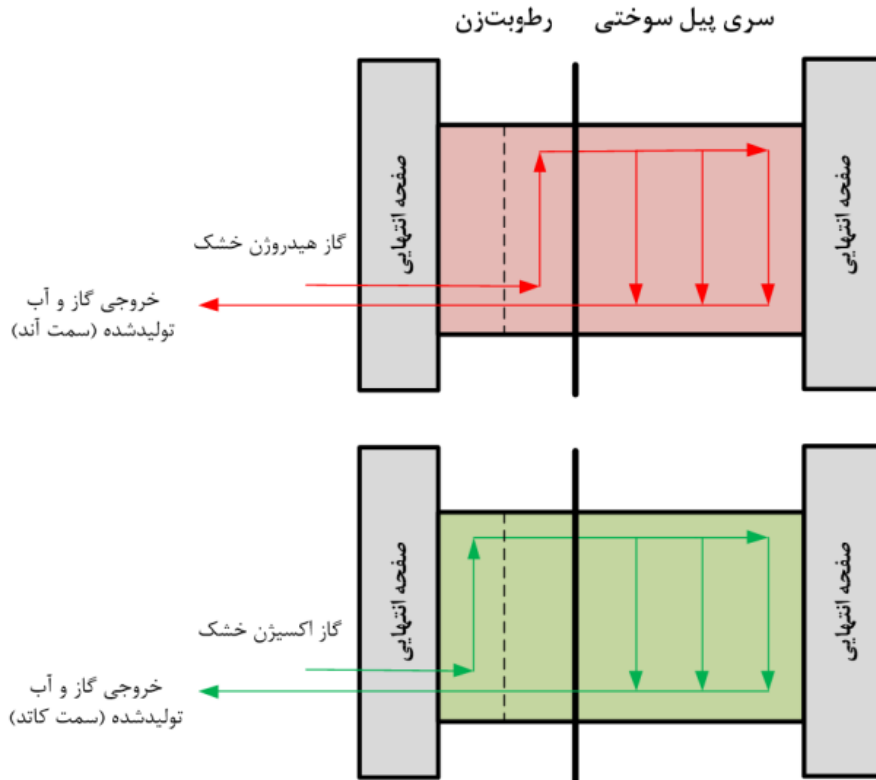
با مروری بر پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که مدل‌سازی و شناسایی سیستم پیل‌های سوختی پلیمری و استفاده از مدل‌ها در بهینه‌سازی، تحلیل، شناسایی عیب و کنترل عملکرد پیل‌های سوختی توسط محققین مختلف بررسی شده و پیشرفت زیادی در این بخش حاصل گردیده است. مدل‌سازی چندبعدی پیل سوختی (با توجه به نیاز به مش‌بندی مدل) جهت تحلیل رفتار سیستم دارای هزینه‌های محاسباتی بسیار زیادی بوده و امکان بکارگیری این مدل‌ها در مصارف برخط وجود ندارد. از اینرو، استفاده از مدل‌های جعبه خاکستری صفر بعدی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. مدل‌های پیل سوختی پلیمری مورد مطالعه در کارهای پیشین معمولاً مدل‌های جعبه سفید و یا جعبه سیاه بوده و پژوهش‌های کمی در زمینه مدل‌سازی جعبه خاکستری پیل‌های سوختی پلیمری انجام شده است.

در این پژوهش، برای دستیابی به مدل جعبه خاکستری سری پیل سوختی پلیمری انتها‌باز هیدروژن-اکسیژن با رطوبت‌زن یکپارچه، در ابتدا بازنویسی معادلات غیرخطی حاکم بر پیل سوختی صورت پذیرفت. پیل سوختی مورد نظر شامل سه سلول بوده و معادلات حاکم بر آن علاوه بر معادلات الکتروشیمیایی شامل معادلات دینامیک سیال و روابط ترمودینامیکی نیز می‌باشد. پارامترهای نامعلوم مدل بر پایه روش شناسایی پارامتر تعیین و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردیده است. ۳۲۹۴۲۰ داده آزمایشگاهی در ۱۸۹ حالت مختلف دسته‌بندی شده و برای هر حالت نیز یک مقدار منتخب برای فشار، دما، جریان و ولتاژ خروجی پیل سوختی بر اساس روش حذف داده‌های پرت انتخاب شده است. جهت بدست آوردن این

همین دلیل، پارامترها از طریق روش حداقل مربعات بازگشتی و خطی‌سازی سیستم حول نقطه عملیاتی در زمان واقعی شناسایی می‌گردد.

کارنس و جیلالی [۱۰] با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی مقید و داده‌های آزمایشگاهی موجود در پژوهش‌های دیگران، ضرایب هدایت یونی غشاء، تبادل چگالی جریان در کاتد و آند و نفوذ اکسیژن در لایه‌های نفوذ گاز و کاتالیست را تخمین زدند. آن‌ها برای مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری از معادلات یک‌بعدی الکتروشیمی استفاده نمودند. عثمان و همکاران [۱۱] شناسایی پارامترهای پیل سوختی پلیمری را با استفاده از روش بهینه‌سازی بر پایه کوانتوم ارائه نمودند. روش ارائه شده بر روی پیل سوختی ۱/۲ کیلوواتی بالارد بکار گرفته شد تا پارامترهای پیل سوختی تعیین گردد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی حاکی از دقت مناسب روش پیشنهادی می‌باشد. بر=زگری و همکاران [۱۲] پیل سوختی پلیمری پلکانی انتها‌بسته با رطوبت‌زن و جداساز یکپارچه را مدل‌سازی نمودند. مدل آن‌ها مبتنی بر مدل جعبه خاکستری بر پایه شناسایی پارامتر بوده است. در این مدل، روابط صفر بعدی غیرخطی سیالاتی، ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی در نظر گرفته شده است. نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از تطابق بسیار مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی بوده است.

یه و همکاران [۱۳] به شناسایی پارامترهای پیل سوختی پلیمری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، صحت مدل پیشنهادی خود را تایید نمودند. نکته بارز در مدل ذکر شده عدم حساسیت به حدس اولیه و همچنین عملکرد مناسب مدل در حضور نویز می‌باشد. سلیم و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۳ نتایج شبیه‌سازی سری پیل سوختی پلیمری ۳ کیلووات را از طریق شناسایی ۱۳ پارامتر نامعلوم مدل با مشخصات منحنی قطبیت آزمایشگاهی تطبیق دادند. مدل بدست آمده توسط آن‌ها سپس با روش بهینه‌سازی تجمع ذرات بهینه گردید. لیرا و همکاران [۱۵] یکی از کارهای انجام شده در زمینه عیب‌یابی پیل سوختی پلیمری را با استفاده از مدل بر پایه مشاهده‌گر ارائه نمودند. آن‌ها این مدل را بر روی پیل سوختی صنعتی شرکت بالارد با شبیه‌سازی عیب‌های مختلف انجام دادند. مدل‌سازی فیزیکی بر اساس قانون بقای جرم و اصول الکتروشیمیایی، ترمودینامیکی و دینامیک سیالاتی صفر بعدی بوده که با معادلات تجربی کوپل گردیده است. آن‌ها برای محاسبه مانده از مشاهده‌گر تغییر پارامتر خطی با ساختار لیونبرگر استفاده نمودند. این روش منتج به خطی‌سازی معادلات سیستم گشته و مساله تحلیلی را در فرم فضای حالت زمان گسسته حل می‌نماید.



شکل ۱. شماتیک پیل سوختی پلیمری سه سل هیدروژن-اکسیژن انتهاباز با رطوبت زن یکپارچه.

Fig. 1. Schematic of flow-through three-cell hydrogen-oxygen PEM fuel cell with integrated humidifier.

داده‌ها، فشار، دما و جریان به عنوان ورودی پیل سوختی و ولتاژ به عنوان خروجی پیل سوختی اندازه‌گیری و ثبت شده است. این نکته قابل ذکر است که استفاده از مدل در بهینه‌سازی و بازطراحی پیل سوختی با توجه به کاهش قابل توجه زمان و همچنین هزینه‌های ساخت از جمله مزایای این پژوهش می‌باشد.

۲- مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن انتهاباز با رطوبت زن یکپارچه

شکل ۱ شماتیک سیستم پیل سوختی مورد نظر که از دو بخش سری و رطوبت زن یکپارچه تشکیل شده است را نمایش می‌دهد. سری پیل سوختی انتهاباز و دارای سه پیل می‌باشد که هیدروژن در سمت آند پیل سوختی و اکسیژن در سمت کاتد جریان می‌یابد. رطوبت مناسب واکنشگرها (هیدروژن و اکسیژن) جهت به حداقل رساندن خطر خشکی غشاء از طریق رطوبت زن غشایی تخت با میدان شارش ماریچ بدست می‌آید. تعداد دو پیل رطوبت‌زنی در نظر گرفته شده است که هر پیل برای رطوبت‌زنی یکی از گازهای

واکنشگر خشک استفاده می‌شود.

پیل سوختی مورد مطالعه در این پژوهش از نوع انتها باز با رطوبت زن یکپارچه می‌باشد. مدل استفاده شده برای پژوهش از نوع صفر بعدی بوده و شامل سه بخش اصلی دینامیک سیالاتی، ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی می‌باشد. در این پژوهش، مدل‌سازی پیل سوختی پلیمری مورد نظر بر اساس فرضیات ذیل صورت می‌گیرد [۲]:

- کلیه گازهای واکنش‌دهنده و فرآورده ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند.
- گازهای واکنش‌دهنده به صورت کاملاً خشک (رطوبت صفر) و خالص وارد رطوبت زن می‌شود.
- توزیع گرما در تمام قسمت‌های رطوبت زن و سری پیل سوختی به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.
- عملکرد تمام سلول‌های پیل سوختی مشابه یکدیگر می‌باشد.
- جریان گازهای واکنش‌دهنده و فرآورده آرام در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱- مدل دینامیک سیالات

در این بخش، مدل سازی دینامیک سیال رطوبت زن و سری پیل سوختی مورد بررسی قرار می گیرد. برقراری قانون پایستگی جرم اساس این معادلات می باشد.

۲-۱-۱- رطوبت زن

در این قسمت، مدل ریاضی رطوبت زن گازهای واکنشگر هیدروژن و اکسیژن ارائه می گردد. همانطور که بیان گردید، گازهای خشک واکنشگر در ابتدا وارد رطوبت زن و پس از آن گازهای مرطوب وارد سری پیل سوختی می شود. مدل ریاضی رطوبت زن اکسیژن فرایند رطوبت زنی گاز اکسیژن پیش از ورود به سمت کاتد سری پیل سوختی را بیان می نماید. معادلات بر اساس قانون بقای جرم برای هر جزء نوشته می شود [۱۹].

$$\dot{m}_{O_2, Hu(O_2)} = \dot{m}_{O_2, in, Hu(O_2)} - \dot{m}_{O_2, out, Hu(O_2)} \quad (۱)$$

$$\dot{m}_{v, Hu(O_2)} = \dot{m}_{v, memb, Hu(O_2)} - \dot{m}_{v, out, Hu(O_2)} \quad (۲)$$

که $\dot{m}_{v, memb}$ نرخ جریان جرمی آب عبوری از غشاء می باشد. مدل ریاضی رطوبت زن هیدروژن مشابه با رطوبت زن اکسیژن می باشد و هیدروژن رطوبت زنی شده وارد سمت آند سری پیل سوختی می شود. معادلات بقای جرم برای رطوبت زن هیدروژن به صورت زیر بیان می گردد [۱۹].

$$\dot{m}_{H_2, Hu(H_2)} = \dot{m}_{H_2, in, Hu(H_2)} - \dot{m}_{H_2, out, Hu(H_2)} \quad (۳)$$

$$\dot{m}_{v, Hu(H_2)} = \dot{m}_{v, memb, Hu(H_2)} - \dot{m}_{v, out, Hu(H_2)} \quad (۴)$$

زیر نویس های $Hu(O_2)$ و $Hu(H_2)$ به ترتیب مربوط به رطوبت زن اکسیژن و هیدروژن می باشد. عبارات موجود در معادله (۱) تا معادله (۴) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\dot{m}_{i, in, Hu(i)} = k_{b, Hu(i)} (p_{b, Hu(i)} - p_{Hu(i)}) \quad (۵)$$

$$\dot{m}_{i, out, Hu(i)} = \frac{m_{i, Hu(i)}}{m_{i, Hu(i)} + m_{v, Hu(i)}} k_{a, Hu(i)} (p_{Hu(i)} - p_{a, Hu(i)}) \quad (۶)$$

$$\dot{m}_{v, memb, Hu(i)} = (D_w)_{Hu} \frac{(c_2)_{Hu(i)} - (c_1)_{Hu(i)}}{t_{m, Hu}} M_v A_{Hu} n_{Hu(i)} \quad (۷)$$

$$\dot{m}_{v, out, Hu(i)} = \frac{m_{v, Hu(i)}}{m_{i, Hu(i)} + m_{v, Hu(i)}} k_{a, Hu(i)} (p_{Hu(i)} - p_{a, Hu(i)}) \quad (۸)$$

که $i = H_2, O_2$ ، t_m ضخامت غشاء و k ثابت اوریفیس می باشد. زیر نویس های " $b, Hu(i)$ " و " $a, Hu(i)$ " به ترتیب بیانگر ورودی و خروجی رطوبت زن می باشد. c_1 و c_2 غلظت مولی غشاء در تماس با واکنشگرها و آب و D_w ضریب انتقال بخار غشاء می باشد که روابط آنها در مرجع [۱۹] ارائه شده است.

۲-۱-۲- سری پیل سوختی

گازهای واکنش دهنده خروجی از رطوبت زن وارد سری پیل سوختی می گردند. موازنه جرمی برای سمت آند و کاتد بر اساس پایستگی جرم با روابط زیر توصیف می شود [۲۰]:

$$\dot{m}_{H_2, FC} = \dot{m}_{H_2, in, FC} - \dot{m}_{H_2, out, FC} - \dot{m}_{H_2, reacted, FC} \quad (۹)$$

$$\dot{m}_{v, an, FC} = \dot{m}_{v, an, in, FC} - \dot{m}_{v, an, out, FC} - \dot{m}_{v, an, GDL2ch, FC} + \dot{m}_{evap, an, FC} \quad (۱۰)$$

$$\dot{m}_{l, an, FC} = -\dot{m}_{l, an, GDL2ch, FC} - \dot{m}_{l, an, out, FC} - \dot{m}_{evap, an, FC} \quad (۱۱)$$

$$\dot{m}_{O_2, FC} = \dot{m}_{O_2, in, FC} - \dot{m}_{O_2, out, FC} - \dot{m}_{O_2, reacted, FC} \quad (۱۲)$$

$$\dot{m}_{v, ca, FC} = \dot{m}_{v, ca, in, FC} - \dot{m}_{v, ca, out, FC} + \dot{m}_{v, ca, GDL2ch, FC} + \dot{m}_{evap, ca, FC} \quad (۱۳)$$

$$\dot{m}_{O_2,out,FC} = \frac{m_{O_2,FC}}{m_{O_2,FC} + m_{v,ca,FC}} k_{a,ca,st} (p_{ca,FC} - p_{atm}) \quad (24)$$

$$\dot{m}_{l,ca,FC} = \dot{m}_{l,ca,GDL2ch,FC} - \dot{m}_{l,ca,out,FC} - \dot{m}_{evap,ca,FC} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{O_2,reacted,FC} = M_{O_2} \times \frac{n_{st} I_{st}}{4F} \quad (25)$$

عبارت‌های معادلات (۹) تا (۱۴) به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲]:

$$\dot{m}_{v,ca,in,FC} = \dot{m}_{v,out,Hu} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{H_2,in,FC} = \dot{m}_{H_2,out,Hu} \quad (15)$$

$$\dot{m}_{v,ca,out,FC} = \frac{m_{v,ca,FC}}{m_{O_2,FC} + m_{v,ca,FC}} k_{a,ca,st} (p_{ca,FC} - p_{atm}) \quad (27)$$

$$\dot{m}_{H_2,out,FC} = \frac{m_{H_2,FC}}{m_{H_2,FC} + m_{v,an,FC}} k_{a,an,st} (p_{an,FC} - p_{atm}) \quad (16)$$

$$\dot{m}_{v,ca,GDL2ch,FC} = N_{v,ca,FC} M_v A_{FC} n_{st} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{H_2,reacted,FC} = M_{H_2} \times \frac{n_{st} I_{st}}{2F} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{evap,ca,FC} = \min \left(\begin{array}{l} A_{FC} (p_{sat}(T_{FC}) - p_{v,ca,FC}), \\ \sqrt{\frac{M_v}{2\pi RT_{FC}}} \dot{m}_{l,ca,GDL2ch,FC} \end{array} \right) \quad (29)$$

$$\dot{m}_{v,an,in,FC} = \dot{m}_{v,out,Hu} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{v,an,out,FC} = \frac{m_{v,an,FC}}{m_{H_2,FC} + m_{v,an,FC}} k_{a,an,st} (p_{an,FC} - p_{atm}) \quad (19)$$

$$\dot{m}_{l,ca,GDL2ch,FC} = A_{FC} n_{st} \rho_w \frac{KS_{ca,FC}^3}{\mu_w} \left| \frac{dp_{c,ca,FC}}{dS_{ca,FC}} \right| \frac{S_{ca,FC}}{t_{GDL}} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{v,an,GDL2ch,FC} = N_{v,an,FC} M_v A_{FC} n_{st} \quad (20)$$

که $p_{c,i,FC}$ ، فشار مویبگی بوده و از مرجع [۱۲] تعیین می‌گردد. V_p نیز حجم تخلخل لایه نفوذ گاز می‌باشد. همچنین، $N_{v,an,FC}$ و $N_{v,ca,FC}$ نیز توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\dot{m}_{evap,an,FC} = \min \left(\begin{array}{l} A_{FC} (p_{sat}(T_{FC}) - p_{v,an,FC}), \\ \sqrt{\frac{M_v}{2\pi RT_{FC}}} \dot{m}_{l,an,GDL2ch,FC} \end{array} \right) \quad (21)$$

$$N_{v,an,FC} = D_{v,an,FC} \frac{c_{v,an,FC} - c_{v,an,GDL,FC}}{t_{GDL}} \quad (31)$$

$$\dot{m}_{l,an,GDL2ch,FC} = -A_{FC} n_{st} \rho_w \frac{KS_{an,FC}^3}{\mu_w} \left| \frac{dp_{c,an,FC}}{dS_{an,FC}} \right| \frac{S_{an,FC}}{t_{GDL}} \quad (22)$$

$$N_{v,ca,FC} = -D_{v,ca,FC} \frac{c_{v,ca,FC} - c_{v,ca,GDL,FC}}{t_{GDL}} \quad (32)$$

$$\dot{m}_{O_2,in,FC} = \dot{m}_{O_2,out,Hu} \quad (23)$$

فشار جزئی بخار آب درون لایه نفوذ گازی سمت آند و کاتد پیلسوختی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۰]:

۲-۲- مدل ترمودینامیکی

معادلات حرارتی رطوبت‌زن و سری پیل سوختی غشاء پلیمری در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. دما یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد پیل سوختی پلیمری می‌باشد. بنابراین، دما باید با استفاده از سیستم خنک‌کاری در محدوده مناسب نگاه داشته شود. مدل ترمودینامیکی با استفاده از روابط موازنه انرژی تعیین می‌گردد.

$$m_{Hu} C_{p,Hu} \dot{T}_{Hu} = \dot{Q}_{in,Hu} - \dot{Q}_{out,Hu} - \dot{Q}_{heat,Hu} - \dot{Q}_{rad,Hu} - \dot{Q}_{latent,Hu} - \dot{Q}_{cond,Hu-FC} - \dot{Q}_{cond,Hu-EP} \quad (41)$$

۲-۲-۱- رطوبت‌زن

مدل ریاضی برای رطوبت‌زن غشایی مورد نظر با استفاده از معادله زیر تعیین می‌گردد.

\dot{Q}_{in} نرخ جریان حرارتی ورودی، \dot{Q}_{out} نرخ جریان حرارتی خروجی، \dot{Q}_{heat} نرخ جریان انرژی گرمایش، \dot{Q}_{rad} نرخ جریان انرژی تشعشی، \dot{Q}_{latent} نرخ جریان انرژی نهفته مربوط به تغییر فاز در رطوبت‌زن، $\dot{Q}_{cond,Hu-FC}$ نرخ جریان انرژی هدایتی بین رطوبت‌زن و سری پیل سوختی و $\dot{Q}_{cond,Hu-EP}$ نرخ جریان انرژی هدایتی بین رطوبت‌زن و صفحه انتهایی می‌باشد که از مرجع [۱۲] تعیین می‌گردد.

۲-۲-۲- سری پیل سوختی

مقدار انرژی که به انرژی الکتریکی تبدیل نشده است با مجموعه‌ای از عبارات‌های مختلف انرژی بیان می‌گردد که با عملکرد پیل سوختی ارتباط دارد [۲۳].

$$m_{FC} C_{p,FC} \dot{T}_{FC} = \dot{Q}_{in,FC} - \dot{Q}_{out,FC} - \dot{Q}_{chem,FC} - \dot{Q}_{elec,FC} - \dot{Q}_{cool,FC} - \dot{Q}_{rad,FC} - \dot{Q}_{latent,FC} + \dot{Q}_{cond,Hu-FC} \quad (42)$$

$\dot{Q}_{chem,FC}$ نرخ انرژی تولیدی توسط واکنش‌های شیمیایی، $\dot{Q}_{elec,FC}$ نرخ انرژی الکتریکی پیل سوختی و $\dot{Q}_{cool,FC}$ نرخ انرژی خارج‌شده توسط سیستم خنک‌کاری می‌باشد. عبارات‌های معادله (۴۲) با استفاده از روابط موجود در مرجع [۲۳] تعیین می‌گردد.

$$\dot{p}_{v,an,GDL,FC} = RT_{FC} \left(\frac{N_{v,an,FC} - N_{v,memb,FC}}{t_{GDL}} + R_{evap,an,FC} \right) \quad (33)$$

$$\dot{p}_{v,ca,GDL,FC} = RT_{FC} \left(\frac{N_{v,gen,FC} + N_{v,memb,FC} - N_{v,ca,FC}}{t_{GDL}} + R_{evap,ca,FC} \right) \quad (34)$$

که $N_{v,gen,FC}$ ، $R_{evap,an,FC}$ و $N_{v,memb,FC}$ از مرجع [۲۰] تعیین می‌گردد.

معادلات حجم آب تولید شده در هر دو سمت آند و کاتد براساس پایستگی جرم به صورت معادلات زیر بیان می‌گردد [۲۰]:

$$\rho_w \dot{V}_{l,an,GDL,FC} = \dot{m}_{l,an,GDL2ch,FC} - R_{evap,an,FC} M_v \varepsilon V_{GDL} \quad (35)$$

$$\rho_w \dot{V}_{l,ca,GDL,FC} = \dot{m}_{l,ca,GDL2ch,FC} - R_{evap,ca,FC} M_v \varepsilon V_{GDL} \quad (36)$$

با توجه به انتها باز بودن پیل سوختی مورد مطالعه، معادلات توصیف‌کننده قانون پایستگی جرم آب و گازهای خروجی را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۲۱]:

$$\dot{m}_{i,out,FC} = \frac{m_{i,FC} k_{a,an,FC}}{m_{H_2FC} + m_{v,an,FC}} (p_{an,FC} - p_{atm}), \quad i = H_2, (v, an) \quad (37)$$

$$\dot{m}_{i,out,FC} = \frac{m_{i,FC} k_{a,ca,FC}}{m_{O_2FC} + m_{v,ca,FC}} (p_{ca,FC} - p_{atm}), \quad i = O_2, (v, ca) \quad (38)$$

$$\dot{m}_{l,an,out,FC} = k_{l,a,an,FC} (p_{an,FC} - p_{atm}) \quad (39)$$

$$\dot{m}_{l,ca,out,FC} = k_{l,a,ca,FC} (p_{ca,FC} - p_{atm}) \quad (40)$$

۲-۳- مدل الکتروشیمیایی

ولتاژ پیل سوختی تابعی از جریان سری، فشار سمت کاتد، فشارهای جزئی واکنشگرها، رطوبت غشاء و دمای سری می‌باشد. اتلاف ولتاژ پیل سوختی به سه دسته تقسیم می‌شود: اتلاف فعالسازی (V_{act})، اتلاف اهمی (V_{ohmic}) و اتلاف غلظتی (V_{conc}). در این بخش، معادلات مربوط به محاسبه ولتاژ سری ارائه می‌شود. ولتاژ یک پیل سوختی منفرد به ولتاژ مدار باز پیل سوختی (E_{Nernst}) و اتلاف‌های ذکر شده وابسته می‌باشد و ولتاژ سری مجموع ولتاژ پیل‌ها می‌باشد [۲].

$$V_{st} = \sum_{i=1}^3 V_{FC} = \sum_{i=1}^3 n (E_{Nernst,FC} - V_{act,FC} - V_{ohmic,FC} - V_{conc,FC}) \quad (43)$$

که E_{Nernst} ، V_{act} ، V_{ohmic} و V_{conc} به صورت زیر تعریف می‌گردند [۲۴]:

$$E_{Nernst,FC} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{FC} - 298.15) + \quad (44)$$

$$4.308 \times 10^{-5} T_{FC} \left[\ln \frac{P_{H_2,FC}}{101325} + \frac{1}{2} \ln \frac{P_{O_2,FC}}{101325} \right]$$

$$V_{act,FC} = - \left(\xi_1 + \xi_2 T_{FC} + \xi_3 T_{FC} \ln(10^4 \times A_{FC} i_{FC}) + \xi_4 T_{FC} \ln(C_{O_2,FC}^*) \right) \quad (45)$$

$$V_{ohmic,FC} = \left(R_{m,FC(S_i)} + R_c \right) I_{st} \quad (46)$$

$$V_{conc,FC} = - \frac{RT_{FC}}{2F} \ln \left(1 - \frac{i_{FC}}{i_{max}} \right) \quad (47)$$

که A_{FC} و i_{FC} به ترتیب چگالی جریان و سطح فعال پیل سوختی می‌باشد.

۳- شناسایی سیستم پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن

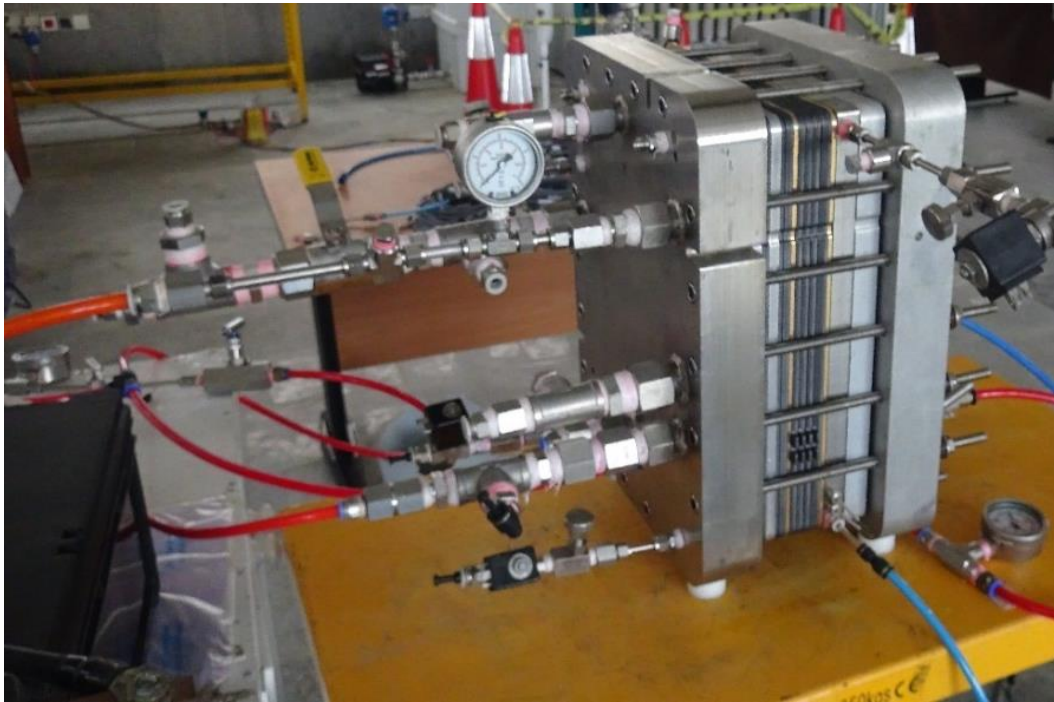
انتهاز با رطوبت زن یکپارچه

شناسایی مدل سری پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن انتهاز با رطوبت زن یکپارچه در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از مدلسازی صفر بعدی، تست‌های آزمایشگاهی مرتبط با سری ۳ سلولی با توان نامی ۷۰۰ وات مورد نظر انجام می‌گیرد. نتایج بدست آمده از تست‌ها در شناسایی پارامترهای نامعلوم مدل سری پیل سوختی و صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۱- گرفتن داده‌های آزمایشگاهی

سری پیل سوختی مورد نظر که در شکل ۲ نمایش داده شده است، تحت شرایط مختلف دمای سری، فشار ورودی گازهای واکنش‌دهنده و جریان سری مورد بررسی قرار گرفت و دسته‌بندی ۳۲۹۴۲۰ داده آزمایشگاهی با توجه به شرایط آزمایش در ۱۸۹ حالت مختلف صورت پذیرفت. دستگاه تست پیل سوختی ۵ کیلووات جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی و اخذ داده‌های مورد نیاز برای شناسایی پارامترهای نامعلوم مدل سری پیل سوختی ساخته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی الکتریکی تولید شده توسط پیل سوختی توسط الکترونیک لود ۵/۲ کیلوواتی کشیده می‌شود. اپراتور از طریق نرم‌افزار گرافیکی لب‌ویو با دستگاه تست ارتباط داشته و مانیتورینگ و کنترل سری پیل سوختی پلیمری را انجام می‌دهد. تصویری از نرم‌افزار مورد استفاده در شکل ۳ نمایش داده شده است. زمان داده‌برداری بر روی ۱۰۰ میلی‌ثانیه تنظیم گردیده است. داده‌های آزمایشگاهی فوق می‌بایست در ابتدا پایش شده و داده‌های پرت حذف شوند. سپس، میانگین مقادیر ولتاژهای پایش شده جهت شناسایی سیستم مورد استفاده قرار خواهد گرفت. بدین منظور، از روش کران‌های توکی جهت محاسبه ولتاژی که به مقدار واقعی نزدیک باشد استفاده شده است [۲۵].

براساس تنوع داده‌های آزمایشگاهی دمای سری و فشار ورودی گازهای واکنش‌دهنده، ۹ حالت متفاوت وجود دارد که به ازای هر کدام از این حالات نیز ۲۱ حالت جریان از جریان صفر تا جریان ۵۰۰ آمپر با طول گام ۲۵ آمپر موجود است. جزئیات هر کدام از این حالت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. پیل سوختی پلیمری سه سل هیدروژن-اکسیژن انتهاباز با رطوبت زن یکپارچه.

Fig. 2. The flow-through three-cell hydrogen-oxygen PEM fuel cell with integrated humidifier.



شکل ۳. تصویری از نرم افزار گرافیکی مورد استفاده جهت ارتباط با دستگاه تست پیل سوختی

Fig. 3. Photo of the graphic software used to communicate with the fuel cell test bench.

جدول ۱. حالت‌های مجزا داده‌های آزمایشگاهی سری پیل سوختی پلیمری.

Table 1. Discrete modes of experimental data of PEM fuel cell stack.

فشار (Barg)	دما (°C)	جریان (A)
۰/۵	۶۰	
۰/۵	۷۰	
۱	۵۵	
۱	۶۰	
۱	۶۵	بازه‌ی ۰ تا ۵۰۰ با طول گام ۲۵
۱	۷۰	
۱	۷۵	
۱/۵	۶۰	
۱/۵	۷۰	

یکی از مناسب‌ترین نسبت‌های در نظر گرفته شده برای تقسیم‌بندی داده‌های آزمایشگاهی جهت شناسایی و صحت‌سنجی مدل، ۷۰٪ جهت آموزش مدل و ۳۰٪ جهت صحت‌سنجی می‌باشد [۲۶]. فرآیند شناسایی سیستم با استفاده از محیط نرم‌افزار متلب انجام شده است. این دستور برای زمانی که فیزیک سیستم قابل درک بوده و امکان نمایش سیستم با استفاده از معادلات دیفرانسیلی معمولی با پارامترهای نامعلوم وجود داشته باشد بکار گرفته می‌شود تا مدل جعبه خاکستری غیرخطی ایجاد گردد. با توجه به بکارگیری مدل زمان-پیوسته در این پژوهش، این دستور برای تخمین و شبیه‌سازی از روش رانگ-کوتا استفاده می‌نماید. الگوریتم شناسایی پارامترهای نامعلوم مدل پیل سوختی مورد مطالعه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۴- نتایج و تفسیر

در این بخش به شناسایی پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری مدل پیل سوختی مورد مطالعه و همچنین ارزیابی رفتار مدل شناسایی شده پرداخته می‌شود. مقادیر عددی ثابت و مشخصات فیزیکی پیل سوختی مورد مطالعه، که داده‌های آزمایشگاهی آن در این پژوهش استفاده شده است در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار پارامترهای حجم لایه نفوذ گاز، ضریب تخلخل لایه نفوذ گاز و بیشینه چگالی جریان که در مدل مورد نظر مورد استفاده قرار

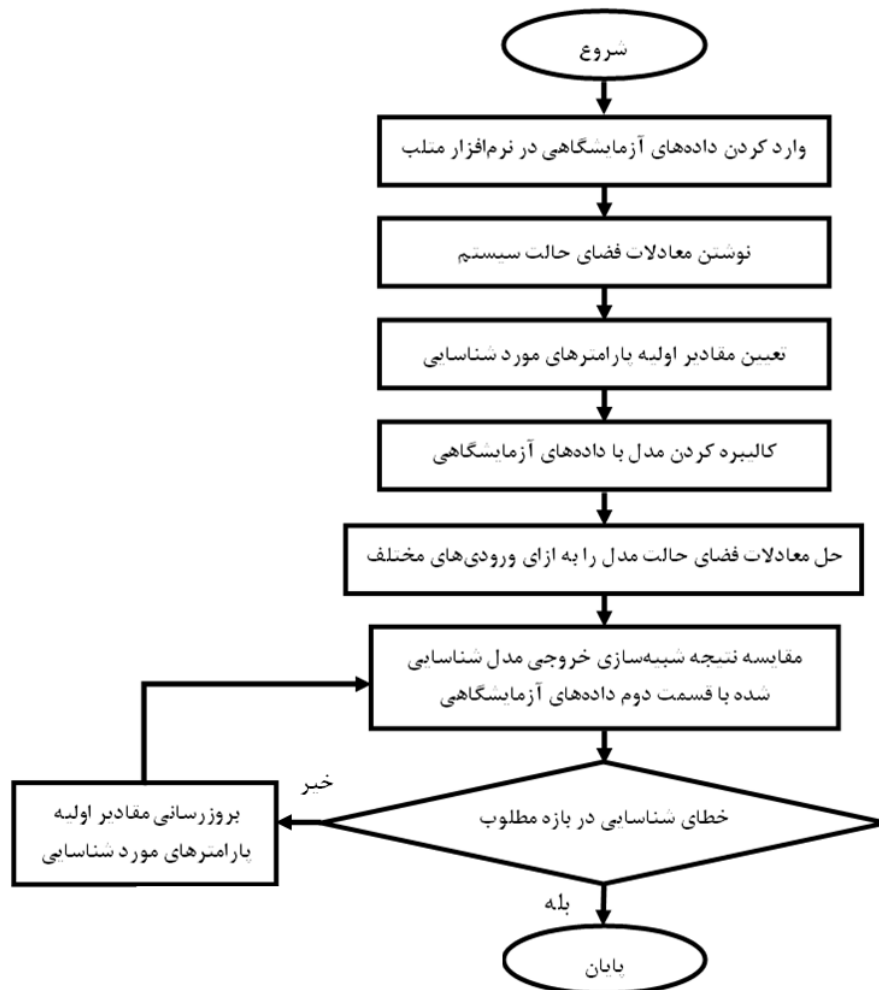
۳-۲- شناسایی پارامترهای نامعلوم و صحت‌سنجی مدل

۱۳۵ حالت از ۱۸۹ حالت داده‌های آزمایشگاهی جهت آموزش مدل و ۵۴ حالت نیز جهت اعتبار سنجی مدل شناسایی شده استفاده شده‌اند. تمامی این حالات به صورت یک بردار عددی جهت آموزش و صحت‌سنجی در فرآیند شناسایی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مقدار پارامترهای نامعلوم و غیرقابل اندازه‌گیری مدل شناسایی و کالیبراسیون مدل انجام می‌شود. در مدل پیل سوختی پلیمری مورد مطالعه، ۱۳ پارامتر جهت شناسایی در نظر گرفته شدند که عبارتند از: مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون (R_c)، ضرایب اوریفیس پیش و پس از رطوبت‌زن سمت آند و کاتد ($k_{ca,b,H}, k_{ca,a,Hu}, k_{an,b,Hu}, k_{an,a,Hu}$)، ضرایب اوریفیس آب مایع پس از سری پیل سوختی سمت آند و کاتد ($k_{l,an,a,FC}, k_{l,ca,a,FC}$)، ضرایب اوریفیس گازهای خروجی سمت آند و کاتد ($k_{an,a,FC}, k_{ca,a,FC}$) و ثابت‌های رابطه افت ولتاژ فعالسازی ($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$). فرآیند شناسایی سیستم انجام شده در این مقاله از نوع چند ورودی-یک خروجی به صورت هم‌زمان است. ورودی‌های مدل فشار ورودی گازهای واکنش‌دهنده، دمای کاری و جریان پیل سوختی بوده و خروجی نیز ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌باشد. معادلات فضای حالت سیستم غیرخطی نیز شامل ۱۶ معادله (معادلات (۱)-(۴)، (۹)-(۱۴)، (۳۳)-(۳۶)، (۴۱) و (۴۲)) با متغیرهای حالت ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. متغیرهای حالت مدل سری پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن انتهاباز با رطوبتزن یکپارچه.

Table 2. State variables of model of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell stack with integrated humidifier.

نماد	متغیر حالت	نماد	متغیر حالت
$m_{l,an,FC}$	جرم آب مایع در آند پیل سوختی	$m_{O_2,Hu(O_2)}$	جرم اکسیژن در رطوبتزن اکسیژن
$m_{l,ca,FC}$	جرم آب مایع در کاتد پیل سوختی	$m_{v,Hu(O_2)}$	جرم بخار آب در رطوبتزن اکسیژن
$P_{v,an,GDL,FC}$	آند GDL فشار جزئی بخار آب در	$m_{H_2,Hu(H_2)}$	جرم هیدروژن در رطوبتزن هیدروژن
$P_{v,ca,GDL,FC}$	کاتد GDL فشار جزئی بخار آب در	$m_{v,Hu(H_2)}$	جرم بخار آب در رطوبتزن هیدروژن
$V_{l,an,GDL,FC}$	آند GDL حجم آب مایع در	$m_{H_2,FC}$	جرم هیدروژن در پیل سوختی
$V_{l,ca,GDL,FC}$	کاتد GDL حجم آب مایع در	$m_{v,an,FC}$	جرم بخار آب در آند پیل سوختی
T_{Hu}	دمای رطوبتزن	$m_{O_2,FC}$	جرم اکسیژن در پیل سوختی
T_{FC}	دمای پیل سوختی	$m_{v,ca,FC}$	جرم بخار آب در کاتد پیل سوختی



شکل ۴. الگوریتم شناسایی پارامترهای نامعلوم مدل

Fig. 4. Algorithm of the unknown parameters identification of the model.

جدول ۳. مقادیر عددی پارامترهای فیزیکی معادلات رطوبت‌زن، سری پیل سوختی و حرارتی سری پیل سوختی [۲۰]، [۲۷]-[۲۸].

Table 3. Values of physical parameters of humidifier, fuel cell stack and thermal equations of fuel cell stack [20], [27]-[28].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۳	تعداد سل پیل سوختی، n_{FC}	۵۰۰	سطح مقطع غشا رطوبت‌زن، A_{Hu} (cm^2)
۰/۵	ضریب تخلخل لایه نفوذ گاز، ε	25×10^{-3}	ضخامت غشا رطوبت‌زن، $t_{m,Hu}$ (mm)
۲۹۸	دمای اکسیژن خشک ورودی، $T_{O_2,in}$ (K)	38126×10^{-3}	حجم کانال اکسیژن رطوبت‌زن، V_{Hu,O_2} (cm^3)
۲۹۸	دمای هیدروژن خشک ورودی، $T_{H_2,in}$ (K)	38126×10^{-3}	حجم کانال هیدروژن رطوبت‌زن، V_{Hu,H_2} (cm^3)
۲۹۸	دمای آب ورودی، $T_{w,in}$ (K)	۱	تعداد سلول رطوبت‌زن اکسیژن، n_{Hu,O_2}
۲۹۸	دمای محیط، T_{amb} (K)	۱	تعداد سلول رطوبت‌زن هیدروژن، n_{Hu,H_2}
۱	نرخ جریان گرمی آب گرمایش رطوبت‌زن، \dot{m}_{heat} (kg/s)	۵۰۰	سطح مقطع فعال غشا و الکتروود، A_{FC} (cm^2)
۳	نرخ جریان گرمی آب خنک‌کاری پیل سوختی، \dot{m}_{cool} (kg/s)	۰/۵	ضخامت غشا، $t_{m,FC}$ (mm)
۰/۱	نرخ جریان گرمی آب ورودی به رطوبت‌زن، $\dot{m}_{w,in,Hu}$ (kg/s)	235×10^{-3}	ضخامت لایه نفوذ گاز، t_{GDL} (mm)
۰/۱	نرخ جریان گرمی آب خروجی از رطوبت‌زن، $\dot{m}_{w,out,Hu}$ (kg/s)	۱۱/۵	حجم لایه نفوذ گاز، V_{GDL} (cm^3)
۲	بیشینه چگالی جریان، i_{max} (A/m^2)	20641×10^{-3}	حجم کانال کاتد یک سل، V_{ca} (cm^3)
		20641×10^{-3}	حجم کانال آند یک سل، V_{an} (cm^3)

در پیل سوختی مورد مطالعه شناسایی می‌گردد. در نهایت، صحنه‌گذاری مدل پیشنهادی با مقایسه بین خروجی مدل و داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل هزینه بالای محاسباتی و پردازشی، امکان شناسایی ۱۳ پارامتر مورد نظر به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نبوده و این ۱۳ پارامتر طی دو مرحله شناسایی می‌شوند. در مرحله اول، با اختصاص مقادیر اولیه به ضرایب اوریفیس و با فرض ثابت بودن این مقادیر، شناسایی پارامترهای $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ و R_C انجام می‌شود. سپس، مقادیر شناسایی شده در مرحله قبل را در معادلات جایگذاری کرده و شناسایی ضرایب اوریفیس پیل سوختی صورت می‌پذیرد. مقادیر عددی ۱۳ پارامتر مورد نظر در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که جهت اختصاص مقادیر اولیه پارامترهای نامعلوم مدل از مراجع [۲۰]، [۲۱] و [۲۷] استفاده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که بیشینه خطای نسبی شناسایی مدل برابر با ۰/۳٪ در نظر گرفته شده است.

گرفته است، با استفاده از مراجع ارائه‌شده در جدول ۳ تعیین گردید. ولتاژ خروجی پیل سوختی مورد نظر به عنوان معیار صحت‌سنجی دینامیک و فیزیکی که برای آن ارائه شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۱- شناسایی پارامترهای نامعلوم و کالیبراسیون مدل

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ و R_C و ضرایب اوریفیس ($k_{ca,a,Hu}$ ، $k_{ca,b,Hu}$) و $k_{an,a,FC}$ ، $k_{an,b,Hu}$ ، $k_{1,ca,a,FC}$ ، $k_{1,an,a,FC}$ ، $k_{an,a,Hu}$ ، $k_{an,b,Hu}$ و $k_{ca,a,FC}$) پارامترهای نامعلوم مدل می‌باشند که اندازه‌گیری مقادیر عددی این پارامترها امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو، نیاز است تا شناسایی پارامترهای ذکر شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صورت پذیرد. ۱۳۵ حالت از ۱۸۹ حالت داده‌های آزمایشگاهی اخذ شده جهت شناسایی پارامترهای نامعلوم و ۵۴ حالت نیز جهت اعتبارسنجی مدل شناسایی شده، استفاده شده است. پارامترهای نامعلوم مدل بر اساس خصوصیات هندسی و مواد بکار گرفته شده

جدول ۴. مقادیر عددی پارامترهای شناسایی شده مدل.

Table 4. Values of identified parameters of the model.

مقدار عددی شناسایی شده در مرحله دوم	پارامتر	مقدار عددی شناسایی شده در مرحله اول	پارامتر
$3/63 \times 10^{-9}$	$k_{ca,b,Hu}$	$-4/84 \times 10^{-1}$	ξ_1
$3/61 \times 10^{-9}$	$k_{ca,a,Hu}$	$5/14 \times 10^{-4}$	ξ_2
$3/62 \times 10^{-9}$	$k_{an,b,Hu}$	$-1/81 \times 10^{-5}$	ξ_3
$3/61 \times 10^{-9}$	$k_{an,a,Hu}$	$-2/68 \times 10^{-5}$	ξ_4
$3/60 \times 10^{-9}$	$k_{l,an,a,FC}$		
$3/60 \times 10^{-9}$	$k_{l,ca,a,FC}$	$2/57 \times 10^{-4}$	R_C
$3/63 \times 10^{-9}$	$k_{an,a,FC}$		
$3/63 \times 10^{-9}$	$k_{ca,a,FC}$		

جدول ۵. بررسی حداکثر میزان خطای مدل سری پیل سوختی شناسایی شده در حالات مختلف.

Table 5. Investigating the maximum error of the identified fuel cell stack model in different conditions.

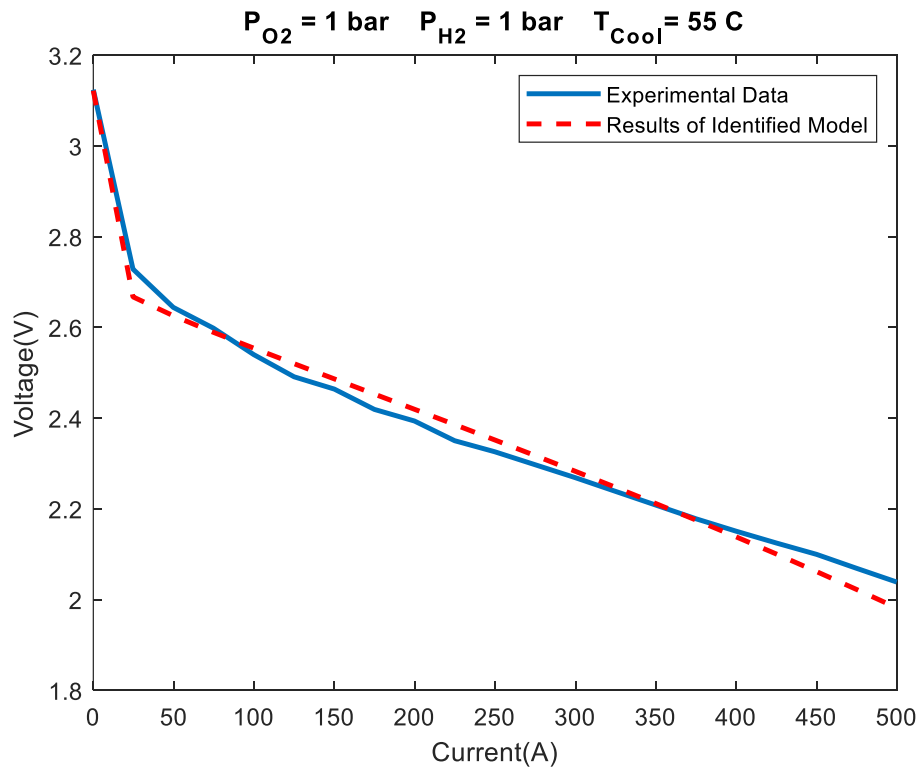
میزان خطا	تعداد حالات
۰ تا ۱٪	۱۳۵ (آموزش)
۲٪ تا ۳٪	۵۴ (صحت‌سنجی)

به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که شکل ۶ مشخص شده است، بیشینه مربع خطا (برای جریان ۲۵ آمپر) کمتر از ۰/۴ درصد می‌باشد. همچنین، میانگین مربع خطاها برای حالت ذکر شده برابر $0/0847$ درصد شده است که نشان از تطابق بسیار مناسب بین نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی دارد.

شکل ۷ نیز نمایشگر مقایسه میان ولتاژ الکتریکی پیل سوختی حاصل از مقادیر آزمایشگاهی و مدل شناسایی شده برای پروفیل جریان مورد نظر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، تطابق مناسبی بین نتایج مدل شناسایی شده و داده‌های آزمایشگاهی در حوزه زمان وجود دارد. لازم به ذکر است که با افزایش جریان، مقدار ولتاژ الکتریکی پیل سوختی با شیب کمتری کاهش می‌یابد.

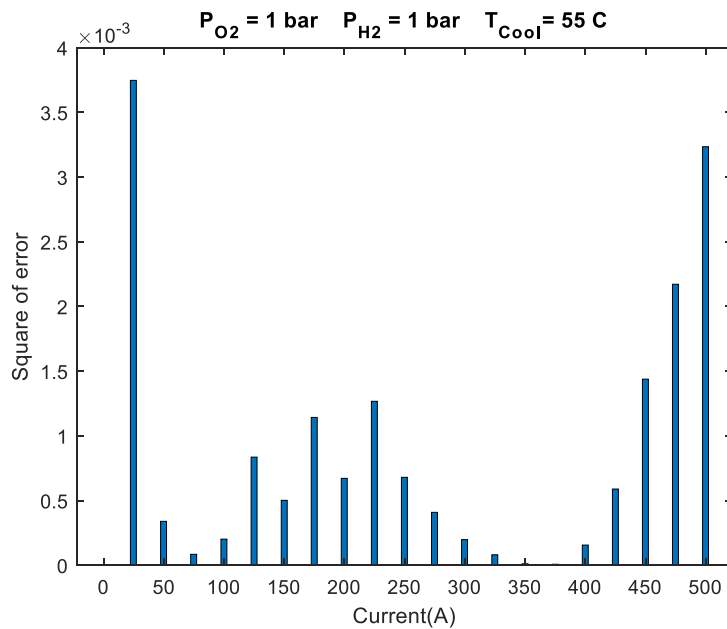
پس از انجام فرآیند شناسایی، پارامترهای بدست آمده در معادلات اصلی جایگذاری شده و ولتاژ خروجی استخراج شده از نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی می‌شود. میانگین خطای ولتاژ پیل سوختی مدل شناسایی شده در ۱۸۹ حالت در مقایسه با مقادیری از ولتاژ که پس از حذف داده‌های پرت و میانگین‌گیری وزنی از مقادیر آزمایشگاهی بدست آمد، برابر با $1/03$ درصد است. خلاصه‌ای از پراکندگی میزان خطای مدل به ازای شرایط مختلف در جدول ۵ ذکر شده است.

جهت اعتبارسنجی مدل پیل سوختی شناسایی شده، مقایسه نتایج منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی حاصل از این مدل و مقادیر آزمایشگاهی و همچنین مربع خطاها میان ولتاژ پیل سوختی تخمین زده شده و داده‌های آزمایشگاهی، برای فشار گازهای واکنشگر ۱ بار و دمای ۵۵ درجه سانتیگراد



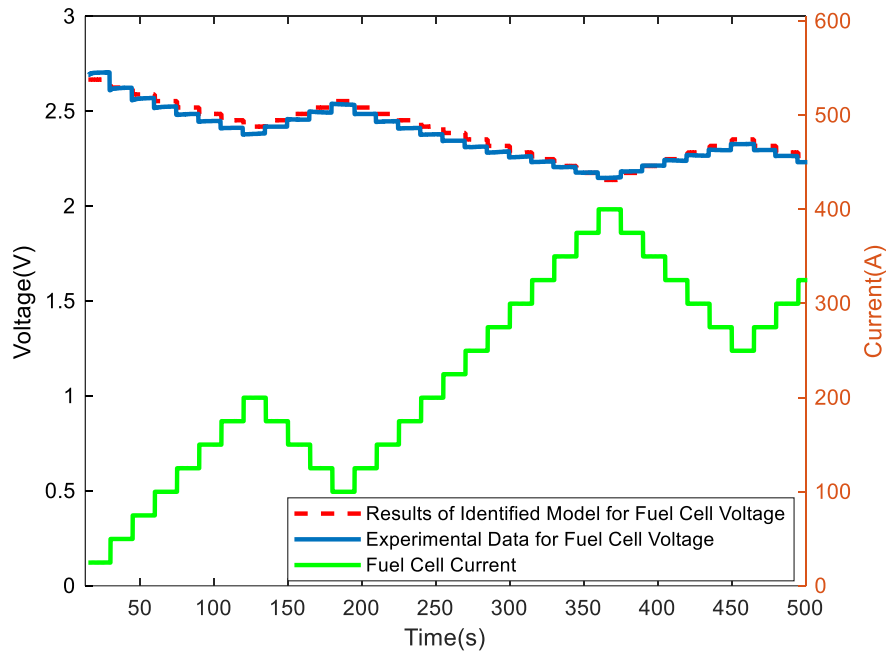
شکل ۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی با داده‌های آزمایشگاهی.

Fig. 5. Comparison of fuel cell polarization curve simulation results with experimental data.



شکل ۶. مربع خطا میان ولتاژ پیل سوختی تخمین زده شده و داده‌های آزمایشگاهی.

6. Error square between estimated fuel cell voltage and experimental data.



شکل ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی پاسخ زمانی ولتاژ پیل سوختی با داده‌های آزمایشگاهی.

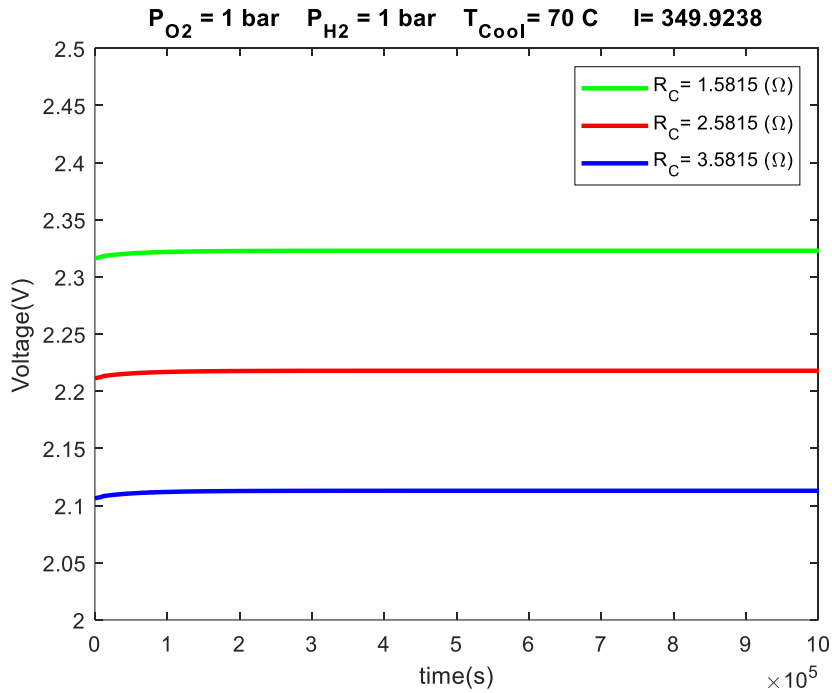
Fig. 7. Comparison of fuel cell time response simulation results with experimental data.

۱۰ نشان‌دهنده ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری مورد نظر با جایگذاری مقادیر عددی جدول ۳ در معادلات مدل و تحت شرایط ورودی ارائه شده در شکل می‌باشد. در شکل ۶ نمودار ولتاژ خروجی پیل سوختی مورد مطالعه بر حسب زمان تا زمانی که ولتاژ به مقدار پایا برسد، رسم شده است. بر اساس معادله (۴۳)، ولتاژ خروجی پیل سوختی به صورت یک رابطه خطی بر حسب ولتاژ مدار باز پیل سوختی و اتلاف ولتاژهای فعال‌سازی، اهمی و غلظتی می‌باشد. در شکل ۱۱، مقادیر شبیه‌سازی شده این اتلاف ولتاژها برای مقادیر ورودی ارائه شده نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اتلاف ولتاژ فعال‌سازی، قسمت عمده این اتلاف ولتاژ را تشکیل می‌دهد. مطابق معادله (۴۵)، اتلاف ولتاژ فعال‌سازی با دمای پیل سوختی، فشار گاز اکسیژن، جریان پیل سوختی و سطح مقطع فعال غشاء رابطه مستقیم دارد. همچنین، جهت محاسبه مقدار، دقت اتلاف ولتاژ فعال‌سازی نیاز به مقادیر پارامترهای ثابت k_1 ، k_2 ، k_3 ، k_4 می‌باشد که این مقادیر تحت فرآیند شناسایی سیستم محاسبه و صحت‌سنجی می‌شوند. با توجه به معادلات (۴۳) و (۴۴)، ولتاژ مدار باز پیل سوختی، تابعی از فشار گازهای هیدروژن و اکسیژن و همچنین دمای پیل سوختی بوده

میزان حساسیت مدل شناسایی شده نسبت به مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش ۶۵ درصدی مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون، میزان افت ولتاژ کاهش و ولتاژ خروجی پیل سوختی ۴/۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین حساسیت ولتاژ خروجی پیل سوختی شناسایی شده نسبت به ضرایب اریفیس گازهای خروجی در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق انتظار با افزایش ضرایب اریفیس‌ها، ولتاژ خروجی پیل سوختی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۸ و شکل ۹، مشاهده می‌شود که همبستگی ولتاژ پیل سوختی به مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون بیشتر از ضرایب اریفیس‌ها می‌باشد.

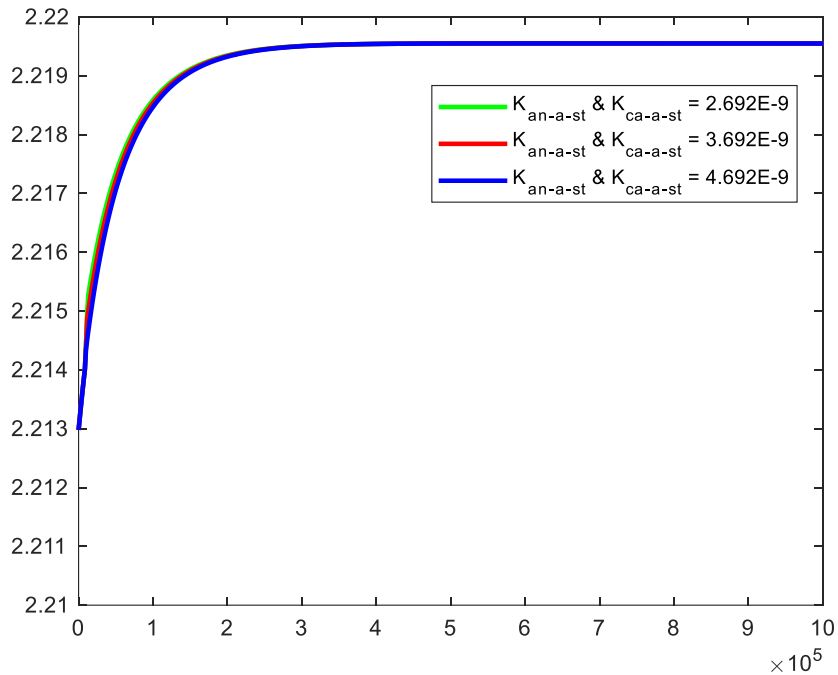
۴-۲- بررسی مدل دینامیکی پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن با رطوبت‌زن یکپارچه

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی معادلات مدل پیل سوختی هیدروژن-اکسیژن انتها‌باز سه سل با رطوبت‌زن یکپارچه شناسایی شده ارائه می‌شود. حل تمامی معادلات دیفرانسیل شبیه‌سازی پیل سوختی مورد مطالعه در این بخش بر اساس روش رانگ-کوتا انجام شده است. شکل



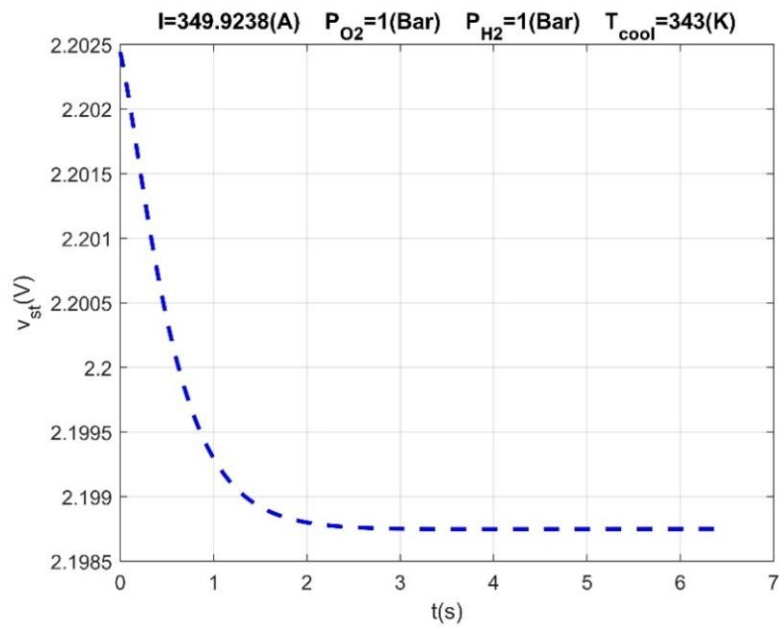
شکل ۸. حساسیت مدل پیل سوختی پلیمری انتهاباز هیدروژن-اکسیژن به مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون.

Fig. 8. Sensitivity analysis of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell model to equivalent contact resistance of electron conduction.



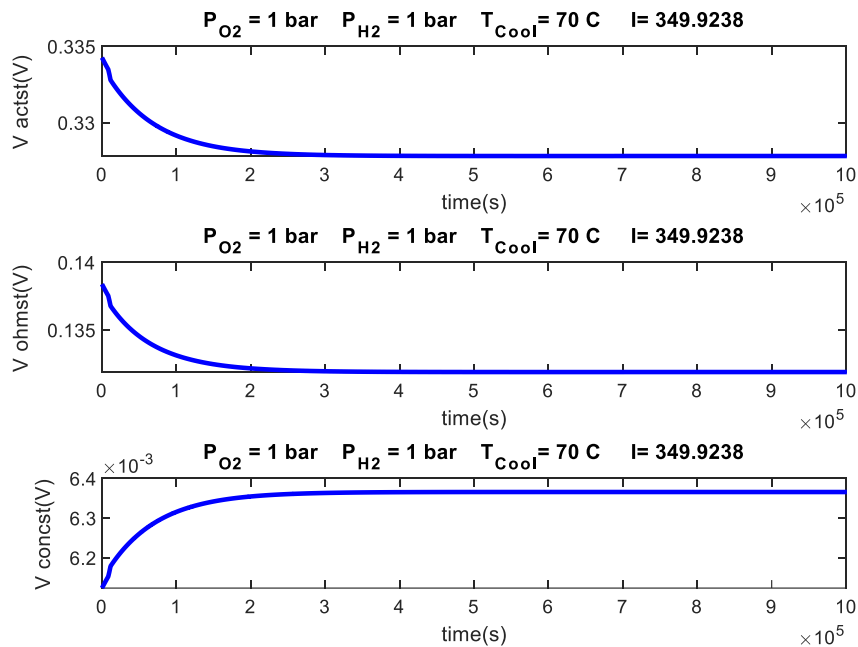
شکل ۹. حساسیت مدل پیل سوختی پلیمری انتهاباز هیدروژن-اکسیژن به ضرایب اوریفیس گازهای خروجی سمت آند و کاتد.

Fig. 9. Sensitivity analysis of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell model to orifice constants of exhaust gases of the anode and cathode sides.



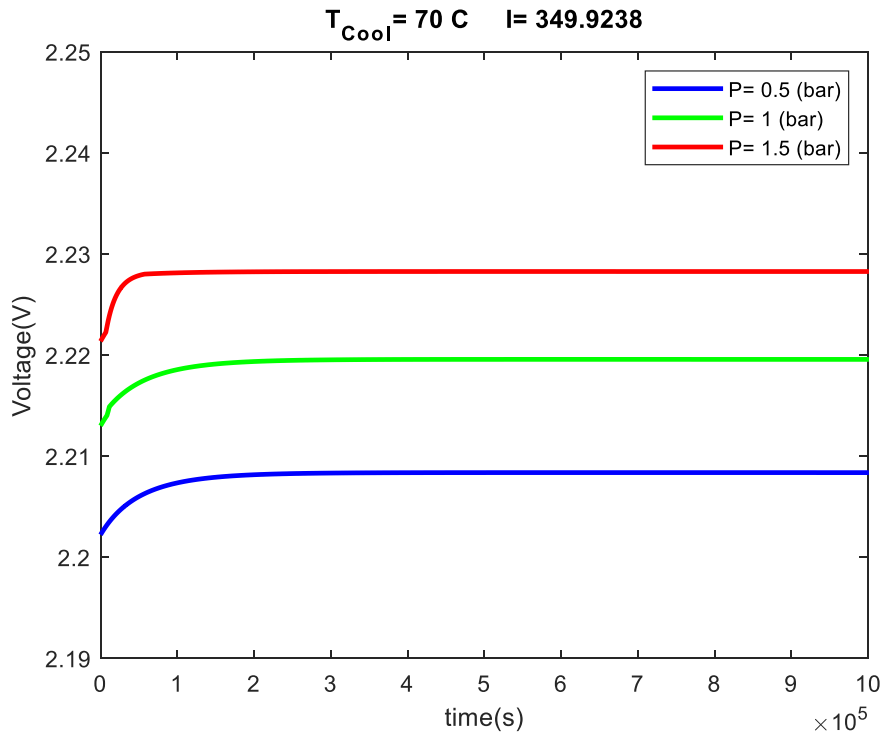
شکل ۱۰. ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری انتهاباز هیدروژن-اکسیژن.

Fig. 10. Output voltage of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.



شکل ۱۱. اتلاف ولتاژ فعال سازی، اهمی و غلظتی پیل سوختی پلیمری انتهاباز هیدروژن-اکسیژن.

Fig. 11. Activation, ohmic and concentration voltage losses of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.



شکل ۱۲. تاثیر فشار ورودی گازهای واکنش دهنده بر ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری انتهاباز هیدروژن-اکسیژن.

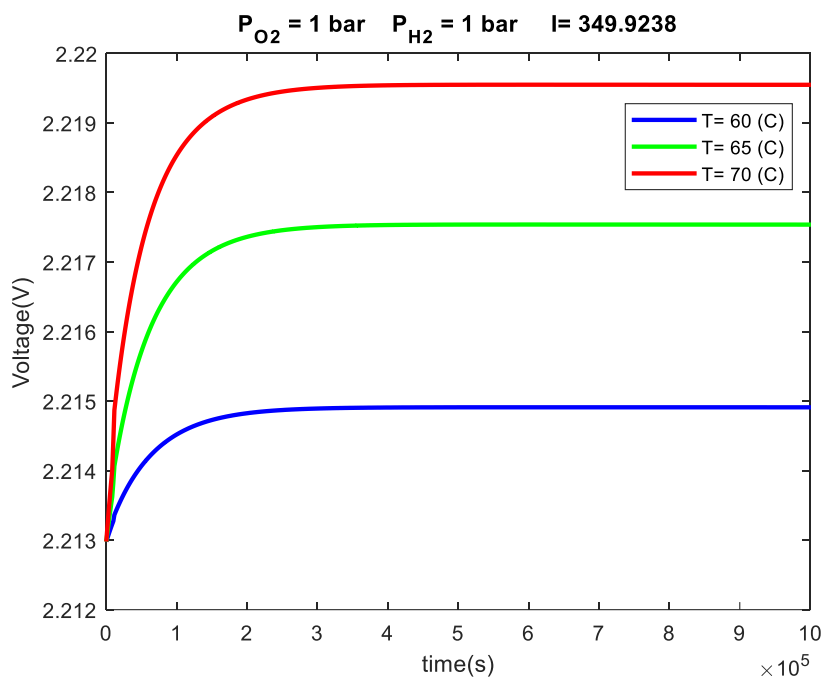
Fig. 12. Effect of inlet pressure of reactant gases on the output voltage of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.

استحصال شده از پیل سوختی موثر است، اما با توجه به دمای کم گازهای واکنش دهنده از آن صرف نظر شده است. در ادامه، تاثیر دمای سیال خنک کاری بر ولتاژ خروجی پیل سوختی ارزیابی شده است. در شکل ۱۳ مشاهده می شود که با افزایش دمای سیال خنک کاری، ولتاژ خروجی پیل سوختی کاهش می یابد. نتایج مرجع [۲۸] نیز صحت روند ارائه شده در شکل ۱۳ را تایید می نماید.

شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نیز به ترتیب نشان دهنده اثر میزان جریان سری پیل سوختی روی ولتاژ و توان سری پیل سوختی می باشد. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، افزایش جریان سری پیل سوختی باعث کاهش ولتاژ می شود، اما در عین حال افزایش جریان سری پیل سوختی تاثیر بیشتری نسبت به کاهش ولتاژ خروجی دارد که در نهایت توان سری پیل سوختی افزایش می یابد (شکل ۱۲).

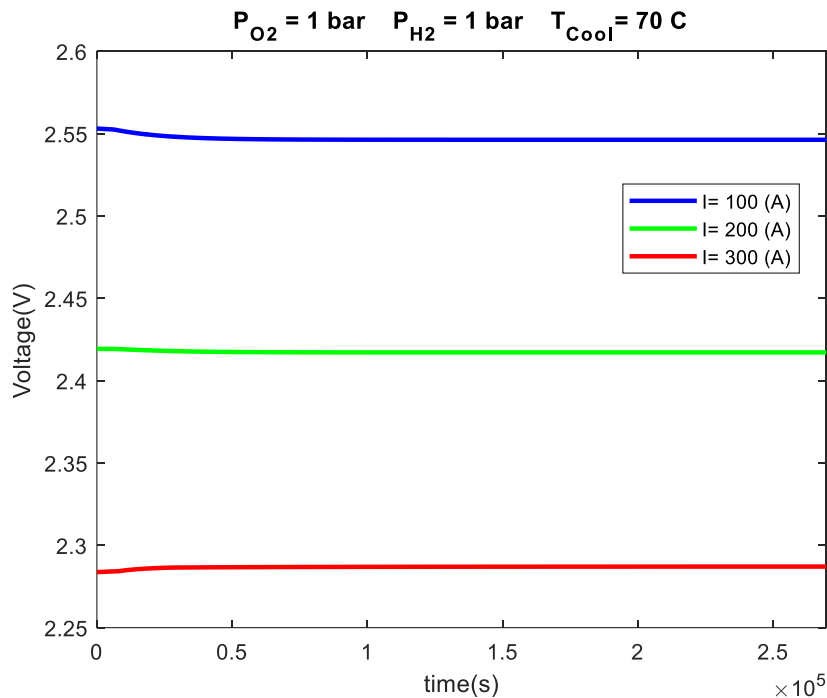
و با آن ها رابطه مستقیم دارد. به همین علت، هرچه میزان فشار ورودی گاز هیدروژن بیشتر شود ولتاژ مدار باز پیل سوختی نیز افزایش می یابد. شکل ۱۲ میزان تاثیر فشار ورودی گازهای واکنش دهنده را نشان می دهد. مطابق با معادلات (۴۴) و (۴۵)، افزایش فشار گاز اکسیژن نیز علاوه بر افزایش ولتاژ مدار باز پیل سوختی منجر به کاهش اتلاف ولتاژ فعال سازی می شود. در نتیجه می توان عنوان کرد با افزایش فشار گازهای واکنش دهنده، میزان ولتاژ خروجی پیل سوختی نیز اندکی افزایش می یابد. با افزایش فشار گازهای ورودی، میزان واکنش الکتروشیمیایی افزایش یافته و در نتیجه انرژی الکتریکی بیشتری استحصال می شود.

با توجه به معادلات (۴۵)–(۴۷)، دما رابطه مستقیم با اتلاف غلظتی و رابطه عکس با اتلاف فعال سازی و اهمی دارد. اگرچه دمای گازهای واکنش دهنده ورودی به پیل سوختی نیز بر روی میزان انرژی الکتریکی



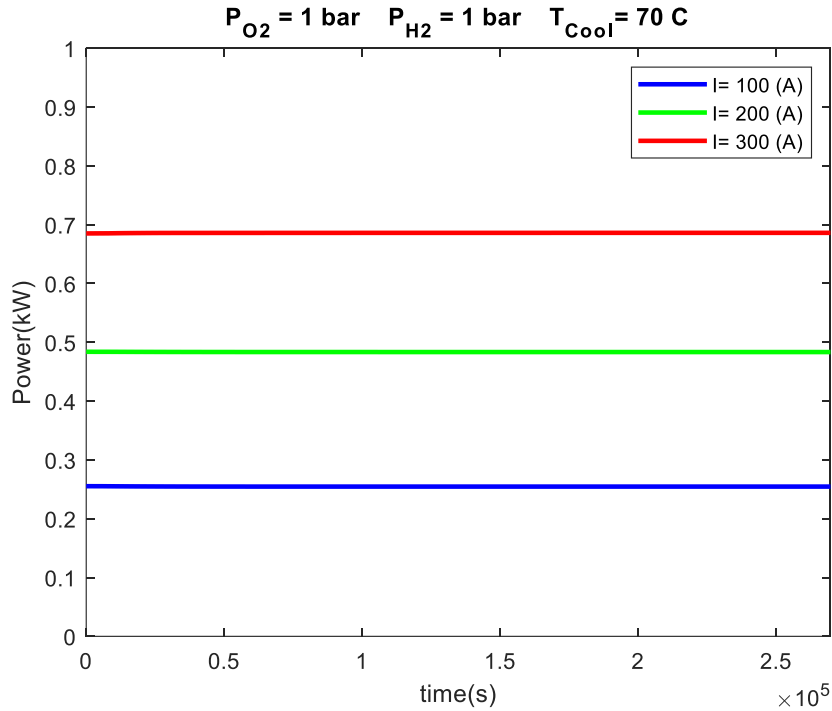
شکل ۱۳. تاثیر دمای ورودی سیال خنک‌کاری بر ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری انتها‌باز هیدروژن-اکسیژن.

Fig. 13. Effect of inlet temperature of coolant on the output voltage of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.



شکل ۱۴. تاثیر جریان پیل سوختی بر روی ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری انتها‌باز هیدروژن-اکسیژن.

Fig. 14. Effect of fuel cell current on the output voltage of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.



شکل ۱۵. تاثیر جریان پیل سوختی بر روی توان پیل سوختی پلیمری انتها باز هیدروژن-اکسیژن.

Fig. 15. Effect of fuel cell current on the power of hydrogen-oxygen flow-through PEM fuel cell.

- پارامترهای مجهول مدل با میانگین خطای $1/0.3$ نسبت به داده‌های آزمایشگاهی مورد شناسایی چند ورودی-یک خروجی قرار گرفت.
- بررسی و تحلیل همبستگی میان ولتاژ پیل سوختی و پارامترهای مدل از قبیل مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون و ضرایب اریفیس‌ها مورد تحلیل قرار گرفت و مشاهده شد که مقاومت تماسی معادل هدایت الکترون نسبت به سایر پارامترهای شناسایی شده دارای تاثیر بیشتری می‌باشد.

۶- فهرست علائم

منابع

- [1] Y. Wang, D.F.R. Diaz, K.S. Chen, Z. Wang, X.C. Adroher, Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review, *Materials today*, 32 (2020) 178-203.
- [2] J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng, *Control of fuel cell power systems: principles, modeling, analysis and feedback design*, Springer Science & Business Media, 2004.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل‌سازی جعبه خاکستری و شناسایی سیستم پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن سه سل انتها باز با رطوبت‌زن یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیل سوختی ارائه شده در این پژوهش از نوع چند ورودی-یک خروجی می‌باشد. در این پژوهش، مدل‌سازی صفر بعدی غیرخطی سیالاتی، ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی پیل سوختی پلیمری با رطوبت‌زن یکپارچه انجام شده است. همچنین، پارامترهای نامعلوم مدل پیل سوختی مورد مطالعه با استفاده از روش شناسایی پارامتر چند ورودی-یک خروجی و بر اساس کمینه‌سازی خطای پیش‌بینی، به روش ناحیه‌های صحیح انعکاسی نیوتن و همچنین بخشی از داده‌های آزمایشگاهی تعیین گردید. در نهایت، اعتبارسنجی مدل بدست آمده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تست مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از نتایج این مقاله در بخش ذیل فهرست شده است:

- تست‌های جامع آزمایشگاهی روی پیل سوختی پلیمری هیدروژن-اکسیژن با رطوبت‌زن یکپارچه انجام شد و 329420 داده آزمایشگاهی تحت شرایط مختلف دمای سری، فشار ورودی گازهای واکنش‌دهنده و جریان سری ضبط گردید.

- [12] M.M. Barzegari, M. Dardel, E. Alizadeh, A. Ramiar, Dynamic modeling and validation studies of dead-end cascade H₂/O₂ PEM fuel cell stack with integrated humidifier and separator, *Applied energy*, 177 (2016) 298-308.
- [13] M. Ye, X. Wang, Y. Xu, Parameter identification for proton exchange membrane fuel cell model using particle swarm optimization, *International journal of hydrogen energy*, 34(2) (2009) 981-989.
- [14] R.I. Salim, H. Noura, A. Fardoun, A parameter identification approach of a PEM fuel cell stack using particle swarm optimization, in: *ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability*, American Society of Mechanical Engineers, 2013, pp. V001T003A011-V001T003A011.
- [15] S. De Lira, V. Puig, J. Quevedo, Robust LPV model-based sensor fault diagnosis and estimation for a PEM fuel cell system, in: *Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, 2010 Conference on, IEEE, pp. 819-824.
- [16] S.L. Chavan, D.B. Talange, System identification black box approach for modeling performance of PEM fuel cell, *Journal of Energy Storage*, 18 (2018) 327-332.
- [17] S. Kelouwani, K. Adegnon, K. Agbossou, Y. Dube, Online system identification and adaptive control for PEM fuel cell maximum efficiency tracking, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(3) (2012) 580-592.
- [18] A.K. Pinagapani, G. Mani, K. Chandran, K. Pandian, E. Sawantmorye, P. Vaghela, Dynamic modeling and validation of PEM fuel cell via system identification approach, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(4) (2021) 2211-2220.
- [19] D. Chen, W. Li, H. Peng, An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control, *Journal of Power Sources*, 180(1) (2008) 461-467.
- [20] J. Alejandro, A. Arce, C. Bordons, Development and
- [3] N. Baharloo, E. Afshari, Methods of humidification of reactant gases of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Mechanical Engineering*, 22(5) (2013) 49-59 (in Persian).
- [4] V.K. Firouzjaei, S. Rahgoshay, M. Khorshidian, Planar membrane humidifier for fuel cell application: Numerical and experimental case study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147 (2020) 118872.
- [5] M. Khorshidian, S.M. Rahgoshay, M. Rahimi, S.H. Masroori, Experimental study of performance of an integrated hydrogen-oxygen dead-end polymer electrolyte membrane fuel cell stack power system with a large active area and internal humidification system, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(3) (2021) 19-19 (in Persian).
- [6] R. Petrone, Z. Zheng, D. Hissel, M.-C. Péra, C. Pianese, M. Sorrentino, M. Béchérif, N. Yousfi-Steiner, A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(17) (2013) 7077-7091.
- [7] I. Arsie, A. Di Domenico, C. Pianese, M. Sorrentino, A multilevel approach to the energy management of an automotive polymer electrolyte membrane fuel cell system, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 7(1) (2010).
- [8] A. Zeller, O. Rallieres, J. Regnier, C. Turpin, Diagnosis of a hydrogen/air fuel cell by a statistical model-based method, in: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, IEEE, pp. 1-6.
- [9] A. Hernandez, D. Hissel, R. Outbib, Modeling and fault diagnosis of a polymer electrolyte fuel cell using electrical equivalent analysis, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 25(1) 148-160.
- [10] B. Carnes, N. Djilali, Systematic parameter estimation for PEM fuel cell models, *Journal of Power Sources*, 144(1) (2005) 83-93.
- [11] A. Al-Othman, N.A. Ahmed, F. Al-Fares, M. AlSharidah, Parameter Identification of PEM Fuel Cell Using Quantum-Based Optimization Method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(9) (2015) 2619-2628.

- of Power Sources, 185(2) (2008) 952-960.
- [25] N.C. Schwertman, R. de Silva, Identifying outliers with sequential fences, Computational statistics & data analysis, 51(8) (2007) 3800-3810.
- [26] H. Liu, M. Cocea, Semi-random partitioning of data into training and test sets in granular computing context, Granular Computing, 2(4) (2017) 357-386.
- [27] M.M. Barzegari, M. Dardel, A. Ramiar, E. Alizadeh, An investigation of temperature effect on performance of dead-end cascade H₂/O₂ PEMFC stack with integrated humidifier and separator, International Journal of Hydrogen Energy, 41(4) (2016) 3136-3146.
- [28] C.-W. Yang, Y.-S. Chen, A mathematical model to study the performance of a proton exchange membrane fuel cell in a dead-ended anode mode, Applied energy, 130 (2014) 113-121.
- experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model, Journal of power sources, 173(1) (2007) 310-324.
- [21] C. Panos, K. Kouramas, M. Georgiadis, E. Pistikopoulos, Modelling and explicit model predictive control for PEM fuel cell systems, Chemical Engineering Science, 67(1) (2012) 15-25.
- [22] J.H. Nam, M. Kaviany, Effective diffusivity and water-saturation distribution in single-and two-layer PEMFC diffusion medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(24) (2003) 4595-4611.
- [23] C. Ziogou, S. Voutetakis, S. Papadopoulou, M.C. Georgiadis, Modeling, simulation and experimental validation of a PEM fuel cell system, Computers & Chemical Engineering, 35(9) (2011) 1886-1900.
- [24] M. Outeiro, R. Chibante, A. Carvalho, A. De Almeida, A parameter optimized model of a proton exchange membrane fuel cell including temperature effects, Journal

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. M. Barzegari, A. h. Pahnabi, *Dynamic Modeling and Parameter Identification of Hydrogen-Oxygen PEM Fuel Cell Model with Integrated Humidifier*, Amirkabir J. Mech Eng., 55(3) (2023) 359-380.

DOI: 10.22060/mej.2023.21898.7537

