



مدل‌سازی و تحلیل ترمودینامیکی تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد در بخش ساختمان

قاسم عرب^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران

* صندوق پستی ۱۸۱۵۱۶۳۱۱۱، gh.arab@iausr.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، مدل‌سازی ترمودینامیکی یک سیکل تولید همزمان برق و حرارت بر پایه پیل سوختی اکسید جامد با کاربردهای ساختمانی انجام شده است. در ابتدا با معرفی سیکل پیشنهادی و ارائه روش مدل‌سازی، نحوه تحلیل ترمودینامیکی توضیح داده شده است. در ادامه با استفاده از نرم افزار تحلیلی Cycle Tempo، شبیه‌سازی سیکل انجام شده و معادلات بالانس جرم، انرژی و الکتروشیمی بصورت همزمان حل شده‌اند. پس از ارائه نتایج عملکردی سیکل، تحلیل پارامتریک بر روی مشخصه‌های اصلی تاثیر گذار بر عملکرد سیکل بررسی و شرایط عملیاتی مناسب مشخص شده است. نتایج حاصله دستیابی به توان الکتریکی ۱۴/۰۰ کیلووات، توان حرارتی ۴/۵۶ کیلووات، نسبت حرارت به توان ۳۲٪ را در بازدهی الکتریکی خالص ۵۸/۵٪ و بازده کل ۷۷/۳٪ نشان می‌دهد. این نتایج تایید کننده جذابیت بالای این سیستم‌ها در قیاس با سایر فناوری‌های تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر موتورهای گازسوز یا میکروتوربین‌های گازی می‌باشد. با توجه به قابلیت عملکرد سیستم در نسبت حرارت به توان‌های مختلف، استفاده از این سیستم در ساختمان‌های اداری و در اقلیم‌های گرم و معتدل، توصیه می‌گردد.

کلیدواژه‌گان: پیل سوختی اکسید جامد، تولید همزمان برق و حرارت، مدل‌سازی ترمودینامیکی، کاربری ساختمانی

Simulation and thermodynamic analysis of a combined heat and power cycle based on solid oxide fuel cell in the building sector

Ghasem Arab^{1*}

1- Assistant professor, Department of Mechanical engineering, Yadegar-e-Emam (RAH) Shahre-Rey branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1815163111 Tehran, Iran, gh.arab@iausr.ac.ir

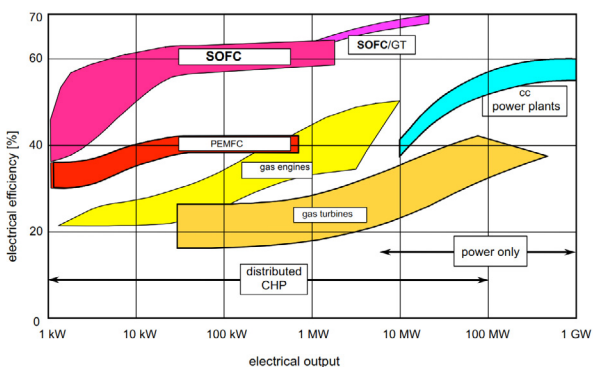
Received: 25 July 2021 Accepted: 9 September 2021

Abstract

In this research, thermodynamic modeling of a combined production cycle of heat and power is performed based on a solid oxide fuel cell for building sector applications. Initially, the thermodynamic assessment is explained by introducing the mentioned cycle and its respected modeling technique. Then, cycle simulation is performed using Cycle Tempo analytical software by simultaneously solving the mass, energy, and electrochemical equilibrium equations. Parametric analysis of the main characteristics influencing the performance of the cycle is assessed, and the appropriate operating conditions are determined after presenting the performance results. The results show that using this model, electric power of 14.00 kW, thermal power of 4.56 kW, heat to power ratio of 32% at net electrical efficiency of 58.5%, and total efficiency of 77.3% is achievable. These results also confirm the attractiveness of the proposed systems over other electricity and heat cogeneration technologies, which are based on gas engines or gas micro turbines. The system is highly recommended in administrative buildings and warm and warm/moderate climates considering the functionality of the proposed system in different heat to power ratios. **Keywords:** Solid oxide fuel cell, Combined heat and power, Thermodynamic modeling, Building sector



۱- مقدمه



شکل ۱ نمودار گرافیکی بازده - توان الکتریکی برای فناوری های مختلف [۱۰]

موضوع توسعه زیرساخت‌های تولید متمرکز یا پراکنده برق یکی از تصمیمات راهبردی صنعت برق در کشورهای مختلف بشمار می‌رود [۱]. رشد سریع تقاضا، محدودیت منابع انرژی فسیلی و آلاینده‌های زیست محیطی مرتبط باعث توجه ویژه به فناوری‌های انرژی کارآمد و دوست‌دار محیط زیست شده است [۲]. پیل‌های سوختی با تولیدی مطمئن، پایدار و قابل اطمینان و با بازدهی بالا یکی از فناوری‌های مناسب تولید پراکنده برق در جهان محسوب می‌شوند. توسعه این فناوری منجر به کاهش مصرف سوخت، تغییر مصرف از سوخت‌های آلاینده نظیر زغال‌سنگ به سوخت‌های با آلاینده‌گی کمتر نظیر گاز طبیعی یا هیدروژن حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش تولید آلاینده‌های زیست محیطی می‌شود. بسیاری از مطالعات و تحقیقات شرکت‌های فنوار بر روی توسعه بازار پیل سوختی نوع پلیمری متمرکز است و این نوع پیل سوختی مرسوم‌ترین نوع، بویژه در صنعت خودرو می‌باشد [۳]. پیل سوختی اکسید جامد^۲ فناوری است که دارای ساختاری کاملاً جامد بوده و بازده انرژی بالایی دارد [۴]. این پیل بازده بالاتر، دمای کارکردی بالاتر و طول عمر طولانی‌تری نسبت به پیل پلیمری داشته و دمای کاری بالای این پیل (بین ۶۵۰ تا ۱۰۰۰) [۵] قابلیت اصلاح داخلی سوخت را برای تولید هیدروژن دارد و لذا امکان استفاده از گستره وسیعی از سوخت‌ها و بخصوص استفاده مستقیم از گاز طبیعی بعنوان سوخت [۶] را می‌دهد. در حالی که سایر پیل‌های سوختی نیازمند هیدروژن خالص هستند، این نوع پیل می‌تواند با استفاده از زیرساخت‌های فعلی شبکه گاز رسانی، برق را در محل مصرف، تولید کند. دارا بودن منابع گازی و گستردگی شبکه گاز کشور از یک سو و مصرف بالای بخش ساختمان از سوی دیگر [۷] باعث جذابیت استفاده از این فناوری کارآمد در بخش ساختمان کشور می‌گردد. همچنین دمای کارکردی پیل سوختی اکسید جامد باعث شده است تا امکان استفاده از آن در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مورد توجه قرار گیرد [۸]. نوع جدید پیل‌های سوختی اکسید جامد تولید شده دارای دمای کارکردی ۶۵۰ °C تا ۷۰۰ هستند که منجر به کاهش شدید هزینه‌های تولید شده و این فناوری را در قیاس با سایر فناوری‌ها اقتصادی می‌نماید [۹].

شکل ۱ شماتیکی از محدوده مناسب توان و بازدهی را برای فناوری‌های مختلف تولید برق نشان می‌دهد. همانگونه که در این نمودار مشخص است در محدوده زیر ۱۰۰ کیلووات که قابلیت تولید پراکنده وجود دارد و بخش خانگی و تجاری نیز در این محدوده قرار می‌گیرند، استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد و پلیمری و همچنین موتورهای گازسوز و میکروتوربین‌های گازی توصیه می‌شود که در این میان پیل‌های سوختی اکسید جامد بازدهی الکتریکی بالاتری را از خود به نمایش می‌گذارند. تحقیقات کاربردی در زمینه استفاده از سیستم‌های مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد در حال افزایش است. تولید همزمان برق و حرارت بعنوان یک مزیت در فناوری‌ها قابل بررسی است و برای کاربردهای خانگی، این تامین همزمان انرژی منجر به کاهش هزینه‌ها شده و این سیستم، مزایای سیستم‌های تولید پراکنده نظیر تمرکز زدایی و کاهش اتلافات شبکه انتقال و توزیع را نیز دارد.

1. Polymer exchange membrane (PEM)
2. Solid oxide fuel cell (SOFC)

مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد لیسو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۱ تاثیرات نسبت حرارت به توان را در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد در کاربردهای خانگی و در اقلیم‌های مختلف اروپا بررسی نمودند. نسبت حرارت به توان در این سیکل در محدوده ۰/۵ تا ۱/۵ را نشان می‌دهد که با توجه به شرایط جغرافیایی اروپا، مطابقت خوبی را با تامین برق، گرمایش محیط و تامین آب گرم در فصول گرم را نشان می‌دهد اما در فصل سرد سال، نیاز به سیستم کمکی بویلر وجود دارد. پیرکندی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲ مدل‌سازی ترمودینامیکی و الکتروشیمی سیستم تولید همزمان برق و حرارت بر پایه پیل سوختی اکسید جامد را انجام داده و نتایج، دستیابی به بازدهی کلی ۷۳٪ را تایید می‌نماید. نایمستر و اسلیتی [۱۳] در سال ۲۰۱۳ پتانسیل استفاده از سیستم تولید همزمان برق و حرارت را برای یک ساختمان تجاری ۷۰۰۰ متر مربعی بررسی کردند. نتایج نشان می‌داد سیستم تولید همزمان ۱۷۵ کیلوواتی بر پایه پیل سوختی اکسید جامد در حدود ۱۴/۵٪ در هزینه‌ها و ۶۲٪ در کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نسبت به سیستم‌های مرسوم تهویه مطبوع ارجحیت دارد. ژو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۳ تحلیل توده ۱ کیلوواتی تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد را بررسی و نشان دادند سیستم طراحی شده قابلیت تولید ۱ کیلووات برق و ۰/۵۲ کیلووات حرارت را با بازده ۵۲/۱٪ الکتریکی و بازده کل ۷۹/۲٪ دارد. فیفر و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۳ چیدمان فرایندی و طراحی یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اکسید جامد را با کاهش دمای عملیاتی بررسی کردند. نتایج دستیابی به بازده الکتریکی ۴۳٪ را در دمای ۶۵۰ °C نشان می‌دهد. یانگ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ طراحی و عملیات بهینه سیستم تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک را برای پیل سوختی اکسید جامد با سوخت گاز سنتز در اقلیم‌های جغرافیایی چین و برای کاربردهای خانگی بررسی نمودند. نتایج نشان دهنده تناسب این سیستم با نیازهای انرژی در تمامی اقلیم‌های چین می‌باشد. واهل و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵، مدل‌سازی حرارتی یک پیل سوختی اکسید جامد صفحه ای با ظرفیت ۱۰ کیلووات الکتریکی را انجام دادند. نتایج این مدل‌سازی نشان دهنده بازده خالص الکتریکی ۵۷٪ و قابلیت استفاده سیستم در ترکیبات مختلف گاز طبیعی بوده است. ممون و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۷ تحلیل ترمودینامیکی تولید سه گانه توان، گرما و سرما را بر پایه پیل سوختی اکسید جامد و برای کاربردهای خانگی انجام دادند. نتایج دستیابی به بازدهی ۹۰٪ را در سیستم ترکیبی نشان می‌دهد. سوراس و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۷ مدل‌سازی و تحلیل ترموآکونومیک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مقیاس کوچک پیل سوختی اکسید جامد با پمپ حرارتی را انجام دادند.

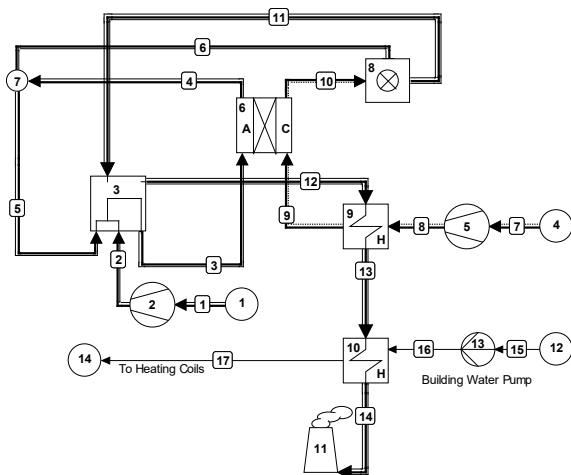


۲- معرفی سیستم تولید همزمان برق و حرارت

شماتیکی از سیستم تولید همزمان در نظر گرفته شده در شکل ۲ ارائه شده است. سوخت از نقطه ۱ وارد سیستم شده و توسط یک دمنده به ریفرمر فرستاده می‌شود تا با بخشی از جریان بازچرخانی شده از خروجی آند پیل سوختی (جریان ۵) مخلوط شده و بصورت جریان شماره (۳) وارد آند پیل سوختی می‌گردد. جریان خروجی از آند پیل سوختی حاوی هیدروژن، سوخت و آب بوده و قابلیت انجام واکنش شیمیایی یا احتراق را دارد. مهمترین دلیل بازچرخانی بخشی از جریان خروجی از آند، وجود هیدروژن و همچنین آب در این جریان می‌باشد. وجود آب برای انجام واکنش‌های شیمیایی در آند پیل سوختی الزامی بوده و در صورتی که جریان بازچرخانی نمی‌شد، آب مورد نیاز باید بصورت یک جریان جداگانه تامین می‌شد. هوا از طریق جریان ۷ از محیط مکش شده و پس از عبور از یک دمنده و یک مرحله پیش گرمایش از طریق جریان ۹ وارد کاتد پیل می‌گردد. در کاتد بخشی از اکسیژن موجود در هوا وارد واکنش الکتروشیمی شده و جریان خروجی از کاتد همچنان حاوی اکسیژن بالایی می‌باشد. جریان خروجی از آند و هوای رقیق خروجی از کاتد در محفظه احتراق سوخته و جریان گرم خروجی از محفظه احتراق، انرژی‌های مورد نیاز برای مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمکن هوا و تولید آب داغ ساختمانی شامل آب مورد نیاز تاسیسات گرمایشی و آب گرم مصرفی در دیگ آب‌گرم موتورخانه را تامین و گازهای خروجی از طریق دودکش به خارج موتورخانه ارسال می‌شوند.

۳- مدل‌سازی ترمودینامیکی

در پیل سوختی اکسید جامد انرژی شیمیایی سوخت بواسطه واکنش‌های الکتروشیمی مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. پتانسیل حرارتی موجود در گازهای خروجی از محفظه احتراق در یک دیگ برای تامین آب گرم مورد نیاز سیستم تاسیساتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی انجام شده خروجی از یک تجهیز بعنوان ورودی به تجهیز بعدی در نظر گرفته شده و از افت فشار در لوله‌ها صرف نظر شده اما افت فشار و اتلافات حرارتی در تجهیزات مد نظر قرار گرفته است. یک مدل ترمودینامیکی جریان پایدار برای شبیه‌سازی سیستم در محیط نرم افزار سیکل تمپو توسعه داده شده و روابط بالانس جرم، انرژی و الکتروشیمی بصورت همزمان حل شده‌اند.



شکل ۲ شماتیک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد برای کاربردهای خانگی

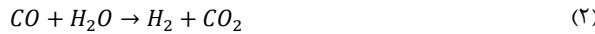
نتایج نشان دهنده مزیت پیل سوختی اکسید جامد (با بازدهی ۸۱٪) در قیاس با پیل سوختی پلیمری (با بازدهی ۷۵٪) می‌باشد. شی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۹ محدودیت‌های عملیاتی سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد را مدل‌سازی کردند. نتایج دستیابی به بازده ۴۴/۹٪ را در توان خروجی الکتریکی و حرارتی ۵/۵۸ کیلووات را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل عملیاتی نشان می‌دهد ثابت نگه داشتن شدت جریان بیشترین تاثیر را بر طول عمر سیستم دارد. مهرپویا و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۹ عملکرد فنی یک سیستم تولید سه گانه برق، حرارت و برودت بر پایه پیل سوختی اکسید جامد را برای یک ساختمان ۷۰۰ متر مربعی در شهر تهران تحلیل کردند. نتایج بازده الکتریکی ۴۵٪ را در توان الکتریکی تولید ۱۲۰ کیلووات نشان می‌دهد. سیستم ترکیبی برق - برودت به بازده ۵۸٪، برق - حرارت به بازده ۶۰٪ و سیستم ترکیبی سه گانه به ۶۰٪ می‌رسد. نتایج تحلیل اقتصادی دوره بازگشت سرمایه را ۸/۳ سال نشان می‌دهد. احمدی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۹ تحلیل ترمودینامیکی سیستم همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد و سیستم تبرید جذبی را بررسی و نتایج دستیابی به بازده انرژی بالای ۶۰٪ و بازده انرژی بالای ۴۹٪ را در تولید همزمان نشان می‌دهد. وانگ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۱ یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد با سوخت بیوگاز را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی بررسی و تاثیرات نسبت بخار به کربن، ترکیب بیوگاز و ولتاژ عملیاتی توده پیل را مطالعه و استفاده از آن را برای تولید همزمان پیشنهاد نمودند.

مروری بر تحقیقات انجام شده نشان دهنده تمرکز مطالعات بر روی سیستم‌های آزمایشگاهی و تحلیلی بوده و کمتر به بررسی شرایط واقعی استفاده از فناوری‌های موجود در بازار و تحقیقات کاربردی مبتنی بر شرایط موجود در بازار پرداخته شده است. با توجه به پیشرفت‌های حاصل شده، شرکت‌های زیادی در این زمینه نظیر الکوژن^۱، سرامیک^۲، هکسیس^۳، تاپسوی^۴، استاکسرا- سان فایر^۵ و سالید پاور^۶ بصورت تجاری در سراسر جهان فعال هستند [۲۴] و بر همین اساس، در این تحقیق و با دیدگاهی کاربردی، از یک توده^۷ پیل سوختی اکسید جامد نوع لوله ای^۸ و دارای ریفرمر داخلی شرکت سالید پاور استفاده شده است. این شرکت یکی از شرکت‌های پیشرو در تولید پیل‌های سوختی اکسید جامد با آند سرامیکی بوده و توده با ظرفیت‌های ۱/۵ کیلووات و با برند بلوژن^۹ تولید می‌نماید. در این تحقیق، با نظر گرفتن یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد با توان ۱۵ کیلووات بر مبنای چیدمان ۱۰ توده محصول تجاری ۱/۵ کیلوواتی معرفی شده توسط شرکت سالیدپاور، مدل‌سازی و تحلیل‌های ترمودینامیکی انرژی و انرژی در محیط نرم افزار سیکل تمپو^{۱۰} [۲۵] بر روی آن انجام و سپس با استفاده از نتایج، قابلیت‌های این سیستم در تامین انرژی یک ساختمان در ایران تحلیل شده است.

1. Elcogen
2. Ceramic Fuel Cells
3. Hexis
4. Topsøe Fuel Cells
5. Staxera-Sunfire
6. SolidPower
7. Stack
8. Tubular
9. BlueGEN®
10. Cycle tempo



تخریب آگزروی در هر تجهیز و راندمان آگزروتیک نیز با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آیند.



$$K_{eq, Shifting} = 10^{-2.4198 + 0.0003855 * T_{SOFC} + \frac{2180.6}{T_{SOFC}}} \quad (3)$$



$$V_{cell} = E_{re} - R_{cell} * I \quad (5)$$

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{i * A}{n_e * F} \quad (6)$$

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2, Consumed}}{\dot{n}_{H_2, in}} \quad (7)$$

$$\dot{n}_{H_2, in} = \dot{n}_{H_2, 3} + \dot{n}_{H_2, Reformed \& Shifted} \quad (8)$$

$$U_a = \frac{\dot{n}_{O_2, Consumed}}{\dot{n}_{O_2, in}} \quad (9)$$

$$\eta_{total} = \frac{\dot{W}_{ele} + \dot{Q}}{\dot{E}_{fuel, in}} \quad (10)$$

$$HPR = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_{ele}} \quad (11)$$

$$ex = ex^{PH} + ex^{ke} + ex^{pe} + ex^{ch} \quad (12)$$

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (13)$$

$$ex^{ch} = \sum y_k ex_k^{ch} + R_u T_0 \sum y_k \ln y_k \quad (14)$$

$$\dot{E}x_D = \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) - \dot{W} + \sum_i (\dot{E}x_i)_{in} - \sum_i (\dot{E}x_i)_{out} \quad (15)$$

$$EPC_{cycle} = \left(1 - \frac{\dot{E}x_{D, total}}{\dot{E}x_{fuel, in}} \right) * 100 \quad (16)$$

۴- نتایج و تحلیل

۴-۱- نتایج مدل‌سازی

پارامترهای ورودی مدل‌سازی بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده برای نقطه طراحی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی مدل‌سازی

پارامتر	مقدار
دمای مرجع (°C)	۲۵
فشار مرجع (bar)	۱/۰۱۳۲۵
بازدهی مبدل AC/DC (%)	۹۵/۰
مساحت سیستم پیل سوختی (m ²)	۴/۶۸
تعداد سلول در هر استک	۲۰۴
مساحت هر سلول (cm ²)	۲۲/۹۴
تعداد استک مورد استفاده در سیستم	۱۰
دمای نامی کارکرد پیل سوختی (°C)	۷۹۰
چگالی شدت جریان نامی (A/m ²)	۴۰۰۰
ضریب کاربرد سوخت (%)	۶۰
ضریب کاربرد هوا (%)	۳۵
فشار کاری پیل سوختی (bar)	۱/۰۴

در ریفرمر و پیل سوختی دارای ریفرمر داخلی، دو واکنش به‌سازی سوخت^۱ و دگرگونی آب-گاز^۲ بصورت همزمان انجام شده و هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی تامین می‌گردد. حرارت مورد نیاز این واکنش‌ها از طریق واکنش شیمیایی در پیل سوختی تامین می‌گردد. سرعت واکنش بر اساس ثابت تعادل بدست می‌آید. به‌سازی سوخت متان و دگرگونی مونوکسید کربن در روابط (۱) و (۲) ارائه شده‌اند و بصورت مشابه برای سایر سوخت‌ها نیز واکنش به‌سازی طبق موازنه انجام می‌شود. ثابت تعادل واکنش دگرگونی با استفاده از رابطه (۳) و بر اساس دمای واکنش بدست می‌آید. برای تامین آب مورد نیاز در فرایندهای به‌سازی و دگرگونی، علاوه بر آب تولیدی در آند پیل سوختی، بخشی از جریان خروجی از آند بازچرخانی می‌شود. میزان بازچرخانی با استفاده از نسبت بخار به کربن^۳ بدست می‌آید. مقدار مناسب برای عملکرد پیل برای نسبت بخار به کربن [۲۶] در پیل سوختی علاوه بر واکنش‌های (۱) و (۲) واکنش الکتروشیمی مطابق رابطه (۴) انجام شده و برق جریان مستقیم تولید می‌شود که با استفاده از یک اینورتر می‌تواند به برق جریان متناوب تبدیل شده و مورد انتقال و استفاده قرار گیرد. ولتاژ سلول پیل سوختی با استفاده از رابطه (۵) بدست می‌آید که در آن E_{re} ولتاژ برگشت پذیر پیل سوختی بوده و بر اساس معادله نرنست [۲۷] بدست می‌آید. مقاومت الکتریکی پیل سوختی، تاثیرات افت ولتاژهای فعال‌سازی، اهمیک و غلظت را در بر می‌گیرد. مقدار هیدروژن مصرفی در فرایند الکتروشیمی به شدت جریان سلول بستگی داشته و از رابطه (۶) بدست می‌آید که در آن F ثابت فارادی (F= 96485) و n_e تعداد الکترون تبادل شده در واکنش الکتروشیمی (n_e=2)، i چگالی جریان الکتریکی و A مساحت موثر توده پیل است. کل هیدروژن ورودی به پیل قابلیت شرکت در واکنش الکتروشیمی را نداشته و با توجه به ساختار و مکانیزم فرایند در پیل سوختی بخشی از آن مصرف می‌شود. میزان هیدروژن مصرفی بر اساس ضریب کاربرد سوخت و از رابطه (۷) به سوخت ورودی مرتبط می‌شود. با توجه به اینکه مقدار هیدروژن ورودی به فرایند الکتروشیمی در پیل سوختی، مجموع هیدروژن ورودی (جریان شماره ۳) و هیدروژن تولیدی در واکنش‌های به‌سازی و دگرگونی می‌باشد، لذا با توجه به سیکل مورد استفاده، مقدار هیدروژن ورودی با استفاده از رابطه (۸) بدست می‌آید. میزان اکسیژن مصرفی بر اساس ضریب کاربرد هوا و بر اساس رابطه (۹) بدست می‌آید که نشان دهنده میزان اکسیژن مشارکت کننده در فرایند الکتروشیمی نسبت به کل اکسیژن در هوای ورودی است. بازده الکتریکی سیستم بر اساس نسبت توان الکتریکی تولیدی توسط پیل سوختی به انرژی سوخت ورودی محاسبه می‌شود. بازده کلی سیستم طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن، توان حرارتی نشان دهنده میزان حرارت در دسترس ساختمان می‌باشد. نسبت حرارت به توان^۴ (رابطه ۱۱) در سیکل‌های تولید همزمان نشان دهنده قابلیت استفاده از این سیستم‌ها در اقلیم‌های مختلف یا راهنمای انتخاب اندازه تاسیسات در اقلیم‌های مختلف است.

برای انجام تحلیل‌های آگزروی نیاز است تا میزان آگزروی هر جریان محاسبه گردد. آگزروی هر جریان که مجموع آگزروی‌های فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل می‌باشد با استفاده از رابطه (۱۲) و آگزروی فیزیکی و شیمیایی بترتیب با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) بدست می‌آیند. میزان

1. Fuel Reforming
2. Gas Shifting
3. Steam to Carbon Ratio (SCR)
4. Heat to Power Ratio (HPR)



جدول ۲ نتایج حاصل از مدل‌سازی در جریان‌های مختلف سیکل

شماره جریان	فشار (bar)	دما (°C)	دبی جرمی (gr/s)	ضرایب جزء مولی (%)										
				N ₂	AR	H ₂ O	CO	O ₂	H ₂	CO ₂	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈	C ₂ H ₆	CH ₄
۱	۱/۰۱۳	۲۵	۰/۴۹	.	.	.	.	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۳	۰/۰۷	۰/۲	۴/۲	۹۵/۲
۲	۱/۰۵۰	۲۸	۰/۴۹	.	.	.	.	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۳	۰/۰۷	۰/۲	۴/۲	۹۵/۲
۳	۱/۰۴۵	۵۶۳	۴/۳۷	.	.	۲۷/۹	۸/۲۹	.	۳۲/۹۸	۲۳/۱۶	.	.	.	۷/۶۸
۴	۱/۰۴۰	۷۹۰	۵/۹۲	.	.	۴۸/۴۷	۷/۳۴	.	۱۷/۶۱	۲۶/۵۷	.	.	.	.
۵	۱/۰۴۰	۷۹۰	۳/۸۸	.	.	۴۸/۴۷	۷/۳۴	.	۱۷/۶۱	۲۶/۵۷	.	.	.	.
۶	۱/۰۴۰	۷۹۰	۲/۰۴	.	.	۴۸/۴۷	۷/۳۴	.	۱۷/۶۱	۲۶/۵۷	.	.	.	.
۷	۱/۰۱۳	۲۵	۱۹/۲۶	۷۷/۳۴	۰/۹۲	۰/۹۴	.	۲۰/۷۷	.	۰/۰۳	.	.	.	.
۸	۱/۰۵۰	۲۹	۱۹/۲۶	۷۷/۳۴	۰/۹۲	۰/۹۴	.	۲۰/۷۷	.	۰/۰۳	.	.	.	.
۹	۱/۰۴۵	۶۷۳	۱۹/۲۶	۷۷/۳۴	۰/۹۲	۰/۹۴	.	۲۰/۷۷	.	۰/۰۳	.	.	.	.
۱۰	۱/۰۴۰	۷۹۰	۱۷/۷	۷۷/۳۴	۰/۹۲	۰/۹۴	.	۲۰/۷۷	.	۰/۰۳	.	.	.	.
۱۱	۱/۰۳۵	۱۰۰۸	۱۹/۷۴	۷۴/۰۶	۰/۸۸	۹/۳۶	.	۱۱/۳۳	.	۴/۳۷	.	.	.	.
۱۲	۱/۰۳۰	۹۰۲	۱۹/۷۴	۷۴/۰۶	۰/۸۸	۹/۳۶	.	۱۱/۳۳	.	۴/۳۷	.	.	.	.
۱۳	۱/۰۲۵	۳۳۶	۱۹/۷۴	۷۴/۰۶	۰/۸۸	۹/۳۶	.	۱۱/۳۳	.	۴/۳۷	.	.	.	.
۱۴	۱/۰۲۰	۱۲۶	۱۹/۷۴	۷۴/۰۶	۰/۸۸	۹/۳۶	.	۱۱/۳۳	.	۴/۳۷	.	.	.	.
۱۵	۱/۰۱۳	۲۵	۲۴/۰۳	.	.	۱۰۰	.	.	.	.	.	.	.	.
۱۶	۳/۰۰۰	۲۵	۲۴/۰۳	.	.	۱۰۰	.	.	.	.	.	.	.	.
۱۷	۲/۹۹۵	۷۰	۲۴/۰۳	.	.	۱۰۰	.	.	.	.	.	.	.	.

بازده الکتریکی و سایر مشخصه‌های طراحی این سیستم در قیاس با سایر سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارتی مبتنی بر سایر فناوری‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ مشخصات عملکردی سیکل در نقطه طراحی

مشخصه	نتایج شبیه‌سازی
ولتاژ سلول (V)	۰/۸۰
توان الکتریکی DC خروجی (kW)	۱۵/۰۳
توان خالص الکتریکی AC خروجی (kW)	۱۴/۰۰
توان حرارتی (kW)	۴/۵۲
بازده الکتریکی (%)	۵۸/۵
بازده کل تولید همزمان (%)	۷۷/۳
درصد بارچرخانی جریان خروجی از آند (%)	۶۵/۵
نسبت حرارت به توان سیکل (HPR) (%)	۳۲/۲۹
میزان برق تولیدی در سال (kWh)	۹۳۸۲۰
میزان دی اکسید کربن ویژه تولیدی سیکل (gr CO ₂ /kWh)	۳۴۶/۱

جدول ۴ مقایسه سیستم این تحقیق با سایر فناوری‌های رقیب در حوزه تامین برق و حرارت بخش خانگی

مشخصه	حرارت بخش خانگی		
	[۲۸]	[۲۹]	[۳۰]
	(موتور گازسوز)	(موتور گازسوز)	(میکروتوربین گازی)
توان الکتریکی تولیدی (kW)	۱۴	۱۵/۲	۶۱
توان حرارتی تولیدی (kW)	۳۵	۳۰	۱۱۴/۲
نسبت حرارت به توان (HPR)	۲/۵	۱/۹۷	۱/۸۷
بازدهی الکتریکی (%)	۲۸/۵	۳۰/۰	۲۷/۴
بازدهی کلی CHP (%)	۹۹/۵	۹۲/۰	۷۹/۵

بر اساس مشخصات عملیاتی ذکر شده در کاتالوگ، سوخت مورد استفاده بصورت گاز طبیعی و هوای ورودی به سیستم بصورت هوای مرطوب در دمای ۲۵ °C و رطوبت نسبی ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. اتلافات حرارتی در تجهیزات مختلف مدنظر قرار گرفته است و با فرض احتراق کامل در محفظه احتراق، نتایج حاصل از مدل‌سازی و خواص ترمودینامیکی در نقاط مختلف سیکل در شرایط طراحی در جدول ۲ ارائه شده است. دمای کارکردی پیل سوختی ۷۹۰ °C و بالاترین دمای سیکل بعد از محفظه احتراق ۱۰۰۸ °C درجه بدست آمده است. برای جلوگیری از میعان آب در دودکش، دمای دود خروجی بر روی ۱۲۶ °C تنظیم شده است و دمای آب گرم جهت مصارف گرمایش محیط یا آب گرم مصرفی بر روی ۷۰ °C تنظیم شده است. در صورتی که از سیستم چگالشی استفاده شود و دمای گازهای خروجی از دودکش تا حدود ۵۰ °C پایین آورده شود، امکان دستیابی به مقادیر بالاتری از راندمان کل وجود دارد.

مهمترین مشخصات عملکردی سیکل در جدول ۳ ارائه شده و نتایج نشان دهنده بازده الکتریکی ۵۸/۵٪ و بازده کلی ۷۷/۳٪ در نقطه طراحی می‌باشد. با توجه به بازده الکتریکی بالای این سیستم، مزیت‌های این سیستم برای تولید برق کاملاً مشخص است و با تولید حرارت، بازده کلی سیستم به بیش از ۷۷٪ می‌رسد که مزیت‌های بسیاری را در تولید همزمان برق و حرارت نشان می‌دهد. با توجه به نسبت بیشتر توان الکتریکی و ذکر این نکته که عمده تجهیزات و تاسیسات برودتی موجود در کشور مصرف کننده برق هستند، لذا می‌توان استفاده از این سیستم را برای مناطق معتدل گرمسیری و گرمسیری کشور و ترکیب آن با سیستم تهویه مطبوع ساختمان توصیه نمود. با توجه به شرایط اقلیمی ایران، بسیاری از نقاط کشور قابلیت استفاده از این سیستم را دارند. برای استفاده از این سیستم در مناطق سردسیری، استفاده از یک سیستم کمکی جهت تامین کمبود حرارت ضرورت دارد. میزان برق تولیدی با فرض ضریب ظرفیت ۸۵٪ و ضریب کارکردی ۹۰٪ بدست آمده است.



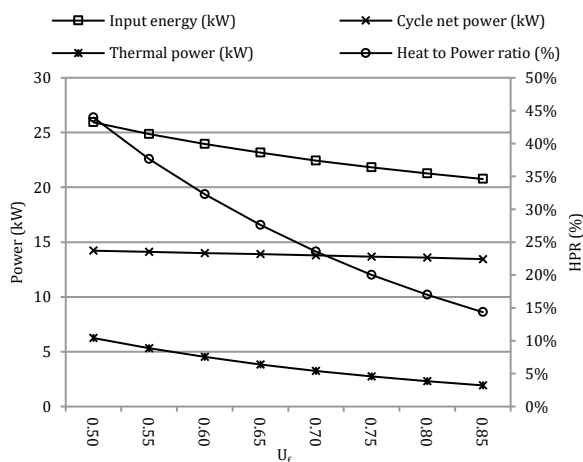
می‌ماند، توان حرارتی کاهش و به تبع آن، نسبت حرارت به توان کاهش می‌یابد. این کاهش باعث می‌شود بازده کل نیز روند کاهشی داشته باشد. بر این اساس روندهای ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴، با انتظارات اعلام شده مطابقت دارد. نکته مهم در این نمودار، نرخ تغییرات و شیب تغییرات در شاخص‌های عملکردی می‌باشد. تغییرات ضریب کاربرد سوخت از ۵۰٪ تا ۸۵٪ منجر به تغییرات کاهشی ۲۰، ۶۹، ۶ و ۶۷ درصدی بترتیب در توان ورودی، توان حرارتی، بازده کل و نسبت حرارت به توان شده و از سوی دیگر باعث تغییرات افزایشی ۱۸ درصدی در بازده الکتریکی شده است که نشان دهنده تاثیرپذیری بالای توان حرارتی از تغییر در این مولفه است.

بازده الکتریکی بالاتر از اهمیت بالایی برخوردار است و لذا با توجه به توصیه استفاده از این سیستم در مناطق گرمسیری، استفاده از ضریب کاربرد سوخت بالاتر پیشنهاد می‌شود.

۳-۴- تحلیل پارامتریک بر اساس تغییر در شدت جریان

تغییر در شدت جریان در محدوده عملیاتی ۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ آمپر بر متر مربع مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ گزارش شده است.

افزایش شدت جریان به معنی افزایش واکنش‌های الکتروشیمی بوده و لذا میزان هیدروژن مشارکت‌کننده در فرایند افزایش یافته و به تبع آن میزان سوخت ورودی به سیکل (توان ورودی) افزایش می‌یابد. با افزایش میزان سوخت، توان الکتریکی، توان حرارتی و نسبت حرارت به توان افزایش می‌یابد. افزایش مصرف سوخت منجر به کاهش بازده الکتریکی و اگزوزی سیکل شده و از سوی دیگر با توجه به تاثیرات مثبت در توان حرارتی، بازده کلی سیکل افزایش می‌یابد. تغییرات شدت جریان از ۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ آمپر بر متر مربع منجر به افزایش ۲۵۰، ۱۸۱، ۲۷۳۹ و ۹۱۱ درصدی تغییرات بترتیب در توان ورودی، توان الکتریکی خروجی، توان حرارتی و نسبت حرارت به توان شده و از سوی دیگر باعث کاهش ۲۰ درصدی در بازده الکتریکی شده است که نشان دهنده تاثیرپذیری بالای مشخصه‌های سیکل از تغییر در این مولفه است. این نتایج نشان می‌دهد شدت جریان می‌تواند بعنوان عاملی برای تنظیم نسبت حرارت به توان و تغییر در میزان تولید حرارت مورد نیاز استفاده شود که این موضوع باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این سیستم جهت انطباق با تقاضاهای مختلف حرارت و توان در اقلیم‌های مختلف می‌شود. بنابراین با توجه به اقلیم و نیاز حرارتی و توان الکتریکی مورد نیاز، شدت جریان می‌تواند تنظیم شود.



شکل ۳ روند تغییرات در توان‌های ورودی، الکتریکی و کل و نسبت توان به حرارت با تغییرات در ضریب کاربرد سوخت

هدف اساسی در آنالیز اگزوزی، تعیین محل و مقدار تولید بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف سیکل ترمودینامیکی و عوامل مؤثر بر تولید این بازگشت‌ناپذیری می‌باشد. از این طریق، علاوه بر ارزیابی کارایی اجزای مختلف سیکل ترمودینامیکی، راه‌های افزایش بازده و همچنین کاهش هزینه‌های طراحی سیکل نیز شناسایی می‌گردد. بازده اگزوزتیکی شاخصی از تاثیرات اتلافات اگزوزی را در کل سیکل نشان داده و بالا بودن این ضریب در هر سیکل بیانگر عملکرد اگزوزتیکی بهتر آن سیکل در قیاس با سیکل‌های دیگر است و از سوی دیگر این شاخص، پتانسیل بهینه‌سازی سیستم را نیز مشخص می‌نماید.

مهمترین نتایج تحلیل اگزوزی انجام شده در جدول ۵ گزارش شده است. پیل سوختی بعلت انجام واکنش‌های الکتروشیمی بیشترین تلفات اگزوزی را داشته و پس از آن مبدل حرارتی (بخاطر برگشت‌ناپذیری ناشی از اختلاف دماها و انتقال حرارت) و محفظه احتراق قرار می‌گیرند. بازده اگزوزتیکی سیکل برابر ۵۶/۵٪ بدست آمده است که کمتر از بازده انرژی سیکل است اما همچنان نشان دهنده کارایی بالای این سیستم می‌باشد.

جدول ۵ نتایج تحلیل اگزوزی انجام شده

مشخصه	مقدار (kW)	سهم (%)
تلفات اگزوزی پیل سوختی	۱۶/۷۷	۷۲/۷
تلفات اگزوزی مبدل حرارتی شماره ۹	۲/۴۵	۱۰/۶
تلفات اگزوزی محفظه احتراق	۱/۷۳	۷/۵
تلفات اگزوزی ریفرمر	۱/۳۹	۶/۰
تلفات اگزوزی جریان دودکش	۰/۷۲	۳/۱
بازده اگزوزتیکی سیکل (%)	۵۶/۵	

سیستم‌های مبتنی بر موتور گازسوز یا میکروتوربین‌ها بعلت بازده الکتریکی پایین، پتانسیل بالایی برای تامین حرارت دارند و ضعف در بازده الکتریکی را با تامین حرارت جبران می‌نمایند. بررسی این مقایسه، برتری این سیستم را در تولید توان الکتریکی نسبت به سایر فناوری‌های تجاری شده نشان داده و با توجه به توان حرارتی این سیستم، مزیت اساسی آن را در تولید توان و حرارت در مناطقی که نیاز به نسبت حرارت به توان پایین‌تری دارند (مناطق گرمسیری) نشان می‌دهد.

همچنین با توجه به اینکه ضریب انتشار نیروگاه‌های زغالسنگ سوز، نیروگاه‌های بخاری گاز طبیعی و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی بترتیب برابر ۹۱۵، ۵۴۹ و ۴۳۶ گرم به کیلووات‌ساعت توان می‌باشد [۳۱]، نرخ انتشار این نیروگاه (۳۴۶/۱) به ترتیب ۶۲٪، ۳۷٪ و ۲۱٪ کاهش دارد که قابلیت بالای این سیستم در رعایت الزامات و قوانین زیست محیطی را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه شرایط عملیاتی با شرایط طراحی متفاوت است، لذا برای پیدا کردن نقاط عملیاتی مناسب، بررسی پایداری و قابلیت عملکرد سیستم در شرایط عملیاتی مختلف، تحلیل‌های پارامتریک زیر مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۴- تحلیل پارامتریک بر اساس تغییر در ضریب کاربرد سوخت

افزایش ضریب کاربرد سوخت به این مفهوم است که بخش بیشتری از هیدروژن در فرایند الکتروشیمی مشارکت می‌کند و بنابراین در یک توان الکتریکی ثابت، انتظار می‌رود میزان سوخت ورودی به پیل کاهش یابد (توان ورودی کاهش می‌یابد) و بنابراین بازده الکتریکی و اگزوزی سیکل بالا می‌رود. از سوی دیگر و بعلت اینکه سوخت کمتری برای بخش احتراق باقی



درجه به دمای ۷۰ درجه سلسیوس در روز را دارد. مقدار آب گرم تولیدی در نسبت توان حرارتی به توان الکتریکی برابر ۶۱٪، به ۶۰۰۰ لیتر در روز می‌رسد. با توجه به مصارف معمول در بخش ساختمان، این ظرفیت آب گرم قابلیت پاسخگویی و تامین آب گرم گرمایش و آب گرم مصرفی را در اقلیم‌های گرم و در کاربردهای مختلف بخصوص کاربردهای اداری را خواهد داشت. تحلیل پارامتریک انجام شده انطباق این سیستم را با تقاضای برق و حرارت در اقلیم‌هایی با نسبت حرارت به توان از ۶ تا ۶۱٪ را نشان می‌دهد. این اقلیم‌ها با توجه به نیاز الکتریکی بالاتر و حرارتی پایین‌تر اصولاً اقلیم‌های گرم و معتدل خواهند بود.

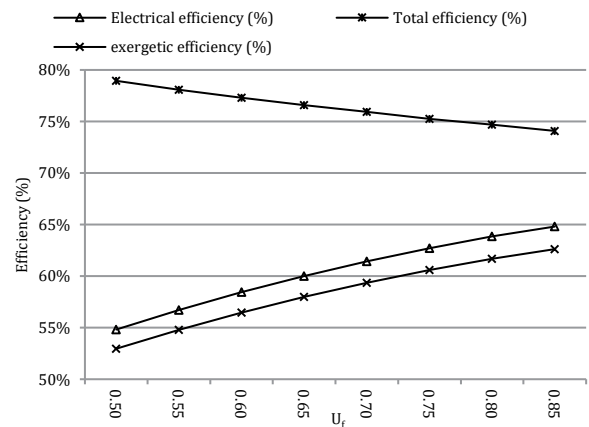
همچنین نتایج بدست آمده از جدول ۴ نشان دهنده بازده الکتریکی بالای این سیستم در قیاس با سیستم‌های تولید همزمان موجود مبتنی بر موتورهای گازسوز یا میکروتوربین‌های گازی می‌باشد. بازده الکتریکی پایین در سیستم‌های تولیدی همزمان به معنی تولید توان حرارتی بالاتر می‌باشد و بعلاوه بازده پایین مولد برق در قیاس با سیکل پیشنهادی، مقدار زیادی از انرژی مفید سوخت در موتور تبدیل به برق نشده و لذا برای تامین حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نسبت حرارت به توان بالا در سایر مجموعه‌های مقایسه شده بعلاوه این موضوع می‌باشد. با توجه به اقلیم‌های مختلف جغرافیایی کشور، دامنه تغییرات در تقاضای انرژی الکتریکی و حرارتی ساختمان‌ها می‌تواند با سیکل پیشنهادی تنظیم گردد. در نقطه طراحی و با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از این سیستم در مناطق گرم و گرم و معتدل که نیاز الکتریکی بالا و نیاز حرارتی پایین دارند، قابل توصیه است.

۵- نتیجه‌گیری

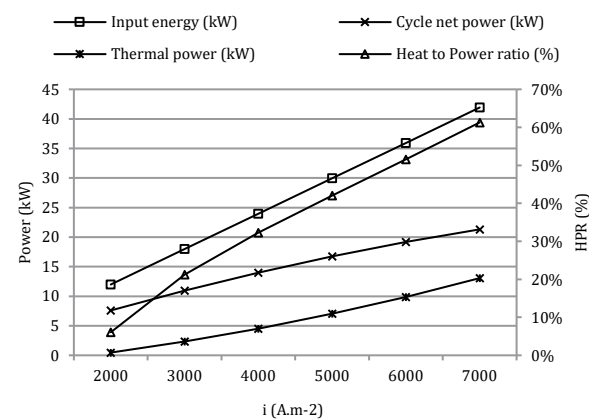
مدلسازی ترمودینامیکی سیکل تولید همزمان برق و حرارتی مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد نشان می‌دهد این سیستم قابلیت بالایی را جهت تامین توان الکتریکی ساختمان از خود نشان می‌دهد. در بخش حرارت، این سیستم انطباق خوبی را جهت تامین آب گرم مورد نیاز گرمایش و آب گرم مصرفی ساختمان نشان می‌دهد. دستیابی به بازده الکتریکی ۵۸/۵٪ و بازده کلی ۷۷/۳٪ در کنار فواید زیست محیطی و قابلیت استفاده از گاز طبیعی بعنوان سوخت، از مزیت‌های عمده این سیستم در قیاس با سایر سیستم‌های تاسیساتی تولید همزمان می‌باشد. با توجه به قابلیت عملکرد سیستم در نسبت حرارت به توان‌های مختلف، استفاده از این سیستم در ساختمان‌های اداری و در اقلیم‌های گرم و معتدل، توصیه می‌گردد.

۶- فهرست علائم

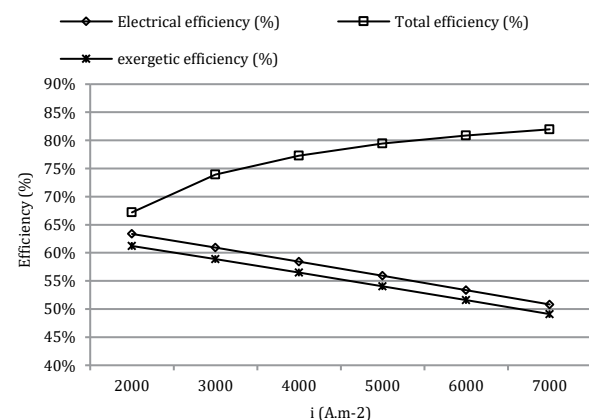
A	مساحت (m ²)
EPC	بازده اگزرتیک (%)
E _{re}	ولتاژ برگشت پذیر سلول پیل سوختی (V)
ex	اگزرتی (kJ.kg ⁻¹)
F	ثابت فارادی
h	آنتالپی (kJ.kg ⁻¹)
HPR	نسبت حرارت به توان (%)
i	چگالی شدت جریان الکتریکی (A.m ⁻²)
I	شدت جریان الکتریکی (A)
n	تعداد مول (mol)
n _e	تعداد الکترون تبادل
\dot{n}	دبی مولی (mol.s ⁻¹)



شکل ۴ تغییرات بازده الکتریکی، بازده کل و بازده اگزرتیک سیستم نسبت به تغییر در ضریب کاربرد سوخت



شکل ۵ تغییرات انرژی ورودی، توان خالص، توان حرارتی و نسبت حرارت به توان نسبت به تغییرات در شدت جریان



شکل ۶ تغییرات بازده الکتریکی، بازده حرارتی و بازده اگزرتیک سیستم نسبت به تغییرات در شدت جریان

۴-۴ جمع‌بندی

این سیکل با توان خالص خروجی ۱۴/۰۰ کیلووات، با فرض ضریب ظرفیت ۸۵٪ و ضریب کارکردی ۹۰٪، پتانسیل تولید ۹۳۸۲۰ کیلوواتساعت انرژی الکتریکی را در سال را دارد. در نسبت توان حرارتی به توان الکتریکی برابر ۳۲٪، این سیکل قابلیت رساندن و تولید ۲۰۷۳ لیتر آب گرم از دمای ۲۵



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال نهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱

www.jrenew.ir

info@jrenew.ir

پایه داده‌ها: ۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

۱۴۰۱

[11] V. Liso, Y. Zhao, N. Brandon, M. Nielsen, S. Kær, Analysis of the impact of heat to power ratio for a SOFC based mCHP system for residential application under different climate regions in Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 13715–13726, 2011.

[12] J. Pirkandi, M. Ghassemi, M. Hamed, R. Mohammadi, Electrochemical and thermodynamic modeling of a CHP system using tubular solid oxide fuel cell (SOFC-CHP), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 29–30, pp. 151–162, 2012.

[13] E. J. Naimaster, A. K. Sleiti, Potential of SOFC CHP systems for energy-efficient commercial buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 61, pp. 153–160, 2013.

[14] H. Xu, Z. Dang, B. F. Bai, Analysis of a 1 kW residential combined heating and power system based on solid oxide fuel cell, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, pp. 1101–1110, 2013.

[15] T. Pfeifer, L. Nusch, D. Liefstink, S. Modena, System design and process layout for a SOFC micro-CHP unit with reduced operating temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 431–439, 2013.

[16] W. Yang, Y. Zhao, V. Liso, N. Brandon, Optimal design and operation of a syngas fueled SOFC micro CHP system for residential applications in different climate zones in China, *Energy and Buildings*, Vol. 80, pp. 613–622, 2014.

[17] S. Wahl, A. Segarra, P. Horstmann, M. Carré, W. Bessler, F. Lapicque, K. Friedrich, Modeling of a thermally integrated 10 kW_e planar solid oxide fuel cell system with anode off gas recycling and internal reforming by discretization in flow direction, *Journal of Power Sources*, Vol. 279, pp. 656–666, 2015.

[18] A. Memon, R. Memon, Thermodynamic analysis of a tri-generation system proposed for residential application, *Energy Conversion and Management*, Vol. 145, pp. 182–203, 2017.

[19] M. Sorace, M. Gandiglio, M. Santarelli, Modeling and techno economic analysis of the integration of a FC based micro CHP system for residential application with a heat pump, *Energy*, Vol. 120, pp. 262–275, 2017.

[20] W. Shi, J. Zhu, M. Han, Z. Sun, Y. Guo, Operating limitation and degradation modeling of micro solid oxide fuel cell-combined heat and power system, *Applied Energy*, Vol. 252, 2019.

[21] M. Mehrpooya, M. Sadeghzadeh, A. Rahimi, M. Pouriman, Technical performance analysis of a combined cooling heating and power (CCHP) system based on solid oxide fuel cell (SOFC) technology – A building application, *Energy Conversion and Management*, Vol. 198, 2019.

[22] S. Ahmadi, H. Ghaebi, A. Shokri, A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles, *Energy*, Vol. 186, 2019.

[23] Y. Wang, L. Wehrle, A. Banerjee, Y. Shi, O. Deutschmann, Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling, *Renewable Energy*, Vol. 163, pp. 78–87, 2021.

[24] S. J. McPhail, J. Kiviahio, B. Conti, the yellow pages of SOFC technology International Status of SOFC deployment 2017, *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2017.

[25] www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/

[26] G. Arab, H. Ghadami, S. Abbasi, Thermo-economic modeling of an atmospheric SOFC/CHP cycle; an exergy based approach, *Mechanics & Industry*, 2014.

[27] S. H. Chan, C. F. Low, O. L. Ding, Energy and exergy analysis of simple solid oxide fuel cell power systems, *Journal of power sources*, Vol. 103, pp. 188–200, 2002.

[28] CHP systems gas engine, CHP Compact 14, <http://www.dejatech.nl/en/products/chp-system>.

[29] Technical Data Sheet XRGBI 15G-TO Energy System, Micro CHP System, *EC Power*.

[30] C30 Micro turbine, Low-pressure Natural Gas, *Capstone Turbine Corporation*, www.capstoneturbine.com, 2020.

[31] L. WALKER, Combined-Cycle Plants Release Far Less CO₂ than Coal, <https://www.environmentalleader.com/2014/01/report-combined-cycle-plants-release-far-less-co2-than-coal/>, 2014.

\dot{Q}	توان حرارتی (kW)
R _{cell}	مقاومت الکتریکی سلول پیل سوختی (Ohm)
R _u	ثابت جهانی گازها (kJ.kmol ⁻¹ .K ⁻¹)
s	آنترپپی (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
T	دما (K)
U _a	ضریب کاربرد هوا (/.)
U _f	ضریب کاربرد سوخت (/.)
V _{cell}	ولتاژ سلول پیل سوختی (V)
\dot{W}	توان الکتریکی (kW)
y	جزء مولی

علامت یونانی

بازده η

بالانویس

شیمیایی ch
جنبشی ke
پتانسیل pe
فیزیکی PH

زیر نویس

0 حالت مرجع
D ناپود شده
ele الکتریکی
eq تعادلی
in ورودی
out خروجی
total کل

۷- مراجع

[1] S. Howell, Y. Rezugui, J. L. Hippolyte, B. Jayan, H. Li, Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, pp. 193–214, 2017.

[2] Statistical Review of World Energy, *BP*, 69th edition, www.bp.com, 2020.

[3] Fuel Cell Industry Review, *E4tech*, 2019.

[4] X. Zhang, Y. Jin, D. Li, Y. Xiong, A review on recent advances in micro-tubular solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 506, 2021.

[5] S. J. McPhail, S. Pylypko, S. Nadorov, D. Opalnikov, A. Lattimer, S. Bond, A new all-European technology for clean, efficient power, *Layman's Report*, 2017.

[6] R. Scataglioni, A. Mayyas, M. Wei, S. H. Chan, T. Lipman, D. Gosselin, A. D'Alessio, H. Breunig, W. G. Colella, B. D. James, A Total Cost of Ownership Model for Solid Oxide Fuel Cells in Combined Heat and Power and Power-Only Applications, *Environmental Energy Technologies Division*, 2015.

[7] M. Shafii-zadeh, M. Tavanpourpaveh, F. Amini, L. S. Fatahi, N. G. Ghahremani, P. Soleimanpour, A review of 31 years of the country's energy statistics (1367–1397), *Ministry of energy*, 2020. (in Persian)

[8] K. Darrow, R. Tidball, J. Wang, A. Hampson, Catalog of CHP Technologies, *U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership Program*, 2008.

[9] M. Singh, D. Zappa, E. Comini, Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges, *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, Corrected Proof, 2021.

[10] E. Ounpuu, High performance Solid Oxide Fuel Cells, *Eco summit, Berlin*, 2015.

