



## Experimental Investigation of Integrated Power System of Dead-End Proton Exchange Membrane Fuel Cell H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Stack with Large Active Area and Internal Humidifier

M. Khorshidian, S. M. Rahgoshay\*, M. Rahimi, S. H. M. Saadat

Fuel Cell Technology Research Laboratory, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran.

### Review History:

Received: Oct. 02, 2019

Revised: Jan. 01, 2020

Accepted: Jan. 26, 2020

Available Online: Feb. 08, 2020

### Keywords:

Proton exchange membrane fuel cell

Dead-end performance

Purge time

Efficiency

Unified humidifier

Water accumulation

**ABSTRACT:** Proton exchange membrane fuel cells with a dead-ended anode and cathode can obtain high hydrogen and oxygen utilization by a comparatively simple system. Accumulation of the water in the anode and cathode channels can lead to local fuel starvation, which degrades the performance of fuel cell. In this paper, for the first time, a new design for proton exchange membrane fuel-cell stack is presented that can achieve higher fuel utilization without using fuel recirculation devices that consume parasitic power. Unified humidifier is another novelty that is applied for the first time. The basic concept of the design is to divide the anodic cells of a stack into two blocks by conducting the outlet gas of each stage to a separator and reentering to next stage, thereby constructing a multistage anode and cathode. In this design, higher gaseous flow rate is maintained at the outlet of the cells, even under dead-end conditions, and this results in a reduction of purge-gas emissions by hindering the accumulation of liquid water in the cells. The result shows that with this new design the dead-end mode has the same performance as open-end mode. All performance tests were carried out at an integrated power system.

### 1. Introduction

Today, fuel cells have attracted much attention for their high performance, low temperature and fast start-up. Fuel cells are clean energy converters that convert energy stored in hydrogen and oxygen into electricity.

In some Proton Exchange Membrane Fuel Cells, (PEMFC) hydrogen is used as fuel and unused hydrogen is discharged into the environment along with other inert gases. To maximize efficiency and safety, it is essential to minimize the amount of hydrogen discharged into the environment.

The ratio of the amount of hydrogen consumed to the input hydrogen to the fuel cell is called the fuel consumption percentage. At the dead-end fuel cells, the fuel consumption percentage is approximately 100%, meaning that almost all hydrogen and oxygen input to the fuel cell participate in the electrochemical reaction. However, at the dead-end mode, it is possible that there will be fuel starvation at the end of the fuel cell, resulting in a decrease in voltage and cell performance [1-3]. The accumulation of water at the bottom of the anode and cathode channels is a major cause of local fuel starvation [3,4].

Hou et al. [5] experimentally investigated the dynamic parameters affecting hydrogen consumption under different electric load conditions and different purge parameters in a fuel cell developed by their group.

Chen et al. [6] analytically and empirically analyzed the anode side purge strategy based on the accumulation of nitrogen in a single fuel cell.

In this paper, a 5 kW PEMFC stack is designed, fabricated and assembled. Both the anode and cathode sides are dead-end and the performance of the flow-through and dead-end modes are compared.

### 2. Methodology

The anode and cathode cells are divided into two distinct stages, and with the idea that although the whole stack operates at the dead-end state, more than 87% of the cells have stoichiometry above 1 and are actually work in flow-through mode and only 13% of the cells have stoichiometry equal to 1. Internal manifolds have been used to distribute the reactants to the cells, reducing the volume of the system dramatically. Voltage fluctuations have been investigated when the anode, cathode, or both sides are in dead-end mode.

Fig. 1 shows schematic diagram of designed fuel cell stack with the stages of anode and cathode. The total number of cells in the stack is 16, with 13 cells in the first stage and 3 cells in the second stage. From left to right, the first to third cells are in the second stage of oxygen, and the fourth to sixteenth cells are in the first stage of oxygen. For hydrogen, the first to thirteenth cells are in the first stage and the fourteenth to sixteenth cells are in the second stage. The stoichiometry of the first stage is approximately 1.23, and the stoichiometry of the second stage is approximately 1.

After the activation process, the polarization curve and purge experiments were performed. These experiments were performed in an integrated power system as shown in Fig. 2.

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



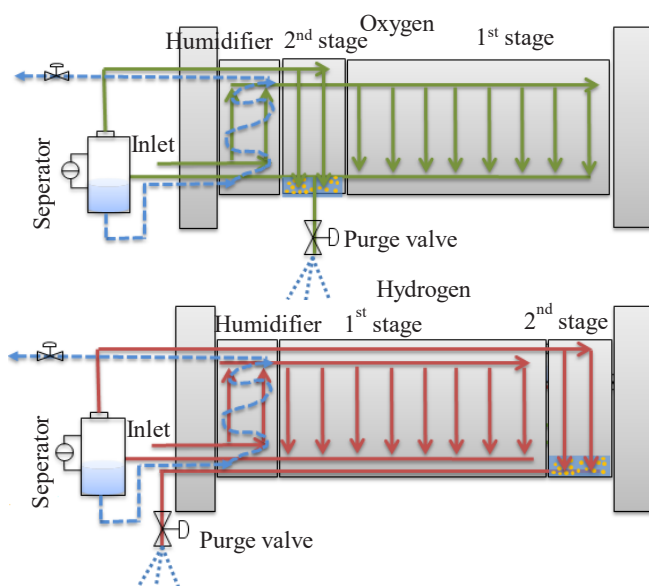


Fig. 1. Schematic diagram of designed fuel cell stack



Fig. 2. Integrated power system for dead-end tests

### 3. Results and Discussion

Fig. 3 shows the polarization curve of the stack. The average power and voltage of each cell are also shown. The results show that by using integrated design and segmented stack, the fuel cell has been able to achieve the design objectives without reaching the limiting voltage range.

Fig. 4 shows the changes in efficiency, voltage and power density in terms of current density. The figure shows that by using this scheme, an efficiency of over 50% at a power density of 1000 mA/cm<sup>2</sup> can be achieved.

### 4. Conclusion

In this paper, a stack of dead-end PEMFC with integrated humidifier and segmented design was tested after design, fabrication and assembly. All experiments were performed on a domestic testbench. After activation of MEA, fuel cell stack

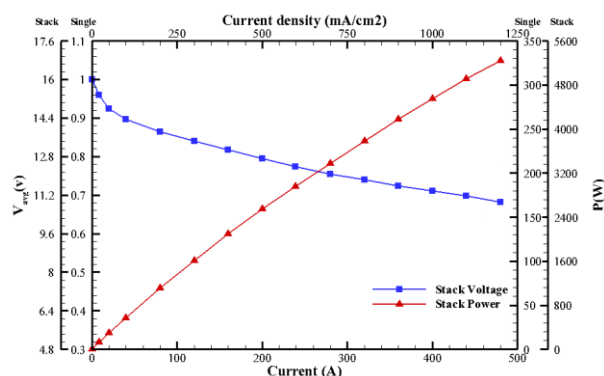


Fig. 3. Stack power and voltage curves

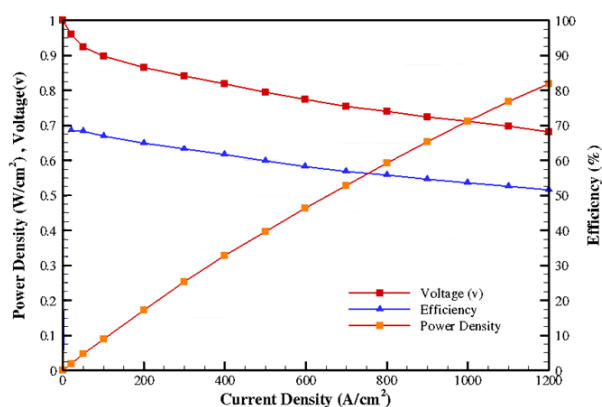


Fig. 4. Changes in efficiency, power density and voltage in terms of current density

subjected to a variety of polarization and purge experiments. The results show that the cathode-side purge cells are highly sensitive to the purge conditions and there are severe voltage fluctuations. This indicates that the purge procedure should be different at the anode and cathode side and that the voltage-based method should be used for purge. The effect of voltage loss on cell performance was also investigated. The results show that by using the present scheme, an efficiency of over 50% can be achieved which is significant compared to other sources of power generation.

### References

- [1] W.R. Baumgartner, P. Parz, S. Fraser, E. Wallnöfer, V. Hacker, Polarization study of a PEMFC with four reference electrodes at hydrogen starvation conditions, *Journal of Power Sources*, 182(2) (2008) 413-421.
- [2] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation, *Journal of Power Sources*, 194(1) (2009) 130-145.
- [3] S. Zhang, X. Yuan, H. Wang, W. Mérida, H. Zhu, J. Shen, S. Wu, J. Zhang, A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, *International journal of hydrogen energy*, 34(1) (2009) 388-404.

- [4] D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, B. Yi, Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation, *Journal of Power Sources*, 194(2) (2009) 847-853.
- [5] Y. Hou, C. Shen, D. Hao, Y. Liu, H. Wang, A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation, *Renewable energy*, 62 (2014) 672-678.
- [6] Y.-S. Chen, C.-W. Yang, J.-Y. Lee, Implementation and evaluation for anode purging of a fuel cell based on nitrogen concentration, *Applied energy*, 113 (2014) 1519-1524.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

M. Khorshidian, S. M. Rahgoshay, M. Rahimi, S. H. M. Saadat, *Experimental Investigation of Integrated Power System of Dead-End Proton Exchange Membrane Fuel Cell H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Stack with Large Active Area and Internal Humidifier*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 399-402.

DOI: [10.22060/mej.2020.17133.6517](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17133.6517)







## بررسی تجربی عملکرد یک سیستم توان یکپارچه سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته هیدروژن-اکسیژن با سطح فعال بزرگ و سیستم رطوبت زن داخلی

مجید خورشیدیان<sup>۱</sup>، سید مجید رهگشای<sup>۲\*</sup>، مظاهر رحیمی اسبویی<sup>۱</sup>، سید حسین مسروری سعادت<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

۲- آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری پیل سوختی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

### کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری

عملکرد انتها بسته

زمان تخلیه

کارایی

رطوبت زن یکپارچه

تجمع آب

**خلاصه:** پیل‌های سوختی پلیمری با آند و کاتد انتها بسته می‌توانند با سیستمی نسبتاً ساده درصد مصرف سوخت‌های اکسیژن و هیدروژن را افزایش دهند. با این وجود، تجمع آب در بخش انتهایی کانال‌های آند و کاتد موجب قحطی سوخت موضعی و در نتیجه کاهش عملکرد پیل سوختی می‌شود. در این مقاله، برای اولین بار یک طرح جدید برای سری پیل سوختی ارائه شده است که بدون استفاده از دستگاه‌های گردش مجدد سوخت که نیازمند صرف توان اضافی هستند، می‌تواند درصد مصرف سوخت را افزایش دهد. ایده اصلی طرح ارائه شده تقسیم سری به دو مرحله مجزا است: گاز خروجی از مرحله اول بعد از ورود به جداساز به مرحله بعدی وارد می‌شود. گازهای واکنشگر قبل از ورود به سلول‌ها از یک رطوبت زن یکپارچه با سری عبور کرده و رطوبت مورد نیاز برای عملکرد مناسب را کسب می‌کنند. در طرح ارائه شده اگرچه پیل سوختی در حالت انتها بسته کار می‌کند اما با توجه به مرحله‌ای بودن سری، بیشتر سلول‌ها در استوکیومتری بزرگتر از ۱ کار می‌کنند. با این طراحی نیاز به تخلیه کمتری برای دفع آب تجمع یافته است. به عبارتی دیگر، کارایی طرح انتها بسته معادل طرح انتها باز خواهد شد. تمامی آزمون‌های عملکردی در یک سیستم قدرت یکپارچه با پیل سوختی انجام شده است.

### ۱- مقدمه

است؛ بدین معنا که تقریباً تمامی هیدروژن یا اکسیژن ورودی به پیل سوختی در واکنش الکتروشیمیایی شرکت می‌کنند. با این حال در حالت انتها بسته احتمال دارد در قسمت‌های انتهایی پیل سوختی با قحطی سوخت مواجه شویم که نتیجه آن کاهش ولتاژ و عملکرد سلول می‌باشد [۴-۶]. تجمع آب در قسمت انتهایی کانال‌های آند و کاتد عامل اصلی قحطی سوخت است [۶ و ۷].

امروزه پیل‌های سوختی به دلیل داشتن کارایی بالا، دمای پایین و شروع به کار سریع توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. پیل‌های سوختی از مبدل‌های انرژی پاک هستند که انرژی ذخیره شده در هیدروژن و اکسیژن را به الکتریسیته تبدیل می‌نمایند. آن‌ها همچنین به علت دارا بودن چگالی توان بالا، شروع به کار سریع و آلودگی کم به عنوان جایگزین اصلی برای تولید توان اتومبیل‌ها، ایستگاه‌های توان ثابت و زیردریایی‌ها در نظر گرفته می‌شوند [۱-۳].

به حالتی که هیدروژن و اکسیژن دقیقاً به اندازه مصرف وارد پیل سوختی گردند، حالت انتها بسته می‌گویند که شکل ۱(الف) نمایش داده شده است. اگر گازهای واکنش دهنده در فشار بیشتری همانند مخزن فشار بالا در شکل ۱ دسترس باشند، حالت انتها بسته به هیچ کنترلی نیاز نداشته و مقدار تأمین و مصرف برابر خواهند بود. در صورت اتلاف هیدروژن و اکسیژن به دلیل نفوذ و یا جریان‌های داخلی، دبی جرمی ورودی به اندازه کمی بیش از مصرف خواهد بود. در حالت دیگر، ممکن است هیدروژن و اکسیژن به مقدار زیاد وارد پیل سوختی گردند که به آن حالت انتها باز می‌گویند (شکل ۱(ب)).

در بعضی از پیل‌های سوختی پلیمری، هیدروژن به عنوان سوخت استفاده می‌شود و هیدروژن مصرف نشده به همراه گازهای بی‌اثر دیگر به محیط تخلیه می‌شود. برای بالابردن کارایی و ایمنی لازم است تا حداقل هیدروژن ممکن به محیط تخلیه شود.

نسبت مقدار هیدروژن مصرف شده به هیدروژن ورودی به پیل سوختی درصد مصرف سوخت نامیده می‌شود. در پیل‌های سوختی پلیمری انتها بسته درصد مصرف سوخت تقریباً برابر با ۱۰۰ درصد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rahgoshay@mut.ac.ir



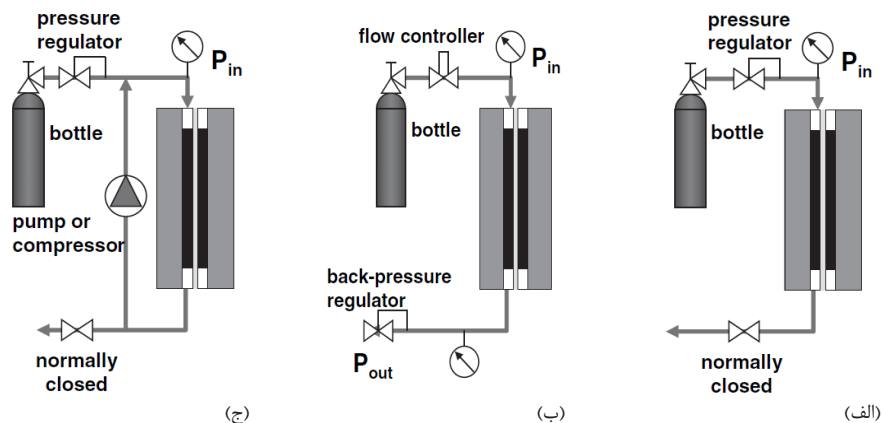


Fig. 1. Different modes of consuming reactant gases. (a) Dead-end mode, (b) Flow-through mode, (c) Recirculation mode

شکل ۱: حالت‌های مختلف مصرف گازهای واکنش‌دهنده. (الف) حالت انتها بسته، (ب) حالت انتها باز و (ج) حالت برگشت مجدد

هوانگ [۱۲] تأثیر روش‌های تغذیه مختلف هیدروژن به سلول را بر کارایی سیستم پیل سوختی بررسی کرد. وی کارایی الکتروشیمیایی پیل را در حالت انتها باز با استفاده از نرم‌افزار تجاری مرجع در حالت‌های مختلف تغذیه هیدروژن محاسبه کردند. همچنین از سیستم آزمایش بومی و استراتژی کنترل هوشمند برای آزمایش کارایی پیل سوختی در حالت‌های انتها بسته و انتها باز استفاده کردند. در ادامه گزارش کردند که اندازه‌گیری گذرای جریان سیال و خصوصیات الکتروشیمیایی به هنگام تخلیه، ولتاژ سلول را در حالت انتها بسته جریان ثابت پایدار نگه می‌دارد. در نهایت گزارش کردند که برای توان‌های کمتر از ۱ کیلووات، هر دو حالت انتها بسته و گردش مجدد بازدهی مشابه دارند.

پارک و چو [۱۳] یک مدل دینامیکی وابسته به دمای دوفازی را در یک سری ۲۰ سلولی پیل سوختی گسترش دادند. آن‌ها گزارش کردند اختلاف پتانسیل بین حالت‌های تک‌فاز و دوفاز تحت تأثیر شدید افت فعال‌سازی است. همچنین بیان کردند اختلاف ولتاژ بین سلول‌های ۱ و ۲ ناشی از گرادیان دما و افت اهمی است. آن‌ها رویه‌های مختلف فعال‌سازی را در این پیل سوختی بررسی کردند. بنابر گزارش ارائه شده، چگالی جریان بالاتر و نرخ سیال خنک‌کاری بیشتر زمان گرمایش اولیه را افزایش می‌دهد، درحالی‌که دمای اولیه صفحات انتهایی تأثیر مهمی بر آن ندارد. آن‌ها اختلاف ولتاژ بین سلول‌های مختلف را با افزایش دمای سیال خنک‌کاری به حداقل رساندند.

هان و همکاران [۱۴] طرح جدیدی را برای افزایش بهره‌وری سوخت در یک سری پیل سوختی ۱۵ کیلووات هیدروژن- هوا ارائه دادند. آن‌ها از طرح منی‌فولد خارجی برای تغذیه واکنشگرها استفاده

اگر حجم آب در کاتد زیاد شود مقداری از آب از سمت کاتد در اثر پدیده نفوذ معکوس به سمت آن‌د انتقال می‌یابد. این پدیده به غرقابگی معروف است [۸]. هو و همکاران [۹] پارامترهای دینامیکی مؤثر بر مصرف هیدروژن را در شرایط بار الکتریکی مختلف و پارامترهای تخلیه مختلف در یک پیل سوختی توسعه داده شده توسط گروه خودشان را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل دینامیکی برای مصرف هیدروژن ارائه کردند که اثر تخلیه هیدروژن را در نظر می‌گیرد و سپس نتایج به دست آمده از مدل را با نتایج آزمایش تجربی در چندین حالت عملیاتی مختلف اعتبارسنجی کردند.

چن و همکاران [۱۰] استراتژی تخلیه سمت آن‌د را بر اساس تجمع نیتروژن در یک تک سلول پیل سوختی به صورت تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند دوره زمانی برای باز کردن خروجی سلول در حالت انتها بسته با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که ولتاژ پیش‌بینی شده با مدل کالیبره شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی در شرایط جریان ثابت دارد.

بلودر و همکاران [۱۱] پدیده غرقابگی در یک پیل سوختی را با توجه به کاهش عملکرد بررسی کردند. آن‌ها فرایند تخلیه در سمت آن‌د و زمان تخلیه برای رسیدن ولتاژ سلول به سطح ولتاژ اولیه را تحلیل کردند. در ادامه فرایند تخلیه را در ۵ نقطه توانی مختلف بررسی کردند. همچنین یک منطق برنامه‌نویسی تخلیه جدید را بر اساس متغیرهای مؤثر بر غرقابگی آزمایش کردند. در نهایت گزارش کردند با استفاده از این منطق جدید کارایی سلول به شدت افزایش می‌یابد.



به کمک شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی مطابقت داده شد و مشخص شد که خطای میانگین مربعات ریشه از ۳ درصد تجاوز نمی‌کند. مدل شبکه عصبی پیشنهادی می‌تواند به عنوان راهنما برای طراحی کنترل کننده و تشخیص عیب سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته که از اکسیژن و هیدروژن خالص استفاده می‌کند، به کار رود.

در این مقاله یک سری ۵ کیلووات طراحی، مونتاژ و ساخته شد. هر دو سمت آند و کاتد در حالت انتها بسته قرار دارند و عملکرد حالت‌های انتها باز و انتها بسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سلول‌های آندی و کاتدی به دو بخش مجزا تقسیم شده و با این ایده اگرچه کل سری در حالت انتها بسته کار می‌کند، بیش از ۸۷ درصد از سلول‌ها استوکیومتری بالاتر از ۱ داشته و در واقع انتها باز هستند و فقط ۱۳ درصد از سلول‌ها استوکیومتری برابر با ۱ دارند. از منیفولدهای داخلی برای توزیع واکنشگرها به سلول‌ها استفاده شده است و با این کار حجم سیستم به شدت کاهش یافته است. نوسانات ولتاژ در هنگام انتها بسته بودن آند، کاتد و یا هر دو سمت با هم بررسی شده است.

## ۲- طراحی جدید سری

شکل ۲ طرح شماتیک مورد استفاده برای سری پیل سوختی مورد نظر است که شامل هیچگونه دستگاه اضافه‌ای برای گردش مجدد اکسیژن و هیدروژن در مدار نیست. برای جداسازی آب از مخلوط گاز و آب خروجی از هر مرحله از جداساز استفاده شده است. پیل سوختی ۵ کیلووات ساخته شده به همراه دستگاه آزمایش بومی و حسگرهای ثبت ولتاژ در شکل ۳ نشان داده شده است. تعداد کل سلول‌های سری ۱۶ عدد می‌باشد که ۱۳ سلول در مرحله اول و ۳ سلول در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. از سمت چپ به راست به ترتیب سلول‌های اول تا سوم در مرحله دوم اکسیژن و سلول‌های چهارم تا شانزدهم در مرحله اول اکسیژن قرار می‌گیرند. برای هیدروژن سلول‌های اول تا سیزدهم در مرحله اول و سلول‌های چهاردهم تا شانزدهم در مرحله دوم قرار گرفته‌اند. استوکیومتری مرحله اول برابر ۱/۲۳ و استوکیومتری مرحله دوم تقریباً ۱ می‌باشد.

## ۳- فعال‌سازی غشاء

فرایند آمادگی غشاء همواره برای فعال‌سازی پیل‌های سوختی غشاء پلیمری تازه‌ساخت احتیاج است. این فرایند رام کردن نیز نامیده

کردند و با مجزا کردن سری به چند قسمت مجزا استوکیومتری سوخت را در اکثر سلول‌ها بالا نگه داشتند. هان و همکاران [۱۵] اخیراً نیز یک سری پیل سوختی هیدروژن-اکسیژن را برای کاربری زبردیا طراحی و آزمایش کردند. ویژگی‌های طرح جدید این گروه همانند مقاله قبلی بود و فقط به علت کاربری زیر سطحی به جای هوا از اکسیژن استفاده کردند.

تخلیه یک روش مؤثر در حذف آب اضافی از الکتروود و افزایش مصرف اکسیژن و هیدروژن است [۱۶]. چن و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ به بررسی عملکرد پیل سوختی و ویژگی‌های بازیابی پارامترهای مرتبط با آن در حین فرایند تخلیه در پیل سوختی با آند انتها بسته در شرایط عملکردی مختلف پرداختند. نتایج نشان داد عملکرد پیل سوختی در طی مدت زمان تخلیه به سرعت کاهش می‌یابد و پس از آن در ابتدا بلافاصله افزایش یافته و سپس به تدریج، چند ثانیه پس از تخلیه، به سطح اصلی خود می‌رسد. با این وجود، در نهایت عملکرد پیل سوختی قبل از شروع عملیات تخلیه بعدی تثبیت می‌شود. آن‌ها پیشنهاد کردند که زمان بازیابی عملکرد را می‌توان با افزایش چگالی جریان، رطوبت نسبی کاتد و دمای کاری کاهش داد.

جیان و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۸، روند تخلیه در یک سری پیل سوختی غشای تبادل پروتون با آند انتها بسته را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای پیدا کردن بهترین استراتژی برای دستیابی به ولتاژ با ثبات بالا، فواصل مختلف تخلیه و مدت زمان تخلیه را مورد آزمایش قرار دادند. آزمایش‌ها نشان داد که زمان بازیابی ولتاژ سری بیشتر از زمان کاهش ولتاژ پس از فرایند تخلیه است. در ضمن برای تعیین استراتژی بهینه برای فرایند تخلیه، هیدروژن مورد استفاده و پایداری ولتاژ باید از قواعد معینی تبعیت کنند. آن‌ها فاصله تخلیه و مدت زمان تخلیه را برای نمونه مورد بررسی خود به ترتیب ۱۴/۸۶ ثانیه و ۰/۴۴ ثانیه در نظر گرفتند.

برزگری و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۹ یک مدل پویا از سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته بر اساس روش شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی یک پیل سوختی پلیمری از نوع آبشاری با توان ۴۰۰ وات انجام دادند. تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون‌ها در هر لایه پنهان، عملکردهای انتقال و الگوریتم بهترین موقعیت شناسی شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارائه شده توسط آن‌ها، پس از بهینه‌سازی پارامترهای شبکه عصبی

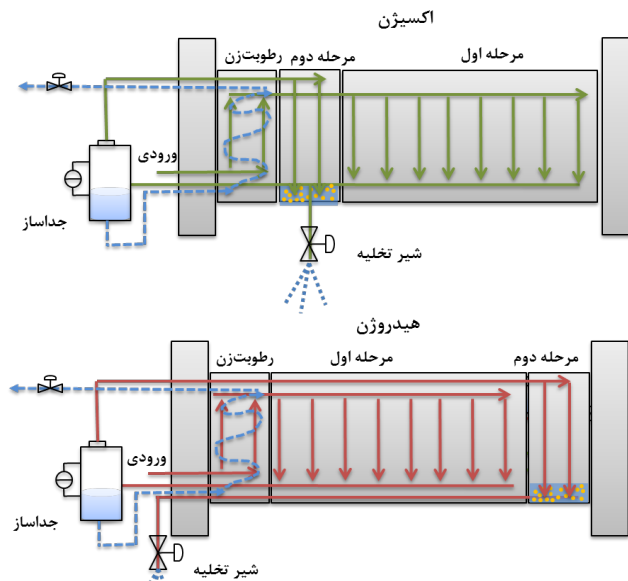


Fig. 2. Schematic diagram of designed fuel cell stack

شکل ۲: طرح شماتیک از سری پیل سوختی طراحی شده

خواهد بود. در این مقاله، غشاء مورد نظر که از شرکت پکسی تک<sup>۱</sup> فرانسه خریداری شده بود، مطابق با شرایط شرکت سازنده فعال‌سازی شد. روند فعال‌سازی به این صورت بود که با تنظیم ولتاژ سلول در مقدار ۰/۶ ولت تغییرات جریان رصد می‌شود و زمانی که تغییرات جریان به صفر میل کرد، عملیات فعال‌سازی کامل است. در جدول ۱ شرایط مربوط به فعال‌سازی شرکت سازنده آمده است.

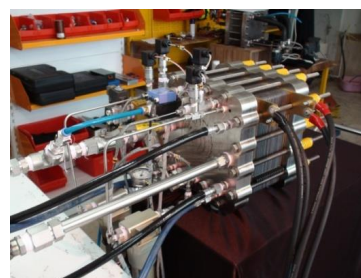
می‌شود که شامل یک دوره رشد نهفته جهت فعال‌سازی و رسیدن به بیشینه کارایی می‌باشد. در طول این دوره فعال‌سازی، کارایی غشاء طبیعتاً به تدریج افزایش می‌یابد تا به نقطه یکنواخت و صاف بدون رشد برسد. بسته به نحوه مونتاژ غشاء الکتروود این فرایند ممکن است از ساعت‌ها تا روزها زمان ببرد. با توجه به مصرف سوخت هیدروژن و افزایش هزینه فرایند، شتاب دادن این فرایند در زمان بهینه با ارزش



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 3. (a) Fabricated testbench, (b) Piping of gases and cooling fluid, (c) Fabricated testbench with fuel cell stack  
شکل ۳: (الف) دستگاه آزمایش ساخته شده (ب) لوله‌های ورودی گازها و سیال خنک‌کاری (ج) دستگاه آزمایش ساخته شده به همراه سری در حال آزمایش



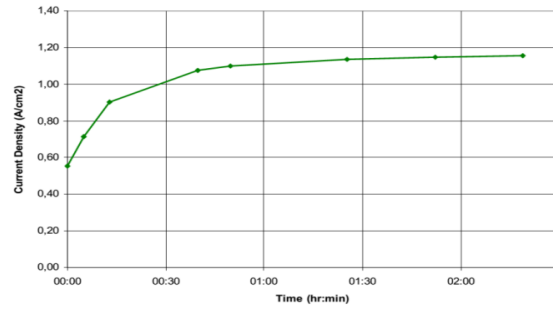
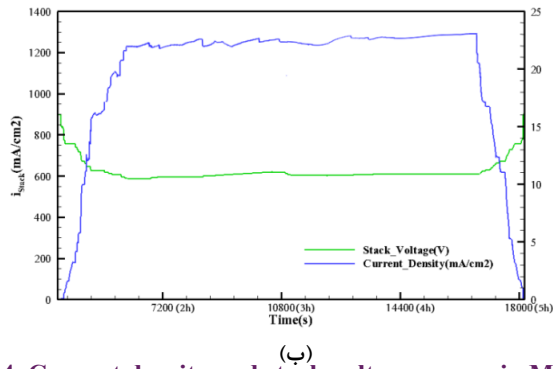


Fig. 4. Current density and stack voltage curves in MEA activation process. a) Manufacturer data, b) Present experiment

شکل ۴: نمودار چگالی جریان و ولتاژ سری در فرایند فعال سازی غشاء (الف) شرکت سازنده (ب) آزمایش حاضر

شانزدهم و سلول‌های تخلیه کاتد شامل سلول‌های اول تا سوم بوده، لذا هیچ سلولی به طور همزمان در حالت آند و کاتد انتها بسته قرار نخواهد گرفت و این امر به شدت در افزایش کارایی مؤثر بوده است. مقایسه‌ی بین نمودارهای قطبیت در حالت‌های انتها باز و انتها بسته در شکل ۶ نشان داده شده است. در تمامی آزمایش‌ها دمای عملکردی در ۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نسبی ۱ بار و انرژی کلمپ ۹/۵ نیوتن در متر می‌باشد. استوکيومتری هیدروژن در حالت انتها باز ۱/۲ و در حالت انتها بسته ۱/۰۰۳ می‌باشد. استوکيومتری اکسیژن در حالت انتها باز ۱/۵ و در حالت انتها بسته ۱/۰۱ می‌باشد. رطوبت ورودی در تمامی حالات برای هیدروژن و اکسیژن بالای ۸۰ درصد می‌باشد. دبی حجمی اکسیژن ۱۸/۲۵ slpm و دبی حجمی هیدروژن ۳۶/۸۷ slpm است. دبی آب تولیدی را می‌توان از روابط استوکيومتری به دست آورد.

در شکل ۷ نمودار قطبیت مربوط به سری نشان داده شده است. همچنین توان و ولتاژ متوسط هر سلول نشان داده شده است. نتایج

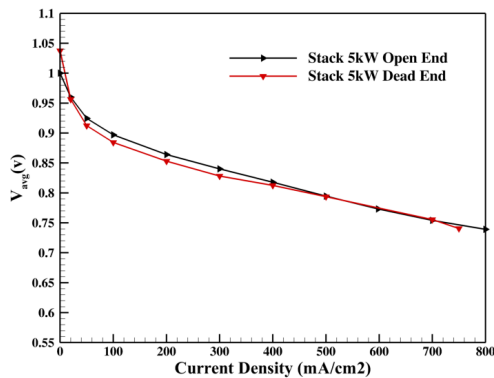


Fig. 6. Comparison of polarization curve for cells average between flow-through and dead-end modes

شکل ۶: مقایسه بین نمودار قطبیت حالت انتها باز و انتها بسته متوسط یک سلول سری



Fig. 5. Integrated power system for dead-end tests

شکل ۵: سیستم یکپارچه قدرت برای آزمایش‌های انتها بسته

جدول ۱: شرایط مربوط به فعال سازی شرکت سازنده غشاء

Table 1. Activation conditions of MEA manufacturer

گاز	دبی (dpm)	استوکيومتری	فشار (bar)	دمای رطوبت‌زنی (°C)
هیدروژن	۳۹	۱/۲	۲	خشک
اکسیژن	۲۴	۱/۵	۲	۵۳

همچنین نمودار فعال سازی مربوط به شرکت سازنده و آزمایش حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار فعال سازی مربوط به شرکت سازنده برای یک سلول تکی پیل سوختی است، اما نمودار مقاله‌ی حاضر مربوط به سری پیل سوختی است. در حالت سری به دلیل توزیع فشار و دمای بهتر چگالی جریان بهتری حاصل می‌شود، به همین دلیل جریان در حالت سری بیشتر از جریان در حالت تک سلول است.

#### ۴- نتایج و بحث‌ها

بعد از انجام فرایند فعال سازی آزمایش‌های مربوط به نمودار قطبیت و آزمایش‌های مربوط به فرایند تخلیه انجام شد. این آزمایش‌ها در یک سیستم یکپارچه قدرت انجام شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه سلول‌های تخلیه آند شامل سلول‌های چهارم تا

تخلیه هیدروژن می‌باشند. همچنین استوکيومتری کل هیدروژن و اکسیژن و استوکيومتری مرحله اول آن‌ها به طور مجزا نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است متوسط ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن به متوسط کل سری بسیار نزدیک بوده ولی در سمت اکسیژن فاصله بیشتری از هم دارند. بر همین اساس پیشنهاد می‌شود از دو رویه مختلف برای تخلیه آب و ناخالصی برای سمت‌های اکسیژن و هیدروژن استفاده شود. همچنین بهتر است برای اکسیژن از رویه بر پایه‌ی تغییرات ولتاژ و در سمت هیدروژن بر پایه‌ی زمان استفاده شود.

شکل ۱۱ نمودار انواع افت‌های ولتاژ را در سری نشان می‌دهد. این افت‌ها از طریق برازش منحنی (رابطه‌ی الکتروشیمیایی نرنست [۱۹]) در نرم‌افزار متلب به دست آمده است. بیشترین افت ولتاژ مربوط به افت فعال‌سازی می‌باشد. افت غلظتی در چگالی جریان‌های خیلی بالا مشهود است و در چگالی جریان‌های کاری معمولاً قابل صرف‌نظر است.

افت اهمی نیز به جریان وابسته است و با افزایش جریان افزایش می‌یابد. رابط بین انواع افت‌های ولتاژ و ولتاژ سلول با رابطه (۱) قابل بیان است [۱۹].

$$V_{cell} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_a - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_c - \Delta V_{ohm} \quad (1)$$

محدوده تغییرات و عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است.

شکل ۱۲ تغییرات بازده، ولتاژ و چگالی توان را با تغییرات چگالی

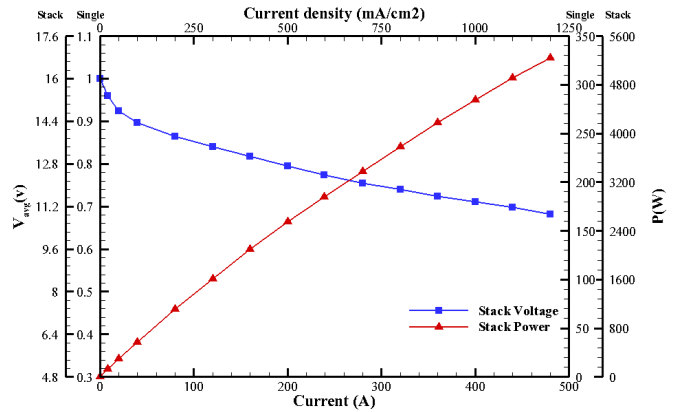


Fig. 7. Stack power and voltage curves

شکل ۷: نمودار توان و ولتاژ سری

نشان می‌دهد که با استفاده از طراحی یکپارچه و پلکانی، سری توانسته است به اهداف طراحی بدون اینکه به محدوده‌ی ولتاژ محدودکننده برسد، دست یابد.

تغییرات ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن، اکسیژن و سلول‌های میانی غیر تخلیه و همچنین کل سری در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به تجمع و تولید آب بیشتر در سمت کاتد نوسانات ولتاژ آن بیشتر است (نوسانات شدید نمودار آبی رنگ در شکل ۸) و باید رویه تخلیه در سمت کاتد و آند متفاوت از هم باشد. در این آزمایش دو سمت آند و کاتد به مدت ۱۰ ثانیه بسته بوده و به هنگام تخلیه ۱ ثانیه باز بوده‌اند.

نوسانات ولتاژ در هر یک از سلول‌های تخلیه هیدروژن و اکسیژن به طور مجزا در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. سلول‌های ۱، ۲ و ۳ سلول‌های تخلیه اکسیژن و سلول‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ سلول‌های

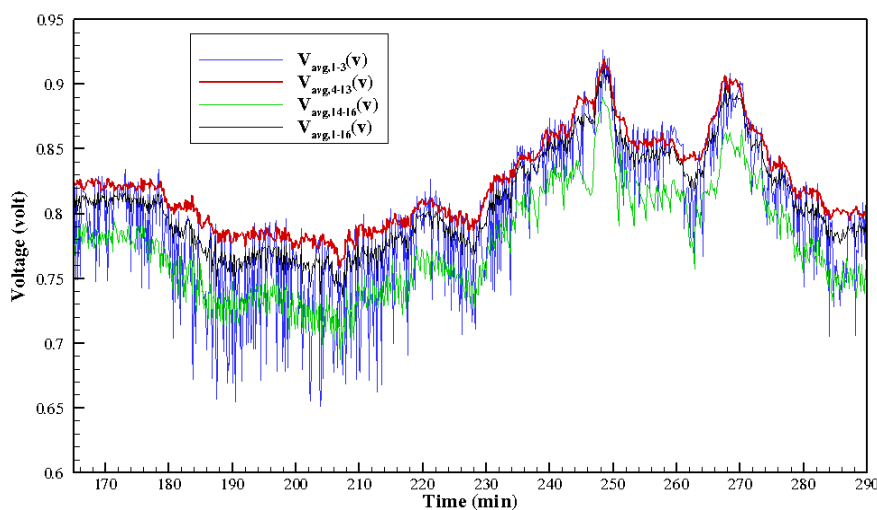


Fig. 8. Mean voltage fluctuation in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۸: متوسط نوسانات ولتاژ در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

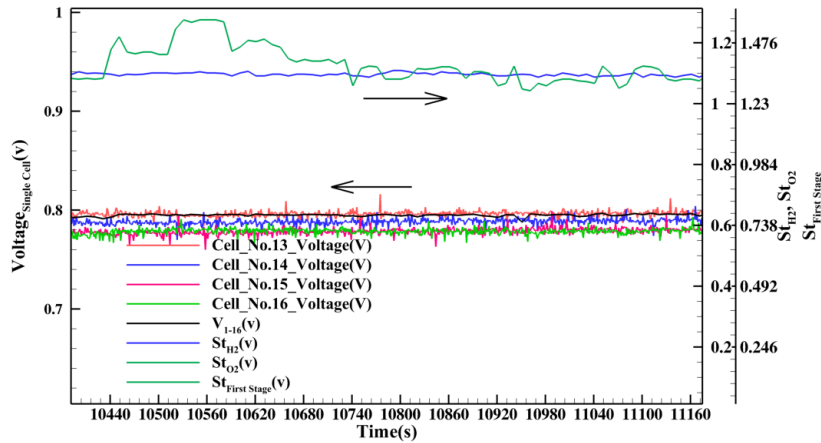


Fig. 9. Fluctuations of stoichiometry and voltage of H<sub>2</sub> purge cell and stack in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۹: نوسانات استوکیومتری و ولتاژ سلول‌های تخلیه هیدروژن و کل سری در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

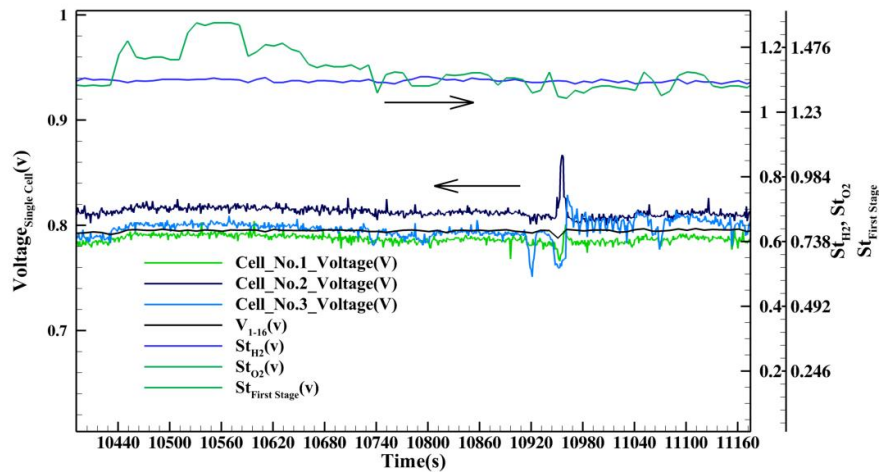


Fig. 10. Fluctuations of stoichiometry and voltage of O<sub>2</sub> purge cell and stack in dead-end mode for both anode and cathode (10 seconds closed and 1 second open)

شکل ۱۰: نوسانات استوکیومتری و ولتاژ سلول‌های تخلیه اکسیژن و کل سری در حالت انتها بسته آند و کاتد (۱۰ ثانیه بسته و ۱ ثانیه باز)

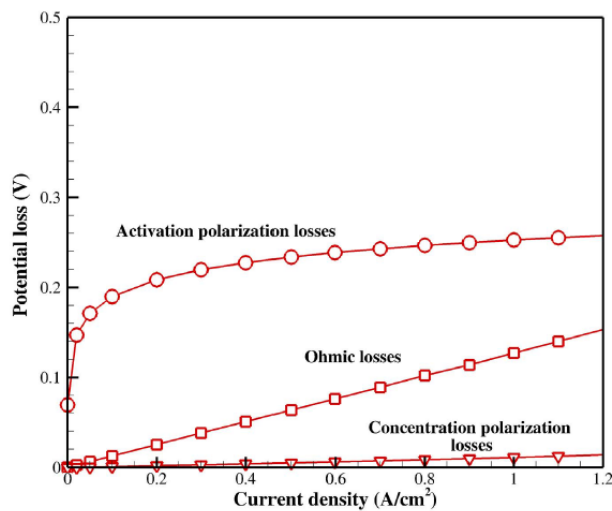


Fig. 11. Average of different types of potential loss in stack (inlet humidity above 80%, clamp torque 9.5 N.m, temperature 70 °C, relative pressure 1 barg, 0.3% hydrogen purge and 1% oxygen purge)

شکل ۱۱: متوسط انواع افت ولتاژ در سری (رطوبت ورودی بالای ۸۰ درصد، گشتاور کلمپ ۵/۹ نیوتن در متر، دما ۷۰ درجه سانتی‌گراد، فشار نسبی ۱ بار، تخلیه هیدروژن ۳/۰ درصد و تخلیه اکسیژن ۱ درصد)

جدول ۲: دقت و عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری، معیار پایداری کنترلرهای تی‌اس‌تی

Table 2. Accuracy and uncertainty of measurement parameters, stability criteria of TST controllers

پارامتر مورد اندازه‌گیری/کمیت	دقت	عدم قطعیت	کنترل پایداری تی‌اس‌تی (حداقل به حداکثر)
فشار گاز واکنشگر (kPa abs)	*fs ±۱٪ >	fs ۲٪ >	fs ۳٪ >
دبی گاز واکنشگر (N.l/min)	fs ±۱٪ >	fs ۲٪ >	fs ۳٪ >
دمای نقطه‌ی شبنم واکنشگر (°C)	±۱ K >	۲ K >	۳ K >
دمای خنک‌کاری T.Si.C (°C)	±۱ K >	۱ K >	۱ K >
بار الکتریکی (A)	±۰/۱ K >	۰/۵ A >	۰/۵ K >
ولتاژ متوسط سلول (V)	±۱ mV	۲ mV >	**N.A

\* کل بازه‌ی اندازه‌گیری  
\*\* کاربرد ندارد.

در رابطه با  $St$  ضریب استوکومیتری گاز واکنشگر،  $V$  ولتاژ سری،  $I$  جریان و  $\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))$  آنتالپی تشکیل بخار آب است. نتایج نشان می‌دهد در نقطه‌ی بیشینه جریان آزمایش سری به نقطه‌ی بیشینه توان خود نرسیده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سری پیل سوختی پلیمری انتها بسته با طراحی پلکانی با رطوبت‌زن یکپارچه بعد از طراحی، ساخت و مونتاژ آزمایش شد. تمامی آزمایش‌ها در یک دستگاه آزمایش بومی انجام شد. غشاء پیل سوختی پلیمری بعد از انجام فرایند فعال‌سازی که مطابق با شرکت سازنده غشاء انجام گرفت، مورد انواع آزمایش‌های نمودار قطبیت و تخلیه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد سلول‌های تخلیه

جریان نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که با استفاده از طرح مذکور به بازده بالای ۵۰ درصد در چگالی توان ۱۰۰۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع خواهیم رسید. با افزایش چگالی جریان چگالی توان افزایش و بازده کاهش می‌یابد. بازده سری با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$\eta = \frac{V \times I}{\dot{n} \times \Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))} \quad (2)$$

در رابطه با  $\dot{n}$  دبی مولی هیدروژن است که با استفاده از رابطه (۳) حساب می‌شود [۱۹].

$$\dot{n} = St \cdot \frac{I}{nF} \text{ mol/s} \quad (3)$$

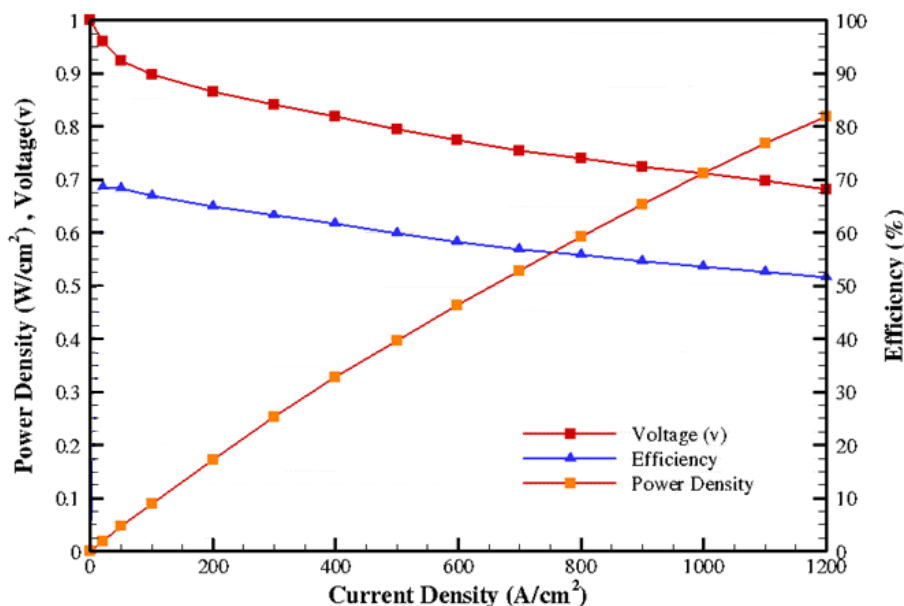


Fig. 12. Changes in efficiency, power density and voltage in terms of current density (test conditions as in Fig. 11)

شکل ۱۲: تغییرات بازده، چگالی توان و ولتاژ بر حسب چگالی جریان (شرایط آزمایش همانند شکل ۱۱)

- Membrane Science, 347(1-2) (2010) 26-31.
- [3] S.-D. Oh, K.-Y. Kim, S.-B. Oh, H.-Y. Kwak, Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications, *Applied Energy*, 95 (2012) 93-101.
- [4] W.R. Baumgartner, P. Parz, S. Fraser, E. Wallnöfer, V. Hacker, Polarization study of a PEMFC with four reference electrodes at hydrogen starvation conditions, *Journal of Power Sources*, 182(2) (2008) 413-421.
- [5] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation, *Journal of Power Sources*, 194(1) (2009) 130-145.
- [6] S. Zhang, X. Yuan, H. Wang, W. Mérida, H. Zhu, J. Shen, S. Wu, J. Zhang, A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, *International journal of hydrogen energy*, 34(1) (2009) 388-404.
- [7] D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, B. Yi, Study of the cell reversal process of large area proton exchange membrane fuel cells under fuel starvation, *Journal of Power Sources*, 194(2) (2009) 847-853.
- [8] H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 178(1) (2008) 103-117.
- [9] Y. Hou, C. Shen, D. Hao, Y. Liu, H. Wang, A dynamic model for hydrogen consumption of fuel cell stacks considering the effects of hydrogen purge operation, *Renewable energy*, 62 (2014) 672-678.
- [10] Y.-S. Chen, C.-W. Yang, J.-Y. Lee, Implementation and evaluation for anode purging of a fuel cell based on nitrogen concentration, *Applied energy*, 113 (2014) 1519-1524.
- [11] B. Belvedere, M. Bianchi, A. Borghetti, A. De Pascale, M. Paolone, R. Vecchi, Experimental analysis of a PEM fuel cell performance at variable load with anodic exhaust management optimization, *international journal of hydrogen energy*, 38(1) (2013) 385-393.

سمت کاتد به شدت به شرایط تخلیه حساس بوده و نوسانات شدید ولتاژ در آن‌ها مشاهده می‌شود. این بیانگر آن است که باید رویه تخلیه در سمت آند و کاتد متفاوت باشد و بهتر است از روش بر پایه ولتاژ برای تخلیه استفاده شود. همچنین تأثیر انواع افت‌های ولتاژ بر عملکرد سلول بررسی شد. نتایج نشان داده است که با استفاده از طرح حاضر به بازده بالای ۵۰ درصد خواهیم رسید که در مقایسه با سایر منابع تولید قدرت قابل توجه است.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$H_2$	گاز هیدروژن
$H$	آنتالپی
$I$	شدت جریان
$\dot{n}$	دبی مولی هیدروژن
$O_2$	گاز اکسیژن
$P$	توان، W
$t$	زمان، s
$V$	ولتاژ، V

#### زیرنویس

$f$	سیال
$cell$	سلول
$r$	بحرانی کمینه
$ohm$	بحرانی بیشینه
$act$	گاز
$conc$	مخلوط

#### مراجع

- [1] Z. Wan, J. Wan, J. Liu, Z. Tu, M. Pan, Z. Liu, W. Liu, Water recovery and air humidification by condensing the moisture in the outlet gas of a proton exchange membrane fuel cell stack, *Applied Thermal Engineering*, 42 (2012) 173-178.
- [2] K. Li, G. Ye, J. Pan, H. Zhang, M. Pan, Self-assembled Nafion®/metal oxide nanoparticles hybrid proton exchange membranes, *Journal of*

- and recovery characteristics during gas purging in a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode, *Applied Thermal Engineering*, 129 (2018) 968-978.
- [17] Q. Jian, L. Luo, B. Huang, J. Zhao, S. Cao, Z. Huang, Experimental study on the purge process of a proton exchange membrane fuel cell stack with a dead-end anode, *Applied Thermal Engineering*, 142 (2018) 203-214.
- [18] M.M. Barzegari, S.M. Rahgoshay, L. Mohammadpour, D. Toghraie, Performance prediction and analysis of a dead-end PEMFC stack using data-driven dynamic model, *Energy*, 188 (2019) 116049.
- [19] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*, Academic Press, 2012.
- [12] J.-J. Hwang, Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency, *Journal of Power Sources*, 239 (2013) 54-63.
- [13] S.-K. Park, S.-Y. Choe, Dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects, *Journal of Power Sources*, 179(2) (2008) 660-672.
- [14] I.-S. Han, J. Jeong, H.K. Shin, PEM fuel-cell stack design for improved fuel utilization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(27) (2013) 11996-12006.
- [15] I.-S. Han, B.-K. Kho, S. Cho, Development of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack for an underwater vehicle, *Journal of Power Sources*, 304 (2016) 244-254.
- [16] B. Chen, Z. Tu, S.H. Chan, Performance degradation

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Khorshidian, S. M. Rahgoshay, M. Rahimi, S. H. M. Saadat, *Experimental Investigation of Integrated Power System of Dead-End Proton Exchange Membrane Fuel Cell H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Stack with Large Active Area and Internal Humidifier*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 1667-1676.

DOI: [10.22060/mej.2020.17133.6517](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17133.6517)

