مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 300-308

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی عملکرد الکتروشیمیایی پیل‌سوختی اکسید جامد در سیستم‌های ترکیبی میکروتوربین‌گاز جهت تعیین فاکتور مصرف سوخت بهینه

**سیده زینب سجادی[1]، جاماسب پیرکندی[2*]، مهدی جهرمی[2]**

1- کارشناس ارشد، هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 3159916111، jpirkandi@mut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 02 شهریور 1395
پذیرش: 16 آبان 1395
ارائه در سایت: 28 آذر 1395

*کلید واژگان:*
سیستم ترکیبی
پیل‌سوختی اکسید جامد
میکروتوربین‌گاز
فاکتور مصرف سوخت بهینه
عملکرد سیستم

**چکیده**

در تحقیق حاضر سه پیکربندی مختلف برای سیستم ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و میکروتوربین‌گاز طراحی و مورد بررسی قرار گرفته است. اولین پیکربندی ارائه شده شامل یک پیل سوختی بوده و به عنوان حالت پایه فرض شده است. دو پیکربندی دیگر با دو پیل‌سوختی که به صورت‌های سری و موازی در بالادست توربین قرار گرفته‌اند، لحاظ شده است. هدف از انجام این تحقیق، تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های طراحی شده و دست‌یابی به فاکتور مصرف سوخت بهینه برای پیل‌های سوختی بکار رفته در سیستم‌های ترکیبی می‌باشد. دمای گازهای ورود به توربین، نسبت فشار کمپرسور و تعداد سلول‌های پیل‌سوختی پارامترهای مهمی می‌باشند که در تطبیق پیل‌سوختی و توربین‌گاز نقش مهمی داشته و در این تحقیق به صورت پارامتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این راستا، پارامترهای مربوط به فرایندهای الکتروشیمیایی درون پیل به صورت توابعی از حالات شیمیایی و ترمودینامیکی آن‌ها در نظر گرفته شده و کد مدل‌سازی آن‌ها با کد مدل‌سازی سیکل میکروتوربین‌گازی ترکیب شده است. نتایج نشان می‌دهد که فاکتور مصرف سوخت بهینه تأثیر مستقیمی بر عملکرد سیستم ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و میکروتوربین‌گاز دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این ضریب برای سیستم ترکیبی حالت پایه 0.85، در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری به ترتیب برای پیل اول 0.7 و برای پیل دوم 0.8 و در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی موازی 0.85 (برای هر دو پیل‌سوختی) حاصل می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در بین سه حالت تحلیل شده، سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری بیشترین بازده (بیش از 48 درصد) را به خود اختصاص داده و به عنوان پیکربندی کارآمدتر برگزیده می‌گردد.

# Electrochemical performance investigation of solid oxide fuel cell in micro-gas turbine hybrid systems to determine optimum fuel utilization factor

**Seyedeh Zeinab Sajadi., Jamasb Pirkandi*, Mehdi Jahromi**

Department of Aerospace Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 3159916111 Tehran, Iran, j_pirkandi@dena.kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 August 2016
Accepted 06 November 2016
Available Online 18 December 2016

*Keywords:*
Hybrid System
Solid Oxide Fuel Cell
Micro-gas Turbine
Fuel Utilization Factor
System Performance

ABSTRACT

The present study was undertaken to design and analyze three different configurations of SOFC (solid oxide fuel cell) and MGT (micro-gas turbine) hybrid system. The first presented configuration is a hybrid system with one fuel cell which is considered as a basic mode. Two other configurations are considered with two fuel cells that are mounted upstream of the turbine in series and parallel forms. The aim of the current study was thermodynamic analysis of designed hybrid systems and achieving the optimum fuel consumption factor for fuel cells that are used in hybrid systems. Therefore, other performance parameters such as turbine inlet temperature, compressor pressure ratio and the number of cells, which play an important role in implementation of SOFC and gas-turbine, were parametrically analyzed and the obtained optimum values were used in analyses. In this regard, the parameters associated with electrochemical processes within cells are considered as a function of their chemical and thermodynamic conditions, and their modeling code combined with the modeling code of micro gas turbine cycle. The results of this study revealed that fuel utilization factor has direct impact on the SOFC/MGT hybrid system performance. Also we demonstrate that the optimal fuel utilization factor for basic mode hybrid system was 0.85, hybrid system with 2 series fuel cells were obtained 0.7 and 0.8 respectively and hybrid system with two parallel fuel cells were calculated to be 0.85(for both fuel cells). Moreover, the SOFC/MGT hybrid system with two series fuel cells account for the highest electrical efficiency (more than 48%) and was selected as the most efficient configuration.

## 1- مقدمه

یکی از اهداف اصلی این پژوهش در زمینه انرژی ایجاد فن‌آوری‌های جدید برای تبدیل انرژی، دست‌یابی به بازده‌های بالاتر و کاهش اثر مخرب بر محیط زیست است. از طرف دیگر فرایند تبدیل انرژی نباید برای محیط زیست مضر و خطرناک باشد. این فرایند باید به گونه‌ای انجام شود که تأثیرات نامطلوبی مانند گرم شدن کره زمین (اثرات گازهای گلخانه‌ای) و افزایش انتشار

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

S. Z. Sajadi., J. Pirkandi, M. Jahromi, Electrochemical performance investigation of solid oxide fuel cell in micro-gas turbine hybrid systems to determine optimum fuel utilization factor, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 300-310 2016 (in Persian)

آلاینده‌ها به حداقل مقدار خود برسد [1]. کاهش سوخت‌های فسیلی و آگاهی نسبت به مسائل زیست محیطی، نیاز به توسعه فناوری تولید توان سازگار با محیط زیست و کارآمد را برای جایگزینی با سیستم‌های تولید توان بر پایه احتراق ترغیب می‌کند [2]. پیل‌های سوختی به دلیل بازدهی بالا در تبدیل انرژی شیمیایی سوخت‌های فسیلی به انرژی الکتریکی و قابلیت اطمینان بالا یکی از اولویت‌های تولید توان در آینده هستند. از طرف دیگر قابلیت پیل‌های سوختی در ترکیب با دیگر سیکل‌های توان مثل سیکل توربین‌گاز، سبب شده است که سیستم ترکیبی حاصل به عنوان پیشنهادی برای سیستم‌های تولید توان آینده مدنظر باشد [3-6]. در سال‌های اخیر سیستم‌های ترکیبی توربین‌گاز و پیل‌سوختی اکسید جامد به عنوان یک گزینه مناسب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران کشورهای مختلف قرار گرفته است. استفاده از این نوع سیستم‌های ترکیبی یکی از روش‌های افزایش راندمان و کاهش آلایندگی می‌باشد.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی سیستم‌های ترکیبی توربین‌گاز و پیل‌سوختی انجام شده اما در بیشتر تحقیقات سیستم‌های هیبریدی ساده مد نظر بوده و سیستم‌های هیبریدی متشکل از دو پیل‌سوختی کمتر مورد توجه بوده است. از معدود تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. اراکی و همکاران [7] یک سیستم تولید توان شامل دو توده پیل‌سوختی اکسید جامد دما بالا و دما پایین را مورد بررسی قرار دادند. در این تحلیل مقایسه‌ای میان بازده سیکل‌های پیل‌سوختی دما بالا، پیل‌سوختی دما پایین و اتصال سری این دو پیل انجام شد. نتایج آن‌ها بیانگر افزایش بازده پیل‌های سوختی در حالت سری و همچنین افزایش بازده سیستم ترکیبی شامل پیل‌های سری و توربین‌گاز است. موسی و همکاران [8] در تحقیقی عملکرد چهار نوع سیستم ترکیبی با پیکربندی‌های متفاوت را که شامل توربین‌گاز، بازیاب و پیل‌سوختی اکسید جامد دما بالا و دما میانی بود؛ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که بازده سیکل پیل‌سوختی اکسید جامد با دو توده دما میانی بیش‌تر از سیکل با دو توده دما میانی و دما بالا و نیز حالت یک توده‌ای است. برایان تاروجا و همکاران [9] یک سیستم ترکیبی توربین‌گاز و پیل‌سوختی اکسید جامد را مورد مطالعه قرار دادند و روش‌های مختلف پیش‌گرم کردن هوای ورودی به کاتد را بررسی نموده و با سیستم تک مبدله مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحلیل‌ها حاکی از این بود که سیستم دارای یک مبدل حرارتی عملکرد بهتری داشته و ویژگی‌هایی مانند نسبت فشار میانگین (4 الی 5)، مصرف اکسیژن کم و مصرف سوخت بالا دارد. چدی [10] یک واحد پیل‌سوختی اکسید جامد را برای ترکیب با یک توربین‌گاز ده مگاواتی پیشنهاد داد. در این بررسی یک مدل ترمو-اقتصادی تعریف شده و برای بهینه‌سازی توان تولیدی سیستم ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. در مدل ارائه شده چهار مبدل به منظور بازیافت گرما از خروجی توربین و پیل‌سوختی بکار گرفته شد. در این مطالعه بازده سیستم ترکیبی شامل مبدل‌ها 66.2 درصد و توان خروجی آن نزدیک به 4 برابر سیستم ترکیبی اولیه به‌دست آمد. همچنین بر اساس مدل ارائه شده دوره بازگشت سرمایه در این تحقیق کم‌تر از 4 سال پیش‌بینی شد. فاکینتی و همکاران [11] طراحی و بهینه‌سازی یک سیکل ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین‌گاز با پیکربندی جدید را مورد بررسی قرار دادند. سیکل ترکیبی ارائه شده شامل یک واحد پیل‌سوختی اکسید جامد صفحه‌ای 5 کیلوواتی و یک واحد میکروتوربین‌گاز متشکل از دو توربین و یک کمپرسور شعاعی بود که عملکرد ترمودینامیکی آن مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم ترکیبی جدید قادر است در دمای ورود به توربین 1573 کلوین به بازده قانون اول بالاتر از 64 درصد و بازده اگزرژی نزدیک به 66 درصد دست یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود طی سال‌های گذشته تحقیقات زیادی به منظور بررسی جنبه‌های مختلف این فن‌آوری منتشر شده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه بیش‌تر بر روی سیکل‌هایی با ساختار ساده و چیدمان مشابه انجام شده است و پیکربندی‌های مختلف این سیستم ترکیبی که از قرار گرفتن چند پیل‌سوختی در محل‌های گوناگون از سیکل ایجاد می‌شوند؛ کمتر مورد توجه بوده است. از طرف دیگر ضریب مصرف سوخت به عنوان یک پارامتر مهم در اینگونه سیستم‌های ترکیبی، در بیشتر تحقیقات ثابت فرض شده است. هدف اصلی این تحقیق دست‌یابی به یک ضریب مصرف سوخت بهینه برای پیل‌های سوختی، در چند پیکربندی مختلف از این نوع سیستم‌های ترکیبی می‌باشد.

## 2- معرفی سیستم‌های ترکیبی

در این بخش به معرفی پیکربندی‌های پیشنهادی در کار حاضر پرداخته شده است. از میان پیکربندی‌های معرفی شده سیکل ترکیبی با یک پیل‌سوختی به عنوان سیکل حالت پایه در نظر گرفته شده و ساختار سایر سیکل‌ها مشابه چیدمان این سیکل و تنها با افزایش تعداد پیل‌سوختی و تغییر در محل قرارگیری آن‌ها طراحی شده است.

### 2-1- معرفی پیکربندی سیستم ترکیبی SOFC/MGT با یک پیل-سوختی (حالت پایه)

شماتیک سیستم پیشنهادی اولیه که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته در شکل 1 نشان داده شده است. این سیستم شامل میکروتوربین، کمپرسور هوا، پس‌سوز، پیل‌سوختی اکسد جامد، بازیاب حرارتی هوا و بازیاب حرارتی سوخت می‌باشد. هوای بکار رفته در سیستم ابتدا به وسیله کمپرسور هوا متراکم شده و در ادامه مسیر با عبور از بازیاب هوا و گرم شدن وارد بخش کاتد پیل‌سوختی می‌شود. از سوی دیگر سوخت هیدروژن نیز با عبور از بازیاب سوخت پیش‌گرم شده و وارد بخش آند پیل‌سوختی می‌گردد. پس از انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل‌سوختی، هوا و سوخت باقی‌مانده وارد پس‌سوز می‌گردند. پس از انجام واکنش در پس‌سوز، محصولات خروجی از آن در ادامه وارد توربین شده و در اثر انبساط کار مکانیکی تولید می‌کنند. گازهای داغ پس از خروج از توربین در ادامه مسیر خود وارد دو بازیاب حرارتی معرفی شده می‌گردند.

### 2-2- معرفی پیکربندی سیستم ترکیبی SOFC/MGT با دو پیل سری

این پیکربندی با قرار دادن دو پیل‌سوختی متوالی در چیدمان سیکل حالت پایه طراحی شده است. تمامی اجزای بکار رفته در سیکل و مشخصات آن‌ها مشابه حالت پایه در نظر گرفته شده است و تنها تفاوت آن در تعداد سلول-های پیل‌های سوختی می‌باشد. بدین صورت که مجموع تعداد سلول‌های دو پیل‌سوختی حالت سری با تعداد سلول‌های پیل‌سوختی حالت پایه برابر می-باشد. با توجه به نقش مؤثر تعداد سلول‌های پیل‌سوختی در راندمان کلی سیستم، این مقایسه امکان انتخاب سیستم ترکیبی مناسب را فراهم می‌کند. شماتیکی از سیستم ترکیبی معرفی شده در شکل 2 نشان داده شده است.

### 2-3- معرفی پیکربندی سیستم ترکیبی SOFC/MGT با دو پیل موازی

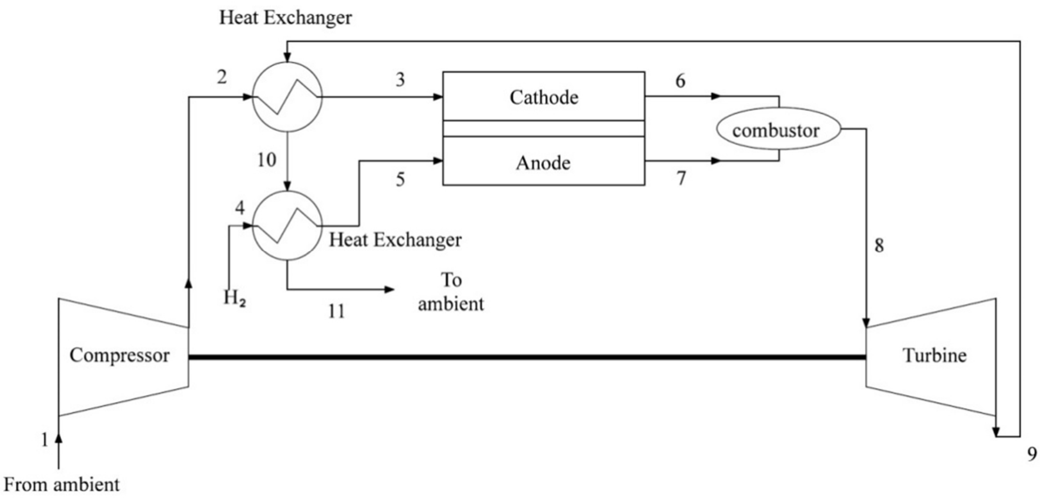


**Fig. 1** Schematic of SOFC/MGT hybrid system

**شکل 1** شماتیک سیستم ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و میکروتوربین‌گاز

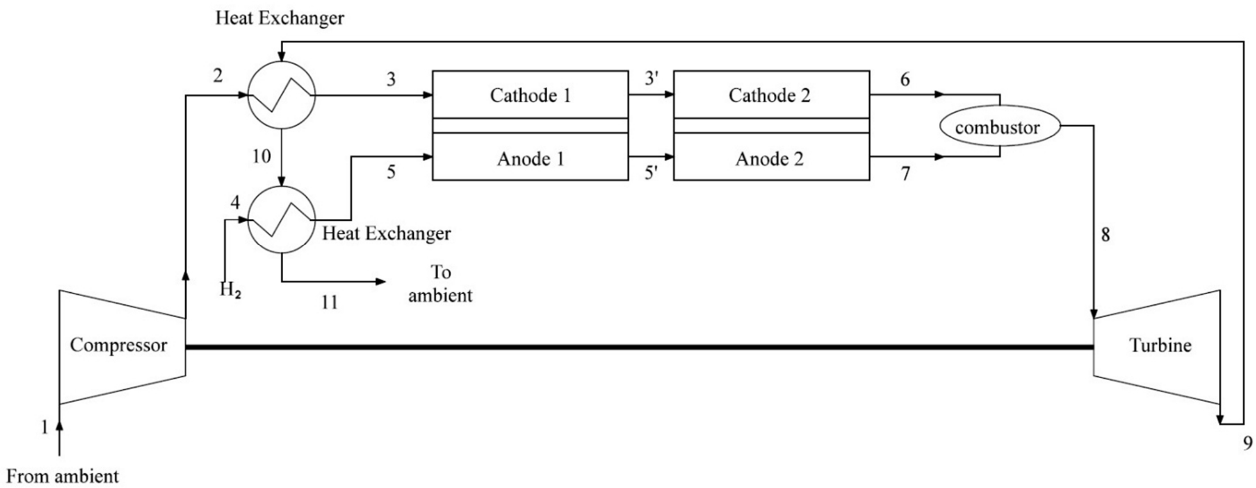


**Fig. 2** Schematic of SOFC/MGT hybrid system with two series fuel cells

**شکل 2** شماتیک سیستم هیبریدی با دو پیل‌سوختی سری

پیکربندی این سیستم در مقایسه با حالت پایه دارای دو پیل‌سوختی و دو پس‌سوز مجزا می‌باشد که به صورت موازی با هم قرار دارند. جریان خروجی از بازیاب هوا توسط تقسیم‌کننده به دو جریان مساوی تبدیل شده و وارد بخش کاتد پیل‌های سوختی می‌شود. جریان خروجی از بازیاب سوخت نیز به طور مشابه تقسیم و وارد آند پیل‌های سوختی می‌شود. پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل‌های سوختی، هوا و سوخت باقی‌مانده به صورت مجزا وارد محفظه‌های احتراق شده و پس از احتراق جریان‌های خروجی با یکدیگر مخلوط و وارد توربین‌گاز می‌شوند. شماتیک سیستم ترکیبی اشاره شده در شکل 3 نشان داده است. همچنین پارامترهای ثابت استفاده شده برای سیستم‌های ترکیبی پیشنهادی درجدول 1 ارائه شده است که در آن $n_1$ و $n_2$ به ترتیب تعداد سلول پیل‌های سوختی اول و دوم می‌باشند.

## 3- فرضیات

در این قسمت فرضیات حاکم بر تحلیل سیستم‌های پیشنهادی آورده شده است. این فرضیات عبارتند از:

- کلیه اجزاء سیکل ترکیبی آدیاباتیک فرض شده‌اند.
- جریان سیال در کلیه اجزاء سیکل پایا در نظر گرفته شده است.
- از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرف نظر شده است.
- هوای ورودی از 79 درصد نیتروژن و 21 درصد اکسیژن تشکیل شده است.
- شرایط محیطی (دما و فشار) با شرایط ورود به کمپرسور یکسان فرض شده است.
- از تغییرات انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است.
- سوخت مصرفی هیدروژن فرض شده است.
- رفتار تمام گازها ایده‌آل فرض شده است.
- فشار و دمای گازهای خروجی از آند و کاتد یکسان و برابر فشار و دمای کاری پیل فرض شده است.
- ولتاژ در سلول‌های پیل‌سوختی ثابت فرض شده است.
- فرایند تمامی سلول‌ها در توده پیل‌سوختی مشابه فرض شده است.

## 4- معادلات حاکم

### 4-1- معادلات پیل‌سوختی

معادلات پیل‌سوختی در سه بخش که شامل روابط الکتروشیمیایی، حرارتی و

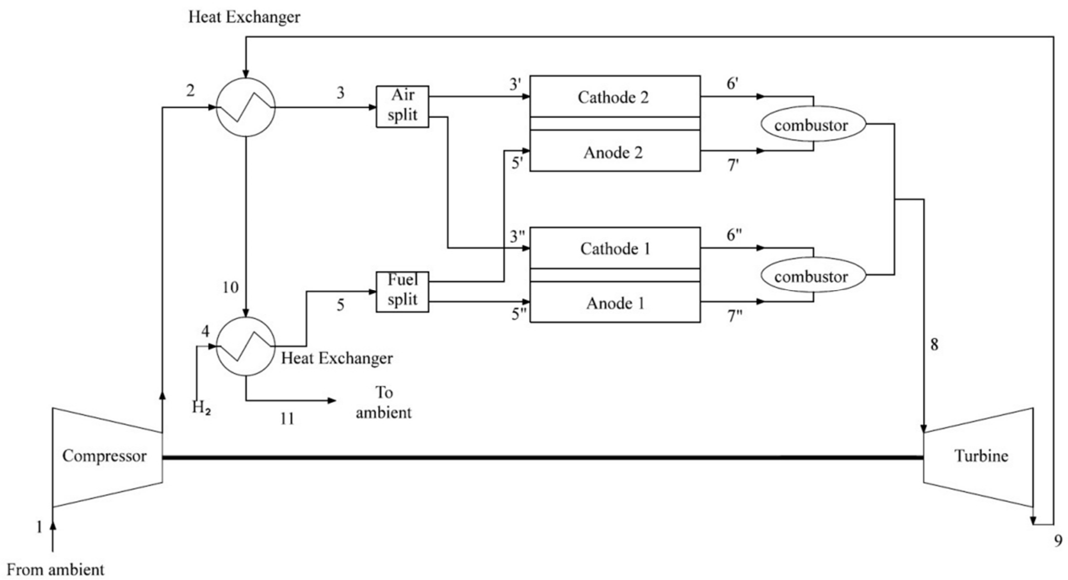


**Fig. 3** Schematic of SOFC/MGT hybrid system with two parallel fuel cells

**شکل 3** شماتیک سیستم هیبریدی با دو پیل‌سوختی موازی

**جدول 1** پارامترهای اصلی به‌کار رفته در سیستم‌های ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز

**Table 1** Main operating parameters of SOFC-MGT systems

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
| --- | --- | --- | --- |
| دمای محیط | 298 K | مساحت هر سلول $(m^2)$ | 0.10362 |
| فشار محیط | 1 bar | | |
| بازده کمپرسور | 81 % | طول هر سلول (m) | 1.5 |
| بازده توربین | 84 % | قطر هر سلول (m) | 0.022 |
| بازده پس‌سوز | 95 % | تعداد سلول در سیستم ترکیبی اول | $n$ = 5136 |
| بازده رکوپراتور | 80 % | | $n_1$ = 1712<br>$n_2$ = 3424 |
| بازده معکوس کننده | 89 % | تعداد سلول در سیستم ترکیبی دوم | $n_1$ = 2568<br>$n_2$ = 2568 |
| افت فشار پیل‌سوختی | 4 % | | $n_1$ = 3424<br>$n_2$ = 1712 |
| افت فشار پس‌سوز | 5 % | تعداد سلول در سیستم ترکیبی سوم | $n_1$ = 1712<br>$n_2$ = 3424 |
| افت فشار رکوپراتور | 4 % | | $n_1$ = 2568<br>$n_2$ = 2568 |

ترمودینامیکی می‌باشد، ارائه شده است.

### 4-1-1- محاسبات الکتروشیمیایی

ولتاژ برگشت‌پذیر پیل‌سوختی توسط معادله نرنست و به شکل رابطه (1) بیان می‌شود [12]:

$$E = E^{\circ} + \frac{R_u T}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2o}}\right) \quad (1)$$

برای محاسبه ولتاژ واقعی پیل، باید افت‌های مربوط به پیل (اضافه ولتاژ پیل) شامل افت ولتاژ ناحیه فعال‌سازی ($V_{act}$)، افت ولتاژ ناحیه اهمیک ($V_{ohm}$) و افت ولتاژ ناحیه غلظت ($V_{conc}$) را محاسبه کرده و در نهایت از رابطه (2) مقدار ولتاژ واقعی ($V_{cell}$) آن را به‌دست آورد [13]:

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) = E - \Delta V_{loss} \quad (2)$$

مقدار افت مربوط به فعال‌سازی شامل افت‌های راه‌اندازی پیل و همچنین غلبه بر واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد. مقدار این افت برابر مجموع اضافه ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد در پیل‌سوختی بوده و بر اساس رابطه باتلر ولمر و طبق روابط (3) و (4) به‌دست خواهد آمد:

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (3)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{\circ}}\right) \quad (4)$$

در رابطه فوق $i$ و $i_{\circ}$ به ترتیب چگالی جریان و چگالی جریان تبادلی می‌باشد. محاسبه مقدار چگالی جریان تبادلی به صورت دقیق بسیار پیچیده می‌باشد. به همین منظور از دو رابطه نیمه تجربی (5) و (6) برای محاسبه چگالی جریان پیل‌سوختی اکسید جامد استفاده می‌شود [14]:

$$i_{\circ,an} = \gamma_{an}\left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}}\right)\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}}\right)\exp\left(-\frac{E_{act,an}}{R_u T}\right) \quad (5)$$

$$i_{\circ,ca} = \gamma_{ca}\left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25}\exp\left(-\frac{E_{act,ca}}{R_u T}\right) \quad (6)$$

در روابط بالا $\gamma$ به جنس الکترودها بستگی دارد و $E$ مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد که مقادیر مربوط به این پارامترها برای پیل‌سوختی اکسید جامد استفاده شده در جدول 2 ارائه شده است.

مقاومت‌های اهمی شامل مقاومت در الکترولیت، الکترودها و اتصالات داخلی پیل‌سوختی است. این مقاومت‌ها از قانون اهم پیروی می‌کنند. بر این اساس افت ولتاژ اهمی برای این چهار جزء با استفاده از روابط (7) تا (10) به دست می‌آید [13]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (7)$$

**جدول 2** پارامترهای ورودی افت ولتاژ فعال‌سازی [13]

**Table 2** Activation polarization input parameters [13]

| پارامتر | مقادیر |
| --- | --- |
| $E_{act,an}$(kJ/kmol) | 110000 |
| $E_{act,ca}$(kJ/kmol) | 155000 |
| $\gamma_{an}(A/m^2)$ | $10^9$x7 |
| $\gamma_{ca}(A/m^2)$ | $10^9$x7 |

$$V_{\mathrm{ohm}} = ir \quad (8)$$

$$r = \delta\rho \quad (9)$$

$$\rho = A\exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (10)$$

پارامترهای $A$، $B$ و $\delta$ مقادیر ثابتی بوده که بسته به نوع و هندسه پیل به‌دست می‌آیند [15]. مقادیر این پارامترها در پس از محاسبه ولتاژهای پیل‌سوختی و به‌دست آوردن مقدار جریان هر سلول توان کلی پیل از روابط (17) تا (20) به‌دست می‌آید [16]:

$$I_{\mathrm{cell}} = iA_{\mathrm{cell}} \quad (17)$$

$$I_{\mathrm{tot}} = 2FZ \quad (18)$$

$$\dot{W}_{\mathrm{DC,SOFC}} = V_{\mathrm{cell}}I_{\mathrm{tot}} \quad (19)$$

$$\dot{W}_{\mathrm{AC,SOFC}} = \dot{W}_{\mathrm{DC,SOFC}} \times \eta_{\mathrm{inv,SOFC}} \quad (20)$$

#### 4-1-2- محاسبات حرارتی و ترمودینامیکی

فرایند واکنش‌های شیمیایی شکل گرفته در داخل پیل‌سوختی یک فرایند گرماده می‌باشد. با نوشتن معادله ترمودینامیکی بین واکنش‌گرها و فرآورده‌ها میزان انتقال حرارت در فرایند به‌دست می‌آید. گرمای حاصل از واکنش شیمیایی انجام شده در پیل‌سوختی طبق رابطه (21) محاسبه می‌شود [12]:

$$\dot{Q}_{\mathrm{elec}} = zT\Delta S - I\Delta V_{\mathrm{loss}} \quad (21)$$

گرمای خالص باقیمانده از واکنش انجام شده در پیل‌سوختی طبق رابطه (22) حاصل می‌شود:

$$\dot{Q}_{\mathrm{net}} = \dot{Q}_{\mathrm{elec}} \quad (22)$$

مقداری از این گرمای خالص باقی‌مانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده ($\dot{Q}'$) و بخش دیگری نیز به محیط ($\dot{Q}_{\mathrm{surr}}$) وارد می‌شود.

$$\dot{Q}_{\mathrm{net}} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{\mathrm{surr}} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{net}} = (\dot{n}_{\mathrm{in}}h_{\mathrm{in}} - \dot{n}_{\mathrm{out}}h_{\mathrm{out}})_{\mathrm{an}} + (\dot{n}_{\mathrm{in}}h_{\mathrm{in}} - \dot{n}_{\mathrm{out}}h_{\mathrm{out}})_{\mathrm{ca}} + \dot{Q}_{\mathrm{surr}} \quad (24)$$

در حالت واقعی فرایندهای انجام شده در پیل‌سوختی همواری مقداری تلفات حرارتی به محیط دارند. با در نظر گرفتن این مسأله به صورت ایده‌آل فرض می‌شود که پیل‌سوختی آدیاباتیک داخلی بوده و گرمای خالص باقیمانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی از پیل خواهد شد ($\dot{Q}''$).

$$\dot{Q}'' = \Delta h_{\mathrm{c,in}} + \Delta h_{\mathrm{c,out}} + \Delta h_{\mathrm{a,in}} + \Delta h_{\mathrm{a,out}} \quad (25)$$

برای محاسبه دمای گازهای خروجی از پیل‌سوختی از یک الگوریتم تکرار استفاده شده و معیار همگرایی نیز به صورت رابطه (26) در نظر گرفته شده است [17].

$$Q_{\mathrm{error}} = \left|\frac{\dot{Q}'' - \dot{Q}'}{\dot{Q}'}\right| < 0.01 \quad (26)$$

پس از محاسبه دمای خروجی، می‌توان با استفاده از رابطه انرژی نرخ تلفات حرارتی در پیل‌سوختی را محاسبه کرد.

$$(\dot{n}_3\bar{h}_3 + \dot{n}_5\bar{h}_5) = \dot{Q}_{\mathrm{loss,SOFC}} + \dot{W}_{\mathrm{SOFC}} + (\dot{n}_6\bar{h}_6 + \dot{n}_7\bar{h}_7) \quad (27)$$

با داشتن ضریب مصرف سوخت ($U_{\mathrm{f}}$)، توان تولیدی پیل‌سوختی ($\dot{W}_{\mathrm{AC,SOFC}}$) و گرمای خالص باقیمانده از واکنش پیل‌سوختی ($\dot{Q}_{\mathrm{surr}}$) بازده الکتریکی و حرارتی پیل‌سوختی طبق روابط (28) و (29) به‌دست می‌آیند:

$$\eta_{\mathrm{elec,SOFC}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{AC,SOFC}}}{\dot{n}_{\mathrm{f}} \times LHV \times U_{\mathrm{f}}} \quad (28)$$

$$\eta_{\mathrm{th,SOFC}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{surr,SOFC}}}{\dot{n}_{\mathrm{f}} \times LHV \times U_{\mathrm{f}}} \quad (29)$$

### 4-2- کمپرسور

با توجه به وابسته بودن راندمان آیزنتروپیک به نسبت فشار و در نظر گرفتن نسبت فشار متغیر در این مدل‌سازی، به‌جای راندمان آیزنتروپیک از راندمان پلی‌تروپیک ($\eta_{\mathrm{ac}}$) استفاده شده (رابطه (30)) و دمای هوای خروجی طبق رابطه (31) به‌دست می‌آید.

$$\eta_{\mathrm{is,ac}} = \frac{(r_{p,\mathrm{ac}})^{\frac{k_{\mathrm{a}}-1}{k_{\mathrm{a}}}}}{(r_{p,\mathrm{ac}})^{\frac{k_{\mathrm{a}}-1}{k_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{p,ac}}}}} \quad (30)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (r_{p,\mathrm{ac}})^{\frac{k_{\mathrm{a}}-1}{k_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{p,ac}}}} \quad (31)$$

با استفاده از دمای هوای خروجی محاسبه شده و مشخص بودن دما و دبی جرمی هوای ورودی کار مصرفی کمپرسور طبق رابطه (32) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{\mathrm{ac}} = \dot{n}_{\mathrm{a}}(\bar{h}_2 - \bar{h}_1) \quad (32)$$

### 4-3- پس‌سوز

قانون اول ترمودینامیک برای پس‌سوز طبق رابطه (33) نوشته شده و دمای گازهای خروجی از آن به‌دست می‌آید:

$$\dot{n}_6\bar{h}_6 + \dot{n}_7\bar{h}_7 - \dot{n}_8\bar{h}_8 - \dot{Q}_{\mathrm{loss,cc}} = 0 \quad (33)$$

در رابطه‌ی فوق $\dot{Q}_{\mathrm{loss,cc}}$ تلفات حرارتی پس‌سوز می‌باشد که با داشتن راندمان پس‌سوز ($\eta_{\mathrm{cc}}$) و ضریب مصرف سوخت با استفاده از رابطه (34) به‌دست می‌آید [18].

$$\dot{Q}_{\mathrm{loss,cc}} = \dot{n}_{\mathrm{f}} \times (1 - \eta_{\mathrm{cc}}) \times (1 - U_{\mathrm{f}}) \times LHV \quad (34)$$

### 4-4- توربین‌گاز

راندمان پلی‌تروپیک توربین، دمای گازهای خروجی توربین و توان تولیدی در توربین طبق روابط (35) تا (37) محاسبه می‌شود [18].

$$\eta_{\mathrm{is,gt}} = \frac{1 - \left(\frac{1}{r_{p,\mathrm{gt}}}\right)^{\frac{\eta_{\mathrm{p,gt}}(k_{\mathrm{g}}-1)}{k_{\mathrm{g}}}}}{1 - \left(\frac{1}{r_{p,\mathrm{gt}}}\right)^{\frac{k_{\mathrm{g}}-1}{k_{\mathrm{g}}}}} \quad (35)$$

$$\frac{T_8}{T_9} = (r_{p,\mathrm{gt}})^{\frac{\eta_{\mathrm{p,gt}}(k_{\mathrm{g}}-1)}{k_{\mathrm{g}}}} \quad (36)$$

$$\dot{W}_{\mathrm{AC,gt}} = \dot{n}_9(\bar{h}_8 - \bar{h}_9) \times \eta_{\mathrm{inv}} \quad (37)$$

### 4-5- بازیاب حرارتی

بازده بازیاب‌های هوا و سوخت بکار رفته در سیکل به صورت روابط (38) و (39) بیان می‌شوند [18]:

$$\varepsilon_1 = \frac{T_3 - T_2}{T_9 - T_2} \quad (38)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{T_5 - T_4}{T_{10} - T_4} \quad (39)$$

با بکار بردن معادله تعادل انرژی، می‌توان دمای خروجی از بازیاب‌های گرمایی را به‌دست آورد.

$$\dot{n}_2(h_3 - h_2) = \dot{n}_9(h_9 - h_{10}) \quad (40)$$

$$\dot{n}_4(h_5 - h_4) = \dot{n}_{10}(h_{10} - h_{11}) \quad (41)$$

### 4-6- سیستم ترکیبی

با در نظر گرفتن یک حجم کنترل برای کل سیستم، بازده‌های الکتریکی و

توان خالص تولیدی سیکل ترکیبی حالت پایه به صورت روابط (42) تا (44) تعریف می‌شوند:

$$\eta_{\text{elec,sys}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV} \tag{42}$$

$$\eta_{\text{th,sys}} = \frac{Q_{\text{loss,SOFC}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV} \tag{43}$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{AC,gt}} - \dot{W}_{\text{ac}} + \dot{W}_{\text{AC,SOFC}} \tag{44}$$

در سیکل ترکیبی با چیدمان دو پیل سری، بازده الکتریکی و حرارتی پیل‌های سوختی طبق روابط (45) تا (48) محاسبه شده است.

$$\eta_{\text{elec,SOFC1}} = \frac{\dot{W}_{\text{AC,SOFC1}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV \times U_{\text{f1}}} \tag{45}$$

$$\eta_{\text{elec,SOFC2}} = \frac{\dot{W}_{\text{AC,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV \times (1 - U_{\text{f1}}) \times U_{\text{f2}}} \tag{46}$$

$$\eta_{\text{th,SOFC1}} = \frac{Q_{\text{loss,SOFC1}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV \times U_{\text{f1}}} \tag{47}$$

$$\eta_{\text{th,SOFC2}} = \frac{\dot{Q}_{\text{loss,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f}} \times LHV \times (1 - U_{\text{f1}}) \times U_{\text{f2}}} \tag{48}$$

در سیکل ترکیبی با چیدمان دو پیل موازی، بازده الکتریکی و حرارتی پیل-سوختی اول مشابه حالت سری و برای پیل‌سوختی دوم طبق روابط (49) و (50) محاسبه شده است.

$$\eta_{\text{elec,SOFC2}} = \frac{\dot{W}_{\text{AC,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f,2}} \times LHV \times U_{\text{f2}}} \tag{49}$$

$$\eta_{\text{th,SOFC2}} = \frac{Q_{\text{loss,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f,2}} \times LHV \times U_{\text{f2}}} \tag{50}$$

## 5- روش حل

به منظور تحلیل سیستم‌های پیشنهادی و دست‌یابی به ضرایب مصرف سوخت بهینه در سیستم‌های ترکیبی طراحی شده، مدل‌سازی معادلات حاکم بر اجزا و سیستم ترکیبی در نرم افزار EES انجام شده است. در بخش اول این برنامه، اطلاعات ورودی سیستم ترکیبی مانند نسبت فشار کاری کمپرسور، دبی هوای ورودی به سیکل، دمای گازهای ورود به توربین وارد می‌گردند. سپس محاسبات سیستم ترکیبی برای کمپرسور، توربین، پس‌سوز و نیزسایر اجزای سیستم ترکیبی با یک حدس اولیه برای پیل آغاز شده و تا برقراری شرط همگرایی تکرار می‌شود. الگوریتم حل برنامه نوشته شده برای سیستم ترکیبی ارایه شده در شکل 4 نشان داده شده است.

## 6- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مدل ایجاد شده در دو بخش بررسی عملکرد الکتروشیمیایی پیل‌سوختی اکسید جامد و سیستم توربین‌گاز انجام شده است. به همین منظور، نتایج حاصل از مدل‌سازی پیل‌سوختی در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [19] و نتایج حاصل از مدل‌سازی سیکل توربین‌گاز با نتایج تحقیقات هورلوک [20] مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی سینگال بر مبنای سوختی متشکل از 89 درصد هیدروژن و 11 درصد آب در فشار کاری 1 بار و دمای کاری 1273 کلوین به-دست آمده بود. در برنامه تهیه شده با اعمال شرایط کاری مشابه، ولتاژ پیل در چگالی جریان‌های مختلف به دست آمده است. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، نمودارها دارای انطباق خوبی با یکدیگر می‌باشند و بیشترین خطای نسبی میان نتایج کمتر از 3.5 درصد می‌باشد. اختلاف موجود در برخی نقاط به علت تفاوت درصد سوخت مصرفی در کار حاضر و آزمایش انجام شده توسط سینگال می‌باشد. سیستم توربین‌گاز معرفی شده توسط هورلوک [20] و نتایج حاصل از کد حاضر نیز در جدول 3 مقایسه شده است. همخوانی نزدیک بین این نتایج صحت روش حاضر و کد تهیه شده برای سیکل توربین گاز را تأیید می‌کند.

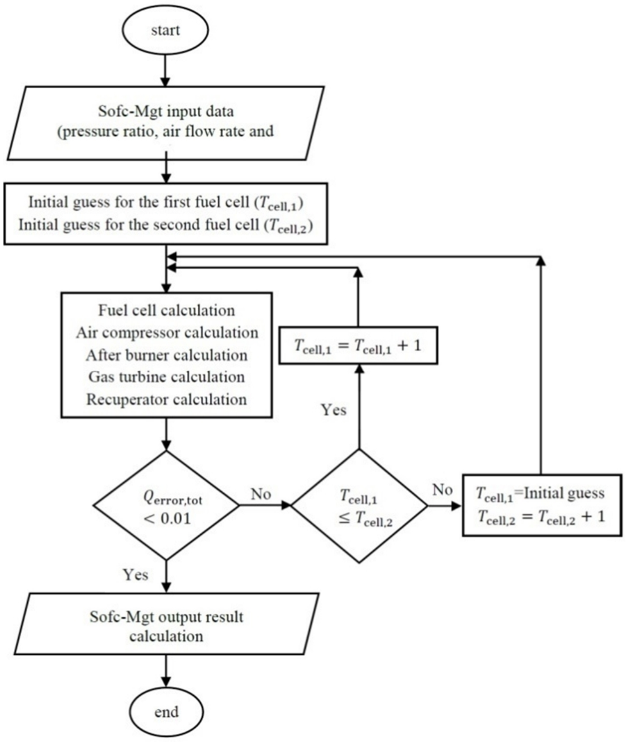


**Fig. 4** Flowchart of SOFC-MGT modeling

**شکل 4** الگوریتم مدل‌سازی سیستم هیبریدی پیل‌سوختی و میکروتوربین گاز

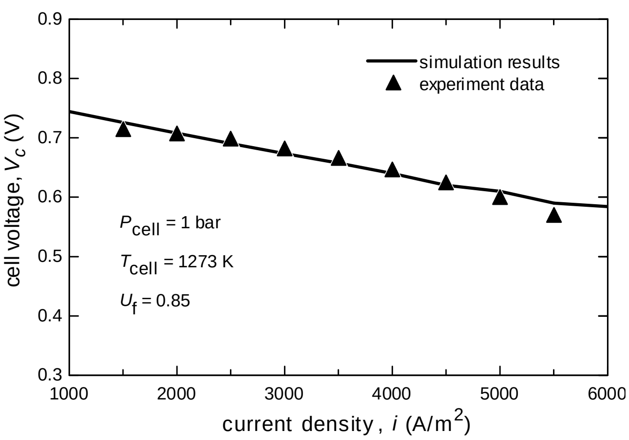


**Fig. 5** Comparison of experimental data and present model results for cell voltage

**شکل 5** مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج این تحقیق برای ولتاژ سل

**جدول 3** مقایسه نتایج کد حاضر با نتایج هورلوک

**Table 3** Comparison of Horlock and present model results

| | کد حاضر | نتایج هورلوک [20] | درصد خطا |
|---|---|---|---|
| راندمان (%) | 35.8 | 34.5 | 3.7 |
| توان مصرفی کمپرسور (kW) | 358 | 350 | 2.3 |
| توان تولیدی توربین (kW) | 672 | 650 | 3.4 |
| توان خالص تولیدی (kW) | 312 | 300 | 4 |

## 7- نتایج

از پارامترهای عملکردی مهم سیستم ترکیبی که تأثیر بسزایی در تطبیق پیل‌سوختی اکسید جامد و توربین‌گاز دارد می‌توان به ضریب مصرف سوخت، دمای گازهای ورود به توربین، نسبت فشار کاری کمپرسور و تعداد سلول پیل‌سوختی اشاره کرد. در این مطالعه به منظور دست‌یابی به مقادیر بهینه برای فاکتور مصرف سوخت و افزایش راندمان کلی سیستم، سایر پارامترها نیز به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در یک حالت بهینه قرار داشته باشند.

### 7-1- نتایج سیکل ترکیبی با یک پیل‌سوختی

در شکل 6 نمودار تغییرات بازده الکتریکی بر حسب ضریب مصرف سوخت در یک نسبت فشار معین (عدد 5) و در دماهای ورود به توربین مختلف نشان داده شده است. این نمودار به منظور بررسی عملکرد سیستم تحت تغییرات دمای ورود به توربین و دست‌یابی به یک مقدار بهینه برای این پارامتر مورد تحلیل قرار گرفته است. با افزایش دمای ورود به توربین، دمای گازهای خروجی توربین نیز افزایش می‌یابد. با توجه به پیش‌گرم شدن هوا و سوخت ورودی به پیل‌سوختی توسط حرارت گازهای خروجی توربین، دمای پیل-سوختی و در نتیجه بازده الکتریکی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد (شکل 6). بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای ورود به توربین 1273 کلوین، بیشترین بازده الکتریکی با مقدار 46 درصد به‌دست می‌آید.

در شکل 7 نمودار تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت در دمای ورود به توربین 1273 کلوین و در نسبت فشارهای مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت فشار کمپرسور تا عدد 5، بازده الکتریکی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر نسبت فشار، بدلیل زیاد شدن کار کمپرسور و در نتیجه کاهش توان خالص تولیدی، بازده الکتریکی رو به کاهش می‌گذارد.

حال نمودار تغییرات بازده الکتریکی بر حسب ضریب مصرف سوخت در دمای ورود به توربین 1273 کلوین و نسبت فشار بهینه 5، در شکل 8 نشان داده شده است. افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل موجب تبدیل انرژی شیمیایی بیشتری به انرژی الکتریکی می‌شود. از طرفی این افزایش انرژی شیمیایی موجب بیشتر شدن اضافه ولتاژ پیل نیز می‌شود. در نتیجه افزایش ضریب مصرف سوخت تا یک حد بهینه افزایش راندمان الکتریکی در پیل را به همراه دارد و با افزایش بیشتر این ضریب راندمان الکتریکی پیل کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اولین پیکربندی پیشنهادی با تعداد

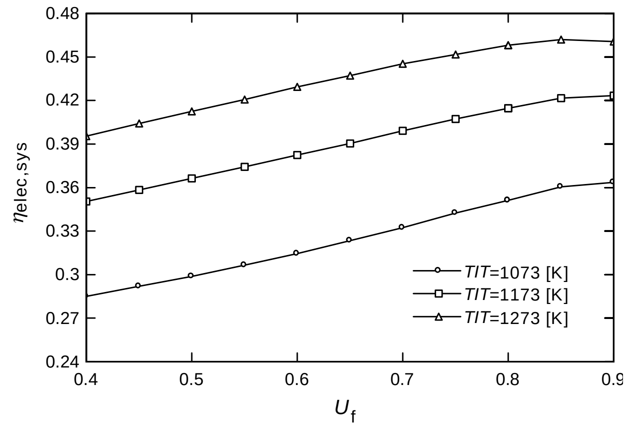


**Fig. 6** Variations of system electrical efficiency with fuel utilization factor

**شکل 6** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت

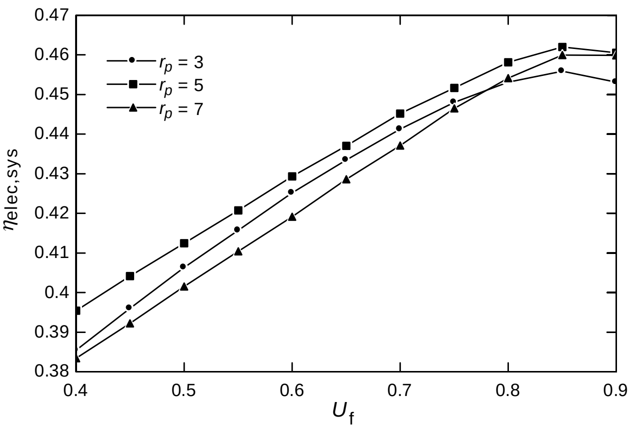


**Fig. 7** Variations of system electrical efficiency with fuel utilization factor

**شکل 7** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت

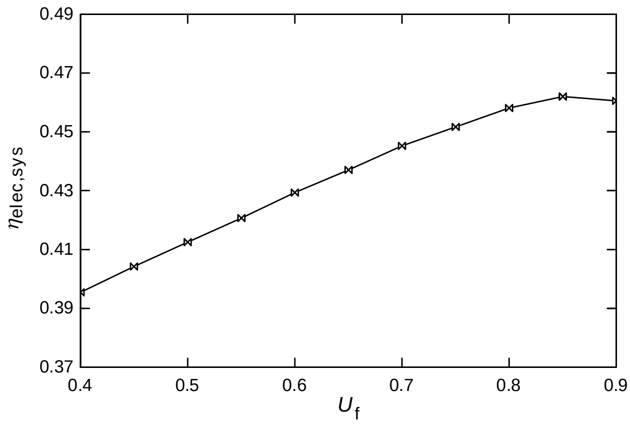


**Fig. 8** Variations of system electrical efficiency with fuel utilization factor

**شکل 8** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت

5136 سلول، نسبت فشار 5 و دمای ورود به توربین 1273 کلوین، ضریب مصرف سوخت مقدار بهینه 0.85 را به خود اختصاص می‌دهد.

### 7-2- نتایج سیکل ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری

در این بخش، ابتدا با در نظر گرفتن تعداد سلول هر کدام از پیل‌های سوختی برابر با نصف سلول‌های پیل‌سوختی حالت پایه، در یک نسبت فشار ثابت 3 و دمای ورود به توربین 1273 کلوین، نمودار بازده الکتریکی سیستم بر حسب تغییرات ضرایب مصرفی سوخت در پیل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل دوم تا مقدار 0.8 بازده سیکل افزایش و با بالاتر رفتن این ضریب بدلیل افزایش افت ولتاژ در پیل بازده رو به کاهش می‌گذارد، با توجه به اینکه این مقدار در ضریب‌های مصرف سوخت اول بدون تغییر باقی می‌ماند می‌توان آن را به عنوان ضریب مصرف سوخت بهینه برای پیل سوختی دوم در نظر گرفت. همچنین با توجه به شکل به ازای سه مقدار ضریب مصرف سوخت اول برابر با 0.5، 0.6 و 0.7 بازده دارای مقادیر بیشتری می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن این مقادیر به عنوان گزینه‌های حالت بهینه، مقایسه‌ای میان این ضرایب در چند نسبت فشار متفاوت انجام شده است.

در ادامه هدف محاسبه مقدار ضریب مصرف سوخت بهینه پیل‌سوختی اول در نسبت فشارهای مختلف است. همان‌طور که در شکل 10 نشان داده شده است این مقدار بهینه در نسبت فشارهای مختلف متفاوت می‌باشد. برای

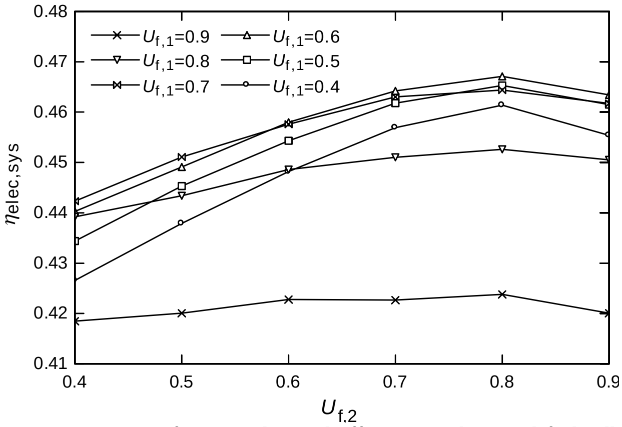


**Fig. 9** Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor

**شکل 9** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل دوم

مثال در نسبت فشار 5 و ضریب مصرف سوخت اول برابر با 0.6، سیستم ترکیبی بیشترین بازده الکتریکی را دارد، در نسبت فشار 7 و ضریب مصرف سوخت اول برابر با 0.7، سیستم ترکیبی بازده قابل توجهی را ارایه می‌دهد، این درحالیست که در نسبت فشار 3 و به ازای تمامی ضرایب مصرف سوخت بازده الکتریکی مقادیر بسیار کمی را در مقایسه با سایر نسبت فشارها نشان می‌دهد. مقادیر این پارامترها در جدول 4 ارائه شده است. در این جدول به ازای سه نسبت فشار مختلف، ضرایب مصرف سوخت بهینه و بازده الکتریکی حاصل از آن آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالتی که تعداد سلول پیل‌های سوختی با یکدیگر برابر می‌باشند، در نسبت فشار 5، ضریب مصرف سوخت دوم برابر با 0.8 و ضریب مصرف سوخت اول برابر با 0.6 ، سیستم ترکیبی بیشترین بازده الکتریکی را دارا است. مقدار این بازده در حدود 0.475 می‌باشد.

در حالت دوم تعداد سلول پیل‌های سوختی به ترتیب قرارگیری در سیکل ترکیبی یک سوم و دو سوم تعداد سلول‌های حالت پایه در نظر گرفته شده است. روند تغییرات بازده الکتریکی بر حسب ضرایب مصرفی سوخت در پیل‌های اول و دوم در شکل 11 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب مصرف سوخت پیل دوم مشابه حالت قبل در مقدار 0.8 بهینه می‌باشد. همچنین به ازای مقادیر 0.4، 0.5 و 0.6 برای ضریب مصرف سوخت پیل اول که بیشترین بازده را به خود اختصاص داده؛ نمودار بازده الکتریکی در نسبت فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (شکل 12). همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت فشار 5 و در ضریب مصرف سوخت پیل اول که برابر با 0.5 در نظر گرفته شده، سیستم ترکیبی بیشترین بازده را به خود اختصاص داده است. مقادیر بهینه حاصل برای این پارامترها در سایر نسبت فشارها نیز در جدول 4 ارائه شده است. در حالت سوم تعداد سلول پیل‌های سوختی به ترتیب قرارگیری در سیکل ترکیبی دو سوم و یک سوم پیل‌سوختی حالت پایه در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 13 بازده الکتریکی در ضریب مصرف سوخت پیل دوم برابر با 0.8 بیشترین مقدار را در ضریب‌های مصرف سوخت پیل اول به خود اختصاص داده است. سپس به منظور دست‌یابی به ضریب مصرف سوخت بهینه در پیل اول از میان سه مقدار 0.6، 0.7 و 0.8 نمودار بازده الکتریکی بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل اول در نسبت فشارهای مختلف در شکل 14 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه بازده الکتریکی در دو نسبت فشار 5 و 7 و در ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.7، رخ می‌دهد. با کاهش یا افزایش ضریب مصرف سوخت پیل اول بازده الکتریکی به طور قابل توجهی کم می‌شود. نتایج مربوط به مقادیر بهینه پارامترهای مورد بررسی در این حالت نیز در جدول 4 آورده شده است.

### 3-7- نتایج سیکل ترکیبی با دو پیل‌سوختی موازی

در این حالت نیز مشابه قبل به منظور دست‌یابی به ضرایب مصرف سوخت

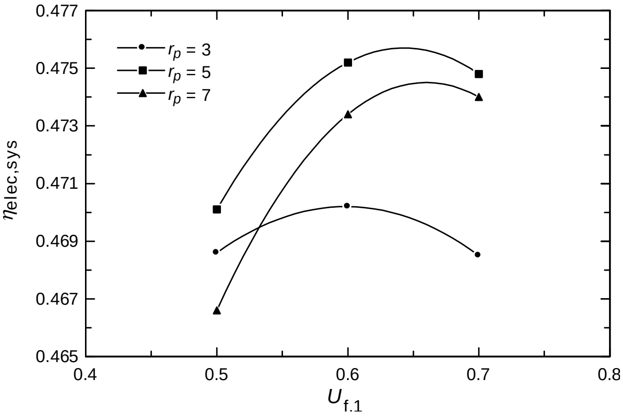


**Fig. 10** Variations of system electrical efficiency with first fuel cell fuel utilization factor

**شکل 10** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل اول

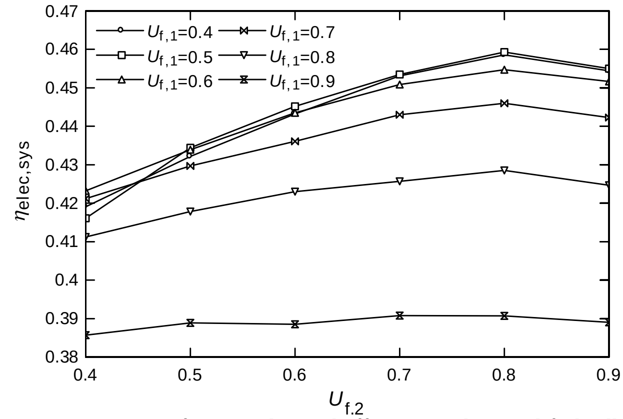


**Fig. 11** Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor

**شکل 11** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل دوم

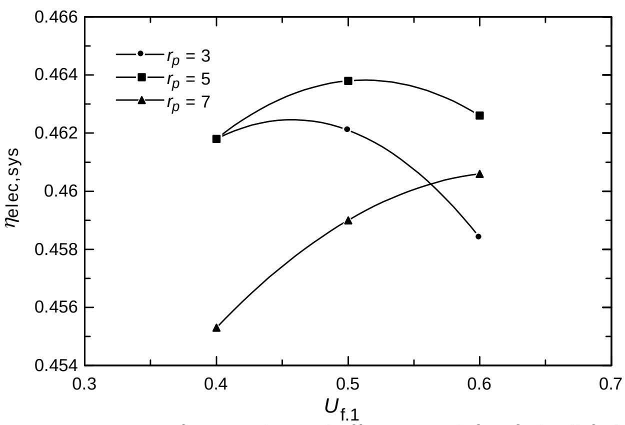


**Fig. 12** Variations of system electrical efficiency with first fuel cell fuel utilization factor

**شکل 12** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل اول

**جدول 4** پارامترهای بهینه ضرایب مصرف سوخت در حالت سری

**Table 4** Optimum parameters of fuel utilization factor in series mode

| $\eta_{\mathrm{elec,sys}}$ | $U_{\mathrm{f,2}}$ | $U_{\mathrm{f,1}}$ | $r_p$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.47 | 0.8 | 0.6 | 3 | $n_1$ = 2568 <br> $n_2$ = 2568 |
| 0.475 | 0.8 | 0.6 | 5 | |
| 0.474 | 0.8 | 0.7 | 7 | |
| 0.462 | 0.8 | 0.5 | 3 | $n_1$ = 1712 <br> $n_2$ = 3424 |
| 0.464 | 0.8 | 0.5 | 5 | |
| 0.461 | 0.8 | 0.6 | 7 | |
| 0.475 | 0.8 | 0.7 | 3 | $n_1$ = 3424 <br> $n_2$ = 1712 |
| 0.481 | 0.8 | 0.7 | 5 | |
| 0.481 | 0.8 | 0.7 | 7 | |

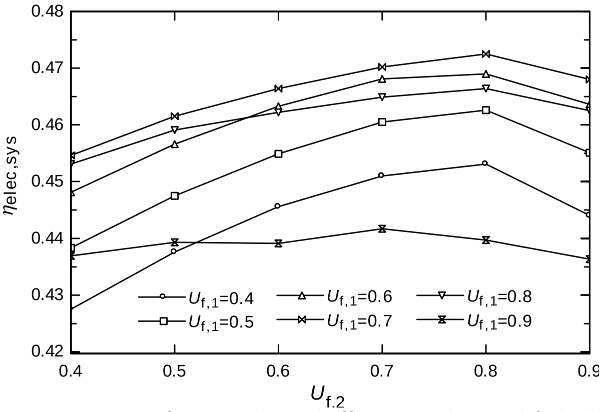


**Fig. 13** Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor

**شکل 13** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل دوم

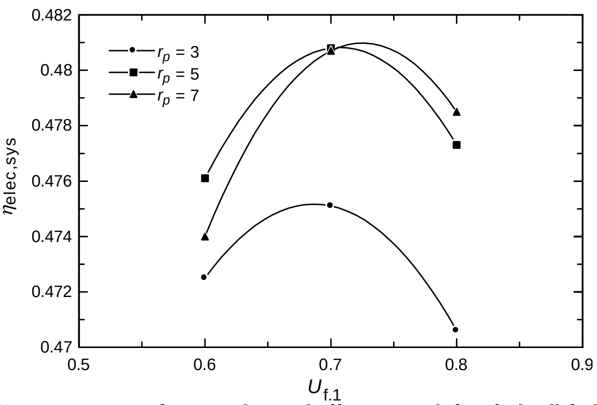


**Fig. 14** Variations of system electrical efficiency with first fuel cell fuel utilization factor

**شکل 14** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل اول

بهینه نمودارهای بازده الکتریکی بر حسب تغییرات ضرایب مصرف سوخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چگونگی این تغییرات در دو ترکیب متفاوت از تعداد سلول‌ها در یک فشار معین و دمای ورود به توربین بهینه (به ترتیب 3 و 1273 کلوین) در شکل 15 و شکل 16 نشان داده شده است. آنگاه این روند در دو نسبت فشار 5 و 7 نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول 5 ارایه شده است. مطابق با شکل 15 اگر روند تغییرات بازده الکتریکی در یکی از ضرایب مصرف سوخت پیل اول در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل دوم تا مقدار بهینه 0.85 بازده الکتریکی سیستم ترکیبی افزایش و پس از آن با بیش‌تر شدن این ضریب بازده کاهش می‌یابد. در ادامه تغییرات ضریب مصرف سوخت پیل اول مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات نمودارها در تمامی ضرایب یکسان و در ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.85، سیستم ترکیبی به بازده الکتریکی بیشینه 47.5 درصد دست می‌یابد (شکل 15). همچنین به دلیل مستقل بودن عملکرد پیل‌های سوختی از یکدیگر در حالت موازی، مقدار بهینه این ضرایب در نسبت فشارهای مختلف یکسان می‌باشد و مطابق با جدول 5 در نسبت فشار 5 و ضرایب مصرف سوخت برابر با 0.85 بازده الکتریکی سیستم 46.3 درصد می‌باشد و سیستم نسبت به سایر نسبت فشارها عملکرد بهتری دارد. به همین ترتیب در حالتی که تعداد سلول‌ها به صورت یک سوم و دو سوم حالت پایه تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل 16) بیش‌ترین بازده به ازای مقادیر ضریب مصرف سوخت اول برابر با 0.8 و ضریب مصرف سوخت دوم برابر با 0.9 حاصل می‌شود که در نتیجه می‌توان این مقادیر را به عنوان ضرایب مصرف سوخت بهینه در نظر گرفت و به بازده الکتریکی 45.5 درصد دست یافت. همچنین همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود بیشترین بازده این حالت یعنی 46 درصد در نسبت فشار 7 حاصل می‌شود.

## 8- نتیجه‌گیری

در تحقیق انجام شده سه پیکربندی مختلف از سیکل ترکیبی پیل‌سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز، از تغییر تعداد پیل‌های سوختی و محل قرارگیری آن در ساختمان سیکل حاصل شده است. تحلیل ترمودینامیکی سیستم‌های مورد نظر به منظور دست‌یابی به فاکتور مصرف سوخت بهینه در پیل‌های سوختی انجام شد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

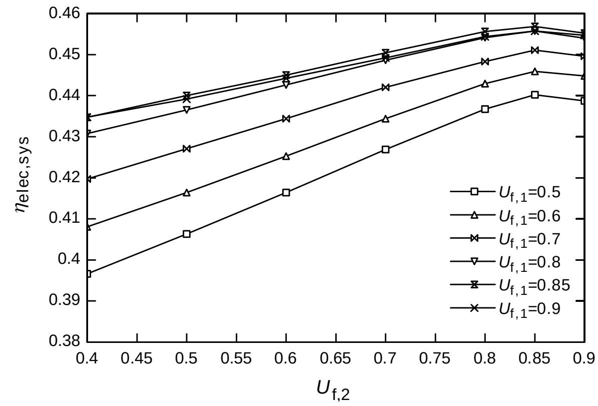


**Fig. 15** Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor

**شکل 15** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل دوم

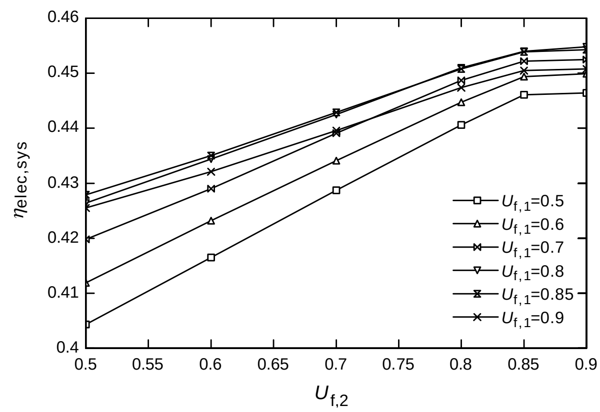


**Fig. 16** Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor

**شکل 16** تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت پیل دوم

**جدول 5** پارامترهای بهینه ضرایب مصرف سوخت در حالت موازی

**Table 5** Optimum parameters of fuel utilization factor in parallel mode

| $\eta_{\text{elec,sys}}$ | $U_{\text{f,2}}$ | $U_{\text{f,1}}$ | $r_{\text{p}}$ | $n$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.457 | 0.85 | 0.85 | 3 | $n_1$ = 2568<br>$n_2$ = 2568 |
| 0.463 | 0.85 | 0.85 | 5 | |
| 0.461 | 0.85 | 0.85 | 7 | |
| 0.455 | 0.9 | 0.8 | 3 | $n_1$ = 1712<br>$n_2$ = 3424 |
| 0.456 | 0.9 | 0.8 | 5 | |
| 0.46 | 0.9 | 0.8 | 7 | |

- در سیستم ترکیبی با یک پیل‌سوختی (حالت پایه) در نسبت فشار 5 و دمای ورود به توربین 1273 کلوین، ضریب مصرف سوخت بهینه 0.85 بدست آمد. در این حالت بیشترین بازده الکتریکی سیستم ترکیبی ساده در حدود 46 درصد محاسبه گردید.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری و تعداد سلول یکسان (نصف تعداد حالت پایه) بیشترین بازده الکتریکی 47.5 درصد می‌باشد. در این حالت نسبت فشار سیستم 5، ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.6 و ضریب مصرف سوخت پیل دوم برابر با 0.8 در نظر گرفته شده است.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری و تعداد سلول به ترتیب یک سوم و دو سوم حالت پایه، بیشترین بازده الکتریکی سیستم در حدود 46.4 درصد می‌باشد. در این حالت نسبت فشار سیستم برابر 5، ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.5 و ضریب مصرف سوخت پیل دوم برابر با 0.8 در نظر گرفته شده است.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری و تعداد سلول به ترتیب دو سوم و یک سوم حالت پایه، بیشترین بازده الکتریکی 48.1 درصد می‌باشد. در این حالت نسبت فشار سیستم 5 و 7، ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.7 و ضریب مصرف سوخت پیل دوم برابر با 0.8 در نظر گرفته شده است.

- نتایج نشان می‌دهد که در سیستم‌های ترکیبی با دو پیل‌سوختی سری، با افزایش تعداد سلول‌های پیل‌سوختی اول، بازده الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد. بهترین حالت عملکردی این سیستم ترکیبی زمانی است که تعداد سلول‌های پیل اول 3424 و تعداد سلول‌های پیل دوم 1712 باشد. در این حالت نسبت فشار بهینه سیستم 5، ضریب مصرف سوخت بهینه برای پیل اول 0.7 و برای پیل دوم 0.8 می‌باشد که تحت این شرایط سیستم دارای بازده الکتریکی 48 درصد خواهد بود.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی موازی و تعداد سلول یک سوم و دو سوم حالت پایه، بیشترین بازده الکتریکی در حدود 46 درصد می‌باشد. در این حالت نسبت فشار سیستم 7، ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 0.8 و ضریب مصرف سوخت دوم برابر با 0.9 می‌باشد.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل‌سوختی موازی و تعداد سلول یکسان (نصف تعداد حالت پایه) بیشترین بازده الکتریکی 46.3 درصد می‌باشد. در این حالت نسبت فشار سیستم برابر 5، ضریب مصرف سوخت پیل اول و دوم نیز برابر با 0.85 می‌باشد.

- نتایج نشان می‌دهد در حالتی که دو پیل‌سوختی به صورت موازی در سیکل قرار می‌گیرند، در تعداد سلول برابر با 2568 برای هر دو پیل‌سوختی، مقدار بیشتری برای بازده حاصل می‌شود. در این حالت نسبت فشار بهینه سیستم 5 و ضرایب مصرف سوخت بهینه برای پیل‌های سوختی اول و دوم 0.85 است. در این حالت سیستم ترکیبی به راندمان الکتریکی بیش از 46 درصد دست می‌یابد.

## 9- فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $A$ | مساحت |
| $D_{\text{eff}}$ | ضریب پخش مؤثر گاز |
| $E$ | ولتاژ برگشت‌پذیر پیل‌سوختی |
| $E^{\circ}$ | ولتاژ پیل‌سوختی در شرایط استاندارد |
| $E_{\text{act}}$ | مقدار انرژی فعال‌سازی |
| $h$ | آنتالپی |
| $i$ | چگالی جریان |
| $i_{\circ}$ | چگالی تبادلی جریان |
| $i_L$ | چگالی جریان حدی |
| $I$ | جریان الکتریکی |
| $k$ | نسبت گرمای ویژه |
| $LHV$ | ارزش حرارتی سوخت |
| $m$ | جرم |
| $n$ | نرخ جرم مولی، تعداد سلول‌های پیل‌سوختی |
| $n_e$ | تعداد مول‌های الکترون |
| $P$ | فشار |
| $Q$ | انتقال گرما |
| $r$ | مقاومت اهمی |
| $r_p$ | نسبت فشار |
| $R_u$ | ثابت عمومی گازها |
| $T$ | دما |
| $U$ | ضریب مصرف |
| $V$ | ولتاژ |
| $W$ | کار |
| $z$ | نرخ مولی پیشرفت واکنش پیل‌سوختی |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\gamma$ | ضریب پیش نمایی |
| $\varepsilon$ | ضریب کارایی |
| $\eta$ | راندمان |
| $\rho$ | چگالی |
| $\delta$ | ضخامت |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| a | هوا |
| AC | جریان متناوب |
| act | افت ولتاژ فعال‌سازی |
| ac | کمپرسور هوا |
| an | آند |
| conc | افت ولتاژ غلظتی |
| ca | کاتد |
| cc | محفظه احتراق |
| cyc | سیکل |
| DC | جریان مستقیم |
| el | الکترولیت |
| elec | الکتریکی |
| f | سوخت |

FC پیل‌سوختی
gt توربین‌گاز
gen ژنراتور
i , in ورودی
is آیزنتروپیک
loss تلفات
net خالص
ohm افت ولتاژ اهمیک
out خروجی
reg بازیاب حرارتی
SOFC پیل‌سوختی اکسید جامد
surr محیط
sys سیستم
th حرارتی
tot کل

## 10- مراجع


[1] A. Buonomano, F. Calise, M. D. d'Accadia, A. Palombo, M. Vicidomini, Hybrid solid oxide fuel cells–gas turbine systems for combined heat and power: A review, *Applied Energy,* Vol. 156, pp. 32-85, 2015.

[2] D. Saebea, Y. Patcharavorachot, S. Assabumrungrat, A. Arpornwichanop, Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 38, No. 11, pp. 4748-4759, 2013.

[3] K. Rajashekara, Hybrid fuel-cell strategies for clean power generation, *Industry Applications, IEEE Transactions on,* Vol. 41, No. 3, pp. 682-689, 2005.

[4] D. Saebea, S. Authayanun, Y. Patcharavorachot, A. Arpornwichanop, Effect of anode–cathode exhaust gas recirculation on energy recuperation in a solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power system, *Energy,* Vol. 94, pp. 218-232, 2016.

[5] Y. Zhao, N. Shah, N. Brandon, The Development and Application of a Novel Optimisation Strategy for Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Cycles, *Fuel Cells,* Vol. 10, No. 1, pp. 181-193, 2010.

[6] S. Motahar, AA. Alemrajabi, Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system, *international journal of hydrogen energy*, Vol. 34, No. 5, pp. 2396-2407, 2009.

[7] T. Araki, T. Ohba, S. Takezawa, K. Onda, Y. Sakaki, Cycle analysis of planar SOFC power generation with serial connection of low and high temperature SOFCs, *Journal of Power Sources,* Vol. 158, No. 1, pp. 52-59, 2006.

[8] A. Musa, M. De Paepe, Performance of combined internally reformed intermediate/high temperature SOFC cycle compared to internally reformed two-staged intermediate temperature SOFC cycle, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 33 ,No. 17, pp. 4665-4672, 2008.

[9] B. Tarroja, F. Mueller, J. Maclay, J. Brouwer, Parametric thermodynamic analysis of a solid oxide fuel cell gas turbine system design space, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,* Vol. 132, No. 7, 072301-072311, 2010.

[10]D. F. Cheddie, Integration of a solid oxide fuel cell into a 10 MW gas turbine power plant, *Energies,* Vol. 3, No. 4, pp. 754-769, 2010.

[11]E. Facchinetti, D. Favrat, F. Marechal, Design and optimization of an innovative solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid cycle for small scale distributed generation, *Fuel Cells,* Vol. 14, No. 4, pp. 595-606, 2014.

[12]S. Chan, H. Ho, Y. Tian, Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant, *Journal of Power Sources,* Vol.109 ,No. 1, pp. 111-120, 2002.

[13]A. V. Akkaya, Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC, *International Journal of Energy Research,* Vol. 31, No. 1, pp. 79-98, 2007.

[14]P. G. Bavarsad, Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 32, No. 17, pp. 4591-4599, 2007.

[15]C. F. McDonald, Low-cost compact primary surface recuperator concept for microturbines, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 20, No. 5, pp. 471-497, 2000.

[16]J. Pirkandi, M. Ghassemi, M. H. Hamedi, 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.

[17]J. Pirkandi, M. Mahmoodi, F. Amanloo, Thermodynamic modeling of an auxiliary power unit equipped with a tubular solid oxide fuel cell with application in aerospace power system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 132-144, 2015. (in Persian فارسی)

[18]Y. Haseli, I. Dincer, G. Naterer, Thermodynamic modeling of a gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 33, No. 20, pp. 5811-5822, 2008.

[19]S. Singhal, Advances in solid oxide fuel cell technology, Solod state ionics, Vol. 135, No. 1, pp. 305-313, 2000.

[20]J. H. Horlock, *Advanced Gas Turbine Cycles: A Brief Review of Power Generation Thermodynamics*, pp. 1-11, United Kingdom: Elsevier, 2003.