



بهینه‌سازی چند هدفه و تحلیل حساسیت آماری سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز با خوراک گاز زیستی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری

محمدحسین علیئی¹، رامین روشندل^{2*}، اکرم عوامی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

*تهران، صندوق پستی 113658639، roshandel@sharif.edu

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 دی 1395

پذیرش: 24 بهمن 1395

ارائه در سایت: 21 اسفند 1395

کلید واژگان:

گاز زیستی

پیل سوختی اکسید جامد

توربین گاز

بهینه‌سازی چندهدفه

تحلیل حساسیت سوبل

امروزه استفاده از گاز زیستی به علت محتوای متان، تجدیدپذیر بودن و ارزان قیمت بودن آن رو به افزایش است. پیل سوختی اکسید جامد یکی از بهترین فناوری‌های تبدیل انرژی موجود جهت کار با گاز زیستی می‌باشد که از پتانسیل بالایی جهت اتصال با توربین گازی برخوردار است. در این مقاله سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسیدجامد-توربین گاز با خوراک‌دهی توسط گاز زیستی، از جنبه‌های انرژی و اقتصادی مدل‌سازی شده است. جهت یافتن مقادیر بهینه پارامترهای طراحی سیستم ترکیبی، دو تابع هدف بیشینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی و کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری کل سیستم در نظر گرفته شده است. در ابتدا هر یک از اجزای سیستم ترکیبی به صورت جداگانه مدل‌سازی و اعتبارسنجی شده است. سپس با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه (NSGII)، مقادیر بهینه پارامترهای طراحی سیستم ترکیبی محاسبه شده‌اند. نقطه بهینه نهایی با به کارگیری روش بی‌بعدسازی اقلیدسی و روش تصمیم‌گیری لین‌مپ در نمودار بی‌تفاوتی به‌دست آمده است. در نقطه بهینه، بازده انرژی الکتریکی برابر 66 درصد و هزینه کل سرمایه‌گذاری برابر 175227.4 دلار می‌باشد که در این نقطه، هزینه همتراز شده انرژی الکتریکی 6.3 سنت به ازای هر کیلووات ساعت محاسبه شده است. در انتها نیز به منظور تعیین اهمیت پارامترهای طراحی، با کمک روش تحلیل حساسیت سوبل میزان تأثیر هر یک از آن‌ها بر توابع هدف بررسی شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که نسبت تراکم کمپرسور دارای بیشترین تأثیر بر بازده انرژی الکتریکی سیستم و همچنین بازده ایزنتروپیک توربین و جریان پیل سوختی نیز دارای بیشترین تأثیر بر هزینه سرمایه‌گذاری کل سیستم می‌باشند.

Multi objective optimization and statistic sensitivity analysis of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system fed by biogas in urban wastewater treatment plants

Mohammad Hossein Aliee, Ramin Roshandel*, Akram Avami

Department of Energy Engineering, Sharif University of technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 113658639, Tehran, Iran, roshandel@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 December 2016
Accepted 12 February 2017
Available Online 11 March 2017

Keywords:

Biogas
Solid oxide fuel cell
Gas turbine
Multi objective optimization
Sobol sensitivity analysis

ABSTRACT

In today's world, usage of biogas is increasing due to its methane content, renewability, and low price. Solid oxide fuel cell is one of the best energy conversion technologies, in order to use biogas and it has a high potential to integrate with the gas turbine. In this paper, solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system, which is fed by biogas is modeled with respect to energy and economic aspects. Maximization of electrical energy efficiency and minimization of total investment cost are objective functions, which are considered to find the optimal design variables of the hybrid system. First, each component of the hybrid system is modeled and validated individually. Then, in order to optimize the hybrid system, multi objective optimization via NSGII is implemented and optimal values of design parameters of the hybrid system were calculated. Optimal point is obtained using Euclidian non-dimensionalization and LINMAP decision making method in Pareto front. So, optimal design values are 66 percent and 175227.4 \$, which are electrical energy efficiency and total investment cost, respectively. In optimal point Levelized unit cost is 6.3 cents per kWh. Finally, in order to determine the effect of design parameters on the objective functions, sensitivity of each design parameters was analyzed using Sobol's sensitivity analysis method. Results show that compressor pressure ratio has the maximum effect on electrical energy efficiency. Furthermore, turbine isentropic efficiency and fuel cell current have the maximum effect on the total investment cost.

1- مقدمه

تولید بهینه توان همراه با کمترین میزان انتشارات تبدیل به یک مسئله مهم

شده است.

به‌علت رشد مصرف جهانی انرژی، قیمت بالای انرژی، کاهش منابع سوخت-

گاز زیستی یکی از سوخت‌های تجدیدپذیر و جایگزین است که می‌تواند

های فسیلی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، یافتن راه حل‌هایی به‌منظور

Please cite this article using:

M. H. Aliee, R. Roshandel, A. Avami, Multi objective optimization and statistic sensitivity analysis of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system fed by biogas in urban wastewater treatment plants, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 239-250, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

لحاظ شوند. تحلیل ترمودینامیک- اقتصادی⁵ یک روش بسیار مناسب جهت در نظر گرفتن ابعاد ترمودینامیک و اقتصاد مسئله به صورت همزمان می باشد. تحلیل ترمودینامیک- اقتصادی بر روی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز با خوراک دهی توسط گاز طبیعی با اهداف بیشینه کردن تولید توان و کمینه کردن هزینه سرمایه گذاری توسط آسویستر و همکاران انجام شده است [13]. چدی و همکاران نیز سیستم پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز را تحلیل ترمودینامیک- اقتصادی کردند [14]. بهینه سازی چند هدفه یک روش مناسب جهت بهینه سازی مسایلی است که دارای توابع هدف در تضاد با هم هستند. بهینه سازی چند هدفه ترمودینامیک- اقتصادی نیز توسط پالازی و همکاران بر روی پیل های سوختی جامد مسطح انجام شده است [15].

مطالعات پیشین نشان می دهد که در طراحی این سیستم ترکیبی توابع هدف مختلفی را می توان در نظر گرفت. یکی از مسایل مهمی که در کارهای پیشین به آن پرداخته نشده است، تعیین سهم تاثیر گذاری هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع هدف می باشد. در این مقاله بهینه سازی چند هدفه پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز با توابع بیشینه کردن بازده انرژی الکتریکی سیستم و کمینه کردن هزینه کل سرمایه گذاری سیستم انجام شده است؛ جهت خوراک دهی این سیستم ترکیبی از گاز زیستی تولید شده توسط هاضم های بی هوازی استفاده شده است زیرا امروزه این مسایل به صورت خاص برای خوراک گاز زیستی اهمیت بیشتری دارد. در ابتدا هر یک از اجزای سیستم به صورت جداگانه مدل و اعتبار سنجی شده و سپس هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه، توسط الگوریتم بهینه سازی ژنتیک تعیین شده اند. سپس از بهینه سازی چند هدفه جهت تعیین پارامترهای بهینه طراحی استفاده شده است. در این مقاله اثر تغییرات همزمان چندین ورودی بر خروجی به همراه تعیین سهم هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع هدف مشخص شده است که بدین منظور از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل⁶ استفاده شده است. در این روش علاوه بر این که میزان تاثیر هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع هدف مشخص می شود، تغییرات این توابع نیز نسبت به تغییرات همزمان ورودی ها یا همان پارامترهای طراحی نیز سنجیده می شود. نتایج به دست آمده از این مقاله می تواند برای به کارگیری این سیستم جهت تولید انرژی از گاز زیستی تولیدی در تصفیه خانه های فاضلاب شهری به کار گرفته شود.

2- مدل سازی و روش شناسی

در این بخش ابتدا به مدل سازی اجزای تشکیل دهنده سیستم ترکیبی پرداخته می شود و سپس معادلات حاکم بر کل سیستم بیان می شود. اجزای سیستم شامل پیل سوختی اکسید جامد، کمپرسور هوا و سوخت، مبدل حرارتی، محفظه احتراق، میکروتوربین، ژنراتور، اینورتر، واحد سولفورزدایی و پمپ می باشد.

2-1- مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد

ساختار تک سلول پیل سوختی اکسید جامد در شکل (1) نشان داده شده است. این هندسه از 6 حجم کنترل تشکیل شده است که شامل صفحات نگه دارنده (CV_1)، کانال های سوخت (CV_2)، آند (CV_3)، الکترولیت (CV_4)، کاتد (CV_5) و کانال هوا (CV_6) است [16]. در این سلول سوخت و هوا به

میزان مصرف سوخت های فسیلی و همچنین انتشارات گازهای گلخانه های را کاهش دهد. این گاز با هضم بی هوازی¹ جریان های حاوی مواد آلی مانند فاضلاب، فضولات حیوانی، پسماندهای غذایی و یا لندفیل ها ایجاد می گردد. گاز زیستی تولید شده عمدتاً شامل 50-70 درصد متان، 30-50 درصد دی اکسید کربن و 0-6 درصد آب می باشد. عمده ترین آلاینده های موجود در گاز زیستی شامل هیدروژن سولفید، آب و ترکیبات سیلیکونی می باشد [1].

تولید انرژی توسط پیل های سوختی از آینده بسیار خوبی برخوردار است، زیرا پیل های سوختی از خوراک های متنوعی به عنوان سوخت استفاده می کنند و به علت تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی موجود در سوخت به برق (بدون احتراق) دارای بازده بالایی هستند [2]. در میان پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد² بهترین گزینه جهت کار کردن با گاز زیستی است. زیرا دمای عملیاتی بالایی دارد (نیاز به الکترودهای فلزی گران قیمت ندارد)، نسبت به برخی از آلاینده ها مقاوم بوده، امکان رفرمینگ داخلی در آن وجود دارد و همچنین دارای بازده بالایی می باشد. یی و همکاران نشان دادند که استفاده از گاز زیستی به جای متان، بازده پیل سوختی اکسید جامد را در بدترین شرایط 1.1 درصد کاهش می دهد. استنیقرس و همکاران نشان دادند در صورت استفاده از گاز زیستی تنها با 20 درصد متان، باز هم پیل سوختی دارای توان خروجی بالا و قابل توجهی می باشد [3].

هدف از ترکیب پیل سوختی با سایر سیستم های تولید توان، بدست آوردن سیستمی است که بتوان با استفاده از پتانسیل های موجود، به بازده بالاتری رسید. این هدف با استفاده از گازهای خروجی از پیل سوختی محقق می شود. در این بین پیل سوختی اکسید جامد به این علت که جریان گازهای خروجی از آن دارای کیفیت حرارتی بالایی می باشد، گزینه بسیار مناسبی جهت ترکیب با توربین گازی می باشد [4-7]. این ترکیب امروزه توجهات بسیاری از محققان را به سمت خود جلب نموده است. در مرجع [8] به مهمترین کارهای انجام شده در زمینه مدل سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز پرداخته شده است.

یکی از معروفترین نمونه های اولیه پیل سوختی اکسید جامد- توربین گازی در دانشگاه کالیفرنیا ساخته شد. توان پیل سوختی اکسید جامد در این سیستم 200 کیلووات و میکروتوربین 20 کیلووات بوده است. بازده الکتریکی این سیستم از لحاظ عملی 55 درصد بوده است. همچنین پیش بینی می شده است که بازده الکتریکی این سیستم به 70 درصد نیز برسد [9].

روش های کلی رفرمینگ گاز زیستی جهت استفاده آن به عنوان سوخت در پیل های سوختی، شامل رفرمینگ خشک³ با دی اکسید کربن، رفرمینگ با بخار و رفرمینگ با هوا می باشد. سورانات و همکاران اشاره کردند که بخار همچنان بهترین و متداول ترین روش برای رفرمینگ می باشد [10]. پیرونرگل و همکاران نشان دادند که استفاده از بخار به عنوان عامل رفرمینگ سبب می شود تا بیشترین چگالی توان به دست آید [11].

مطالعات بسیاری سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز را از نظر انرژی و اکسرژی⁴ مورد بررسی قرار داده اند. لیژیانگ دان و همکاران این سیستم ترکیبی را از نظر انرژی و با تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار دادند [12].

به هنگام تحلیل یک واحد تولید توان می بایستی جنبه های اقتصادی نیز

¹ Anaerobic digestion

² Solid Oxide Fuel Cell

³ Dry Reforming

⁴ Exergy

⁵ Thermo-Economic

⁶ Sobol

$$X_{O_2} = \frac{2\lambda_{air}X_{O_{2,in}} - X_{O_{2,in}}^2}{2(\lambda_{air} - X_{O_{2,in}})} \quad (11)$$

$$X_{N_2} = \frac{2\lambda_{air}X_{N_{2,in}} - X_{O_{2,in}} - X_{N_{2,in}}}{2(\lambda_{air} - X_{O_{2,in}})} \quad (12)$$

ولتاژ عملکردی سلول با کم کردن تمامی افت‌ها (فعال‌سازی، اهمیک و غلظتی) از ولتاژ استاندارد نرنست در دما و فشار عملکردی داده شده بدست خواهد آمد. افت‌ها تابعی از جریان، دما و فشار عملکردی و همچنین ساختار سلول می‌باشد. در معادله (13) ولتاژ مدار باز پیل سوختی محاسبه می‌شود:

$$V_{OCV} = \frac{H_{H_2O} - H_{H_2} - 0.5 \times H_{O_2}}{2F} + \frac{T \times (S_{H_2O}^0 - S_{H_2}^0 - 0.5 \times S_{O_2}^0)}{2F} + RT \frac{\ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}\right)}{2F} \quad (13)$$

ولتاژ عملکردی سیستم از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = V_{OCV} - (\sum_j \eta_{ohm,j} + \eta_{conc,3} + \eta_{conc,5} + \eta_{act,3} + \eta_{act,5}) \quad j = 1, 3, 4, 5 \quad (14)$$

$L_{j,opt}$ به طول فعال ناحیه سه‌گانه، جایی که واکنش‌های شیمیایی واقعاً در آن‌جا اتفاق می‌افتد اشاره می‌کند. نیم‌واکنش‌های الکتروشیمیایی در مکان‌هایی اتفاق می‌افتد که جمع تمام افت‌های ولتاژ در الکتروده‌های آند و کاتد به کمینه مقدار خود برسد. در مطالعه حاضر الکترودها ترکیبی از رساناهای یونی و الکترونی در نظر گرفته شده‌اند. افت اهمیک با توجه به قانون اهم از طریق روابط (15) تا (20) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{ohm,j} = I\beta_j, \quad j = 1, 4 \quad (15)$$

$$\eta_{ohm,j} = \frac{I(A_{j,opt} - L_y L_z) L_{j,opt}}{2A_{j,opt} L_y L_z (1 - \phi_j) \sigma_4} + \frac{I(L_j - L_{j,opt})}{L_y L_z (1 - 1.8 \phi_j) \sigma_j} \quad j = 3, 5 \quad (16)$$

عبارت اول سمت راست معادله (16)، افت اهمیک را در نواحی سه‌گانه فعال و در مکانی که مقاومت هدایت یونی غالب است بیان می‌کند. عبارت دوم همین معادله به افت اهمیک مربوط به سایر مکان‌های آند و کاتد، مکان‌هایی که مقاومت هدایت الکترونی غالب است اشاره می‌کند. در معادلات بالا مقاومت اتصال‌دهنده و الکتروولت β_1 و β_2 با توجه به جنس مواد و هندسه آن‌ها از طریق معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\beta_1 = \frac{L_1}{L_y L_z \sigma_1} + \frac{L_2}{(1+n_{ch}) L_t L_y \sigma_1} + \frac{L_6}{(1+n_{ch}) L_t L_y \sigma_1} \quad (17)$$

$$\beta_4 = \frac{L_4}{L_y L_z \sigma_4} \quad (18)$$

$A_{j,opt}$ مساحت ناحیه فعال می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{j,opt} = (1 + \frac{2L_{j,opt}\phi_j}{D_{p,j}}) L_y L_z \quad (19)$$

$D_{p,j}$ میانگین قطر حفره‌های موازی در الکترودها را نشان می‌دهد و توسط معادله زیر به دست می‌آید:

$$D_{p,j} = D_{w,j} \phi_j / (1 - \phi_j) \quad (20)$$

فشار نواحی سه‌گانه که به فشار جزیی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در ناحیه فعال سه‌گانه اشاره می‌کند توسط کیم و اوگیر و همکاران از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود [17]:

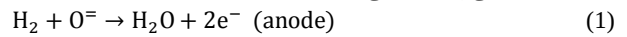
$$p_{H_2O,TPB} = p_f X_{H_2O} + \frac{RT\psi_3}{2FD_3\phi_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \quad (21)$$

$$p_{H_2,TPB} = p_f X_{H_2} - \frac{RT\psi_3}{2FD_3\phi_3} \frac{L_3 I}{L_y L_z} \quad (22)$$

$$p_{O_2,TPB} = (p_{air} - X_{O_2} p_{air}) \exp\left(\frac{RT\psi_3}{4FD_5\phi_5 p_{air}} \frac{L_5 I}{L_y L_z}\right) \quad (23)$$

ترتیب وارد آند و کاتد می‌شوند تا به‌صورت مجزا در ناحیه تداخل رسانای یونی/رسانای الکترونی/رسانای گازی¹ در واکنش‌های الکتروشیمیایی شرکت کنند. در این قسمت از مدل‌سازی، هیدروژن خالص و هوا به ترتیب به‌عنوان سوخت و اکسیدکننده در نظر گرفته شده است.

در پیل سوختی اکسید جامد دو واکنش الکتروشیمیایی در الکترودهای آند و کاتد انجام می‌شود که توسط معادلات (1) و (2) بیان شده است. به علاوه واکنش کلی پیل سوختی نیز توسط معادله (3) بیان شده است.



هیدروژن به لایه آند و اکسیژن به لایه کاتد توسط کانال‌های سوخت و هوا وارد می‌شوند. براساس واکنش‌های الکتروشیمیایی، دبی مولی هیدروژن در ابتدا و انتهای کانال سوخت و همچنین میزان مصرف آن براساس جریان عملکردی پیل سوختی به‌دست می‌آید:

$$\dot{n}_{H_2,in} = \frac{I}{nF Y_f} = \frac{I}{2FY_f} \quad (4)$$

$$\dot{n}_{H_2,out} = \frac{I}{nF} \left(\frac{1}{Y_f} - 1 \right) = \frac{I}{2F} \left(\frac{1}{Y_f} - 1 \right) \quad (5)$$

در معادلات بالا n تعداد الکترون‌هایی است که به ازای هر مول واکنش-دهنده هیدروژن و یا اکسیژن منتقل می‌شود که این عدد در الکتروده آند برابر 2 و در الکتروده کاتد برابر 4 است. F در معادلات بالا ثابت فارادی را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه دبی مولی اکسیژن در ابتدا و انتهای کانال سوخت و همچنین میزان اکسیژن مصرفی از طریق معادلات زیر به‌دست می‌آید:

$$\dot{n}_{O_2,in} = \frac{1}{nF} \lambda_{air} = \frac{1}{4F} \lambda_{air} \quad (6)$$

$$\dot{n}_{O_2,out} = (\lambda_{air} - 1) \times \frac{1}{nF} = (\lambda_{air} - 1) \times \frac{1}{4F} \quad (7)$$

مقدار نیتروژن ورودی و خروجی در کانال هوا با فرض آن‌که هوا متشکل از اکسیژن و نیتروژن باشد، برابر است با:

$$\dot{n}_{N_2,in} = \dot{n}_{N_2,out} = \frac{I \lambda_{air} X_{N_{2,in}}}{4F X_{O_{2,in}}} \quad (8)$$

در کانال سوخت کسر مولی میانگین برابر است با:

$$X_{H_2O} = \frac{Y_f}{2} \quad (9)$$

$$X_{H_2} = 1 - \frac{Y_f}{2} \quad (10)$$

کسر مولی متوسط اکسیژن و نیتروژن در کانال هوا برابر است با:

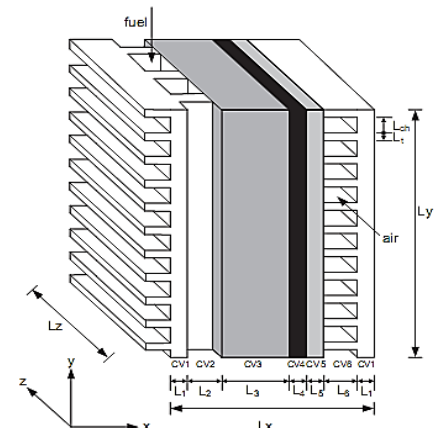


Fig. 1 The 3D configuration of a planar single SOFC [16]

شکل 1 شمای سه‌بعدی تک سلول پیل سوختی اکسید جامد [16]

¹ Three phase boundary region

$$K_{pr} = \frac{P_{CO} \times P_{H_2}^3}{P_{H_2O} \times P_{CH_4}} = \frac{n_{CO} \times n_{H_2}^3}{n_{H_2O} \times n_{CH_4}} \times \frac{1}{n_t} \times \left(\frac{p_t}{p_0}\right)^2 \quad (36)$$

$$K_{ps} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} = \frac{n_{CO_2} \times n_{H_2}}{n_{CO} \times n_{H_2O}} \quad (37)$$

ارتباط بین ثوابت تعادل و دما از طریق رابطه (38) بیان می‌شود:

$$\log k = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (38)$$

ثوابت معادله (38) از مرجع [12] استخراج شده است. اگر فرض کنیم x مقدار مصرف متان در واکنش رفرمینگ متان، y مقدار مصرف مونواکسیدکربن در واکنش شیف و z مقدار مصرف هیدروژن در واکنش کلی پیل سوختی باشد و همچنین ضریب مصرف سوخت برابر γ_f ، با توجه به ثوابت تعادل، معادلات زیر به دست می‌آید که با حل همزمان آن‌ها می‌توان مقدار مصرف متان، مونواکسیدکربن و همچنین هیدروژن را محاسبه نمود و در نهایت دبی گازهای خروجی از استک را محاسبه کرد.

$$K_{pr} = \frac{(3x + y - z)^3 (x - y)}{(n_{CH_4}^{in} - x)(n_{H_2O}^{in} - x - y + z)(n_{H_2O}^{in} + n_{CH_4}^{in} + 2x)^2} \times \left(\frac{P_t}{P_0}\right)^2 \quad (39)$$

$$K_{ps} = \frac{y(3x + y - z)}{(x - y)(n_{H_2O}^{in} - x - y + z)} \quad (40)$$

$$z = \gamma_f \times (3x + y) \quad (41)$$

2-3- مدل سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز

شماتیک سیستم ترکیبی در نظر گرفته شده در "شکل 2" نشان داده شده است.

جریان (1) مربوط به هوای ورودی، جریان (15) گاز زیستی ورودی، جریان (14) آب، جریان (11) بخار ورودی به پیل سوختی و جریان (5) گازهای حاصل از احتراق می‌باشد. گازهای حاصل از احتراق پس از خروج از توربین گاز وظیفه پیش گرمایش هوا و سوخت ورودی به پیل سوختی و همچنین تولید بخار مورد نیاز برای رفرمینگ سوخت را برعهده دارند. معادلات مربوط به کمپرسور عبارتند از [12]:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_1}{\eta_c} \times \left[\left(\beta_c^{\frac{K_a-1}{K_a}} \right) - 1 \right] \quad (42)$$

$$T_{13} = T_{12} + \frac{T_{12}}{\eta_c} \times \left[\left(\beta_c^{\frac{K_a-1}{K_a}} \right) - 1 \right] \quad (43)$$

$$P_{c,air} = n_{air} \times C_{p,air} \times (T_2 - T_1) \quad (44)$$

$$P_{c,fuel} = n_{fuel} \times C_{p,fuel} \times (T_{13} - T_{12}) \quad (45)$$

معادلات مربوط به توربین شامل معادلات (46) و (47) می‌باشد [12]:

$$T_6 = TIT \times \left[1 - \eta_{GT} \times \left(1 - \beta_G^{\frac{K_f-1}{K_f}} \right) \right] \quad (46)$$

$$W_{GT} = (n_{air} + n_{fuel}) \times C_{p,mix} \times (TIT - T_6) \quad (47)$$

معادله پمپ [19]:

$$W_{pump} = \frac{m_w \times \Delta p_w}{\rho_w \times \eta_{pump}} \quad (48)$$

از گازهای داغ خروجی از توربین به منظور پیش گرم کردن سوخت، هوا و همچنین تولید بخار استفاده می‌شود زیرا جهت تولید هیدروژن، به بخار

ضرایب نفوذ در الکتروند آند و کاتد از طریق معادلات زیر به دست می‌آید:

$$D_3 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{H_2} + M_{H_{2O}})^{1/2}}{p_f (2M_{H_2} M_{H_{2O}})^{1/2} (v_{H_2}^{1/3} v_{H_{2O}}^{1/3})^2} \quad (24)$$

$$D_5 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{O_2} + M_{N_2})^{1/2}}{P_{air} (2M_{O_2} M_{N_2})^{1/2} (v_{O_2}^{1/3} v_{N_2}^{1/3})^2} \quad (25)$$

افت‌های غلظتی در الکتروند آند و کاتد توسط اوگیر و همکاران از طریق روابط زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{conc,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (26)$$

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{H_{2O,TPB}}}{P_{H_2,TPB} P_{H_{2O}}} \right) \quad (27)$$

در این مطالعه برای محاسبه افت فعال سازی از معادله بالتر- والمر استفاده شده است:

$$i_j = i_{0,j} \left[\exp \left(\frac{\alpha_c n F}{RT} \eta_{act,j} \right) - \exp \left(- \frac{(1-\alpha_c) n F}{RT} \eta_{act,j} \right) \right], j = 3, 5 \quad (28)$$

افت‌های فعال سازی که انرژی مورد نیاز برای فعال شدن نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی را فراهم می‌کند براساس معادله بالتر- والمر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{act,j} = \frac{RT}{\alpha_c n F} \sinh^{-1} \left(\frac{i_j}{2i_{0,j}} \right), j = 3, 5 \quad (29)$$

n در معادله بالا برابر 2 است که ضریب انتقال بار را نشان می‌دهد و α_c برابر 0.5 است. چگالی تبادل جریان نیز از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$i_{0,j} = \frac{RT}{nF} \delta_j \exp \left(\frac{-E_j}{RT} \right), j = 3, 5 \quad (30)$$

توان پیل سوختی نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_E = VI \quad (31)$$

بازده الکتریکی برای این ساختار از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{sofc} = \frac{V \times i \times N \times A}{n_{H_2} \times LHV_f} \quad (32)$$

مقادیر پارامترهای فیزیکی و ثابت‌هایی که در این مدل برای رسم نمودار قطبش تک سلول پیل سوختی اکسید جامد استفاده شده است، در مرجع [16] آمده است.

2-2- مدل سازی رفرمر داخلی

سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز در این مقاله براساس رفرمر داخلی است. دمای استک پیل سوختی اکسید جامد به راحتی اجازه می‌دهد تا واکنش‌های شیف و رفرمینگ در آن صورت پذیرد. به علاوه در رفرمینگ داخلی، واکنش گرمای الکتروشیمیایی حرارت آزاد می‌کند و این حرارت توسط رفرمینگ متان مصرف می‌شود. با ورود گاز متان به پیل سوختی دما بالا و در حضور کاتالیست نیکل، واکنش‌های رفرمینگ و شیف برای احیای گاز متان و تولید هیدروژن در قسمت الکتروند آند پیل سوختی انجام می‌شود [18]. واکنش‌هایی که در رفرمر رخ می‌دهند عبارتند از:



واکنش (33) واکنش رفرمینگ متان و واکنش (34) واکنش شیف می‌باشد. به علاوه واکنش کلی پیل سوختی نیز عبارت است از:



اگر فرض کنیم واکنش‌ها به حالت تعادل شیمیایی رسیده باشند، آن‌گاه معادلات تعادل شیمیایی برابر است با:

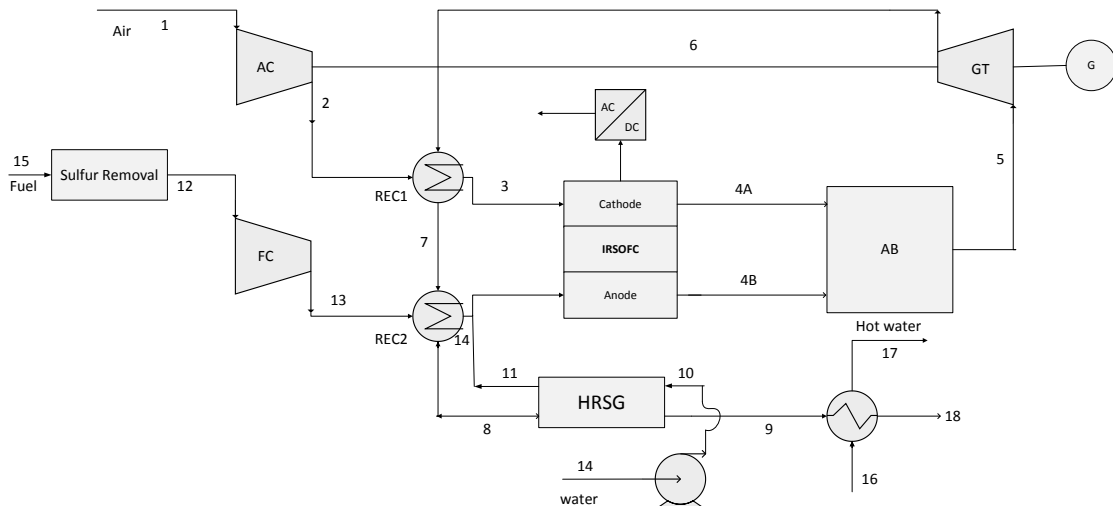


Fig. 2 The configuration of SOFC-GT hybrid system

شکل 2 شمای سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسیدجامد- توربین گاز

انرژی ورودی به استک پیل سوختی برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{inlet} &= \left(\sum_i \dot{n}cp_i \right) \Big|_{inlet, Anode} \times (T - T_0) \\ &+ n_{H_2O, inlet Anode} H_{H_2O}(T_{inlet}, x_{H_2O}, P_{H_2O}) \\ &+ \left(\sum_i \dot{n}cp_i \right) \Big|_{inlet, cathode} \end{aligned} \quad (58)$$

میزان انرژی خالص تولیدی توسط واکنش‌های رفرمینگ، شیف و الکتروشیمیایی درون آند پیل سوختی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{E}_{reac} = -(z\Delta H_{H_2} + y\Delta H_{shift} + x\Delta H_{ref}) \quad (59)$$

نرخ انرژی خروجی از پیل سوختی برابر است با:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{outlet} &= \left(\sum_i \dot{n}cp_i \right) \Big|_{out} \times (T_{out} - T_0) \\ &+ m_{H_2O, outlet Anode} H_{H_2O} + V_{cell} \\ &\times I \times N \end{aligned} \quad (60)$$

انرژی خروجی از پیل سوختی، همان انرژی ورودی به محفظه احتراق است. به علاوه سوخت‌های باقی‌مانده از پیل سوختی شامل متان، هیدروژن و کربن منواکسید نیز در محفظه احتراق، محترق می‌شوند. اگر فرض شود که احتراق به صورت کامل انجام می‌شود، انرژی آزادشده در محفظه احتراق برابر است با:

$$\dot{E}_{reac, B} = \dot{n}_{CH_4} \Delta H_{CH_4} + \dot{n}_{CO} \Delta H_{CO} + \dot{n}_{H_2} \Delta H_{H_2} \quad (61)$$

گازهای خروجی از محفظه احتراق شامل اکسیژن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و آب است. با یافتن میزان گازهای خروجی از محفظه احتراق (با توجه به واکنش احتراق کربن منواکسید، متان و هیدروژن) می‌توان دمای ورودی به توربین را محاسبه نمود:

$$T_5 = \frac{E_{outlet} + abs(E_{burnet})}{\sum_i \dot{n}_i cp_i} + T_0 \quad (62)$$

در رابطه فوق i شامل گازهای اکسیژن، دی‌اکسید کربن، نیتروژن و بخار آب خروجی از محفظه احتراق است. در نهایت بازده سیستم ترکیبی از طریق روابط زیر قابل محاسبه است:

$$W_{net} = W_{sofc} + W_{GT} - P_{c, air} - P_{c, fuel} - W_{pump} \quad (63)$$

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{\dot{n}_{CH_4} \times LHV_{CH_4}} \quad (64)$$

نیازمند هستیم. واحد تولیدکننده بخار از سه مبدل تشکیل شده است. یکی از مبدل‌ها آب ورودی را پیش گرم می‌کند، مبدل دیگر آب گرم شده را تبدیل به بخار آب می‌کند و در نهایت مبدل آخر دمای بخار آب را افزایش می‌دهد و بخار فوق گرم تولید می‌کند. دمای گاز داغ ورودی به سیستم همان دمای جریان (8) است و آب ورودی نیز به این واحد در دمای محیط وارد می‌شود. دمای متوسط لگاریتمی و سطح هر مبدل نیز از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود [20]:

• مبدل آب گرم

$$A_{SH} = \frac{\dot{n}_{H_2O} \times Cp_{H_2O}(T_{C4} - T_{C3})}{U_{sh} \times \Delta T_{LMTD, SH}} \quad (49)$$

• مبدل تبخیرکننده

$$A_{ev} = \frac{\dot{n}_{H_2O} \times H_{fg}}{U_{ev} \times \Delta T_{LMTD, ev}} \quad (50)$$

• مبدل بخار داغ - گاز

$$A_{ev} = \frac{\dot{n}_{CH_4} \times C_{CH_4} \times (T_{C2} - T_{C1})}{U_{ec} \times \Delta T_{LMTD, ec}} \quad (51)$$

ضرایب عملکرد هر دو رکوپراتور که جهت پیش گرم کردن جریان سوخت و هوا به کار گرفته می‌شوند نیز از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [21]:

$$\eta_{rec1} = \frac{T_3 - T_2}{T_6 - T_2} \quad (52)$$

$$\eta_{rec2} = \frac{T_{14} - T_{13}}{T_7 - T_{13}} \quad (53)$$

4-2- موازنه انرژی سیستم ترکیبی

موازنه انرژی حول رکوپراتور یک و دو به شرح زیر است:

$$T_7 = T_6 - \frac{\dot{n}_{air} cp_{air}(T_3 - T_2)}{\dot{n}_{tur} cp_{mix}} \quad (54)$$

$$T_8 = T_7 - \frac{\dot{n}_{CH_4} cp_{CH_4}(T_{14} - T_{13})}{\dot{n}_{tur} cp_{mix}} \quad (55)$$

مساحت موردنیاز جهت انتقال حرارت در هر دو مبدل از طریق روابط زیر به دست می‌آید:

$$A_{rec1} = \frac{\dot{n}_{air} \times Cp_{air} \times (T_3 - T_2)}{U \times \Delta T_{1, LMTD}} \quad (56)$$

$$A_{rec2} = \frac{\dot{n}_{ch4} \times Cp \times (T_{14} - T_{13})}{U \times \Delta T_{2, LMTD}} \quad (57)$$

با فرض غلظت متوسط 500 ppm برای هیدروژن سولفید در گاز زیستی تولید شده توسط هاضم بی‌هوازی موجود در تصفیه‌خانه‌ها و جذب آن توسط بستری از اکسید آهن، هزینه مربوط به واحد سولفورزدایی محاسبه شده است [24]. بنابراین کل هزینه سرمایه گذاری از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{\text{tot}} = C_{\text{SOFC}} + Z_{\text{AC}} + Z_{\text{FC}} + Z_{\text{CC}} + Z_{\text{generator}} + Z_{\text{rec}} + Z_{\text{hrsg}} + Z_{\text{pump}} + Z_{\text{sul}} \quad (80)$$

با در نظر گرفتن نرخ تنزیل (i) 8 درصد و با فرض این که عمر سیستم ترکیبی 15 سال بوده و در سال 8640 ساعت فعالیت کند هزینه سالانه از طریق معادله (81) محاسبه می‌شود:

$$Z_{\text{annual}} = Z_{\text{tot}} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (81)$$

هزینه تعمیر و نگهداری به صورت شش درصد هزینه سالیانه در نظر گرفته شده و به هزینه سالیانه افزوده می‌شود [23]. هزینه همتراز شده انرژی نیز با توجه به میزان انرژی تولید شده در هر سال (Et) از طریق رابطه (82) محاسبه می‌شود:

$$COE = \frac{Z_{\text{annual}}}{E_t} \quad (82)$$

3- بهینه‌سازی سیستم ترکیبی

در این قسمت دو تابع هدف شامل بازده انرژی (که می‌بایستی بیشینه شود) و هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم (که می‌بایستی کمینه شود) در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف اول همان معادله (64) می‌باشد که می‌بایستی بیشینه شود. تابع هدف دوم هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم، معادله (80) می‌باشد که می‌بایستی کمینه شود. پارامترهای طراحی که جهت بهینه‌سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز به کار گرفته شده‌اند شامل نسبت تراکم کمپرسور سوخت و هوا، بازده ایزنتروپیک توربین، جریان پیل سوختی، ضریب مصرف سوخت و نسبت بخار به متان ورودی می‌باشد. در ابتدا توسط الگوریتم ژنتیک هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه بهینه می‌شوند و سپس بهینه‌سازی چند هدفه صورت می‌گیرد. برخلاف بهینه‌سازی تک هدفه، پاسخ بهینه‌سازی چند هدفه، یک نقطه مشخص نمی‌باشد. در روش NSGA-II در بهینه‌سازی چند هدفه مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به دست می‌آید. این مجموعه پاسخ‌های بهینه تشکیل نمودار پارتو¹ می‌دهند. در این مقاله از نرم‌افزار متلب جهت بهینه‌سازی استفاده شده است. در جدول (1) محدوده پارامترهای طراحی برای مسئله بهینه‌سازی و یکسری از قیود آن آورده شده است.

3-1- انتخاب نقطه بهینه عملیاتی در سیستم ترکیبی

در بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب نقطه بهینه از میان مجموعه نقاط بدست آمده در نمودار بی‌تفاوتی یک فرایند تصمیم‌گیری است. روش‌های متعددی برای فرایند تصمیم‌گیری وجود دارد. قبل از هرگونه فرایند تصمیم‌گیری می‌بایستی ابعاد توابع هدف در نمودار پارتو را بدون بعد کرد. روش‌های متعددی برای بی‌بعدسازی وجود دارد که می‌توان به بی‌بعدسازی خطی²، بی‌بعدسازی فازی³ و بی‌بعدسازی اقلیدسی⁴ اشاره کرد [25]. روش‌های متعددی نیز برای فرایند تصمیم‌گیری وجود دارد که می‌توان به روش فازی

در حالت کلی روش حل مسئله به گونه‌ای است که در ابتدا دمای عملکرد پیل سوختی حدس زده می‌شود و سپس انرژی ورودی به پیل سوختی و انرژی خروجی از آن با توجه به مجموعه معادلات موازنه انرژی نوشته شده محاسبه می‌شود. در صورتی که انرژی ورودی و خروجی با هم برابر باشند دمای حدس زده شده درست است، در غیر این صورت دمای دیگری حدس زده می‌شود.

2-5- هزینه سیستم ترکیبی

تمامی هزینه‌های استفاده شده با استفاده از ضریب شاخص هزینه به‌روز شده‌اند [22]. جهت به روزرسانی، شاخص سال مورد نظر به شاخص سالی که رابطه هزینه هر تجهیز آورده شده تقسیم و سپس نتیجه حاصله در قیمت هر تجهیز ضرب شده است. محاسبات هزینه مربوط به پیل سوختی اکسید جامد از معادلات زیر تبعیت می‌کند [13]:

$$C_{VP} = 10^{K_1 + K_2 \log(\text{Thermalload})} \quad (65)$$

$$C_{VBM} = C_{VP} \cdot f_{BM} \cdot f_{\text{pressure}} \quad (66)$$

$$C_{\text{Cell}} = A_{\text{Cell}} \cdot C_{\text{Spec}} \quad (67)$$

$$N_{\text{Stack}} = \frac{N_{\text{Cells}}}{N_{\text{Max Cells}}} \quad (68)$$

$$C_{\text{FCstack}} = f_{BM} \cdot (C_{\text{cell}} \cdot N_{\text{cells}} + 2N_{\text{stack}} \cdot A_{\text{cell}} \cdot f_{hs} \cdot C_{h,\text{spec}}) \quad (69)$$

$$C_{\text{inverter}} = 10^5 \left(\frac{P_{\text{SOFC}}}{500} \right)^{0.7} \quad (70)$$

$$C_{\text{SOFC}} = f_{\text{actualization}} \cdot (C_{VBM} + C_{\text{FCstack}}) + C_{\text{Inverter}} \quad (71)$$

محاسبه هزینه کمپرسور هوا و سوخت به ترتیب در معادلات (72) و (73) آورده شده است [23]:

$$Z_{AC} = \frac{39.5 - \dot{m}_a}{0.9 - \eta_{AC}} \left(\frac{p_{dc}}{p_{suc}} \right) \ln \left(\frac{p_{dc}}{p_{suc}} \right) \quad (72)$$

$$Z_{FC} = 91562 \left(\frac{W_{FC}}{445} \right)^{0.67} \quad (73)$$

هزینه مربوط به محفظه احتراق [23]:

$$Z_{CC} = \left(\frac{46.0 \dot{m}_{4A}}{0.995 - \frac{p_5}{p_4}} \right) [1 + \exp(0.018T_5 - 26.4)] \quad (74)$$

محاسبات مربوط به هزینه توربین و ژنراتور نیز از طریق روابط (75) و (76) محاسبه شده است [23]:

$$Z_T = W_{GT} [1318.5 - 98.328 \ln(W_{GT})] \quad (75)$$

$$Z_{\text{generator}} = 26.18 (W_{GT})^{0.95} \quad (76)$$

هزینه مربوط به رکوپراتور و واحد تامین‌کننده بخار و پمپ نیز از طریق معادلات (77) و (78) و (79) به دست می‌آید [23]:

$$Z_{\text{rec}} = 2290 (A_{\text{rec}})^{0.85} \quad (77)$$

$$Z_{\text{hrsg}} = 8500 + 406 (A_{\text{hrsg}})^{0.85} \quad (78)$$

$$Z_{\text{pump}} = 705.48 \times W_{\text{pump}}^{0.71} \left(1 + \frac{0.2}{1 - \eta_{\text{pump}}} \right) \quad (79)$$

غلظت هیدروژن سولفید در گاز زیستی به دست آمده از هاضم‌های بی-هوازی تصفیه‌خانه‌ها از 10-1200 ppm متغیر است و می‌بایستی غلظت هیدروژن سولفید ورودی به پیل سوختی اکسید جامد کمتر از 4ppm باشد.

¹ Pareto

² Linear non-dimensionalization

³ Fuzzy non-dimensionalization

⁴ Euclidian non-dimensionalization

f_0 عددی ثابت است و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_0 = \int f(x)dx \quad (88)$$

بخش‌های مختلف رابطه (87) را می‌توان با استفاده از انتگرال‌های چندگانه زیر محاسبه نمود:

$$f_i(x_i) = -f_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x)dx_{\sim i} \quad (89)$$

$$f_{ij}(x_i, x_j) = -f_0 - f_i(x_i) + \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x)dx_{\sim ij} \quad (90)$$

$dx_{\sim i}$ انتگرال روی تمام متغیرها غیر از x_i است و $dx_{\sim ij}$ انتگرال بر تمام متغیرها به جز x_i و x_j را نشان می‌دهد. واریانس تابع عبارت است از:

$$D = \int_{\Omega} f^2(x)dx - (f_0)^2 \quad (91)$$

واریانس‌های جزئی را نیز می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s})dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (92)$$

با استفاده از تحلیل واریانس، واریانس به بخش‌های جزئی قابل تجزیه است.

$$D = f_0 + \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} D_{ij} + \dots + D_{1,2,3,\dots,k} \quad (93)$$

حساسیت مرتبه اول $S_{1,2,3,\dots,k}$ از تقسیم واریانس هر گروه از متغیرها به واریانس کلی به صورت زیر به دست می‌آید که در آن $S_{i_1, \dots, i_s}$ درجه حساسیت خروجی به $x_{i_1}, \dots, x_{i_s}$ نامیده می‌شود که تاثیر آن بر خروجی را نشان می‌دهد.

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, \dots, i_s}}{D}, 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_s \leq k \quad (94)$$

حساسیت کلی متناظر به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_{i_1, \dots, i_s}^{\text{tot}} = \frac{D - D'_{i_1, \dots, i_s}}{D} \quad (95)$$

واریانس بقیه پارامترها به جز $x_{i_1}, \dots, x_{i_s}$ است.

جدول 1 محدوده متغیرهای طراحی برای مسئله بهینه‌سازی

Table 1 Design parameters domain for optimization problem

دلیل	قید
بازه متداول برای کمپرسور و دسترسی تجاری	$2 \leq \beta_C \leq 10$
بازه متداول برای کمپرسور و دسترسی تجاری	$0.6 \leq \eta_C \leq 0.9$
بازه متداول برای توربین و دسترسی تجاری	$0.6 \leq \eta_{GT} \leq 0.9$
با توجه به نمودار قطبش برای پیل سوختی	$150 \leq I \leq 300$
کمینه و بیشینه مقدار برای ضریب مصرف سوخت	$0.6 \leq U_f \leq 0.9$
کمینه و بیشینه نسبت بخار به متان	$2 \leq S_c \leq 4$
محدودیت دمای مواد	$TIT \leq 1550 \text{ K}$
محدودیت دمای مواد	$T_{SOFC} \leq 1400 \text{ K}$
جهت انجام شدن انتقال حرارت در مبدل یک	$T_6 > T_7$
جهت انجام شدن انتقال حرارت در مبدل یک	$T_6 > T_3$
جهت انجام شدن انتقال حرارت در مبدل یک	$T_7 > T_2$
جهت انجام شدن انتقال حرارت در مبدل دو	$T_7 > T_{14}$
جهت انجام شدن انتقال حرارت در مبدل دو	$T_8 > T_{13}$
جهت جلوگیری از تشکیل کربنیک اسید در گازهای خروجی	$T_9 > 370$

بلمان‌زاده^۱، روش لین مپ^۲ و روش تاپسیس^۳ اشاره کرد. در این مقاله از روش بی‌بعدسازی اقلیدسی و فرایند تصمیم‌گیری لین‌مپ استفاده شده است.

• روش بی‌بعدسازی اقلیدسی

در این روش جهت بی‌بعدسازی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$F_{ij}^n = \frac{F_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (F_{ij})^2}} \quad (83)$$

F_{ij} نشان‌دهنده مقدار توابع هدف در پارتو می‌باشد که در آن i بیانگر هر نقطه روی نمودار و j نشان‌دهنده نوع تابع هدف می‌باشد.

• روش تصمیم‌گیری لین‌مپ

همان‌طور که مشخص است در بهینه‌سازی چندهدفه غیرممکن است که هر یک از توابع به دست آمده را در بهترین نقطه به دست آمده در بهینه‌سازی تک هدفه در اختیار داشت. بنابراین نقطه ایده‌آل بر روی نمودار پرتو وجود ندارد. در این روش بعد از بی‌بعدسازی اقلیدسی توابع، فاصله هر یک از نقاط پرتو از نقطه ایده‌آل از طریق رابطه (84) زیر به دست می‌آید، در این رابطه n بیانگر تعداد توابع هدف و i هر یک از پاسخ‌ها را بر روی نمودار پارتو نشان نشان می‌دهد. F_j^{ideal} مقدار ایده‌آل هر یک از توابع هدف را در بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان می‌دهد.

$$d_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (F_{ij} - F_j^{\text{ideal}})^2} \quad (84)$$

در روش لین‌مپ پاسخی که کمترین فاصله را از نقطه ایده‌آل داشته باشد تحت عنوان پاسخ بهینه شناخته می‌شود. بنابراین نقطه بهینه نهایی عبارت است از:

$$i_{\text{final}} \equiv i \in \min(d_{i+}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (85)$$

4- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت ابزاری جهت تعیین میزان تاثیر پارامترهای ورودی بر تابع هدف سیستم می‌باشد. روش‌های تحلیل حساسیت می‌تواند به صورت گرافیکی، ریاضی و آماری باشد. در روش‌های آماری تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی ورودی می‌پردازد، سپس تاثیر این ورودی را بر خروجی ارزیابی می‌کند. در این روش می‌توان اثر متقابل بین چندین ورودی را بر روی خروجی مشخص کرد. روش سوبل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه تجزیه واریانس می‌باشد [26]. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی استفاده کرد. در این بخش روابط به صورت خلاصه از مراجع [26] و [27] اقتباس شده است. اگر تابع هدف $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ را که دارای k متغیر ورودی است در نظر بگیریم، دامنه پارامترهای ورودی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega^k = \{X | 0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, 3, \dots, k\} \quad (86)$$

برای انجام سنجش حساسیت در روش سوبل، نخست تابع هدف بر پایه پارامترهای ورودی با استفاده از تحلیل واریانس به رابطه زیر تجزیه می‌شود:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,k}(x_1, \dots, x_k) \quad (87)$$

¹ Belman-Zadeh decision making method

² LINMAP decision making method

³ TOPPSIS decision making method

5- نتایج

5-1- اعتبارسنجی مدل پیل سوختی اکسید جامد و رفرمر داخلی

نمودار قطبش به‌دست آمده برای پیل سوختی به شکل زیر است:

پس از کسر نمودن تمامی افت‌ها، در نهایت ولتاژ عملیاتی در کار حاضر با مقاله ون و همکاران [16] در جدول (2) مقایسه شده است. جهت اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده برای رفرمر از اطلاعات مرجع [28] استفاده شده است. نتایج اعتبارسنجی برای گازهای خروجی از آند و کاتد در جدول (3) و (4) آورده شده است.

با در نظر گرفتن دبی متان برابر 0.242 مول بر ثانیه و دی‌اکسیدکربن 0.138 مول بر ثانیه (60 درصد حجمی متان و 40 درصد حجمی دی‌اکسیدکربن) و همچنین غلظت متوسط هیدروژن سولفید 500ppm نتایج بهینه‌سازی به‌منظور بهینه‌سازی بازده انرژی کل و کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم مشخص شده است.

ترکیب گازهای خروجی از کاتد در جدول (4) آورده شده است:

5-2- نتایج بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه

نتایج بهینه‌سازی برای هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه برای تابع هدف

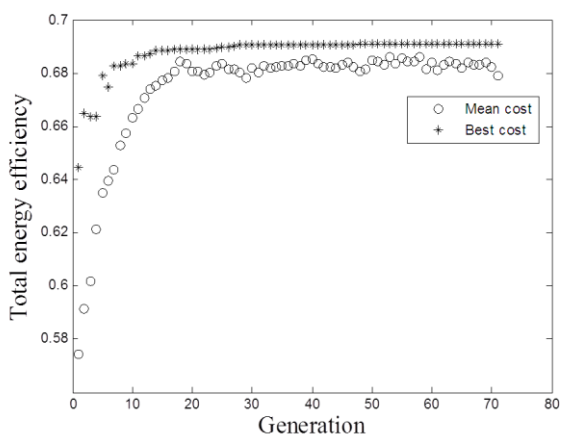


Fig. 4 Evolution of electrical energy efficiency of hybrid system over the generations

شکل 4 تکامل بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی در طی نسل‌ها

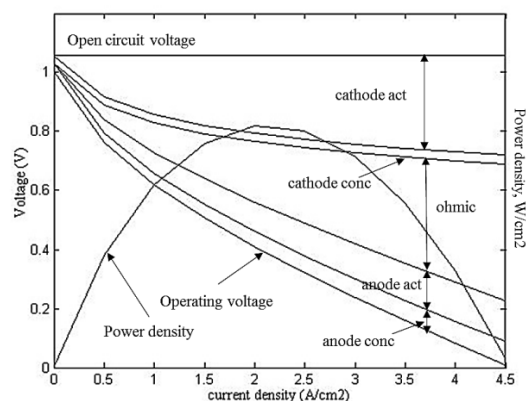


Fig. 3 polarization curve and power density simulated in current model

شکل 3 نمودار قطبش و چگالی توان شبیه‌سازی شده در کار حاضر

جدول 2 مقایسه ولتاژ عملیاتی در کار حاضر با مرجع [16]

Table 2 Comparison of operating voltage in this paper and reference [16]

جریان (A)	مقدار ولتاژ عملیاتی در کار حاضر	مقدار ولتاژ عملیاتی در مرجع [16]
1	0.61	0.63
2	0.41	0.4
3	0.22	0.2
4	0.07	0.03

جدول 3 مقایسه ترکیب گازهای خروجی از آند در این مقاله و مرجع [28]

Table 3 Comparison of outlet anode gas composition in this paper and reference [28]

ترکیب گازهای خروجی از آند	مقدار به‌دست آمده در کار حاضر	مقدار به‌دست آمده در مرجع
H ₂ O	0.68	0.66
H ₂	0.11	0.13
CH ₄	0.02	0.01
CO	0.01	0.03
CO ₂	0.18	0.17

جدول 4 مقایسه ترکیب گازهای خروجی از کاتد در این مقاله و مرجع [28]

Table 4 Comparison of outlet cathode gas composition in this paper and reference [28]

ترکیب گازهای خروجی از کاتد	مقدار به‌دست آمده در کار حاضر	مقدار به‌دست آمده در مرجع
N ₂	0.91	0.93
O ₂	0.09	0.07

بهینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی در "شکل 4" نمایش داده شده است. نتایج بهینه‌سازی جهت بهینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی سیستم توسط الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این تابع هدف 0.691 می‌باشد. در این حالت تمامی پارامترهای طراحی جهت بهینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی به‌دست آمده در "جدول 5" خلاصه شده است و در این حالت کار ایجاد شده توسط پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی و همچنین کار خالص تولیدی سیستم ترکیبی مطابق با "جدول 6" می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی جهت کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم توسط الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد "شکل 5" که کمترین مقدار این تابع هدف 169116 دلار می‌باشد. در این حالت نیز تمامی پارامترهای طراحی جهت کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری به‌دست آمده که در

جدول 5 مقادیر بهینه پارامترهای طراحی در بهینه‌سازی بازده کل انرژی سیستم
Table 5 Optimum design parameters in maximization of electrical energy efficiency

پارامتر	مقدار
تابع هدف	0.691
S_c	2.006
U_f	0.83
η_{GT}	0.831
I (A)	179.904
η_C	0.89
β_C	2.005

جدول 6 کار به‌دست آمده در بهینه‌سازی بازده کل انرژی سیستم

Table 6 Obtained work in maximization of electrical energy efficiency

پارامتر	مقدار
W_{SOFC}	81.6 kW
W_{GT}	45.53 kW
W_{net}	119 kW

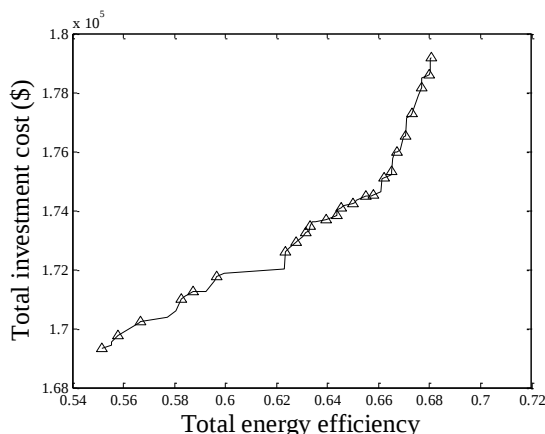


Fig. 6 Pareto front of multi objective optimization

شکل 6 جبهه پارتو بهینه‌سازی چند هدفه

جدول 9 مقادیر بهینه متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی دو هدفه

Table 9 Optimum design parameters in two objective optimization

مقدار	پارامتر
0.66	تابع هدف اول
175227.4	تابع هدف دوم (دلار)
2.086	S_c
0.84	U_f
0.72	η_{GT}
195.911	I (A)
0.83	η_C
2.02	β_C

جدول 10 کار به‌دست آمده در بهینه‌سازی دو هدفه

Table 10 Obtained work in in two objective optimization

مقدار	پارامتر
81.6 kW	W_{SOFC}
42 kW	W_{GT}
116.1 kW	W_{net}

پس از اعمال روش تحلیل حساسیت سوپل درصد تاثیر هر یک از شش پارامتر طراحی بر روی هر یک از توابع هدف محاسبه شده است که نمودار آن در "شکل‌های 7 و 8" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت تراکم کمپرسور دارای بیشترین میزان تاثیر (45%) و بازده ایزنتروپیک کمپرسور دارای کمترین تاثیر (4%) بر روی بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی می‌باشد در حالی‌که بازده ایزنتروپیک توربین (20%) دارای بیشترین تاثیر و نسبت بخار به متان ورودی کمترین تاثیر (14%) را بر هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم می‌گذارند. شش تصویر اول از بالا در شکل (9) تغییرات بازده انرژی الکتریکی را نسبت به پارامترهای طراحی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این اشکال مشخص است، با افزایش نسبت بخار به متان ورودی بازده انرژی الکتریکی کاهش می‌یابد، اما پهنای زیاد نمودار نشان می‌دهد که این تابع هدف نسبت به این متغیر حساسیت چندانی ندارد. با افزایش ضریب مصرف سوخت از 0.8 تا 0.9 بازده انرژی الکتریکی سامانه تغییر چندانی نکرده است. با افزایش بازده ایزنتروپیک توربین، بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی افزایش می‌یابد. بازده انرژی الکتریکی سامانه نسبت به جریان پیل سوختی حساسیتی تقریباً سهمی‌وار دارد که طبق نمودار قطبش پیل سوختی ماکزیمم بازده در حوالی 190 آمپر رخ می‌دهد. با افزایش بازده ایزنتروپیک کمپرسور بازده انرژی الکتریکی کل سامانه نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت تراکم فشار کمپرسور، بازده انرژی الکتریکی کل سامانه

"جدول 7" خلاصه شده است. در این حالت کار ایجاد شده توسط پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی و همچنین کار خالص تولیدی سیستم مطابق با "جدول 8" می‌باشد. پس از انجام بهینه‌سازی دو هدفه نمودار پرتو در "شکل 6" بدست آمده است. تابع هدف اول بیشینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی و تابع هدف دوم کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری می‌باشد. نمودار پرتو به‌دست آمده مجموعه‌ای از نقاط بهینه می‌باشد. در این حالت پس از اعمال دو روش بی‌بعدسازی اقلیدسی و تصمیم‌گیری لین‌مپ نقاط بهینه نهایی برای پارامترهای طراحی سیستم ترکیبی در "جدول 9" خلاصه شده است. در این حالت نیز کار ایجاد شده توسط پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی و همچنین کار خالص تولیدی سیستم مطابق با "جدول 10" می‌باشد.

هزینه همتراز شده سیستم با توجه به معادلات ذکر شده در بخش اقتصادی 6.3 سنت به ازای هر کیلووات ساعت به‌دست می‌آید. همچنین در این حالت به کمک جریان گازهای داغ خروجی از واحد بازیاب حرارت تولیدکننده بخار می‌توان 71 لیتر آب با دمای 70 درجه سانتی‌گراد در طول شبانه روز تولید کرده که می‌توان از آن جهت گرمایش هاضم بی‌هوازی در واحد تصفیه استفاده نمود.

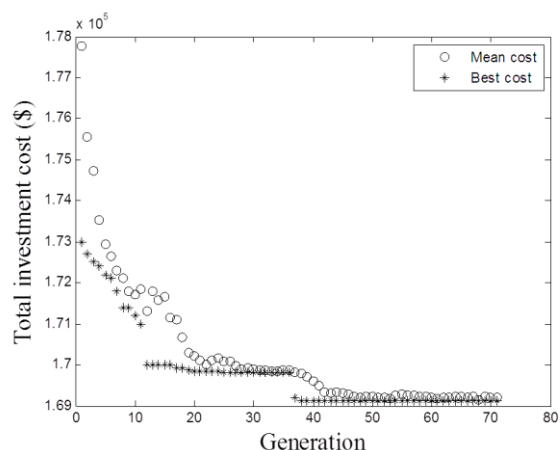


Fig. 5 Evolution of total investment cost of hybrid system over the generations

شکل 5 تکامل هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم ترکیبی در طی نسل‌ها

جدول 7 مقادیر بهینه پارامترهای طراحی در کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم

Table 7 Optimum design parameters in minimization of total investment cost

مقدار	پارامتر
169116	تابع هدف (دلار)
2.485	S_c
0.9	U_f
0.7	η_{GT}
293.86	I (A)
0.7	η_C
2.243	β_C

جدول 8 کار بدست آمده در کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم

Table 8 Obtained work in in minimization of total investment cost

مقدار	پارامتر
72 kW	W_{SOFC}
43.6 kW	W_{GT}
107.9 kW	W_{net}

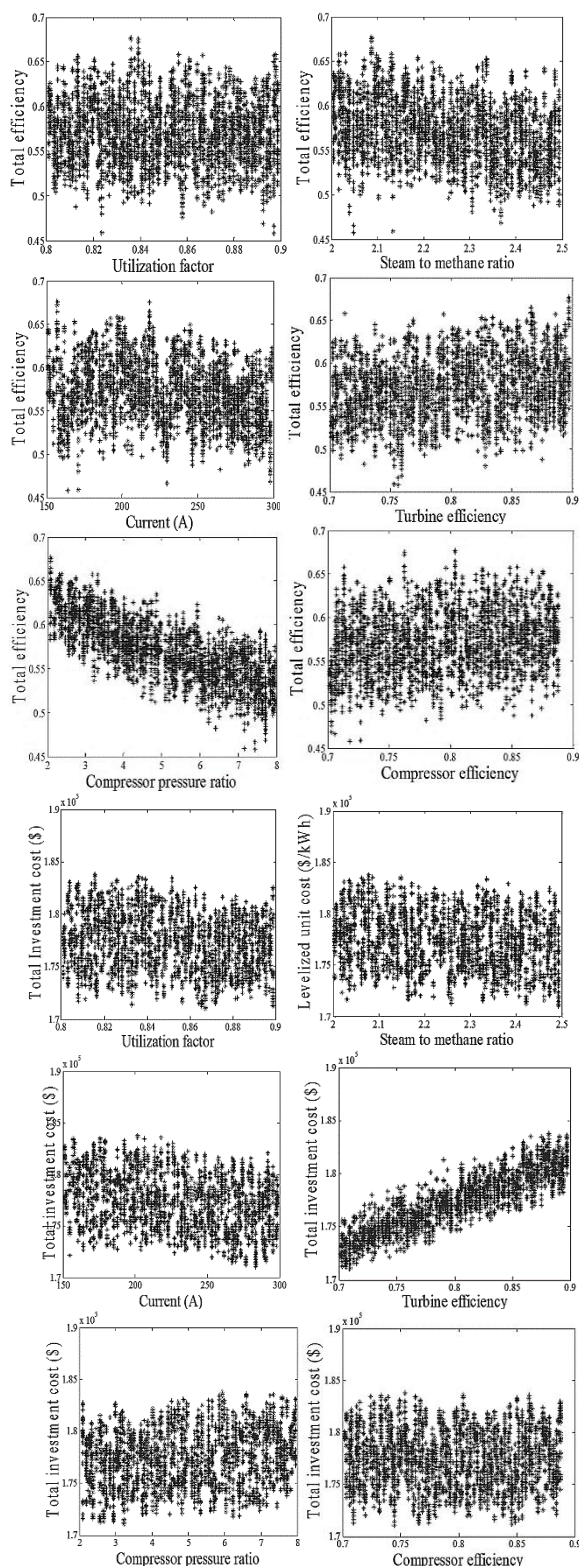


Fig. 9 Variation energy efficiency and total investment cost over variation of the design variables

شکل 9 تغییرات بازده انرژی و هزینه کل سرمایه‌گذاری نسبت به تغییرات متغیرهای طراحی

حساسیت سوبل درصد تاثیر هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع هدف دیده شده تا سهم تاثیرگذاری هر یک بر توابع هدف محاسبه شود. در این

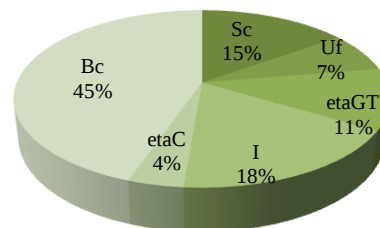


Fig. 7 Sensitivity of electrical energy efficiency of hybrid system to design parameters

شکل 7 حساسیت بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی نسبت به متغیرهای طراحی

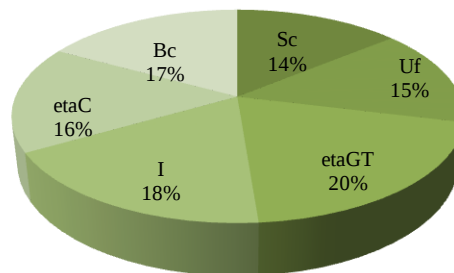


Fig. 8 Sensitivity of total investment cost of hybrid system to design parameters

شکل 8 حساسیت هزینه سرمایه‌گذاری کل سیستم ترکیبی نسبت به متغیرهای طراحی

کاهش می‌یابد.

شش تصویر پایین در "شکل 9" تغییرات هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم را نسبت به پارامترهای طراحی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این اشکال مشخص است، با افزایش نسبت بخار به متان ورودی هزینه کل

سرمایه‌گذاری سامانه تقریباً کاهش یافته است. با افزایش ضریب مصرف سوخت اندکی هزینه کاهش یافته است. با افزایش بازده ایزنتروپیک توربین گازی، هزینه افزایش یافته است. با افزایش بازده ایزنتروپیک کمپرسور، هزینه اندکی افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت تراکم فشار کمپرسور، هزینه افزایش می‌یابد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز که همه اجزای آن در "شکل 2" نمایش داده شده است، مدل‌سازی شده است. این سیستم ترکیبی توسط گاز زیستی تولید شده در تصفیه‌خانه فاضلاب خوراک‌دهی شده است. سیستم ترکیبی به‌دست آمده در ابتدا با در نظر گرفتن دو تابع هدف بهینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی و کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. در بهینه‌سازی تک هدفه برای بهینه‌سازی بازده انرژی الکتریکی، میزان بازده 0.691 و در بهینه‌سازی تک‌هدفه برای کمینه‌سازی هزینه کل سرمایه‌گذاری میزان هزینه کل برابر 169116 دلار محاسبه شده است. در بهینه‌سازی چندهدفه نیز که توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده، مقادیر بهینه هر یک از توابع هدف محاسبه شده و در این حالت، بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی برابر 0.66 و هزینه کل سرمایه‌گذاری 175227 دلار محاسبه شده است. در این حالت هزینه هم‌تراز شده انرژی الکتریکی 6.3 سنت به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی محاسبه شده است. درنهایت با کمک روش تحلیل

میان نسبت تراکم کمپرسور دارای بیشترین میزان تاثیر بر روی بازده انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی می‌باشد. در حالی که بازده ایزنتروپیک توربین و جریان پیل سوختی نیز بیشترین تاثیر را بر هزینه کل سرمایه‌گذاری سیستم می‌گذارند. مشخص نمودن درصد تاثیر هر یک از پارامترهای طراحی بر توابع هدف، دید جامع و کاملی در ارتباط با اهمیت هر یک از پارامترهای طراحی به مهندسين ارائه می‌کند.

بالانویس‌ها و زیرنویس‌ها

فعال‌سازی	act
کاتد	c
کمپرسور	C
کانال	ch
بازیاب حرارتی تولید بخار	hrsrg
ولتاژ مدار باز	ocv
اهمیک	ohm
بازیاب حرارت	rec
رفرمینگ	ref
شیفت	shift
ناحیه فعال سه‌گانه	TPB
غلظت	conc
مبدل تولیدکننده بخار فوق داغ	SH
مبدل تولیدکننده بخار	ev
مبدل تولیدکننده آب گرم	ec
کمپرسور هوا	AC
کمپرسور سوخت	FC
محفظه احتراق	CC
تخلیه	dc
مکش	suc
بهینه	opt
غلظت	conc
سولفورزدایی	sul
استک پیل سوختی	FCstack
حجم ماژول	VBM
خرید حجم ماژول	VP
اتاقک استک	spec

7- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
COE	هزینه همتراز شده ($\$/kWh$)
D	ضریب انتقال جرم (m^2s^{-1})
E	انرژی فعال‌سازی ($Jmol^{-1}$)
$\dot{E}$	نت انرژی (Js^{-1})
η_{act}	بازده ایزنتروپیک توربین
η_{ac}	بازده ایزنتروپیک کمپرسور
F	ثابت فارادی ($Cmol^{-1}$)
f_{BM}	ضریب محاسبات ماژول
i	چگالی جریان تبدیلی (Acm^2)
I	جریان پیل سوختی (A)
k	ثابت تعادل واکنش
L	طول (m)
LHV	ارزش حرارتی ($Jmol^{-1}$)
M	جرم مولی ($gmol^{-1}$)
N	تعداد سلول
n	تعداد الکترون جابه‌جا شده
$\dot{n}$	دبی مولی ($mol s^{-1}$)
P	فشار (bar)
R	ثابت جهانی گازها ($Jmol^{-1}K^{-1}$)
S_c	نسبت بخار به متان ورودی
U	ضریب انتقال حرارت ($Jm^{-2}K^{-1}$)
U_f	ضریب مصرف سوخت
V	ولتاژ (v)
X	کسر مولی جزء
Z	هزینه سرمایه‌گذاری (\$)

علائم یونانی

α	ضریب انتقال بار
β	مقاومت اهمی (Ω)
β_c	نسبت فشار کمپرسور
β_t	نسبت فشار توربین
δ	ضریب قبل از exp، $\Omega^{-1} m^{-2}$ در رابطه (34)
ϕ	تخلخل
γ_f	ضریب مصرف سوخت
σ	رسانایی الکتریکی ($\Omega^{-1} m^{-1}$)
ψ	انحنای
η	افت ولتاژ
η_{sofc}	بازده پیل سوختی اکسید جامد
ν	حجم نفوذ یک مولکول ساده (cm^3)

8- مراجع

- [1] A. Trendewicz, R. Braun, Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities, *Journal of Power Sources*, Vol. 233, pp. 380-393, 2013.
- [2] D. F. Cheddie, Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 1702-1709, 2011.
- [3] L. Hedström, *Fuel Cells and Biogas*, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Sewden, 2010.
- [4] S. C. Singhal, K. Kendall, *High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals*, first Edition, pp. 1-22, UK: ELSEVIER, 2003.
- [5] J. Palsson, A. Selimovic, L. Sjunnesson, Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation, *Journal of Power Sources*, Vol. 86, No. 1-2, pp. 442-448, 2000.
- [6] X. Zhang, S. Chan, G. Li, H. Ho, J. Li, Z. Feng, A review of integration strategies for solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 685-702, 2010.
- [7] M. Ni, M. K. Leung, D. Y. Leung, A modeling study on concentration overpotentials of a reversible solid oxide fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 460-466, 2006.
- [8] 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.
- [9] J. Milewski, K. Świrski, M. Santarelli, P. Leone, *Advanced*

- rating, and thermal design, Third Edition, pp. 132-135, New York: Taylor & Francis Group, 2012.
- [20] Y. Zhao, H. Chen, M. Waters, D. N. Mavris, Modeling and cost optimization of combined cycle heat recovery generator systems, *International Joint Power Generation Conference*, Atlanta: ASME Turbo Expo, pp. 881-891, 2003
- [21] O. J. Shariatzadeh, A. Refahi, M. Rahmani, S. Abolhassani, Economic optimisation and thermodynamic modelling of SOFC tri-generation system fed by biogas, *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp. 772-781, 2015.
- [22] M. G. J. Pirkandi, Thermo-economic modeling and analysis of a combined fuel cell and micro gas turbine power plant cycle, *Modares Mechanica Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 207-222, 2014. (in persian)
- [23] A. Shirazi, M. Aminyavari, B. Najafi, F. Rinaldi, M. Razaghi, Thermal-economic-environmental analysis and multi-objective optimization of an internal-reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 24, pp. 19111-19124, 2012.
- [24] D. D. Papadias, S. Ahmed, R. Kumar, Fuel quality issues with biogas energy-An economic analysis for a stationary fuel cell system, *Energy*, Vol. 44, No. 1, pp. 257-277, 2012.
- [25] H. Sayyaadi, R. Mehrabipour, Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger, *Energy*, Vol. 38, No. 1, pp. 362-375, 2012.
- [26] I. M. Sobol, Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 55, No. 1-3, pp. 271-280, 2001.
- [27] I. y. M. Sobol', On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models, *Matematicheskoe Modelirovanie*, Vol. 2, No. 1, pp. 112-118, 1990.
- [28] F. Calise, M. D. d'Accadia, A. Palombo, L. Vanoli, Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC)-gas turbine system, *Energy*, Vol. 31, No. 15, pp. 3278-3299, 2006.
- methods of solid oxide fuel cell modeling, First Edition, pp. 1-16, New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- [10] S. Wongchanapai, H. Iwai, M. Saito, H. Yoshida, Selection of suitable operating conditions for planar anode-supported direct-internal-reforming solid-oxide fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 204, pp. 14-24, 2012.
- [11] P. Piroonlerkgul, S. Assabumrungrat, N. Laosiripojana, A. Adesina, Selection of appropriate fuel processor for biogas-fuelled SOFC system, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 341-351, 2008.
- [12] L. Duan, B. He, Y. Yang, Parameter optimization study on SOFC-MGT hybrid power system, *International Journal of Energy Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 721-732, 2011.
- [13] N. Autissier, F. Palazzi, F. Maréchal, J. Van Herle, D. Favrat, Thermo-economic optimization of a solid oxide fuel cell, gas turbine hybrid system, *Journal of fuel cell science and technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 123-129, 2007.
- [14] D. F. Cheddie, R. Murray, Thermo-economic modeling of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 8134-8140, 2010.
- [15] F. Palazzi, N. Autissier, F. M. Marechal, D. Favrat, A methodology for thermo-economic modeling and optimization of solid oxide fuel cell systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 16, pp. 2703-2712, 2007.
- [16] H. Wen, J. Ordonez, J. Vargas, Single solid oxide fuel cell modeling and optimization, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 7519-7532, 2011.
- [17] J. W. Kim, A. V. Virkar, K. Z. Fung, K. Mehta, S. C. Singhal, Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 146, No. 1, pp. 69-78, 1999.
- [18] F. Calise, A. Palombo, L. Vanoli, Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 225-244, 2006.
- [19] S. Kakac, H. Liu, A. Pramuanjaroenkij, *Heat exchangers: selection,*