

بهینه‌سازی سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی با تکنیک یادگیری ماشین

پرپسا مجاور

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

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

p.mojaver@kut.ac.ir

چکیده:

در این تحقیق، یک سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی پیشنهاد شد که سوخت آن با استفاده از گازسازی زباله‌های جامد شهری تأمین می‌گردد. پارامترهای هدف توان خالص تولیدی و میزان نشر دی اکسیدکربن است که به ازای تغییرات پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین، مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی رفتار خروجی‌ها استخراج گردید. سپس بهینه‌سازی دو هدفه به منظور بیشینه کردن توان خالص تولیدی و کمینه کردن دی اکسیدکربن منتشر شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین حالت به ازای چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه سلسیوس و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ بدست می‌آید. در شرایط بهینه مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی اکسیدکربن منتشر شده برابر ۱۰۰۱/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت حاصل می‌گردد.

واژگان کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد، سیستم انرژی، هدایت پروتونی، یادگیری ماشین، مدل رگرسیون

Optimization of a proton-conducting solid oxide fuel cell-based energy system using machine learning techniques

Parisa Mojaver

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

Abstract:

The growing need for clean energy and effective waste management highlights the importance of integrated systems like waste gasification combined with fuel cells, offering a sustainable solution to reduce emissions and convert waste into useful energy. This study presents a sustainable energy system based on a proton-conducting solid oxide fuel cell, in which the required fuel is supplied by gasifying municipal solid waste. The main goals are to maximize the net power output and minimize carbon dioxide emissions. The performance of the system was evaluated under varying operating conditions, including current density, inlet temperature, and fuel utilization ratio. A thermodynamic model of the system was developed using an engineering equation solver, and its accuracy was validated by comparing the results with data from previous studies. The comparison showed good agreement, confirming the reliability of the model. To further analyze the system, machine learning techniques were used to create regression models that predict the outputs based on the input parameters. These models helped examine the combined influence of the operational variables and supported a multi-objective optimization approach. The optimization results showed that higher current densities generally lead to increased power output. At high current densities, increasing the inlet temperature significantly raises CO₂ emissions, which may rise from about 10.8 kg/MWh to nearly 44.8 kg/MWh. In contrast, when the system operates at current densities below 3000 A/m², carbon dioxide emissions remain in a lower and more stable range (between 8.0 and 10.0 kg/MWh), regardless of the fuel utilization ratio. The optimal operating point for the system was found at a current density of 2798 A/m², an inlet temperature of 800 °C, and a fuel utilization ratio of 0.8. Under these conditions, the system generates a net power output of 310.3 kW, while emitting 10.14 kg of carbon dioxide per megawatt-hour of electricity produced. These findings highlight the potential of combining waste-to-energy technologies with advanced fuel cell systems to achieve both high efficiency and reduced environmental impact.

Keywords: Solid oxide fuel cell, Energy system, Proton-conducting, Machine learning, Regression model

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

در زمینه سیستم‌های انرژی، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین^۱ می‌تواند به شکل قابل توجهی به بهبود عملکرد و بهره‌وری این سیستم‌ها کمک کند [۱]. این تکنیک‌ها امکان تحلیل حجم عظیمی از داده‌های تولید شده توسط سیستم‌های انرژی را فراهم می‌کنند و از این طریق می‌توانند الگوها و روندهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کنند. این شناسایی الگوها و روندها می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر نیازهای انرژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها منجر شود [۲]. در فرآیند بهینه‌سازی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند راهکارهای جدید و بهینه‌تری برای مدیریت منابع انرژی ارائه دهند، به طوری که مصرف انرژی به حداقل رسیده و بازدهی سیستم‌ها به حداکثر برسد. همچنین، تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌توانند در توسعه و بهبود مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های انرژی و ارائه راهکارهای بهینه جهت بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی موثر واقع شوند [۳].

پیل‌های سوختی اکسید جامد^۲ به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در زمینه تولید انرژی پاک و کارآمد شناخته می‌شوند. این پیل‌ها به دلیل قابلیت تولید برق با بهره‌وری بالا و انتشار آلاینده‌های کمتر، اهمیت ویژه‌ای در سیستم‌های انرژی دارند [۴]. یکی از نوآوری‌های مهم در این زمینه، توسعه پیل‌های سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی^۳ است. این نوع پیل‌ها به جای انتقال یون‌های اکسیژن، یون‌های پروتون را از طریق الکترولیت سرامیکی خود منتقل می‌کنند. این ویژگی منحصر به فرد، 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 به ویژه در زمینه‌های مختلفی مانند تولید برق پایدار، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوس است [۶].

راه‌اندازی سیستم‌های انرژی بر پایه زباله‌های جامد شهری^۴ نه تنها 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 این زباله‌ها به انرژی، می‌تواند به عنوان 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 تولید شده شامل گازهای قابل اشتعالی مانند هیدروژن، مونواکسید کربن و متان است که می‌تواند به عنوان منبع سوخت در تولید برق و حرارت مورد استفاده قرار گیرد [۸]. این روش نه تنها به کاهش حجم زباله‌ها کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های مضر می‌شود. سیستم‌های انرژی بر پایه گازسازی زباله‌های جامد شهری می‌توانند به طور قابل توجهی به کاهش بار زیست‌محیطی ناشی از دفن زباله‌ها و سوزاندن آن‌ها کمک کنند [۹].

جاو^۵ و ژو^۶ [۱۰] یک سیستم ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد را مدل‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتایج نشان می‌دهد که تنظیم مناسب اندازه پیل سوختی اکسید جامد می‌تواند بازده انرژی کل سیستم را به طور قابل توجهی افزایش دهد. این نوع داده‌های تحلیل حساسیت، چارچوب مناسبی برای توسعه مدل‌های سریع یادگیری ماشین جهت ارزیابی عملکرد کلی در بهینه‌سازی‌های چن هدفه فراهم می‌سازد. در مطالعه‌ای دیگر، یو^۷ و همکاران [۱۱] یک سیستم پیرولیز مایکروویو زیست‌توده با تأمین توان از پیل سوختی اکسید جامد را معرفی کردند. نتایج آنها شامل اثر نوع زیست توده بر بازده سوخت نشان داد که قابلیت این را دارند که به عنوان داده‌های پایه برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین برای حداکثر بازده پیل سوختی اکسید جامد مورد استفاده قرار گیرند. قربانی و همکاران [۱۲] یک سیستم تولید هیدروژن از بیوگاز و پیل سوختی اکسید جامد را بررسی کردند. در این پژوهش، از یادگیری ماشین، روابط پیش‌بینی‌کننده خروجی‌ها مانند نرخ تولید هیدروژن و سود سالیانه مدل‌سازی گردید. لی^۸ و همکاران [۱۳] کنترل ولتاژ خروجی پیل سوختی اکسید جامد را با بهره‌گیری از یادگیری تقویتی عمیق

^۵ Gao

^۶ Zhou

^۷ Yue

^۸ Li

^۱ Machine Learning

^۲ Solid oxide fuel cells (SOFCs)

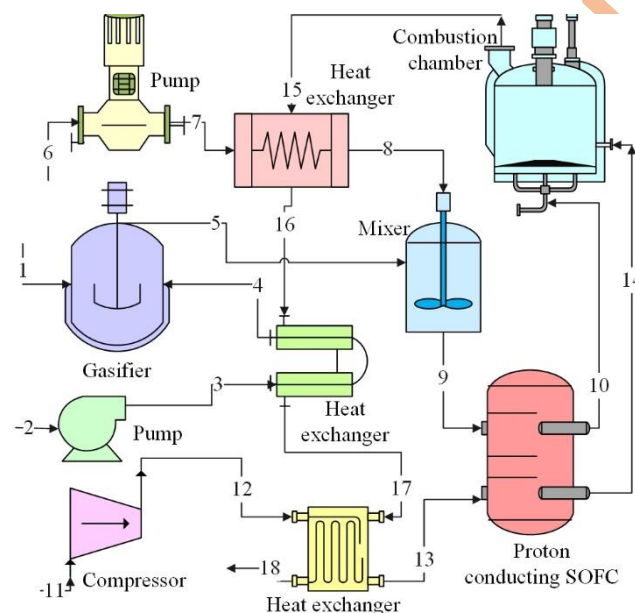
^۳ Proton conducting SOFCs

^۴ Municipal solid waste

نسبت به پیل‌های هدایت اکسیژنی صورت گرفته است. این ویژگی‌ها منجر به افزایش بازده و طول عمر سیستم می‌گردد.

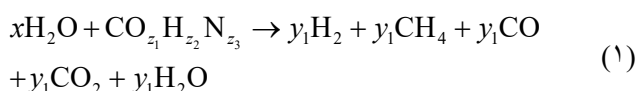
۲- مدل‌سازی سیستم انرژی

در تحقیق حاضر، یک سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی توسعه داده شده است که با یک سیستم گازسازی زباله‌های جامد شهری ادغام شده است. پیکربندی این سیستم در شکل ۱ ارائه شده است. بخار آب به عنوان عامل گازسازی به همراه زباله‌های جامد شهری به عنوان سوخت وارد راکتور گازسازی می‌شوند و با انجام واکنش گازسازی مطابق رابطه (۱)، سینگاز تولید می‌شود. این سینگاز وارد پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی شده و در آنجا با رخ دادن واکنش‌های الکتروشیمیایی، توان تولید می‌شود.



شکل ۱: پیکربندی سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی

Figure ۱: Configuration of an energy system based on a proton-conducting solid oxide fuel cell



چند عاملی بهبود دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در افزایش عمر مفید و پایداری عملیاتی سیستم نقش مهمی داشته باشند. در نهایت، وانگ^۹ و همکاران [۱۴] یک چارچوب ترکیبی شامل مدل چند فیزیکی، یادگیری عمیق و بهینه‌سازی ژنتیک برای بهبود عملکرد و دوام پیل سوختی اکسید جامد ارائه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از یادگیری ماشین می‌تواند به کاهش تخریب و افزایش طول عمر سیستم منجر شود.

تحقیق حاضر با توسعه و ادغام یک سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی و سیستم گازسازی زباله‌های جامد شهری، نوآوری‌های قابل توجهی را در حوزه انرژی پایدار معرفی کرده است. اهمیت این تحقیق در آن است که با استفاده از مواد تجدیدپذیر و ضایعات شهری، به تولید انرژی پاک و کاهش آلودگی‌های محیط زیستی کمک می‌کند. ادغام سیستم گازسازی با پیل سوختی، امکان استفاده بهینه از انرژی حاصل از زباله‌های شهری را فراهم می‌آورد و به افزایش بهره‌وری سیستم‌های انرژی منجر می‌شود. همچنین، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی عملکرد این سیستم، نوآوری دیگری است که این تحقیق را از سایر مطالعات مشابه متمایز می‌سازد. ضرورت این تحقیق از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است. نخست، با توجه به افزایش حجم زباله‌های شهری و نیاز به مدیریت مؤثر آنها، ارائه راهکارهایی برای تبدیل زباله‌ها به منابع انرژی تجدیدپذیر اهمیت فراوانی دارد. دوم، با توجه به تغییرات اقلیمی و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه سیستم‌های انرژی پاک و پایدار ضروری است. این تحقیق با ارائه راهکارهایی نوین، به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و ارتقای پایداری سیستم‌های انرژی کمک می‌کند. در مقایسه با مطالعات پیشین که عمدتاً بر تحلیل ترمودینامیکی یا بهینه‌سازی مستقل هر بخش تمرکز داشتند، نوآوری این تحقیق در ادغام گازسازی زباله‌های شهری با پیل سوختی هدایت پروتونی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی همزمان توان و آلودگی است. لازم به ذکر است که انتخاب پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی به دلیل دمای عملیاتی پایین‌تر (حدود ۶۰۰-۸۰۰ درجه سلسیوس)، پایداری بهتر مواد سرامیکی و کاهش افت‌های اهمی

^۹ Wang

سوختی ۱۰۰ درجه سلسیوس، نسبت بخار به کربن آن ۲ و مقدار ثابت فارادی ۹۶۴۸۵ کولن بر مول می‌باشد [۱۷].
توان خالص تولیدی و میزان دی اکسید منتشر شده در سیستم به عنوان پارامترهای خروجی سیستم انتخاب شده‌اند که به ترتیب در معادلات (۶) و (۷) ارائه شده‌اند:

$$\dot{W}_{net}^g = \dot{W}_{SOFC}^g - \dot{W}_{Comp}^g - \dot{W}_{Pump,1}^g - \dot{W}_{Pump,2}^g \quad (6)$$

$$CO_2 emission = \frac{\dot{m}_{CO_2}^g}{\dot{W}_{net}^g} \times 3600 \quad (7)$$

که در این رابطه (۶)، $\dot{W}$ 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 می‌باشد. در رابطه (۷) که میزان دی اکسید منتشر شده در سیستم از نسبت دبی جرمی دی اکسید کربن به توان خالص تولیدی سیستم در طول یک ساعت حاصل می‌شود.

روش برای توسعه الگوریتم‌های رگرسیون در این مطالعه شامل یک رویکرد سیستماتیک برای مدل‌سازی رابطه بین پاسخ‌های سیستم و متغیرهای ورودی است. دو متغیر دمای ورودی و چگالی جریان هر کدام در پنج سطح متفاوت هستند که منجر به طراحی جامع می‌شود. این طراحی فاکتوریل، کاوش قوی در فضای ورودی را تضمین می‌کند و تأثیرات هر متغیر را بر 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 را نشان می‌دهد، β_0 نقطه قطع است، 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 نشان دهنده عبارت خطا است. ضرایب از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون تعیین می‌شوند و یک معیار کمی از تأثیر هر متغیر ورودی بر پاسخ را ارائه می‌دهند. عملکرد این الگوریتم‌ها با استفاده از مقدار R -squared ارزیابی می‌شود 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 تحقیق حاضر، از تکنیک رگرسیون به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی سیستم انرژی استفاده شده است. اجرای این تکنیک شامل چندین مرحله اساسی می‌باشد. ابتدا داده‌های مربوط به عملکرد سیستم انرژی جمع‌آوری و پردازش

که در این رابطه، x تعداد مول‌های بخار آب به عنوان عامل گازسازی را نشان می‌دهد و y_i تعداد مول‌های اجزای سینگاز را نشان می‌دهد که شامل هیدروژن، متان، مونواکسید کربن، دی‌اکسید کربن و بخار آب است. $Z1$ نسبت مولی اکسیژن به کربن، $Z2$ نسبت مولی هیدروژن به کربن و $Z3$ نسبت مولی نیتروژن به کربن را در ترکیب شیمیایی زباله‌های جامد شهری را نشان می‌دهند. برای پیدا کردن تعداد مول‌های اجزای سینگاز از ترکیب روش‌های مینیمم‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده شده است. مشخصات عنصری زباله‌های جامد شهری به صورت درصد کربن برابر ۴۸/۸۱، هیدروژن برابر ۶/۸۶، اکسیژن برابر ۴۱/۰۹ و نیتروژن برابر ۲/۷۸ [۱۵] می‌باشد.

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

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

که در این رابطه، V_N ولتاژ نرنست است که از رابطه (۳) بدست می‌آید و V_L ولتاژ اتلافی است که از رابطه (۴) بدست می‌آید [۱۷] و [۱۸]:

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

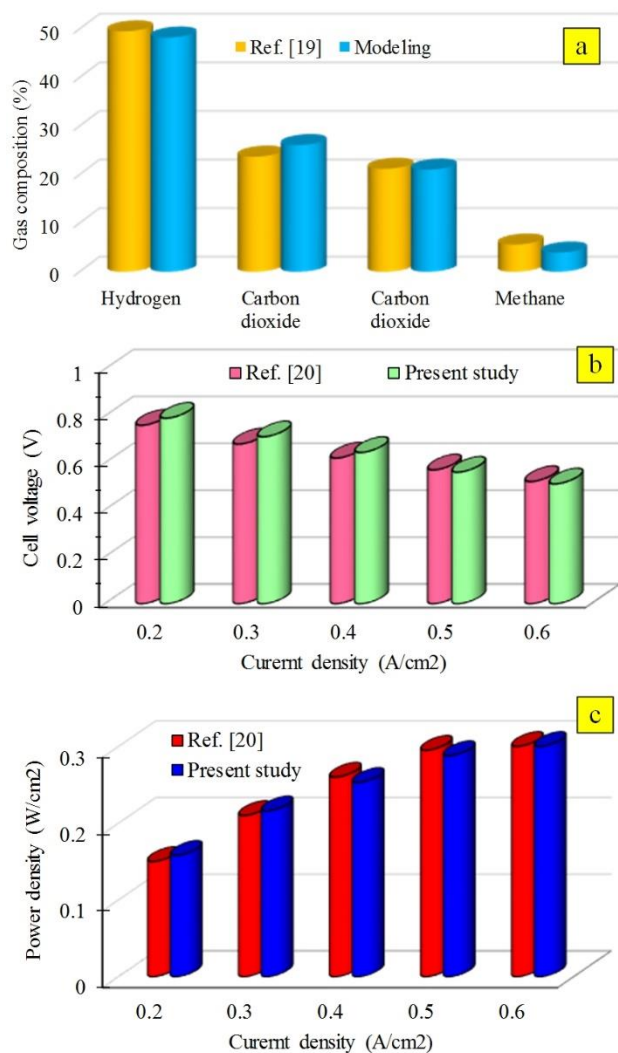
$$\begin{aligned} \sum V_L &= V_{loss}^{ac,a} + V_{loss}^{ac,c} + V_{loss}^{oh} + V_{loss}^{co,a} + V_{loss}^{co,c} \\ &= \left[\sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0^a} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_0^c} \right) \right] \cdot \frac{TR}{F} + (\sum_i \delta_i / \tau_i) J \\ &\quad + \left[\ln \left(\frac{P_{H_2}^a}{P_{H_2}^{a,TPB}}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

که در این روابط، P_i فشار جزئی اجزا است و اندیس‌های a و c برای آند و کاتد استفاده شده است، 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 اشاره دارند. همچنین J به چگالی جریان و J_0 به چگالی جریان تبادلی اشاره دارند. δ ضخامت و τ رسانایی را نشان می‌دهند و P^{TPB} به فشار جزئی در مرز سه فاز اشاره دارد.

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

$$W = NAVJ \quad (5)$$

که در این رابطه، N به تعداد سلول‌ها و A به سطح فعال اشاره دارند. در این تحقیق، تعداد ۱۱۰۰۰ سلول استفاده شده و سطح فعال برابر ۰/۰۱ مترمربع است. اختلاف دمای ورودی و خروجی پیل



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

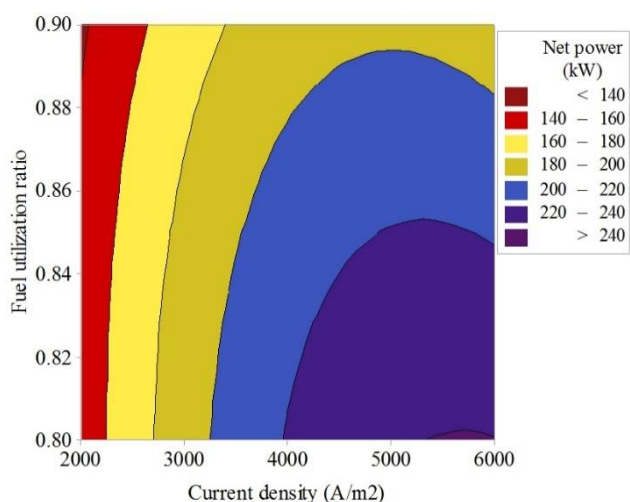
Figure ۲: Validation a) syngas of the municipal solid waste gasification, b) voltage and c) power density of the solid oxide fuel cell versus the current density

شکل ۳ اثر همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی بر توان خالص تولیدی سیستم انرژی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، سیستم انرژی پیشنهادی در چگالی جریان‌های و دماهای بالاتر پیل سوختی، توان خالص بیشتری تولید می‌کند. توان تولیدی در چگالی جریان‌های پایین نسبت به تغییرات دما حساس نیست. در حالیکه در چگالی

شدند. این داده‌ها شامل ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، پارامترهای عملیاتی و متغیرهای محیطی بودند. در مرحله بعد، داده‌ها به منظور شناسایی الگوهای اصلی و حذف نویزها و داده‌های نامعتبر، مورد پیش‌پردازش قرار گرفتند. پس از آماده‌سازی داده‌ها، مدل رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد سیستم انرژی طراحی و آموزش داده شد. این مدل با استفاده از داده‌های آموزشی که شامل مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌های مشاهده شده بود، آموزش دید. در این مرحله، پارامترهای مدل تنظیم شده و با استفاده از روش‌هایی مانند اعتبارسنجی متقابل، بهترین تنظیمات برای مدل انتخاب شدند. پس از آموزش مدل، عملکرد آن با استفاده از داده‌های آزمایشی ارزیابی شد تا دقت و قابلیت پیش‌بینی آن بررسی شود. مدل رگرسیون در نهایت برای بهینه‌سازی سیستم انرژی مورد استفاده قرار گرفت. با تحلیل نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل، پارامترهای عملیاتی سیستم تنظیم و بهینه‌سازی شدند تا عملکرد کلی سیستم بهبود یابد. این بهینه‌سازی شامل شناسایی شرایط بهینه برای بهره‌برداری از سیستم و کاهش آلایندگی سیستم بود. نتایج نشان داد که استفاده از تکنیک رگرسیون می‌تواند به طور موثری به بهبود کارایی و بهره‌وری سیستم‌های انرژی کمک کند و راهکارهایی عملی برای مدیریت و بهینه‌سازی این سیستم‌ها ارائه دهد.

۳- نتایج و بحث

پیش از استخراج نتایج و تحلیل آنها، بایستی مدل‌سازی انجام شده اعتبارسنجی گردد. بدین منظور نتایج حاصل از گازسازی زباله‌های جامد شهری با استفاده از مدل‌سازی در کار حاضر با نتایج حاصل از کار تجربی مرجع [۱۹] در شکل ۲-ا مقایسه گردید. همانطور که نتایج نشان می‌دهد سینگاز بدست آمده با استفاده از مدل‌سازی و کار تجربی دارای مقادیر مشابهی است. عملکرد پیل سوختی اکسید جامد نیز با مقایسه ولتاژ تولیدی و چگالی توان تولیدی آن به ازای چگالی‌های جریان متفاوت با مرجع [۲۰] مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که شکل ۲-ب و شکل ۲-ج نشان می‌دهد، نتایج حاصل از مدل‌سازی کار حاضر با نتایج تحقیق پیشین در تطابق خوبی است. بنابراین پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، عملکرد سیستم انرژی پیشنهادی بررسی می‌گردد.



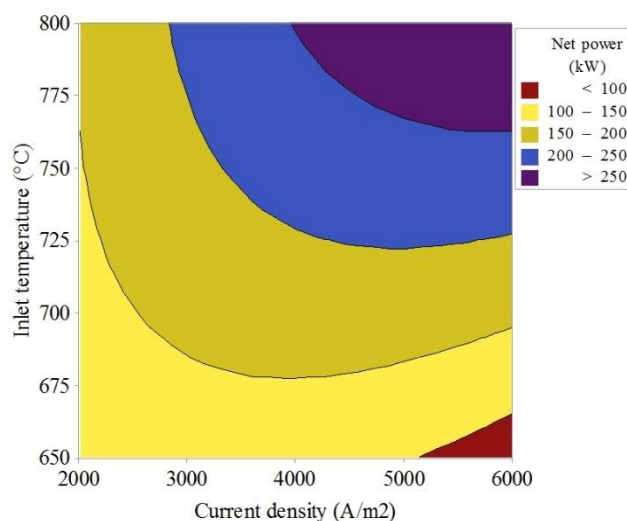
شکل ۴: اثر همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی بر توان خالص تولیدی سیستم انرژی

Figure ۴: 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 ۵ به بررسی میزان دی اکسیدکربن منتشر شده سیستم انرژی پیشنهادی نسبت به تغییرات همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی می پردازد. با توجه به نتایج می توان دریافت بیشینه میزان دی اکسیدکربن منتشر شده در چگالی های جریان بالا و دماهای پایین پیل سوختی و متعاقباً کمینه مقدار آن در چگالی های جریان پایین و دماهای بالا رخ می دهد. از دیدگاه حساسیت، در چگالی های جریان پایین دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم به افزایش دما حساس نیست درحالیکه در مقادیر بالای چگالی جریان، مقدار آن با افزایش دما از ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت افزایش می یابد. در دماهای بالا نیز چگالی جریان تأثیر محسوسی بر دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم ندارد، درحالیکه در دماهای پایین، افزایش چگالی جریان به شدت مقدار دی اکسیدکربن منتشر شده را افزایش می دهد. نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین هم راستا است [۲۳، ۲۲].

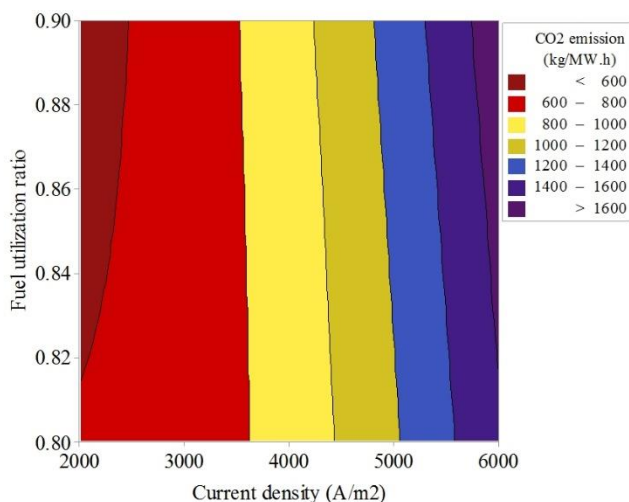
جریان های بالاتر از ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع، حساسیت توان تولیدی به دما بسیار زیاد است بطوریکه مقدار آن از ۸۹ کیلووات به ۳۱۸ کیلووات می رسد. به همین ترتیب، حساسیت توان تولیدی نیز در دماهای بالا نسبت به تغییرات چگالی جریان بیشتر است. نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین هم راستا است [۲۱، ۱۸].

تغییرات توان خالص تولیدی سیستم انرژی پیشنهادی نسبت به تغییرات همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به یافته ها، حداکثر توان تولیدی سیستم به ازای چگالی جریان بالا و نسبت مصرف سوخت پایین اتفاق می افتد. در چگالی جریان کمتر از ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع، مقدار توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت ثابت می ماند. درحالیکه در چگالی جریان بیشتر از ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع، مقدار توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت دچار افت می گردد. از طرفی هم حساسیت توان تولیدی سیستم به تغییرات چگالی جریان در نسبت های مصرف سوخت پایین بیشتر است، بطوریکه مقدار آن در کمترین نسبت های مصرف سوخت، از ۱۱۴ تا ۳۱۸ کیلووات متغیر است. نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین هم راستا است [۲۱، ۱۸].



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

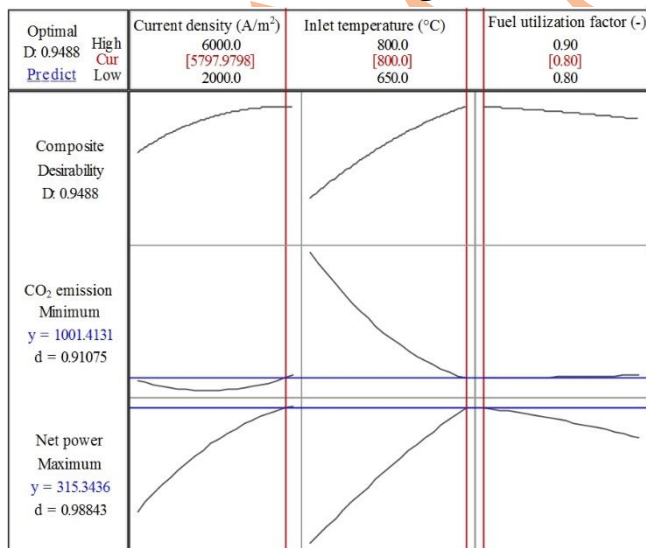
Figure ۳: Interaction effect of the current density and the temperature of the proton conducting solid oxide fuel cell on the net power generation of the energy system



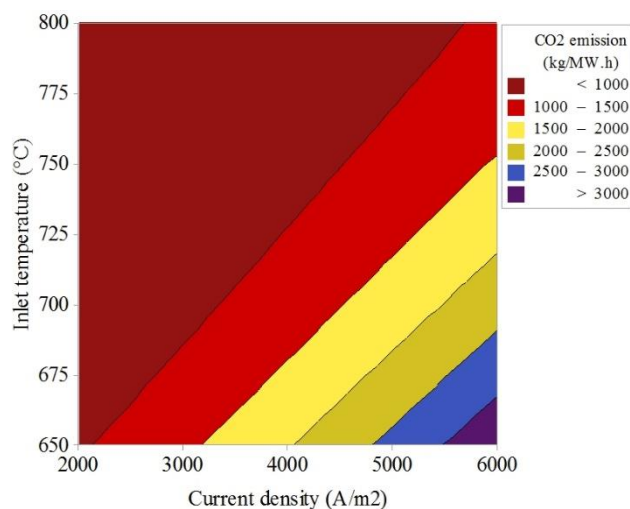
شکل ۶: اثر همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی بر دی اکسیدکربن منتشر شده سیستم انرژی

Figure ۶: 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

همانطور که نتایج نشان می‌دهد بهینه‌ترین حالت به ازای چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه سلسیوس و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ بدست می‌آید. در شرایط بهینه مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی اکسیدکربن منتشر شده برابر ۱۰۰۱/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت حاصل می‌گردد.



شکل ۷: بهینه‌سازی خروجی‌ها بر اساس پارامترهای عملیاتی ورودی در سیستم انرژی پیشنهادی



شکل ۵: اثر همزمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی بر دی اکسیدکربن منتشر شده سیستم انرژی

Figure ۵: 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

میزان دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم به ازای تغییرات همزمان چگالی جریان و نسبت مصرف سوخت در شکل ۶ مشاهده می‌گردد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در چگالی جریان ثابت، افزایش دما اثری بر روی دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم ندارد. این در حالی است که به ازای تمامی دماها، در یک دمای ثابت، افزایش چگالی جریان بصورت قابل ملاحظه‌ای دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم را تحت تأثیر قرار داده و موجب افزایش آن می‌گردد. کمینه دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم در چگالی‌های جریان کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع فارغ از مقدار نسبت مصرف سوخت اتفاق می‌افتد که مقدار آن در بازه ۵۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت می‌باشد. نتایج بدست آمده با نتایج مطالعات پیشین هم راستا است [۲۲، ۲۳].

شکل ۷ نمودار بهینه‌سازی دو هدف توان خالص تولیدی و دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم به ازای پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد هدایت پروتونی را نشان می‌دهد. این بهینه‌سازی به هدف بیشینه کردن توان خالص تولیدی و کمینه کردن دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم انجام گرفته است.

- ۴- بهینه‌ترین حالت به ازای چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه سلسیوس و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ بدست می‌آید.
- ۵- در شرایط بهینه مقدار توان خالص تولیدی برابر ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی اکسیدکربن منتشر شده برابر ۱۰۰/۴ کیلوگرم بر مگاوات ساعت حاصل می‌گردد.

منابع

- Ren B. Chi Y. Zhou N. Wang Q. Wang T. Luo Y. Ye J. and Zhu X. ۲۰۲۴. Machine learning applications in health monitoring of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, pp. ۱۱۴۰۳۹. <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. ۲۰۲۴. Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۵۶, pp. ۱۱۵۲-۱۱۸۲. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.181>
- Udo W.S. Kwakye J.M. Ekechukwu D.E. and Ogundipe O.B. ۲۰۲۴. Optimizing wind energy systems using machine learning for predictive maintenance and efficiency enhancement. *Journal of Renewable Energy Technology*, 28(۳), pp. ۳۱۲-۳۳۰. <https://doi.org/10.51۵۹۴/csitrj.v۲۳i۳.۱۳۹۸>
- Roy D. Samanta S. Roy S. Smallbone A. and Roskill A.P. ۲۰۲۴. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom. *Green Chemistry*, 26(۷), pp. ۳۹۷۹-۳۹۹۴. <https://doi.org/10.1039/D3GC00140K>
- Mojaver P. Chitsaz A. Sadeghi M. and Khalilarya S. ۲۰۲۰. 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. ۱۱۲۴۵۵. <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. ۲۰۲۴. 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. ۲۳۴۹۱۰. <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. ۲۰۲۴. Decoupling study of municipal solid

Figure ۷: Outputs optimization based on the key parameters of the proposed energy system

جدول ۱ مقادیر R-square، R-square (adjusted) و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی اکسیدکربن منتشر شده سیستم انرژی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که خروجی‌های مدل با قابلیت اطمینان بالایی تخمین زده شده است و مدل رگرسیون قابل استناد است.

جدول ۱: مقادیر R-square، R-square (adjusted) و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی اکسیدکربن منتشر شده سیستم انرژی

Table ۱: 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	۹۹.۸۴ %	۹۹.۸۲ %	۹۹.۷۷ %
CO ₂ emission	۹۰.۴۶ %	۸۹.۱۰ %	۸۴.۹۹ %

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک سیستم انرژی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با هدایت پروتونی پیشنهاد شد که سوخت آن با استفاده از گازسازی زباله‌های جامد شهری تأمین می‌گردد. پارامترهای هدف توان خالص تولیدی و میزان نشر دی اکسیدکربن است که به ازای تغییرات پارامترهای عملیاتی چگالی جریان، دمای ورودی و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج کلی سیستم مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- حداکثر توان خالص تولیدی سیستم به ازای چگالی جریان بالا و نسبت مصرف سوخت پایین اتفاق می‌افتد.
- ۲- در مقادیر بالای چگالی جریان، میزان دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم با افزایش دما از ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت افزایش می‌یابد.
- ۳- کمینه در چگالی‌های جریان کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع فارغ از مقدار نسبت مصرف سوخت اتفاق می‌افتد که میزان دی اکسیدکربن منتشر شده در سیستم در بازه ۵۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت می‌باشد.

۱۶. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. ۲۰۱۹. 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. ۶۲۷-۶۳۹. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.014>
۱۷. Razmi A.R. Sharifi S. Vafaenezhad S. Hanifi A.R. and Shahbakhti M. ۲۰۲۴. Modeling and microstructural study of anode-supported solid oxide fuel cells: experimental and thermodynamic analyses. *International journal of hydrogen energy*, 54, pp. ۶۱۳-۶۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.296>
۱۸. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. ۲۰۱۸. 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. ۲۸۷-۲۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.096>
۱۹. Loha C. Chattopadhyay H. and Chatterjee P.K. ۲۰۱۱. Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Energy*, 36(۷), pp. ۴۶۳-۴۷۱. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.042>
۲۰. Ranjbar F. Chitsaz A. Mahmoudi S.S. Khalilarya S. and Rosen M.A. ۲۰۱۴. Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 87, pp. ۳۱۸-۳۲۷. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>
۲۱. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. ۲۰۱۹. 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. ۶۲۷-۶۳۹. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.014>
۲۲. Mojaver P. Abbasalazadeh M. Khalilarya S. and Chitsaz A. ۲۰۲۰. 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(۵), pp. ۲۷۷۱۳-۲۷۷۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.137>
۲۳. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. ۲۰۲۱. Combined systems based on OSOFC/HOFC: Comparative analysis and multi-objective optimization of power and emission. *International Journal of Energy Research*, 45(۴), pp. ۵۴۴۹-۵۴۶۹. <https://doi.org/10.1002/er.6173>
- waste gasification: effect of pelletization on pyrolysis and gasification of pyrolytic char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(۶), ۱۱۴۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114334>
۸. Arena U. ۲۰۱۲. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. a review. *Waste management*, 32(۴), pp. ۶۲۵-۶۳۹. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.020>
۹. Biancini, G. Cioccolanti L. Moradi R. and Moglie M. ۲۰۲۴. 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. ۱۲۲۴۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122437>
۱۰. Gao B. and Zhou Y. ۲۰۲۵. 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. ۱۱۹۳۷۱. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119371>
۱۱. Yue M. Zhang Y. Lv L. Zhu J. Fu Y. and Ye F. ۲۰۲۶. A novel biomass microwave-assisted pyrolysis system driven by solid oxide fuel cell: modeling and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 348, pp. ۱۲۰۶۸۰. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120680>
۱۲. Ghorbani B. Zendeheboudi S. Afrouzi Z.A. and Mohammadzadeh, O. ۲۰۲۴. Efficient hydrogen production via electro-thermochemical process and solid oxide fuel cell: thermodynamics, economics, optimization, and uncertainty analyses. *Energy Conversion and Management*, 307, pp. ۱۱۸۱۷۵. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118175>
۱۳. Li J. Yu T. and Yang B. ۲۰۲۱. A data-driven output voltage control of solid oxide fuel cell using multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 304, pp. ۱۱۷۵۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117541>
۱۴. Li J. Yu T. and Yang B. ۲۰۲۱. A data-driven output voltage control of solid oxide fuel cell using multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 304, pp. ۱۱۷۵۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117541>
۱۵. Khalilarya S. Chitsaz A. and Mojaver P. ۲۰۲۱. 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(۲), pp. ۱۸۱۵-۱۸۲۷. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.020>