



## Analysis of the hydrogen production system using a polymer membrane electrolyzer and its transfer to the natural gas pipeline

Mohamad Reza Zayandehroodi, Ebrahim Afshari \*, Mehdi Mosharaf-Dehkordi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

**ABSTRACT:** One of the methods for producing hydrogen is using a polymer membrane electrolyzer with photovoltaic panels. To avoid hydrogen storage and achieve decarbonization, injecting hydrogen into the urban gas pipeline is an effective solution. This study examines the injection of hydrogen into the urban gas pipeline and determines that to keep the injected hydrogen flow rate below 10% of the gas flow rate, a production of 20.69 mole/s of hydrogen is required. According to mathematical modeling, to produce the necessary hydrogen, 3,230 cells with an area of 2,500 cm<sup>2</sup> should be used. The injection pressure of hydrogen is 17.23 bar. To achieve this pressure, an electrochemical compressor with 1,600 cells and an area of 2,500 cm<sup>2</sup> is used. The power consumption of the electrolyzer and compressor for injecting 9.5% hydrogen during maximum solar radiation, accounting for losses, is 6.64 MW. To generate this power with a photovoltaic system, 12,991 STP550S-C72/Vmh panels are needed. Considering the electrolyzer pressure of 17.23 bar, the compressor can be eliminated, allowing the use of a high-pressure electrolyzer.

### Review History:

Received: Aug. 06, 2024

Revised: Dec. 27, 2024

Accepted: Dec. 28, 2024

Available Online: Mar. 25, 2025

### Keywords:

Hydrogen Energy

PEM Electrolyzer

Electrochemical Compressor

Photovoltaic System

Urban Gas Pipeline

### 1- Introduction

The importance of hydrogen gas in industry has led to a focus on producing green hydrogen using electrolyzers and renewable fuels. Among the various methods of producing green hydrogen, the use of water electrolysis through electrolyzers accounts for the largest share of hydrogen production. Polymer membrane electrolyzers, known for their high efficiency, short response times, low operational pressure, and smaller geometric dimensions compared to other electrolyzers, have gained attention and can be coupled with renewable energy sources. In electrolyzers, hydrogen is produced. If hydrogen needs to be stored, storage tanks are required. One method of utilizing hydrogen is to inject it into the municipal gas pipeline, which necessitates increasing its pressure using mechanical or electrochemical compressors. Electrochemical compressors are favored due to their low power consumption and fewer moving parts, resulting in a longer lifespan [1]. Future studies by Atitlan et al. [2] on using hydrogen as an alternative fuel in the shipping industry, Briguglio et al. [3] on the use of thin membranes, Chen and Fuller [4] regarding membrane resistance, Moradi Nafchi et al. [5] on thermodynamic analysis of electrolyzer and solar systems, Zhao et al. [6] on comparing hydrogen produced from fossil fuels with green hydrogen, Strobel et al. [7] on compressing hydrogen for automotive fuel applications,

Xuemei et al. [8] on suitable membranes for compressors, Casati et al. [9] regarding membrane water content control, Lee and Huang [10] on optimizing gas diffusion layer performance in compressors, and Witkowski et al. [11] on hydrogen injection into gas pipelines are noteworthy.

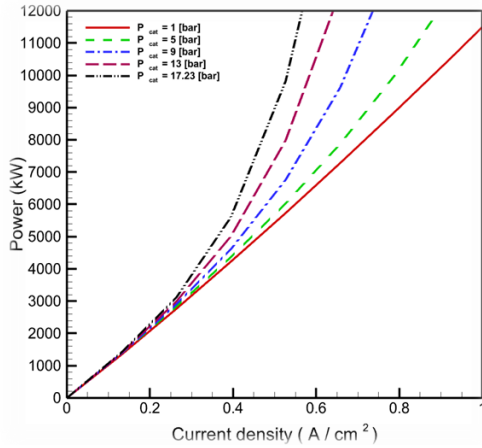
In the present work, a hydrogen production system using a polymer membrane electrolyzer has been examined. To increase hydrogen pressure, an electrochemical compressor is used, and the required power for these two devices is supplied by a photovoltaic system. V-I curves for the electrolyzer, compressor, and photovoltaic panels have been determined, which aided in the design of system to supply hydrogen equal to 9.5% of the natural gas flow rate in a gas pipeline.

### 2- System and mathematical modeling

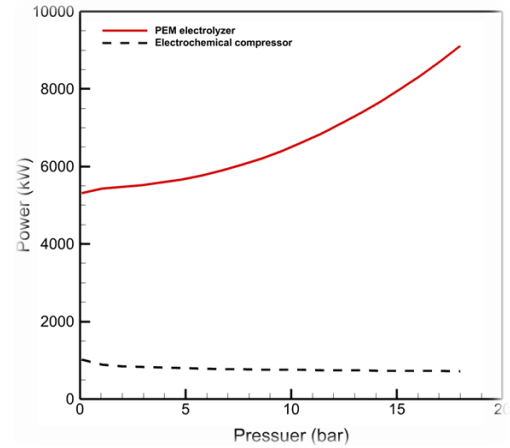
The system consists of four components: photovoltaic panels, an electrolyzer, an electrochemical compressor, and a gas pipeline. The power produced by the photovoltaic panels supplies the energy needed for the electrolyzer and the compressor. The electrolyzer is responsible for breaking down water into hydrogen and oxygen. The voltage of the electrolyzer is referred to as the minimum voltage required to initiate the reaction. Equation (1) expresses the voltage required for the electrolyzer.

\*Corresponding author's email: e.afshari@eng.ui.ac.ir





**Fig. 1. Effect of cathode pressure in polymer membrane electrolyzers on output power at maximum solar radiation.**



**Fig. 2. Changes in power consumption as a function of the cathode pressure of the electrolyzer and anode pressure of the electrochemical compressor under maximum solar radiation**

$$V = V_{OC} + V_{act} + V_{Ohm} + V_{con} \quad (1)$$

The reaction rate of the reactants must be greater than the current rate consumed inside the electrolyzer.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{H_2O} &= \frac{J}{2F} M_{H_2O} \\ \dot{m}_{O_2} &= \frac{J}{4F} M_{O_2} \\ \dot{m}_{H_2} &= \frac{J}{2F} M_{H_2} \end{aligned} \quad (2)$$

The rate of hydrogen production is equal to the rate of water consumption.

### 3- Results

The required pressure for injecting hydrogen into the city gas pipeline is 17.23 bar, and the goal of using the compressor is to increase the pressure to reach this level. The pressure of the hydrogen produced at the cathode of the electrolyzer is considered equal to the pressure of the hydrogen sent to the anode of the compressor. The hydrogen needed for injection into the natural gas pipeline is compressed at the cathode of the compressor. Figure 1 shows the impact of pressure variations at the cathode of the electrolyzer. It is important to note that the anode electrode pressure of the electrolyzer is equal to the ambient pressure. In the electrolyzer, at a constant current density of 0.5 amperes per square centimeter, the required power at a pressure of 1 bar is 4,790 kilowatts, and at a pressure of 17.23 bar, it is 8,890kW. In other words, with an increase in the operating pressure of the electrolyzer, the required input power increases. Figure 2 illustrates the

changes in power consumption in both the polymer membrane electrolyzer and the electrochemical compressor.

As the power increases at the cathode, or the output of the electrolyzer, the power consumption rises; meanwhile, an increase in pressure at the anode electrode of the electrochemical compressor reduces the power consumption necessary to reach the required pressure (17.23 bar).

### 4- Conclusion

In this article, the impact of various parameters on the performance of the system has been examined, and the following conclusions have been drawn:

Due to the irreversible nature of chemical reactions in the polymer membrane electrolyzer and electrochemical compressor, there is a drop in the activation voltages of the anode and cathode, as well as ohmic and concentration losses, which results in an increase in the overall voltage of the system and its power consumption.

By analyzing the polarization curves of the polymer membrane electrolyzer and the electrochemical compressor, it can be observed that an increase in current density leads to higher voltage drops and, consequently, an increase in the overall voltage.

An investigation of the effect of pressure parameters on the performance of the polymer membrane electrolyzer revealed that increasing the cathode pressure from 1 bar to 17.23 bars results in an increase in the power consumption of the electrolyzer.

### References

- [1] J. Zou, N. Han, J. Yan, Q. Feng, Y. Wang, Z. Zhao, J. Fan, L. Zeng, H. Li, H. Wang, Electrochemical compression technologies for high-pressure hydrogen: Current status, challenges and perspective. *Electrochim. Energy Review*, 3(2020) 690-729.
- [2] S. Atitlan, S. Park, M. M. El-Halwagi, M. Atitlan, M.

- Moore, R. B. Nielsen, Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31(2021) 100668.
- [3] N. Briguglio, F. Panto, S. Siracusano, A. S. Aric, Enhanced performance of a Pt Co recombination catalyst for reducing the H<sub>2</sub> concentration in the O<sub>2</sub> stream of a PEM electrolysis cell in the presence of a thin membrane and a high differential pressure. *Electrochemical Acta*, 344(2020) 136153, 2020.
- [4] C. Chen, T. F. Fuller, The effect of humidity on the degradation of Nafion membrane. *Polymer Degradation Stability*, 94(2009) 1436-1447.
- [5] F. Moradi Nafchi, E. Baniasadi, E. Afshari, N. Javani, Performance assessment of a solar hydrogen and electricity production plant using high temperature PEM electrolyze and energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2018) 5820-5831.
- [6] G. Zhao, E. R. Nielsen, E. Troncoso, K. Hyde, J. S. Romeo, M. Diderich, Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2019) 9517-9528.
- [7] R. Strobel, M. Oszczipok, M. Fasil, B. Rohland, L. Jörissen, J. Garcke, The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PEM fuel cell design, *Journal of Power Sources*. 105(2002) 208–215.
- [8] W. Xuemei, H. Gaohong, Y. Lu, L. Xiangcun, Electrochemical hydrogen pump with SPEEK/CRPSSA semi-interpenetrating polymer exchange membrane for H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> separation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2(2014) 75-79.
- [9] C. Casati, P. Longhi, L. Zanderighi, F. Bianchi, Some fundamental aspects in electrochemical hydrogen purification/compression. *Journal of Power Sources*, 180(2008) 103-113.
- [10] M. Lee, X. Huang, An improved hydrophobic coating for the porous gas diffusion layer in a PEM-based electrochemical hydrogen pump to mitigate anode flooding. *Electrochemistry Communications*, 117(2020) 106777.
- [11] A. Witkowski, A. Rusin, M. Majkut, K. Stockcar, Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 166(2018) 24-34.



## تحلیل سیستم تولید هیدروژن سبز به کمک الکترولایزر غشا پلیمری و انتقال آن به خط لوله گاز شهری

محمدرضا زاینده‌رودی، ابراهیم افشاری\*، مهدی مشرف دهکردی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

### کلمات کلیدی:

انرژی هیدروژن

الکترولایزر غشا پلیمری

کمپرسور الکتروشیمیایی

سامانه فتولتائیک

خط لوله گاز شهری

**خلاصه:** هیدروژن سبز می‌تواند از مهمترین انرژی‌های قابل استفاده در مصارف خانگی، حمل‌ونقل و صنعت باشد. از روش‌های تولید هیدروژن، استفاده از الکترولایزر غشا پلیمری با صفحات فتولتائیک است. به منظور عدم ذخیره‌سازی هیدروژن و کربن‌زدایی، تزریق هیدروژن به خط لوله گاز شهری راه‌کاری موثر است. در مطالعه حاضر، تزریق هیدروژن به خط لوله گاز شهری بررسی شده و برای این‌که دبی هیدروژن تزریق شده کمتر از ۱۰ درصد دبی گاز باشد؛ نیازمند به تولید ۲۰/۶۹ مول بر ثانیه هیدروژن است. بر اساس مدل‌سازی ریاضی، برای تولید هیدروژن مورد نیاز، باید از ۳۲۳۰ سل با مساحت ۲۵۰۰ سانتی‌مترمربع استفاده شود. فشار هیدروژن تزریقی ۱۷/۲۳ بار است. برای رساندن هیدروژن به این فشار، از یک کمپرسور الکتروشیمیایی با ۱۶۰۰ سل و مساحت ۲۵۰۰ سانتی‌مترمربع استفاده می‌شود. توان مصرفی الکترولایزر و کمپرسور برای تزریق ۹/۵ درصد هیدروژن در زمان حداکثر تابش خورشیدی و با احتساب تلفات، ۶/۶۴ مگاوات است. برای تولید این توان با سامانه فتولتائیک، پنل STP550S-C72 / ۱۲۹۹۱ / Vmh احتیاج است. با در نظر گرفتن فشار الکترولایزر برابر با ۱۷/۲۳ بار، کمپرسور می‌تواند حذف شود و از الکترولایزر فشار بالا استفاده شود. افزایش فشار در ورودی کمپرسور منجر به کاهش توان مصرفی و در نتیجه افزایش بازده انرژی آن می‌شود.

### ۱- مقدمه

مصرف توان مصرفی برای تولید هیدروژن نسبت به سایر الکترولایزرها و همچنین زمان پاسخ‌گویی کوتاه به دلیل داشتن ابعاد فیزیکی کوچک‌تر و فشار عملیاتی پایین‌تر که سبب سریع‌تر بودن واکنش نسبت به تغییرات شرایط عملکردی این نمونه از الکترولایزر نسبت به سایر الکترولایزرها، مناسب‌تر می‌باشد و به دلیل داشتن ابعاد هندسی کوچک‌تر نسبت به سایر الکترولایزرها و پایین بودن فشار عملیاتی، بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و امکان کوپل شدن با انرژی‌های تجدیدپذیر از قبیل انرژی خورشیدی را نیز دارد [۴].

روش کار الکترولایزر غشا پلیمری به این گونه است که در سطح آند، با به کارگیری ولتاژ DC که بزرگتر از ولتاژ ترمودینامیکی است؛ آب به اکسیژن، یون‌ها و الکترون‌ها تجزیه شده و سپس یون‌ها از درون غشای پلیمری عبور کرده و در سطح کاتد با الکترون‌هایی که از مدار خارجی به الکتروکاتد رسیده‌اند، ترکیب و هیدروژن تولید می‌شود. هیدروژن تولیدی اگر بخواهد ذخیره شود نیاز به مخازن، هیدریدهای فلزی یا دیگر تجهیزات ذخیره‌سازی است. یکی از روش‌های بسیار مهم استفاده از هیدروژن تولیدی

استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، سبب تولید گازهای گلخانه‌ای و آسیب به جو می‌شود. علاوه بر این، اهمیت زیاد گاز هیدروژن در صنعت سبب شده که به تولید هیدروژن سبز با استفاده از الکترولایزر و به کمک سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر روی آورده شود. تأمین انرژی تجدیدپذیر فراوان، پاک و مطمئن یکی از چالش‌های کلیدی فناوری است. از هیدروژن، فراوان‌ترین عنصر شیمیایی روی زمین می‌توان به عنوان یک حامل انرژی یاد کرد [۱]. از میان انواع روش‌های تولید هیدروژن سبز، استفاده از الکترولیز آب توسط الکترولایزر بیشترین سهم تولید هیدروژن (حدود ۴ درصد) از کل تولید هیدروژن به روش‌های مختلف را به خود اختصاص داده است [۲ و ۳]. الکترولیز آب یا همان شکستن و تجزیه آب به مولکول‌های تشکیل دهنده آن به کمک جریان الکتریکی معمولاً با چهار نوع الکترولایزر آلیکالینی، تبادل یون، اکسید جامد و غشا پلیمری انجام می‌شود. از میان الکترولایزرهای معرفی شده، الکترولایزر غشا پلیمری با داشتن بازده بالا به دلیل پایین بودن

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.afshari@eng.ui.ac.ir



این جزایر متشکل از ۲۰ جزیره مسکونی بوده و حدود ۸۵ درصد از انرژی آن‌ها (معادل ۶۶ مگاوات) از طریق توربین‌های بادی تأمین می‌شود. حال با نصب الکترولایزرهایی غشاء پلیمری با مصرف انرژی ۱ مگاوات، امکان تولید ۱۲۴ تن هیدروژن در سال را می‌توان فراهم کرد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های استفاده از هیدروژن، امکان ایجاد ذخیره‌سازی آن با حجم پایین از طریق تجهیزاتی با قابلیت اطمینان بالا در کاربردهای با فشار بالا می‌باشد. استوریل و همکاران [۱۱] به مقایسه فشرده‌سازی هیدروژن در کاربرد سوخت‌رسانی خودرو پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فشرده‌سازی از طریق کمپرسورهای الکتروشیمیایی نسبت به کمپرسورهای مکانیکی مناسب‌تر می‌باشد. بالا بودن هزینه تعمیرات و تجهیزات کمپرسورهای مکانیکی در مقایسه با کمپرسورهای الکتروشیمیایی، کم‌تر بودن قطعات متحرک و پایین بودن افت ولتاژ در کمپرسور الکتروشیمیایی، قابلیت تولید همزمان فشار ۳۵۰ بار برای هیدروژن و ۲۵۰ بار برای اکسیژن تولیدی از الکترولایزر غشاء پلیمری توسط کمپرسور الکتروشیمیایی دلایل روی آوردن به کمپرسور الکتروشیمیایی می‌باشد. یو و همکاران [۱۲] به بررسی غشای‌های مناسب برای کمپرسورهای دما پایین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که علاوه بر پرفلوروسولفونیک اسید، غشاهای هیدروکربنی سولفوناته شده نیز به دلیل رسانایی بالا و همچنین هزینه کم‌تر می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. کازاتی و همکاران [۱۳] از نافیون ۱۱۷ به عنوان غشا برای کمپرسور الکتروشیمیایی در دمای پایین استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در هنگام بررسی کمپرسور از روش اندازه‌گیری نرخ خوردگی و واکنش شیمیایی الکتروکود در جریان ثابت، کمپرسور الکتروشیمیایی در حالت سینتیک فرایندهای شیمیایی نمی‌تواند وضعیت هیدراتاسیون غشا را حفظ کند و همچنین موجب عدم توانایی آن در کنترل محتوای آب در غشا می‌شود. مطالعات انجام شده توسط لی و هوانگ [۱۴]، در مورد بهینه‌سازی عملکرد لایه‌های انتشار گاز در کمپرسور الکتروشیمیایی از طریق روش اصلاح شیمیایی نشان می‌دهند که استفاده از لایه‌های فلزی متخلخل آبگریز، مانند لایه‌های فلزی متخلخل از جنس نقره، موجب افزایش عملکرد سیستم می‌شود. ویتکوفسکی و همکاران [۱۵] به بررسی تزریق هیدروژن تولیدی به کمک انرژی باد به خط لوله گاز طبیعی با غلظت ۵ الی ۵۰ درصد با شرایط مختلف پرداختند. هیدروژن از طریق دو لوله با قطرهایی با اندازه‌های ۰/۱۵ متر و ۱ متر تزریق شده است. غلظت هیدروژن تزریقی ۱۰ درصد بوده و به ترتیب در لوله اول با دبی ۱/۰۳ کیلوگرم در ثانیه و در لوله دوم ۲۶۹ کیلوگرم در ثانیه بدست آمده است. برای غلظت ۵۰ درصدی

توسط الکترولایزر، تزریق آن به خط لوله گاز شهری می‌باشد؛ بدین وسیله سیستم ذخیره هیدروژن حذف می‌شود. تزریق هیدروژن سبز به خط لوله گاز شهری با در نظر گرفتن درصد حجمی مشخص منجر به کربندایی و کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نیز می‌شود. به منظور بالا بردن فشار هیدروژن برای تزریق به خط لوله گاز شهری (تا فشار ایستگاه برابر با ۱۷/۲۳ بار)، از کمپرسورهای مکانیکی و الکتروشیمیایی می‌توان استفاده کرد. کمپرسورهای الکتروشیمیایی به دلیل پایین بودن مصرف توان و همچنین کم بودن قطعات متحرک نسبت به کمپرسورهای مکانیکی، دارای طول عمر بالاتر می‌باشند [۵]. از اینرو، بررسی یک سیستم تولید هیدروژن سبز و تزریق آن به خط لوله گاز طبیعی با سیستم افزایش فشاری با حداقل مصرف توان لازم و ضروری است.

مطالعات آتیلهم و همکاران [۶] در مورد استفاده از هیدروژن سبز به عنوان سوختی جایگزین در صنعت کشتیرانی در سال ۲۰۲۱ انجام شد. آن‌ها نشان دادند که جایگزینی هیدروژن سبز به جای سوخت‌های فسیلی سبب کاهش آلودگی و گازهای گلخانه‌ای می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که هیدروژن مایع از لحاظ سلامت و ایمنی درجه صفر را دریافت کرده است. در بررسی عوامل مؤثر بر الکترولایزر غشاء پلیمری، بریگوگلیو و همکاران [۷] به این نتیجه رسیدند که برای دستیابی به الکترولایزر غشاء پلیمری با بازده بالا و کم کردن میزان غلظت هیدروژن در اکسیژن تولید شده، استفاده از غشاهای نازک‌تری به جای نافیون با ابعاد متداول مناسب می‌باشد. چنگ چن و فولر [۸] آزمایشاتی روی قابلیت اطمینان الکترولایزر و مقاومت لایه‌های غشاء انجام دادند. در این تحقیق، از مقایسه دو روش آزمایشی فتون که یکی براساس روش حل عددی و دیگری روش تبادل می‌باشد؛ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که تخریب و یا نازک شدن غشا سبب عبور هیدروژن به سطح آند شده و امکان انفجار را در داخل سیستم فراهم می‌کند. یکی دیگر از عواملی که باید به آن توجه شود؛ تغییر میزان رطوبت سیستم است که سبب ایجاد تورم در لایه غشاء می‌شود. مرادی و همکاران [۹] به کمک آنالیز ترمودینامیکی، یک الکترولایزر غشاء پلیمری با سیستم خورشیدی را به کمک معادلات الکتروشیمیایی و مکانیکی بررسی کردند. نتایج به این صورت است که افزایش چگالی جریان سبب افزایش ولتاژ می‌شود. همچنین افزایش دما که به واکنش‌های شیمیایی سرعت می‌بخشد؛ سبب افزایش راندمان‌های انرژی و شیمیایی می‌شود. تحقیق دیگری توسط ژائو و همکاران [۱۰] در مورد جایگزینی هیدروژن تولیدی از طریق سوخت‌های فسیلی با هیدروژن سبز در جزایر اورکنی انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که



هیدروژن، دبیها به ترتیب  $1/75$  کیلوگرم بر ثانیه و  $449/5$  کیلوگرم بر ثانیه، بدست آمده است.

در کار حاضر، یک سیستم تولید هیدروژن با الکترولایزر غشا پلیمری بررسی شده است. به منظور بالا بردن فشار هیدروژن تولیدی از یک کمپرسور الکتروشیمیایی استفاده شده و توان مورد نیاز این دو تجهیز توسط سیستم فتولتائیک تامین شده است. به کمک تحلیل ریاضی، منحنیهای ولتاژ - دانسیته جریان (یا توان - دانسیته جریان) الکترولایزر، کمپرسور و صفحات فتولتائیک تعیین شده و به کمک این منحنیها، طراحی سیستم و اجزای آن به منظور تامین هیدروژن به اندازه  $9/5$  درصد (کمتر از  $10$  درصد) میزان دبی گاز طبیعی در یک خط لوله گاز انجام شده است. مقایسه استفاده از الکترولایزر فشار بالا با الکترولایزر فشار پایین همراه با کمپرسور از دیگر اهداف این پژوهش است.

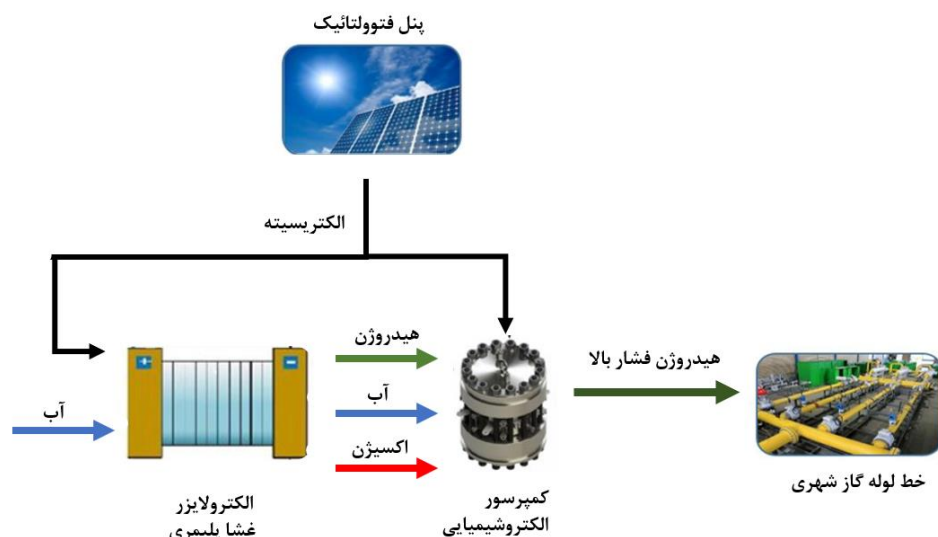
در این تحقیق، نوآوری اصلی در استفاده از الکترولایزر غشا پلیمری با فشار بالا برای تولید هیدروژن و تزریق مستقیم آن به خط لوله گاز شهری است. بر خلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به بررسی سیستمهای تولید هیدروژن در فشارهای پایین پرداخته‌اند، در این تحقیق به‌طور جامع تأثیر افزایش فشار کاتد الکترولایزر و فشار آند کمپرسور الکتروشیمیایی بر کاهش توان مصرفی و افزایش بازدهی انرژی بررسی شده است. دیگر نوآوری این مطالعه، حذف نیاز به کمپرسور مکانیکی است که در تحقیقات پیشین برای افزایش فشار استفاده می‌شد. به کمک مدل‌سازی ترمودینامیکی دقیق، این مطالعه توانسته است سیستمی را طراحی کند که نیاز به کمپرسور مکانیکی را حذف کرده و در عین حال امکان تولید هیدروژن با فشار مطلوب و همچنین افزایش فشار آن توسط کمپرسور الکتروشیمیایی برای تزریق به خط لوله گاز طبیعی را فراهم سازد. این رویکرد جدید به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش داده و بهره‌وری کلی سیستم را بهبود بخشیده است.

## ۲- سیستم تولید و تزریق هیدروژن به خط لوله گاز طبیعی

در شکل ۱ شماتیک سیکل تولید و تزریق هیدروژن به خط لوله گاز طبیعی نمایش داده شده است. این سیکل از چهار قسمت صفحات فتولتائیک، الکترولایزر غشا پلیمری، کمپرسور الکتروشیمیایی و در نهایت خط لوله گاز شهری تشکیل شده است. توان تولید شده توسط صفحات فتولتائیک، انرژی مورد نیاز برای کارکردن الکترولایزر و کمپرسور را فراهم می‌سازد. الکترولایزر غشا پلیمری، وظیفه تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن را بر عهده دارد. واکنش‌های الکتروشیمیایی در این سیستم به این صورت

است که در الکتروآند، آب به اکسیژن، یون‌ها و الکترون‌ها تجزیه می‌شود. سپس یون‌های تولیدی از درون غشا پلیمری عبور کرده و در الکتروآند کاتد با الکترون‌هایی که از مدار خارجی به الکتروآند کاتد رسیده‌اند، ترکیب شده و هیدروژن تولید می‌شود. سپس هیدروژن تولید شده برای تزریق به خط لوله گاز تا فشار  $17/33$  بار باید افزایش یابد. افزایش فشار هیدروژن توسط کمپرسور صورت می‌گیرد. روش کار کمپرسور الکتروشیمیایی بسیار مشابه با الکترولایزر غشا پلیمری است؛ به‌طوری که در کمپرسور الکتروشیمیایی، ابتدا سمت الکتروآند مولکول‌های هیدروژن کم فشار اکسایش یافته و به یون هیدروژن و الکترون تبدیل شده و سپس از طریق غشا، یون‌ها به سمت کاتد رفته و الکترون‌ها هم از طریق مدار خارجی برای تولید هیدروژن فشار بالا در الکتروآند کاتد انتقال می‌یابند. در سمت کاتد مولکول‌های هیدروژن انباشته می‌شوند و این انباشتگی باعث افزایش فشار هیدروژن می‌شود. باید توجه داشت که غشا در مقابل عبور گاز مقاومت کرده و هیدروژن از سمت کاتد به سمت آند نمی‌رود.

به جای استفاده از کمپرسور برای افزایش فشار می‌توان از الکترولایزر فشار بالا نیز استفاده کرد. هر چند که استفاده از الکترولایزر در فشارهای بالا، مانند فشارهای نزدیک به فشار خط لوله گاز طبیعی، محدودیت‌هایی دارد که عمدتاً به افزایش مصرف انرژی و کاهش بازده انرژی مرتبط است. با افزایش فشار، ولتاژ مورد نیاز برای تولید هیدروژن بیشتر شده و این امر به مصرف انرژی بیشتری منجر می‌شود که در نهایت بازدهی انرژی الکترولایزر را کاهش می‌دهد. همچنین، فشارهای بالا باعث افزایش تلفات اهمی، فعال‌سازی و غلظتی در سیستم می‌شوند که به افزایش ولتاژ و مصرف انرژی منجر می‌گردد. این موضوع علاوه بر کاهش کارایی، باعث فشار بیشتر بر اجزای سیستم و نیاز به طراحی‌های مقاوم‌تر و مواد با استحکام بالاتر می‌شود، که می‌تواند هزینه‌های ساخت و نگهداری را افزایش دهد. از دیگر محدودیت‌های استفاده از الکترولایزر در فشارهای بالا، نیاز به خنک‌سازی مؤثرتر به دلیل تولید حرارت بیشتر است. خنک‌سازی ناکافی می‌تواند باعث کاهش عملکرد و طول عمر سلول‌های الکترولایزر شود. علاوه بر این، طراحی الکترولایزرهای فشار بالا پیچیده‌تر است و نیازمند مدیریت دقیق انرژی و واکنش‌های الکتروشیمیایی در شرایط فشار بالا است. این عوامل باعث می‌شوند که استفاده از الکترولایزر در فشارهای بالا چالش‌برانگیز باشد و نیاز به بررسی دقیق‌تری از نظر هزینه‌ها و بهره‌وری انرژی داشته باشد.



شکل ۱. سیکل تبدیل انرژی الکتریکی به هیدروژن و تزریق هیدروژن به خط لوله گاز شهری

Fig. 1. The cycle of converting electrical energy to hydrogen and injecting hydrogen into the natural gas pipeline

واکنشی واقعی، ولتاژ واقعی الکترولایزر از ولتاژ حالت ایده‌آل آن بزرگتر است. رابطه ۴، بیان کننده ولتاژ مورد نیاز الکترولایزر است.

$$V = V_{OC} + V_{act} + V_{Ohm} + V_{con} \quad (4)$$

در رابطه بالا، ولتاژها به ترتیب ولتاژ مدار باز، افت ولتاژ فعالسازی، افت ولتاژ اهمی و افت ولتاژ غلظتی در آند و کاتد است.

### ۳-۱-۱- ولتاژ مدار باز

انرژی آزاد گیبس و آنتروپی، فقط تابع دما نبوده و تابع فشار نیز می‌باشند. ولتاژ مدار باز الکترولایزر به کمک معادله نرنست بدست می‌آید. با فرض آب ورودی به صورت مایع و هیدروژن و اکسیژن تولیدی به صورت گاز، معادله نرنست که غلظت واکنش دهنده‌ها و محصولات را به اختلاف پتانسیل سیستم مرتبط می‌سازد، به صورت زیر است [۱].

$$V_{OC} = V_{rev} - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{a(H_2O(L))}{a(H_2(g)) \cdot (a(O_2(g)))^{\frac{1}{2}}}\right) \quad (5)$$

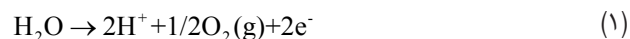
در رابطه بالا،  $V_{rev}$  ولتاژ برگشتپذیر،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دمای

### ۳- معادلات حاکم

#### ۳-۱- الکترولایزر غشا پلیمری

واکنش‌های الکتروشیمیایی که در الکتروآند و کاتد رخ می‌دهند تا هیدروژن سبز با مصرف توان مورد نیاز تولید شود، به شرح زیر می‌باشد.

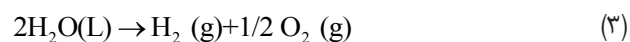
آند:



کاتد:



واکنش کلی تجزیه آب توسط الکترولایزر به صورت زیر است.



ولتاژ الکترولایزر غشا پلیمری به حداقل ولتاژ مورد نیاز برای شروع واکنش گفته می‌شود. ولتاژ الکترولایزر تحت تاثیر دما و فشار واکنش‌ها تغییر میکند. به دلیل وجود تلفات اهمی، غلظتی و سینتیکی در سیستم‌های

عملکرد، و  $F$  ثابت فارادی است.

پارامتر  $J_i^{ref}$  بیانگر چگالی تبادل جریان در دمای مرجع،  $E_{act,i}$  انرژی فعال سازی و  $T_{ref}$  دمای مرجع بر حسب کلون است [۱]

اگر فرآیندها به صورت بازگشتپذیر رخ دهند؛ تلفات ولتاژ وجود ندارد و اختلاف پتانسیل با ولتاژ برگشتپذیر برابر است. این ولتاژ برابر با حداقل کار برای انجام واکنش شیمیایی درون الکترولایزر بوده و از رابطه انرژی آزاد گیبس در شرایط استاندارد بدست می آید [۱].

$$V_{rev}^0 = \frac{\Delta G_R}{nF} = 1.22 \quad (6)$$

۳-۱-۳- افت ولتاژ اهمی  
مقاومت ایجاد شده در جریان انتقال الکترون ها و مقاومت یونی الکترولایزر، سبب افت ولتاژ اهمی در سیستم می شود. افت ولتاژ اهمی تابعی از ضخامت غشا ( $t_m$ ) به دلیل وجود مقاومت در غشا، رسانندگی یونی غشا ( $\sigma_{mem}$ ) و چگالی جریان می باشد.

در رابطه بالا،  $n$  تعداد الکترون های مبادله شده و بالانویس  $\cdot$  حالت استاندارد است. ولتاژ برگشتپذیر به صورت زیر بیان می شود [۱۶].

$$V_{rev} = V_{rev}^0 - 0.9 \times 10^{-3} (T - 298) \quad (7)$$

$$V_{ohmic} = \frac{t_m}{\sigma_{mem}} J \quad (11)$$

$$\sigma_{mem} = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp(1263(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})) \quad (12)$$

عبارت  $\lambda$  بیانگر محتوی آب غشا است. مقدار محتوی آب غشا بین ۱۴ و ۲۱ متغیر می باشد. در این مقاله به دلیل این که هر چه مقدار محتوی غشا نزدیک به ۲۱ باشد، سبب افزایش کارایی سیستم می باشد؛ مقدار ۲۱ در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۲- افت ولتاژ فعال سازی  
در واکنش های واقعی، یکی از اتلاف ولتاژهایی که در سیستم رخ می دهد؛ افت ولتاژ فعال سازی است که تابعی از دما و فشار می باشد. هنگام اعمال ولتاژ به الکترولایزر برای شروع واکنش، بخشی از ولتاژ در طول فرایند، صرف فعال سازی الکترودهای آند و کاتد می شود.

$$V_{act} = V_{act.anode} + V_{act.cathode} \quad (8)$$

۳-۱-۴- افت ولتاژ غلظتی  
تغییر غلظت واکنش دهنده ها در الکترودهای آند و کاتد در هنگام انجام واکنش منجر به افت ولتاژ غلظتی می شود. به طور کلی این افت ولتاژ به دلیل توزیع نامناسب مواد ناخالص در سطح الکتروود رخ می دهد [۱۶].

$$V_{act,i} = \frac{RT}{\alpha_i z F} \sinh^{-1} \frac{J}{2J_{0,i}} \quad (9)$$

$$V_{con,i} = J(\beta_1 \frac{J}{J_{max}})^{\beta_2} \quad (13)$$

پارامتر  $J_{max}$  بیانگر حداکثر چگالی جریان برای الکترولایزر بوده که مقدار ۲ آمپر بر سانتی مترمربع در نظر گرفته می شود. مقادیر  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب ثابت هستند [۱۶].

متغیر  $i$  بیانگر الکتروود آند و کاتد می باشد.  $\alpha_i$  ضریب انتقال شارژ برای آند و کاتد،  $z$  ضریب استوکیومتری و برابر تعداد الکترون های مبادله شده در هر نیم واکنش (در اینجا برابر با ۲)،  $J_{0,i}$  چگالی تبادل جریان آند و کاتد و  $J$  چگالی جریان است. برای بدست آوردن چگالی تبادل جریان که دستخوش تغییر بر اساس پارامترهای مختلفی می باشد؛ رابطه زیر ارائه شده است.

اگر  $P_{sat} + P_i / 0.1173 < 2atm$  باشد؛

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \left\{ \frac{-E_{act,i}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\beta_1 = (7.16 \times 10^{-4} T - 0.622) \left( \frac{P_i}{0.1173} + P_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T + 1.68) \quad (14)$$

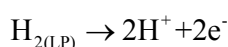


### ۳-۲- کمپرسور الکتروشیمیایی

اگر  $P_{sat} + P_i / 0.1173 > 2atm$  باشد:

در الکتروود آند و کاتد کمپرسور واکنش‌های زیر اتفاق می‌افتد [۱۸].

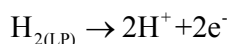
آند:



(۲۰)

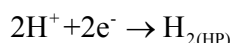
$$\beta_1 = (8.66 \times 10^{-5} T - 0.068) \left( \frac{P_i}{0.1173} + P_{sat} \right) + P_{sat} + (-1.6 \times 10^{-4} T + 0.54) \quad (15)$$

کاتد:



(۲۱)

$$\beta_2 = 2 \quad (16)$$



ترم‌های  $P_i$  و  $P_{sat}$  فشار اشباع آب در دمای عملکرد الکترولایزر و فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن در آند و کاتد می‌باشد [۱۷].

واکنش کلی نیز به شکل زیر است.

### ۳-۱-۵- نرخ واکنش‌گرها

نرخ جریان واکنش دهنده‌ها باید بزرگتر یا مساوی با نرخ جریانی که در داخل الکترولایزر مصرف می‌شود؛ باشد. بر اساس قانون فارادی، نرخ جریان تولید اکسیژن و هیدروژن و مصرف آب از طریق روابط زیر بدست می‌آید.



(۲۲)

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F}, \quad \dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F}, \quad \dot{N}_{H_2O,reacted} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2} \quad (17)$$

هدف کمپرسور، افزایش فشار هیدروژن یعنی تبدیل هیدروژن با فشار پایین و رساندن آن به فشار بالا است. ولتاژ کمپرسور الکتروشیمیایی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V = V_{nernst} + V_{act} + V_{ohmic} + V_{con} \quad (23)$$

(۲۳)

در روابط بالا،  $J$  چگالی جریان است. نرخ تولید هیدروژن با نرخ جریان آب مصرف شده، طبق قانون بقای اجزا برابر می‌باشد. بر اساس قانون بقای جرم، نرخ جریان آب وارد شده به الکترولایزر با مجموع آب مصرف شده و آب خارج شده از سیستم برابر است.

### ۳-۲-۱- ولتاژ مدار باز

پارامتر  $V_{nernst}$  به ولتاژ عبوری از سل‌های کمپرسور الکتروشیمیایی گفته می‌شود از طریق رابطه نرنست بدست می‌آید.

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \dot{N}_{H_2O,reacted} \quad (18)$$

$$V_{nernst} = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2,cathode}}{P_{H_2,anode}}\right) \quad (24)$$

(۲۴)

نرخ جرمی گازهای تولیدی و آب مصرفی در الکترولایزر غشا پلیمری نیز می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۱۶].

ترم  $V^0$  بیانگر ولتاژ کمپرسور در شرایط استاندارد است که در کمپرسور الکتروشیمیایی صفر در نظر گرفته می‌شود.  $R$  ثابت جهانی گاز،  $P_{H_2,cathode}$  و  $P_{H_2,anode}$  به ترتیب فشارهای جزئی هیدروژن در سمت کاتد و آند می‌باشد.  $n$  تعداد هیدروژن‌های اکسید شده در کمپرسور الکتروشیمیایی (در اینجا مقدار ۲) می‌باشد [۱۸].

$$\begin{aligned} \dot{m}_{H_2O} &= \frac{J}{2F} M_{H_2O} \\ \dot{m}_{O_2} &= \frac{J}{4F} M_{O_2} \\ \dot{m}_{H_2} &= \frac{J}{2F} M_{H_2} \end{aligned} \quad (19)$$

### ۳-۲-۲- افت ولتاژ فعال سازی

ولتاژ فعال سازی در آند و کاتد کمپرسور، به دلیل اختلاف فشار بین دو الکتروود، موجب تأثیر بر سینتیک واکنش می شود و از طریق رابطه ولمر - باتلر به صورت زیر بدست می آید.

$$V_{act} = V_{act.anode} + V_{act.cathode} \quad (25)$$

در رابطه بالا، ولتاژ فعال سازی واکنش، که برابر با مجموع ولتاژهای فعال سازی الکتروود آند و کاتد می باشد؛ مطابق روابط زیر است.

$$V_{act.i} = \frac{RT}{2\alpha_i F} \ln\left(\frac{J}{J_{0,i}}\right) \quad (26)$$

در روابط بالا،  $J$  و  $J_0$  چگالی جریان و چگالی جریان آند و کاتد و  $\alpha$  نیز به عنوان ضریب انتقال بار شناخته می شود. این پارامتر بیانگر سرعت واکنش انتقال بار در رابطه با پتانسیل الکتریکی می باشد. برای این پارامتر مقدار ۰/۵ در نظر گرفته می شود.

### ۳-۲-۳- افت ولتاژ اهمی

افت پتانسیل اهمی ناشی از مقاومت الکترون ها و پروتون ها درون کمپرسور رخ می دهد.

$$V_{ohmic} = JR_{ohmic} = J \frac{t_m}{\sigma} \quad (27)$$

ترم  $R_{ohmic}$  بیانگر مقاومت اهمی کمپرسور،  $t_m$  ضخامت غشا و  $\sigma$  نیز هدایت یونی غشا است. همانند الکتروولایزر غشا پلیمری، تابعی از محتوای آب موجود است. هدایت یونی غشا معادل ۰/۰۰۷۷ زیمنس بر سانتیمتر است [۱۳].

### ۳-۲-۴- نرخ واکنش گرها

نرخ جریان انتقال هیدروژن (بر حسب مول بر ثانیه) که به الکتروود کاتد می رسد؛ به صورت زیر است.

$$\dot{N}_{H_{2,f}} = \frac{JAN_{cell}}{nF} \quad (28)$$

در رابطه بالا،  $N_{cell}$  تعداد سل ها و  $n$  تعداد الکترون های مبادله شده می باشد.

اختلاف فشار در سمت کاتد با آند، سبب برگشت هیدروژن از کاتد به آند از طریق غشا می شود. نرخ برگشت هیدروژن طبق رابطه زیر بدست می آید.

$$\dot{N}_{H_{2,b}} = DAH \frac{(P_c - P_a)}{t_m} \quad (29)$$

پارامترهای  $D$ ،  $A$  و  $H$  به ترتیب ضریب انتشار هیدروژن، مساحت سطح موثر و ثابت هنری است. مقدار خالص هیدروژن که توسط الکتروود کاتد، فشرده می شود، بر حسب مول بر ثانیه به شرح زیر است [۲۰].

$$\dot{N}_{H_{2,n}} = \dot{N}_{H_{2,f}} - \dot{N}_{H_{2,b}} \quad (30)$$

نرخ جرمی هیدروژن در کمپرسور الکتروشیمیایی، مشابه الکتروولایزر، حاصل ضرب مول هیدروژن خروجی در جرم مولکولی آن می باشد.

### ۳-۳- سامانه فتوولتائیک

الکتروولایزر و کمپرسور الکتروشیمیایی، برای کار کردن نیاز به توان ورودی دارند. استفاده از سلول های فتوولتائیک به منظور تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی انجام می شود. معادلات جریان و ولتاژ خروجی ناشی از سلول های فتوولتائیک به صورت زیر می باشد.

$$I = I_{ph} - I_d = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left\{ e^{\left(\frac{q}{VAT_{cell}kn_s}\right)^{-1}} \right\} \quad (31)$$

در رابطه بالا،  $n_p$  و  $n_s$  بیانگر تعداد سلول های به صورت موازی و سری در مدار می باشد.  $I_d$  و  $I_{ph}$  جریان فوتونی و جریان دیودی و  $I_0$  جریان اشباع نام دارد. عبارت های  $V$ ،  $T_{cell}$ ،  $k$  و  $q$  و  $A$  به ترتیب ولتاژ خروجی سامانه و دمای عملیاتی سلول، ثابت بولتزمن، بار الکترون و فاکتور ایده آل است که برای سلول های آمورفی برابر با ۱ و برای کریستالی ۲ می باشد [۲۵، ۲۶].

جدول ۱. مقادیر ثابت شرایط جو برای ماژول فتوولتائیک [۲۶]

Table 1. The constant values of atmospheric conditions for the photovoltaic module [26]

مقدار	واحد	پارامتر
$1/6 \times 10^{-19}$	-	$q$
۱۰۰۰	$W/m^2$	$G_{as}$
۲۵	$^{\circ}C$	$T_s$
$1/0.538 \times 10^{-23}$	$J/K$	$k$
۱/۱	$V$	$E_{g0}$

جریان فوتونی به طور مستقیم با شدت تابش خورشیدی رابطه دارد و از

دماى عملیاتی سلول از طریق رابطه زیر حساب می‌شود.

طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T = T_a C_t G_a \quad (35)$$

$$I_{ph} = I_{sc}(STS) \frac{G_a}{G_{as}} [1 + K_0 (T_{cell} - T_s)] \quad (32)$$

پارامتر  $C_t$  یک مقدار ثابت دارد و از طریق رابطه زیر بدست می‌آید.  $T_a$  نیز بیانگر دمای میانگین روزانه بر حسب کلون است.

در رابطه بالا  $G_a$  تابش خورشیدی است که تابعی از موقعیت جغرافیایی می‌باشد.  $G_{as}$  نیز تابش استاندارد است.  $I_{sc}(STS)$  بیانگر جریان اتصال کوتاه در شرایط تست استاندارد و  $K_0$  نیز ضریب دما در جریان اتصال کوتاه می‌باشد. جدول ۱ مقادیر ثابت شرایط جوی در استفاده از صفحات فتوولتائیک آورده شده است. برای بدست آوردن جریان اشباع از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$C_t = \frac{NOCT - 20}{80} \quad (36)$$

$$I_0 = I_r \left(\frac{T}{T_s}\right)^3 e^{\left[\frac{qE_{g0}}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)\right]} \quad (33)$$

عبارت  $NOCT$  بیانگر دمای کاری نرمال سلول بر حسب درجه

سلسیوس است که عموماً در مشخصات پنل داده می‌شود.

محاسبه مقدار توان مورد نیاز برای راه‌اندازی چرخه، از طریق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{pv} = VI \quad (37)$$

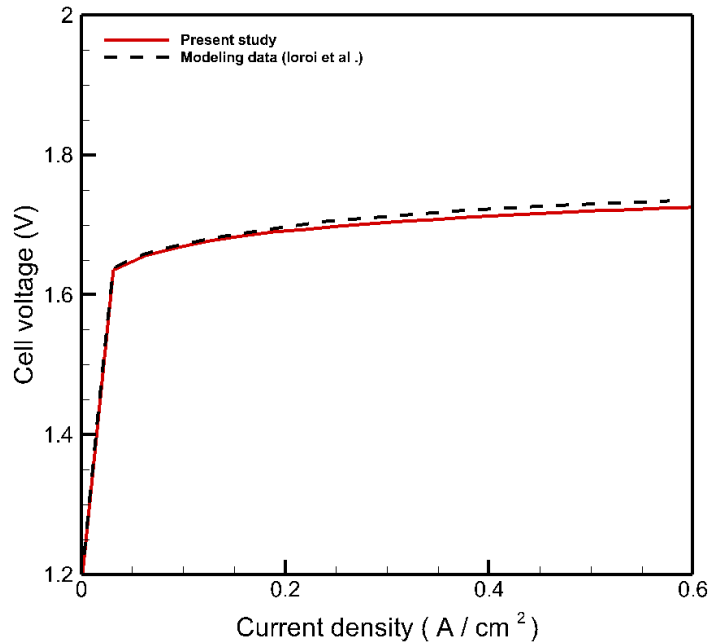
ترم  $E_{g0}$  اختلاف ولتاژ بین حداکثر استفاده از ظرفیت هدایتی فوتون‌ها و حداقل آن می‌باشد.  $I_r$  فشار اشباع معکوس درون سیستم است. که تابعی از ولتاژ و جریان اتصال کوتاه و همچنین دمای سلول است [۲۵، ۲۶].

در رابطه بالا  $V$  بیانگر ولتاژ سامانه خروجی و  $I$  جریان است. بر اساس رابطه (۳۷) نمایش داده شده؛ تعداد سلول‌های موازی و سری در خود مقدار جریان محاسبه شده است.

$$I_r = \frac{I_{sc}(STS)}{e^{\left[\frac{qV_{oc}}{N_s nkT}\right]} - 1} \quad (34)$$

$$P_{pv} = P_{comp} + P_{elec} \quad (38)$$

$V_{oc}$  نیز همانند جریان اتصال کوتاه، یک مقدار ثابت در کاتالوگ پنل



شکل ۲. مقایسه منحنی عملکرد الکترولیزر حاصل از مطالعه حاضر با نتایج مدل‌سازی ریاضی مرجع [۲۱].

**Fig. 2. Comparison of the electrolyzer performance curve obtained from the present study with the results of the reference mathematical modeling [21].**

بررسی، با نتایج تحلیل ترمودینامیکی دیل و همکاران [۲۲] مقایسه شده است. غشای به کار رفته از جنس نافین و ضخامت آن ۱۷۸ میکرومتر است. در دمای ۳۳۳ کلین، چگالی تبادل جریان برای کاتد و آنُد به ترتیب برابر با ۰/۰۹ و ۰/۳۶ آمپر بر سانتی‌متر مربع است. چگالی جریان برای انجام واکنش ۰/۷ آمپر بر سانتی‌متر مربع و سطح مقطع فعال برابر با ۳۰ سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال شارژ در آنُد و کاتد مساوی و برابر ۰/۵ است. فشار در الکتروُد آنُد ۱۴/۷ و فشار در کاتد، بین ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ psi است. نمودار اعتبارسنجی در شکل ۳ نشان داده شده است.

براساس شکل ۳، حداکثر خطا بین نتایج مدل‌سازی ولتاژ کلی کمپرسور و نتایج مدل‌سازی ریاضی مرجع [۲۲] در چگالی جریان ۰/۷ آمپر بر سانتی‌متر مربع، برابر با ۳/۶ درصد است. حداکثر خطا بین افت ولتاژ فعال‌سازی و نتایج مدل‌سازی ۵/۳۴ درصد و حداکثر خطا بین ولتاژ اهمیک با نتایج برابر با ۴ درصد است. از این رو نتایج مدل‌سازی مطابقت خوبی با نتایج مدل‌سازی ریاضی مرجع [۲۲] دارد.

دلیل خطا در بیشترین اختلاف به تفاوت در رفتار سیستم‌ها در شرایط مختلف عملکرد مربوط می‌شود. در دانسیته جریان‌های پایین، تأثیرات افت ولتاژ اهمی، فعال‌سازی و غلظتی کمتر بوده و مدل‌های ریاضی بهتر می‌توانند

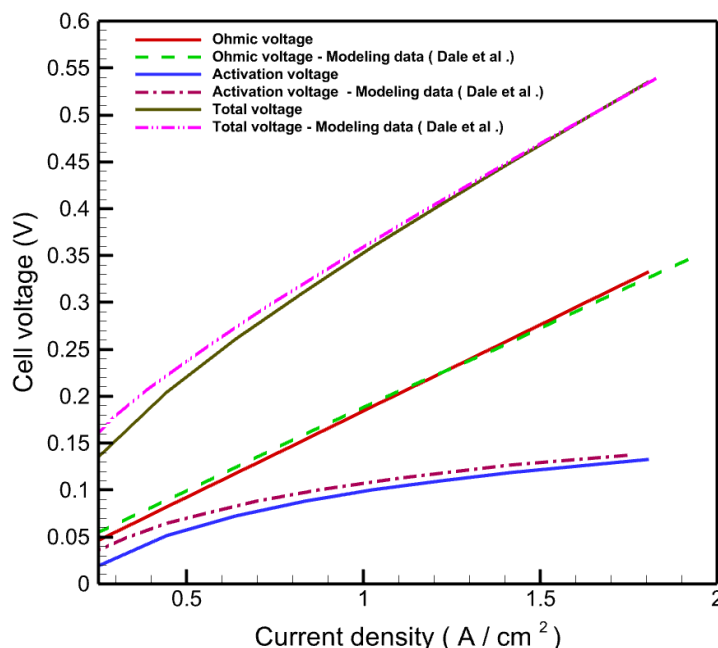
توان خروجی فتوولتائیک برابر حاصل جمع مورد نیاز الکترولیزر و کمپرسور الکتروشیمیایی، با احتساب بازده و تلفات است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- اعتبارسنجی

مدلسازی ترمودینامیکی برای دو سیستم الکترولیزر غشا پلیمری و کمپرسور الکتروشیمیایی با استفاده از نرم افزار EES صورت گرفته است. جهت اعتبارسنجی مدل الکترولیزر، نتایج پژوهش حاضر با نتایج مدل‌سازی ریاضی آبرویی و همکاران [۲۱] مقایسه شده است. غشا در این مدل، نافین با نسبت رطوبت ۱۴ و با ضخامت ۵۰ میکرومتر است. دمای عملکرد الکترولیزر ۳۵۳ کلین است. فشار آنُد و کاتد و چگالی تبادل جریان الکترودهای آنُد و کاتد ۱ اتمسفر،  $10^{-5}$  و ۱۰ آمپر بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲، حداکثر خطا بین نتایج مدل‌سازی حاضر و نتایج مدل‌سازی ریاضی [۲۱] در چگالی جریان ۰/۳ آمپر بر سانتی‌متر مربع، حدود ۲ درصد است؛ از اینرو نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه، مطابقت بسیار خوبی با نتایج مرجع [۲۱] دارد.

برای اعتبارسنجی، نتایج حاصل از مدل کمپرسور الکتروشیمیایی مورد



شکل ۳. مقایسه منحنی عملکرد کمپرسور حاصل از مطالعه حاضر با نتایج مدل سازی ریاضی مرجع [۲۲].

Fig. 3. Comparison of the compressor performance curve obtained from the present study with the results of the reference mathematical modeling [22].

شکل های ۴ و ۵ ولتاژ کلی کمپرسور و الکترولایزر حاصل از جمع افت ولتاژهای موجود بر حسب چگالی جریان، در شرایط مدل سازی ترمودینامیکی را نشان داده است.

#### ۴-۳- سامانه فتوولتائیک

برای مطابقت سامانه فتوولتائیک با کمپرسور الکتروشیمیایی و الکترولایزر غشا پلیمری، ابتدا تعداد ماژول های سامانه، بر اساس رابطه ۴-۶ باید به گونه ای طراحی شود که توان مورد نیاز سیکل را تامین کند. از این رو مجموع توان مورد نیاز برای الکترولایزر و کمپرسور ۶/۶۴ مگاوات می باشد که این توان توسط سیستم فتوولتائیک تامین می شود. بر اساس اطلاعات بدست آمده از شهر اصفهان، در سه روز ۳ ژوئن، ۱۲ نوامبر و ۳ ژانویه به ترتیب بیشترین، متوسط و کمترین میزان تابش دریافتی از خورشید را داریم. در شکل ۶ نمودار تابش خورشیدی در ساعات مختلف این سه روز نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۶ نمایش داده شده است؛ حداکثر تابش کلی در ۳ ژوئن برابر با ۹۹۰ وات بر مترمربع و در ۱۲ نوامبر برابر با ۷۶۸ وات بر مترمربع و کمترین میزان تابش در ۳ ژانویه ۴۴۸ وات بر مترمربع است. در این پژوهش

این رفتارها را پیش بینی کنند. اما در دانسیته جریان های بالا، افت ولتاژهای مختلف به دلیل افزایش مقاومت اهمی، غلظتی و فعال سازی بیشتر می شود که موجب افزایش خطا در مدل سازی ریاضی می گردد. در این حالت، شرایط تجربی با ناپایداری ها و عدم خطی بودن سیستم همراه می شود و باعث می گردد که داده های آزمایشگاهی با مدل ریاضی کمتر انطباق داشته باشند.

#### ۴-۲- مدل سازی ترمودینامیکی سیکل تولید و تزریق هیدروژن به خط لوله گاز طبیعی

بر اساس اطلاعات بدست آمده حاصل از شرکت گاز استان اصفهان [۲۳] در یکی از ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی، دبی گاز طبیعی در خط لوله در فشار ۱۷/۲۳ بار و دمای محیط برابر با ۱۵۶۸/۷ کیلوگرم بر ساعت می باشد. بر اساس مطالعات انجام شده، امکان تزریق هیدروژن به خط لوله گاز به مقدار حداکثر ۹/۵ درصد، معادل ۱۴۹/۰۳ کیلوگرم بر ساعت معادل ۲۰/۶۹ مول بر ثانیه می باشد [۲۴]. هیدروژن تولیدی با فشار مورد نیاز ایستگاه (۱۷/۲۳) باید بدست آید. برای تولید این میزان هیدروژن و تزریق آن به خط لوله گاز طبیعی، مدل سازی ترمودینامیکی الکترولایزر غشا پلیمری و کمپرسور الکتروشیمیایی مطابق جدول ۲ انجام می شود.

جدول ۲. شرایط مدل سازی ترمودینامیکی کمپرسور الکتروشیمیایی و الکترولایزر غشا پلیمری [۲۲].

Table 2. The conditions for thermodynamic modeling of polymer membrane electrochemical compressor and electrolyzer [22].

مقدار	واحد	نماد	پارامتر
۳۳۳	کلوین	T	دما کمپرسور
۳۵۳	کلوین	T	دما الکترولایزر
۱	بار	P <sub>a</sub>	فشار آند کمپرسور
۱	بار	P <sub>c</sub>	فشار کاتد کمپرسور
۱۷/۲۳	بار	P <sub>c</sub>	فشار کاتد الکترولایزر
۰/۳۶	آمپر بر سانتیمتر مربع	J <sub>0,a</sub>	چگالی تبادل جریان آند کمپرسور
۰/۰۱	آمپر بر سانتیمتر مربع	J <sub>0,a</sub>	چگالی تبادل جریان آند الکترولایزر
۰/۰۹	آمپر بر سانتیمتر مربع	J <sub>0,c</sub>	چگالی تبادل جریان کاتد کمپرسور
۱۰	آمپر بر سانتیمتر مربع	J <sub>0,c</sub>	چگالی تبادل جریان کاتد الکترولایزر
۱	آمپر بر سانتیمتر مربع	J	چگالی جریان کمپرسور
۰/۵	آمپر بر سانتیمتر مربع	J	چگالی جریان الکترولایزر
۱۲۵	میکرومتر	t <sub>m</sub>	ضخامت لایه غشا کمپرسور
۱۸۳	میکرومتر	t <sub>m</sub>	ضخامت لایه غشا الکترولایزر
۲۵۰۰	سانتیمتر مربع	A	مساحت
۱۶۰۰	—	N <sub>cell</sub>	تعداد سل کمپرسور
۳۲۲۰	—	N <sub>cell</sub>	تعداد سل الکترولایزر

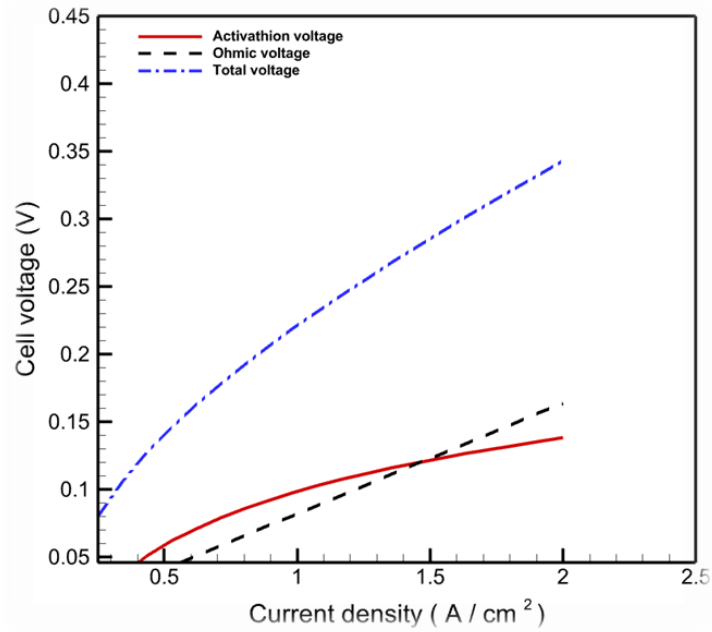
در کمپرسور الکتروشیمیایی می‌باشد. هدف کمپرسور افزایش فشار تا رسیدن به فشار مورد نظر یعنی فشار خط لوله گاز طبیعی می‌باشد. فشار هیدروژن تولید شده در سمت کاتد الکترولایزر غشا پلیمری برابر با فشار هیدروژن ارسال شده به سمت آند کمپرسور در نظر گرفته شده است. هیدروژن مورد نیاز برای تزریق به خط لوله گاز طبیعی در کاتد کمپرسور فشارش افزایش می‌یابد. در این بخش تاثیر تغییرات فشار هیدروژن خروجی در الکترولایزر و افزایش فشار آن در کمپرسور، بر افزایش عملکرد سیستم را مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت اول فشار در دو سمت آند و کاتد الکترولایزر برابر با

فرض می‌شود که تابش خورشیدی در یک بازه زمانی یک ساعته ثابت است. طبق اطلاعات بدست آمده از شهر اصفهان، میزان توان خروجی از پنل‌ها در سه روز ۳ ژوئن، ۱۲ نوامبر و ۳ ژانویه بررسی می‌گردد. شکل ۷ میزان تغییرات توان خروجی از ماژول فتوولتائیک را نشان می‌دهد.

۴-۴- تاثیر فشار بر عملکرد الکترولایزر و کمپرسور

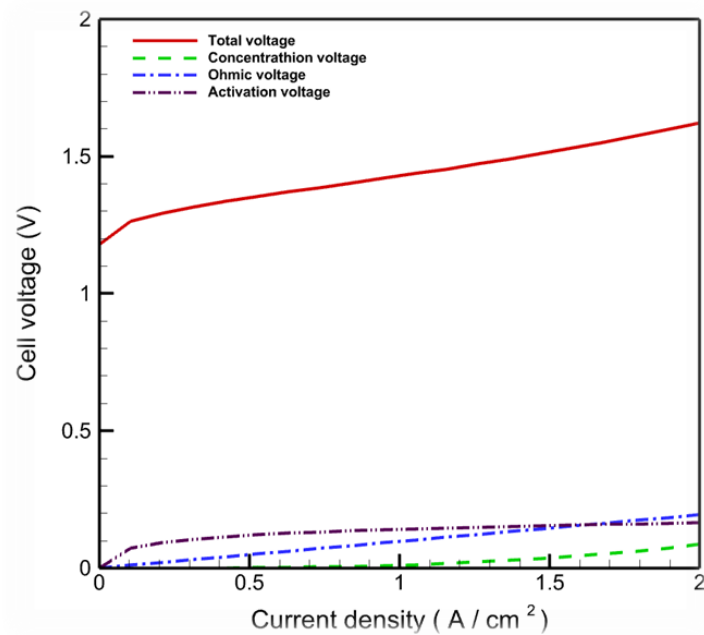
همان‌طور که بیان شد؛ فشار مورد نیاز برای تزریق هیدروژن به خط لوله گاز شهری برابر ۱۷/۲۳ بار است [۲۳]. این فشار همان فشار الکتروکاتد





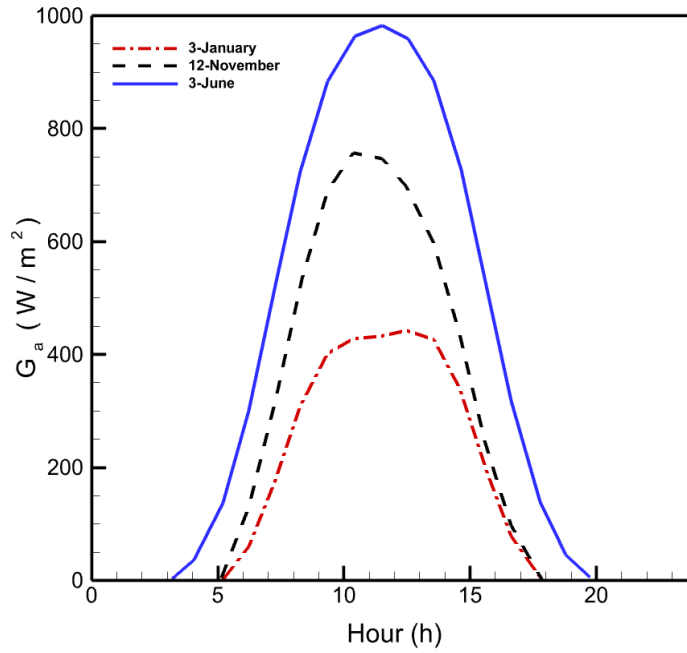
شکل ۴. نمودار عملکرد کمپرسور تحت شرایط ارائه شده در جدول ۳

Fig. 4. The performance chart of the compressor under the conditions presented in Table 3



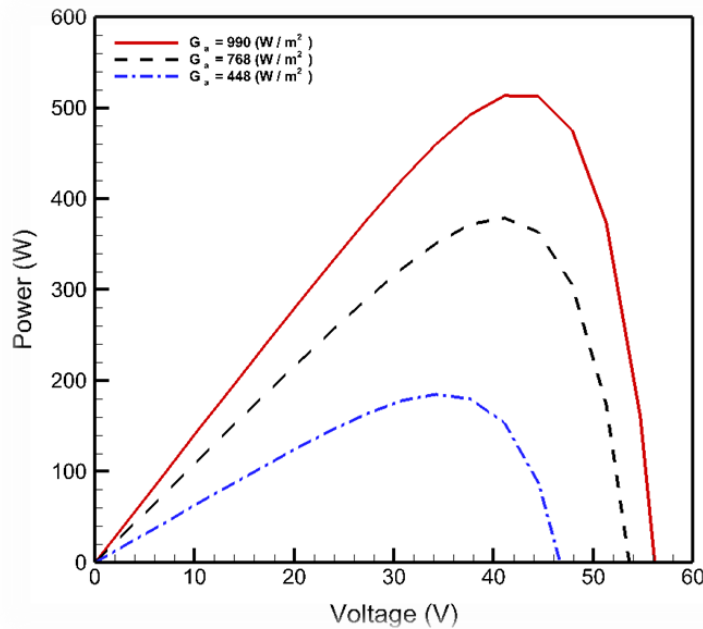
شکل ۵. نمودار الکترولایزر تحت شرایط ذکر شده در جدول ۳.

Fig. 5. The performance curve of the compressor under the conditions presented in Table 3.



شکل ۶. تابش خورشیدی در روز حداکثر (۳ ژوئن)، متوسط (۱۲ نوامبر) و حداقل (۳ ژانویه) در شهر اصفهان

Fig. 6. The solar radiation on the maximum day (June 3), average day (November 12), and minimum day (January 3) in the city of Isfahan



شکل ۷. تاثیر شدت تابش حداکثر (۳ ژوئن)، متوسط (۱۲ نوامبر) و حداقل (۳ ژانویه) بر توان خروجی ماژول فتوولتائیک.

Fig. 7. The effect of maximum (June 3), average (November 12), and minimum (January 3) radiation intensity on the output power of the photovoltaic module.

بر این است که طراحی سیستم تولید و تزریق هیدروژن بر حسب حداکثر امکان تولید هیدروژن صورت بگیرد. برای تزریق این میزان هیدروژن به خط لوله گاز طبیعی، نیاز به تولید  $3624/48$  کیلوگرم گاز هیدروژن توسط الکترولایزر در روز می‌باشد. با در نظر گرفتن چگالی جریان متداول برای الکترولایزر غشا پلیمری، در حدود  $0/5$  آمپر بر سانتی‌مترمربع، ولتاژ برای یک سل از الکترولایزر بر اساس منحنی پلاریزاسیون بدست می‌آید که برابر با مقدار  $1/349$  ولت است. سپس به منظور استفاده و تزریق هیدروژن در خط لوله گاز شهری، فشار هیدروژن تولیدی بایستی تا  $17/23$  بار توسط کمپرسور الکتروشیمیایی افزایش یابد. با توجه به مدل‌سازی ریاضی کمپرسور و استخراج دقیق میزان هیدروژن با فشار مورد نظر در یک چگالی جریان مشخص، امکان بدست آمدن ولتاژ نهایی وجود دارد. متداول‌ترین چگالی جریان به کار رفته در کمپرسور معادل  $1$  آمپر بر سانتی‌مترمربع می‌باشد. بر اساس منحنی پلاریزاسیون کمپرسور الکتروشیمیایی، ولتاژ نهایی یک سل کمپرسور برابر با  $0/221$  ولت است. سیستم فتوولتائیک بر حسب حداکثر تولید هیدروژن در روز طراحی شده و قادر به تولید توان مورد نیاز، از طریق رابطه (۳۸) می‌باشد. تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم بررسی شده و نتایج زیر استنباط شده است.

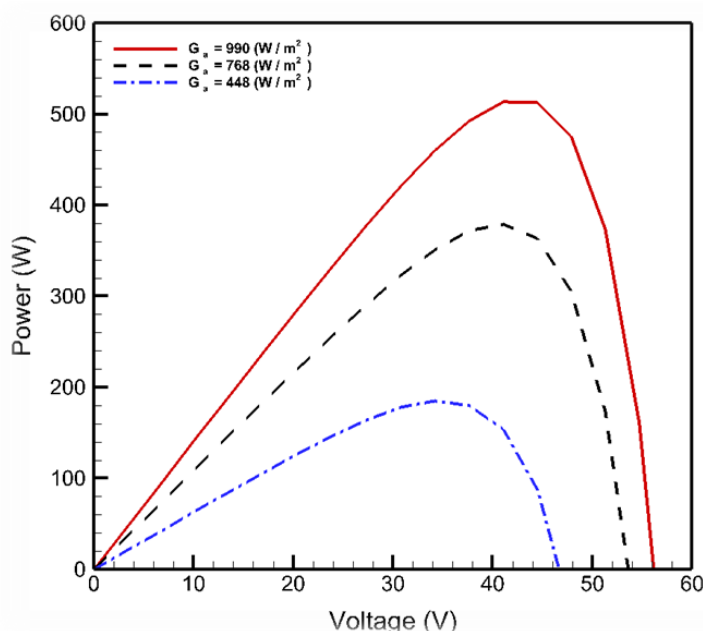
• به دلیل برگشتناپذیر بودن واکنش‌های شیمیایی در الکترولایزر غشا

۱ بار بوده و سپس توسط کمپرسور تا  $17/23$  بار افزایش می‌یابد. در حالت دوم فشار خروجی در الکترولایزر ۵ بار، در حالت سوم ۹ بار، در حالت چهارم ۱۳ بار و در حالت آخر برابر با  $17/23$  بار در نظر گرفته می‌شود. در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تاثیر تغییرات فشار کاتد الکترولایزر غشا پلیمری و فشار آند کمپرسور الکتروشیمیایی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که فشار الکتروآند الکترولایزر برابر با فشار محیط می‌باشد. در الکترولایزر در چگالی جریان ثابت  $0/5$  آمپر بر سانتی‌مترمربع، توان مورد نیاز در فشار ۱ بار،  $4790$  کیلووات و در فشار  $17/23$  بار، برابر با  $8890$  کیلووات است. به عبارتی با افزایش فشار کاری الکترولایزر، توان ورودی مورد نیاز افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ بیانگر تغییرات توان مصرفی در دو سیستم الکترولایزر غشا پلیمری و کمپرسور الکتروشیمیایی می‌باشد. با افزایش توان در سمت کاتد و یا همان خروجی الکترولایزر، توان مصرفی افزایش یافته و با افزایش فشار در سمت الکتروآند ورودی کمپرسور الکتروشیمیایی، میزان توان مصرفی برای رسیدن به فشار مورد نیاز ( $17/23$  بار) کاهش می‌یابد.

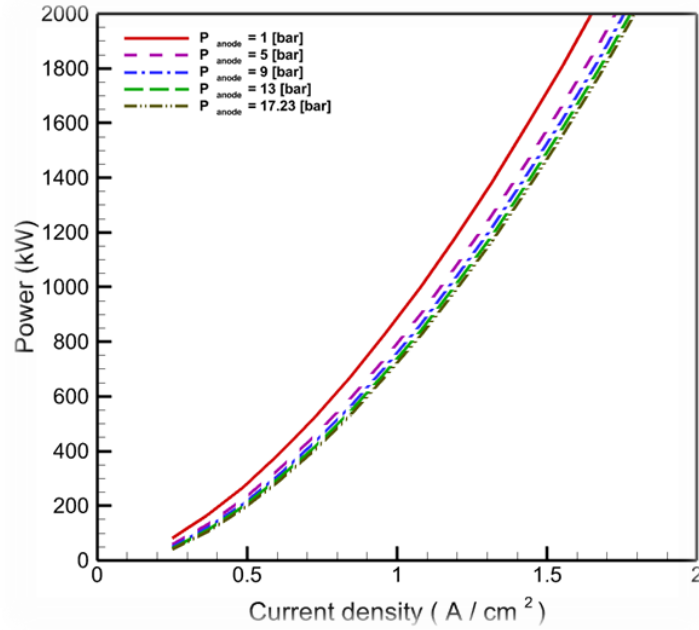
## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا بر اساس تحقیقات انجام شده حداکثر تزریق مجاز گاز هیدروژن به خط لوله گاز شهری  $9/5$  درصد در نظر گرفته شد. فرض



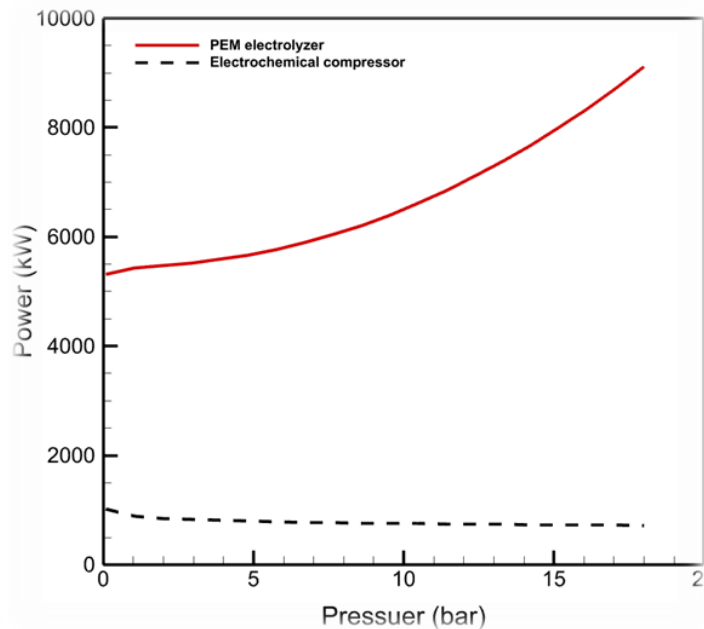
شکل ۸. تاثیر فشار کاتد الکترولایزر غشا پلیمری بر توان خروجی در حداکثر تابش خورشیدی (۳ ژوئن).

Fig. 8. The effect of cathode pressure in polymer membrane electrolyzers on output power at maximum solar radiation (June 3).



شکل ۹. تاثیر فشار آند کمپرسور الکتروشیمیایی بر توان خروجی در حداکثر تابش خورشیدی (۳ ژوئن).

Fig. 9. The effect of anode pressure on the output power under maximum solar irradiation (June 3).



شکل ۱۰. تغییرات توان مصرفی بر حسب فشار کاتد الکترولایزر و فشار آند کمپرسور الکتروشیمیایی در حداکثر تابش خورشیدی (۳ ژوئن).

Fig. 10. Changes in power consumption as a function of cathode pressure of the electrolyzer and anode pressure of the electrochemical compressor at maximum solar radiation (June 3).

- [7] N. Briguglio, F. Panto, S. Siracusano, A. S. Aric, Enhanced performance of a Pt Co recombination catalyst for reducing the H<sub>2</sub> concentration in the O<sub>2</sub> stream of a PEM electrolysis cell in the presence of a thin membrane and a high differential pressure. *Electrochemical Acta*, 344(2020) 136153, 2020.
- [8] C. Chen, T. F. Fuller, The effect of humidity on the degradation of Nafion membrane. *Polymer Degradation Stability*, 94(2009) 1436-1447.
- [9] F. M. Nafchi, E. Baniasadi, E. Afshari, N. Javani, Performance assessment of a solar hydrogen and electricity production plant using high temperature PEM electrolyze and energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2018) 5820-5831.
- [10] G. Zhao, E. R. Nielsen, E. Troncoso, K. Hyde, J. S. Romeo, M. Diderich, Life cycle cost analysis: A case study of hydrogen energy application on the Orkney Islands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2019) 9517-9528.
- [11] R. Strobel, M. Oszcipok, M. Fasil, B. Rohland, L. Jörissen, J. Garche, The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PEM fuel cell design, *Journal of Power Sources*. 105(2002) 208–215.
- [12] W. Xuemei, H. Gaohong, Y. Lu, L. Xiangcun, Electrochemical hydrogen pump with SPEEK/CRPSSA semi-interpenetrating polymer exchange membrane for H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> separation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2(2014) 75-79.
- [13] C. Casati, P. Longhi, L. Zanderighi, F. Bianchi, Some fundamental aspects in electrochemical hydrogen purification/compression. *Journal of Power Sources*, 180(2008) 103-113.
- [14] M. Lee, X. Huang, An improved hydrophobic coating for the porous gas diffusion layer in a PEM-based electrochemical hydrogen pump to mitigate anode flooding. *Electrochemistry Communications*, 117(2020) 106777.
- [15] A. Witkowski, A. Rusin, M. Majkut, K. Stockcar, Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. پلیمری و کمپرسور الکتروشیمیایی، افت ولتاژهای فعال‌سازی آند و کاتد، اهمیت و غلظتی رخ می‌دهد و سبب افزایش ولتاژ کلی سیستم و توان مصرفی آن‌ها می‌شود.
- با بررسی منحنی‌های پلاریزاسیون الکترولاایزر غشا پلیمری و کمپرسور الکتروشیمیایی می‌توان دریافت که افزایش چگالی جریان منجر به افزایش افت ولتاژها و در نتیجه ولتاژ کلی می‌شود.
  - با بررسی تاثیر پارامتر فشار بر عملکرد الکترولاایزر غشا پلیمری مشخص شد که افزایش فشار کاتد از ۱ بار تا ۱۷/۲۳ بار، منجر به افزایش توان مصرفی الکترولاایزر می‌شود.
  - با بررسی پارامتر فشار بر عملکرد کمپرسور الکتروشیمیایی مشخص می‌شود که افزایش فشار آند از ۱ بار تا ۱۷/۲۳ منجر به کاهش توان مصرفی کمپرسور الکتروشیمیایی می‌شود.

## منابع

- [1] S. S. Kumar, V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technology*, 2(2019) 442-454.
- [2] G. Sdanghi, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, Towards non-mechanical hybrid hydrogen compression for decentralized hydrogen facilities. *Energies*, 13(2020) 3145.
- [3] R. S. El-Emam, I. Khamis, Advances in nuclear hydrogen production: Results from an IAEA international collaborative research project. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2019) 19080-19088.
- [4] R. W. Howrah, M. Z. Jacobson, How green is blue Hydrogen? *Energy Science Engineering*, 9(2121) 1676-1687.
- [5] J. Zou, N. Han, J. Yan, Q. Feng, Y. Wang, Z. Zhao, J. Fan, L. Zeng, H. Li, H. Wang, Electrochemical compression technologies for high-pressure hydrogen: Current status, challenges and perspective. *Electrochemist. Energy Review*, 3(2020) 690-729.
- [6] S. Atitlan, S. Park, M. M. El-Halwagi, M. Atitlan, M. Moore, R. B. Nielsen, Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31(2021) 100668.

- 112(2002) 583-587.
- [22] N. V. Dale, M. D. Mann, H. Salehfar, A. M. Dhirde, T. Han, Modeling and analysis of electrochemical hydrogen compression. In Proceedings of the NHA Annual Hydrogen Conference, Sacramento Convention Center, Sacramento, USA, 2017
- [23] Y. S. K. De Silva, P. H. Middleton, M. L. Kolhe, Performance comparison of mono-polar and bi-polar configurations of alkaline electrolysis stack through 3-D modelling and experimental fabrication. *Renewable Energy*, 149(2020) 760-772.
- [24] M. D. Dashtebayaz, A. E. Moghadam, S. I. Pishbin, M. Pourramezan, Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermo-physical properties with various compositions. *Energy*, 167(2019) 235- 245.
- [25] U. Akyol, D. Akal, A. Durak, Estimation of power output and thermodynamic analysis of standard and finned photovoltaic panels. *Energy Sources*, 3(2023) 8438-8457.
- [26] F. Moradi Nafchi, E. Afshari, E. Baniasadi, Numerical simulation and performance analysis of solar hydrogen production using anion exchange membrane electrolyzer and blending with natural gas. *Energy Conversion and Management*, 299(2024) 117874-117894.
- International Journal of Pressure Vessels and Piping, 166(2018) 24-34.
- [16] Z. Abdin, C. J. Webb, E. M. Gray, Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyze cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(2015) 13243-13257.
- [17] R. García-Valverde, N. Espinosa, A. Urbina, Simple PEM water electrolyzer model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2012) 1927-1938.
- [18] G. N. B. Durmus, C. O. Copan, Y. Devrim, A review on the development of the electrochemical hydrogen compressors. *Journal of Power Sources*, 494(2021) 229743.
- [19] M. Bampaou, K. D. Panopoulos, A. I. Papadopoulos, P. Seferlis, S. Voutetakis, An electrochemical hydrogen compression model. *Chemical Engineering Transaction*, 70(2018) 1213-1218.
- [20] M. Schalenbach, G. Tjarks, M. Carmo, W. Lueke, M. Mueller, D. Stolten, Acidic or alkaline? Towards a new perspective on the efficiency of water electrolysis. *Journal of. Electrochemical. Society*, 163(2016) F3197.
- [21] T. Ioroi, K. Yasuda, Z. Siroma, N. Fujiwara, Y. Miyazaki, Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Zayandehroodi, E. Afshari, M. Mosharaf-Dehkordi, Analysis of the hydrogen production system using a polymer membrane electrolyzer and its transfer to the natural gas pipeline, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(12) (2025) 1609-1628.

DOI: [10.22060/mej.2025.23403.7758](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23403.7758)

