



Modeling of hybrid system of solid oxide fuel cell and Rankine cycle fed with synthesis gas

Omid Kohzadi¹, Mohsen Mansouri^{2*}

¹ MSc, Department of Chemical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

² Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 1 Feb 2022

Accepted: 1 May 2022

Abstract

In this study, a solid oxide fuel cell fed with synthesis gas derived from industrial waste water was combined with a Rankine power generation cycle was analyzed and investigated using thermodynamic relationships. First, the solid oxide fuel cell was independently simulated and the quantities such as output voltage, current density and output power of the fuel cell were calculated. Then, the power cycle that equipped with a gas turbine combined with a solid oxide fuel cell was investigated according to the output results of the fuel cell simulation using thermodynamic analysis. In current study, fuel cell output voltage as a function of current density was reported, and the effect of temperature and pressure increasing on output fuel cell voltage was reported. The analysis of this system showed that with the increase in temperature and pressure, the output voltage of the solid oxide fuel cell increased. The variation in the output power of the fuel cell against the current density at three operating temperatures of 1073, 1173 and 1273 K were also calculated, the results showed that the power of the fuel cell increases with the increase in temperature. Also, the total efficiency of the hybrid system by increasing in fuel cell operating temperature increased.

Keyword: Hybrid System, Fuel Cell, Rankine Cycle, Modeling.

* m.mansouri@ilam.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Kohzadi, O., Mansouri, M., "Modeling of hybrid system of solid oxide fuel cell and Rankine cycle fed with synthesis gas", Journal of Farayandno – Vol. 17 – No. 77, pp. 24-37, In Persian, (2022).

مدل سازی سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و سیکل رانکین تغذیه شده با گاز سنتز

امید کهزادی^۱، محسن منصوری^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام

^۲ دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

چکیده

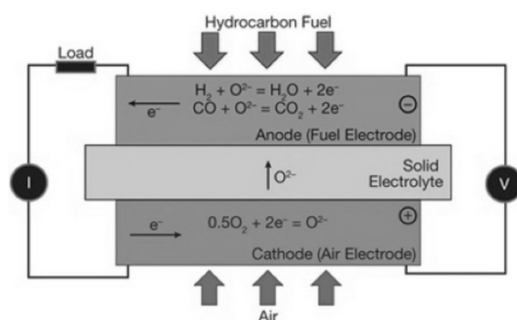
در این مطالعه یک پیل سوختی اکسید جامد تغذیه شده با گاز سنتز حاصل از پساب صنعتی که با یک سیکل تولید توان رانکین ترکیب شده است، با استفاده از روابط ترمودینامیکی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. ابتدا به صورت مستقل پیل سوختی اکسید جامد شبیه سازی و کمیت‌های مانند ولتاژ خروجی، چگالی جریان و توان خروجی پیل سوختی محاسبه شد. سپس سیکل توان ترکیب شده با پیل سوختی اکسید جامد مجهز به توربین گازی با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی پیل سوختی تحلیل ترمودینامیکی شد. در پژوهش حاضر ولتاژ پیل سوختی به صورت تابعی از چگالی جریان گزارش شد و اثر افزایش دما و فشار روی آن مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل این سیستم نشان داد که با افزایش دما و فشار ولتاژ خروجی پیل سوختی اکسید جامد افزایش می‌یابد. تغییرات توان خروجی تولیدی پیل سوختی در مقابل چگالی جریان در سه دمای عملیاتی ۱۰۷۳، ۱۱۷۳ و ۱۲۷۳ کلین نیز محاسبه شد، نتایج نشان داد که با افزایش دما توان پیل سوختی نیز روند افزایشی دارد. همچنین راندمان کلی سیستم هیبریدی با افزایش دمای عملیاتی پیل سوختی اکسید جامد نیز افزایش یافت.

کلمات کلیدی: سیستم هیبریدی، پیل سوختی، سیکل رانکین، مدل سازی

* m.mansouri@ilam.ac.ir

۱- مقدمه

با آغاز استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع تولیدکننده انرژی بشر با مشکلاتی از قبیل آلودگی محیط زیست، بازدهی کم و نگرانی از پایان این منابع زیرزمینی درگیر بوده است [۱]. بزرگترین چالش که استفاده از سوخت فسیلی با آن مواجه است حل دو مسأله به صورت همزمان است: اول اینکه، تولید انرژی با استفاده کمتر از منابع طبیعی و دوم، کاهش میزان آلودگی که به خاطر استفاده از این سوخت منتشر می‌گردد [۲]. برای حل این مشکل سیستم‌های دیگری مانند تولید انرژی از هیدروژن پیشنهاد شده که در طی چند سال اخیر مطالعه زیادی بر روی آنها انجام شده است. به عنوان نمونه هیدروژن می‌تواند در داخل یک پیل سوختی طی یک فرآیند الکتروشیمیایی جریان الکتروسیسته تولید کند. باید توجه داشت استفاده از هیدروژن دارای ویژگی‌های همچون راندمان بالا و عدم آلودگی برای محیط زیست است [۳]. پیل سوختی با استفاده از غشاء، انرژی شیمیایی را به توان و گرما تبدیل می‌کند. در فرآیندهای دیگر تولید الکتروسیسته با گذشت چند مرحله و تبدیل حالت‌های مختلف انرژی به تولید الکتروسیسته می‌رسیم، در حالی که با استفاده از پیل سوختی طی یک مرحله انرژی شیمیایی به الکتریکی تبدیل می‌شود [۴]. انواع مختلفی از پیل‌های سوختی با فرآیندهای مختلف شیمیایی وجود دارد، معمولاً ماده الکترولیت به کار رفته در پیل سوختی مبنای طبقه بندی انواع پیل‌های سوختی است. به عنوان مثال در پیل‌های سوختی پلیمری، هوا به عنوان اکسید کننده و هیدروژن به عنوان سوخت در مجاورت یک الکتروکاتالیست مناسب عمل می‌کند که در این فرآیند علاوه بر هیدروژن خالص، از هیدروکربنات قلیایی، متانول و ... (بر حسب نوع پیل سوختی) نیز به عنوان سوخت استفاده می‌گردد که در خاتمه فرآیند در این پیل‌ها، آب و انرژی الکتریکی به عنوان محصول اصلی تولید می‌شود [۵]. در پیل سوختی اکسید جامد، بین دو الکتروکاتالیست مناسب قرار دارد، که اکسیژن الکترون‌ها در ناحیه سه فازی از کاتد دریافت کرده و بصورت یون اکسیژن از طریق الکترولیت عبور می‌کند تا در ناحیه سه فازی واکنش انجام گیرد و آب و دی اکسید کربن در انتها فرآیند تشکیل می‌گردد [۶]. در شکل ۱ نحوه کارکرد یک پیل سوختی اکسید جامد نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد

یکی از راه‌های حل‌هایی که جهت کاهش مصرف انرژی امروزه مورد توجه قرار می‌گیرد، استفاده بهینه از انرژی شیمیایی سوخت‌های فسیلی است. به عنوان یکی از مهمترین روش‌ها، استفاده از سیستمی که علاوه بر تولید برق، حرارت تولیدی را طی فرآیند جهت ایجاد گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. به همین دلیل در چند سال اخیر استفاده از حرارت تولیدی پیل‌های سوختی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۷]. حرارت به دست آمده از پیل سوختی کاربردهای فراوانی دارد، به عنوان نمونه گرمای تولید شده در پیل سوختی می‌تواند در توربین گازی بجای حرارت محفظه

احتراق مورد استفاده قرار گیرد [۸]. سیستم‌های ترکیب گرمایش، سرمایش و توان، پتانسیل بالایی را برای افزایش بازده انرژی منابع مختلف و کاهش آلودگی محیط زیست دارند [۹]. در سالیان گذشته با توجه به افزایش جمعیت و گسترش صنایع، مصرف برق افزایش یافته و همین امر سبب شده نیروگاه‌های حرارتی بیشتری در چرخه تولید توان قرار گیرند. این نیروگاه‌ها که اکثراً از منابع انرژی سوخت‌های فسیلی به عنوان سوخت بهره می‌برند تنها با هدف تولید برق به کار گرفته می‌شوند. با توجه به عدم دسترسی برخی کشورها به سوخت‌های فسیلی و افزایش قیمت این سوخت‌ها، افزایش راندمان نیروگاه‌ها در دستور کار بسیاری از کشورها قرار گرفت. از جمله استفاده از گازهای خروجی با دمای بالا در ساخت نیروگاه‌های که با ترکیب گاز و بخار کار می‌کنند. برای بازیافت گرمای سیکل نیروگاه‌ها استفاده از سیکل رانکین به دلایلی چون راندمان و ایمنی بالا می‌تواند گزینه مناسبی باشد. چنانچه انرژی‌های خورشیدی، گرمای آزاد شده از زمین و یا هر منبع گرمایی دیگری با سیکل ترکیب شوند بازدهی کلی سیستم افزایش می‌یابد. از آن مهم‌تر میزان آلودگی سیکل رانکین، به دلیل استفاده گرمای اضافی سیکل‌های دیگر نیز کمتر است. یکی از گزینه‌ها برای کاهش آلودگی سیکل رانکین استفاده از گرمای حاصل از واکنش در پیل‌های سوختی و ترکیب این نوع پیل‌ها با یک نیروگاه سیکل رانکین است، این موضوع در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

چان و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک سیستم پیل سوختی اکسید جامد با ریفرمینگ^۱ داخلی را مورد مطالعه قرار دادند، آنها دو پارامتر در فشار عملیاتی و دبی سوخت و روی در فرآیند مورد مطالعه را استخراج نموده و تاثیر آنها روی عملکرد هر یک از تجهیزات و کل سیستم مورد بحث و بررسی قرار دادند. این پژوهشگران دریافتند که با افزایش فشار سیستم راندمان افزایش می‌یابد و این در صورتی است که با افزایش دبی سوخت، راندمان کاهش می‌یابد. همچنین توانستند با مدل کردن این سیستم به راندمان کلی (حرارتی) ۸۰ درصد دست پیدا کنند [۱۰]. یک سیستم هیبریدی پیل سوختی و توربین گازی توسط پژوهشگران در سال ۲۰۰۶ شبیه سازی و آنالیز اکسرژی شد. در این پژوهش با آنالیز اکسرژی تک‌تک اجزای سیستم، برگشت ناپذیری‌های هر یک از اجزا را نیز گزارش شد. با شبیه سازی سیستم، تاثیر پارامترهایی از جمله فشار عملیاتی سیستم، فاکتور استفاده از سوخت و نسبت هوا به سوخت بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. سیستم هیبریدی ذکر شده با احیاء گرما دارای راندمان کلی ۷۰ بود [۱۱]. در سال ۲۰۱۰ پژوهشگران یک سیستم هیبریدی متشکل از سیکل توربین گازی و یک پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) با سوخت بیومس مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق سه نوع سیستم متشکل از یک توربین گازی، یک پیل سوختی، سیستم ترکیبی پیل سوختی و توربین گازی را مدل شد، و هر سه سیستم با سوخت بیومس تغذیه و راه اندازی گردید. با بررسی فشار و دما روی عملکرد سیکل مرکب از پیل سوختی و توربین گاز به راندمان ۵۰ درصد که بزرگ‌تر از راندمان هر یک از توربین گازی و پیل سوختی بود دست یافتند [۱۲]. یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد میکروتوربین گازی در سال ۱۳۹۰ شمسی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه اثر دما عملیاتی، فشار کاری و نسبت سوخت به هوا روی بازده، توان و آنتروپی سیستم گزارش شد. نتایج در این تحقیق نشان داد که افزایش دما و فشار کاری، بازده کلی سیستم تا حدود ۸۰٪ افزایش یافت [۱۳].

سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی با خوراک بیوگاز در سال ۲۰۱۳ مورد مطالعه قرار گرفت، که تغییرات دمای ورودی توربین، نسبت تراکم در کمپرسور و تاثیر آنها بر راندمان کلی سیستم هیبریدی بررسی شد.

¹ Reforming

همچنین پارامترهای نسبت گرما به توان، نسبت توان توربین به پیل سوختی و نسبت توان به اندازه پیل سوخت نیز گزارش شد [۱۴]. محققین در سال ۲۰۱۷ طی پژوهشی دریافتند با برگرداندن مقداری از جریان خروجی پیل سوختی و توربین گازی در سیستم هیبریدی مرکب از این دو به ابتدای فرآیند، مقدار هوای مورد نیاز سیستم کاهش می‌یابد، در این مطالعه اثرات فشار، فاکتور استفاده از سوخت و راندمان توربین بر عملکرد کل سیستم گزارش شد [۱۵]. در سال ۲۰۱۸ پژوهشی بر روی سوخت‌های مختلفی از جمله سوخت‌های زیستی تولید شده از محصولات کشاورزی و پسماند صنعتی و کاربرد آنها در پیل سوختی اکسید جامد انجام گرفت. در این مطالعه با آنالیز ترمودینامیکی پیل سوختی دریافتند که تقریباً ۴۰ درصد از تولید آنتروپی در پیل سوختی مربوط به افت ولتاژهای اهمی، غلظتی و قطبی در پیل سوختی می‌باشد و حدود ۳۰ درصد آنتروپی تولیدی کل مربوط به ریفرمینگ و شیفتینگ متان است، ماکزیمم تولید آنتروپی از سوخت حاصل از تخمیر متان نیز گزارش شد [۱۶]. پژوهشگران در سال ۲۰۱۹ با مطالعه بر روی یک پیل سوختی اکسید جامد و یک سیستم سه گانه گاز بخار پارامترهای کلیدی این سیستم شامل دما و فشار عملیاتی، نسبت هوا به سوخت، نسبت تراکم کمپرسور، دمای محفظه احتراق و نقطه پینچ سیکل بخار تعیین و گزارش کردند. در این مقاله دو تابع هدف راندمان اکسرژی و هزینه‌های الکتریسیته مورد بحث و بررسی نویسندگان قرار گرفته که با بهینه‌سازی این سیستم توسط توابع هدف پارامترهای مهم ذکر شده سیستم محاسبه گردید [۱۷]. حبیب‌اله‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد، سیستم گازی‌سازی بیومس با عامل‌های گازی‌سازی مختلف و یک الکترولیزور اکسید جامد که جریان الکتریسیته خود را از توان خروجی توربین گازی دریافت می‌کرد را بررسی کردند. آنها سه عامل گازی‌سازی هوا، اکسیژن و دی اکسید کربن را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که اکسیژن دارای عملکرد کلی ترمودینامیکی و اقتصادی بهتری در سیستم گازی‌سازی داشت [۱۸]. در پژوهشی یک سیستم انرژی تولیدچندگانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز به همراه فرآیند جذب و ذخیره سازی دی اکسید کربن متشکل از سیکل رنگین آلی با مبدل حرارتی داخلی، سیکل گازی‌سازی مجدد گاز طبیعی مایع شده، سیکل تبرید جذبی آب-لیتیوم برماید، فتوولتائیک/ حرارتی با متمرکزکننده، مزرعه بادی و الکترولیزر قلیایی پیشرفته، توسط خجسته عفت پناه و همکاران مدل-سازی شد [۱۹].

در مطالعات پیشین تحقیقات کمتری روی ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و سیکل توان که توسط گاز سنتز تغذیه می‌شود انجام گرفته است. هدف این مطالعه مدل‌سازی و بررسی یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و یک سیکل رنگین با تغذیه سوخت مونوکسید کربن و هیدروژن (حاصل از گاز سنتز) است.

۲- الگوسازی نظری

در این تحقیق گاز سنتز (سوخت تولیدی ناشی از پساب‌های صنعتی) فشرده شده به عنوان خوراک یک سیستم تولید همزمان برق و گرما در نظر گرفته شده است. در ابتدای فرآیند خوراک وارد پیل سوختی اکسید جامد با ریفرمر داخلی شده است و تبدیل به هیدروژن به عنوان خوراک پیل سوختی گردید. در واقع متان طی واکنش‌های شیفتینگ^۲ و ریفرمینگ درون خود پیل سوختی در حضور کاتالیست تبدیل به هیدروژن، بخار آب و دی اکسید کربن می‌شود. مخلوط کربن مونوکسید و هیدروژن که در فرآیندهای پتروشیمیایی کاربرد گسترده دارد گاز سنتز می‌گویند. برای تولید گاز سنتز سه نوع ریفرمینگ به طور کلی سه نوع تکنیک ریفرمینگ برای تولید گاز سنتز از سوخت‌های

² Shifting

هیدروکربن وجود دارد که عبارتند از: ریفورمینگ اتوترمال، ریفورمینگ بخار، اکسیداسیون جزئی و ترکیب دو ریفورمر که شامل بخار و جزیی می شود اتو نرمال گویند [۲۰]. هیدروژن تولید شده طی فرآیند ریفورمینگ درون پیل سوختی در واکنش الکتروشیمیایی کلی پیل و در حضور اکسیژن ناشی از هوای فشرده شرکت می کند. که این واکنش گرمازا منجر به تولید جریان الکتروسیسته می گردد. گازهای داغ حاصل از واکنشها وارد یک محفظه احتراق می شوند که گازهای واکنش نداده، واکنش دهند و نیز دمای گازهای خروجی بالا رود. این گازهای داغ پس از مبدل های پیشگرم کن وارد یک میکرو توربین گازی به منظور تولید توان الکتریکی بیشتر می شود. سپس این گازها، که هنوز دارای دما و اکسرژی بالایی هستند وارد یک بویلر به منظور تولید بخار می گردند. بخار تولید شده به عنوان سیال عامل در سیکل رانکین عمل می کند. به گونه ای که با عبور از توربین بخار تولید توان می کند و بخار خروجی از توربین که انرژی آن کم شده است با عبور از یک کندانسور آب خنک کننده، دوباره به کندانس آب تبدیل شده و به چرخه باز می گردد. کل فرایند مورد بررسی در شکل ۲ ارائه شده است.

به منظور مدل سازی فرایند فوق فرض هایی به صورت زیر در نظر گرفته شد:

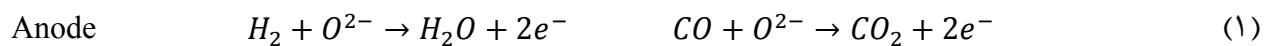
(۱) سیستم بصورت پایدار است.

(۲) تغییرات دما با زمان در پیل سوختی وجود ندارد.

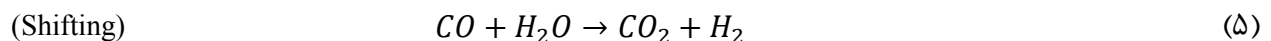
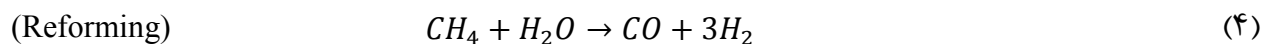
(۳) توزیع دما، فشار، غلظت مواد و سرعت جریانها در کانال های پیل سوختی بصورت یکنواخت در نظر گرفته شد.

(۴) از افت فشار در ریفورمر چشم پوشی شد.

(۵) واکنش های کاتد، آند و کلی پیل سوختی اکسید جامد بصورت زیر است [۲۱]:



در طی فرآیند ریفورمینگ داخلی، کربن مونو اکسید و متان می توانند به عنوان سوخت داخلی مورد استفاده قرار گیرند. واکنش فرآیند ریفورمینگ داخلی به شدت گرماگیر است و این واکنش گرمای خود را از پیل سوختی دریافت می کند. مکانیزم این واکنشها بصورت زیر می باشد [۲۱]:



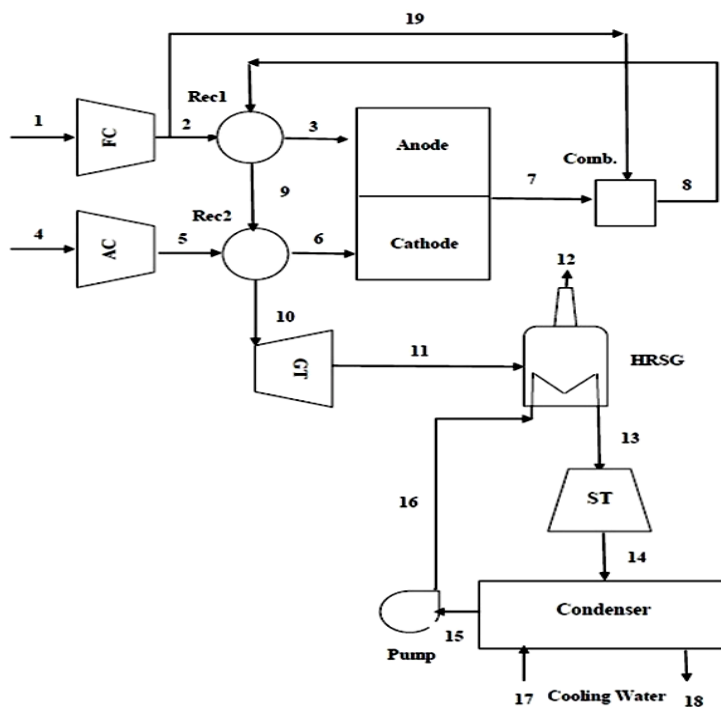
سه واکنش ۳ الی ۵ به صورت تعادلی فرض شد، در نتیجه مقادیر تعادلی در قالب x ، y و z توسط معادلات زیر بدست آمد [۲۲]:

$$k_{\text{reforming}} = \frac{n_{H_2}^3 n_{CO}}{n_{H_2O} n_{CH_4}} \left(\frac{P_{\text{cell}}}{P_0} \right)^2 \quad (6)$$

$$k_{\text{shift}} = \frac{n_{H_2} n_{CO}}{n_{H_2O} n_{CH_4}} \quad (7)$$

$$z = U_f (n_{H_2, \text{inlet}} + 3x + y) \quad (8)$$

در این معادلات k ثابت تعادل برای واکنش ۴ و ۵، x مقدار نرخ مولی پیشرفت واکنش تولید متان، y مقدار نرخ مولی پیشرفت واکنش ۵، Z میزان نرخ مولی پیشرفت واکنش الکترو شیمیایی ۳، η نرخ مولی (اندیس معرف نرخ مولی آن نوع مولکول است) و U_f میزان بهره وری سوخت است. برای محاسبه نرخ مولی معادلات ۳ الی ۵ می توان از موازنه جرمی بین معادلات با فرض فقط هیدروژن به صورت الکتروشیمیایی واکنش می دهد و سلولها به صورت سری هستند، استفاده کرد.



شکل ۲- نمودار فرآیند مورد بررسی در این پژوهش، FC کمپرسور سوخت، AC کمپرسور هوا، Comb پس سوز، Rec مبدل های حرارتی، GT توربین گاز، HRSG تولید کننده بخار در سیکل توان و ST توربین بخار در سیکل توان

ولتاژ یک سلول که اختلاف بین ولتاژ برگشت پذیر و افت ولتاژها است که تابعی از چگالی جریان، فشار، ترکیب شیمیایی مواد و هندسه سلول است ولتاژ کلی سلول به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{cell} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) - ir - (A_{anode} + A_{cathod}) \left(\frac{i}{\left(i_{0,anode} \frac{A_{anode}}{A_{anode} + A_{cathod}} \right) \left(i_{0,cathod} \frac{A_{cathod}}{A_{anode} + A_{cathod}} \right)} \right) - \frac{RT}{n_e \alpha F} \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (9)$$

که F ثابت فارادی (96485 C/mol)، P_i فشارهای جزئی هر یک از گازها هیدروژن، اکسیژن و بخار آب است (پایین نویس معرف نوع ماده است)، i چگالی جریان (mA/cm^2)، $i_{0,Anode}$ و $i_{0,Cathod}$ چگالی جریان تبدلی آند و کاتد (mA/cm^2)، α ضریب انتقال بار الکتریکی، n_e تعداد مول الکترون به ازای هر مول هیدروژن، T دمای ساختار جامد

E_0 ، (K) نیرو محرکه الکتریکی در فشار استاندارد بر حسب ولت، A سطح فعال سلول برای کاتد و آند، r مقاومت ویژه سطحی (Ω) ، V_{cell} ولتاژ کلی سلول می‌باشند [۲۳].

برای شبیه‌سازی پیل سوختی فرض شد که واکنش ۵ به صورت کامل انجام گرفت، به این ترتیب هیدروژن تولیدی این واکنش به علت بزرگ بودن ثابت تعادل می‌تواند توسط واکنش الکتروشیمیایی ۳ مصرف شود. در واقع اکثر پژوهش‌ها نشان داد که کسر مولی متان در خروجی آند کمتر از یک درصد است [۲۱]. به منظور ساده سازی محاسبات مقادیر x ، y و z بر حسب نرخ مولی جریان سوخت در هر ساعت n_f به صورت زیر قابل باز تعریف هستند:

$$x = 0.97n_f \quad (10)$$

$$y = \frac{z}{U_f} - 2.91n_f \quad (11)$$

$$n_{CO_2}^{in} = n_{N_2}^{in} = 0.015n_f \quad (12)$$

با جای گذاری این مقادیر در معادلات ثابت‌های تعادلی ۶ الی ۸، فقط مقدار n_f و z مجهول است (n_f نرخ مولی جریان سوخت). با این عمل دو معادله با دو مجهول تشکیل که با روش عددی تکراری حل شد. این محاسبه مقدار هیدروژن به ازای هر کیلو آمپر به عنوان شاخصی برای تشخیص میزان مصرف سوخت به ازای توان مطلوب خروجی پیل سوختی را محاسبه می‌کند. برای محاسبه شدت جریان کلی I_{tot} ، z (بر حسب $kmol/hr$) و توان ($power_{dc}$) بر حسب وات با توجه به چگالی جریان i (بر حسب mA/cm^2) از روابط زیر استفاده شد [۲۱]:

$$I_{tot} = i A_{cell} n_{cell} \quad (13)$$

$$z = 0.018655 \times 10^{-3} i A_{cell} n_{cell} \quad (14)$$

$$power_{dc} = V_{cell} I_{cell} \quad (15)$$

شبیه‌سازی و روش حل مدل به این ترتیب است ابتدا دمای به عنوان دمای عملیاتی پیل سوختی حدس زده شد و با حل دستگاه دو معادله دو مجهول حاصل از معادلات تعادل مقدار ولتاژ سلول تعیین گشت. از معادله توان (معادله ۱۵) یک مقدار جدید برای ولتاژ سلول جدیدی بدست می‌آید که با مقایسه بین این دو ولتاژ (اختلاف ولتاژ بین دو تکرار) به عنوان مقدار شاخص همگرایی روش تکرار استفاده شد. برای شبیه سازی پیل سوختی کدی در نرم افزار متلب (Matlab 2019a) نوشته شد، که فلوچارت این روش در شکل ۳ نشان داده شده است همچنین می‌توان مقدار بهینه متان خروجی نیز با فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$n_{CH_4}^e = n_{CH_4}^i - x = n_{CH_4}^i - 0.969996n_f \quad (16)$$

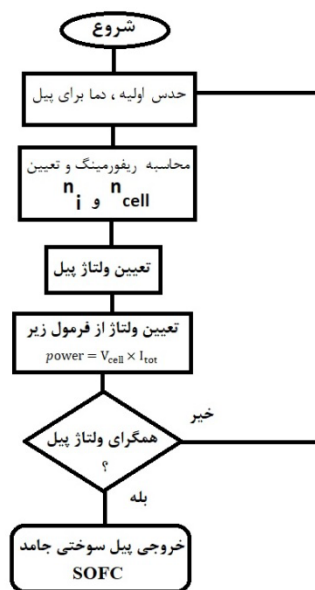
که $n_{CH_4}^e$ نرخ مولی متان خروجی و $n_{CH_4}^i$ نرخ مولی متان ورودی است.

تعداد سلول‌های مورد نیاز (n)، شدت جریان ($I_{tot,ac}$) و توان متناوب تولیدی ($power_{ac}$) با روابط زیر تعریف می‌گردد: راندمان کلی سیستم با تحلیل ترمودینامیکی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{sofc} + \dot{W}_{gt} + \dot{W}_{st} - \dot{W}_{ac} - \dot{W}_{fc} - \dot{W}_{pump} + \dot{Q}_{sys}}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (17)$$

که \dot{m}_{fuel} دبی سوخت، LHV ارزش حرارتی سوخت، \dot{W}_{sofc} توان پیل سوختی جامد، \dot{W}_{ac} توان مصرفی جریان ورودی، \dot{Q}_{sys} آهنگ دفع حرارت از کل سیستم است و \dot{W}_{fc} توان کمپروسور هوا و سوخت با فرض آدیاباتیک به صورت زیر محاسبه شد:

$$\dot{W}_{fc} = \dot{n}_f(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) \quad (18)$$



شکل ۳- الگوریتم و فلوچارت نحوه شبیه‌سازی پیل سوختی جامد

که \dot{n}_f دبی مولی و \bar{h}_i انتالپی به ازای هر مول سوخت و یا هوا است. توان توربین \dot{W}_{gt} در دبی مولی \dot{n}_g به صورت زیر محاسبه شد:

$$\dot{W}_{gt} = \dot{n}_g(\bar{h}_{10} - \bar{h}_{11}) \quad (19)$$

توان توربین بخار در سیکل رانکین \dot{W}_{gt} در دبی مولی \dot{n}_{orc} به صورت زیر محاسبه شد:

$$\dot{W}_{gt} = \dot{n}_{orc}(\bar{h}_{13} - \bar{h}_{14}) \quad (20)$$

توان پمپ سیکل رانکین که وظیفه انتقال آب در کنداسور را به بویلر دارد به صورت زیر است:

$$\dot{W}_{pump} = \dot{n}_{orc}(\bar{h}_{16} - \bar{h}_{15}) \quad (21)$$

پارامترهای ورودی مورد استفاده در این تحقیق برای شبیه‌سازی پیل سوختی و کل سیستم هیبریدی در جدول ۱ نشان داده شده است. داده‌های این جدول از منابع [۲۴]، [۲۵] و [۲۶] استخراج شده است (مشابه پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای ساخت شرکت زیمنس-وستینگهوس)، سایر پارامترها مورد نیاز از روابط و تحلیل ترمودینامیکی محاسبه شده است که برای این کار از نرم افزار EES استفاده شد. همچنین نمودارها با نرم افزار مایکروسافت اکسل ۲۰۰۷ رسم شده است.

جدول ۱- پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه

پارامترهای مورد نیاز ورودی برای شبیه‌سازی سیستم هیبریدی	مقدار
فاکتور استفاده از سوخت	۰/۸۵
فاکتور استفاده از هوا	۰/۱۶۵
فشار عملیات (bar)	۳
چگالی جریان ($A m^{-2}$)	۳۰۰۰
توان مورد نیاز (kW)	۳/۱
سطح سلول (m^2)	۰/۱۰۳۶

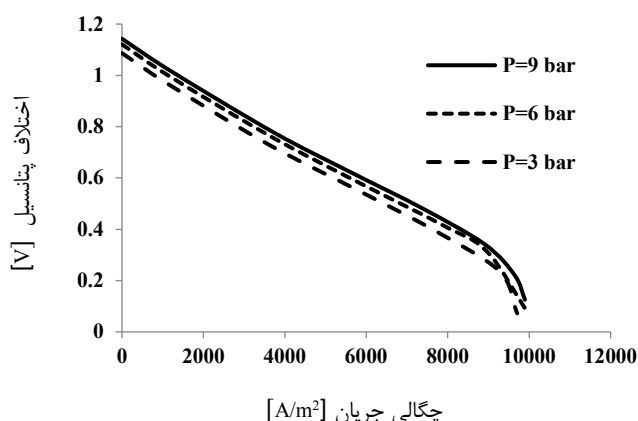
طول هر سلول (m)	۱/۵
قطر هر سلول (m)	۰/۰۲۲
فاکتور تبدیل DC/AC	۰/۸۹
سطح بازباینده حرارتی تولید کننده بخار* (m ²)	۴/۵
راندمان کمپرسور هوا	۸۵٪
راندمان کمپرسور سوخت	۸۵٪
راندمان اتاق احتراق سوخت	۹۸٪
راندمان توربین	۹۰٪
راندمان کنداسور	۸۹٪
راندمان پمپ	۸۵٪
ارزش حرارتی سوخت (kJ kg ⁻¹)	۱۴۸۰۰
راندمان اینوننتور	۸۹٪
راندمان پیش گرمکن	۸۵٪
T ₁₇ (K) دمای منبع آب سرد کننده	۲۹۰
T ₁₈ (K) دمای آب سرد کننده بازگشتی	۳۴۳
T ₁₂ (K) دمای گاز خروجی	۳۵۰
دبی جرمی سوخت (kmol/h)	۰/۱۲۵
دبی جرمی هوا (kmol/h)	۲
نسبت هوا به سوخت	۱۶

*Area of heat recovery steam generator

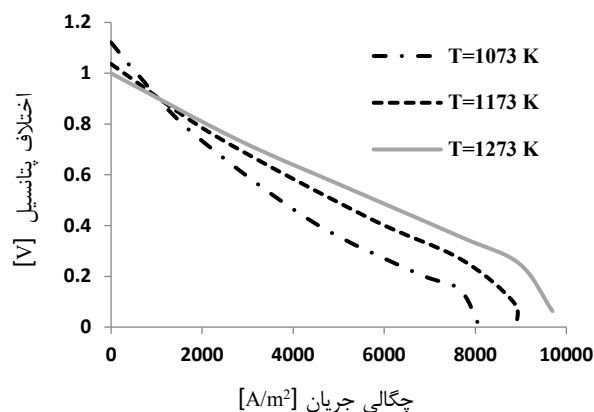
۳- نتایج و بحث

تاثیر دمای عملیاتی پیل سوختی در سیستم هیبریدی را بر روی تغییرات ولتاژ در مقابل چگالی جریان آن در شکل ۴ ارائه شده است. با بررسی تاثیر چگالی جریان بر روی عملکرد پیل سوختی، نتیجه گیری شد که با افزایش چگالی جریان، ولتاژ پیل سوختی کاهش می یابد. این نتیجه به این دلیل است که با افزایش جریان، مقدار مقاومت جریان و در نهایت افت ولتاژ افزایش می یابد، که این موضوع باعث کاهش ولتاژ کلی پیل سوختی می گردد. این در حالیست که با افزایش دما، ولتاژ پیل افزایش می یابد. البته در چگالی جریان های پایین تر عملکرد پیل نسبت به دما بر عکس می شود. زیرا افت ولتاژها ناچیز می گردند. همچنین در جریان های بسیار بالا (بیشتر 8000 A/m^2) افت ولتاژ پیل سوختی بسیار محسوس تر است. پیرکندی و همکاران نتایجی مشابه با این تحقیق گزارش کرده اند.

در شکل ۵، تاثیر چگالی جریان بر ولتاژ پیل را در فشارهای مختلف نشان داده شده است. با مشاهده این شکل نتیجه می شود که همانند اثر دما با افزایش چگالی جریان، ولتاژ پیل سوختی کاهش می یابد. اما با افزایش فشار، ولتاژ پیل افزایش می یابد. با مشاهده این شکل دریافت می شود که رفتار نمودار بصورت غیرخطی است، رفتار مشابه با این پژوهش برای تاثیر دما و فشار روی تغییرات ولتاژ بر حسب چگالی جریان در تحقیق پیرکندی و همکاران گزارش شده است.



شکل ۵- تاثیر چگالی جریان بر ولتاژ پیل سوختی در فشارهای مختلف



شکل ۴- تاثیر چگالی جریان، بر ولتاژ پیل سوختی در دماهای مختلف

با حل الگوریتم شبیه‌سازی پیل سوختی جامد مقادیر ولتاژ تولیدی، توان جریان مستقیم، دمای عملیاتی و بازده تولید جریان مستقیم محاسبه شد و با نتایج بدست آمده در تحقیق اکایا و همکاران مقایسه شده است [۲۵]. با استفاده از تحلیل آماری اختلاف معنی داری بین این دو تحقیق مشاهده نشد (جدول ۲). برای بدست آمدن تکرار برای تحلیل آماری از سه سطح متفاوت دما برای شروع الگوریتم استفاده شد، در واقع مقدار گزارش شده میانگین در سه تکرار است.

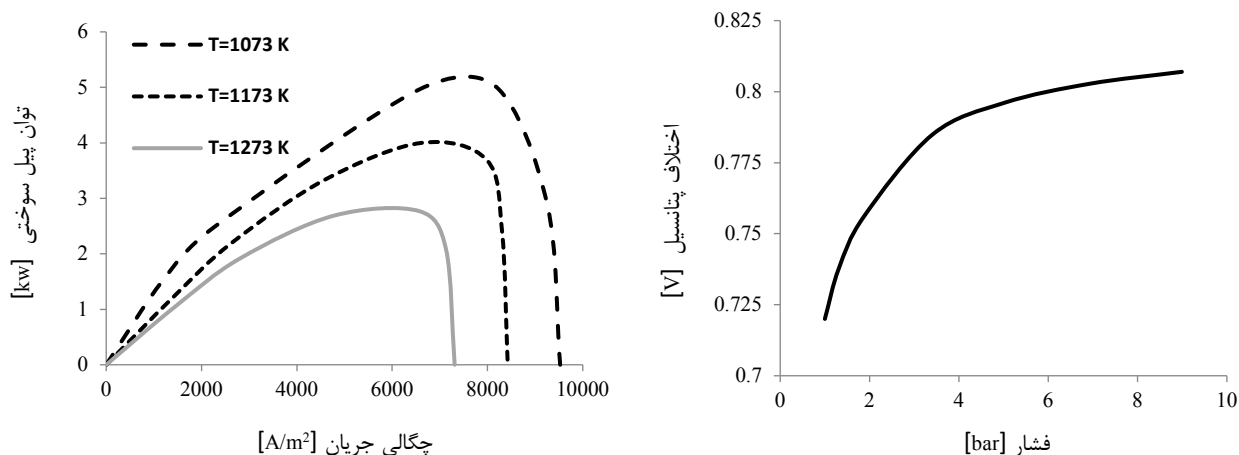
در شکل ۶ ولتاژ خروجی به صورت تابعی از فشار عملیاتی نشان داده شده است، که با افزایش فشار عملیاتی مقدار ولتاژ پیل سوختی افزایش یافت. این افزایش در دامنه فشار ۱-۴ bar شدیدتر از سایر نقاط است و با افزایش مقدار فشار شیب تغییرات ولتاژ پیل سوختی کاهش یافت. در شکل ۷ اثر دما روی توان پیل سوختی به صورت تابعی از چگالی جریان نشان داده شده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مطالعه منبع [۲۵]

Parameters	مطالعه اکایا و همکاران (۲۰۰۹)	مطالعه حاضر	درصد اختلاف
ولتاژ (V)	۰/۶۸۷	۰/۶۹	۱/۷% ^{ns}
توان جریان مستقیم (kw)	۱۱۷/۲	۱۱۸	۰/۷% ^{ns}
دمای عملیاتی پیل سوختی (K)	۱۲۷۳	۱۲۷۰	۰/۲۳% ^{ns}
بازده الکتریکی جریان مستقیم	۵۵/۴	۵۴/۲	۲/۴% ^{ns}

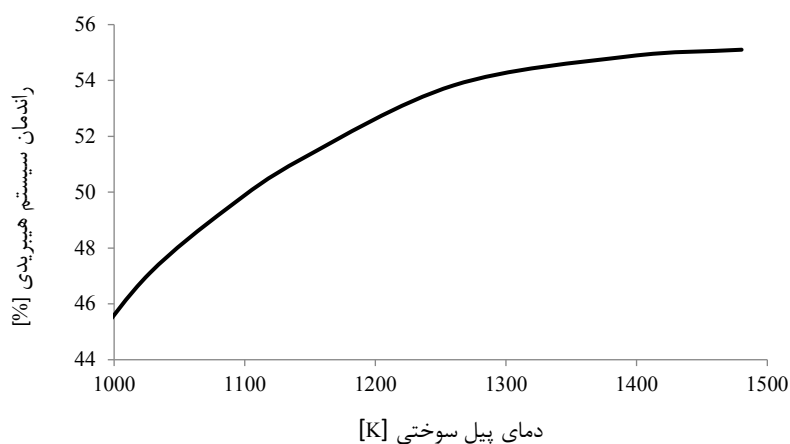
ns: non significant

با افزایش چگالی جریان، توان پیل سوختی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این بدلیل کاهش ولتاژ پیل سوختی در جریان‌های بالا است که موجب کاهش شدید توان می‌گردد. همچنین با توجه به این شکل، با افزایش دما نیز توان پیل سوختی به مراتب افزایش می‌یابد. در بررسی یک پیل سوختی با دقت شود که چگالی جریان در محدوده بحرانی قرار نگیرد که باعث کاهش شدید توان پیل سوختی شود. همچنین مقدار ولتاژ مورد نیاز نیز باید مد نظر قرار گیرد. نتیجه مشابه برای تاثیر دما روی توان پیل سوختی در پژوهش پیرکندی و همکاران گزارش شده است.



شکل ۶- تاثیر فشار عملیاتی پیل سوختی بر روی ولتاژ
شکل ۷- تاثیر چگالی جریان بر روی توان پیل سوختی در دماهای مختلف

تاثیر دمای عملیاتی پیل سوختی، بر روی راندمان کلی سیستم در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای عملیاتی پیل سوختی، راندمان کلی سیستم هیبریدی افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش دمای پیل، توان پیل افزایش می‌یابد. از طرفی گازهای خروجی پیل نیز دارای دمای بالاتری بوده و در نهایت، توان تولیدی در توربین گازی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نرخ تولید بخار در بویلر نیز بالا می‌رود که همه این نتایج، موجب افزایش راندمان کلی سیستم می‌گردند. نتیجه بدست آمده برای اثر دمای عملیاتی روی راندمان سیستم هیبریدی رفتاری مشابه با مطالعه پیرکندی و همکاران نشان می‌دهد.



شکل ۸- تاثیر دمای عملیاتی پیل سوختی بر روی راندمان کلی سیستم

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سیکل هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد که با یک سیکل رنکین تولید قدرت ترکیب شده شبیه-سازی و مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر از این تحقیق منتج شد:

- * با افزایش چگالی جریان، ولتاژ پیل سوختی کاهش و با افزایش دما، ولتاژ پیل افزایش می‌یابد.
- * با افزایش فشار، ولتاژ پیل افزایش و شیب تغییرات ولتاژ پیل سوختی کاهش یافت.

- * با افزایش چگالی جریان، توان پیل سوختی رفتار افزایش و سپس کاهش داشت.
- * با افزایش دمای عملیاتی نیز توان پیل سوختی افزایش یافت.
- * با افزایش دمای عملیاتی پیل سوختی، راندمان کلی سیستم هیبریدی افزایش می‌یابد.

۵- منابع

- [1] Andújar, J.M. and Segura, F., "Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries", *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), pp. 2309-2322, 2009.
- [2] Ghasemi, M., Daud, W.R.W., Hassan, S.H., Oh, S.E., Ismail, M., Rahimnejad, M. and Jahim, J.M., "Nano-structured carbon as electrode material in microbial fuel cells: A comprehensive review", *Journal of Alloys and Compounds*, 580, pp. 245-255, 2013.
- [3] Larminie, J., Dicks, A. and McDonald, M.S., Chichester, UK: J. Wiley, *Fuel cell systems explained*, Vol. 2, pp. 207-225, 2003.
- [4] Ratlamwala, T.A.H., *Thermodynamic Analysis of Integrated Fuel Cell and Solar Energy Systems* (Doctoral dissertation), 2011.
- [۵] رشیدی رنجبر نسرین، پیل سوختی/انرژی سبز، اصفهان، انتشارات مرکز تحقیقات مهندسی، ارکان دانش، ۱۳۸۰.
- [6] EG & G Services, Ralph M., "Parsons Company and Science Applications International Corporation", *Fuel Cell Handbook*. DIANE Publishing, 2000.
- [7] F. C. Handbook, West Virginia, "USA: EG&G Technical Services, US Dep. Energy, Off. Foss. Energy, Natl", *Energy Technol. Lab. Morgantown*, 2000.
- [8] Stiller, C., Thorud, B., Bolland, O., Kandepu, R. and Imsland, L., "Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system", *Journal of power sources*, 158(1), pp. 303-315, 2006.
- [9] Cho, H., Smith, A.D. and Mago, P., "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization", *Applied Energy*, 136, pp. 168-185, 2014.
- [10] Chan, S.H., Ho, H.K. and Tian, Y., "Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal of power sources*, 109(1), pp. 111-120, 2002.
- [11] Calise, F., d'Accadia, M.D., Palombo, A. and Vanoli, L., "Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine system", *Energy*, 31(15), pp. 3278-3299, 2006.
- [12] Bang-Møller, C. and Rokni, M., "Thermodynamic performance study of biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid systems", *Energy Conversion and Management*, 51(11), pp. 2330-2339, 2010.
- [۱۳] پیرکندی جاماسب، قاسمی مجید، حامدی محمد حسین، "تحلیل عملکرد ترمودینامیکی یک چرخه هیبری پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز در یک سیستم تولید همزمان"، *سوخت و احتراق*، ۴ (۲)، صص ۶۷-۸۹، ۱۳۹۰.
- [14] Wongchanapai, S., Iwai, H., Saito, M. and Yoshida, H., "Performance evaluation of a direct-biogas solid oxide fuel cell-micro gas turbine (SOFC-MGT) hybrid combined heat and power (CHP) system", *Journal of Power Sources*, 223, pp. 9-17, 2013.
- [15] Saebea, D., Magistri, L., Massardo, A. and Arpornwichanop, A., "Cycle analysis of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid systems integrated ethanol steam reformer: Energy management", *Energy*, 127, pp. 743-755, 2017.
- [16] Ramírez-Minguela, J.J., Rangel-Hernández, V.H., Alfaro-Ayala, J.A., "Uribe-Ramírez, A.R., Mendoza-Miranda, J.M., Belman-Flores, J.M. and Ruiz-Camacho, B., Energy and entropy study of a SOFC using biogas from different sources considering internal reforming of methane", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, pp. 1044-1054, 2018.

- [17] Ehyaei, M.A. and Rosen, M.A. "Optimization of a triple cycle based on a solid oxide fuel cell and gas and steam cycles with a multiobjective genetic algorithm and energy, exergy and economic analyses", *Energy Conversion and Management*, vol. 180, no. 15, pp. 689-708, 2019.
- [18] Habibollahzade, A., Gholamian, E. and Behzadi, A., "Multi-objective optimization and comparative performance analysis of hybrid biomass-based solid oxide fuel cell/solid oxide electrolyzer cell/gas turbine using different gasification agents", *Applied Energy*, 233, pp. 985-1002, 2019.
- [۱۹] خجسته عفت پناه سعید، "تولید و به کارگیری هیدروژن سبز در یک سیستم انرژی تولید چندگانه مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز با رویکرد افزایش تولید توان و کاهش نشر CO₂"، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، ۱۴۰۰.
- [20] Rowshanzamir, S. and Eikani, M.H., "Autothermal reforming of methane to synthesis gas: Modeling and simulation", *International journal of hydrogen energy*, 34(3), pp. 1292-1300, 2009.
- [21] Zink, F., Lu, Y. and Schaefer, L., "A solid oxide fuel cell system for buildings", *Energy Conversion and Management*, 48(3), pp. 809-818, 2007.
- [22] Chan, S.H., Low, C.F. and Ding, O.L., "Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems", *Journal of power sources*, 103(2), pp.188-200, 2002.
- [23] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., "Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), pp. 2059-2067, 2009.
- [24] Desai, N. B., & Bandyopadhyay, S., "Process integration of organic Rankine cycle", *Energy*, 34(10), pp. 1674-1686, 2009.
- [25] Akkaya, A.V., Sahin, B. and Erdem, H.H., "Thermodynamic model for exergetic performance of a tubular SOFC module", *Renewable energy*, 34(7), pp. 1863-1870, 2009.
- [26] J. A. Ciesar, "Hybrid Systems Development by the Siemens Westinghouse Power Corporation," Presented by Siemens Westinghouse Power Corporation, *Natural Gas/Renewable Energy Hybrids Workshop*, August 2001.