

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

سیده زینب سجادی¹، جاماسب پیرکندی^{2*}، مهدی جهرمی²

1 - كارشناس ارشد، هوافضا، دانشگاه صنعتى مالک اشتر، تهران

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در تحقیق حاضر سه پیکربندی مختلف برای سیستم ترکیبی پیلسوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز 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	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 20 شهریور 1395 پذیرش: 16 آبان 1395 ارائه در سایت: 28 آذر 1395
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	<i>کلید واژگان:</i> سیستم ترکیبی
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	پیل سوختی اکسید جامد میکروتوربین گاز
ترکیب شده است. نتایج نشان میدهد که فاکتور مصرف سوخت بهینه تأثیر مستقیمی بر عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز دارد. بررسیها نشان میدهد که این ضریب برای سیستم ترکیبی حالت پایه 0.85، در سیستم ترکیبی با دو پیل سوختی سری به ترتب برای با اما 7.7 میرای برا دوم 8.8 م.در سیستم ترکیب با دو با سوخت ممانی 0.85، (برای هر دو برا سوختی) حاص	فاکتور مصرف سوخت بهینه عملکرد سیستم
به ترتیب برای پیل اول ۲.۵ و برای پیل توم ۵.۵ و تر سیستم ترتیبی با تو پیلسوختی موری ۵.۵۵ زبرای سر تو پیلسوختی خاص ش گردد. 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

ABSTRACT

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

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.

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

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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 توربین گاز، سبب شده است که سیستم ترکیبی حاصل به عنوان پیشنهادی برای سیستمهای تولید توان آینده مدنظر باشد [3-6]. در سالهای اخیر سیستمهای ترکیبی توربین گاز و پیلسوختی اکسید جامد به عنوان یک گزینه مناسب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران کشورهای مختلف قرار گرفته است. استفاده از این نوع میباشد.

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی بر روی سیستمهای ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی انجام شده اما در بیشتر تحقیقات سیستمهای هیبریدی ساده مد نظر بوده و سیستمهای هیبریدی متشکل از دو پیل سوختی کمتر مورد توجه بوده است. از معدود تحقیقات انجام شده در این زمینه می توان به موارد ذیل اشاره کرد. اراکی و همکاران [7] یک سیستم تولید توان شامل دو توده پیل سوختی اکسید جامد دما بالا و دما پایین را مورد بررسی قرار دادند. در این تحلیل مقایسهای میان بازده سیکلهای پیل سوختی دما بالا، پیل سوختی 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 توربین گاز است. موسی و همکاران [8] در تحقیقی عملکرد چهار نوع سیستم ترکیبی با پیکربندیهای متفاوت را که شامل توربین گاز، بازیاب و پیل سوختی 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 توده ای است. برایان تاروجا و همکاران [9] یک سیستم ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد را مورد مطالعه قرار دادند و روشهای مختلف پیش گرم 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 پیل سوختی اکسید جامد را برای ترکیب با یک توربین گاز 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 پیل سوختی بکار گرفته شد. در این مطالعه بازده سیستم ترکیبی شامل مبدل ها 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 تركيبي ارائه شده شامل يك واحد پيل سوختي اكسيد جامد صفحهاي 5 کیلوواتی و یک واحد میکروتوربین گاز 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

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دورہ 16، شمارہ 12

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.

1-2- 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 پیش گرم شده و وارد بخش آند پیلسوختی می گردد. پس از انجام واکنشهای الکتروشیمیایی در پیلسوختی، هوا و سوخت باقیمانده وارد پسسوز می گردند. پس از انجام واکنش در پسسوز، محصولات خروجی از آن در ادامه وارد توربین شده و در اثر انبساط کار مکانیکی تولید می کند. گازهای داغ پس از خروج از توربین در ادامه مسیر خود وارد دو بازیاب

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.

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

301



Fig. 1 Schematic of SOFC/MGT hybrid system

شکل 1 شماتیک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز



^{1 ▲} From ambient

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

- 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 پیل سوختی ثابت فرض شده است.
- فرایند تمامی سلولها در توده پیلسوختی مشابه فرض شده است.

4- معادلات حاكم

1-4- معادلات پيلسوختى

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

پیکربندی این سیستم در مقایسه با حالت پایه دارای دو پیل سوختی و دو پس سوز مجزا میباشد که به صورت موازی با هم قرار دارند. جریان خروجی از بازیاب هوا توسط تقسیم کننده به دو جریان مساوی تبدیل شده و وارد بخش کاتد پیل های سوختی میشود. جریان خروجی از بازیاب سوخت نیز به طور مشابه تقسیم و وارد آند پیل های سوختی میشود. پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی در پیل های سوختی، هوا و سوخت باقی مانده به صورت مجزا وارد محفظه های احتراق شده و پس از احتراق جریان های خروجی با یکدیگر مخلوط و وارد توربین گاز میشوند. شماتیک سیستم ترکیبی اشاره شده در شکل 3 نشان داده است. همچنین پارامترهای ثابت استفاده شده برای سیستم های ترکیبی پیشنهادی درجدول 1 ارائه شده است که در آن n_2 ور به ترتیب تعداد سلول پیل های سوختی اول و دوم میباشند.

3- فرضيات

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.

شکل 2 شماتیک سیستم هیبریدی با دو پیلسوختی سری



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 به کار رفته در سیستمهای ترکیبی پیلسوختی اکسید جامد و میکروتوربین گاز

Table 1 Main op	perating parameters of S	OFC-MG'	Γ systems
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
0.10272	(m^2) []	298 K	دمای محیط
0.10362	مساحت هر سلول (۱۱۱)	1 bar	فشار محيط
1.5	طول هر سلول (m)	81 %	بازده كمپرسور
0.022	قطر هر سلول (m)	84 %	بازده توربين
n = 5136	تعداد سلول در سیستم ترکیبی اول	95 %	بازده پسسوز
n ₁ = 171 2 n ₂ = 3424		80 %	بازده ركوپراتور
$n_1 = 2568$ $n_2 = 2568$	تعداد سلول در سیستم ترکیبی دوم	89 %	بازده معکوس کننده
n ₁ = 3424 n ₂ = 1712		4 %	افت فشار پيلسوختي
$n_1 = 1712$ $n_2 = 3424$	تعداد سلول در سیستم	5 %	افت فشار پسسوز
n ₁ = 2568 n ₂ = 2568	تركيبي سوم	4 %	افت فشار ركوپراتور

ترمودینامیکی میباشد، ارائه شده است.

1-1-4- محاسبات الكتروشيميايي

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

$$E = E^{\circ} + \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{\rm H_2} P_{\rm O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\rm H_2 o}} \right)$$
(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 (*س*(V) 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]:

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

$$V_{\text{act}} = \frac{V_{\text{act,an}} + V_{\text{act,ca}}}{n_e F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_o}\right)$$
(3)

در رابطه فوق *i* و *i* به ترتیب چگالی جریان و چگالی جریان تبادلی می-باشد. محاسبه مقدار چگالی جریان تبادلی به صورت دقیق بسیار پیچیده می-باشد. به همین منظور از دو رابطه نیمه تجربی (5) و (6) برای محاسبه چگالی جریان پیل سوختی اکسید جامد استفاده می شود [14]:

$$i_{\circ,\mathrm{an}} = \gamma_{\mathrm{an}} \left(\frac{P_{\mathrm{H}_2}}{P_{\mathrm{ref}}}\right) \left(\frac{P_{\mathrm{H}_2\mathrm{O}}}{P_{\mathrm{ref}}}\right) \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{act,an}}}{R_u T}\right)$$
(5)

$$i_{\circ,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.23} \exp\left(-\frac{E_{act,ca}}{R_u T}\right)$$
(6)

در روابط بالا γ به جنس الکترودها بستگی دارد و E مقدار انرژی فعال-سازی میباشد که مقادیر مربوط به این پارامترها برای پیل سوختی اکسید جامد استفاده شده در جدول 2 ارائه شده است.

مقاومتهای اهمی شامل مقاومت در الکترولیت، الکترودها و اتصالات داخلی پیل سوختی 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]:

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

جدول 2 پارامترهای ورودی افت ولتاژ فعالسازی [13]

Table 2 Activation polarization input parameters [13]				
مقادير	پارامتر			
110000	E _{act,an} (kJ/kmol)			
155000	$E_{\rm act,ca}$ (kJ/kmol)			
10 ⁹ ×7	$\gamma_{\rm an}$ (A/m ²)			
10 ⁹ ×7	$\gamma_{\rm ca}$ (A/m ²)			

2-4- كمپرسور

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 پلی تروپیک (η_{ac}) استفاده شده (رابطه (30)) و دمای هوای خروجی طبق رابطه (31) بهدست میآید.

$$\eta_{\rm is,ac} = \frac{\left(r_{p,ac}\right)^{\frac{k_{\rm a}-1}{k_{\rm a}}}}{\left(r_{p,ac}\right)^{\frac{k_{\rm a}-1}{k_{\rm a}\eta_{\rm p,ac}}}} \tag{30}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (r_{p,ac})^{\frac{k_{a-1}}{k_a \eta_{p,ac}}}$$
(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: $\dot{W}_{
m ac}$ = $\dot{n}_{
m a}(ar{h}_2 - ar{h}_1)$ (32)

3-4- پسسوز

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

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

در رابطهی فوق $\dot{Q}_{\text{loss,cc}}$ تلفات حرارتی پس سوز میباشد که با داشتن راندمان پس سوز (η_{cc}) و ضریب مصرف سوخت با استفاده از رابطه (34) به دست می-آید [18].

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

4-4- توربين گاز

(34)

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

$$\eta_{\text{is,gt}} = \frac{\mathbf{1} - \left(\frac{1}{r_{p,gt}}\right)^{\frac{\eta_{pgt}(\log - 1)}{k_g}}}{\mathbf{1} - \left(\frac{1}{r_{r,st}}\right)^{\frac{k_g - 1}{k_g}}}$$
(35)

$$\frac{T_8}{T_9} = (r_{p,\text{gt}})^{\frac{\eta_{p,\text{gt}}(k_g-1)}{k_g}}$$
(36)

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

4-5- بازياب حرارتي

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

$$\varepsilon_1 = \frac{T_3 - T_2}{T_9 - T_2} \tag{38}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{T_5 - T_4}{T_{10} - T_4} \tag{39}$$

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

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

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

6-4- سیستم ترکیبی

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

$$V_{\rm ohm} = ir \tag{8}$$

 $r = \delta \rho \tag{9}$

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

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

$$eell = iA_{cell}$$
(17)

$$H_{\text{tot}} = \mathbf{2}FZ \tag{18}$$

$$\dot{W}_{\rm DC,SOFC} = V_{\rm cell} I_{\rm tot} \tag{19}$$

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

2-1-4- محاسبات حرارتي و ترموديناميكي

فرایند واکنشهای شیمیایی شکل گرفته در داخل پیلسوختی یک فرایند گرماده میباشد. با نوشتن معادله ترمودینامیکی بین واکنش گرها و فرآوردهها میزان انتقال حرارت در فرایند بهدست میآید. گرمای حاصل از واکنش شیمیایی انجام شده در پیلسوختی طبق رابطه (21) محاسبه میشود [12]: $\dot{Q}_{
m elec} = zT\Delta S - I\Delta V_{
m loss}$ گرمای خالص باقیمانده از واکنش انجام شده در پیلسوختی طبق رابطه (22) حاصل میشود:

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

مقداری از این گرمای خالص باقیمانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده (Q') و بخش دیگری نیز به محیط (Q_{surr}) وارد می شود. $\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{surr}$ (23)

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

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

 $\dot{Q}'' = \Delta h_{c,in} + \Delta h_{c,out} + \Delta h_{a,in} + \Delta h_{a,out}$ (25) $\dot{Q}'' = \Delta h_{c,in} + \Delta h_{c,out} + \Delta h_{a,in} + \Delta h_{a,out}$ (25) $\mu_{c,out}$ برای محاسبه دمای گازهای خروجی از پیل سوختی از یک الگوریتم تکرار استفاده شده و معیار همگرایی نیز به صورت رابطه (26) در نظر گرفته شده است [17].

$$Q_{\text{error}} = \left| \frac{\dot{Q}'' - \dot{Q}'}{\dot{Q}'} \right| < 0.01 \tag{26}$$

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

با داشتن ضریب مصرف سوخت (*U_f*)، توان تولیدی پیل سوختی (Ŵ_{AC,SOFC}) و گرمای خالص باقیمانده از واکنش پیل سوختی (Qsurr) بازده الکتریکی و حرارتی پیل سوختی طبق روابط (28) و (29) بهدست می آیند:

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

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

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.57.2

. : .

توان خالص توليدي سيكل تركيبي حالت پايه به صورت روابط (42) تا (44) تعريف مي شوند:

$$\eta_{\text{elec,sys}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{n}_f \star LHV}$$
(42)

$$\eta_{\text{th,sys}} = \frac{Q_{\text{loss,SOFC}}}{\dot{\eta}_c \times LHV}$$
(43)

$$\dot{W}_{\rm net} = \dot{W}_{\rm AC,gt} - \dot{W}_{\rm ac} + \dot{W}_{\rm AC,SOFC}$$
(44)

$$\eta_{\text{elec,SOFC1}} = \frac{W_{\text{AC,SOFC1}}}{\dot{n}_{\text{f}} \star LHV \star U_{\text{f1}}}$$
(45)

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

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

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

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

$$\eta_{\text{elec,SOFC2}} = \frac{W_{\text{AC,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f},2} \times LHV \times U_{\text{f}2}}$$
(49)

$$\eta_{\text{th,SOFC2}} = \frac{Q_{\text{loss,SOFC2}}}{\dot{n}_{\text{f,2}} \times LHV \times U_{\text{f2}}}$$
(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 کمیرسور، دبی هوای ورودی به سیکل، دمای گازهای ورود به توربین وارد می گردند. 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- اعتبارسنجي

اعتبارسنجی مدل ایجاد شده در دو بخش بررسی عملکرد الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد و سیستم توربین گاز انجام شده است. به همین منظور، نتایج حاصل از مدلسازی پیل سوختی در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [19] و نتایج حاصل از مدلسازی سیکل توربین گاز 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. همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود، نمودارها دارای انطباق خوبی با یکدیگر می باشند 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 سينگال مي باشد. سيستم توربين گاز معرفي 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 سيكل توربين گاز را تأييد مي كند.



Fig. 4 Flowchart of SOFC-MGT modeling شكل 4 الگوريتم مدلسازى سيستم هيبريدى پيلسوختى و ميكروتوربين گاز



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

سل	ولتاژ	براى	تحقيق	اين	نتايج	و	آزمایشگاهی	نتايج	مقايسه	5	شکل
----	-------	------	-------	-----	-------	---	------------	-------	--------	---	-----

هورلوک	نتايج	با	حاضر	کد	نتايج	مقايسه	3	دول	2
--------	-------	----	------	----	-------	--------	---	-----	---

Table 3 Cor	nparison of Horlock	and present model results	
د. صد خطا	نتابح هم لمک [20]	کد حاض	

	<i></i>		
راندمان (%)	35.8	34.5	3.7
توان مصرفی کمپرسور (WW)	358	350	2.3
توان توليدي توربين (kW)	672	650	3.4
توان خالص توليدي (kW)	312	300	4

305

7- نتايج

از پارامترهای عملکردی مهم سیستم ترکیبی که تأثیر بسزایی در تطبیق پیلسوختی اکسید جامد و توربین گاز 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.

1-7- 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 پیل سوختی توسط حرارت گازهای خروجی توربین، دمای پیل-سوختی و در نتیجه بازده الکتریکی سیستم ترکیبی افزایش مییابد (شکل 6). بنابراین همان طور که مشاهده میشود در دمای ورود به توربین 1273 کلوین، بیشترین بازده الکتریکی با مقدار 46 درصد به دست 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 $% \left[{{\left[{{{K_{{\rm{B}}}} \right]}} \right]_{\rm{B}}} \right]$

شکل 6 تغییرات بازده الکتریکی سیستم بر حسب ضریب مصرف سوخت



Fig. 7 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.

2-7- 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 پیل سوختی 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. همان طور 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 بهینه برای پیل سوختی دوم در نظر گرفت. مقدار در ضریبهای 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 را به عنوان ضریب مدارای 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





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 می شود، در حالتی که تعداد سلول پیلهای سوختی با یکدیگر برابر میباشند، در نسبت فشار 5، ضريب مصرف سوخت دوم برابر با 0.8 و ضريب مصرف سوخت اول برابر با 0.6 ، سیستم ترکیبی بیشترین بازده الکتریکی را دارا است. مقدار این بازده در حدود 0.475 مى باشد.

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. همان طور که مشاهده می شود 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). همان طور که مشاهده می شود 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 ییل سوختی 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 الكتريكي بر حسب ضريب مصرف سوخت پیل اول در نسبت فشارهای مختلف در شکل 14 ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشینه بازده الکتریکی در دو نسبت فشار 5 و 7 و در ضريب مصرف سوخت پيل اول برابر با 0.7، رخ ميدهد. با كاهش يا افزايش

ضریب مصرف سوخت پیل اول بازده الکتریکی به طور قابل توجهی کم می شود. 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 پیل سوختی 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 حس ب ضريب مصرف سوخت پيل اول



fuel utilization factor



utilization factor

شکل 12 تغییرات بازدہ الکتریکی سیستم بر حہ بب ضريب مصرف سوخت پيل اول

جدول 4 پارامترهای بهینه ضرایب مصرف سوخت در حالت سری Table 4 Optimum parameters of fuel utilization factor in series mode

$\eta_{ m elec,sys}$	$U_{\rm f,2}$	$U_{\rm f,1}$	r_p	n
0.47	0.8	0.6	3	m - 2549
0.475	0.8	0.6	5	n ₁ - 2500 m - 2540
0.474	0.8	0.7	7	n ₂ = 2568
0.462	0.8	0.5	3	m - 171 0
0.464	0.8	0.5	5	$n_1 = 1/12$
0.461	0.8	0.6	7	n ₂ = 3424
0.475	0.8	0.7	3	
0.481	0.8	0.7	5	$n_1 = 3424$
0.481	0.8	0.7	7	$n_2 = 1/12$



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





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 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 فرایب مصرف سوخت پیل اول در نظر گرفته شود، مشاهده میشود که با افزایش ضریب مصرف سوخت پیل دوم تا مقدار بهینه 20.0 بازده الکتریکی مییابد. در ادامه تغییرات ضریب مصرف سوخت پیل اول مورد بررسی قرار مییابد. در ادامه تغییرات ضریب مصرف سوخت پیل اول مورد بررسی قرار مرفته است. همان طور که مشاهده میشود روند تغییرات نمودارها در تمامی ضرایب یکسان و در ضریب مصرف سوخت پیل اول برابر با 2.50 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 6.34 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) بیش-صورت یک سوم و دو سوم حالت پایه تقسیمبندی شدهاند (شکل 16) بیش-مورت یک سوم دو مرابر با 0.9 حاصل میشود که در نتیجه میتوان این مقادیر را به عنوان ضرایب مصرف سوخت بهینه در نظر گرفت و به بازده مقادیر را به عنوان ضرایب مصرف سوخت بهینه در نظر گرفت و به بازده مقاهده میشود بیشترین بازده این حالت یعنی 46 درصد در نسبت فشار 7

8- نتیجه گیری

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 می باشد.



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



شكل 15 تغييرات بازده الكتريكي سيستم بر حسب ضريب مصرف سوخت پيل دوم

Fig. 16 Variations of system electrical efficiency with second fuel cell fuel utilization factor $% \left[{\left[{{{\rm{T}}_{\rm{T}}} \right]_{\rm{T}}} \right]_{\rm{T}}} \right]$

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

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.57.2

جدول 5 پارامترهای بهینه ضرایب مصرف سوخت در حالت موازی Table 5 Optimum parameters of fuel utilization factor in parallel mode

n	$r_{ m p}$	$U_{\rm f,1}$	$U_{\rm f_{l^2}}$	$\eta_{\rm elec,sys}$
	3	0.85	0.85	0.457
$n_1 = 2508$	5	0.85	0.85	0.463
n ₂ = 2308	7	0.85	0.85	0.461
m - 171 0	3	0.8	0.9	0.455
$n_1 = 1/12$	5	0.8	0.9	0.456
n ₂ = 3424	7	0.8	0.9	0.46
$n_1 = 1712$ $n_2 = 3424$	3 5 7	0.85 0.8 0.8 0.8	0.85 0.9 0.9 0.9	0.461 0.455 0.456 0.46

در سیستم ترکیبی با یک پیل سوختی (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 پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی سری و تعداد سلول به ترتیب دو سوم و یک سوم حالت پایه، بیشترین بازده الکتریکی 48.1 درصد می باشد. 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 پیل سوختی سری، با افزایش تعداد سلولهای پیل سوختی 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 می باشد 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 می باشد. 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 می باشد.

- در سیستم ترکیبی با دو پیل سوختی 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 پیل سوختی به صورت موازی در سیکل قرار می گیرند، در تعداد سلول برابر با 2568 برای هر دو پیل سوختی، مقدار بیشتری برای بازده حاصل می شود. در این حالت نسبت فشار بهینه سیستم 5 و ضرایب مصرف سوخت بهینه برای پیل های سوختی اول و دوم 0.85 است. در این حالت سیستم ترکیبی به راندمان الکتریکی بیش از 46 درصد دست می یابد.

9- فهرست علايم

- مساحت D_{eff} ضربب بخش مؤثر گار
- D_{eff} ضریب پخش مؤثر گاز *E* ولتاژ برگشتپذیر پیلسوختی
- ت واندر بر نست پدیر پین سوختی . • E ملتاث بیا سمختی در شرایط استاندارد
- E[•] ولتاژ پیل سوختی در شرایط استاندارد E_{act} مقدار انرژی فعال سازی
 - لا مقدار الرری کا h آنتالپی
 - ن چگالی جریان i
 - ن چگالی تبادلی جریان *i*ه
 - پ کی جریان حدی i_L
 - I جريان الكتريكي
 - k نسبت گرمای ویژه
 - LHV ارزش حرارتی سوخت
 - m جرم
- n نرخ جرم مولی، تعداد سلول های پیل سوختی
 - تعداد مول های الکترون n_e
 - P فشار
 - Q انتقال گرما
 - r مقاومت اهمی
 - نسبت فشار r_p
 - ثابت عمومی گازها R_u
 - T دما
 - U ضريب مصرف
 - V ولتاژ
 - W کار
 - z نرخ مولی پیشرفت واکنش پیلسوختی

علايم يونانى

- γ ضریب پیش نمایی
 - ^ع ضريب كارايي
 - راندمان η
 - ρ چگالی
 - δ ضخامت

زيرنويسها

- یک a هوا AC جریان متناوب act افت ولتاژ فعالسازی
 - **ac** کمپرسور هوا
 - **an** آند
 - conc افت ولتاژ غلظتی
 - **ca** کاتد
 - **CC** محفظه احتراق
 - **сус** سيكل
 - **DC** جريان مستقيم
 - **el** الكتروليت
 - **elec** الكتريكي
 - **أ** سوخت

309

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.57.2

- [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 فارسى)
- [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.



10- مراجع

- 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.