



Performance and Emission Analysis of an Energy System Based on Thermochemical Processes and a Proton-Conducting Electrolyte Fuel Cell

Parisa Mojaver*

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

* corresponding author: (p.mojaver@kut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 25 August 2025

Revised: 24 November 2025

Accepted: 3 December 2025

Keywords:

Proton-conducting SOFC,
energy system,
machine learning,
regression model.

Abstract

In this study, the performance of a hybrid system based on a thermochemical process and a proton-conducting electrolyte fuel cell is investigated from the perspectives of energy production and environmental emissions. To study the system behavior, machine learning-based regression methods were employed, and after data preprocessing, the models were trained and validated. Subsequently, system optimization was carried out with the objectives of maximizing power output and minimizing environmental emissions. The results indicate that increasing the current density and inlet temperature leads to higher power generation, while high current densities result in increased carbon dioxide emissions. The optimal operating conditions were achieved at a current density of 5798 A/m², a temperature of 800 °C, and a fuel utilization ratio of 0.80. The minimum carbon dioxide emissions, independent of the fuel utilization ratio, were obtained at current densities below 3500 A/m², ranging between 500 and 800 kg/MWh.

Introduction

Machine learning has become an increasingly powerful tool for enhancing the performance and efficiency of modern energy systems. By analyzing large datasets, ML can reveal hidden patterns that are often overlooked by traditional modeling approaches. These data-driven insights support more accurate prediction of energy demand, improved resource management, and reduced operational costs. SOFCs are recognized as an advanced technology for clean and efficient power generation. Their high electrical efficiency and low pollutant emissions make them valuable in modern energy systems. A key innovation is the use of proton-conducting SOFCs, which transport protons rather than oxygen ions. They offer key advantages such as lower operating temperatures, improved material stability, and reduced ohmic losses. Gasification converts solid waste into combustible syngas containing H₂, CO, and CH₄, which can be used directly as fuel. This approach not only reduces landfill-associated emissions but also enhances circular economy objectives by turning waste into valuable energy.

The present study proposes a hybrid waste-to-energy system that couples a proton-conducting SOFC with municipal solid waste gasification while employing ML techniques to optimize net power output and minimize CO₂ emissions. This integration aligns with global efforts toward decarbonization and offers a practical solution for clean and sustainable energy generation.

Methodology

In this study, an integrated energy system is developed based on a proton-conducting SOFC combined with an MSW gasification unit. The system configuration is illustrated in Figure 1. In the gasification reactor, steam is introduced as the gasifying agent along with MSW as the primary feedstock. Through the gasification reaction presented in Eq. (1), the solid waste is converted into synthesis gas (syngas). This syngas, which mainly consists of H₂, CO, CO₂, CH₄, and H₂O, is subsequently supplied to the proton-conducting SOFC, where electrochemical reactions generate electrical power efficiently.

To Cite this article:

Mojaver, P. 2025. Performance and emission analysis of an energy system based on thermochemical processes and a proton-conducting electrolyte fuel cell, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(2), 127-135.
<https://doi.org/10.24200/ij40.2025.67629.1751>

The elemental ratios of the solid waste, defined as z_1 , z_2 , and z_3 for O/C, H/C, and N/C, respectively, are incorporated into the model. The composition of syngas is determined using a combined Gibbs free energy minimization and Lagrange multipliers method, based on the ultimate analysis of MSW (C: 48.81%, H: 6.86%, O: 41.09%, N: 2.78%) [15].

The output voltage of the proton-conducting SOFC is calculated by Eq. (2), which includes the Nernst potential and associated voltage losses (Eqs. (3)-(4)) [16-18]. The net electrical power generation and CO₂ emission rate of the integrated system are then evaluated using Eqs. (6) and (7). The regression model predicts system outputs and supports the identification of optimal operating conditions for maximizing power generation while minimizing emissions. According to the Eq. (8), the regression model predicts the response Y , where β_0 is the intercept, β_1 and β_2 represent input effects, and ε is the error term.

Results and Discussion

A proton-conducting SOFC system powered by MSW-derived syngas is proposed and analyzed in terms of net power output and CO₂ emissions under varying current density, inlet temperature, and fuel-utilization ratio. SOFC voltage and power density align well with benchmark results, demonstrating that the electrochemical model reliably represents SOFC performance (Figure 2).

Figure 3 illustrates the effects of current density and inlet temperature on the net power. The results show that higher current densities and higher temperatures lead to greater power. At low current densities, temperature has little influence, whereas above 5000 A/m² power becomes highly temperature-sensitive, rising from 89 kW to 318 kW. Figure 4 examines net power as a function of both current density and fuel-utilization ratio. Maximum power occurs at high current density and low utilization. Below 3000 A/m², power remains nearly constant with increasing utilization, while above this threshold it declines. Sensitivity to current density is greater at low utilization, with power ranging from 114 kW to 318 kW. Figure 5 evaluates CO₂ emissions under

simultaneous changes in current density and temperature. Maximum emissions occur at high current density and low temperature, while minimum values appear at low current density and high temperature. At high densities, CO₂ rises sharply with temperature (1085-4468 kg/MWh). Figure 6 shows CO₂ emissions versus current density and fuel-utilization. Temperature has a negligible effect at a fixed current density. Minimum emissions (500-800 kg/MWh) occur below 3500 A/m² regardless of utilization. Figure 7 presents the multi-objective optimization, identifying optimal conditions at 5798 A/m², 800 °C, and 0.80 utilization, yielding 315.3 kW net power and 1001.4 kg/MWh CO₂. Table 1 confirms high regression reliability through strong R² metrics.

Conclusion

A proton-conducting SOFC system powered by MSW-derived syngas is proposed and analyzed in terms of net power output and CO₂ emissions under varying current density, inlet temperature, and fuel-utilization ratio. The key findings are summarized as follows:

- ✓ Maximum power generation occurs at high current density and low fuel utilization.
- ✓ At high current densities, CO₂ emissions significantly increase with temperature, rising from 1085 to 4468 kg/MWh.
- ✓ Minimum emissions (500-800 kg/MWh) are achieved at current densities below 3500 A/m².
- ✓ The optimal operating point is 5798 A/m², 800 °C, and 0.80 fuel utilization.
- ✓ Under optimal conditions, the net power output reaches 315.3 kW with CO₂ emissions of 1001.4 kg/MWh.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



بهینه‌سازی سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی با شیوه‌ی یادگیری ماشین

پریسا مجاور*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

*نویسنده مسئول (p.mojaver@kut.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، یک سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی پیشنهاد شده است، که سوخت آن با استفاده از گازسازی زباله‌های جامد شهری تأمین می‌شود. پارامترهای هدف، توان خالص تولیدی و میزان نشر دی‌اکسیدکربن هستند؛ که به ازاء تغییرات پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی، و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد مطالعه شده‌اند. با استفاده از روش یادگیری ماشین، مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی رفتار خروجی-ها استخراج شده است. سپس بهینه‌سازی دودفده به‌منظور بیشینه‌سازی توان خالص تولیدی و کمینه‌سازی دی‌اکسیدکربن منتشرشده انجام شده و نتایج نشان داده است که بهینه‌ترین حالت به ازاء چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ به‌دست آمده است. در شرایط بهینه، مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده برابر ۱۰۰۱/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت به‌دست آمده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

واژگان کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد،

سیستم انرژی،

هدایت پروتونی،

یادگیری ماشین،

مدل رگرسیون.

۱. مقدمه

در زمینه‌ی سیستم‌های انرژی، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین^۱ می‌تواند به شکل قابل‌توجهی به بهبود عملکرد و بهره‌وری سیستم‌های انرژی کمک کند؛^[۱] و امکان تحلیل حجم عظیمی از داده‌های تولیدشده توسط سیستم‌های انرژی را فراهم سازند و از این طریق می‌توانند الگوها و روندهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کنند، تا به پیش‌بینی دقیق‌تر نیازهای انرژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، و کاهش هزینه‌ها دست یابند.^[۲] در فرآیند بهینه‌سازی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند راهکارهای جدید و بهینه‌تری برای مدیریت منابع انرژی ارائه دهند، به‌طوری که مصرف انرژی به میزان کمینه و بازدهی سیستم‌ها به میزان بیشینه برسد. همچنین، روش‌های یادگیری ماشین می‌توانند در توسعه و بهبود مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی و ارائه‌ی راهکارهای بهینه جهت بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی مؤثر واقع شوند.^[۳]

پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFCs)^۲ به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در زمینه‌ی تولید انرژی پاک و کارآمد شناخته می‌شوند و به‌دلیل قابلیت تولید برق با بهره‌وری بالا و انتشار آلاینده‌های کمتر، اهمیت ویژه‌ای در

سیستم‌های انرژی دارند.^[۴] یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، توسعه‌ی پیل‌های سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی^۳ است؛ که به جای انتقال یون‌های اکسیژن، یون‌های پروتون را از طریق الکترولیت سرامیکی خود منتقل می‌کنند. این ویژگی منحصر به‌فرد، مزایای زیادی از جمله کاهش دمای عملیاتی، افزایش پایداری مواد، و بهبود کارایی کلی سیستم را به همراه دارد.^[۵] اهمیت پیل‌های سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی در سیستم‌های انرژی به‌ویژه در زمینه‌های مختلفی، مانند: تولید برق پایدار، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوس است.^[۶]

راه‌اندازی سیستم‌های انرژی بر پایه‌ی زباله‌های جامد شهری^۴، نه فقط راه‌حلی پایدار برای مدیریت زباله‌ها ارائه می‌دهد، بلکه فرصتی برای تولید انرژی پاک و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی نیز فراهم می‌کند. استفاده از فرآیند گازسازی برای تبدیل زباله‌های جامد شهری به انرژی می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی مؤثر در مدیریت پایدار زباله‌ها و تولید انرژی تجدیدپذیر مطرح شود.^[۷] در فرآیند گازسازی، زباله‌های جامد در دماهای بالا و در شرایط کم‌اکسیژن تجزیه می‌شوند و به سینگاز تبدیل می‌شوند. سینگاز تولیدشده، شامل: گازهای قابل اشتعالی مانند هیدروژن، مونو‌اکسیدکربن، و متان است، که می‌تواند به‌عنوان

³ Proton conducting SOFCs

⁴ Municipal solid waste

¹ Machine Learning

² Solid oxide fuel cells

استناد به این مقاله:

مجاور، پریسا، ۱۴۰۴. بهینه‌سازی سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی با شیوه‌ی یادگیری ماشین. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۲)، صص. ۱۲۷-۱۳۵.

<https://doi.org/10.24200/40.2025.67629.1751>



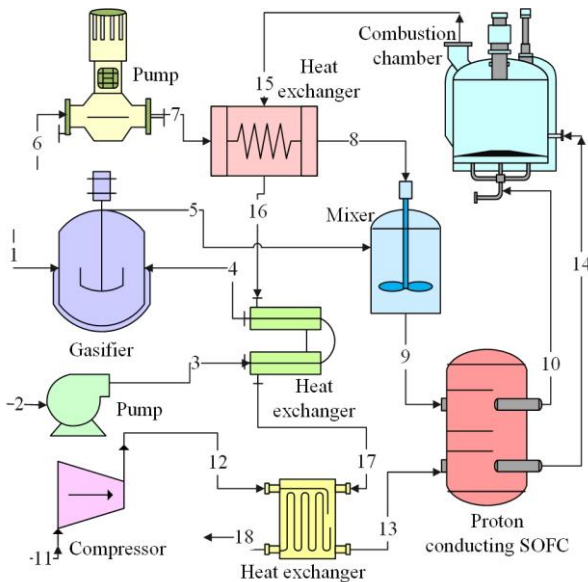


Figure 1. Configuration of an energy system based on a proton-conducting solid oxide fuel cell.

شکل ۱. پیکربندی سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی.

عمدتاً بر تحلیل ترمودینامیکی یا بهینه‌سازی مستقل هر بخش تمرکز داشته‌اند، نوآوری پژوهش حاضر در ادغام گازسازی زباله‌های شهری با پیل سوختی هدایت پروتونی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی همزمان توان و آلایندگی است. شایان ذکر است که انتخاب پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی به دلیل دمای عملیاتی پایین‌تر (حدود ۶۰۰-۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس)، پایداری بهتر مواد سرامیکی، و کاهش افت‌های اهمی نسبت به پیل‌های هدایت اکسیژنی صورت گرفته است. ویژگی‌های مذکور منجر به افزایش بازده و طول عمر سیستم می‌شوند.

۲. مدل‌سازی سیستم انرژی

در پژوهش حاضر، یک سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی توسعه داده شده است، که با یک سیستم گازسازی زباله‌های جامد شهری ادغام شده است. پیکربندی سیستم انرژی مذکور در شکل ۱ مشاهده می‌شود. بخار آب به‌عنوان عامل گازسازی به همراه زباله‌های جامد شهری به عنوان سوخت وارد راکتور گازسازی می‌شود و با انجام واکنش گازسازی مطابق رابطه‌ی ۱، سینگاز تولید و وارد پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی می‌شود و در آنجا با رخ دادن واکنش‌های الکتروشیمیایی، توان تولید می‌شود.



که در آن، x تعداد مول‌های بخار آب به‌عنوان عامل گازسازی و y_i تعداد مول‌های اجزاء سینگاز هستند، که شامل: هیدروژن، متان، مونواکسید کربن، دی-اکسید کربن، و بخار آب هستند. Z_1 نسبت مولی اکسیژن به کربن، Z_2 نسبت مولی هیدروژن به کربن، و Z_3 نسبت مولی نیتروژن به کربن را در ترکیب شیمیایی زباله‌های جامد شهری نشان می‌دهند. برای پیدا کردن تعداد مول‌های

منبع سوخت در تولید برق و حرارت استفاده شود.^[۸] روش اخیر نه فقط به کاهش حجم زباله‌ها کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلایندگی‌های مضر می‌شود. سیستم‌های انرژی بر پایه‌ی گازسازی زباله‌های جامد شهری می‌توانند به‌طور قابل توجهی به کاهش بار زیست‌محیطی ناشی از دفن زباله‌ها و سوزاندن آن‌ها کمک کنند.^[۹]

جاو و ژو^[۱۰] (۲۰۲۵) یک سیستم ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد را مدل‌سازی و بهینه‌سازی کرده و دریافته‌اند که تنظیم مناسب اندازه‌ی پیل سوختی اکسید جامد می‌تواند بازده انرژی کل سیستم را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. این نوع داده‌های تحلیل حساسیت، چارچوب مناسبی برای توسعه‌ی مدل‌های سریع یادگیری ماشین جهت ارزیابی عملکرد کلی در بهینه‌سازی‌های چندهدفه فراهم می‌سازد. در مطالعه‌ی دیگر، یو^۶ و همکاران (۲۰۲۶)^[۱۱] یک سیستم پیرولیز مایکروویو زیست‌توده با تأمین توان از پیل سوختی اکسید جامد را معرفی کرده‌اند. نتایج ایشان، شامل اثر نوع زیست‌توده بر بازده سوخت نشان داد، که این قابلیت را دارند که به‌عنوان داده‌های پایه برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی بازده پیل سوختی اکسید جامد استفاده شوند. قربانی و همکاران (۲۰۲۴)^[۱۲] یک سیستم تولید هیدروژن از بیوگاز و پیل سوختی اکسید جامد را بررسی کرده‌اند. همچنین با استفاده از یادگیری ماشین، روابط پیش‌بینی‌کننده‌ی خروجی‌ها مانند نرخ تولید هیدروژن و سود سالیانه را مدل‌سازی کرده‌اند. لی^۷ و همکاران (۲۰۲۱)^[۱۳] کنترل ولتاژ خروجی پیل سوختی اکسید جامد را با بهره‌گیری از یادگیری تقویتی عمیق چندعاملی بهبود داده و دریافته‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در افزایش عمر مفید و پایداری عملیاتی سیستم، نقش مهمی داشته باشند. درنهایت، وانگ^۸ و همکاران (۲۰۲۲)^[۱۴] یک چارچوب ترکیبی شامل مدل چندفیزیکی، یادگیری عمیق، و بهینه‌سازی ژنتیک را برای بهبود عملکرد و دوام پیل سوختی اکسید جامد ارائه کرده و دریافته‌اند که استفاده از یادگیری ماشین می‌تواند به کاهش تخریب و افزایش طول عمر سیستم منجر شود.

پژوهش حاضر با توسعه و ادغام یک سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی و سیستم گازسازی زباله‌های جامد شهری، نوآوری‌های قابل توجهی را در حوزه‌ی انرژی پایدار معرفی کرده است. اهمیت پژوهش حاضر در آن است که با استفاده از مواد تجدیدپذیر و ضایعات شهری، به تولید انرژی پاک و کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی کمک می‌کند. ادغام سیستم گازسازی با پیل سوختی، امکان استفاده‌ی بهینه از انرژی حاصل از زباله‌های شهری را فراهم می‌سازد و به افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی منجر می‌شود. همچنین، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم انرژی، نوآوری دیگری است که پژوهش حاضر را از سایر مطالعات مشابه متمایز می‌سازد. ضرورت پژوهش حاضر از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است. نخست، با توجه به افزایش حجم زباله‌های شهری و نیاز به مدیریت مؤثر آن‌ها، ارائه‌ی راهکارهایی برای تبدیل زباله‌ها به منابع انرژی تجدیدپذیر اهمیت فراوانی دارد. دوم، با توجه به تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه‌ی سیستم‌های انرژی پاک و پایدار ضروری است. پژوهش حاضر با ارائه‌ی راهکارهایی نوین، به کاهش آثار منفی زیست‌محیطی و ارتقاء پایداری سیستم‌های انرژی کمک می‌کند. در مقایسه با مطالعات پیشین، که

⁷ Li

⁸ Wang

⁵ Gao & Zhou

⁶ Yue

روش پژوهش در مطالعه حاضر برای توسعه الگوریتم‌های رگرسیون، شامل یک رویکرد هدفمند برای مدل‌سازی رابطه بین پاسخ‌های سیستم و متغیرهای ورودی بوده است. دو متغیر دمای ورودی و چگالی جریان هر کدام در ۵ سطح متفاوت بوده‌اند، که منجر به طراحی جامع شده است. این طراحی فاکتوریل، کاوش قوی در فضای ورودی را تضمین و آثار هر متغیر را در خروجی‌های سیستم ثبت می‌کند. شکل کلی الگوریتم رگرسیون خطی برای سه متغیر را می‌توان به صورت رابطه ۸ بیان کرد:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(T) + \beta_2(J) + \varepsilon \quad (8)$$

که در آن، Y پاسخ پیش‌بینی شده، β_0 نقطه‌ی قطع، β_1 و β_2 ضرایب مربوط به هر متغیر ورودی (β_1 مربوط به دمای ورودی و β_2 مربوط به چگالی جریان) هستند و ε نشانگر عبارت خطاست. ضرایب مذکور از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون تعیین می‌شوند و یک معیار کمی از تأثیر هر متغیر ورودی در پاسخ ارائه می‌دهند. عملکرد مذکور با استفاده از مقدار R-squared ارزیابی شده است، که نسبت واریانس در پاسخ‌ها را که از متغیرهای ورودی قابل پیش‌بینی است، کمی نشان می‌دهد و به عنوان معیاری برای دقت پیش‌بینی مدل‌ها عمل می‌کند. [۱۸]

در پژوهش حاضر، از روش رگرسیون به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی سیستم انرژی استفاده شده است؛ که اجرای آن شامل چند مرحله‌ی اساسی بوده است. ابتدا، داده‌های مربوط به عملکرد سیستم انرژی جمع‌آوری و پردازش شده‌اند؛ که شامل ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، پارامترهای عملیاتی، و متغیرهای محیطی بوده‌اند. در مرحله بعد، داده‌ها به منظور شناسایی الگوهای اصلی و حذف نویزها و داده‌های نامعتبر، پیش‌پردازش شده‌اند. پس از آماده‌سازی داده‌ها، مدل رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد سیستم انرژی طراحی و آموزش داده شد؛ که با استفاده از داده‌های آموزشی که شامل مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌های مشاهده شده بوده است، صورت گرفته است. در این مرحله، پارامترهای مدل تنظیم و با استفاده از روش‌هایی مانند اعتبارسنجی متقابل، بهترین تنظیمات برای مدل انتخاب شده‌اند. پس از آموزش مدل، عملکرد آن با استفاده از داده‌های آزمایشی ارزیابی شده است، تا دقت و قابلیت پیش‌بینی آن بررسی شود. مدل رگرسیون در نهایت برای بهینه‌سازی سیستم انرژی استفاده شده است. با تحلیل نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل، پارامترهای عملیاتی سیستم تنظیم و بهینه‌سازی شده‌اند تا عملکرد کلی سیستم بهبود یابد. این بهینه‌سازی شامل شناسایی شرایط بهینه برای بهره‌برداری از سیستم و کاهش آلایندگی سیستم بوده است. نتایج نشان داده است که استفاده از روش رگرسیون می‌تواند به طور مؤثری به بهبود کارایی و بهره‌وری سیستم‌های انرژی کمک کند و راهکارهایی عملی برای مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی ارائه دهد.

۳. نتایج و بحث

پیش از استخراج نتایج و تحلیل آن‌ها، باید مدل‌سازی انجام شده اعتبارسنجی شود. بدین منظور نتایج حاصل از گازسازی زباله‌های جامد شهری با استفاده از مدل‌سازی در پژوهش حاضر با نتایج حاصل از روش تجربی نوشتار لوها^۹ و همکاران (۲۰۱۱)، [۱۹] در شکل ۲-۳ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، سیگنال به‌دست‌آمده با استفاده از مدل‌سازی و روش تجربی، مقادیر مشابهی دارند. عملکرد پیل سوختی اکسید جامد نیز با مقایسه‌ی ولتاژ تولیدی

اجزاء سیگنال از ترکیب روش‌های کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده شده است. مشخصات عنصری زباله‌های جامد شهری به صورت ۴۸/۸۱٪ کربن، ۶/۸۶٪ هیدروژن، ۴۱/۰۹٪ اکسیژن، و ۲/۷۸٪ نیتروژن، [۱۵] بوده است.

ولتاژ پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی (V) مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید: [۱۶]

$$V = V_N - \sum V_L \quad (2)$$

که در آن، V_N ولتاژ نرنست (مطابق رابطه ۳) و V_L ولتاژ اتلافی (مطابق رابطه ۴) هستند: [۱۷، ۱۸]

$$V_N = \frac{1}{2F} \left[T\bar{R} \left\{ \ln \frac{P_{H_2}^a}{P_{H_2O}^c} \sqrt{\frac{P_{O_2}^c}{P_{H_2O}^c}} \right\} - \Delta \bar{G}^\circ \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum V_L = V_{loss}^{ac,a} + V_{loss}^{ac,c} + V_{loss}^{oh} + V_{loss}^{co,a} + V_{loss}^{co,c} = \\ \left[\sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0^a} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0^c} \right) \right] \cdot \frac{T\bar{R}}{F} + \left(\sum_i \delta_i / \tau_i \right) J \\ + \left(\ln \left(\frac{P_{H_2}^a}{P_{H_2}^{a,TPB}} \right) + \left[\ln \left(\sqrt{\frac{P_{O_2}^c}{P_{O_2}^{c,TPB}}} \right) \times \left(\frac{P_{H_2O}^{c,TPB}}{P_{H_2O}^c} \right) \right] \right) \cdot \frac{T\bar{R}}{2F} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن‌ها، P_i فشار جزئی اجزاست و اندیس‌های a و c برای آند و کاتد استفاده شده‌اند. T دما و $\bar{R}$ ثابت جهانی گاز را نشان می‌دهند و F و $\bar{G}^\circ$ به ترتیب به ثابت فارادی و انرژی آزاد گیبس استاندارد و همچنین J به چگالی جریان و J_0 به چگالی جریان تبدیلی اشاره دارند. δ ضخامت و τ رسانایی را نشان می‌دهند و P^{TPB} به فشار جزئی در مرز سفاز اشاره دارد.

توان تولیدی توسط پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی (W) مطابق رابطه ۵ به دست می‌آید: [۱۷]

$$W = N A V J \quad (5)$$

که در آن، N به تعداد سلول‌ها و A به سطح فعال اشاره دارند. در پژوهش حاضر، ۱۱۰۰ سلول استفاده شده و سطح فعال برابر ۰/۰۱ مترمربع بوده است. اختلاف دمای ورودی و خروجی پیل سوختی ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس، نسبت بخار به کربن آن ۲، و مقدار ثابت فارادی ۹۶۴۸۵ کولن بر مول بوده است. [۱۷]

توان خالص تولیدی و میزان دی‌اکسید منتشرشده در سیستم به عنوان پارامترهای خروجی سیستم انتخاب شده‌اند، که به ترتیب در معادله‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند:

$$W_{net} = W_{SOFC} - W_{Comp} - W_{Pump,1} - W_{Pump,2} \quad (6)$$

$$CO_2 emission = \frac{m_{CO_2}}{W_{net}} \times 3600 \quad (7)$$

که در رابطه ۶، W معرف توان است که به ترتیب مربوط به توان‌های تولیدی خالص و پیل سوختی اکسید جامد و توان‌های مصرفی کمپرسور و پمپ‌های اول و دوم است. همچنین، W در رابطه ۷، میزان دی‌اکسید منتشرشده در سیستم است، که از نسبت دبی جرمی دی‌اکسید کربن به توان خالص تولیدی سیستم در طول یک ساعت حاصل می‌شود.

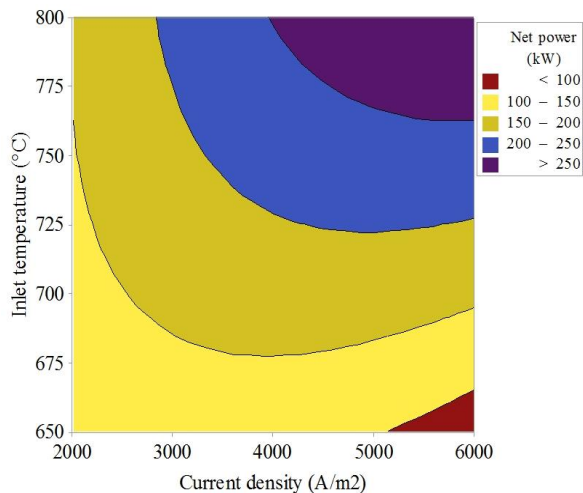


Figure 3. Interaction effect of the current density and the temperature of the proton conducting solid oxide fuel cell on the net power generation of the energy system.

شکل ۳. اثر همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در توان خالص تولیدی سیستم انرژی.

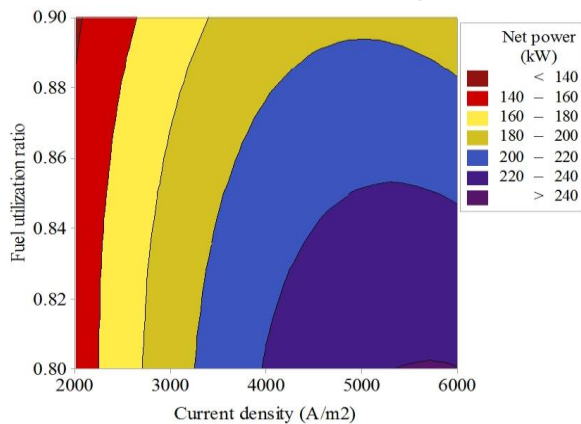


Figure 4. Interaction effect of the current density and the fuel utilization ratio of the proton conducting solid oxide fuel cell on the net power generation of the energy system.

شکل ۴. اثر همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در توان خالص تولیدی سیستم انرژی.

کیلووات رسیده است. به همین ترتیب، حساسیت توان تولیدی نیز در دماهای بالا نسبت به تغییرات چگالی جریان بیشتر بوده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۱۸ و ۲۱] هم‌راستا بوده است.

تغییرات توان خالص تولیدی سیستم انرژی پیشنهادی نسبت به تغییرات همزمان چگالی جریان و نسبت به مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با توجه به یافته‌ها، بیشینه‌ی توان تولیدی سیستم به ازاء چگالی جریان بالا و نسبت مصرف سوخت پایین اتفاق افتاده است. در چگالی جریان کمتر از ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع، مقدار توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت ثابت مانده است. در حالی که در چگالی جریان بیشتر از ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع، مقدار توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت دچار افت شده است. از طرفی، هم حساسیت توان تولیدی سیستم به تغییرات چگالی جریان در نسبت‌های مصرف سوخت پایین بیشتر شده است، به‌طوری که مقدار آن در کمترین نسبت‌های مصرف سوخت، از

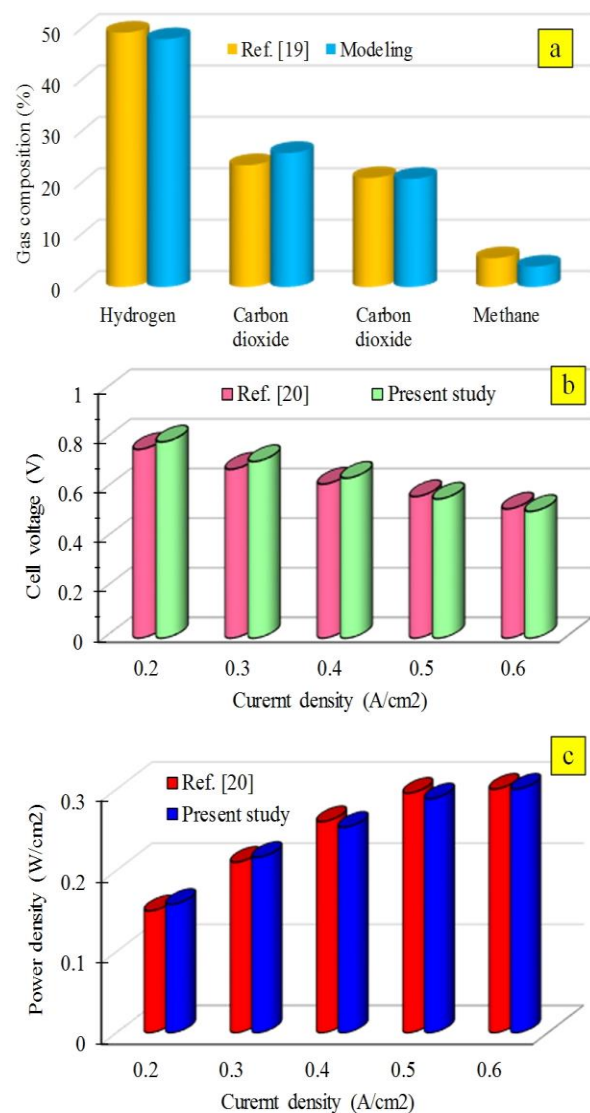


Figure 2. Validation: (a) syngas of the municipal solid waste gasification, (b) voltage and (c) power density of the solid oxide fuel cell versus the current density.

شکل ۲. اعتبار سنجی: (a) سینگاز گازسازی زباله‌های جامد شهری، (b) ولتاژ تولیدی، و (c) چگالی توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد به ازاء تغییرات چگالی جریان.

و چگالی توان تولیدی آن به ازاء چگالی‌های جریان متفاوت با نوشتار رنجبر و همکاران (۲۰۱۴)،^[۲۰] مقایسه شده است. مطابق شکل‌های ۲-b و ۲-c مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی پژوهش حاضر با نتایج مطالعات پیشین در تطابق خوبی بوده است. بنابراین، پس از اطمینان از درستی مدل‌سازی، عملکرد سیستم انرژی پیشنهادی بررسی شده است.

در شکل ۳، اثر همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در توان خالص تولیدی سیستم انرژی مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سیستم انرژی پیشنهادی در چگالی جریان‌ها و دماهای بالاتر پیل سوختی، توان خالص بیشتری تولید کرده است. توان تولیدی در چگالی جریان‌های پایین نسبت به تغییرات دما حساس نیست. در حالی که در چگالی جریان‌های بالاتر از ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع، حساسیت توان تولیدی به دما بسیار زیاد بوده است؛ به‌طوری که مقدار آن از ۸۹ کیلووات به ۳۱۸

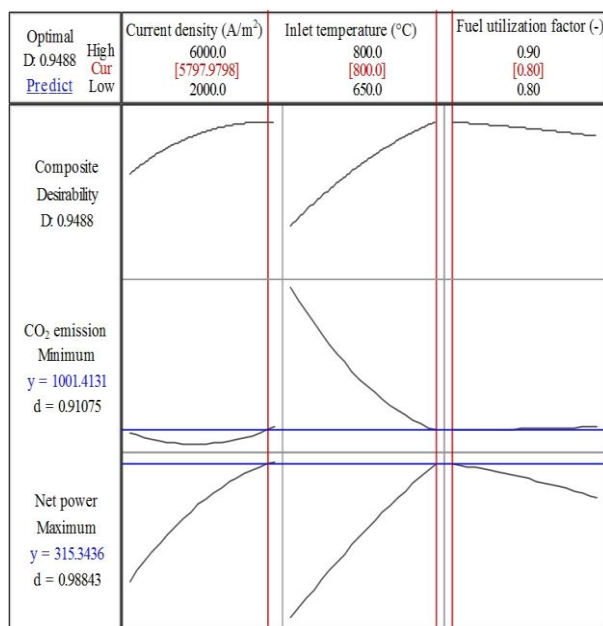


Figure 7. Outputs optimization based on the key parameters of the proposed energy system.

شکل ۷. بهینه‌سازی خروجی‌ها براساس پارامترهای عملیاتی ورودی در سیستم انرژی پیشنهادی.

دی‌اکسیدکربن منتشرشده را افزایش داده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۲۲ و ۲۳] هم‌راستا بوده است.

میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم به ازاء تغییرات همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در چگالی جریان ثابت، افزایش دما اثری در دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم نداشته است. این در حالی است که به ازاء تمامی دماها، در یک دمای ثابت، افزایش چگالی جریان به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای، دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم را تحت تأثیر قرار داده و موجب افزایش آن شده است. کمینه‌ی دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم در چگالی‌های جریان کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع فارغ از مقدار نسبت مصرف سوخت اتفاق افتاده است، که مقدار آن در بازه‌ی ۵۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت بوده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۲۲ و ۲۳] هم‌راستا بوده است.

در شکل ۷، نمودار بهینه‌سازی دو هدف توان خالص تولیدی و دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم به ازاء پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی، و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی مشاهده می‌شود. این بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی توان خالص تولیدی و کمینه‌سازی دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم انجام شده است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، بهینه‌ترین حالت به ازاء چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ به‌دست آمده است. در شرایط بهینه، مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده برابر ۱۰۰۱/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت به‌دست آمده است.

در جدول ۱، مقادیر R-square، R-square (adjusted)، و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت

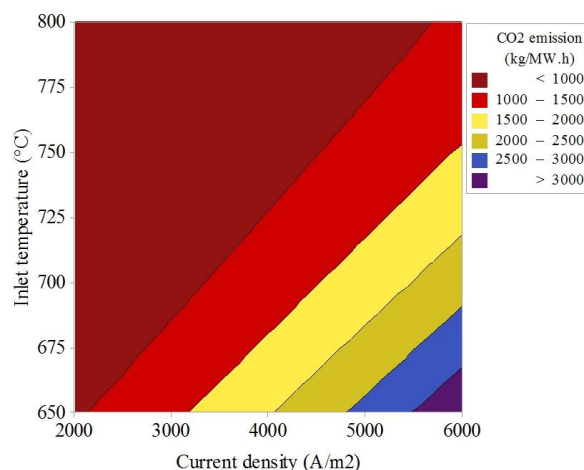


Figure 5. Interaction effect of the current density and the temperature of the proton conducting solid oxide fuel cell on the CO₂ emission of the energy system.

شکل ۵. اثر همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی.

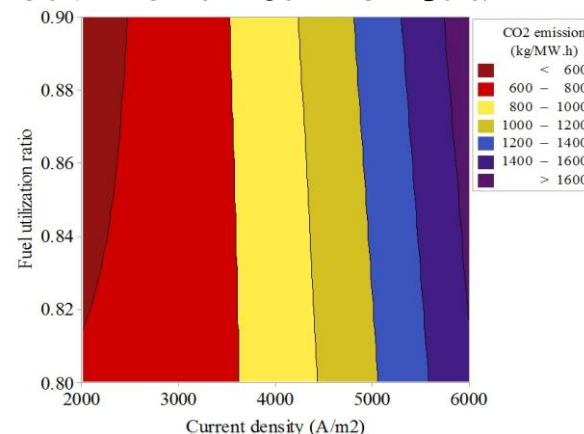


Figure 6. Interaction effect of the current density and the fuel utilization ratio of the proton conducting solid oxide fuel cell on the CO₂ emission of the energy system.

شکل ۶. اثر همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی.

۱۱۴ تا ۳۱۸ کیلووات متغیر بوده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج برخی مطالعات پیشین،^[۱۸ و ۲۱] هم‌راستا بوده است.

در شکل ۵، بررسی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی پیشنهادی نسبت به تغییرات همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشینه‌ی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در چگالی‌های جریان بالا و دماهای پایین پیل سوختی و متعاقباً کمینه‌ی مقدار آن در چگالی‌های جریان پایین و دماهای بالا رخ داده است. از دیدگاه حساسیت، در چگالی‌های جریان پایین، دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم به افزایش دما حساس نبوده است؛ در حالی که در مقادیر بالای چگالی جریان، مقدار آن با افزایش دما از ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت افزایش یافته است. در دماهای بالا نیز چگالی جریان تأثیر محسوسی در دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم نداشته است، در حالی که در دماهای پایین، افزایش چگالی جریان به شدت مقدار

جدول ۱. مقادیر R-square (adjusted), R-square (predicted) و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی.

Table 1. Values of R-square, R-square (adjusted), R-square (predicted) for predicting the net power and the CO₂ emission of the energy system.

	R-square	R-square (adjusted)	R-square (predicted)
Net Power	99.84 %	99.82 %	99.77 %
CO₂ emission	90.46 %	89.10 %	84.99 %

سیستم با افزایش دما از ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت افزایش یافته است.

۳- میزان کمینه در چگالی‌های جریان کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع فارغ از مقدار نسبت مصرف سوخت اتفاق افتاده است، که میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم در بازه‌ی ۵۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت بوده است.

۴- بهینه‌ترین حالت به ازاء چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ به‌دست آمده است.

۵- در شرایط بهینه، مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده برابر ۱۰۰۱/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت به‌دست آمده است.

که خروجی‌های مدل با قابلیت اطمینان بالایی تخمین زده شده‌اند و مدل رگرسیون قابل استناد است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک سیستم انرژی بر پایه‌ی پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی پیشنهاد شده است، که سوخت آن با استفاده از گازسازی زیاله-های جامد شهری تأمین می‌شود. پارامترهای هدف، توان خالص تولیدی و میزان نشر هستند، که به ازاء تغییرات پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی، و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسیدجامد مطالعه شده‌اند. نتایج کلی سیستم مطالعه‌شده به این شرح هستند:

۱- بیشینه‌ی توان خالص تولیدی سیستم به ازاء چگالی جریان بالا و نسبت مصرف سوخت پایین اتفاق افتاده است.

۲- در مقادیر بالای چگالی جریان، میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در

References – منابع

- Ren B. Chi Y. Zhou N. Wang Q. Wang T. Luo Y. Ye J. and Zhu X. 2024. Machine learning applications in health monitoring of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, pp. 114039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114039>
- Sikiru, S. Oladosu T.L. Amosa T.I. Olutoki J.O., Ansari M.N.M. Abioye K.J. Rehman Z.U. and Soleimani H. 2024. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56, pp.1152-1182. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.186>
- Udo W.S. Kwakye J.M. Ekechukwu D.E. and Ogundipe O.B. 2024. Optimizing wind energy systems using machine learning for predictive maintenance and efficiency enhancement. *Journal of Renewable Energy Technology*, 28(3), pp.312-330. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v4i3.1398>
- Roy D. Samanta S. Roy S. Smallbone A. and Roskilly A.P. 2024. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom. *Green Chemistry*, 26(7), pp.3979-3994. <https://doi.org/10.1039/D3GC02645K>
- Mojaver P. Chitsaz A. Sadeghi M. and Khalilarya S. 2020. Comprehensive comparison of SOFCs with proton-conducting electrolyte and oxygen ion-conducting electrolyte: thermoeconomic analysis and multi-objective optimization. *Energy Conversion and Management*, 205, pp.112455. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112455>
- Tariq U. Khan M.Z. Gohar O. Babar Z.U.D. Ali, F. Malik R.A. Starostina, I.A. Rehman J. Hussain I. Saleem M. and Ghaffar A. 2024. Bridging the gap between fundamentals and efficient devices: advances in proton-conducting oxides for low-temperature solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 613, pp. 234910. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234910>
- Hu Z. Gao P. Wang B. Pan W. Ding L. Tang L. Chen X. and Wang F. 2024. Decoupling study of municipal solid waste gasification: effect of pelletization on pyrolysis and gasification of pyrolytic char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114334. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114334>

8. Arena U. 2012. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. a review. *Waste management*, 32(4), pp.625-639.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
9. Biancini, G. Cioccolanti L. Moradi R. and Moglie M. 2024. Comparative study of steam, organic Rankine cycle and supercritical CO2 power plants integrated with residual municipal solid waste gasification for district heating and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 241, pp.122437.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122437>
10. Gao B. and Zhou Y. 2025. Multi-objective optimization and posteriori multi-criteria decision making on an integrative solid oxide fuel cell cooling, heating and power system with semi-empirical model-driven co-simulation. *Energy Conversion and Management*, 325, pp.119371.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119371>
11. Yue M. Zhang Y. Lv L. Zhu J. Fu Y. and Ye F. 2026. A novel biomass microwave-assisted pyrolysis system driven by solid oxide fuel cell: modeling and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 348, pp.120680.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120680>
12. Ghorbani B. Zendejboudi S. Afrouzi Z.A. and Mohammadzadeh, O. 2024. Efficient hydrogen production via electro-thermochemical process and solid oxide fuel cell: thermodynamics, economics, optimization, and uncertainty analyses. *Energy Conversion and Management*, 307, pp.118175.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118175>
13. Li J. Yu T. and Yang B. 2021. A data-driven output voltage control of solid oxide fuel cell using multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 304, pp.117541.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117541>
14. Wang, Y., Wu, C., Zhao, S., Wang, J., Zu, B., Han, M., Du, Q., Ni, M. and Jiao, K., 2022. Coupling deep learning and multi-objective genetic algorithms to achieve high performance and durability of direct internal reforming solid oxide fuel cell. *Applied energy*, 315, pp.119046.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119046>
15. Khalilarya S. Chitsaz A. and Mojaver P. 2021. Optimization of a combined heat and power system based gasification of municipal solid waste of Urmia university student dormitories via ANOVA and taguchi approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), pp.1815-1827.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.020>
16. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2019. Multi-objective optimization using response surface methodology and exergy analysis of a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 156, pp.627-639.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.104>
17. Razmi A.R. Sharifi S. Vafaeenezhad S. Hanifi A.R. and Shahbakhti M. 2024. Modeling and microstructural study of anode-supported solid oxide fuel cells: experimental and thermodynamic analyses. *International journal of hydrogen energy*, 54, pp.613-634.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.296>
18. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2018. Performance assessment of a combined heat and power system: a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system part I: thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, pp.287-297.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.096>
19. Loha C. Chattopadhyay H. and Chatterjee P.K. 2011. Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Energy*, 36(7), pp.4063-4071.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.042>
20. Ranjbar F. Chitsaz A. Mahmoudi S.S. Khalilarya S. and Rosen M.A. 2014. Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 87, pp.318-327.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>
21. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2019. Multi-objective optimization using response surface methodology and exergy analysis of a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 156, pp.627-639.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>
22. Mojaver P. Abbasalizadeh M. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2020. Co-generation of electricity and heating using a SOFC-ScCO2 Brayton cycle-ORC integrated plant: investigation and multi-objective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), pp.27713-27729.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.137>
23. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A., 2021. Combined systems based on OSOFC/HOFC: Comparative analysis and multi-objective optimization of power and emission. *International Journal of Energy Research*, 45(4), pp.5449-5469.
<https://doi.org/10.1002/er.6173>

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.