مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 433-443

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر رطوبت زنی گازهای ورودی بر پاسخ دینامیکی یک توده پیل سوختی پلیمری

شریف قریب[1]، حسن حسن‌زاده[2*]

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175.615، h.hassanzadeh@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 خرداد 1396

پذیرش: 17 تیر 1396

ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:

مدل‌سازی دینامیکی

توده

پیل سوختی پلیمری

رطوبت‌زنی

چکیده

برای به‌دست آوردن پاسخ واقعی یک سیستم پیل سوختی پلیمری به تغییرات بار، مدل‌سازی دینامیکی لازم است چرا که مدل‌سازی استاتیکی مستقل از زمان بوده و عملکرد سیستم را فقط در یک یا چند نقطه نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر عملکرد دینامیکی توده یک سیستم پیل سوختی پلیمری در محیط سیمولینک متلب مدل‌سازی و توسط داده‌های موجود در مقالات اعتبارسنجی شده است. مدل‌سازی در دو بخش انجام شده است؛ در بخش اول گازهای ورودی به توده پیل سوختی به‌صورت خشک و در بخش دوم گازهای ورودی به توده پیل سوختی رطوبت زنی می‌شوند. به منظور بررسی پاسخ دینامیکی توده پیل سوختی به تغییرات سریع جریان، جریان الکتریکی متغیری به‌صورت پله به سیستم وارد شده و اثر این تغییر بار بر ولتاژ خروجی، میزان مصرف واکنشگرها، دما و فشار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بخش اول نشان می‌دهد که پاسخ سیستم به تغییرات جریان الکتریکی با تأخیر زمانی همراه است و هر چقدر مقدار جریان الکتریکی بیشتر شود تغییرات دمای بدنه پیل سوختی، میزان مصرف واکنشگرها و میزان گازهای ورودی به کانال‌های آند و کاتد بیشتر می‌شوند. دمای کانال‌های آند، کاتد و بدنه پیل سوختی(سطح خارجی) با یکدیگر متفاوتند و با افزایش توان توده تفاوت آن‌ها بیشتر می‌شوند. نتایج قسمت دوم نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت نسبی گازهای ورودی، افت ولتاژ اهمی در غشا کاهش و به تبع آن تلفات حرارتی توده و در نتیجه دمای بدنه پیل سوختی کاهش می‌یابد.

Investigation of the effect of humidification of inlet gases on the dynamic response of a PEM fuel cell stack

Sharif Gharib, Hassan Hassanzadeh*

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175.615, Birjand, Iran, h.hassanzadeh@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 May 2017
Accepted 08 July 2017
Available Online 25 August 2017

Keywords:
Dynamic Modeling
Stack
PEM fuel cell
Humidification

ABSTRACT

To obtain a precise answer a PEM fuel cell system to load changing, dynamic modeling is necessary because static modeling is independent of time and it shows the system performance in just one or a few points. In this study, the dynamic performance of a PEM fuel cell stack is modeled in the Matlab Simulink and is validated by the data available in the literature. Modeling is done in two parts; in the first part, the input gases to the fuel cell stack are dry and in the second part, the gases entering the stack are humidified. In order to investigate dynamic response of system to rapid changes in electrical current, the variable electrical current is entered into the system step by step then the effect of this change on output voltage, consumption of reactants, temperature and pressure are obtained. Analyzing the results of first part demonstrates the time delay of system response to electrical current changes. With increasing the electrical current, the temperature of cell body, consumption of reactants and amount of input gases into the anode and the cathode channels are increased. The temperature of anode and cathode channels and fuel cell body are different and with increasing the stack power more differences are observed. Analyzing the results of the second part indicates that with increasing the relative humidity of input gases the ohmic loss, and so the body temperature of fuel cell is decreased.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد وسایل نقلیه با سوخت پاک با بازده بالا و ایمن صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به وسایل نقلیه‌ی الکتریکی، هیبریدی الکتریکی و پیل سوختی اشاره کرد، این وسایل در آینده نزدیک می‌توانند جایگزین مناسبی برای وسایل نقلیه‌ی امروزی باشند. پیل‌های سوختی به واسطه بازده بالا، آلودگی و سروصدای و عضو متحرک کم، امکان استفاده از سوخت‌های پاک، تنوع منابع سوختی و غیره، گزینه مناسبی برای جایگزینی ماشین‌های حرارتی محسوب می‌شوند. در این میان، پیل‌های سوختی پلیمری به دلیل داشتن مزایایی مانند جامدبودن الکترولیت، چگالی قدرت و عمر مفید بالا، زمان شروع به کار کم و پاسخ دینامیکی سریع برای کاربرد در خودرو مناسب‌ترند [1].

در حال حاضر بازده خودروهای پیل‌های سوختی بالاتر از موتورهای احتراق داخلی هستند ولی هنوز تجاری نشده و هزینه تولید عاملی بازدارنده است. برای تجاری سازی مدل‌سازی لازم است چرا که مدل‌سازی می‌تواند در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sh. Gharib, H. Hassanzadeh, Investigation of the effect of humidification of inlet gases on the dynamic response of a PEM fuel cell stack, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 433-443, 2017 (in Persian)

توسعه و کاهش هزینه‌های تولید و همچنین شناخت پارامترهای مؤثر بر عملکرد پیل‌های سوختی نقش موثری داشته باشد. سیستم پیل سوختی و یا اجزاء آن می‌تواند از جنبه‌های مختلفی مدل‌سازی شوند یکی از این جنبه‌ها، مدل‌سازی عملکرد آنها از نقطه نظر استاتیکی یا دینامیکی است [2]. در مدل‌سازی استاتیکی، خروجی سیستم وابسته به زمان نیست لذا عملکرد سیستم در یک نقطه یا نقاط کاری مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نوع مدل‌سازی برای برآورد اندازه اجزای سیستم و محاسبه مقدار مواد مورد نیاز اجزاء سیستم با اهمیت است. در ادامه به تعدادی از مدل‌های استاتیکی اشاره می‌شود.

ویشارت و همکاران [3] مدلی نیمه‌تجربی و استاتیکی از یک سیستم پیل سوختی را برای به‌دست آوردن شرایط کاری بهینه سیستم ارائه کردند. در این مدل از روابط حاکم بر اجزای سیستم پیل سوختی استفاده و بوسیله الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده شرایط کاری سیستم را به‌دست آوردند. بهینه‌سازی براساس دو تابع هدف ماکزیمم قدرت خالص خروجی و ماکزیمم بازده اگزرژی سیستم انجام شده است. حسن‌زاده و جعفری [4] یک سیستم خودروی پیل سوختی با قدرت 50 کیلووات را به‌صورت استاتیکی مدل کردند. این محققان در کار خود از مدل نیمه تجربی امفلت برای مدل‌سازی سیستم پیل سوختی استفاده کرده و اثر دما، فشار، ضریب استوکیومتری هوا و رطوبت نسبی واکنش‌گرها را بر روی ولتاژ خروجی سیستم پیل سوختی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش هر یک از این چهار عامل باعث افزایش ولتاژ پیل سوختی می‌شود ولی در این بین، افزایش رطوبت نسبی تأثیر بیشتری بر ولتاژ خروجی دارد.

مدل‌های استاتیکی شرایط کاری سیستم در یک نقطه یا نقاط ثابت را مورد بررسی قرار می‌دهند ولی برای به‌دست آوردن پاسخ واقعی یک سیستم به تغییرات بار، مدل‌سازی دینامیکی لازم است. حتی در یک مدل‌سازی استاتیکی، مدل دینامیکی می‌تواند برای تحلیل آغاز و پایان سیکل کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد در ادامه به تعدادی از مدل‌های دینامیکی اشاره می‌شود.

ژو و همکاران [5] یک مدل دینامیکی و نیمه تجربی از سیستم پیل سوختی ارائه کردند که در آن اثر تغییرات دما، نرخ جریان گاز و ظرفیت خازنی روی عملکرد پیل سوختی در حالت دینامیکی بررسی شده است. جهت بررسی سیستم از سه حجم کنترل مختلف برای کانال‌های آند و کاتد و بدنه پیل سوختی استفاده شده است. برای تحلیل هر کدام از این حجم کنترل‌ها از ترکیبی از روابط حاکم بر رفتار سیال و روابط تجربی استفاده شده است. این محققین مدل‌سازی دینامیکی خود را در محیط سیمولینک متلب[1] انجام داده‌اند. در این مدل تغییرات ولتاژ خروجی، دبی گازها و فشار در کانال‌های ورودی پیل سوختی با تغییرات زمانی جریان بررسی شده است. پاساپاتی و همکاران [6] یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی پاسخ گذرای سیستم پیل سوختی پلیمری توسعه دادند. این محققین از مدل ژو و همکاران استفاده کرده و یک مدل دینامیکی برای بررسی اثر شارژ ظرفیت لایه دوگانه[2]، دینامیک جریان و فشار در کانال‌های آند و کاتد و خصوصیات حالت گذرا انتقال جرم و انتقال حرارت در بدنه پیل سوختی ارائه کردند. مدل‌سازی در محیط سیمولینک متلب انجام شده و پاسخ حالت گذرا شامل تغییرات ولتاژ خروجی، نرخ جریان اکسیژن و هیدروژن ورودی، دما و فشار گازها در کانال‌های آند و کاتد با تغییرات زمانی جریان می‌باشد. پورعابدین و امی [7] نمونه‌ای از سیستم‌های پیشنهادی برای وسیله نقلیه پیل سوختی ارائه دادند و ضمن توسعه مدلی برای شبیه‌سازی سیستم، عوامل مختلف موثر بر عملکرد سیستم، تأثیر نوع استراتژی کنترل مدل سیستم پیل سوختی، بازده انرژی، عملکرد خودرو در ارتفاعات مختلف از سطح دریا، تأثیر شیب جاده بر روی عملکرد خودرو را مورد بررسی قرار دادند. این محققین در سیستم پیل سوختی خود از یک توده با قدرت 50 کیلووات همراه با یک باتری اسیدسرب 26 آمپرساعتی استفاده کرده و سیستم را به کمک نرم‌افزار ادوایزور[3] مدل‌سازی کردند. براون و همکاران [8] یک سیستم پیل سوختی پلیمری را در محیط سیمولینک- متلب مدل‌سازی کردند. این مدل شامل مدل دینامیکی توده پیل سوختی، الکترولایزر، یک مخزن ذخیره هیدروژن از نوع هیدریدهای فلزی و یک سیستم خنک‌کننده رادیاتوری می‌باشد. کوربو و همکاران [9] مدلی تجربی و دینامیکی جهت بررسی رفتار دینامیکی سیستم پیل سوختی با قدرت 30 کیلووات جهت طراحی یک مینی‌بوس شهری ارائه دادند. مدل‌سازی سیستم در محیط سیمولینک- متلب انجام شده است. قلیزاده و همکاران [10] اثر جریان و رطوبت گازهای ورودی به پیل تک پیل سوختی پلیمری را بر جریان الکترو- اسمز به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها با تغییر رطوبت در دو طرف پیل سوختی و استفاده از معادلات تعادل آب، مقادیر جریان الکترو-اسمز، ضریب الکترو-اسمز و درگ خالص در رطوبت‌های مختلف را به‌دست آوردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند و کاتد تا یک رطوبت خاص به‌صورت خطی تغییر می‌کند و پس از آن تغییر زیادی مشاهده نمی‌شود، همچنین تغییر رطوبت آند اثر موثرتری بر عملکرد پیل نسبت به تغییر رطوبت کاتد دارد. تیس و همکارانش [11] یک مدل غیرخطی دینامیکی غیرهم‌دما را در فضای حالت برای یک پیل سوختی پلیمری توسعه دادند. این محققان در این مدل‌سازی، با حل کردن معادلات بقاء انرژی و جرم اثرات تغییرات بار، فشار گاز و دمای گاز ورودی را بر عملکرد دینامیکی پیل سوختی مورد بررسی قرار دادند. این محققین از نرم‌افزار مث کد[4] جهت مدل‌سازی سیستم خود استفاده کردند و دریافتند که عوامل اساسی موثر بر عملکرد دینامیکی پیل سوختی تغییرات بار و دمای گازهای ورودی می‌باشند.

مقاومت غشا در مقابل عبور پروتون در پیل‌های سوختی پلیمری وابسته به میزان آب موجود در آن است که بخشی از آن توسط آب تولیدی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی و بخشی دیگر توسط رطوبت‌زنی گازهای ورودی تامین می‌شود. در مطالعات انجام شده معمولا از فرض اشباع بودن گازهای ورودی از آب استفاده می‌شود ولی در تحقیق حاضر، پاسخ دینامیکی توده پیل سوختی در دو حالت گازهای ورودی خشک و مرطوب (با رطوبت نسبی‌های مختلف) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند تا تاثیر رطوبت‌زنی گازهای ورودی بر عملکرد دینامیکی توده پیل سوختی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تغییرات دمای گازهای عبوری از کانال‌های آند و کاتد و دمای بدنه پیل سوختی و فشار گازهای عبوری از کانال‌ها، ولتاژ و قدرت تولیدی پیل سوختی نسبت به تغییرات پله‌ای جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- معادلات حاکم

برای به‌دست آوردن معادلات حاکم و مدل‌سازی دینامیکی توده پیل سوختی، مطابق "شکل 1"، پیل سوختی به سه حجم کنترل شامل کانال آند، کانال کاتد و بدنه پیل سوختی تقسیم بندی شده و با استفاده از معادلات بقای جرم

[1] Simulink-Matlab
[2] Charge Double Layer Capacitance
[3] Advisor
[4] MATHCAD

و بقای انرژی همراه با معادلات الکتروشیمیایی معادلات حاکم بر مسله مورد نظر استخراج می‌شود. برای استخراج معادلات حاکم از دو فرض ساده کننده زیر استفاده شده است:

الف) مخلوط گازها ایده‌ال هستند.

ب) از حل معادله مومنتوم در امتداد کانال‌ها صرفنظر می‌شود.

فرم انتگرالی معادلات بقای جرم و انرژی حاکم بر سیستم به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint \rho dv + \oiint \rho(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint \rho e_t dv + \oiint \rho h(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \tag{2}$$

برای حجم کنترل‌های آند و کاتد مطابق "شکل 1" داریم:

$$\oiint \rho(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = -\dot{m}_{\text{in}} + \dot{m}_{\text{out}} + \dot{m}_{\text{electrode}} \tag{3}$$

برای به‌دست آوردن دبی جرمی ورودی و خروجی از کانال‌های آند و کاتد لازم است توزیع سرعت ورودی و خروجی معلوم باشند. در حالت کلی، توزیع سرعت در هر نقطه از کانال‌ها از حل معادله مومنتوم به‌دست می‌آید اما در تحقیق حاضر معادلات مومنتوم در کانال‌ها حل نمی‌شود لذا از مدل جریان نازل (برای جریان زیر بحرانی) استفاده می‌شود. بر این اساس، دبی جرمی عبوری از یک نازل تابعی خطی از اختلاف فشار بالادست P_1 و پایین دست P_2 است و از رابطه (4) به‌دست می‌آید [5]:

$$\dot{m} = k(P_1 - P_2) \tag{4}$$

که در این رابطه k ثابت نازل می‌باشد.

در چگالی جریان i، دبی جرمی سوخت و اکسید کننده ورودی به الکترودها (دبی جرمی مصرفی) از رابطه (5) به‌دست می‌آید:

$$\oiint \rho(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = N\frac{i}{nF}M \tag{5}$$

در این رابطه N تعداد تک پیل‌ها، F ثابت فارادی، M جرم مولکولی گاز و n تعداد مول الکترون انتقال یافته به ازای یک مول سوخت مصرفی است که مقدار آن برای هیدروژن برابر با 2 و برای اکسیژن برابر با 4 است.

معادلات بقای جرم در کانال‌ها به‌صورت زیرند:

$$\frac{dm_{\text{H}_2}}{dt} = k_{\text{up,an}}\left(P_{\text{s,an}} - P_{\text{an}}\right) - k_{\text{down,an}}(P_{\text{an}} - P_{\text{atm}}) - \frac{Ni}{2F}M_{\text{H}_2} \tag{6}$$

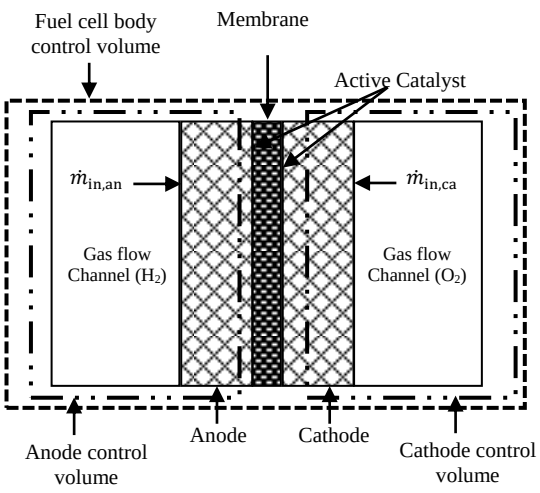

Fig. 1 The control volumes of the anode, cathode channel and fuel cell body

شکل 1 حجم کنترل کانال‌های آند، کاتد و بدنه پیل سوختی

$$\frac{dm_{\text{O}_2}}{dt} = k_{\text{up,ca}}\left(P_{\text{s,ca}} - P_{\text{ca}}\right) - k_{\text{down},ca}(P_{ca} - P_{\text{atm}}) - \frac{Ni}{4F}M_{\text{O}_2} \tag{7}$$

که در رابطه مربوط به کانال آند، $k_{\text{up,an}}$ و $k_{\text{down,an}}$ به ترتیب ضرایب دبی جرمی ورودی و خروجی از کانال و $P_{\text{s,an}}$، P_{an} و P_{atm} به ترتیب فشار منبع تغذیه هیدروژن، فشار کانال آند و فشار محیط هستند. ثوابت برای کانال کاتد هم به همین طریق است.

همچنین نرخ انتقال جرم از حجم کنترل بدنه پیل سوختی از رابطه (8) به‌دست می‌آید:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{Ni}{2F}M_{\text{H}_2} + \frac{Ni}{4F}M_{\text{O}_2} \tag{8}$$

در معادله انرژی (رابطه 2)، عبارت اول سمت چپ معادله بیانگر نرخ تغییرات انرژی در حجم کنترل، عبارت دوم بیانگر نرخ انتقال حرارت ناشی از انتقال جرم از سطح کنترل، عبارت اول سمت راست نشان دهنده نرخ انتقال حرارت جابجایی بین بدنه پیل سوختی و کانال‌هاست که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{\text{conv}}A_{\text{conv}}\Delta T \tag{9}$$

عبارت dQ/dt شامل گرمای اضافه شده به بدنه پیل سوختی از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی و همچنین انتقال حرارت جابجایی کانال‌ها با محیط است و مقدار آن برابر است با:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q}_{\text{conv,an}} + \dot{Q}_{\text{conv},ca} + \dot{Q}_{\text{conv,amb}} + \Delta h_{R,T}\iint \rho_{\text{H}_2}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA \tag{10}$$

در این رابطه $\Delta h_{R,T}$ ارزش حرارتی واحد جرم هیدروژن است.

برای بدنه پیل سوختی عبارت dW/dt نشان‌دهنده توان الکتریکی تولید شده در پیل سوختی است که از رابطه (11) به‌دست می‌آید:

$$\frac{dW}{dt} = -NV_{\text{cell}}i \tag{11}$$

که V_{cell} ولتاژ خروجی از پیل سوختی است. طبق قرارداد قانون اول، کار خروجی از سیستم منفی است لذا علامت منفی در این رابطه به همین دلیل است.

تغییرات زمانی انرژی داخلی هیدروژن در حجم کنترل کانال آند از رابطه (12) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint \rho_{\text{H}_2}e_t dV = \frac{d}{dt}(m_{\text{H}_2}C_{\text{V,H}_2}T_{\text{an}}) \tag{12}$$

انتقال حرارت به حجم کنترل کانال آند از طریق انتقال جرم از سطح کنترل است که شامل ورود و خروج به کانال و ورودی به لایه نفوذی گاز آند است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$-\iint \rho_{\text{H}_2}h_{\text{H}_2}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = k_{\text{up,an}}\left(P_{\text{s,an}} - P_{\text{an}}\right)C_{\text{P,H}_2}\left(T_{\text{an,in}} - T_0\right) - k_{\text{down,an}}(P_{\text{an}} - P_{\text{atm}})C_{\text{P,H}_2}(T_{\text{an}} - T_0) - \frac{Ni}{2F}M_{\text{H}_2}C_{\text{P,H}_2}(T_{\text{an}} - T_0) \tag{13}$$

انتقال حرارت جابجایی از بدنه پیل سوختی به کانال آند مطابق رابطه (14) بیان می‌شود:

$$\frac{dQ}{dt} = k_{\text{conv,an}}(T_{\text{body}} - T_{\text{an}}) \tag{14}$$

که در این رابطه $k_{\text{conv,an}} = h_{\text{conv},an}A_{\text{conv,an}}$ است.

همچنین تغییرات زمانی انرژی داخلی اکسیژن در حجم کنترل کانال کاتد از رابطه (15) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint \rho_{O_2} e_t dV = \frac{d}{dt}(m_{O_2} C_{V,O_2} T_{ca}) \quad (15)$$

مانند کانال آند، معادله بقای انرژی حاکم بر کانال کاتد و بدنه پیل سوختی به‌صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} &-\iint \rho_{O_2} h_{O_2}(\vec{v}\cdot\vec{n})dA \\ &= k_{up,ca}(P_{s,ca}-P_{ca})C_{P,O_2}(T_{ca,in}-T_0) \\ &-k_{down,ca}(P_{ca}-P_{atm})C_{P,O_2}(T_{ca}-T_0) \\ &-\frac{Ni}{4F}M_{O_2}C_{P,O_2}(T_{ca}-T_0) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{dQ}{dt} = k_{conv,ca}(T_{body}-T_{ca}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint \rho_{body} e_t dV = m_{body} C_{P,body}\frac{dT_{body}}{dt} \quad (18)$$

که در آن $C_{P,body}$ میانگین ظرفیت حرارتی ویژه بدنه پیل سوختی است.

گرمای اضافه شده و کار انجام شده بر روی حجم کنترل بدنه پیل سوختی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} &\frac{dQ}{dt}+\frac{dW}{dt} = k_{conv,an}(T_{an}-T_{body}) \\ &+k_{conv,ca}(T_{ca}-T_{body})+k_{conv,amb}(T_{amb}-T_{body}) \\ &+\Delta h_{R,T}\frac{Ni}{2F}M_{H_2}-NV_{cell}i \end{aligned} \quad (19)$$

ولتاژ پیل سوختی در حالت دینامیکی از رابطه زیر به‌دست می‌آید [12]:

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{dyn} + \psi_{ohmic} \quad (20)$$

2-1- اثر اضافه شدن رطوبت به واکنش‌گران

در یک فشار ثابت، با اضافه شدن بخار آب به جریان گازهای ورودی به کانال‌های آند و کاتد، غلظت گونه‌های ورودی به کانال‌ها کاهش می‌یابند. از این رو بایستی علاوه بر معادلات قبلی، معادله بقای گونه برای بخار آب در دو کانال نیز حل شوند. در صورت هم فشار بودن جریان عبوری از دو کانال، انتقال آب در غشا توسط دو مکانیزم درگ الکترو اسموتیک[1] و نفوذ معکوس[2] انجام می‌شود. مولکول‌های آب در غشاء از یک طرف توسط پروتون‌ها از آند به سمت کاتد انتقال می‌یابند که به آن پدیده درگ الکترو اسموتیک می‌گویند. دبی جرمی آب منتقل شده توسط این مکانیزم از رابطه (21) به‌دست می‌آید [13]:

$$\dot{m}_{H_2O,drag} = n_{drag}\frac{i}{F}M_{H_2O} \quad (21)$$

در این رابطه n_{drag} تعداد مولکول‌های آب حمل شده به ازای هر پروتون (ضریب درگ الکترو اسموتیک) انتقال یافته است. این ضریب از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود [13]:

$$n_{drag} = 0.0029\lambda_{mem}{}^2 + 0.05\lambda_{mem} - 3.4\times10^{-19} \quad (22)$$

در این رابطه λ_{mem} محتوای آب غشاست که به‌صورت نسبت تعداد ملکول‌های آب به ازای هر محل بار در غشاء تعریف می‌شود که حداکثر مقدار آن در غشا کاملا اشباع برابر با 22 است.

از طرف دیگر، با افزایش چگالی جریان در غشا، آب انتقال یافته از آند به طرف کاتد و همچنین نرخ تولید آب در کاتالیست کاتد افزایش می‌یابد بنابراین غلظت آب در غشا سمت کاتد از غشا سمت آند غشا بیشتر می‌شود و این اختلاف غلظت باعث برگشت آب از کاتد به سمت آند می‌شود. این پدیده را نفوذ معکوس می‌گویند. دبی جرمی ناشی از آن برابر است با [14]:

$$\dot{m}_{H_2O,\text{back diffusion}} = D_{FC,H_2O}\frac{C_{ca,H_2O}-C_{an,H_2O}}{t_M} \quad (23)$$

که در این رابطه D_{FC,H_2O} ضریب نفوذ آب در غشاست که تابعی از درجه حرارت و محتوای آب غشا است و از رابطه (24) به‌دست می‌آید:

$$D_{FC,H_2O} = D_{FC,\lambda}\exp\left(2416\left(\frac{1}{303}-\frac{1}{T_m}\right)\right) \quad (24)$$

در این رابطه $D_{FC,\lambda}$ ضریب نفوذ غشا در درجه حرارت303 کلوین است.

همچنین t_M ضخامت غشا و C_{ca,H_2O} و C_{an,H_2O} به ترتیب غلظت آب در غشا سمت کاتد و غلظت آب در غشا سمت آند هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_{an,H_2O} = \frac{\rho_m}{M_m}\lambda_{an} \quad (25)$$

$$C_{ca,H_2O} = \frac{\rho_m}{M_m}\lambda_{ca} \quad (26)$$

که ρ_m چگالی غشای خشک، M_m وزن مولکولی غشای خشک، λ_{an} و λ_{ca} به ترتیب محتوای آب غشا در سمت آند و کاتد می‌باشند.

بنابراین معادله بقای جرم در کانال آند به‌صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} &\frac{dm_{H_2}}{dt} = \beta_{H_2}k_{up,an}(P_{s,an}-P_{an}) \\ &-\frac{m_{H_2}}{m_{H_2}+m_{H_2O}}k_{down,an}(P_{an}-P_{atm})-\frac{Ni}{2F}M_{H_2} \end{aligned} \quad (27)$$

که در آن β_{H_2} درصد جرمی هیدروژن در مخلوط هیدروژن- بخار آب ورودی به کانال آند است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\beta_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{RH\times P_{H_2O}^{sat}}\times\frac{M_{H_2}}{M_{an,tot}} \quad (28)$$

آب موجود در کانال آند می‌تواند در دو حالت مایع و گاز وجود داشته باشد. بیشینه مقدار بخار آب موجود در کانال آند برابر است با:

$$m_{an,vapor,max} = \frac{P_{H_2O}^{sat}V_{an}M_{H_2O}}{R_{H_2O}T_{body}} \quad (29)$$

هنگامی که میزان آب موجود در کانال آند از مقدار به‌دست آمده رابطه (29) کمتر باشد، آب به‌صورت بخار خواهد بود ولی اگر از این مقدار بیشتر باشد قسمتی از آب به‌صورت مایع تقطیر شده که مقدارآن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} m_{an,liq} &= m_{an,H_2O}-m_{an,vapor,max} \\ &= \frac{(P_{an,H_2O}-P_{H_2O}^{sat})V_{an}M_{H_2O}}{RT_{an}} \end{aligned} \quad (30)$$

با حل این معادلات در محیط سیمولینک متلب، توزیع فشار و دما در کانال‌های آند و کاتد و همچنین تغییرات دمای بدنه پیل سوختی محاسبه می‌شود. علاوه بر این‌ها، دبی جرمی گونه‌های واکنش‌گر، ولتاژ خروجی توده، قدرت خروجی و بازده پیل سوختی به ازای ورودی جریان متغیر بررسی شده و تاثیر مرطوب‌سازی گازهای ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3- مدل‌سازی و اعتبارسنجی

3-1- نحوه مدل‌سازی

برای مدل‌سازی، ابتدا روابط حاکم بر هر حجم کنترل و همچنین معادلات الکتروشیمیایی حاکم بر پیل سوختی را به‌صورت بلوک دیاگرام‌هایی مشخص کرده و ورودی و خروجی‌های مربوط به هر قسمت را مشخص می‌کنیم به دلیل این‌که بعضی از پارامترهای مسأله مانند حجم‌های کانال آند و کاتد و ضرایب دبی ورودی و خروجی مقدارشان به مراتب کمتر از مقدار پارامترهای دیگر مسأله (دما، فشار و ...) است، لذا معادلات حاکم بر مسأله از نوع

[1] Electro-Smotic drag
[2] Back Diffusion

معادلات دیفرانسیل بدرفتار[1] است و برای حل آن‌ها از حل‌کننده ODE23s در محیط سیمولینک متلب استفاده می‌شود. داده‌های مورد نیاز برای به‌دست آوردن دبی جرمی لحظه‌ای هیدروژن، دما و فشار کانال آند و جریان الکتریکی مطلوب مسأله مطابق "شکل 2"، شامل دما و فشارگاز ورودی به کانال آند، فشار محیط، دمای مرجع و دمای بدنه پیل سوختی می‌باشند. از حل معادلات بقای جرم و انرژی در کانال آند به ترتیب دبی جرمی هیدروژن و دمای کانال آند به‌دست می‌آیند. یکی از داده های مورد نیاز کانال آند دمای بدنه پیل سوختی است که از حل معادله انرژی برای بدنه پیل سوختی محاسبه می‌شود.

مانند کانال آند، داده های موردنیاز جهت تحلیل جریان در کانال کاتد مطابق "شکل 3"، شامل جریان الکتریکی، دما و فشار گاز ورودی به کانال کاتد، فشار محیط، دمای مرجع و دمای بدنه پیل سوختی هستند که از حل معادلات بقاء جرم و انرژی دبی جرمی اکسیژن و نیتروژن، دمای کانال کاتد، فشار کانال کاتد و فشارهای جزئی اکسیژن و هیدروژن به‌دست می‌آیند.

برای حل معادله انرژی برای بدنه پیل سوختی، دمای کانال‌های آند و کاتد، دمای محیط، جریان و ولتاژ خروجی پیل سوختی به عنوان ورودی به سیستم داده می‌شود و دمای بدنه به عنوان خروجی به‌دست می‌آید که از این دما به عنوان ورودی کانال‌های آند و کاتد استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که ولتاژ خروجی پیل سوختی براساس معادلات الکتروشیمیایی حاکم برپیل سوختی به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی باید معادلات الکتروشیمیایی حاکم بر پیل سوختی حل شوند. ورودی‌های موردنیاز این معادلات شامل دما و فشار کانال‌های آند و کاتد، دمای بدنه پیل سوختی، فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن در ورود و نهایتا مشخص بودن تعداد پیل‌های سوختی می‌باشند.

در "شکل 4" روند حل معادلات بقای جرم و بقای انرژی برای کانال آند پیل سوختی در محیط سیمولینک نشان داده شده است.

2-3- اعتبارسنجی

به منظور بررسی صحت نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، نتایج به‌دست آمده از کد نوشته شده با نتایج منتشر شده در مرجع [5] مقایسه شده است. در ابتدا ملاحظه شد که روند تغییرات این دو منحنی یکسان است ولی مقادیر تفاوت فاحشی دارند که علت اختلاف عدم تبدیل صحیح واحد ثابت جهانی گازها در مرجع [5] بود که با تصحیح آن نتایج، مطابق "شکل 5" نتایج با دقت خوبی بر نتایج این مرجع منطبق شدند.

4- نتایج

ابتدا نتایج برای گازهای ورودی خشک بررسی می‌شود، سپس تأثیر رطوبت‌زنی گازهای ورودی بر عملکرد توده پیل سوختی بررسی خواهد شد.

برای به‌دست آوردن پاسخ دینامیکی توده پیل سوختی، جریانی مطابق "شکل 6" به سیستم اعمال می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سه جریان متفاوت در سه بازه زمانی مختلف به توده پیل سوختی اعمال شده و پاسخ آن به این تغییرات جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد نیاز برای حل مساله در جدول 1 آورده شده است.

1-4- نتایج با گازهای ورودی خشک

در این حالت، توسط گازهای ورودی به توده پیل سوختی آبی به آن وارد نمی‌شود لذا آب موجود در غشا صرفا ناشی از آب تولید شده در کاتالیست کاتد به‌دلیل واکنش‌های الکتروشمیایی است. "شکل 7" منحنی تغییرات

جدول 1 پارامترهای ورودی موردنیاز

Table 1 Input Parameters required

پارامتر	مقدار
$k_{\mathrm{up,an}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.0000036
$k_{\mathrm{down,an}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.00022
$k_{\mathrm{up,ca}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.00036
$k_{\mathrm{down,ca}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.0022
$k_{\mathrm{conv,amb}}\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}\right)$	17
$k_{\mathrm{conv,an}}\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}\right)$	2
$k_{\mathrm{conv,ca}}\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}\right)$	10
$P_{\mathrm{s,an}}(\mathrm{atm})$	2.4
$P_{s,ca}(\mathrm{atm})$	2.4
$P_{\mathrm{atm}}(\mathrm{atm})$	1
$C_{\mathrm{P,N_2}}(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kgK}})$	1042
$M_{\mathrm{N_2}}\left(\frac{\mathrm{gr}}{\mathrm{mol}}\right)$	28
$m_{\mathrm{body}}.\ C_{\mathrm{P,body}}\ \left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right)$	3500
$F\left(\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{mol}}\right)$	96486.56
N	35
$V_{\mathrm{an}}(\mathrm{m}^3)$	0.005
$V_{\mathrm{ca}}(\mathrm{m}^3)$	0.01
$C(\mathrm{F})$	2
$T_0(\mathrm{K})$	296.5
$A(\mathrm{cm}^2)$	150
$\rho_m\left(\frac{\mathrm{gr}}{\mathrm{cm}^3}\right)$	2
$t_M(\mathrm{cm})$	0.0178

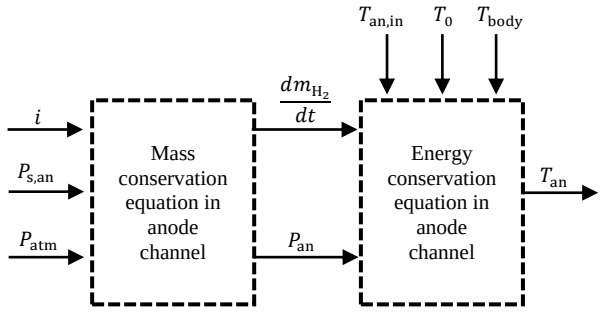

Fig. 2 The procedure to solve the equations of anode channel

شکل 2 نحوه حل معادلات کانال آند

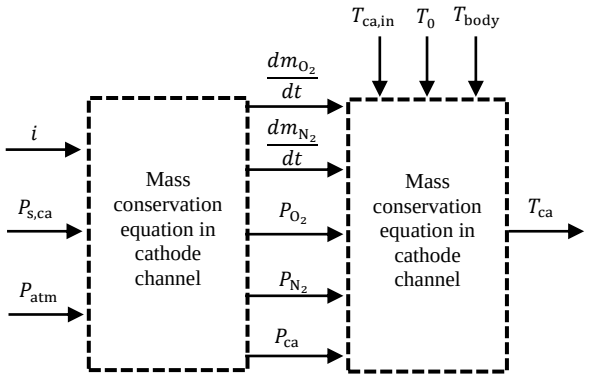

Fig. 3 The procedure to solve the equations of cathode channel

شکل 3 نحوه حل معادلات کانال کاتد

[1] Stiff

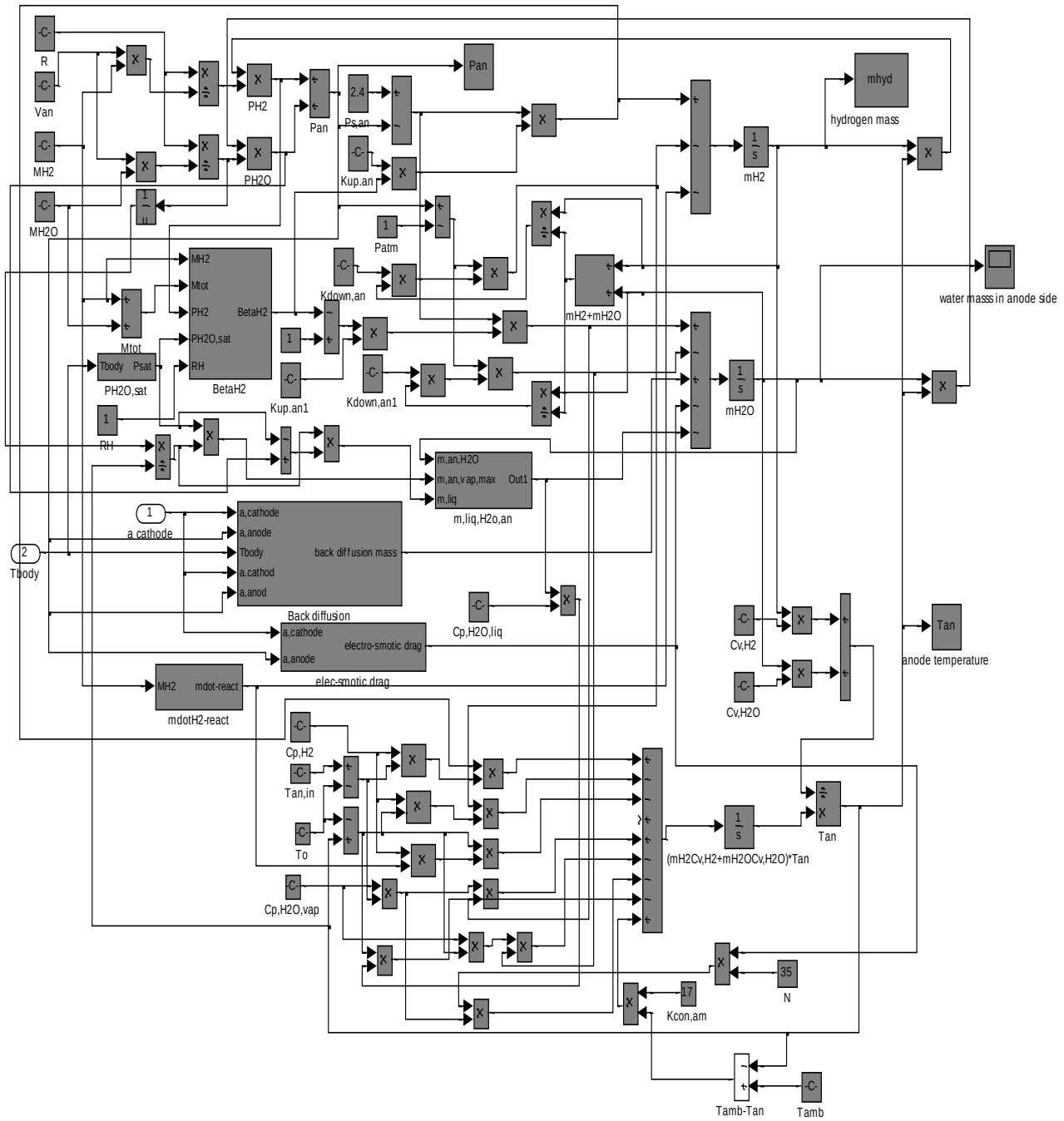

Fig. 4 The solution of mass and energy conservation equation in Simulink

شکل 4 حل معادلات بقای جرم و انرژی کانال آند در محیط سیمولینک

دمای سه حجم کنترل، شامل حجم کنترل بدنه پیل سوختی و حجم کنترل‌های کانال آند و کانال کاتد را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که تغییرات دمای سه حجم کنترل روند مشابهی دارند اما با یکدیگر متفاوتند، که این تفاوت ضرورت تقسیم‌بندی پیل سوختی به سه حجم کنترل را تأیید می‌کند. تفاوت در دماها برای این توان قابل ملاحظه نیست به همین دلیل در بیشتر مقالات، در این محدوده توان این دماها یکسان فرض می‌شوند. در بازه زمانی صفر تا 12000 ثانیه، به‌دلیل این‌که گرمای تولید شده توسط واکنش‌های الکتروشیمیایی بیشتر از انتقال حرارت ناشی از جابجایی با محیط است لذا دمای در سه حجم کنترل افزایش می‌یابند. همچنین در بازه زمانی 12000 تا 25000 ثانیه با افزایش جریان الکتریکی، قدرت تولیدی توده پیل سوختی و به تبع آن گرمای تولیدی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی افزایش یافته و باعث بالا رفتن دماها در سه حجم کنترل می‌شوند. با توجه به این‌که در پیل سوختی پلیمری گرمای ناشی از واکنش در کاتالیست کاتد تولید می‌شود لذا انتظار می‌رود که دمای هوا درکانال کاتد اندکی بالاتر از دمای هیدروژن در کانال آند باشد.

"شکل 8" منحنی تغییرات فشار هیدروژن و هوا به ترتیب در کانال‌های آند و کاتد را نشان می‌دهند. با افزایش جریان الکتریکی، مقدار هیدروژن و هوای مصرفی در کانال‌های آند و کاتد افزایش و این امر باعث کاهش فشار در کانال‌ها می‌شود و بر عکس. همچنین چون فشار محیط ثابت بوده و دبی جرمی هوای ورودی به کانال کاتد بیشتر از دبی جرمی هیدروژن ورودی به

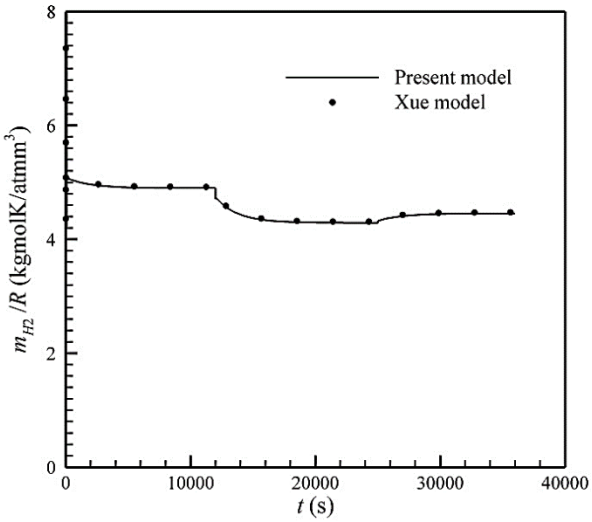

Fig. 5 The curve of mass ratio of hydrogen to the universal gas constant and comparison with result of Zhou [5]

شکل 5 منحنی تغییرات نسبت جرم گاز هیدروژن بر ثابت جهانی گازها و مقایسه آن با نتایج ژو [5]

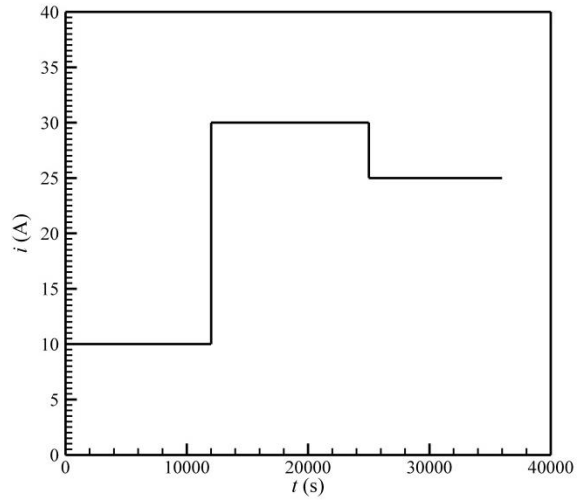

Fig.6 The distribution of the current applied to the system over time

شکل 6 منحنی تغییرات جریان اعمال شده به سیستم برحسب زمان

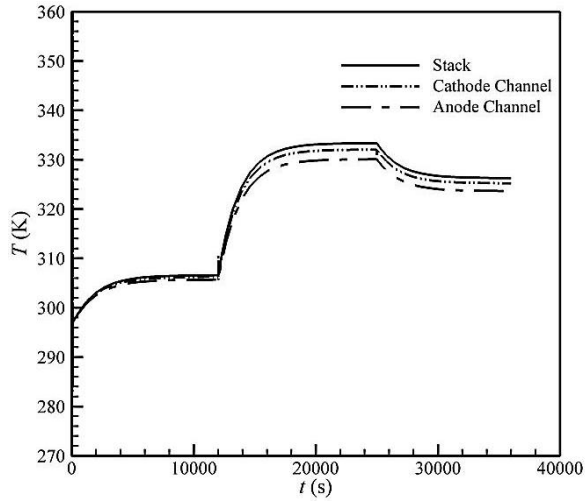

Fig. 7 The temperature distribution of three control-volumes of fuel cell body, anode and the cathode channels

شکل 7 منحنی تغییرات دمای سه حجم کنترل بدنه پیل سوختی، کانال آند و کانال کاتد

کانال آند است، لذا تغییرات فشارنسبی هوا در کانال کاتد بیشتر از فشارنسبی هیدروژن در کانال آند است.

در "شکل‌های 9 و 10" منحنی تغییرات جرم گازهای هیدروژن و اکسیژن در کانال‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش جریان الکتریکی و به تبع آن افزایش مصرف، مقدار جرم هیدروژن و اکسیژن موجود در کانال‌ها کاهش می‌یابند.

در "شکل 11" منحنی تغییرات ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی در حالت استاتیکی و دینامیکی ترسیم شده است. در مدل‌سازی استاتیکی پارامتر زمان دخالت ندارد لذا پاسخ سیستم بدون تأخیر بوده که از واقعیت بدور است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش جریان الکتریکی، ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد زیرا فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن کاهش و به تبع آن افت ولتاژها افزایش می‌یابد. با تغییر پله‌ای جریان الکتریکی در زمان 12000 ثانیه از 10 آمپر به 30 آمپر و در زمان 2500 ثانیه از 30 آمپر به 25 آمپر تاخیر در پاسخ ولتاژ خروجی، فشار، دما و تغییرات جرمی به این

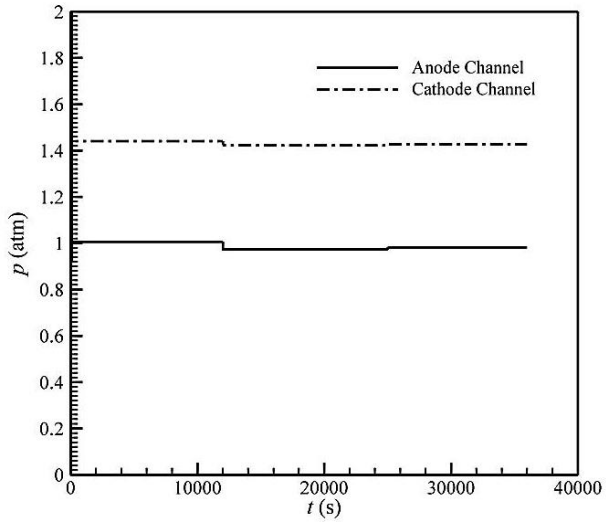

Fig. 8 The pressure variation curve in the anode and the cathode channels

شکل 8 منحنی تغییرات فشار در کانال‌های آند و کاتد

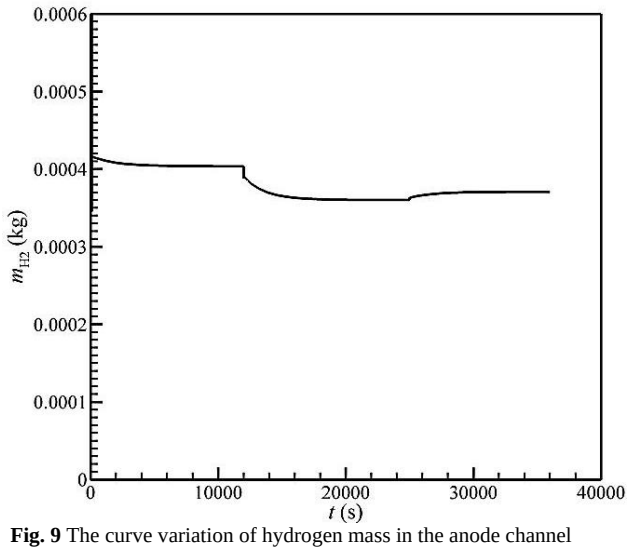

Fig. 9 The curve variation of hydrogen mass in the anode channel versus time

شکل 9 منحنی تغییرات جرم هیدروژن در کانال آند برحسب زمان

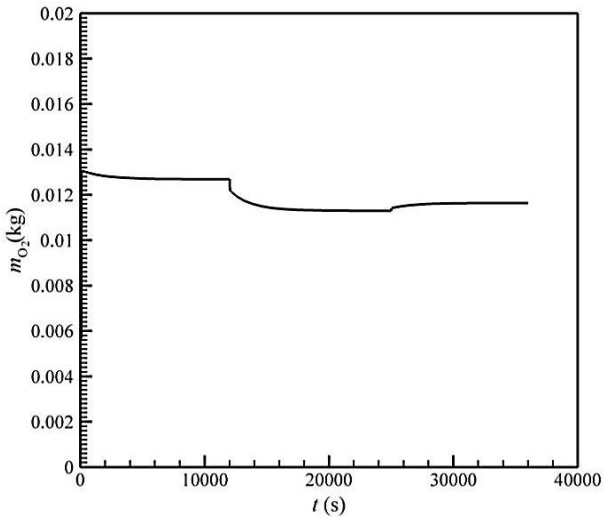

Fig. 10 The variation curve of oxygen mass in the cathode channel versus time

شکل 10 منحنی تغییرات جرم گاز اکسیژن در کانال کاتد برحسب زمان

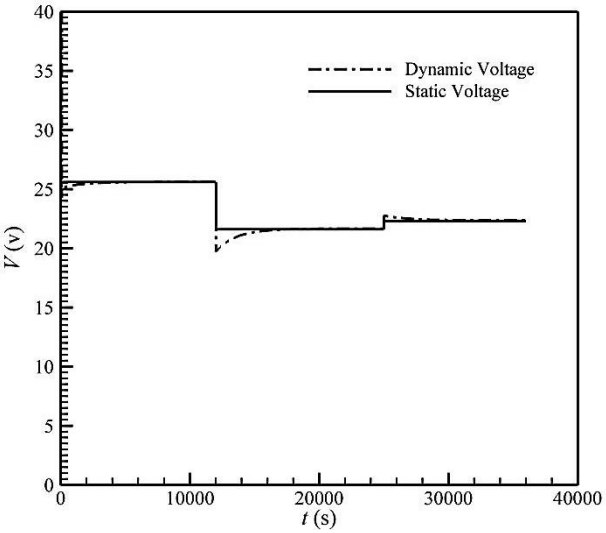

Fig. 11 Comparison the variation of static and the output dynamic voltage of fuel cell stack

شکل 11 مقایسه تغییرات ولتاژ خروجی توده پیل سوختی در حالت استاتیکی و دینامیکی

تغییرات مشاهده می‌شود. این تاخیر در پاسخ‌ها، تفاوت میان مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی را نشان می‌دهد.

"شکل 12" قدرت ناخالص خروجی از توده پیل سوختی را نشان می‌دهد. بیشینه قدرت خروجی در حدود 650 وات است که کمتر از قدرت موردنیاز برای سیستم‌های به‌کار رفته در خودروهای پیل‌سوختی است. ضرایب دبی جرمی ورودی و خروجی داده‌هایی تجربی هستند و در تحقیق حاضر از ضرایب به‌دست آمده تحقیق ژو و همکاران [5] استفاده شده است، و به استناد آن ضرایب نتایج قسمت قبل به‌دست آمده‌اند.

برای این‌که قدرت خروجی توده پیل سوختی به حدود یک خودروی معمول (حدود 50 کیلووات) برسد تعدادی از پارامترها از آن جمله جریان اعمال شده، تعداد پیل‌های تشکیل‌دهنده توده، مساحت هر تک پیل و ضرایب دبی جرمی ورودی و خروجی را تغییر داده و پارامترهای جدید به‌دست آمده برای این محدوده قدرت در جدول 2 آورده شده است.

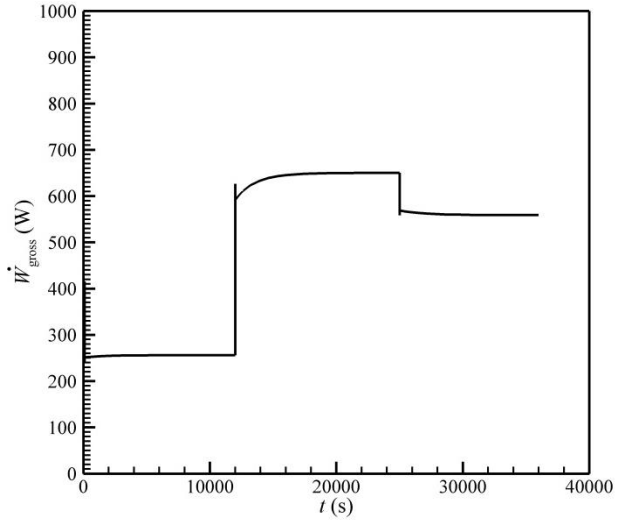

Fig. 12 The curve variation of the output gross power of fuel cell stack

شکل 12 منحنی تغییرات قدرت ناخالص خروجی توده پیل سوختی

جدول 2 پارامترهای جدید استفاده شده در مدل‌سازی توده

Table2 The new parameters using in the stack modeling

پارامتر	مقادیر قبل	مقادیر جدید
N	35	215
$A(\mathrm{cm}^2)$	150	1000
$k_{\mathrm{up,an}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.0000036	36
$k_{\mathrm{down,an}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.00022	0.22
$k_{\mathrm{up,ca}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.00036	3.6
$k_{\mathrm{down,ca}}(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{satm}})$	0.0022	2.2

"شکل 13" جریان اعمال شده جدید به سیستم را نشان می‌دهد که با استفاده از این منحنی جریان و داده‌های جدید ارائه شده در جدول 2 منحنی تغییرات کمیت‌های مختلف توده به‌دست آورده شده است.

مطابق "شکل 14" بیشینه قدرت ناخالص خروجی توده تقریباً 50 کیلووات است. در این حالت منحنی تغییرات دمای بدنه پیل سوختی برحسب

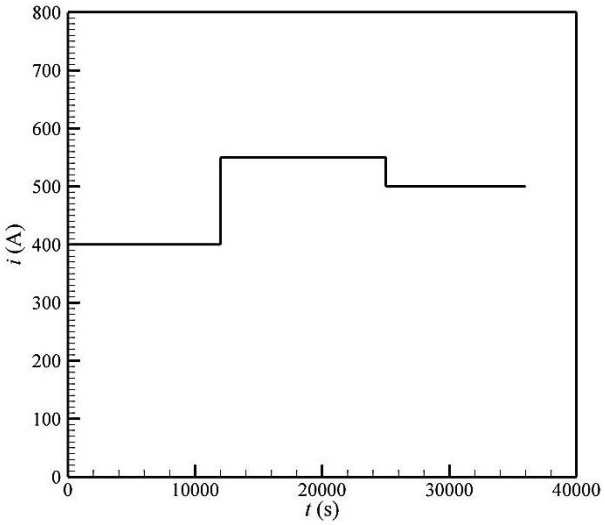

Fig. 13 The new current imposed to the fuel cell system for 50 kW power generations

شکل 13 جریان جدید اعمال شده به سیستم پیل سوختی برای تولید قدرت حدود 50 کیلووات

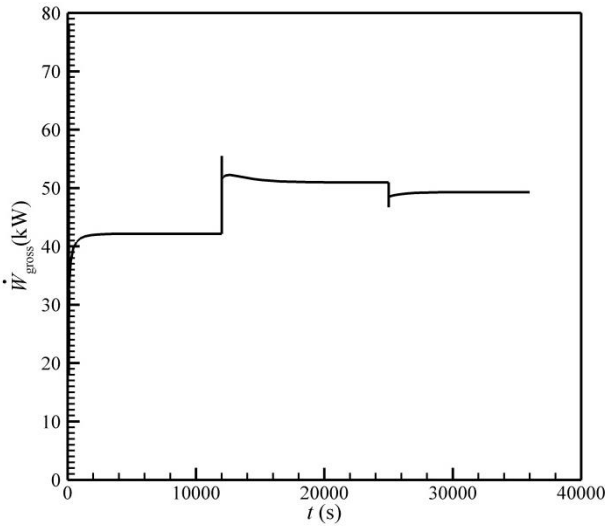

Fig. 14 The curve variation of gross power output of fuel cell stack with new data

شکل 14 منحنی تغییرات قدرت ناخالص خروجی توده پیل سوختی با داده‌های جدید

زمان با اساس داده‌های جدید در "شکل 15" ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بدلیل افزایش توان سیستم و به تبع آن افزایش حرارت اتلافی بر خلاف حالت قبل، دمای بدنه پیل سوختی به‌شدت افزایش یافته و از محدوده دمای کاری پیل سوختی (353 کلوین) بالاتر می‌رود که این مسأله ضرورت استفاده از سیستم خنک کننده در سیستم خودروی پیل سوختی را ایجاب می‌کند.

4-2- بررسی نتایج با گازهای ورودی مرطوب

همان‌طور که اشاره شد رسانایی یونی غشاء بشدت وابسته به رطوبت آن است لذا با مرطوب‌سازی غشاء مقاومت اهمی آن کاهش یافته و در نتیجه قدرت تولیدی پیل سوختی افزایش می‌یابد. در پیل سوختی پلیمری درگ الکترو اسموتیک ناشی از میدان الکتریکی، پروتون‌ها را از آند به‌طرف کاتد انتقال داده و به تبع آن مولکول‌های آب به همراه یون‌های هیدروژن از سمت آند به سمت کاتد انتقال می‌یابند، انتقال آب از سمت آند به‌طرف کاتد با کمبود

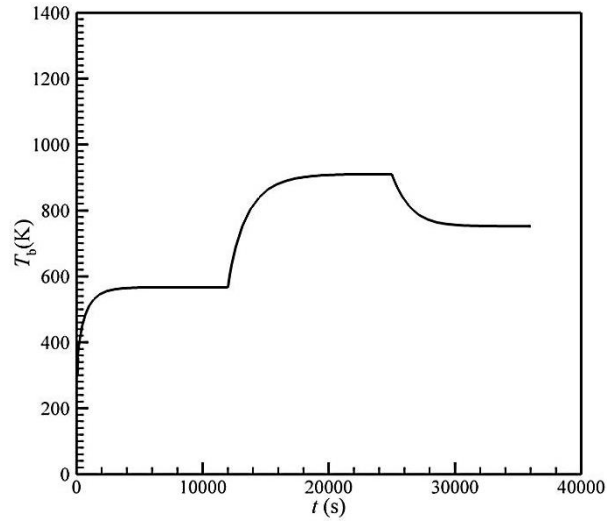

Fig. 15 The variation curve of fuel cell body temperature for 50 kW power generations

شکل 15 منحنی تغییرات دمای بدنه پیل سوختی برای تولید قدرت 50 کیلووات

رطوبت غشاء در سمت آند مواجه شده و مقاومت اهمی افزایش می‌یابد از این رو هوا و هیدروژن ورودی به کانال‌های کاتد و آند رطوبت‌زنی می‌شوند. در اینجا تاثیر رطوبت‌زنی واکنش‌گران بر عملکرد دینامیکی توده پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج قسمت اول که براساس نتایج مرجع [5] به‌دست آمده بود مقایسه می‌شود.

در "شکل‌های 16 و 17 و 18" به ترتیب منحنی‌های تغییرات دمای هوا و هیدروژن مرطوب در کانال‌های آند، کاتد و بدنه (سطح خارجی) پیل سوختی برای دوحالت گاز ورودی خشک و اشباع (رطوبت نسبی 100%) ترسیم شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با مرطوب‌سازی واکنشگرها ورودی، دمای گازها در کانال‌ها و همچنین دمای بدنه توده پیل سوختی کاهش می‌یابند زیرا با افزایش رطوبت غشا، مقاومت اهمی غشا کاهش یافته و به تبع آن اتلافات حرارتی کاهش می‌یابد، لذا کاهش اتلافات حرارتی غشا عامل اصلی کاهش درجه حرارت در این سه حجم کنترل می‌باشد. تغییرات کمتر دمای هوا در کانال کاتد نسبت به هیدروژن در کانال آند به‌دلیل بالاتر

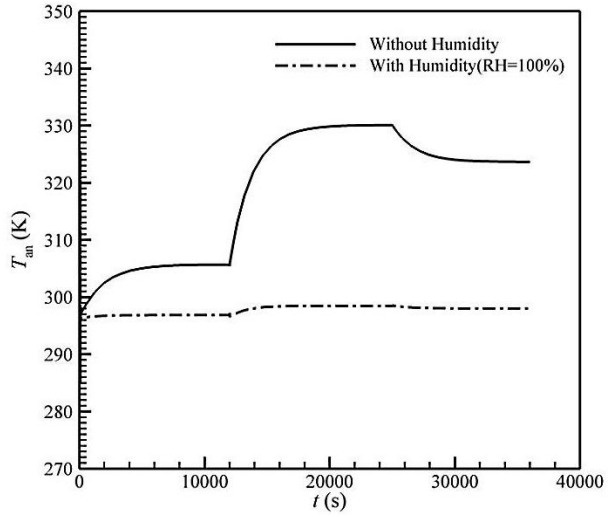

Fig. 16 The variation curve of the Anode channel temperature with and without humidification of inlet gas

شکل 16 منحنی تغییرات دمای کانال آند با رطوبت‌زنی گازهای ورودی و بدون آن

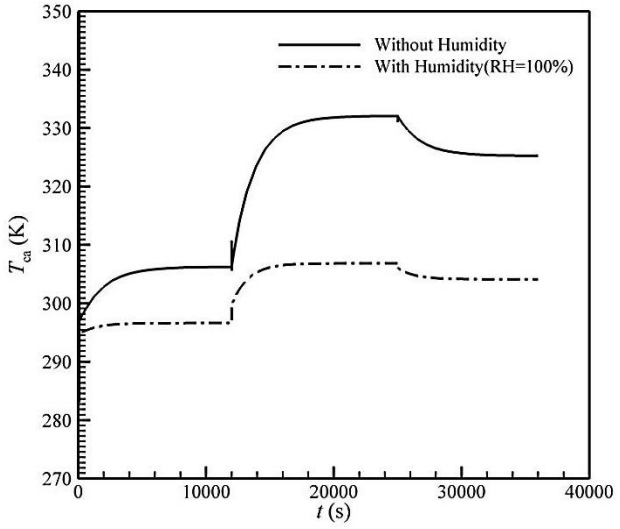

Fig. 17 the variation curve of the cathode channel temperature with and without humidification of inlet gas

شکل 17 منحنی تغییرات دمای کانال کاتد با رطوبت‌زنی گازهای ورودی و بدون آن

بودن ضریب استوکیومتریک هوا در کانال کاتد نسبت به کانال آند است.

در "شکل 19" منحنی تغییرات دمای بدنه پیل سوختی با تغییر رطوبت نسبی گازهای ورودی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش رطوبت نسبی گازهای ورودی مقاومت غشا کمتر شده و به تبع آن اتلافات اهمی کاهش یافته و حرارت کمتری تولید می‌شود که این باعث کاهش بیشتر دمای بدنه توده پیل سوختی می‌شود.

در "شکل 20" منحنی تغییرات افت ولتاژ اهمی برحسب زمان در دو حالت گازهای ورودی اشباع و خشک نشان داده شده است. افزایش رطوبت نسبی گازهای ورودی باعث افزایش رسانایی یونی غشای پلیمری شده و به تبع آن مقاومت اهمی کاهش می‌یابد.

همان‌طور که ملاحظه شد با افزایش رطوبت نسبی افت اهمی کمتر شده و انتظار می‌رود که با کاهش مقاومت اهمی، ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی افزایش یابد. "شکل 21" صحت این مطلب را نشان می‌دهد. مطابق

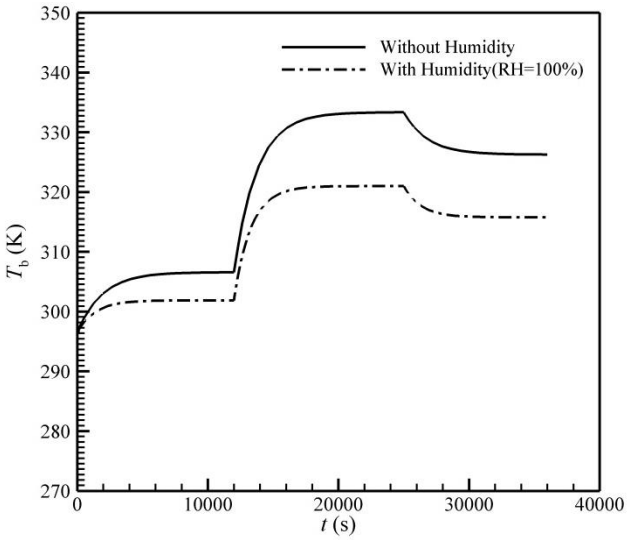

Fig. 18 The variation curve of fuel cell body temperature with and without humidification of inlet gas

شکل 18 منحنی تغییرات دمای بدنه پیل سوختی با رطوبت‌زنی گازهای ورودی و بدون آن

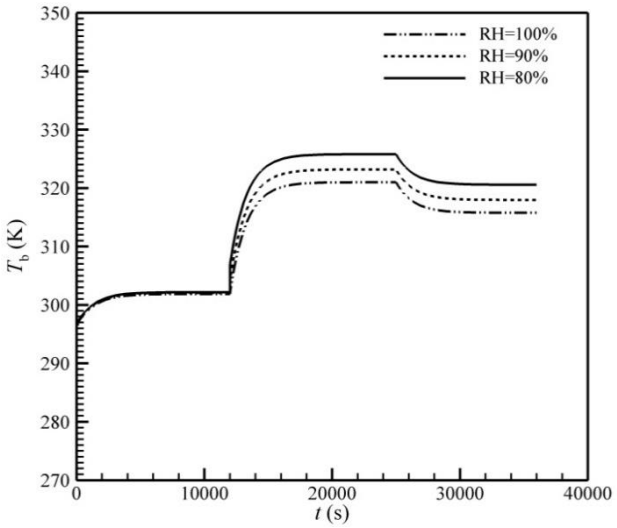

Fig. 19 The variation curve of fuel cell body temperature at different relative humidifies

شکل 19 منحنی تغییرات دمای بدنه پیل سوختی در رطوبت های نسبی مختلف

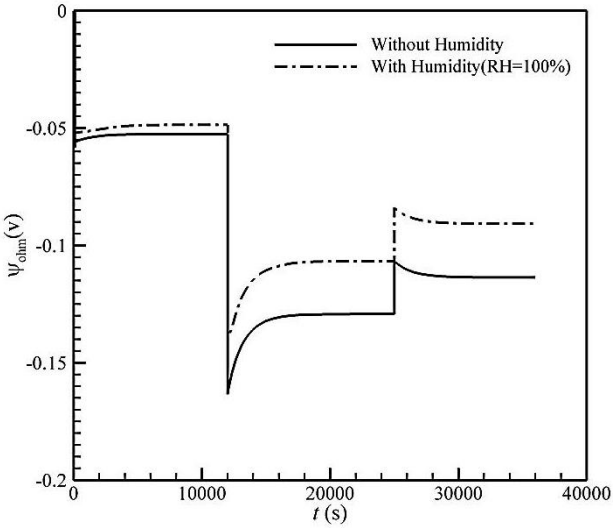

Fig. 20 The effect of humidification on the variation of ohmic voltage

شکل 20 تأثیر رطوبت زنی بر تغییرات ولتاژ اهمی

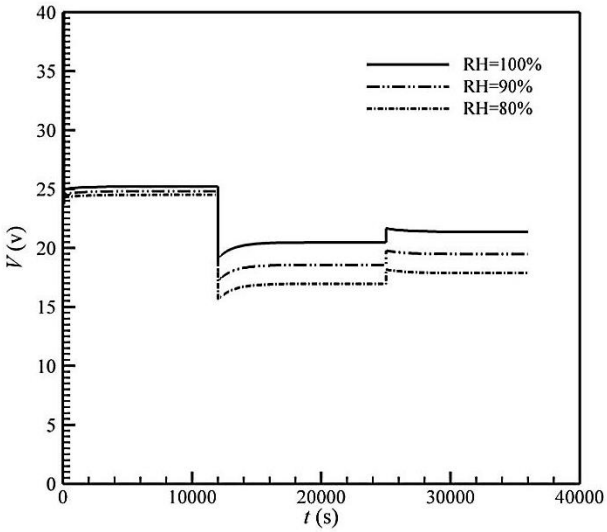

Fig. 21 The variation curve of the output voltage fuel cell stack in different relative humidity

شکل 21 منحنی تغییرات ولتاژ خروجی توده پیل سوختی در رطوبت نسبی‌های متفاوت

این شکل هرچقدر رطوبت نسبی گازهای ورودی بیشتر شود ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی افزایش می‌یابد و این ضرورت وجود رطوبت‌زن در سیستم پیل سوختی پلیمری را نشان می‌دهد.

5- نتیجه گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر مدل‌سازی دینامیکی پیل سوختی در دو حالت گازهای ورودی خشک و مرطوب انجام شده است. در بخش اول گازهای ورودی به کانال‌ها خشک و در بخش دوم گازهای ورودی رطوبت‌زنی شدند. نتایج به‌دست آمده از بخش اول نشان می‌دهد که در مدل‌سازی دینامیکی پاسخ سیستم به تغییرات اعمال شده با تأخیر زمانی همراه است و این تاخیر در پاسخ‌ها، تفاوت میان مدل‌سازی دینامیکی و استاتیکی را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات دما در سه حجم کنترل روند مشابهی دارند اما با یکدیگر تفاوت دارند که این تفاوت ضرورت تقسیم پیل سوختی به سه حجم کنترل را

بخصوص در قدرت بالا تأیید می‌کند. در قدرت های کم، دماها تفاوت اندکی دارند و به همین دلیل در بعضی از مقالات این سه دما برابر فرض می‌شوند. بررسی فشار در کانال‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جریان الکتریکی نرخ مصرف هیدروژن و اکسیژن در کانال‌های آند و کاتد افزایش یافته و این منجر به افت فشار بیشتر می‌شود و با کاهش جریان الکتریکی افت فشار در کانال‌ها کاهش می‌یابد. قدرت خروجی سیستم مدل شده براساس داده‌های مرجع [5] کمتر از قدرت موردنیاز سیستم‌های به کار رفته در خودروهای پیل‌سوختی معمول است لذا ضرایب دبی جرمی ورودی و خروجی و همچنین اندازه و تعداد پیل‌ها را (مطابق جدول 2) برای به‌دست آوردن قدرتی در حد مطلوب افزایش داده‌ایم.

در بخش دوم تأثیر رطوبت زنی گازهای ورودی به کانال‌ها را بر عملکرد توده پیل سوختی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که با وجود اینکه اضافه شدن رطوبت به گازهای ورودی به پیل سوختی باعث کاهش فشارهای جزئی گازهای واکنشگر هیدروژن و اکسیژن و در نتیجه کاهش ولتاژ ترمودینامیکی پیل می‌شود، ولی رطوبت زنی گازهای ورودی برای جلوگیری از خشک شدن غشا و کاهش مقاومت اهمی ضروری است که این منجر به کاهش درجه حرارت در سه حجم کنترل و افزایش ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌شود.

6- مراجع

[1] J. E. Micklethwait, *Roads to Somewhere*, The Economist, June 24th-30th, pp. 36-37, 2006.
[2] M. Ehsani,Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, *Modern Electric Hybrid Electric and Fuell Cell Vehicles Fundamentals: Theory and Design* pp. 347-357, Florida, CRC Press, 2005.
[3] J. Wishart, *Modeling Simulation Testing and Optimization of Advanced Hybrid Vehicles Powertrains*, Phd Dissertation, University of Victoria, 2008.
[4] H. Hassanzadeh, H. Jafari, Modeling and optimization of fuel cell vehicle driver system with power of 50Kw, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 141-152, 2016. (In Persian فارسی)
[5] X. Xue, J. Tang, A. Smirnova, R. England, Nigel Sammes, System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 133, No. 2, pp. 188-204 , 2004.
[6] P. R. Pathapati, X. Xue, J. Tang, A new dynamic model of predicting transient phenomena in a PEM fuel cell system, *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-22, 2005.
[7] G. Pourabedin, F. Ommi, How a hybrid fuel cell vehicle working in different conditions, *1st National Conference of Hydrogen and fuel cell*, University of Science and Technology Iran, Tehran, 2007. (in Persian فارسی)
[8] T. M. Brown, J. Brouwer, G. S. Samuelsen, F. H. Holcomb, J. King, Dynamic first principles model of a complete reversible fuel cell system, *Journal of Power Sources*, Vol. 139, No. 1, pp. 152-164, 2008.
[9] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, Dynamic behavior of hydrogen fuel cells for automotive application, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 8, pp. 1955-1961, August, 2009.
[10] M. Gholizadeh, M. Ghazikhani, I. Khazaee, Experimental investigation of electro-osmotic flow in effect of current and humidity of inlet gases intothe single PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 105-111, 2016. (in Persian فارسی)
[11] F. Tiss, R. Chouikh, A. Guizani, Dynamic modeling of a PEM fuel cell with temperature effects, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 20, pp. 8532-8541, 2013.
[12] D. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 2nd Ed, pp. 285-345, New Jersey, Prentice Hall, 1989.
[13] S. Dutta, S. Shimplalee, J. W. Van Zee, Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 11, pp. 2029-2042, 2001.
[14] J. T. Purkushpan, A. G. Stefanopoulou, H. Peng, *Control of Fuel Cell Power System: Priciples, Modeling, Analysis and Feedback Design*, pp. 57-65, New York, Springer, 2004.