



# Numerical Simulation of a Biogas-fueled Solid Oxide Fuel Cell and the Investigation of the Influence of Operating Conditions

M. Mehrabian, J. Mahmoudimehr\*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

**ABSTRACT:** Using biogas, rather than pure hydrogen, in a solid oxide fuel cell (SOFC) can help the green energy production chain. This research investigates the influence of operating conditions on the performance of a biogas-fueled SOFC. In this regard, a 3D numerical model is developed using a finite volume approach and Fluent software. User Defined Functions are employed to introduce the steam reforming processes inside the SOFC. The second-order upwind scheme and SIMPLE algorithm are used for the discretization of governing equations and the pressure-velocity coupling. The results indicate that the power density first increases and then decreases by increasing the steam-to-fuel (S/C) ratio. Increasing the biogas methane content causes the performance of the SOFC to improve by enhancing the rates of reforming reactions. At a voltage of 0.5V and an operating temperature of 1073K, increasing the biogas methane percentage from 45% to 65%, causes the power to increase by 15%. Also, increasing the operating temperature enhances the SOFC performance by increasing the rates of reforming and electrochemical reactions and the electrolyte ionic conductivity. At a voltage of 0.5V, for a biogas methane percentage of 65%, increasing the operating temperature from 1073K to 1273K leads to a 132% growth of power. It is also found that the optimal S/C ratio decreases with temperature and increases with biogas methane content and lies within the range of 0.3-1.2.

## Review History:

Received: Mar. 26, 2023

Revised: Sep, 04, 2023

Accepted: Nov, 22, 2023

Available Online: Nov, 27, 2023

## Keywords:

Solid oxide fuel cell

biogas fuel, influence of operating conditions

internal steam reforming

numerical simulation

## 1- Introduction

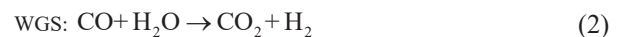
SOFCs due to their operation at high temperatures, can utilize alternative hydrogen fuels, including methane, biogas, and other hydrocarbons [1]. The introduction of water vapor at the fuel cell inlet induces steam reforming reactions, mitigates the risk of carbon deposition, and enhances fuel flexibility [2]. Finding the optimal amount of water vapor to be added to the fuel in a SOFC fueled with biogas is a challenging task. Adding too little water to biogas can impede the formation of steam-reforming reactions or lead to carbon deposition. Conversely, adding too much water can result in a performance drop of fuel cells due to fuel deficiency [3]. Previous research activities in investigating the performance of biogas-fed solid oxide fuel cells with added water vapor have generally employed a thermodynamic approach [4], focusing on specific biogas [5], a limited range of steam-to-fuel ratios [6], and a fixed operating temperature [7].

This study aims to provide a more comprehensive understanding of the steam reforming process in a biogas-fed solid oxide fuel cell to cover the mentioned gaps. For this purpose, a three-dimensional numerical model is developed, and the influence of biogas composition, steam-to-fuel ratio, and operating temperature on the behavior of a biogas-fed solid oxide fuel cell is investigated.

## 2- Mathematical model

In order to simulate a SOFC, it is necessary to solve a set of partial differential equations that describe the transport phenomena within the fuel cell. These equations include the mass conservation equation, momentum equation, energy equation, species transport equation, and phase potential equation.

The direct utilization of biogas fuel containing  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  in a SOFC necessitates the occurrence of reforming reactions within the anode electrode. The primary reforming reactions include the steam reforming and water-gas shift reaction, shown in equations (1) and (2), respectively [8]:



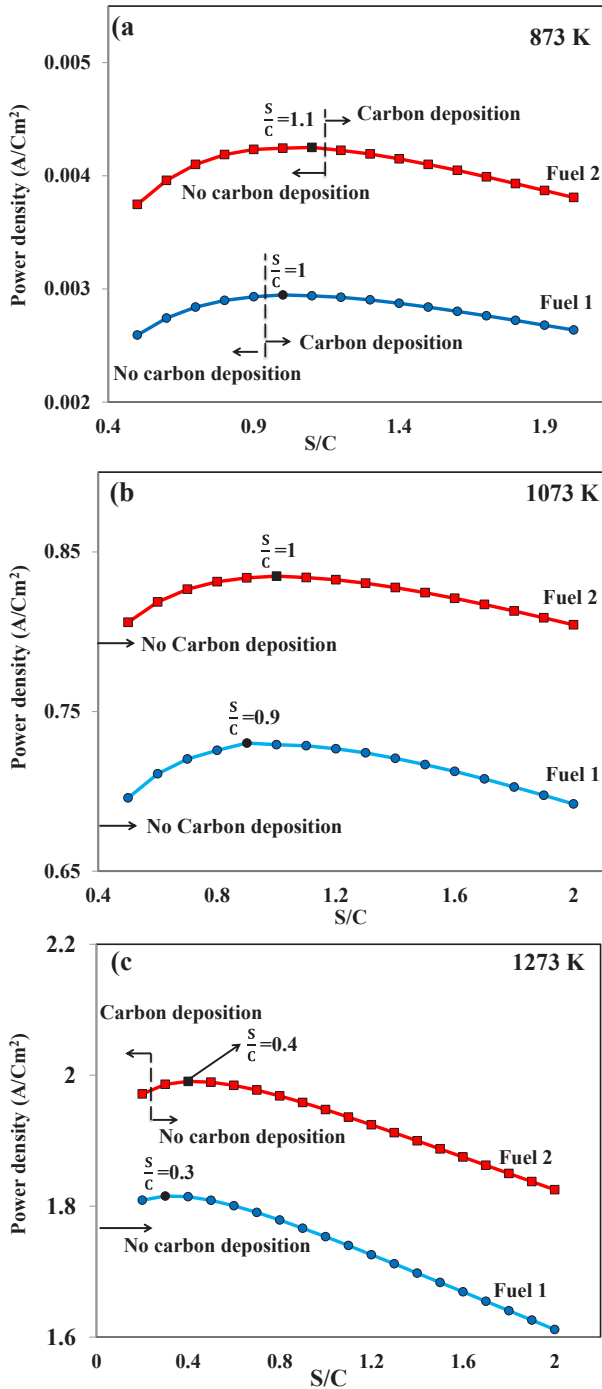
The reaction rates for the steam reforming and water-gas shift reactions are calculated according to equations (2) and (3):

$$R_{\text{SR}} = K_{\text{rf}} \left( P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}} (P_{\text{H}_2})^3}{K_{\text{pr}}} \right) \quad (3)$$

$$R_{\text{WGS}} = K_{\text{sf}} \left( P_{\text{H}_2} P_{\text{CO}} - \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{CO}_2}}{K_{\text{ps}}} \right) \quad (4)$$

\*Corresponding author's email: Mahmoudimehr@guilan.ac.ir



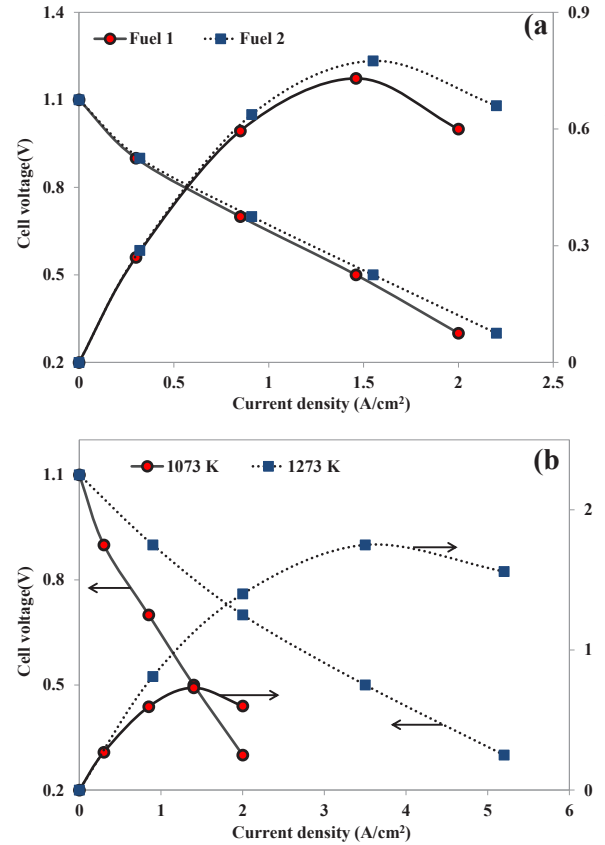


**Fig. 1. The effect of S/C ratio on the performance of a fuel cell under various operating conditions**

The influences of steam reforming reactions on the species transport and energy equations are considered by using User Defined Functions (UDFs) in ANSYS FLUENT software.

### 3- Result and Discussion

This research investigates the influence of operating conditions on the performance of an SOFC. To this end, two types of biogases with different methane fractions (at 45% and 65% molar ratios), three different operating temperatures (873, 1073, and 1273 K), and a wide range of S/C ratios (from 0.2 to 2) are examined.



**Fig. 2. Comparison of power density and polarization curves (a) effect of fuel type (b) effect of temperature**

Figure 1 illustrates the power density of the SOFC under various operational conditions. In this figure, Fuel 1 and 2 have the methane-to-carbon dioxide ratios of 0.82 and 1.85, respectively. It is observed that the power density initially increases and then decreases with the increase of S/C ratio. Also, as a result of the increase in temperature (regardless of fuel type and S/C ratio), the fuel cell performance improves due to a noticeable enhancement in reforming reaction rates. Furthermore, the optimal S/C ratio, leading to a maximum power output, decreases with the increase of temperature. Figure 1 also indicates that the methane-rich fuel (i.e., Fuel 1) leads to higher power densities and higher optimal S/C ratios, as compared to Fuel 2. Figure 1 shows that the risk of carbon deposition is higher at lower temperatures and for fuels with higher methane contents.

The influence of each fuel type and operating temperature on both polarization and power curves are depicted in Figure 2. It is observed in Figure 2a that the power output of Fuel 2 (with a higher methane content) is considerably higher than that of Fuel 1 (with a lower methane content), and the difference is more pronounced at lower voltages. Also, for both fuels, the maximum power occurs at the operating voltage of 0.5V. Figure 2b indicates that a higher operating temperature of 1273K results in a higher power output, and the difference between the two operating temperatures is more pronounced at lower operating voltages.

#### 4- Conclusion

This study was concerned with the numerical study of a biogas-fueled solid oxide fuel cell under different operating conditions. In general, with an increase in operating temperature and fuel methane content, the rates of reforming reactions significantly increased, leading to more rapid consumption of methane, and increased hydrogen production and power density.

The optimal S/C ratio has decreased with an increase in the operating temperature. For instance, at 873 K, the optimal S/C ratios for different biogas compositions were in the range of 1-1.2, while at 1273 K, they were within the range of 0.3-0.4. The optimal S/C ratio increased with the biogas methane content. For example, at an operating temperature of 1073 K, the optimal S/C ratios were 0.9 and 1 for biogas with methane molar fractions of 45% and 65%, respectively. Furthermore, the results indicated that the risk of carbon deposition was higher at lower temperatures and for fuels with higher methane contents.

#### References

- [1] M. Liu, R. Peng, D. Dong, J. Gao, X. Liu, G. Meng, Direct liquid methanol-fueled solid oxide fuel cell, *Journal of Power Sources*, 185(1) (2008) 188-192.
- [2] N. Laosiripojana, S. Assabumrungrat, Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC, *Journal of Power Sources*, 163(2) (2007) 943-951.
- [3] M. Mehrabian, J. Mahmoudimehr, A numerical study to determine proper steam-to-fuel ratio in a biogas-fueled solid oxide fuel cell for different levels of biogas methane content, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, (2023) 09544062231187709.
- [4] K. Chouhan, S. Sinha, S. Kumar, S. Kumar, Utilization of biogas from different substrates for SOFC feed via steam reforming: Thermodynamic and exergy analyses, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2) (2019) 103018.
- [5] E. Vakouftsi, G. Marnellos, C. Athanasiou, F. Coutelieris, CFD modeling of a biogas fuelled SOFC, *Solid State Ionics*, 192(1) (2011) 458-463.
- [6] A. Lanzini, P. Leone, Experimental investigation of direct internal reforming of biogas in solid oxide fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(6) (2010) 2463-2476.
- [7] Y. Wang, L. Wehrle, A. Banerjee, Y. Shi, O. Deutschmann, Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling, *Renewable energy*, 163 (2021) 78-87.
- [8] M. Ni, Modeling and parametric simulations of solid oxide fuel cells with methane carbon dioxide reforming, *Energy Conversion and Management*, 70 (2013) 116-129.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Mehrabian, J. Mahmoudimehr, *Numerical Simulation of a Biogas-fueled Solid Oxide Fuel Cell and the Investigation of the Influence of Operating Conditions*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 55(7) (2023) 187-190.

DOI: 10.22060/mej.2023.22280.7593







## شبیه‌سازی عددی پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شده با زیست‌گاز و بررسی تاثیر شرایط عملکردی

مرتضی مهرابیان، جواد محمودی‌مهر\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶

### کلمات کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد  
سوخت بیوگاز  
تاثیر شرایط عملکردی  
اصلاح داخلی بخار  
شبیه‌سازی عددی

**خلاصه:** استفاده از زیست‌گاز به‌جای هیدروژن در پیل سوختی می‌تواند به زنجیره تولید انرژی پاک کمک نماید. در تحقیق حاضر، تأثیر شرایط عملکردی بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شده با بیوگاز بررسی می‌شود. به این منظور، به روش حجم محدود و به کمک نرم‌افزار فلوئنت به توسعه یک مدل عددی سه‌بعدی پرداخته‌شده است. همچنین از توابع تعریف‌شده توسط کاربر، برای تعریف واکنش‌های اصلاح بخار، و از روش بالادست مرتبه دوم و الگوریتم سیمپل برای گسسته‌سازی معادلات حاکم و کوپل سرعت-فشار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت بخار به کربن، میزان توان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت متان در بیوگاز، نرخ واکنش‌های اصلاحی افزایش یافته و عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. در ولتاژ میانی ۰/۵ ولت و دمای عملکردی ۱۰۷۳ کلوین، با افزایش درصد متان در بیوگاز از ۴۵٪ به ۶۵٪، توان به میزان ۱۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای عملکردی، به دلیل افزایش نرخ واکنش‌های اصلاحی و الکتروشیمیایی و بهبود هدایت یونی، عملکرد پیل سوختی بهبود می‌یابد. در ولتاژ میانی ۰/۵ ولت و به ازای بیوگاز با ۶۵٪ متان، با افزایش دما از ۱۰۷۳ به ۱۲۷۳ کلوین، توان به میزان ۱۳۲٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که میزان بهینه نسبت بخار به کربن با افزایش دما کاهش و با افزایش غلظت متان در سوخت افزایش می‌یابد و در محدوده ۰/۳ تا ۱/۲ قرار می‌گیرد.

### ۱- مقدمه

هیدروژن بسیار خالص به‌عنوان سوخت استفاده نمایند (۸، ۹)، پیل‌های سوختی اکسید جامد می‌توانند از سوخت‌های جایگزین هیدروژن از جمله متان، بیوگاز، گاز زغال‌سنگ، اتانول زیستی، آمونیاک و سایر سوخت‌های هیدروکربنی استفاده کنند [۱۰-۱۲]. استفاده از بیوگاز به‌عنوان سوخت در پیل‌های سوختی اکسید جامد این امکان را می‌دهد که زنجیره تولید توان (شامل تولید بیوگاز از زیست‌توده و سپس مصرف آن به‌عنوان سوخت در پیل سوختی برای تولید توان) یک زنجیره پاک باشد و واسطه‌هایی نظیر سیستم‌های تولید هیدروژن و مخازن مربوطه حذف شوند که منجر به هزینه‌های کمتر و ایمنی بیشتر است.

البته استفاده از زیست‌گاز به‌عنوان سوخت پیل سوختی دارای معایبی نیز می‌باشد. زمانی که زیست‌گاز در پیل سوختی مصرف می‌شود، به علت دمای بالا، امکان تولید گازهای مضر نظیر اکسید نیتروژن<sup>۱</sup> وجود دارد که می‌تواند منجر به ایجاد خوردگی و آسیب به پیل سوختی و همچنین آلاینده‌گی هوا خروجی شود [۱۳]. همچنین زیست‌گاز علاوه بر متان و دی اکسید کربن

ذخایر رو به پایان سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها، از دلایل اصلی توجه ویژه به منابع انرژی تجدید پذیر و استفاده از فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست جهت تأمین انرژی است [۱، ۲]. از جمله فناوری‌های بسیار امیدبخش می‌توان به پیل‌های سوختی اشاره نمود. پیل‌های سوختی دستگاه‌های الکتروشیمیایی تولید برق پاک هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند [۳].

از میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد<sup>۱</sup> به‌واسطه کار در دمای بالا (۶۷۳-۱۲۷۳ کلوین) مزیت‌هایی خاصی دارد که از آن میان می‌توان به راندمان بالا، انرژی فعال‌سازی نسبتاً کم و تولید گرمای اتلافی باکیفیت (دما بالا) اشاره نمود [۴-۷]. همچنین، برخلاف پیل‌های سوختی دمایی مانند سلول‌های سوختی غشای تبادل پروتون<sup>۲</sup> که نیاز دارند از

- 1 SOFC
- 2 PEMFC

3 NO<sub>x</sub>

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahmoudimehr@guilan.ac.ir



اکسید جامد دریافتند که افزایش میزان رطوبت زیست‌توده، توان تولیدی تک‌سلول پیل سوختی اکسید جامد را کاهش می‌دهد و بیشترین میزان راندمان در مقدار رطوبت ۰/۴ در ورودی رخ می‌دهد. صالح میر حسنی و همکاران [۲۸] در تحلیل انرژی-اقتصادی سیستم تولید سه‌گانه بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با اصلاح کننده خارجی توانستند سیستمی با بازده ۳۸٪ بیشتر نسبت به پیل سوختی منفرد ارائه دهند. گاوگانو و همکاران<sup>۴</sup> [۱۷] به کمک شبیه‌ساز اسپنت پلاس<sup>۵</sup> به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی پیل سوختی تغذیه‌شده با بیوگاز پرداختند. ترکیب بیوگاز موردنظر به صورت ۶۰٪ متان و ۴۰٪ دی‌اکسید کربن در نظر گرفته شده است و نسبت‌های بخار به سوخت (۲/۵ و ۱/۲) مورد بررسی قرار گرفته است و کارایی انرژی<sup>۶</sup> در محدوده (۸۵-۸۸) درصد به دست آمده است. چوهان و همکاران<sup>۷</sup> [۲۹] به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی اصلاح بخار بیوگاز با درصد‌های متفاوت متان (متان ۴۵-۸۰٪) پرداختند. در این مطالعه، محدوده دمایی بین (۵۷۳-۱۲۷۳ کلوین) و نسبت بخار به کربن بین ۰-۲ مورد بررسی واقع شد. پیرولرنکو و همکاران<sup>۸</sup> [۳۰] به مطالعه ترمودینامیکی پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شده با بیوگازهای مختلف (درصد‌های متفاوت متان و نسبت‌های متفاوت بخار به کربن) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد سوخت با بالاترین درصد متان (حدود ۷۵ درصد) بهترین راندمان الکتریکی (در حدود ۶۰ درصد) را موجب شده است. چاتراتانوت و همکاران<sup>۹</sup> [۳۱] از طریق تحلیل ترمودینامیکی به جستجوی شرایط بهینه عملکردی یک پیل سوختی به صورت مستقیم تغذیه شونده با بیوگاز پرداختند. در این پژوهش دما عملکردی بین ۸۲۳ تا ۱۳۲۳ کلوین و نسبت بخار به کربن بین ۰/۵-۵ و فشار عملکردی بین ۱ تا ۵ اتمسفر متغیر بوده است. نتایج نشان داد که دمای ۱۱۷۳، نسبت بخار به کربن برابر با ۰/۵ و فشار عملکردی ۳ اتمسفر، عملکرد بهینه پیل را موجب شده است. نیشینو و همکاران<sup>۱۰</sup> [۳۲] به شبیه‌سازی عددی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای تغذیه‌شده با بیوگاز و بخار آب (شامل فرایند اصلاح بخار) پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش نسبت متان در سوخت، گرادیان دما در داخل سلول کاهش می‌یابد. ونگ و همکاران<sup>۱۱</sup> [۳۳] با بررسی عددی سه‌بعدی پیل سوختی اکسید جامد تغذیه شونده با سوخت

(که خود از جمله گازهای گلخانه‌ای می‌باشند) حاوی ترکیبات مضر از جمله ترکیبات گوگردی (مانند سولفید هیدروژن) می‌باشد، به خصوص اگر از منابعی مانند تصفیه‌خانه‌های فاضلاب یا محل‌های دفن زباله مشتق شده باشد. این ترکیبات گوگردی می‌توانند کاتالیست‌های موجود در پیل سوختی را تخریب نموده و در طول زمان منجر به کاهش راندمان یا حتی آسیب به آن شوند.

به منظور استفاده مستقیم از سوخت‌های جایگزین نظیر بیوگاز در پیل سوختی، لازم است فرایندهای شیمیایی موسوم به اصلاح، روی این سوخت‌ها انجام پذیرد. یکی از روش‌های رایج اصلاح، روش اصلاح بخار است [۱۴]. در این روش، بیوگاز به همراه بخار آب به پیل سوختی اکسید جامد تزریق می‌شود. وجود بخار آب، بیوگاز و دماهای بالای پیل سوختی منجر به واکنش‌هایی درون پیل سوختی می‌شود که در اثر آن هیدروژن تولید می‌گردد. هیدروژن تولیدی، هم‌زمان در پیل سوختی مصرف شده و منجر به تولید الکتریسیته می‌گردد. از طرف دیگر، استفاده مستقیم از سوخت‌های دارای کربن در پیل سوختی، همواره ریسک ته‌نشینی کربن بر روی سطح آند را به همراه دارد [۱۵، ۱۶]. ته‌نشینی کربن به دلیل غیرفعال نمودن کاتالیزورها و مسدود نمودن مسیر حرکت گازها، راندمان را به شدت کاهش می‌دهد و عملکرد پیل سوختی را مختل می‌کند [۱۷]. ته‌نشینی کربن به عواملی همچون دما عملکردی [۱۸، ۱۹]، ریزساختار کاتالیزور [۲۰-۲۲] و همچنین اجزای سوخت ورودی [۲۳، ۲۴] بسیار وابسته است.

در طی سال‌های اخیر، تحقیقات مختلفی به استفاده از بیوگاز در پیل‌های سوختی اکسید جامد پرداخته‌اند. واگتسکی و همکاران [۲۵] یک شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> از یک پیل سوختی اکسید جامد مسطح تغذیه‌شده با مخلوط بیوگاز و بخار آب را انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیوگاز با بالاترین نسبت متان به دی‌اکسید کربن منجر به بیشترین چگالی جریان می‌شود. واگتسکی و همکاران [۲۶] در پژوهش دیگر به کمک نرم‌افزار تجاری ای سی ای<sup>۳</sup> به شبیه‌سازی سه‌بعدی یک پیل سوختی اکسید جامد مسطح تغذیه‌شده با متان و بخار آب پرداختند. نسبت بخار آب به متان طوری انتخاب شده است که عملکرد پیل سوختی از نظر ته‌نشینی کربن ایمن باشد. در این کار به بررسی تأثیر دما بر چگالی جریان تولیدی پرداخته شده است. برجی و همکاران [۲۷] با مطالعه‌ی عددی سیکل یکپارچه تولید گاز از زیست‌توده و تولید توان در پیل سوختی

4 Galvagno et al  
5 Aspen Plus  
6 energy efficiency  
7 Chouhan et al  
8 Piroonlerkku et al  
9 Chatrattanawet et al  
10 Nishino et al  
11 Wang Y et al

1 Vakouftsi et al  
2 CFD  
3 CFD ACE

## ۲- شبیه‌سازی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است یک پیل سوختی اکسید جامد<sup>۳</sup> معمولی از یک کانال جریان گاز، یک جمع‌کننده جریان<sup>۴</sup> و یک لایه منطقه واکنش<sup>۵</sup> در هر طرف آند و کاتد تشکیل شده است. همچنین یک الکترولیت<sup>۶</sup> جامد بین الکترودهای آند و کاتد واقع شده است. در سمت کاتد، مولکول‌های اکسیژن که در کانال گاز سمت کاتد جریان دارند، از لایه نفوذ گاز<sup>۷</sup> آند عبور می‌کنند تا به لایه فعال واکنش برسند، جایی که همان‌طور که در رابطه (۱) بیان شده کاهش<sup>۸</sup> می‌یابند. یون‌های اکسیژن تولیدشده از الکترولیت عبور می‌کنند تا به لایه فعال واکنش آند برسند. در سمت آند، مولکول‌های هیدروژن که در کانال گاز کاتد جریان دارند، به درون لایه نفوذ کاتد نفوذ می‌کنند تا به لایه فعال واکنش برسند، جایی که با یون‌های اکسیژن دریافتی واکنش می‌دهند تا الکترون و آب تولید کنند، همان‌طور که در رابطه (۲) نشان داده شده است. رابطه (۳) نشان‌دهنده واکنش کلی است که در یک پیل سوختی اکسید جامد رخ می‌دهد [۳۹، ۴۰].



شبیه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد عبارت است از حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی که توصیف‌کننده پدیده‌های انتقال درون پیل سوختی می‌باشند. در ادامه معادلات حاکم بر عملکرد پیل سوختی اکسید جامد ارائه می‌گردند. مفروضات شبیه‌سازی حاضر عبارت‌اند [۴۱]:

۱- رژیم جریان در کانال‌های گاز به علت سرعت کم، آرام و پیل سوختی در حالت پایا عمل می‌نماید.

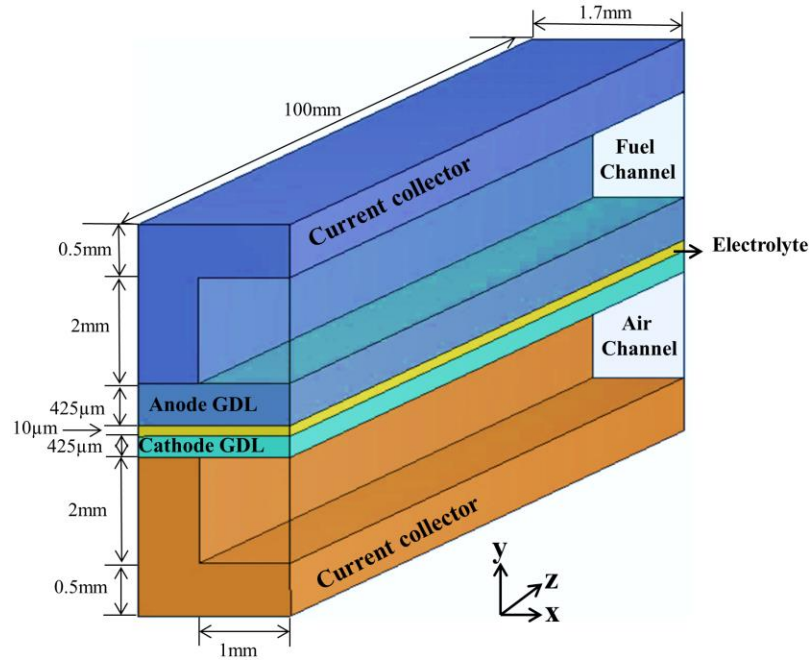
بایوگاز و بخار آب پرداختند. آن‌ها مشاهده نمودند که افزایش نسبت بخار به کربن منجر به کاهش راندمان الکتریکی پیل می‌شود و بهتر است مقدار بخار به کربن تا جایی که ته‌نشینی کربن اتفاق نیفتد، کم انتخاب شود. چودو و همکاران<sup>۱</sup> [۳۴] به بررسی آزمایشگاهی پیل سوختی تغذیه‌شده با بایوگازی که توسط هیدروژن رقیق شده است پرداختند. در این تحقیق، دما از ۸۷۳ تا ۱۰۷۳ کلوین متغیر در نظر گرفته شده است و قیدی برای عدم ته‌نشینی کربن لحاظ شده است. نتایج نشان داد که از میان روش‌های مختلف اصلاح سوخت، روش اصلاح بخار با راندمان ۶۰٪ بهترین عملکرد را داشته است. یافتن میزان بهینه بخار آب اضافه‌شده به سوخت ورودی در یک پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شونده با بایوگاز یک امر چالشی است. افزودن آب کم به بایوگاز می‌تواند شکل‌گیری واکنش‌های اصلاح بخار را دچار مشکل نماید و یا منجر به ته‌نشینی کربن گردد و افزودن آب زیاد (و در نتیجه کاهش سهم بایوگاز در سیال ورودی به پیل) هم می‌تواند افت عملکرد پیل سوختی به‌واسطه کمبود سوخت را در پی داشته باشد [۲۹، ۳۵]. تولید آب درون پیل در اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی نیز بر پیچیدگی تعیین مقدار بهینه آب اضافه‌شده به بایوگاز می‌افزاید. مروری بر تحقیقات پیشین خالاهای را نشان می‌دهد از جمله:

- بیشتر فعالیت‌های صورت پذیرفته در زمینه بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شده با بایوگاز و بخار آب دارای رویکرد ترمودینامیکی و صفر بعدی می‌باشند [۲۹-۳۱، ۳۶]
- فعالیت‌های پیشین عموماً به یک بایوگاز خاص (با ترکیب مشخص از گونه‌های گازی) پرداخته‌اند [۲۵، ۳۷].
- بازه محدودی از نسبت بخار به سوخت را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۱۷، ۱۸، ۳۸]
- بررسی‌ها را به ازای یک دمای عملکردی ثابت انجام داده‌اند [۲۵، ۳۲، ۳۳].

هدف از کار حاضر، بررسی جامع‌تر فرایند اصلاح بخار در یک پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شونده با بایوگاز به منظور پوشش خالاهای مذکور می‌باشد. به این منظور یک مدل عددی سه‌بعدی (با الحاق سینتیک فرایندهای اصلاح داخلی به کمک کد نویسی<sup>۲</sup> با نرم‌افزار فلوئنت) توسعه یافته و تاثیر ترکیب بایوگاز، نسبت بخار به سوخت، و دمای عملکردی بر رفتار پیل سوختی اکسید جامد تغذیه‌شونده با بایوگاز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3 SOFC  
4 Current collector  
5 Triple Phase Boundary  
6 Electrolyte  
7 GDL  
8 reduce

1 Chiodo Vet al  
2 UDF



شکل ۱. شماتیک هندسه پیل سوختی (به علت تقارن، نیمی از پیل سوختی نشان داده شده است).

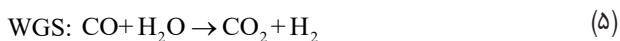
Fig. 1. Schematic of a fuel cell geometry (due to symmetry, only half of the fuel cell is depicted)

- ۲- دماها در ورودی کانال‌ها مشابه است و جریان در کانالهای گاز هم‌جهت فرض شده است.
- ۳- فقط هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی شرکت میکند. منوکسیدکربن در واکنش جابجایی آب-گاز به دی‌اکسیدکربن و هیدروژن تبدیل میشود.
- ۴- در این شبیه‌سازی از انتقال حرارت تشعشع بین ساختار جامد و کانالهای گاز صرف نظر شده است.
- ۵- الکتروود متخلخل از مواد ایزوتروپیک و همگن ساخته شده است.
- ۶- گاز در داخل پیل سوختی اکسید جامد به صورت مخلوط گاز ایده‌ال نیوتنی تراکم‌ناپذیر رفتار میکند.
- ۷- خصوصیات مواد وابسته به دما فرض شده است.
- ۸- از تئوری تعادل دمای محلی برای محیط متخلخل استفاده شده است.

۲-۱- معادلات حاکم

۲-۱-۱- روابط و مدل شیمیایی

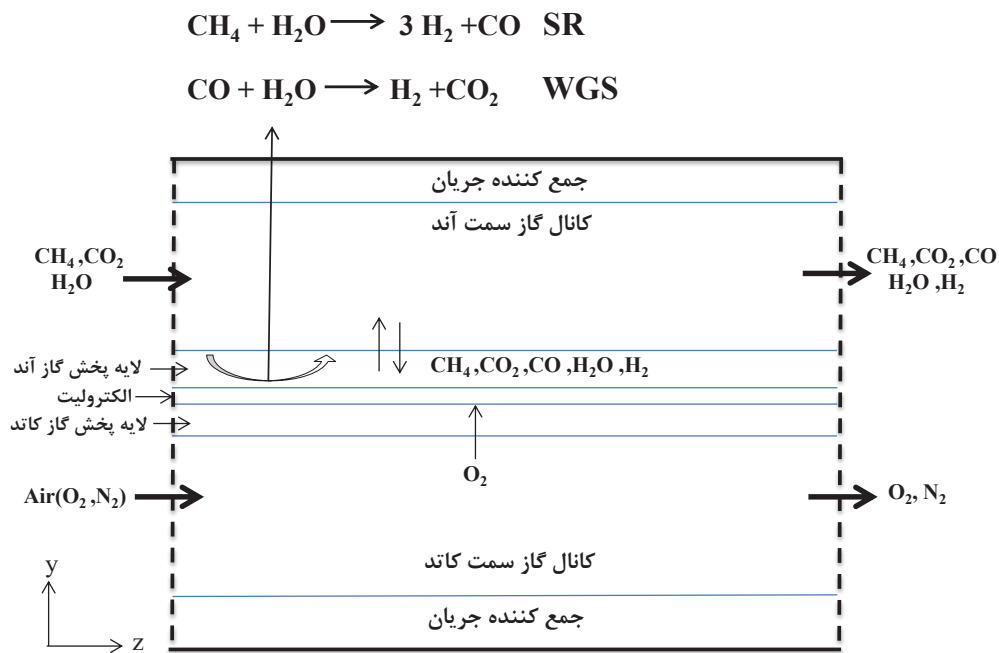
استفاده مستقیم از سوخت بیوگاز حاوی متان و کربن دی‌اکسید، مستلزم رخداد واکنش‌های اصلاحی در داخل آن‌د است. عمده واکنش‌های اصلی، دو واکنش اصلاح بخار<sup>۱</sup> و واکنش آب-گاز<sup>۲</sup> هستند که به ترتیب در روابط (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند [۴۲، ۴۳].



محل رخداد واکنش‌های اصلاحی (بخار و آب-گاز) به همراه ترکیبات گازهای ورودی و خروجی در شکل ۲ نشان شده است.

- 1 Steam reforming
- 2 Water gas shift





شکل ۲. نحوه عملکرد واکنش‌های اصلاحی در پیل سوختی تغذیه‌شده با گاز بیو

Fig. 2. Mechanism of reforming reactions in a biogas-fed fuel cell

$$R_{WGS} = K_{sf} \left( P_{\text{H}_2} P_{\text{CO}} - \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{CO}_2}}{K_{ps}} \right) \quad (9)$$

$$K_{sf} = 0.0171 \exp\left(\frac{-103191}{RT}\right) \quad (10)$$

$$K_{ps} = \exp(-0.2935Z^3 + 0.6351Z^2 + 4.1788Z + 0.3169) \quad (11)$$

$$Z = \frac{1000}{T} - 1 \quad (12)$$

برای محاسبه گرمای واکنش گرماگیر اصلاح بخار و واکنش گرمای آب-گاز از روابط (۱۳) و (۱۴) استفاده شده است [۴۶].

نرخ واکنش در کانال سوخت به دلیل عدم وجود کاتالیزور ناچیز فرض می‌شود (هابرمن و یانگ [۴۴])، نرخ واکنش برای اصلاح بخار آب و واکنش آب-گاز در لایه متخلخل آند که از جنس سرامیک نیکل می‌باشد مطابق روابط (۶) تا (۱۲) محاسبه می‌شود [۴۵].

$$R_{SR} = K_{rf} \left( P_{\text{CH}_4} P_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{P_{\text{CO}} (P_{\text{H}_2})^3}{K_{pr}} \right) \quad (6)$$

$$K_{rf} = 2395 \exp\left(\frac{-231266}{RT}\right) \quad (7)$$

$$K_{pr} = 1.0267 \times 10^{10} \times \exp(-0.2513Z^4 + 0.3665Z^3 + 0.5810Z^2 - 27.134Z + 3.277) \quad (8)$$

$$S_{CO} = -R_{SR} M_{CH_4} \text{ in GDL anode} \quad (22)$$

$$H_{SR} = -(206205.5 + 19.5175T) \quad (13)$$

چگالی جریان بر واحد حجم<sup>۱</sup> در سمت آند و کاتد بر اساس مدل باتلر-ولمر<sup>۲</sup> و به ترتیب مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) به صورت زیر به دست می‌آیند [۴۸، ۴۷، ۴۱].

$$H_{WGS} = 45063 - 10.28T \quad (14)$$

۲-۱-۲ معادله بقای جرم

$$j_{an} = \zeta_{an} j_{an}^{ref} \left( \frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left[ \exp\left(\eta_{an} \frac{\alpha_{an} F}{RT}\right) - \exp\left(-\eta_{an} \frac{\alpha_{an} F}{RT}\right) \right] \quad (23)$$

رابطه (۱۵) معادله پیوستگی را نشان می‌دهد. با گاز کامل فرض، چگالی مخلوط از رابطه (۱۶) به دست می‌آید. ترم‌های چشمه معادله از روابط (۱۷) تا (۲۲) به دست می‌آید [۴۵].

$$j_{ca} = \zeta_{ca} j_{ca}^{ref} \left( \frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right)^{\gamma_{ca}} \left[ -\exp\left(\eta_{ca} \frac{\alpha_{ca} F}{RT}\right) + \exp\left(-\eta_{ca} \frac{\alpha_{ca} F}{RT}\right) \right] \quad (24)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_{H_2} + S_{H_2O} + S_{O_2} + S_{CO_2} + S_{CO} + S_{CH_4} \quad (15)$$

افت ولتاژ فعالسازی<sup>۳</sup> در سمت آند و کاتد طبق روابط (۲۵) و (۲۶) محاسبه می‌شوند.

$$\rho_{mix} = \frac{p}{RT \sum \frac{Y_i}{M_i}} \quad (16)$$

$$\eta_{an} = \varphi_{elec,an} - \varphi_{ionic,an} \quad (25)$$

$$S_{H_2} = \begin{cases} 3R_{SR} M_{H_2} + R_{WGS} M_{H_2} \text{ in GDL anode} \\ -\left(\frac{j_{an}}{2F}\right) M_{H_2} \text{ at the anode-electrode} \end{cases} \quad (17)$$

$$\eta_{ca} = \varphi_{elec,ca} - \varphi_{ionic,ca} - V_{oc} \quad (26)$$

ولتاژ مدارباز با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود [۴۹-۵۱]. در این معادله  $E^o$  نشان‌دهنده ولتاژ مدارباز در حالت استاندارد است و  $P_i$  فشار جزئی گونه  $i$  است.

$$S_{H_2O} = \begin{cases} -R_{SR} M_{H_2O} - R_{WGS} M_{H_2O} \text{ in GDL anode} \\ +\left(\frac{j_{an}}{2F}\right) M_{H_2} \text{ at the anode-electrode} \end{cases} \quad (18)$$

$$V_{oc} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} \times P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (27)$$

$$S_{O_2} = -\left(\frac{j_{an}}{4F}\right) M_{O_2} \text{ at the cathode-electrolyte interface} \quad (19)$$

۲-۱-۳ معادله انتقال گونه‌ها

معادله انتقال گونه‌ها در رابطه (۲۸) نشان داده شده است [۴۰]. ترم چشمه این معادله مشابه روابط (۱۷) تا (۲۲) است. برای ساده‌سازی، ضریب

$$S_{CO_2} = R_{WGS} M_{CO_2} \text{ in GDL anode} \quad (20)$$

$$S_{CO} = R_{SR} M_{CO} - R_{WGS} M_{CO} \text{ in GDL anode} \quad (21)$$

- 
- 1 Exchange Current Density
  - 2 Butler-Volmer
  - 3 Over-potential

۲-۱-۵- معادله انرژی

معادله انرژی مطابق رابطه (۳۵) و ترم چشمه آن به ترتیب در روابط (۳۶) تا (۳۸) نشان داده شده است [۳۹]. لازم به ذکر است که ترم چشمه واکنش اصلاح بخار و آب-گاز مربوط به واکنش اصلاح داخلی متان هستند که فقط در آند اعمال می شود [۴۵].

$$\bar{\nabla} \cdot (\rho C_p \bar{u} T) = \bar{\nabla} \cdot (K \bar{\nabla} T) + S_h + S_{e(SR)} + S_{e(WGS)} \quad (35)$$

$$S_h = h_{reat} - (j_{an,ca} \times \eta_{an,ca}) + I^2 R_{ohm} \quad (36)$$

$$S_{e(SR)} = R_{SR} \times H_{SR} \quad (37)$$

$$S_{e(WGS)} = R_{WGS} \times H_{WGS} \quad (38)$$

۲-۱-۶- مومنتوم

رابطه (۳۹) معادله مؤمنتم را نشان می دهد. ترم چشمه معادله مؤمنتم در لایه های متخلخل مطابق رابطه (۴۰) حاصل می شود [۳۹، ۵۲].

$$\bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\bar{\nabla} P + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\nabla} \mu \bar{u}) + S_u \quad (39)$$

$$S_u = \frac{\varepsilon \mu}{K_p} \bar{u} \quad (40)$$

۲-۲- روش عددی و شرایط مرزی

شرط مرزی حرارتی دما ثابت برای دیوارهای خارجی و عدم لغزش برای تمامی دیواره ها، شرایط مرزی سرعت ورودی<sup>۱</sup> و شرط مرزی فشار خروجی به ترتیب در ورودی و خروجی کانال های سوخت و هوا در نظر گرفته شده است و شرایط مرزی پتانسیل یونی و الکترونی مطابق مرجع [۵۳] لحاظ شده است. در مورد معادله انتقال گونه ها، از شرط مرزی شار پخش صفر<sup>۲</sup>

نفوذ مؤثر گونه های گازی به صورت رابطه (۲۹) تخمین زده می شود.

$$\bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = \bar{\nabla} \cdot (\rho D_i^{eff} \bar{\nabla} Y_i) + S_i \quad (28)$$

$$D_i^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_i \quad (29)$$

۲-۱-۴- فاز پتانسیل

نیروی محرکه واکنش الکتروشیمیایی، اختلاف پتانسیل است؛ یعنی تفاوت بین پتانسیل فاز جامد (رسانای الکترون) و الکترولیت (رسانای یونی). معادلات پتانسیل فاز برای جامد و الکترولیت [۳۹] به ترتیب در رابطه (۳۰) و (۳۱) نشان داده شده است.

$$\bar{\nabla} \cdot (\sigma_{elec} \bar{\nabla} \sigma_{elec}) + S_{elec} = 0 \quad (30)$$

$$\bar{\nabla} \cdot (\sigma_{ionic} \bar{\nabla} \sigma_{ionic}) + S_{ionic} = 0 \quad (31)$$

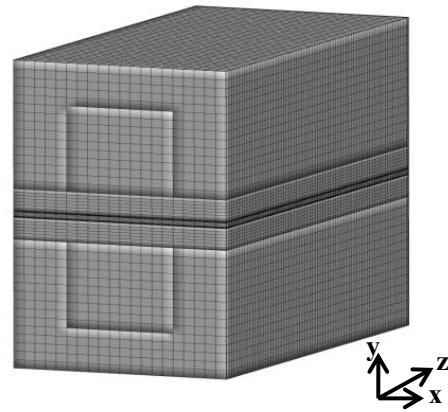
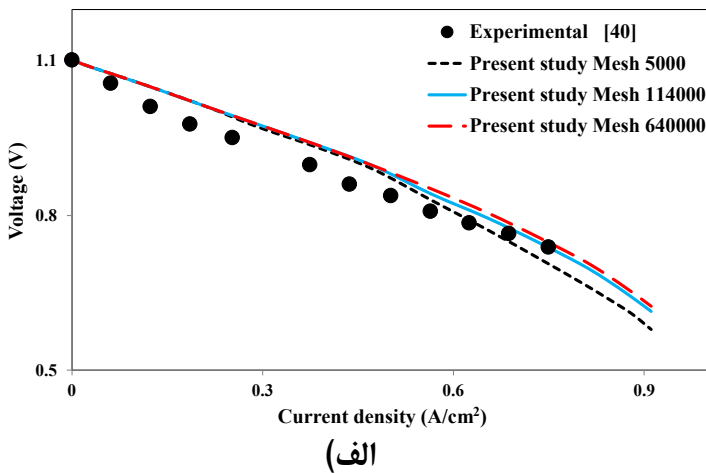
مطابق رابطه (۳۲) رسانایی یونی الکترولیت تابعی از دما در نظر گرفته می شود [۳۹]. همچنین ترم چشمه معادلات فاز پتانسیل از روابط (۳۳) و (۳۴) به دست می آید.

$$\sigma_{ionic} = \frac{100}{0.3685 + 0.002838e^{\left(\frac{10300}{T}\right)}} \quad (32)$$

$$S_{elec} = -j_{an,ca} \quad (33)$$

$$S_{ionic} = +j_{an,ca} \quad (34)$$

1 velocity inlet  
2 Zero diffusion flux



شکل ۳. الف) استقلال از شبکه و اعتبار سنجی پیل سوختی تغذیه شده با هیدروژن (ب) شبکه بندی پژوهش حاضر با ۱۱۴۰۰۰ سلول محاسباتی

Fig. 3. A) Independence from the grid and validation of a hydrogen-fed fuel cell, B) Current research grid with 114,000 computational cells

### ۲-۳- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

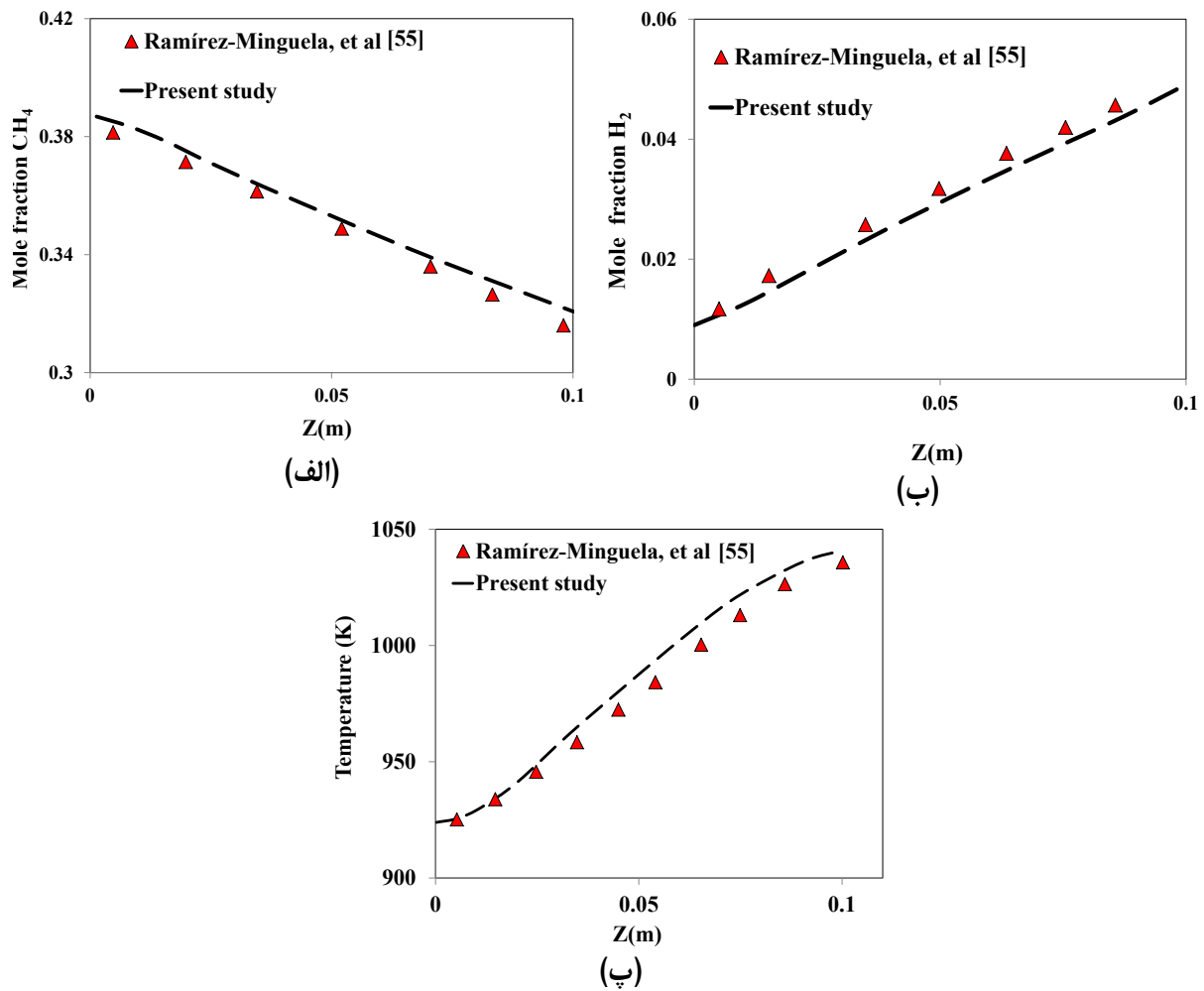
صحت سنجی شبیه سازی حاضر هم برای سوخت هیدروژن خالص و هم برای زیست گاز انجام پذیرفته است. در ابتدا سه شبکه بندی با تعداد کل سلول محاسباتی برابر با ۵۰۰۰، ۱۱۴۰۰۰ و ۶۴۰۰۰۰ ارائه شده است و نمودار قطبش شبیه سازی این سه شبکه بندی با نتایج تجربی مرجع [۴۰] در شکل ۳ الف مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود میزان اختلاف چگالی جریان تولیدی بین شبکه بندی با ۱۱۴۰۰۰ و ۶۴۰۰۰ سلول محاسباتی اندک است (کمتر از ۱ درصد)، بنابراین شبکه بندی با ۱۱۴۰۰۰ سلول محاسباتی به عنوان شبکه مناسب انتخاب می گردد. همچنین نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی تطابق قابل قبولی را نشان می دهد (با متوسط تفاوت حدود ۵ درصد). شماتیک شبکه بندی با تعداد سلول محاسباتی ۱۱۴۰۰۰ در شکل ۳ ب نشان داده شده است.

در ادامه شکل ۴ به مقایسه نتایج شبیه سازی حاضر و نتایج شبیه سازی مرجع [۵۵] برای سلول سوختی تغذیه شونده با بیوگاز به ازای چگالی توان  $1.05 \text{ W/m}^2$  می پردازد. مشخصات سلول سوختی و گازهای ورودی به آن در جدول ۱ لیست شده است. این مقایسه از نظر کسر مولی متان و کسر مولی هیدروژن (که در اثر واکنش های اصلاح بخار تولید شده است) و دما در امتداد محور طولی سلول صورت پذیرفته و به ترتیب در شکل های ۴ الف، ۴ ب و ۴ پ نشان داده شده است. این شکل ها نشان دهنده روندهای یکسان میان نتایج حاصل از کار حاضر و مرجع [۵۵] بوده و متوسط تفاوت های کمتر از ۵

در دیواره ها استفاده شده است و در ورودی سمت کاتد کسر مولی نیتروژن  $0.79$  و کسر مولی اکسیژن  $0.21$  در نظر گرفته شده است و در سمت آند، کسر مولی آب، متان و دی اکسید کربن بر اساس نوع سوخت و مقدار بخار به کربن تعیین می شود. برای مقداردهی اولیه سلول های محاسباتی، مقادیر تمامی غلظت ها و سرعت ها صفر و دما برابر با دمای عملکردی و فشار برابر با ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است.

شبیه سازی به کمک نرم افزار انسیس فلونت<sup>۱</sup> و با کمک کد نویسی<sup>۲</sup> انجام شده است. در کد نویسی با استفاده از اطلاعاتی نظیر دما و فشار جزئی هر یک از اجزا در هر سلول محاسباتی، مقدار نرخ واکنش اصلاح بخار و واکنش آب-گاز در هر تکرار<sup>۳</sup> برای هر المان محاسباتی محاسبه می گردد. سپس بر اساس نرخ های واکنش به دست آمده برای هر المان، ترم های چشمه مربوط به معادلات بقای جرم و انرژی محاسبه و اعمال می گردد. علاوه بر این از الگوریتم آپ ویند مرتبه دو و سیمپل<sup>۴</sup> [۵۴] به ترتیب برای گسسته سازی معادلات حاکم و کوپل معادله فشار-سرعت استفاده شده است. شرط همگرایی مقدار باقیمانده حل عددی کمتر از  $10^{-6}$  برای تمامی معادلات در نظر گرفته شده است.

- 1 ANSYS Fluent
- 2 UDF
- 3 iteration
- 4 second-order upwind scheme and SIMPLE algorithm



شکل ۴. اعتبار سنجی پیل سوختی تغذیه شده با بیوگاز در پژوهش حاضر الف) کسر مولی متان ب) کسر مولی هیدروژن ب) دما

Fig. 4. Validation of a biogas-fed fuel cell in the current research A) Methane molar fraction, B) Hydrogen molar fraction, C) Temperature

### ۳- بحث و بررسی نتایج

هدف از کار حاضر، تعیین نسبت بهینه بخار به سوخت (بیوگاز) در ورود پیل سوختی به صورت تابعی از دمای پیل سوختی و نوع بیوگاز (کسر مولی متان در بیوگاز) است. نسبت آب تزریقی به سوخت بیوگاز با پارامتر بخار به کربن<sup>۱</sup> مطابق رابطه (۴۱) تعریف می شود که  $X$  بیانگر کسر مولی اجزا است:

$$\frac{S}{C} = \frac{X_{H_2O}}{X_{CH_4} + X_{CO_2}} \quad (41)$$

درصد برای هیدروژن و متان و دما را نشان می دهد. با توجه به تعدد پارامترها و پیچیدگی مسئله اصلاح بخار توأم با واکنش های الکتروشیمیایی درون پیل سوختی، می توان این تطابق را قابل قبول در نظر گرفت. همچنین یکی از دلایل تفاوت را می توان به تفاوت کار حاضر با مرجع [۵۵] در شکل سطح مقطع کانال آند نسبت داد (در مرجع مذکور مقطع کانال آند ذوزنقه ای و در تحقیق حاضر مستطیلی فرض شده است). در عین حال، به منظور مقایسه ای منطقی، سطح مقطع مستطیلی در پژوهش حاضر به نحوی انتخاب شده است که سطح فعال واکنش (فصل مشترک آند و الکترولیت)، فصل مشترک کانال با لایه نفوذ گاز و همچنین مساحت سطح مقطع کانال آند با مرجع [۵۵] برابر باشد.

1 S/C=Steam/Carbon

جدول ۱. اطلاعات مطالعات موردی جهت اعتبار سنجی

Table 1. Case study information for validation purpose

مقدار	مشخصات نمونه مورد مطالعه
۵۳۰۰ [۵۵]	چگالی جریان تبدلی آند، ( $A/m^2$ )
۲۳۰۰ [۵۵]	چگالی جریان تبدلی کاتد، ( $A/m^2$ )
۰/۵ [۵۵]	ضریب انتقال بار آند/کاتد
۱۰۰	طول سلول، (mm)
۲/۴	عرض سلول، (mm)
۲	ارتفاع سلول، (mm)
۴۳	ضخامت لایه پخش آند، ( $\mu m$ )
۴۳	ضخامت لایه پخش کاتد، ( $\mu m$ )
۱۰	ضخامت الکترولیت، ( $\mu m$ )
۲۰	ضخامت لایه منطقه واکنشی آند/کاتد، ( $\mu m$ )
۰/۳ [۵۵]	ضریب تخلخل لایه پخش آند/کاتد
۰/۳ [۵۵]	ضریب تخلخل لایه واکنشی آند/کاتد
۱۲-۱۰ [۵۵]	ضریب نفوذپذیری لایه پخش و لایه واکنشی آند/کاتد
۶/۲۳ [۵۶]	هدایت حرارتی آند، ( $W/m K$ )
۹/۶ [۵۶]	هدایت حرارتی کاتد، ( $W/m K$ )
۲/۷ [۵۶]	هدایت حرارتی الکترولیت، ( $W/m K$ )
۱۳ [۵۶]	هدایت حرارتی جمع کننده جریان، ( $W/m K$ )
۳۳۳۳۳۰ [۵۵]	هدایت الکتریکی آند، ( $\Omega.m$ ) <sup>-1</sup>
۷۹۳۷ [۵۵]	هدایت الکتریکی کاتد، ( $\Omega.m$ ) <sup>-1</sup>
۶۵۰ [۵۶]	ظرفیت گرمایی ویژه آند، ( $J/kg.K$ )
۹۰۰ [۵۶]	ظرفیت گرمایی ویژه کاتد، ( $J/kg.K$ )

۳۰۰ [۵۶]	ظرفیت گرمایی ویژه الکترولیت، (J/kg.K)
۸۰۰ [۵۶]	ظرفیت گرمایی ویژه جمع کننده جریان، (J/kg.K)
۶۲۰۰ [۵۶]	چگالی آند، (kg/m <sup>3</sup> )
۶۰۰۰ [۵۶]	چگالی کاتد، (kg/m <sup>3</sup> )
۵۵۶۰ [۵۶]	چگالی الکترولیت، (kg/m <sup>3</sup> )
۷۷۰۰ [۵۶]	چگالی جمع کننده جریان، (kg/m <sup>3</sup> )
۴/۷۶*۱۰ [۵۵]	نرخ جریان گاز ورودی در آند، (kg/s)
۱	سرعت گاز ورودی در آند (پژوهش حاضر)، (m/s)
۹/۱۸*۱۰ [۵۵]	نرخ جریان گاز ورودی در کاتد، (kg/s)
۳	سرعت گاز ورودی در کاتد (پژوهش حاضر)، (m/s)
۱۰۷۳	دمای عملکردی، (K)
۱	فشار عملکردی، (bar)
۲۱%O <sub>2</sub> , ۷۹%N <sub>2</sub>	ترکیب گاز ورودی در کاتد، (کسر مولی)
مسیر مشترک	الگوی جریان‌ها در سلول

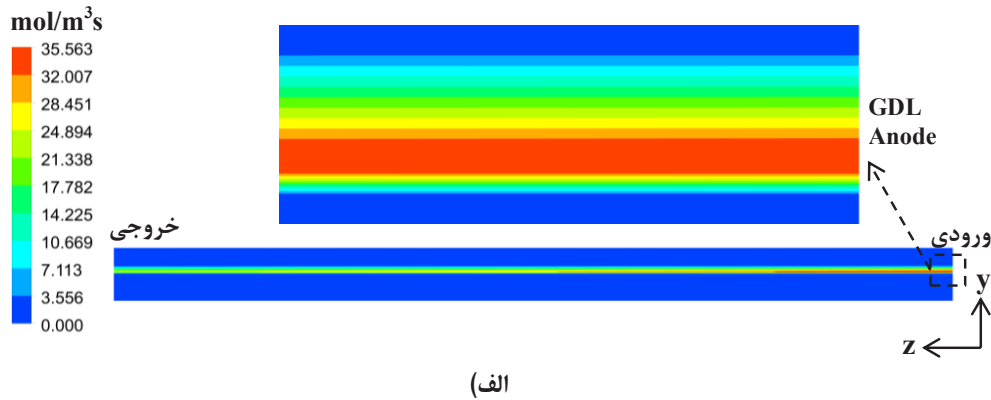
۳-۱- آنالیز عملکرد پیل سوختی اکسید جامد تغذیه شده با گاز بیو  
در این بخش، به بررسی عملکرد پیل سوختی تغذیه شده با بیوگاز در یک  
نمونه (دمای ۱۰۷۳ کلوین، ترکیب سوخت ۲ طبق «ب ۲»، ولتاژ ۰/۵ ولت  
و نسبت بخار به کربن برابر با ۱) در نظر گرفته شده است.  
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نرخ واکنش اصلاح بخار، آب-گاز و  
کسر مولی گونه‌های شیمیایی را در منطقه محاسباتی به تصویر می‌کشد.  
همان‌طور که در شکل ۵الف مشاهده می‌شود نرخ واکنش اصلاح بخار در  
امتداد سلول (از جهت ورودی به سمت خروجی) کاهش می‌یابد که دلیل  
اصلی آن مصرف متان و کاهش غلظت آن (همان‌طور که در شکل ۶الف  
مشاهده می‌شود) است.  
نحوه تغییرات نرخ واکنش آب-گاز در شکل ۵ب نشان داده شده است.  
برخلاف نرخ اصلاح بخار، نرخ واکنش آب-گاز در امتداد پیل سوختی افزایش

بررسی به ازای ترکیبات مختلف بیوگاز انجام می‌گیرد. به‌طور کلی بیوگاز  
از ۳۵ تا ۷۵ درصد مولی متان و ۲۵ تا ۵۰ درصد مولی دی‌اکسید کربن (و  
مقدار بسیار کمی گونه‌های دیگر نظیر نیتروژن، هیدروژن سولفات، آمونیاک  
و بخار آب که از آن‌ها صرف نظر می‌شود) تشکیل شده است [۵۷، ۵۸]. در این  
پژوهش به‌منظور از دو نوع بیوگاز با مقادیر مختلف متان (با کسر مولی ۴۵ و  
۶۵ درصد) مطابق جدول ۲ در سه دمای عملکردی مختلف (۸۷۳، ۱۰۷۳ و  
۱۲۷۳ کلوین) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین بازه تغییرات بخار به کربن  
تا حد امکان وسیع (بین ۰/۲ الی ۲) در نظر گرفته شده است.  
در ادامه در بخش ۱-۳ به تشریح نتایج شبیه‌سازی پیل سوختی تغذیه شده  
با بیوگاز به ازای یک نمونه مشخص پرداخته شده است و در بخش ۲-۳ تأثیر  
پارامترهای دما، بخار به کربن و ترکیب نوع سوخت بر عملکرد پیل سوختی  
با در نظرگیری قید ته‌نشینی کربن مورد توجه قرار می‌گیرد.

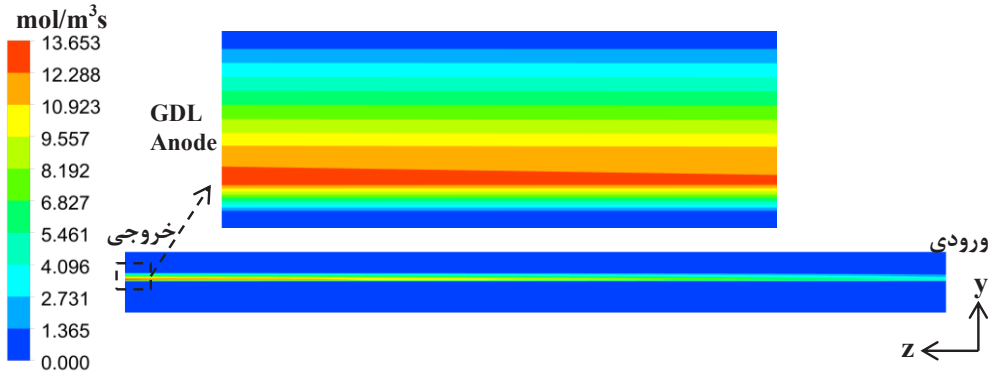
جدول ۲. انواع نوع سوخت و ترکیبات آن‌ها

Table 2. Types of fuel and their compositions

ترکیبات (کسر مولی)	نوع بیوگاز
٪۴۵ CH <sub>4</sub> , ٪۵۵ CO <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> =۰/۸۲)	۱
٪۶۵ CH <sub>4</sub> , ٪۳۵ CO <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> =۱/۸۵)	۲



(الف)



(ب)

شکل ۵. الف) کانتور نرخ واکنش اصلاح بخار در پیل سوختی ب) کانتور نرخ واکنش آب-گاز در پیل

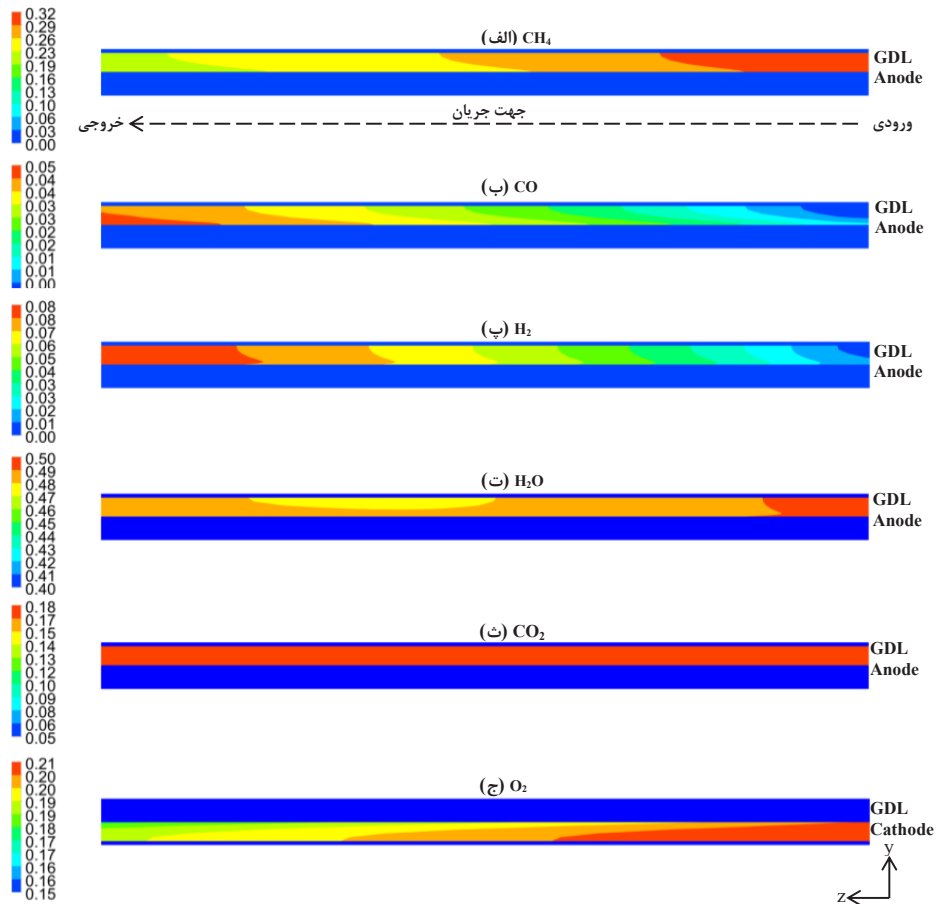
Fig. 5. A) Contour plot of steam reforming reaction rate in the fuel cell, B) Contour plot of water-gas shift reaction rate in the fuel cell

شکل ۶ پ کسر مولی هیدروژن را نشان می‌دهد که در امتداد پیل سوختی افزایش یافته است. در واقع علت این روند افزایشی آن است که نرخ تولید هیدروژن توسط واکنش‌های اصلاح بخار و واکنش آب-گاز بیشتر از میزان مصرف توسط واکنش الکتروشیمیایی بوده است.

شکل ۷ نحوه تغییرات کسر مولی آب در امتداد سلول را نشان می‌دهد. کاهش ابتدایی آب عمدتاً ناشی از مصرف آن در واکنش اصلاح

می‌یابد. نرخ واکنش آب-گاز به غلظت گونه‌های مونواکسید کربن و آب وابسته است. به علت عدم وجود مونواکسید کربن به همراه بیوگاز در ورود به پیل سوختی، نرخ واکنش آب-گاز در ابتدای سلول حداقل است (حداقل بودن کسر مولی مونواکسید کربن در ابتدای سلول در شکل ۶ قابل مشاهده است)؛ اما در ادامه، با افزایش تولید مونواکسید کربن در اثر واکنش اصلاح بخار، نرخ واکنش آب-گاز افزایش می‌یابد.





شکل ۶. کانتور تغییرات کسر مولی گونه‌های شیمیایی در امتداد پیل سوختی (الف) متان، (ب) منو اکسید کربن، (پ) هیدروژن، (ت) آب، (ث) دی اکسید کربن، (ج) اکسیژن

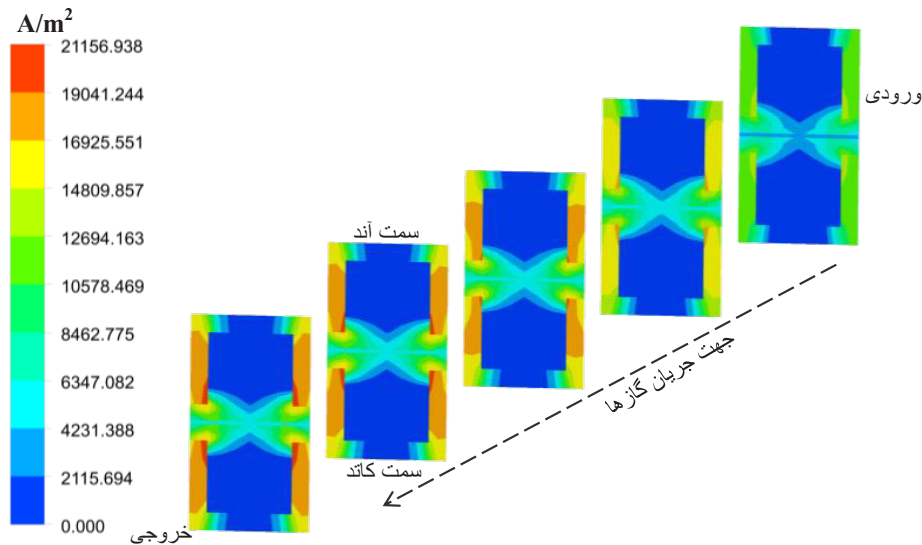
Fig. 6. Contour plot of molar fraction of chemical species along the fuel cell A) Methane, B) Carbon monoxide, C) Hydrogen, D) Water, E) Carbon dioxide, F) Oxygen

۳-۲- عملکرد پیل سوختی تحت شرایط مختلف عملکردی (دما، نوع سوخت و بخار به کربن)

در شکل ۸ چگالی توان پیل سوختی در شرایط مختلف عملکردی (نوع بیوگاز، دمای عملکردی و نسبت بخار به کربن) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود (صرف‌نظر از نوع سوخت و دما) با افزایش بخار به کربن میزان چگالی توان ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارتی یک‌میزان بهینه در (بخار به کربن) های میانی وجود دارد. دلیل این امر آن است که میزان پایین بخار آب (که معادل است با میزان پایین بخار به کربن) در سوخت ورودی منجر به افت نرخ واکنش‌های اصلاحی شده و تولید هیدروژن را کاهش و در نتیجه منجر به افت عملکرد پیل می‌شود. همچنین مقادیر بالای بخار آب (که معادل است با میزان بخار به کربن بالا) به معنی کاهش غلظت متان در ورودی به پیل و بنابراین کاهش پتانسیل تولید هیدروژن است که منجر به افت عملکرد پیل خواهد شد.

بخار است. لازم به ذکر است اگرچه واکنش آب-گاز مصرف‌کننده آب است اما مقایسه شکل ۵الف و ب نشان می‌دهد که نرخ واکنش اصلاح بخار غالب است. در نیمه دوم پیل به دلیل کاهش نرخ واکنش اصلاح بخار و تولید آب در اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی، افزایش کسر مولی آب مشاهده می‌شود. شکل ۶ت تغییرات کسر مولی دی‌اکسید کربن را در امتداد پیل سوختی نشان می‌دهد که به دلیل تولید به‌واسطه واکنش آب-گاز روند آهسته افزایشی را نشان می‌دهد. در نهایت، شکل ۶ج تغییرات کسر مولی اکسیژن در سمت کاتد را نشان می‌دهد که در اثر مصرف به‌واسطه واکنش‌های الکتروشیمیایی روندی کاهشی دارد.

شکل ۷ کانتور چگالی جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در امتداد پیل سوختی به‌واسطه تولید هیدروژن ناشی از واکنش‌های اصلاحی (آب و آب-گاز) و بنابراین افزایش غلظت مولی هیدروژن (با توجه به شکل ۶پ)، میزان چگالی جریان افزایش یافته است.



شکل ۷. کانتور چگالی جریان در پیل سوختی

Fig. 7. Contour plot of current density in the fuel cell

نمود که با افزایش دما نرخ واکنش اصلاح بخار زیاد شده [۴۵، ۲۵] و به تبع آن هیدروژن بیشتری تولید می‌شود. تولید بیشتر هیدروژن به واسطه افزایش نرخ اصلاح بخار و همچنین تأثیر مستقیم دما بر واکنش‌های الکتروشیمیایی [۵۹-۶۱]، هر دو باعث تقویت واکنش‌های الکتروشیمیایی شده و بنابراین منجر به تولید آب بیشتر می‌شود که این امر بخشی از نیاز آب را تأمین می‌نماید.

در فرایند اصلاح بیوگاز، بر اساس مشاهدات تجربی واکنش‌های ناخواسته دیگری نظیر شکست<sup>۱</sup> و کاهش منواکسید کربن<sup>۲</sup> نیز رخ می‌دهد [۶۳، ۶۲]. واکنش‌های مذکور، به دلیل تولید کربن، می‌توانند منجر به ته‌نشینی کربن بر روی لایه آند شده و در نتیجه منجر به انسداد<sup>۳</sup> مسیر جریان گاز و غیرفعال شدن الکتروود شوند. نرخ تولید کربن وابسته به ترکیب سوخت ورودی و همچنین دمای عملکردی است. با افزایش نسبت بخار به سوخت در ورودی به پیل، میزان نرخ تولید کربن نیز کاهش می‌یابد [۶۳]. بر اساس تحقیقات پیشین معیاری برای تشخیص قرارگیری در ناحیه غیرمجاز یا مجاز (از نقطه نظر ته‌نشینی کربن) به صورت شکل ۹ و با نام مثلث گیبس<sup>۴</sup> تعیین شده است [۶۴]. در این شکل متان خالص، دی‌اکسید کربن خالص، و آب خالص

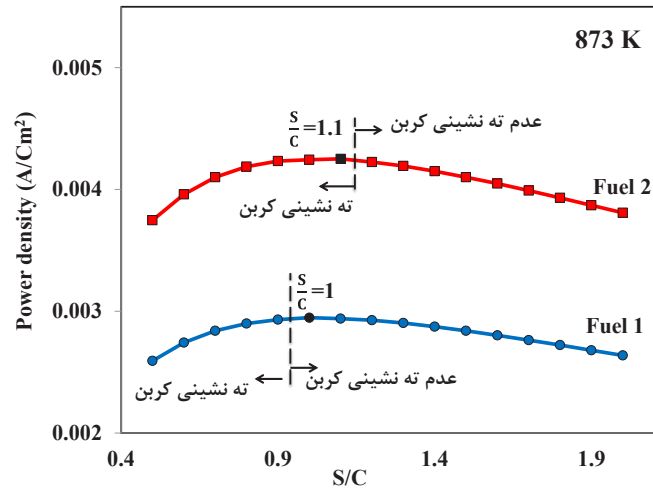
شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد (صرف‌نظر از دما و نسبت بخار به کربن) با افزایش نسبت متان به دی‌اکسید کربن در بیوگاز (از سوخت نوع ۱ به ۲)، به عبارتی با افزایش غلظت متان در سوخت، نرخ واکنش‌های اصلاحی و پتانسیل تولید هیدروژن افزایش یافته و عملکرد پیل بهبود می‌یابد.

شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد با افزایش دما (صرف‌نظر از نوع سوخت و نسبت بخار به کربن) به دلیل افزایش محسوس نرخ واکنش‌های اصلاحی و تولید بیشتر هیدروژن، افزایش نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی (طبق معادله بالتر-ولمر) و بهبود هدایت یونی الکترولیت، عملکرد پیل سوختی بهبود یافته است.

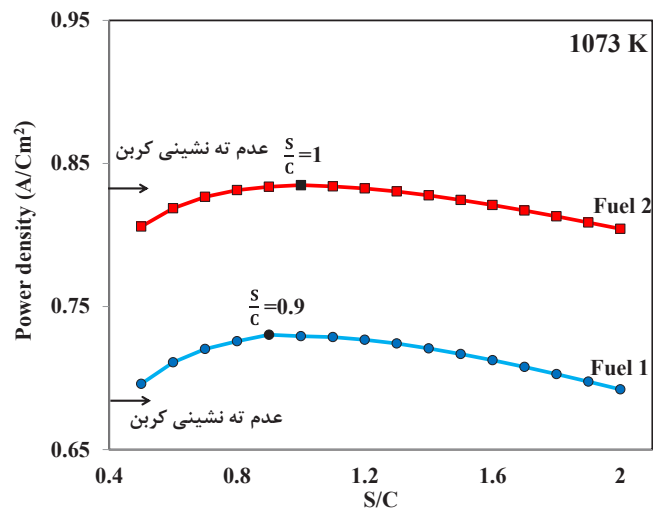
نکته حائز اهمیت دیگر در شکل ۸ آن است که با افزایش نسبت (دی‌اکسید کربن/متان) در سوخت (بیوگاز با غلظت بالاتر متان)، مقادیر بخار به کربن بهینه (که منجر به بیشترین توان تولیدی می‌شود)، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در دمای ۱۰۷۳ کلوین شکل ۸، با تغییر نوع سوخت از سوخت ۱ (سوخت با غلظت متان کم) به سوخت ۲ (سوخت با غلظت متان زیاد)، بخار به کربن بهینه از ۰/۹ به ۱ افزایش یافته است. دلیل این امر، آن است که به‌واسطه مقادیر بالاتر متان، مقادیر بیشتری آب برای واکنش‌های اصلاحی لازم است.

شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش دما، میزان بخار به کربن بهینه کاهش یافته است. دلیل این مشاهده را می‌توان این‌گونه توصیف

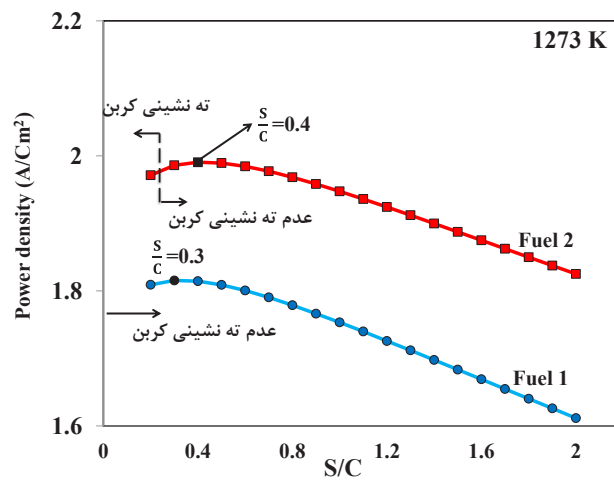
- 1 cracking
- 2 CO reduction
- 3 Blockage
- 4 Gibbs



(الف)



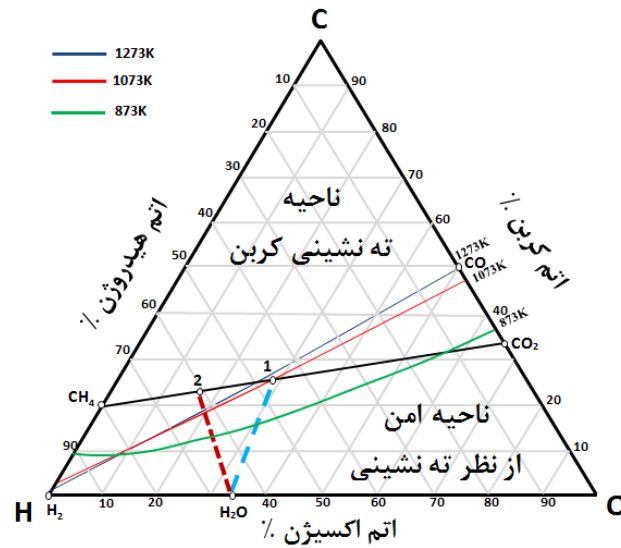
(ب)



(پ)

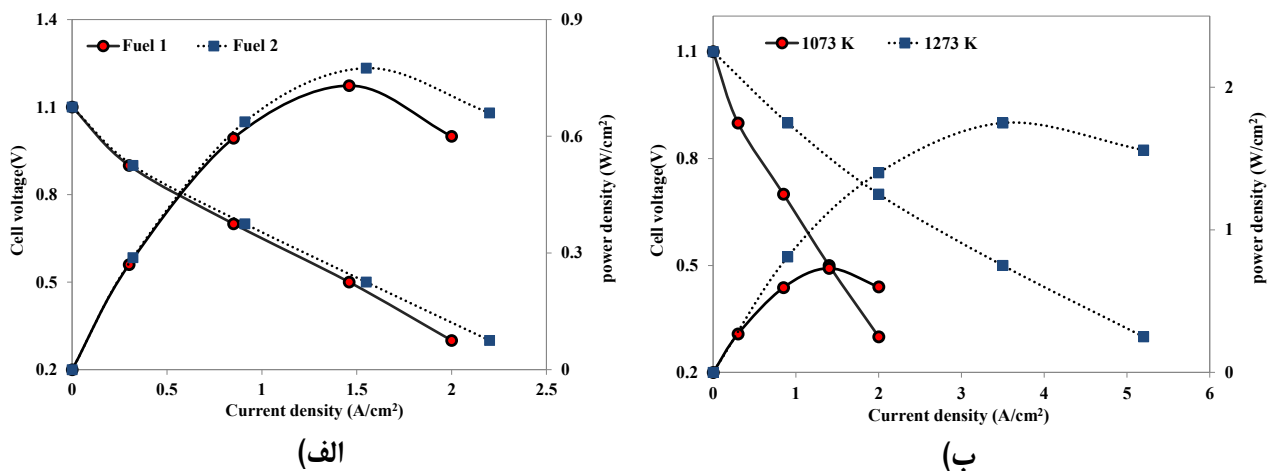
شکل ۸. تأثیر مقدار بخار به کربن بر عملکرد پیل سوختی در شرایط عملکردی مختلف (دمای عملکردی و نوع بیوگاز)

Fig. 8. The effect of carbon-to-steam ratio on the performance of the fuel cell under various operating conditions (operational temperature and type of biogas)



شکل ۹. مثلث گیبس برای تعیین ناحیه ته نشینی کربن در دماهای مختلف بر اساس مرجع [۶۴]

Fig. 9. Gibbs triangle to determine the carbon deposition region at different temperatures based on reference [64]



شکل ۱۰. مقایسه منحنی چگالی توان و قطبش (الف) تاثیر نوع سوخت (ب) تاثیر دما

Fig. 10. Comparison of power density and polarization curves A) Effect of fuel type, B) Effect of temperature

لازم است مقدار بهینه بخار به کربن با توجه به این امر اصلاح شوند. در دمای ۸۷۳ کلوین و به ازای سوخت نوع ۲، بخار به کربن بهینه برابر با ۱/۱ در محدوده غیرمجاز قرار می‌گیرد و بنابراین بخار به کربن بعدی یعنی ۱/۲ به عنوان مقدار بهینه لحاظ می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر نوع سوخت و دما در طیف گسترده‌ای از ولتاژها، منحنی‌های چگالی توان و قطبش برای ترکیب بیوگاز نوع ۱ (۴۵٪ متان) و ۲ (۶۵٪ متان) و همچنین در دو دمای ۱۰۷۳ و ۱۲۷۳ کلوین در شکل ۱۰

به صورت یک نقطه نشان داده شده‌اند. همچنین مکان هندسی سوخت توأم با بخار، روی خطوط واصل سوخت مورد نظر و بخار آب قرار می‌گیرد. همچنین خطوط جداکننده نواحی مجاز و غیرمجاز (به ازای دماهای متفاوت) در شکل نشان داده شده است.

بر اساس معیار نمایش داده شده در شکل ۹، محدوده غیرمجاز از نظر ته نشینی کربن در شکل ۸ توسط خط چین مشخص شده است. با توجه به این شکل یکی از نقاط بهینه در محدوده غیرمجاز قرار گرفته است بنابراین

- بخار به کربن بهینه با افزایش غلظت متان در بیوگاز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در دمای عملکردی ۱۰۷۳ کلوین، مقدار بهینه بخار به کربن برای سوخت بیوگاز با کسر مولی متان ۰/۴۵ برابر ۰/۹ و برای سوخت بیوگاز با کسر مولی متان ۰/۶۵ برابر ۱ بوده است.
- نتایج نشان می‌دهد ریسک ته‌نشینی کربن در دماهای پایین و سوخت‌های با غلظت بالاتر متان بیشتر است. به‌طوری‌که در دمای ثابت ۸۷۳ کلوین، به ازای سوخت بیوگاز با کسر مولی متان ۰/۶۵ نسبت‌های بخار به سوخت کمتر از ۱/۱، منجر به ته‌نشینی کربن می‌شود و باید مقدار بهینه را به ۱/۲ افزایش داد.

### ۵- فهرست علائم

C	غلظت مولی، $\text{Kmol/m}^3$
$C_p$	ظرفیت حرارتی ویژه، $\text{J/kg.K}$
D	ضریب نفوذ، $\text{m}^2/\text{s}$
F	ثابت فارادی، $\text{C/mol}$
GDL	لایه پخش گاز
$H_i$	آنتالپی واکنش، $\text{J/mol}$
I	جریان، A
j	چگالی جریان انتقالی، $\text{A/m}^2$
K	رسانایی گرمایی، $\text{W/m.K}$
$K_p$	نفوذپذیری، $\text{m}^2$
$K_{SF}$	ثابت اول واکنش آب-گاز، $\text{mol/m}^3.\text{Pa}^2$
$K_{PS}$	ثابت دوم واکنش آب-گاز
$K_{rf}$	ثابت اول واکنش اصلاح بخار، $\text{mol/m}^3.\text{Pa}^2$
$K_{pr}$	ثابت دوم واکنش اصلاح بخار
M	وزن مولی، $\text{kg/Kmol}$
P	فشار، KPa
$P_i$	فشار جزئی، Pa
R	ثابت جهانی گاز، $\text{KJ/Kmol.K}$
$R_{SR}$	نرخ واکنش اصلاح بخار، $\text{mol/m}^3.\text{s}$
$R_{WGS}$	نرخ واکنش آب-گاز، $\text{mol/m}^3.\text{s}$
$S_i$	ترم چشمه معادله اجزاء، $\text{Kg/m}^3\text{s}$
$S_e$	ترم چشمه معادله انرژی، $\text{W/m}^3\text{s}$
T	دما، K
TPB	ناحیه سه فازی
$\vec{u}$	بردار سرعت، $\text{m/s}$
V	ولتاژ، V
X	کسر مولی
Y	کسر جرمی

رسم شده است. مقدار بخار به کربن ثابت و برابر با یک و چهار ولتاژ (۰/۳) ، ۰/۵ ، ۰/۷ و ۰/۹) ولت به‌عنوان ولتاژهای میانی برای رسم منحنی‌ها در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۰ الف که نشان‌دهنده تأثیر نوع سوخت است، مشاهده می‌شود که در تمامی ولتاژها، توان تولیدی برای سوخت نوع دوم (با غلظت متان بیشتر) نسبت به سوخت نوع اول بیشتر است و مقدار این تفاوت در ولتاژهای کم تقویت می‌شود. همچنین بیشتر توان تولیدی در هر دو سوخت در ولتاژ ۰/۵ ولت حاصل شده است.

در شکل ۱۰ ب که نشان‌دهنده تأثیر دمای عملکردی است، مشاهده می‌شود که در تمامی ولتاژها، توان تولیدی در دمای ۱۲۷۳ کلوین به میزان قابل توجهی بیشتر از دمای ۱۰۷۳ کلوین می‌باشد و میزان اختلاف در ولتاژهای پایین به شدت افزایش یافته است. در دماهای مختلف نیز بیشینه توان تولیدی در ولتاژ ۰/۵ ولت حاصل شده است.

### ۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به تعیین مقدار بهینه نسبت بخار به سوخت در یک پیل سوختی اکسید جامد به‌صورت مستقیم تغذیه شونده با بیوگاز پرداخته است. توسعه مدل سه‌بعدی، از طریق الحاق واکنش‌های اصلاح بخار و آب-گاز به دستگاه معادلات انتقال گونه‌ها، جرم و انرژی داخل پیل سوختی، درون محیط نرم‌افزار فلونت و به کمک کد نویسی صورت پذیرفت. با در نظرگیری قید عدم ته‌نشینی کربن، مقدار بهینه نسبت آب به بخار به ازای ترکیبات متفاوت بیوگاز (۱/۸۵ < متان < ۰/۸۲) و دماهای مختلف ۸۷۳-۱۲۷۳ کلوین صورت پذیرفت. نتایج را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

- به‌طور کلی با افزایش دمای عملکردی نرخ واکنش‌های اصلاحی به شدت افزایش می‌یابد و این امر سبب مصرف سریع‌تر متان و تولید هیدروژن بیشتر و به تبع آن تولید چگالی جریان بیشتر در درون پیل سوختی می‌گردد.
- افزایش غلظت متان در سوخت ورودی نیز سبب افزایش نرخ واکنش‌های اصلاحی و تولید هیدروژن بیشتر در سمت آند و افزایش چگالی جریان تولیدی شده است.
- افزایش دمای عملکردی مقدار بخار به کربن بهینه کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، در دمای ۸۷۳ کلوین مقدار بخار به کربن بهینه برای ترکیبات متفاوت بیوگاز در محدوده (۱-۱/۲) است، درحالی‌که در دمای عملکردی ۱۲۷۳ به ترتیب در محدوده (۰/۳-۰/۴) است.

biomass fuel on load characteristics of an intermediate-temperature solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22) (2016) 9563-9576.

- [7] C.O. Colpan, I. Dincer, F. Hamdullahpur, Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(7) (2007) 787-795.
- [8] T. Zhao, *Micro fuel cells: principles and applications*, Academic Press, 2009.
- [9] Y. Shiratori, T. Oshima, K. Sasaki, Feasibility of direct-biogas SOFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21) (2008) 6316-6321.
- [10] V. Evely, W. Karunkeyoon, P. Rodgers, A. Al Alili, Energy, exergy and economic analysis of an integrated solid oxide fuel cell–gas turbine–organic Rankine power generation system, *International journal of hydrogen energy*, 41(31) (2016) 13843-13858.
- [11] M. Ni, D.Y. Leung, M.K. Leung, Mathematical modeling of ammonia-fed solid oxide fuel cells with different electrolytes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20) (2008) 5765-5772.
- [12] M. Liu, R. Peng, D. Dong, J. Gao, X. Liu, G. Meng, Direct liquid methanol-fueled solid oxide fuel cell, *Journal of Power Sources*, 185(1) (2008) 188-192.
- [13] n. Kousheshi, M. Yari, A. Saberi Mehr, Investigation of Performance and Emission Characteristic of a Reactivity Controlled Compression Ignition Engine Fueled By a Mixture of Diesel and Syngas Derived From Biomass Gasification, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(1) (2021) 17-30.
- [14] H. Timmermann, W. Sawady, R. Reimert, E. Ivers-Tiffée, Kinetics of (reversible) internal reforming of methane in solid oxide fuel cells under stationary and APU conditions, *Journal of Power Sources*, 195(1) (2010) 214-222.
- [15] N. Laosiripojana, S. Assabumrungrat, Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: The possible use of these fuels in internal reforming SOFC, *Journal of Power Sources*, 163(2) (2007) 943-

علائم یونانی	
$\alpha$	ضریب انتقال شارژ الکتریکی
$\gamma$	ضریب وابستگی به غلظت
$\epsilon$	ضریب تخلخل
$\eta$	حد-پتانسیل
$\mu$	ویسکوزیته، kg/m.s
$\xi$	سطح فعال واکنشی، 1/m
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	رسانایی الکتریکی، 1/ ( $\Omega$ .m)
$\varphi$	فاز پتانسیل، V
زیرنویس	
An	آند
Ca	کاتد
elec	الکتریکی
i	اجزا گازی
Mix	مخلوط
OC	مدار باز
React	واکنش

## منابع

- [1] J. Xuan, M.K. Leung, D.Y. Leung, M. Ni, A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7) (2009) 1301-1313.
- [2] A.B. Stambouli, E. Traversa, Fuel cells, an alternative to standard sources of energy, *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(3) (2002) 295-304.
- [3] S.C. Singhal, K. Kendall, *High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications*, Elsevier, 2003.
- [4] M. Ni, D.Y. Leung, M.K. Leung, Modeling of methane fed solid oxide fuel cells: comparison between proton conducting electrolyte and oxygen ion conducting electrolyte, *Journal of Power Sources*, 183(1) (2008) 133-142.
- [5] Q. Ma, R. Peng, Y. Lin, J. Gao, G. Meng, A high-performance ammonia-fueled solid oxide fuel cell, *Journal of power sources*, 161(1) (2006) 95-98.
- [6] X. Lv, C. Gu, X. Liu, Y. Weng, Effect of gasified

- 85(3) (2006) 323-332.
- [25] E. Vakouftsi, G. Marnellos, C. Athanasiou, F. Coutelieres, CFD modeling of a biogas fuelled SOFC, *Solid State Ionics*, 192(1) (2011) 458-463.
- [26] E. Vakouftsi, G. Marnellos, C. Athanasiou, F. Coutelieres, A detailed model for transport processes in a methane fed planar SOFC, *Chemical Engineering Research and Design*, 89(2) (2011) 224-229.
- [27] M. Borji, S. Ghorbani, K. Atashkari, A. Etemadi, Numerical Investigation of Integrated Biomass Gasification and Planar Solid Oxide Fuel Cell, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(1) (2017) 219-230.
- [28] S. Saleh Mirhasani, S. Jafarmadar, S. Khalilarya, A. Chitsaz, Exergoeconomic Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Based Trigeneration System with External Reformer and Dimethyl Ether, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(6) (2019) 1463-1478.
- [29] K. Chouhan, S. Sinha, S. Kumar, S. Kumar, Utilization of biogas from different substrates for SOFC feed via steam reforming: Thermodynamic and exergy analyses, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2) (2019) 103018.
- [30] P. Piroonlerkgul, S. Assabumrungrat, N. Laosiripojana, A. Adesina, Selection of appropriate fuel processor for biogas-fuelled SOFC system, *Chemical Engineering Journal*, 140(1-3) (2008) 341-351.
- [31] N. Chatrattanawet, D. Saebea, S. Authayanun, A. Arpornwichanop, Y. Patcharavorachot, Performance and environmental study of a biogas-fuelled solid oxide fuel cell with different reforming approaches, *Energy*, 146 (2018) 131-140.
- [32] T. Nishino, J.S. Szmyd, Numerical analysis of a cell-based indirect internal reforming tubular SOFC operating with biogas, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 7(5) (2010).
- [33] Y. Wang, L. Wehrle, A. Banerjee, Y. Shi, O. Deutschmann, Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling, *Renewable energy*, 163 (2021) 78-87.
- 951.
- [16] C. Guerra, A. Lanzini, P. Leone, M. Santarelli, D. Beretta, Experimental study of dry reforming of biogas in a tubular anode-supported solid oxide fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25) (2013) 10559-10566.
- [17] A. Galvagno, V. Chiodo, F. Urbani, F. Freni, Biogas as hydrogen source for fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10) (2013) 3913-3920.
- [18] A. Lanzini, P. Leone, Experimental investigation of direct internal reforming of biogas in solid oxide fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(6) (2010) 2463-2476.
- [19] Y. Wang, F. Yoshiba, M. Kawase, T. Watanabe, Performance and effective kinetic models of methane steam reforming over Ni/YSZ anode of planar SOFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9) (2009) 3885-3893.
- [20] J.R. Rostrup-Nielsen, J. Sehested, J. Noerskov, Hydrogen and Synthesis Gas by Steam and CO<sub>2</sub> Reforming, *Cheminform*, 34 (2003).
- [21] J. Ashok, S. Das, N. Dewangan, S. Kawi, Steam reforming of surrogate diesel model over hydrotalcite-derived MO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M= Ni & Co) catalysts for SOFC applications, *Fuel*, 291 (2021) 120194.
- [22] T. Nguyen, M. Sakamoto, T. Uchida, D. Doan, M. Dang, P. Tu, K. Sasaki, Y. Shiratori, Development of paper-structured catalyst for application to direct internal reforming solid oxide fuel cell fueled by biogas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(21) (2019) 10484-10497.
- [23] J. Kihlman, J. Sucipto, N. Kaisalo, P. Simell, J. Lehtonen, Carbon formation in catalytic steam reforming of natural gas with SOFC anode off-gas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(3) (2015) 1548-1558.
- [24] N. Laosiripojana, W. Sangtongkitcharoen, S. Assabumrungrat, Catalytic steam reforming of ethane and propane over CeO<sub>2</sub>-doped Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at SOFC temperature: Improvement of resistance toward carbon formation by the redox property of doping CeO<sub>2</sub>, *Fuel*,

- [43] M. Ni, Modeling of SOFC running on partially pre-reformed gas mixture, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2) (2012) 1731-1745.
- [44] B. Haberman, J. Young, Three-dimensional simulation of chemically reacting gas flows in the porous support structure of an integrated-planar solid oxide fuel cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(17-18) (2004) 3617-3629.
- [45] M. Ni, Modeling and parametric simulations of solid oxide fuel cells with methane carbon dioxide reforming, *Energy Conversion and Management*, 70 (2013) 116-129.
- [46] M.W. Chase, N.I.S. Organization, NIST-JANAF thermochemical tables, American Chemical Society Washington, DC, 1998.
- [47] H. Bouwmeester, P.J. Gellings, *The CRC handbook of solid state electrochemistry*, 1997.
- [48] M.H. Akbari, B. Rismanchi, Numerical investigation of flow field configuration and contact resistance for PEM fuel cell performance, *Renewable Energy*, 33(8) (2008) 1775-1783.
- [49] S. Nagata, A. Momma, T. Kato, Y. Kasuga, Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer, *Journal of Power Sources*, 101(1) (2001) 60-71.
- [50] Q. Wang, L. Li, C. Wang, Numerical study of thermoelectric characteristics of a planar solid oxide fuel cell with direct internal reforming of methane, *Journal of Power Sources*, 186(2) (2009) 399-407.
- [51] Z. Zhang, D. Yue, G. Yang, J. Chen, Y. Zheng, H. Miao, W. Wang, J. Yuan, N. Huang, Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in multi-channel anode-supported planar SOFCs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84 (2015) 942-954.
- [52] M. Hussain, X. Li, I. Dincer, Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, 161(2) (2006) 1012-1022.
- [53] M.E. Chelmehsara, J. Mahmoudimehr, Techno-economic comparison of anode-supported, cathode-supported, and electrolyte-supported SOFCs, *International journal of*
- [34] V. Chiodo, A. Galvagno, A. Lanzini, D. Papurello, F. Urbani, M. Santarelli, S. Freni, Biogas reforming process investigation for SOFC application, *Energy Conversion and Management*, 98 (2015) 252-258.
- [35] B. Tjaden, M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, M. Jarvinen, Small-scale biogas-SOFC plant: technical analysis and assessment of different fuel reforming options, *Energy & fuels*, 28(6) (2014) 4216-4232.
- [36] K.-W. Lin, H.-W. Wu, Hydrogen-rich syngas production and carbon dioxide formation using aqueous urea solution in biogas steam reforming by thermodynamic analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20) (2020) 11593-11604.
- [37] O. Razbani, M. Assadi, M. Andersson, Three dimensional CFD modeling and experimental validation of an electrolyte supported solid oxide fuel cell fed with methane-free biogas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(24) (2013) 10068-10080.
- [38] D. Saebea, A. Arpornwichanop, Y. Patcharavorachot, Thermodynamic analysis of a proton conducting SOFC integrated system fuelled by different renewable fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(20) (2021) 11445-11457.
- [39] Z. Qu, P. Aravind, S. Boksteen, N. Dekker, A. Janssen, N. Woudstra, A. Verkooijen, Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of anode-supported planar SOFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16) (2011) 10209-10220.
- [40] Z. Zhang, D. Yue, C. He, S. Ye, W. Wang, J. Yuan, Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena in anode-supported planar SOFCs, *Heat and Mass Transfer*, 50(11) (2014) 1575-1586.
- [41] H. Hesami, M. Borji, J. Rezapour, Three-Dimensional Numerical Study of Solid Oxide Fuel Cell Performance with Converging Diverging Flow Field, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(3) (2022) 589-614.
- [42] M. Ni, Electrolytic effect in solid oxide fuel cells running on steam/methane mixture, *Journal of Power Sources*, 196(4) (2011) 2027-2036.



- tubular solid oxide fuel cell (SOFC), *Journal of Power Sources*, 192(2) (2009) 414-422.
- [60] L.A. Chick, O.A. Marina, C.A. Coyle, E.C. Thomsen, Effects of temperature and pressure on the performance of a solid oxide fuel cell running on steam reformat of kerosene, *Journal of power sources*, 236 (2013) 341-349.
- [61] H. Djamel, A. Hafsia, Z. Bariza, B.M. Hocine, O. Kafia, Thermal field in SOFC fed by hydrogen: Inlet gases temperature effect, *International journal of hydrogen energy*, 38(20) (2013) 8575-8583.
- [62] S.A. Saadabadi, A.T. Thattai, L. Fan, R.E. Lindeboom, H. Spanjers, P. Aravind, Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints, *Renewable Energy*, 134 (2019) 194-214.
- [63] S. Araki, N. Hino, T. Mori, S. Hikazudani, Autothermal reforming of biogas over a monolithic catalyst, *Journal of Natural Gas Chemistry*, 19(5) (2010) 477-481.
- [64] Z. Jaworski, B. Zakrzewska, P. Pianko-Oprych, On thermodynamic equilibrium of carbon deposition from gaseous CHO mixtures: updating for nanotubes, *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3) (2017) 217-235.
- hydrogen energy, 43(32) (2018) 15521-15530.
- [54] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publ, Corp., New York, 58 (1980) 288.
- [55] J. Ramírez-Minguela, V. Rangel-Hernández, J. Alfaro-Ayala, A. Uribe-Ramírez, J. Mendoza-Miranda, J. Belman-Flores, B. Ruiz-Camacho, Energy and entropy study of a SOFC using biogas from different sources considering internal reforming of methane, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120 (2018) 1044-1054.
- [56] Y. Yang, G. Wang, H. Zhang, W. Xia, Comparison of heat and mass transfer between planar and MOLB-type SOFCs, *Journal of Power Sources*, 177(2) (2008) 426-433.
- [57] M. Jahn, M. Heddrich, A. Weder, E. Reichelt, R. Lange, Oxidative Dry-Reforming of Biogas: Reactor Design and SOFC System Integration, *Energy Technology*, 1(1) (2013) 48-58.
- [58] M. Balat, H. Balat, Biogas as a renewable energy source—a review, *Energy Sources, Part A*, 31(14) (2009) 1280-1293.
- [59] M.F. Serincan, U. Pasaogullari, N.M. Sammes, Effects of operating conditions on the performance of a micro-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mehrabian, J. Mahmoudimehr, *erical Simulation of a Biogas-fueled Solid Oxide Fuel Cell and the Investigation of the Influence of Operating Conditions, Amirkabir J. Mech Eng., 55(7) (2023) 895-916.*

DOI: 10.22060/mej.2023.22280.7593



