

بررسی عملکرد اگزرزی-اقتصادی یک سیستم تولید سه گانه بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد

محمد ذوقی

محمد رضا علی خباز جورشري

کوروش جواهرده*

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

مری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشاء-زیباکنار، لشت نشاء، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

درین تحقیق یک سیستم ترکیبی شامل چرخه پیل سوختی اکسید جامد، مبادله کن گرم تولید آب گرم خانگی و چیلر جذبی تک مرحله ای آب-آمونیاک به منظور تولید همزمان قدرت، برودت و آب گرم شبیه سازی و از منظر انرژی، اگزرزی-اقتصادی مورد بررسی قرار می گیرد و پس از ارائه نتایج در حالت ورودی پایه، اثر تغییر چگالی جریان پیل سوختی و ضریب مصرف سوخت بر روی عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج حالت پایه حاکی از آن است که کار کلی $418/4$ کیلووات، بازگشت نابذیری کلی $650/1$ کیلووات و بازده اگزرزی کلی $378/0$ می باشد. همچنین مبادله کن گرمها هوا، مبادله کن گرم آب و پیل سوختی به عنوان اجزایی معرفی می شوند که باید بیشتر از سایر اجزا از منظر اگزرزی-اقتصادی مورد توجه قرار بگیرند چون تقریباً بیشترین مقدار نرخ هزینه متعلق به این اجزا می باشد.

واژه های کلیدی: سیکل تولید سه گانه، پیل سوختی اکسید جامد، اگزرزی، اگزرزی-اقتصادی، تحلیل پارامتری.

Exergoeconomic Performance Assessment of a Trigeneration System Based on Solid Oxide Fuel Cell

M. Zoghi

Young Researchers and Elite Club, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

M. R.. Aikhabbazjorshary

Department of mechanical engineering,Lashtenesha-Zibakenar Branch, Islamic Azad University, Lashtenesha, Iran

K. Javaherdeh

Faculty of Mechanical Engineering, University Of Guilan , Rasht, Iran

Abstract

In this study, a hybrid system including a solid oxide fuel cell cycle, a domestic hot water heat exchanger and a single-stage water-ammonia absorption chiller are simulated for the simultaneous generation of power, cooling and hot water. and it is examined from the perspective of energy, exergy and exergy-economic. After evaluating the results in the base input mode, the effect of changing the fuel cell flow density and fuel consumption coefficient on the system performance is investigated. The basic shows that overall work is 4,418 kW, the total irreversibility is 1,650 kW and the overall exergy efficiency is 378/0. Also, the air heat exchanger, water heat exchanger and fuel cell are introduced as components that should be considered more than other components from the exergy-economic point of view, since they are almost the largest amount of cost pertaining to these components.

Keywords: Trigeneration system, Solid oxide fuel cell, Exergy, Exergoeconomic, parametric analyses.

۳، پیل سوختی و چرخه رانکین بخار، آلی و چرخه کالینا [۶-۴]، پیل سوختی و چرخه های تولید همزمان آب-آمونیاک [۷-۹] و پیل سوختی و چرخه تولید سرما جذبی [۱۰-۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است.

استفاده از سیستم های تولید همزمان توان، گرمایش و سرما به دلیل نیاز همزمان به برق و گرمایش و سرما، در ساختمان و صنعت بسیار مورد توجه قرار دارد و با توجه به مزایای این سیستم در کاهش مصرف و هزینه انرژی، از جمله راه کارهایی به شمار می آید که دارای صرفه اقتصادی مناسبی می باشد. بازده چرخه های تولید قدرت متدائل حدود ۳۰ درصد و کمتر استو در این سیستم ها قسمت عمده انرژی محرك به هدر می رود [۱۲]. در حالی که می توان با استفاده از سیستم های تولید همزمان قدرت و گرمایش (CHP) و یا سیستم های تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش (CCHP) به مقدار بازده بهتری دست پیدا کرد که این بازده در سیستم های تولید سه گانه به حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد نیز می رسد [۱۳]. در سیستم های تولید همزمان، اکثر از انرژی اتلافی دستگاه تولید قدرت به منظور ایجاد

۱- مقدمه

در سال های اخیر استفاده فزاینده از سوخت های فسیلی مشکلات زیست محیطی فراوانی مانند آلودگی شهرها، تخریب لایه ای اوزون، باران های اسیدی و غیره را در پی داشته است. علاوه بر این با افزایش مراکز صنعتی و مصرف بیشتر این سوخت ها دورنمای پایان ذخایر انرژی های فسیلی واضح تر شده است. با توجه به موارد گفته شده، استفاده از منابع انرژی جدید مانند انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، انرژی باد و همچنین انرژی گرمای اتلافی و پیل های سوختی برای تولید الکتریسیته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، پیل های سوختی به عنوان یک فناوری نسبتاً جدید در تبدیل انرژی مطرح بوده و از بین انواع مختلف پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل دمای عملکرد بالا، بازده مناسب و دارا بودن گرمای اتلافی با پتانسیل دمای بالا، به منظور افزایش بازده سیستم تبدیل انرژی، قابلیت ترکیب با توربین های گازی و یا سایر انواع چرخه های تولید قدرت، گرمایش و سرما دما پایین را دارا است که در تحقیقات مختلفی چرخه ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی [۱-۱۱]

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: javaherdeh@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۴

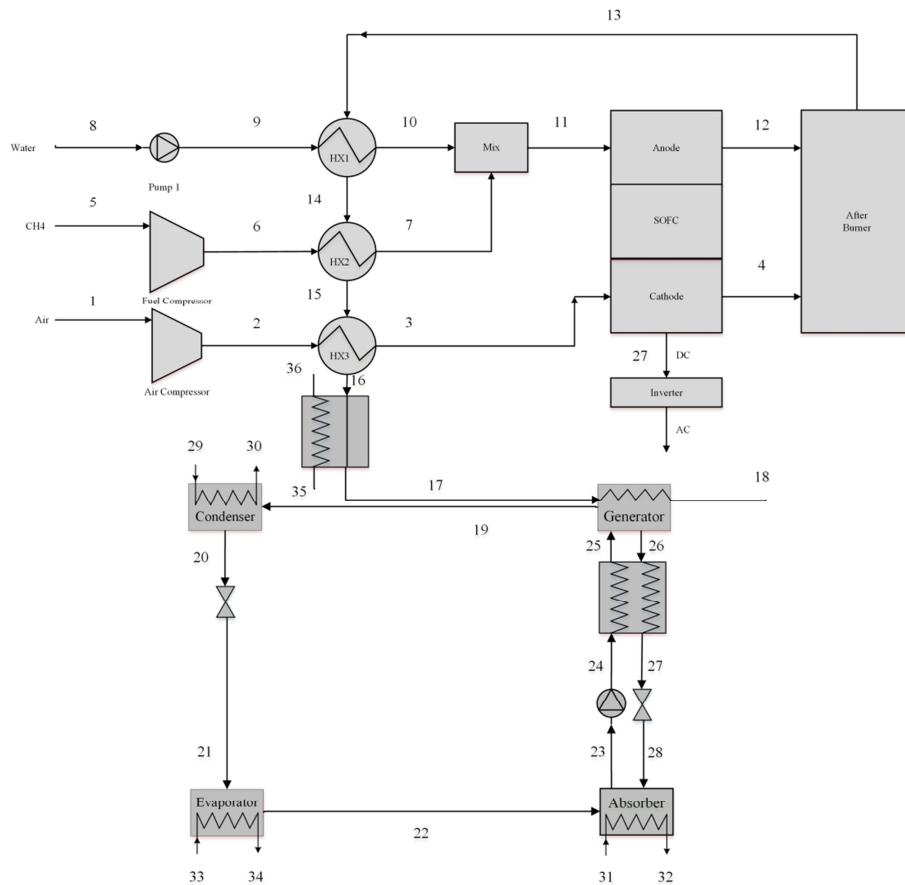
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۲

گرمایش و یا سرمایش استفاده می‌شود. برای مثال از دفع گرما در چگالنده چرخه رانکین می‌توان به عنوان محرك زیر سیستم تولید گرمایش و یا زیر سیستم تولید سرمایش استفاده کرد. متداولترین زیر سیستم تولید گرمایش، مبادله کن گرما تولید آب گرم و متداولترین زیر سیستم تولید سرمایش با انرژی گرمایی، چیلر جذبی و یا چرخه تبرید اجکتوری می‌باشد. از جمله تحقیقات انجام شده در مورد چرخه های تولید همزمان، تمپستی و همکاران [۱۴] چرخه تولید همزمان کار و گرما در مقیاس میکرو را با محرك همزمان انرژی زمین گرمایی و خورشیدی از منظر انرژی، اگررژی و اقتصادی شبیه‌سازی کردند. بیوپاچی و همکاران [۱۵] چرخه تولید همزمان قدرت، حرارت و برودت با محرك انرژی خورشیدی همراه با تانک ذخیره را برای دو فصل زمستان و تابستان از منظر انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی شبیه‌سازی نمودند. احمدی و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید همزمان چند منظوره مشکل از توربین گازی، چرخه رانکین بخار با مولد بخار دو فشاره، چرخه چیلر جذبی، چرخه تولید قدرت و برودت اجکتوری، مبدل حرارتی تولید آب گرم خانگی و الکتروولایزر را شبیه‌سازی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی دو هدفه نمودند. خلجانی و همکاران [۱۷] یک چرخه ترکیبی توربین گاز و رانکین آبی به منظور تولید همزمان گرما و قدرت را از منظر انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی بروتی قرار دادند.

سرمایش مورد نیاز برای تهیه مطبوع، اکثرا در این قرن توسط چرخه تراکمی بخار (پمپ گرمایی) تامین شده که مهمترین عیب آن وابستگی به سطح بالایی از انرژی الکتریکی برای عملکرد است. به تازگی چرخه هایی به منظور تولید سرما معرفی شده است که از انرژی گرمایی دما پایین و یا دما متوسط به عنوان محرك استفاده می‌کنند که به آنها چرخه های تولیدسrama با انرژی گرمایی گفته می‌شود که از انواع آن می‌توان به چیلرهای جذبی و حجمی، چرخه تبرید اجکتوری و چرخه ترکیبی رانکین و پمپ گرمایی اشاره کرد. همانطور که گفته شد، چیلرهای جذبی یکی از انواع چرخه های تولید برودت با محرك انرژی گرمایی هستند که به دلیل قابلیت استفاده از انواع انرژی های پاک و تجدید پذیر دما پایین به عنوان محرك آنها، امروزه بسیار مورد توجه فرار گرفته اند. ترکیبات متداول در این سیستمها لیتییم بروماید-آب و همچنین آمونیاک-آب می‌باشند که در اولی آب و در دومی آمونیاک مبرد است. از جمله تحقیقات انجام شده در مورد سیکل تبرید جذبی سن کانو همکاران [۱۸] تحلیل انرژی و اگررژی را برای یک چیلر جذبی تک مرحله‌ای لیتییم بروماید-آب با نظر گرفتن دماهای آب گرم، آب خنک و آب سرد ورودی به چیلر جذبی تک مرحله ای و آروا [۱۹] تحلیل انرژی و اگررژی را برای چیلر جذبی تک مرحله ای و دو مرحله ای لیتییم بروماید-آب انجام داده و ابتدا تخریب اگررژی را در هر یک از اجزای چیلر جذبی بدست آوردن. بیشترین مقدار تخریب اگررژی در ابزرب چیلر جذبی رخ داده و بعد از آن به ترتیب چگالنده، تبخیرکن، ژنراتور و مبادله کن گرما بالاترین مقدار تخریب اگررژی را دارا بودند. گروسوی و همکاران [۲۰] تحلیل اگررژی-اقتصادی را برای چیلر جذبی دو مرحله ای لیتییم برماید-آب انجام دادند و در انتها با

۲- شرح عملکرد چرخه ترکیبی

طرحواره چرخه ترکیبی در شکل ۱ قابل ملاحظه است. همانطور که ملاحظه می‌شود، هوا و سوت ورودی (با دما و فشار محیط) به وسیله کمپرسور و آب ورودی (با دما و فشار محیط) به وسیله پمپ تا فشار کاری پبل سوتی افزایش فشار می‌یابند. در مرحله بعد افزایش دمای سه جریان ذکر شده با محرك گاز اتالافی خروجی از محفظه پس سوز به وسیله مبادله کن گرما هوا، سوت و آب انجام می‌شود و سه جریان تا دما و فشار ورودی پبل سوتی افزایش دما و فشار می‌یابند. هوا افزایش دما و فشار یافته، وارد کاتند پبل سوتی شده، همچنین سوت و بخار آب ابتدا بوسیله مخلوط کننده، مخلوط شده و سپس وارد آند پبل سوتی می‌شوند و کار خروجی از پبل سوتی به وسیله واکنشهای مربوطه حاصل می‌شود. در مرحله بعد، سوت اضافی و واکنش نداده خروجی آند با هوا افزایش می‌یابد. گاز داغ تولیدی در چهار مرحله کاهش دما می‌یابد. در سه مبادله کن گرما هوا، سوت و آب، همچنین در مبادله کن گرما تولید آب گرم دمای گاز اتالافی کاهش پیدا می‌کند و آب گرم مورد نیاز مصارف خانگی تولید می‌شود. در انتها در چرخه تبرید جذبی آب-آمونیاک نیز، گاز اتالافی ورودی به عنوان محرك ژنراتور عمل می‌کند.



شکل ۱- طرحواره چرخه ترکیبی

می شود.

۳- هوا با درصد مولی ۷۹ درصد نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن وارد پیل سوختی می شود.

۴- هوا، سوخت و بخار آب با دمای یکسان وارد پیل سوختی می شوند.

۵- محصولات خروجی آند و کاتد با دمای یکسان از پیل سوختی خارج می شوند.

۶- مخلوط گازهای خروجی از پیل سوختی در تعادل شیمیایی می باشند.

۷- تمام اجزای چرخه ترکیبی عملکرد آدیاباتیک دارند.

۸- به منظور بدست آوردن خواص هوا، سوخت و مخلوط گازها از روابط مربوط به گاز ایده آل استفاده می شود.

۹- کمپرسور، توربین و پمپ بازده آبزونتروبیک ثابت دارند.

۱۰- افت فشار پیل سوختی ۲ درصد و افت فشار محفظه پس سوز ۳ درصد فرض می شود.

۱۱- افت فشار جریانات چرخه بالایی در مبادله کن های گرما ۲ درصد فرض شده و از افت فشار جریانات در مبادله کن های گرما چرخه ذوبی صرفنظر می شود.

۱۲- حداقل دمای گاز اتلافی خروجی برای جلوگیری از تشکیل مواد خورنده، ۱۰۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته می شود.

۱۳- در چرخه ذوبی مبرد خروجی از چگالنده مایع اشباع و مبرد خروجی از تبخیرکن بخار اشباع فرض می شود.

چگالنده و جذب کننده چرخه ذوبی با آب، در دما و فشار محیط خنک شده و سرما مطلوب خروجی در تبخیر کن تولید می شود. همانطور که در شکل ملاحظه می شود چرخه ذوبی از چهار جز اصلی تبخیرکن، جذب کننده، ژنراتور و چگالنده تشکیل شده است. در تبخیرکن مبرد مایع در فشار پایین با گرفتن گرما از سیال خارجی بخار شده و تولید سرما می کند، سپس در جذب کننده بخار مبرد، جذب ماده جاذب می شود و سپس این محلول توسط پمپ به ژنراتور فرستاده می شود. گرمای خارجی در ژنراتور موجب می گردد که دمای محلول بالا رفته و بخار مبرد از محلول جدا شود. در چگالنده بخار مبرد تولید شده در ژنراتور، سرد می گردد و با دفع گرما تقطیر می شود. سپس مایع مبرد تولید شده در چگالنده، با کاهش فشار توسط شیر فشارشکن وارد تبخیر کن می گردد و محلول غلیظ ایجاد شده در ژنراتور به جذب کننده فرستاده می شود تا بخار مبرد تولید شده در تبخیرکن را مجددا جذب کند. عموما یک مبادله کن گرما در مسیر رفت و برگشت محلول غلیظ دما بالا و محلول رقیق دما پایین بین ژنراتور و جذب کننده قرار می گیرد که باعث بازیابی حرارت و در نتیجه افزایش راندمان چرخه ذوبی می شود. به منظور شبیه سازی چرخه ترکیبی فرضیات ساده کننده زیر در نظر گرفته می شود [۲۳-۲۱]:

۱- سیستم در حالت پایا کار می کند.

۲- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در اجزای مختلف صرفنظر

۱۴- همچنین محلول آب-آمونیاک خروجی از ژنراتور و جذب کننده مایع اشباع می‌باشد.

۱۵- برای تحلیل اگررژی، دما و فشار محیط به عنوان دما و فشار مرجع در نظر گرفته می‌شود.

۳- شبیه‌سازی چرخه ترکیبی

در این بخش ابتدا روابط کلی مربوط به تحلیل انرژی و اگررژی اجزای چرخه گفته می‌شود و در قسمت ۱-۳ روابط مربوط به شبیه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد که جزء عمدۀ و اصلی چرخه ترکیبی است شرح داده می‌شود.

به منظور تحلیل ترمودینامیکی سیستم معادلات موازنۀ جرم، انرژی و اگررژی برای اجزای مختلف مطابق روابط (۱) تا (۴) نوشته شده است.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_e x_e \quad (2)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e \quad (3)$$

$$Ex_Q + \dot{m}_i ex_i = Ex_w + \dot{m}_e ex_e + Ex_D \quad (4)$$

که زیرنویس i و e به ترتیب ورودی به و خروجی از حجم کنترل و تحریب اگررژیدر هر جزء بوده و Ex_Q اگررژی متناظر با انتقال گرمای Ex_w اگررژی متناظر با توان و Ex_D اگررژی مربوط به هر جریان بوده که از روابط (۵) تا (۷) به دست آمده است [۲۴].

$$Ex_Q = (1 - \frac{T_0}{T_K}) \dot{Q}_i \quad (5)$$

$$Ex_w = \dot{W} \quad (6)$$

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (7)$$

ex_{ph} و ex_{ch} به ترتیب، اگررژی فیزیکی و شیمیایی هستند که به صورت روابط (۸) و (۹) تعریف می‌شوند [۲۴].

$$ex_{ph} = (\mathbf{h} - \mathbf{h}_0) - T_0(\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) \quad (8)$$

$$ex_{ch} = (\sum_{i=1}^n x_i ex_i^{ch} + RT_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i) \quad (9)$$

که زیرنویس ۰ مربوط به خواص در دما و فشار محیط بوده و در رابطه (۹)، x_i و ex_i^{ch} به ترتیب، کسر مولی و اگررژی شیمیایی استاندارد هر جزء می‌باشدند. همچنین به منظور سنجش حقیقی کار آرایی هر جز در چرخه ترکیبی بازده اگررژی مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد [۲۴].

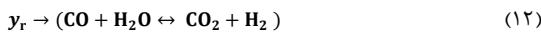
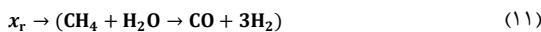
$$\eta_{ex} = \frac{Ex_p}{Ex_F} = 1 - \frac{Ex_D}{Ex_F} \quad (10)$$

که Ex_p و Ex_F به ترتیب مربوط به جریان اگررژی محصول سوخت هر جزء می‌باشند. سوخت اگررژی بیانگر منابعی است که محرك جزء بوده و در نهایت محصول را تولید می‌کند و محصول اگررژی، جریان اگررژی مفید حاصله از یک دستگاه است که مربوط به محصول ترمودینامیکی دستگاه است.

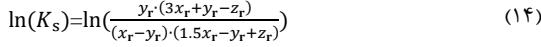
۱-۳- پیل سوختی اکسید جامد

واکنش‌های انجام شده داخل استک پیل سوختی، واکنش‌های به سازی (فرمینگ)، دگرگونی (شیفتینگ) و واکنش کلی الکتروشیمیایی

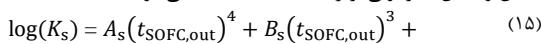
بوده که به ترتیب مطابق معادلات (۱۱) تا (۱۳) است و با نرخ مولی پیش می‌روند [۲۲].



در این تحقیق به دلیل دمای عملکردی بالای پیل سوختی و قیمت پایین‌تر، از بهسازی داخلی پیل سوختی استفاده می‌شود [۷، ۲۲]. به این ترتیب که واکنش بهسازی در داخل آند پیل سوختی انجام شده و در این حالت نیازی به ریفرمر خارجی نیست. همچنین گرمای موردنیاز واکنش گرمایگیر بهسازی از گرمای آزاد شده دو واکنش دیگر، یعنی واکنش کلی الکتروشیمیایی و واکنش دگرگونی مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید.



از سوی دیگر با معلوم بودن دمای گازهای خروجی پیل سوختی، ثابت تعادل واکنش دگرگونی از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۱].



که ثوابت موجود در رابطه (۱۵) در مرجع [۱] ارائه شده است. برای به دست آوردن نرخ مولی پیشرفت واکنش‌های سه‌گانه پیل سوختی، علاوه بر رابطه ثابت تعادل دگرگونی، از دو رابطه چگالی جریان j و ضریب مصرف سوخت U_f نیز استفاده می‌شود.

$$j = \frac{2 \cdot F \cdot z_r}{N_{fc} \cdot A_a} \quad (16)$$

$$U_f = \frac{(\text{Fuel})_{\text{consumed}}}{(\text{Fuel})_{\text{supplied}}} = \frac{(H_2)_{\text{consumed}}}{(H_2)_{\text{supplied}}} = \frac{z_r}{3x_r + y_r} \quad (17)$$

قابل ذکر است که ثوابت موجود در رابطه (۱۶) در جدول موارد ابتدایورودی ارائه شده است. با حل همزمان سه معادله ذکر شده، ضرایب مربوطه به دست می‌آیند. سپس با معلوم بودن این ضرایب و با توجه به واکنش‌های سه‌گانه داخل پیل سوختی، نرخ مولی گازهای مختلف در ورودی و خرجی آند و کاتد پیل سوختی از روابط (۱۸) تا (۲۷) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$\dot{n}_{ch4,11} = x_r \quad (18)$$

$$\dot{n}_{h20,11} = r_{sc} \cdot x_r \quad (19)$$

$$\dot{n}_{h2,12} = 3x_r + y_r - z_r \quad (20)$$

$$\dot{n}_{co,12} = x_r - y_r \quad (21)$$

$$\dot{n}_{co2,12} = y_r \quad (22)$$

$$\dot{n}_{h20,12} = 1.5x_r - y_r + z_r \quad (23)$$

$$\dot{n}_{o2,3} = \frac{z_r}{2 \cdot U_0} \quad (24)$$

$$\dot{n}_{n2,3} = \frac{79}{21} \dot{n}_{o2,3} \quad (25)$$

$$\dot{n}_{o2,4} = \dot{n}_{o2,3} - \frac{z_r}{2} \quad (26)$$

$$\dot{n}_{n2,4} = \dot{n}_{o2,3} \quad (27)$$

که در رابطه (۱۹) r_{sc} نسبت بخار به کربن بوده و در رابطه (۲۰) U_0 ضریب مصرف هوا است. ضریب مصرف هوا که مقدار هوای اضافی ورودی به کاتد را مشخص کند، در واقع پارامتر کنترلی دما و عملکرد پیل سوختی بوده که از معادله پایستگی انرژی در پیل سوختی محاسبه

$$j_{cs} = \frac{4 \cdot F \cdot P_{O2,4} \cdot D_{ceff}}{\left(\frac{P_4 - P_{O2,4}}{P_4}\right) \cdot \bar{R} \cdot (t_{SOFC,out}) \cdot L_c}$$

آخرین ابطة برای حل مجموعه معادلات مربوط به پیل سوختی، رابطه پایستگی انرژی بوده که با توجه به آدیابتیک بودن پیل، مطابق رابطه [۳۴].

$$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} + \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{W}_{SOFC} \quad (۳۴)$$

و در نهایت کار خروجی پیل سوختی بهوسیله مبدل DC به AC به جریان الکتریکی مستقیم تبدیل می‌شود.

$$\dot{W}_{SOFC,DC} = \dot{W}_{SOFC} \eta_{inverter} \quad (۳۵)$$

۴- تحلیل اگررژی-اقتصادی

فرآیند هزینه گذاری اگررژی شامل معادلات موازنۀ هزینه است که برای هر یک از اجزای سیستم مطابق رابطه [۳۶] به صورت جداگانه نوشته می‌شود [۲۴].

$$\sum (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{Q,k} \dot{E}_{Q,k} + \dot{Z}_k \quad (۳۶)$$

که هزینه واحد اگررژی \dot{Z}_k نرخ هزینه برای جزء k است و از رابطه [۳۷] بدست می‌آید [۲۴].

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k CRF \varphi}{N} \quad (۳۷)$$

که Z_k هزینه ابتدایی خریداری جزء (ارائه شده در جدول ۸/۱) [۲۶] که با استفاده از روابط مربوطه به قیمت سال ۲۰۱۳ به روز رسانی شده‌اند، φ ضریب مربوط به هزینه عملکرد و نگهداری جزء N تعداد ساعت‌عملکرد سالیانه جزء و CRF ضریب بازگشت سرمایه است و از رابطه (۳۸) بدست می‌آید [۲۴].

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۳۸)$$

که i نرخ سود سرمایه برابر با ۱۰ درصد و n تعداد سال‌های عملکرد سیستم برابر با ۲۰ سال است. همچنین $\varphi = 1/10.6$ بوده و $N = 7446$ ساعت در نظر گرفته می‌شود [۸]. روابط موازنۀ نرخ هزینه در اجزای مختلف، همراه با معادلات کمکی با استفاده از روش SPECO مجموعه‌ای از معادلات خطی را ایجاد می‌کند که با حل آن‌ها هزینه واحد اگررژی تمام جریان‌ها محاسبه می‌شود [۲۷]. معادلات اصلی و کمکی مربوط به تحلیل اگررژی-اقتصادی اجزای مختلف سیکل ترکیبی پیل سوختی و چرخه سه‌گانه بازیاب در جدول ۲ آمده است.

تعريف سوخت و محصول برای محاسبات بازده اگررژی در یک جزء منجر به تعريف جریان هزینه مربوط به سوخت و جریان هزینه مربوط به محصول برای سیستم می‌گردد. هزینه متوسط واحد سوخت و محصول برای جزء k ام سیستم مطابق روابط (۳۹) و (۴۰) بدست می‌آید [۲۴].

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (۳۹)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \quad (۴۰)$$

و هزینه تخریب اگررژی از رابطه (۴۱) محاسبه می‌گردد [۲۴].

$$\dot{C}_{dest,k} = c_{F,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (۴۱)$$

می‌شود [۲۵]. برای به دست آوردن کار خروجی پیل سوختی، ابتدا جریان عبوری I از رابطه (۲۸) به دست آمده و سپس کار حاصله از رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$I = j \cdot A_a \quad (۲۸)$$

$$\dot{W}_{SOFC} = N_{FC} \cdot I \cdot V_c \quad (۲۹)$$

که در رابطه (۲۹) اختلاف پتانسیل پیل سوختی بوده که از رابطه (۳۰) به دست می‌آید.

$$V_c = V_n - V_{loss} \quad (۳۰)$$

که در آن V_n و V_{loss} به ترتیب ولتاژ تولیدی نرنست و افت ولتاژ داخل پیل سوختی می‌باشند و افت ولتاژ از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$V_{loss} = V_{ohm} + V_{act} + V_{conc} \quad (۳۱)$$

افت ولتاژ مجموعه پیل سوختی نیز حاصل جمع سه نوع افت ولتاژ فعال‌سازی (V_{act})، افت ولتاژ اهمی (V_{ohm}) و افت ولتاژ غلطی (V_{conc}) است. برای به دست آوردن افت ولتاژ‌های ذکر شده از روابط ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است [۲۲]. ولتاژ تولیدی نرنست از رابطه (۳۲) به دست می‌آید [۲۲].

$$V_n = \frac{\Delta g^o}{2 \cdot F} + \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{h2,12} \cdot a_{O2,4}^{0.5}}{a_{H2O,12}} \right) \quad (۳۲)$$

که در رابطه (۳۲) Δg^o تابع گیبس استاندار بر مبنای مولی بوده و از رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود.

$$a_{i,12} = y_{i,12} \cdot \frac{p_{12}}{p_{ref}} \quad (۳۳)$$

که لزکسر مولی جریانات مختلف بوده و p_{ref} فشار مرتع برابر ۱۰۱/۳ کیلو پاسکال است.

در این قسمت با استفاده از معادلات ارائه شده ولتاژ پیل سوختی به دست آمده و با استفاده از رابطه (۲۹) کار خروجی پیل سوختی می‌شود.

جدول ۱- معادلات الکتروشیمیابی [۲۲]

عنوان	روابط
اتلاف اهمی	$V_{ohm} = (R_c + \rho_c \cdot L_c + \rho_a \cdot L_a + \rho_e \cdot L_e + \rho_{int} \cdot L_{int}) \cdot j$
	$\rho_c = \left(\left(\frac{-42 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \right) \cdot \exp \left(\frac{-1200}{t_{SOFC,out}} \right) \right)^{-1}$
	$\rho_a = \left(\left(\frac{95 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \right) \cdot \exp \left(\frac{-1150}{t_{SOFC,out}} \right) \right)^{-1}$
	$\rho_e = \left(\left(\frac{9.3 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \right) \cdot \exp \left(\frac{-1100}{t_{SOFC,out}} \right) \right)^{-1}$
اتلاف فعال سازی	$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c}$
	$V_{act,a} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{F} \cdot \text{arc sinh} \left(\frac{j}{2 \cdot f_{ca}} \right)$
	$V_{act,c} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{F} \cdot \text{arc sinh} \left(\frac{j}{2 \cdot f_{cc}} \right)$
اتلاف غلطی	$V_{conc} = V_{conc,a} + V_{conc,c}$
	$V_{conc,a} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F} \left(\ln \left(1 + \frac{P_{h2,12} \cdot j}{P_{h2O,12} \cdot j_{as}} \right) - \ln \left(1 - \frac{j}{j_{as}} \right) \right)$
	$V_{conc,c} = -\left(\frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{j}{j_{cs}} \right)$
	$j_{as} = \frac{2 \cdot F \cdot P_{h2,12} \cdot D_{aef}}{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out}) \cdot L_a}$

جدول ۲-تابع قیمت اجزای مختلف، موازنہ هزینه و معادلات کمکی به منظور تحلیل اگزرسی- اقتصادی چرخه ترکیبی [۲۶، ۸]

رابطه کمکی	رابطه اصلی	قیمت ابتدایی	جزء
$c_1 = 0$	$\dot{C}_1 + c_{el,sofc} \dot{W}_{air,com} + \dot{Z}_{air,com} = \dot{C}_2$	$z_{air,com} = 71.1 \dot{m}_{air} \left(\frac{1}{0.9 - \eta_{com}} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$	کمپرسور هوای
$c_{fuel} = 12 \frac{\$}{GJ}$	$\dot{C}_5 + c_{el,sofc} \dot{W}_{fuel,com} + \dot{Z}_{fuel,com} = \dot{C}_6$	$= 71.1 \dot{m}_{fuel} \left(\frac{1}{0.9 - \eta_{com}} \right) \left(\frac{p_6}{p_5} \right) \ln \left(\frac{p_6}{p_5} \right)$	کمپرسور سوخت
$c_8 = 0$	$\dot{C}_8 + c_{el,sofc} \dot{W}_{water,p} + \dot{Z}_{water,p} = \dot{C}_9$	$z_{water,p} = 705.48 \dot{W}_{water,p} \left(\frac{1}{0.2} + \frac{0.71}{1 - \eta_{water,p}} \right)$	پمپ آب
$c_{15} = c_{15}$	$\dot{C}_2 + \dot{C}_{15} + \dot{Z}_{air,hx} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{16}$	$z_{air,hx} = 3 \cdot 130 \cdot \left(\frac{A_{air,hx}}{0.093} \right)^{0.78}$	مبادله کن گرمای هوای
$c_{14} = c_{15}$	$\dot{C}_6 + \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{fuel,hx} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{15}$	$z_{fuel,hx} = 130 \cdot \left(\frac{A_{fuel,hx}}{0.093} \right)^{0.78}$	مبادله کن گرمای سوخت
$c_{13} = c_{14}$	$\dot{C}_9 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{water,hx} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{14}$	$z_{water,hx} = 130 \cdot \left(\frac{A_{water,hx}}{0.093} \right)^{0.78}$	مبادله کن گرمای آب
$c_4 = c_{26}$ $c_{12} = c_{26}$	$\dot{C}_3 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{SOFC} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_4 + c_{26} \dot{W}_{SOFC}$	$z_{SOFC} = A_a N_{fc} (2.96 \cdot t_{SOFC,out} - 1907)$	پیل سوختی
-	$c_{26} \dot{W}_{SOFC} + \dot{Z}_{of,eva} = c_{el,sofc} \dot{W}_{SOFC,ac}$	$z_{inverter} = 100000 \left(\frac{\dot{W}_{SOFC}}{500} \right)^{0.7}$	اینورتر
-	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{AB} = \dot{C}_{13}$	$= 46.08 \cdot \dot{m}_4 \left(\frac{1 + \exp(0.018t_{13} - 26.4)}{0.995 - \frac{p_{13}}{p_{12}}} \right)$	محفظه پس سوز
$c_{16} = c_{17}$	$c_{16} \dot{E}x_{16} + c_{35} \dot{E}x_{35} + \dot{z}_{dhw,hx} = c_{17} \dot{E}x_{17} + c_{36} \dot{E}x_{36}$	$z_{of,hx} = 130 \left(\frac{A_{of,hx}}{0.093} \right)^{0.78}$	مبادله کن گرمای آب گرم
$c_{19} \dot{E}x_{19} - c_{25} \dot{E}x_{25}$ $\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{25}$ $c_{26} \dot{E}x_{26} - c_{25} \dot{E}x_{25}$ $\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{25}$	$c_{17} \dot{E}x_{17} + c_{25} \dot{E}x_{25} + \dot{z}_{gen} = c_{18} \dot{E}x_{18} + c_{19} \dot{E}x_{19} + c_{26} \dot{E}x_{26}$	$z_{gen,ACH} = 0.322 (30000 + 0.75 A_{gen}^{0.8})$	ژنراتور جذبی
$c_{22} = c_{23}$ $c_{31} = 0$	$c_{22} \dot{E}x_{22} + c_{28} \dot{E}x_{28} + c_{31} \dot{E}x_{31} + \dot{z}_{abs} = c_{23} \dot{E}x_{23} + c_{32} \dot{E}x_{32}$	$z_{abs,ACH} = 0.322 (30000 + 0.75 A_{abs}^{0.8})$	ابزربر جذبی
$c_{19} = c_{20}$ $c_{29} = 0$	$c_{19} \dot{E}x_{29} + c_{29} \dot{E}x_{29} + \dot{z}_{con} = c_{20} \dot{E}x_{20} + c_{30} \dot{E}x_{30}$	$z_{con,ACH} = 0.322 (30000 + 0.75 A_{con}^{0.8})$	چگالنده جذبی
$c_{21} = c_{22}$ $c_{33} = 0$	$c_{21} \dot{E}x_{21} + c_{33} \dot{E}x_{33} + \dot{z}_{eva} = c_{22} \dot{E}x_{22} + c_{34} \dot{E}x_{34}$	$z_{eva,ACH} = 0.322 (30000 + 0.75 A_{eva}^{0.8})$	جذب کننده جذبی
$c_{26} = c_{27}$	$c_{24} \dot{E}x_{24} + c_{26} \dot{E}x_{26} + \dot{z}_{shx} = c_{23} \dot{E}x_{23} + c_{32} \dot{E}x_{32}$	$z_{shx,ACH} = 0.322 (30000 + 0.75 A_{shx}^{0.8})$	مبادله کن گرمای محلول
$c_{el} = 10 \frac{\$}{GJ}$	$c_{23} \dot{E}x_{23} + c_{el} \dot{W}_{sp} + \dot{z}_{sp} = c_{24} \dot{E}x_{24}$	$z_{p,ACH} = 1120 \dot{W}_{p,ACH}^{0.8}$	پمپ محلول

۶- نتایج و بحث

۶-۱- نتایج حالت پایه

کلیه معادلات پایستگی جرم و انرژی و روابط برگشت ناپذیری، همچنین روابط مربوط به تحلیل اگزرسی- اقتصادی در اجزای مختلف چرخه ترکیبی به وسیله نرم افزار EES شبیه سازی می شود. در ابتدا به منظور صحت سنجی نتایج حاصله، نتایج خروجی مربوط به پیل سوختی اکسید جامد با موارد ورودی کاملاً یکسان با نتایج مرجع [۲۲] در جدول ۳ مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود تطابق خوبی بین نتایج حاصله و نتایج مرجع مذکور وجود دارد. موارد ابتدایی ورودی به منظور شبیه سازی چرخه ترکیبی مطابق جدول ۴ است [۲۲، ۲۱].

جدول ۳- صحت سنجی نتایج شبیه سازی حاضر مربوط به پیل سوختی اکسید جامد

مرجع [۲۲]	تحقیق حاضر	پارامتر
۰/۸۴۳	۰/۸۴۳۱	$V_n(V)$
۰/۸۸۸۱	۰/۸۸۸۷	$V_{loss}(V)$
۴۸۹/۲۱۱	۴۷۸/۹	$\dot{W}_{SOFC}(kW)$

در نهایت فاکتور اگزرسی- اقتصادی در هر جز مطابق رابطه (۴۲) به دست می آید [۲۴].

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{dest,k}} \quad (42)$$

۵- پارامترهای خروجی

به منظور تحلیل عملکرد چرخه ترکیبی، توان خالص خروجی، بازده اگزرسی و نرخ هزینه کل چرخه ترکیبی از روابط (۴۳) تا (۴۵) محاسبه می شوند.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{SOFC,DC} - \dot{W}_{air,com} - \dot{W}_{fuel,com} - \dot{W}_{water,p} - \dot{W}_{sp} \quad (43)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + (\dot{E}x_{36} - \dot{E}x_{35}) + (\dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{33})}{\dot{E}x_5} \quad (44)$$

$$\dot{C}_{tot} = \sum \dot{Z}_k + \sum \dot{C}_{Dest,k} + \dot{C}_{fuel} \quad (45)$$

که نرخ هزینه سوخت از رابطه \dot{C}_{fuel} به دست می آید.

$$\dot{C}_{fuel} = \dot{m}_{fuel} c_{fuel} LHV_{fuel} \quad (46)$$

۰/۹۹	بازده محفظه پس سوز	η_{AB}
۲۵	دماه آب ورودی مبادله کن گرمای تولید آب گرم	$t_{35}({}^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱/۳	فشار آب ورودی مبادله کن گرمای تولید آب گرم	$p_{33}(kPa)$
۲۵	دماه آب خروجی مبادله کن گرمای تولید آب گرم	$t_{36}({}^{\circ}\text{C})$
۸۰	دماه ژنراتور چیلر جذبی	$t_{19}, t_{26}({}^{\circ}\text{C})$
۳۰	دماه جذب کننده چیلر جذبی	$t_{23}({}^{\circ}\text{C})$
۳۰	دماه چگالنده چیلر جذبی	$t_{20}({}^{\circ}\text{C})$
۲	دماه تبخیر کن چیلر جذبی	$t_{22}({}^{\circ}\text{C})$
۸	اختلاف دماه گاز اتالافی ورودی و خروجی ژنراتور	$\Delta T_{gas}({}^{\circ}\text{C})$
۲۵	دماه آب خنک ورودی چگالنده و جذب کننده	$t_{29}, t_{31}({}^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱/۳	فشار آب خنک ورودی چگالنده و جذب کننده	$p_{29}(kPa)$
۳۵	دماه آب خنک خروجی چگالنده و جذب کننده	$t_{30}, t_{32}({}^{\circ}\text{C})$
۱۲	دماه آب سرد ورودی تبخیر کن	$t_{33}({}^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱/۳	فشار آب سرد ورودی تبخیر کن	$p_{33}(kPa)$
۷	دماه آب سرد خروجی تبخیر کن	$t_{34}({}^{\circ}\text{C})$
۰/۸	کارآبی مبادله کن گرمای محلول	ε_{shx}
۰/۸	بازده پمپ محلول	η_{sp}
۹۶۴۸۵	ثابت فارادی	$F(\frac{C}{mol})$
۷۲۶/۸۵	دماه ورودی پیل سوختی	$t_{SOFC,in}({}^{\circ}\text{C})$
۸۲۶/۸۵	دماه خروجی پیل سوختی	$t_{SOFC,out}({}^{\circ}\text{C})$
۰/۸۵	ضریب مصرف سوخت	U_f
۰/۰۱	مساحت تک پیل سوختی	$A_a(m^2)$
۸۰۰۰	چگالی جریان	$j(\frac{A}{m^2})$
۰/۹۷	بازده اینورتر	$\eta_{inverter}$
۶۵۰۰	چگالی جریان آند	$j_{as}(\frac{A}{m^2})$
۲۵۰۰	چگالی جریان کاند	$j_{es}(\frac{A}{m^2})$
2×10^{-5}	ضریب پخش مؤثر آند	$D_{aef}(\frac{m^2}{s})$
5×10^{-6}	ضریب پخش مؤثر کاند	$D_{cef}(\frac{m^2}{s})$
۱۱۰۰۰	تعداد سلوهای پیل سوختی	N_{FC}
۲/۵	نسبت بخار به کربن	r_{sc}
5×10^{-4}	ضخامت آند	$L_a(m)$
2×10^{-5}	ضخامت کاند	$L_c(m)$
1×10^{-5}	ضخامت الکتروولیت	$L_e(m)$
۰/۰۰۳	ضخامت اتصال	$L_{int}(m)$

برای شبیه‌سازی چرخه‌ترکیبی موارد ابتدایی ورودی چرخه در حالت پایه مطابق جدول ۴ می‌باشد، با استفاده از موارد ورودی و معادلات توازن جرم و انرژی و روابط مربوط به تحلیل اگررژی و اگررژی-اقتصادی، مقادیر خروجی مربوط نرخ انرژی، نرخ اگررژی، اگررژی-اقتصادی‌بازده اگررژی اجزای مختلف سیستم ترکیبی در جدول ۵ را از شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تحریب اگررژی در مبادله کن گرمای هوا، مبادله کن گرمای آب و پیل سوختی رخ می‌دهد، بالاترین بازده اگررژی مربوط به کمپرسورها و شیرهای فشار شکن و کمترین مقدار بازده اگررژی مربوط به مبادله کن گرمای تولید آب گرم و ژنراتور چیلر جذبی است. همچنین در حالت ورودی پایه کار کلی ۴۱۸/۴ کیلووات، بازگشت ناپذیری کلی ۶۵۰/۱ کیلووات و بازده اگررژی کلی ۰/۳۷۸ می‌باشد.

در این تحقیق مبادله کن گرمای هوا، مبدل حرارتی آب و پیل سوختی به عنوان اجرایی معرفی می‌شوند که باید بیشتر از سایر اجرا از منظر اگررژی-اقتصادی مورد توجه قرار بگیرند چون تقریباً بیشترین مقدار $\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ متعلق به این اجزا می‌باشد. همچنین همان‌طور از جدول پیداست کمپرسور سوخت، محفظه پس سوز و مبدل حرارتی آب کمترین مقدار فاکتور اگررژی-اقتصادی را دارا می‌باشد. مقادیر بدست آمده برای اجزای ذکر شده به این معنی است که قیمت تحریب اگررژی بر قیمت ابتدایی غالب بوده که باعث کاهش فاکتور اگررژی-اقتصادی می‌شود. در مورد چنین اجرایی در چرخه افزایش قیمت ابتدایی به منظور کاهش مقدار تحریب اگررژی توصیه می‌شود. این مورد در مبادله کن گرمای بوسیله افزایش مساحت مبادله کن گرمای (که منجر به افزایش قیمت ابتدایی آن می‌شود) و از سوی دیگر کاهش تحریب اختلاف دما در مبادله کن گرمای (که منجر به کاهش برگشت ناپذیری در مبدل حرارتی می‌گردد) محقق می‌شود. همچنین مقدار هزینه واحد انرژی الکتریکی تولید شده بوسیله اینورتر ۲۹/۶۶۵ دلار بر گیگاژول می‌باشد. در انتها قابل ذکر است که مقدار کلی فاکتور اگررژی-اقتصادی برای چرخه ترکیبی ۲/۴۴ درصد می‌باشد. این مقدار نشان‌دهنده این است که ۸۷/۵۶ درصد هزینه سیستم در اثر هزینه متناظر با تحریب اگررژی می‌باشد. در نتیجه به کار بردن اجزای با قیمت بالاتر که منجر به کاهش هزینه تحریب اگررژی و افزایش هزینه ابتدایی سیستم می‌شود، عملکرد سیستم را از منظر اگررژی-اقتصادی بهبود می‌بخشد.

جدول ۴- موارد ابتدایی به منظور شبیه‌سازی [۲۲, ۲۱]

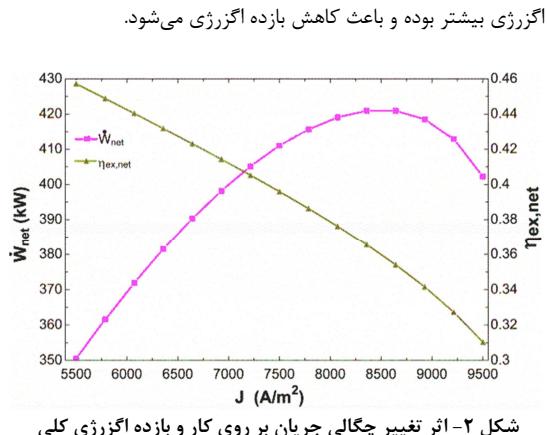
مقدار	توضیح	پارامتر
۲۵	دماه محیط	$t_0({}^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱/۳	فشار محیط	$p_0(kPa)$
۱/۱۹	نسبت فشار کمپرسور و پمپ	$r_{p,com}, r_{p,pump}$
۰/۸۵	بازده آیزوتروپیک کمپرسور هوا و سوخت	η_{com}
۰/۸۵	بازده آیزوتروپیک پمپ آب	$\eta_{water,p}$

جدول ۵- نتایج خروجی مربوط به نرخ انرژی، اگررژی‌های مختلف، اقتصادی‌بازده اگررژی اجزای مختلف سیکل

$f(\%)$	$\dot{Z} (\$/h)$	$C_p (\$/h)$	$c_p (\$/GJ)$	$c_f (\$/GJ)$	η_{ex}	$\dot{Ex}_D (kW)$	$\dot{Ex}_p (kW)$	$\dot{Ex}_f (kW)$	$\dot{Q}_e \dot{W} (kW)$	جزء
۲/۱۴۷	۰/۰۱۸	۰/۰۸۲	۳۴/۶۹۳	۲۹/۶۶۵	۰/۰۸۵۷	۷/۶۷۹	۴۶/۳۷	۵۴/۰۵	۵۴/۰۵	کمپرسور هوا
۱/۱۹۹	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۱	۳۴/۶۹۳	۲۹/۶۶۵	۰/۰۸۵۶	۰/۱۰۳	۰/۶۱۴	۰/۷۱۷	۰/۷۱۷	کمپرسور سوخت
۹۱/۴۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۲۸	۱۰۷/۱۳۵	۲۹/۶۶۵	۰/۰۸۱۷	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	پمپ آب
۱۸/۳۳	۴/۹۵۸	۲۲/۱	۳۶/۲۴۸	۲۹/۶۶۵	۰/۰۸۴۱	۲۰۸/۲	۱۱۰۸	۱۳۱۶	۲۲۰۶	مبادله کن گرمای هوا
۲/۲۱۹	۰/۰۳۸	۱/۶۸۹	۴۶/۶۶۵	۲۹/۶۶۴	۰/۰۶۳۳	۱۵/۹۱	۲۷/۴۹	۴۳/۴	۵۲/۲	مبادله کن گرمای سوخت
۰/۶۴۱۷	۰/۰۸۷	۱۳/۵۱	۷۹/۲۴۷	۲۹/۶۶۴	۰/۰۳۷۳	۱۲۷/۳	۷۵/۸۷	۲۰۳/۲	۲۴۲/۵۷	مبادله کن گرمای سوخت آب
۲۵/۲۴	۲/۸۵۸	۸/۴۶۶	۲۷/۷۰۲	۲۱/۲۵۴	۰/۰۸۱۵	۱۱۰/۶	۴۸۷/۹	۵۹۸/۶	۴۷۲/۳	پبل سوختی
۱/۰۲۹	۰/۱۱۱	۱۰/۷۵	۲۹/۶۶۴	۲۷/۷۰۲	۰/۰۹۴	۱۰۷/۸	۱۷۰۱	۱۸۰۸	-	محفظه پس سوز
	۰/۳۵۹	۶/۶۸۲	۱۷۴/۱۳۴	۲۹/۶۶۴	۰/۰۱۷۶	۶۲/۹۷	۱۳/۵۲	۷۶/۴۹	۲۴۶/۱	مبادله کن گرمای سوخت آب گرم
۱۸/۲۶	۰/۱۸۳	۰/۰۸۲۱	۱۱۸/۲۱۷	۲۹/۶۶۴	۰/۰۲۹۱	۷/۷۴۴	۳/۱۸	۱۰/۹۲	۲۵/۸۶	ژنراتور
۳۱/۲۶	۰/۱۸۳	۰/۰۴۰۳	۵۹۴/۱۵	۱۸۷/۶	۰/۰۴۰۱	۰/۰۵۹۷	۰/۰۴۰۱	۰/۰۹۸	۲۳/۷۴	جذب کننده
۷۲/۶۵	۰/۱۸۳	۰/۰۶۹	۳۸۰/۵۴۴	۱۴۱/۰۷۹	۰/۰۶۸۳	۰/۱۳۶	۰/۰۲۹۳	۰/۰۴۲۹	۱۷/۳۵	چگالنده
۴۵/۴۱	۰/۱۸۳	۰/۰۲۲	۲۷۷/۴۹۲	۱۴۱/۱۳۴	۰/۰۶۵۴	۰/۰۴۳۴	۰/۰۸۲۳	۱/۰۲۵۷	۱۵/۱۵	تبخیرکن
۴۷/۲۸	۰/۱۸۳	۰/۰۲۰۴	۳۰۰/۲۶۹	۱۴۱/۱۳۴	۰/۰۶۲۷	۰/۰۴۰۲	۰/۰۶۷۷	۱/۰۰۸	۱۰/۳	مبادله کن گرمای سوخت محلول
۸۱/۰۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۵	۲۳/۵۷۱	۱۰	۰/۰۷۹۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	پمپ محلول
-	-	۰/۰۲۲	۱۴۱/۲۱۸	۱۴۱/۱۳۴	۰/۰۹۹۹	۰/۰۰۴۵	۵۱۶/۳	۵۱۶/۴	-	شیر فشارشکن محلول
-	-	۰/۰۵۵	۱۴۱/۱۰۷	۱۴۱/۰۷۹	۰/۰۹۹۹	۰/۰۱۰۸	۲۷۱	۲۷۱/۱	-	شیر فشارشکن مبرد

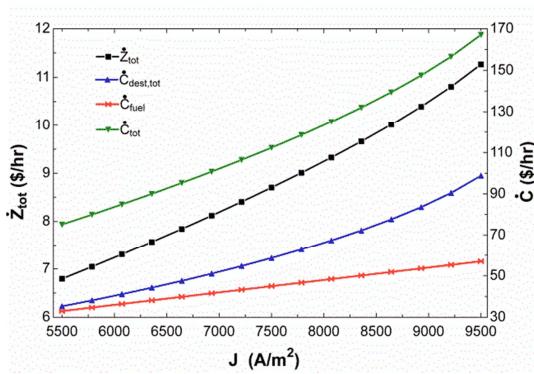
۲-۶- نتایج تحلیل پارامتری

در این قسمت اثر تغییر چگالی جریان پبل سوختی و ضریب مصرف سوخت بر روی عملکرد سیستم از منظر انرژی، اگررژی و اگررژی-اقتصادی بررسی می‌شود. دقت شود که به منظور تحلیل پارامتری تنها پارامتر مورد نظر در بازده در نظر گرفته شده تغییر کرده و بقیه موارد ورودی در چرخه ترکیبی در حالت پایه مطابق جدول ۸ ثابت می‌مانند. در شکل ۲ اثر تغییر چگالی جریان عبوری پبل سوختی بر روی کار و بازده اگررژی کلی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش چگالی جریان در محدوده مورد نظر، کار دارای مقدار بیشترین بوده و بازده کاهش پیدا می‌کند. افزایش چگالی جریان عبوری از پبل سوختی، افزایش جریان عبوری و کاهش ولتاژ پبل سوختی V_C در شکل ۳) را در پی دارد که مطابق رابطه (۲۹) اثر متناقض دو عامل ذکر شده باعث ایجاد بیشینه برای کار خروجی پبل سوختی می‌شود. همچنین افزایش چگالی جریان، افزایش دبی مورد نیاز هوا، سوخت و آب ورودی را در پی دارد که باعث افزایش کار مورد کمپرسور هوا، کمپرسور سوخت و پمپ آب می‌شود. در نهایت ایجاد بیشینه در کار خروجی پبل سوختی باعث ایجاد بیشینه در اگررژی کلی می‌گردد. از سوی دیگر افزایش چگالی جریان، افزایش دبی آب گرم و آب سرد تولیدی، افزایش دبی آب سرد تولیدی و افزایش دبی سوخت متان ورودی را در پی دارد که علیرغم افزایش دبی آب گرم و آب سرد تولیدی در صورت کسر بازده اگررژی، اثر افزایش دبی مورد نیاز متان در مخرج کسر بازده



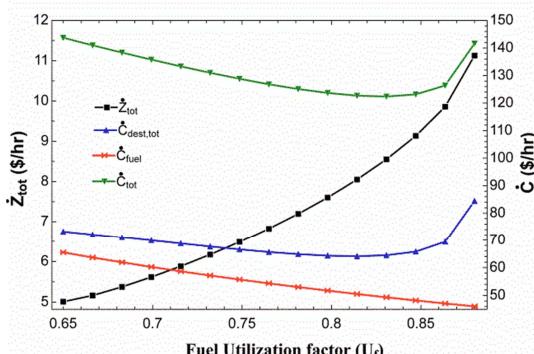
شکل ۲- اثر تغییر چگالی جریان بر روی کار و بازده اگررژی کلی

در شکل ۴ اثر تغییر ضریب مصرف سوخت پبل سوختی بر روی کار و بازده اگررژی کلی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب مصرف سوخت در بازده ذکر شده کار خروجی کاهش یافته و بازده اگررژی دارای بیشینه است. افزایش ضریب مصرف سوخت باعث کاهش ولتاژ عبوری پبل سوختی می‌شود که با ثابت ماندن بقیه موارد، تنها عامل موثر در کاهش کار خروجی پبل سوختی می‌باشد. همچنین افزایش ضریب مصرف سوخت افزایش دبی هوا و کاهش دبی سوخت و آب ورودی را در پی دارد که باعث افزایش کار



شکل ۵- اثر تغییر چگالی جریان بر روی نرخ های هزینه

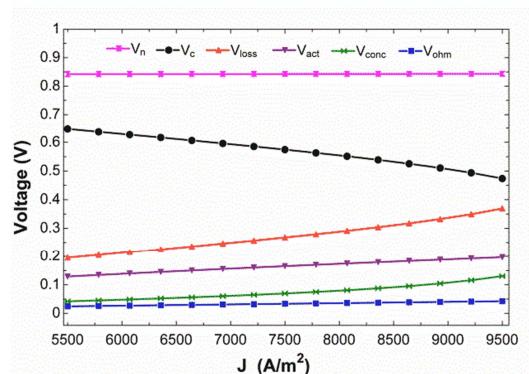
قیمت ابتدایی، تغییرات دبی ذکر شده اثر پیچیده و متناقضی در اجزای مختلف داشته که نهایتاً افزایش قیمت ابتدایی کلی را باعث می شود. اما در مورد نرخ هزینه تخریب اگزرزی، این هزینه در تمامی اجزای سیکل ترکیبی افزایش و مبادله کن گرما تولید آب گرم به میزان قابل توجهی کاهش می یابد که ایجاد کمینه را برای نرخ هزینه تخریب اگزرزی نتیجه می دهد. نرخ هزینه کلی نیز روندی تقریباً مشابه با نرخ هزینه تخریب اگزرزی داشته و در ضریب مصرف سوخت حدود ۰/۸۳ دارد مقادیر کمینه است.



شکل ۶- اثر تغییر ضریب مصرف سوخت بر روی نرخ های هزینه

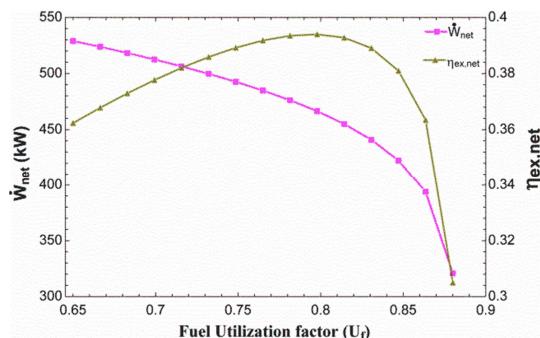
۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر سیستم ترکیبی تولید سه گانه پبل سوختی اکسید چامد، مبادله کن گرما تولید آب گرم و چرخه تبرید جذب آب-آمونیاک از منظر انرژی، اگزرزی و اگزرزی- اقتصادی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حالت پایه حاکی از کار کلی ۴۱۸/۴ کیلووات، بازگشت ناپذیری کلی ۶۵۰/۱ کیلووات و بازده اگزرزی کلی ۰/۳۷۸ برای سیستم ترکیبی بود. همچنین مقدار فاکتور اگزرزی- اقتصادی برای چرخه ترکیبی ۱۲/۴۴ درصد بدست آمد. این مقدار نشان دهنده این بود که که ۸۷/۵۶ درصد هزینه سیستم در اثر هزینه متناظر با تخریب اگزرزی بوده و در نتیجه به کار بردن اجزای با قیمت بالاتر، عملکرد سیستم را از منظر اگزرزی- اقتصادی بهبود می بخشند. نتایج تحلیل پارامتری حاکی از آن بود که افزایش چگالی جریان باعث کاهش بازده اگزرزی، ایجاد بیشینه برای کار کلی و افزایش تمامی نرخ های هزینه می گردد. افزایش ضریب مصرف سوخت نیز باعث کاهش کار کلی، ایجاد بیشینه برای بازده اگزرزی و ایجاد کمینه برای نرخ هزینه



شکل ۳- اثر تغییر چگالی جریان بر روی ولتاژ های مختلف

مورد نیاز کمپرسور هوا و کاهش کار مورد نیاز کمپرسور سوخت و پمپ آب می گردد. در نهایت کار کلی با روندی مشابه روند کاهش کار پبل سوختی کاهش می یابد. همچنین افزایش ضریب مصرف سوخت علاوه بر موارد ذکر شده کاهش دبی آب گرم تولیدی و افزایش دبی آب سرد تولیدی را نتیجه می دهد که مجموع عوامل متناقض ذکر شده باعث ایجاد بیشینه برای بازده اگزرزی می گردد.



شکل ۴- اثر تغییر ضریب مصرف سوخت بر روی کار و بازده اگزرزی کلی

در شکل ۵ اثر تغییر چگالی جریان پبل سوختی بر روی نرخ هزینه ابتدایی، نرخ هزینه تخریب اگزرزی، نرخ هزینه سوخت و نرخ هزینه کلی نشان داده شده است. افزایش چگالی جریان پبل سوختی، افزایش دبی بخش های مختلف چرخه ترکیبی را نتیجه می دهد که عامل موثر در افزایش قیمت ابتدایی تمامی اجزای چرخه ترکیبی می باشد. در میان اجزا تنها قیمت ابتدایی پبل سوختی بدون تغییر می ماند. همچنین این افزایش دبی باعث افزایش بازگشت ناپذیری و نرخ هزینه بازگشت ناپذیری تمام اجزای چرخه ترکیبی شده و در نهایت نرخ هزینه کلی در اثر افزایش تمامی جملات آن، افزایش می یابد.

در شکل ۶ اثر تغییر ضریب مصرف سوخت پبل سوختی بر روی نرخ هزینه ابتدایی، نرخ هزینه تخریب اگزرزی، نرخ هزینه سوخت و نرخ هزینه کلی نشان داده است. افزایش ضریب مصرف سوخت همانطور که قبل اشاره شد باعث افزایش دبی مورد نیاز هوا و کاهش دبی سوخت و آب مورد نیاز ورودی پبل سوختی، همچنین کاهش دبی آب گرم تولیدی و افزایش دبی آب سرد تولیدی می شود. در مورد نرخ

- مراجع - ۸

- [14] Tempesti D., Fiaschi D., Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy, *Energy*, Vol. 58, pp. 45-51, 2013 .
- [15] Boyaghchi, F. A . Heidarnejad P., Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application, *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 224-234, 2015 .
- [16] Ahmadi P., Dincer ,I. Rosen M. A., Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 282-300, 2013 .
- [17] Khaljani M., Saray R. K., Bahlouli K., Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle, *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 154-165, 2015 .
- [18] Şençan A., Yakut K. A., Kalogirou S. A., Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems, *Renewable energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 645-657, 2005 .
- [19] Kaushik S., Arora A., Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water-lithium bromide absorption refrigeration systems ,*International journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 6, pp. 1247-1258, 2009 .
- [20] Farshi L. G., Mahmoudi S. S., Rosen M., Yari M., M. Amidpour, Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems, *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 13-25, 2013 .
- [21] Aman, J. Ting D.-K., Henshaw P., Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia-water absorption cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 62, No. 2, pp. 424-432, 2014 .
- [22] A. Chitsaz ,S. M. S. Mahmoudi, M. A. Rosen, Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 86, pp. 81-90, 2015 .
- [23] Ranjbar F., Chitsaz A., Mahmoudi S., Khalilarya S., Rosen M. A., Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 318-327, 2014 .
- [24] Bejan A., Tsatsaronis G., *Thermal design and optimization*: John Wiley&Sons, 1996 .
- [25] Colpan C. O. *Thermal Modelling of Solid Oxide Fuel-cell Based Biomass Gasification Systems*, Thesis, Carleton University, 2009 .
- [26] Bahlouli K. Saray R. K., Sarabchi N., Parametric investigation and thermo-economic multi-objectiveoptimization of an ammonia–water power/cooling cycle coupled with an HCCI (homogeneous charge compression ignition) engine, *Energy*, Vol. 86, pp. 672-684, 2015 .
- [27] Lazzaretto A., Tsatsaronis G., SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy*, Vol. 31, No. 8, pp. 1257-1289, 2006 .
- [1] Chan S., Ho H., Tian Y., 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 .
- [2] Bavarsad P. G., Energy and exergy analysis of internal reforming solid oxide fuelcell-gas turbine hybrid system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 17, pp. 4591-4599, 2007 .
- [3] Pirkandi J., Mahmoodi M., Ommian M., An optimal configuration for a solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system based on thermo-economic modelling, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 144, pp. 375-386, 2017 .
- [4] Aminyavari M., Mamaghani A. H., Shirazi A., Najafi B., Rinaldi F., Exergetic, economic, and environmental evaluations and multi-objective optimization of an internal-reforming SOFC-gas turbine cycle coupled with a Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 108, pp. 833-846, 2016 .
- [5] Gholamian E., Zare V., comparative A thermodynamic investigation with environmental analysis of SOFC waste heat to power conversion employing Kalina and Organic Rankine Cycles, *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 150-161, 2016 .
- [6] Ebrahimi M., Moradpoor I., Combined solid oxide fuel cell, micro-gas turbine and organic Rankine cycle for power generation (SOFC-MGT-ORC),*(Energy Conversion and Management*, Vol. 116, pp. 120-133, 2016 .
- [7] Ma S., Wang J., Yan Z., Dai, Y. B. Lu, Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heat and power system driven by solid oxide fuel cell based on ammonia–water mixture, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 20, pp. 8463-8471, 2011 .
- [8] Sadeghi M., Chitsaz A., Mahmoudi S., M. A. Rosen, Thermoeconomic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell, *Energy*, Vol. 89, pp. 191-2015-2040
- [9] L. Khani, S. M. S. Mahmoudi, A. Chitsaz, M. A. Rosen, Energy and exergoeconomic evaluation of a new power/cooling cogeneration system based on a solid oxide fuel cell, *Energy*, Vol. 94, pp. 64-77, 2016 .
- [10] M. Mortazaei, M. Rahimi, A comparison between two methods of generating power, heat and refrigeration via biomass based Solid Oxide Fuel Cell: A thermodynamic and environmental analysis, *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, pp. 132-141, 2016 .
- [11] E. Gholamian, V. Zare, S. M .Mousavi, Integration of biomass gasification with a solid oxide fuel cell in a combined cooling, heating and power system: A thermodynamic and environmental analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 44, pp. 20396-20406, 2016 .
- [12] J. Zhang, H. Cho, A. Knizley, Evaluation of financial incentives for combined heat and power (CHP) systems in US regions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 738-762, 2016 .
- [13] Liu M., Shi Y., Fang F., Combined cooling, heating and power systems: A survey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 35, pp. 1-22, 2014 .