

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

محمد ذوقی

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

محمد رضا علی خباز جورشری

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

کورش جواهرده\*

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

### چکیده

در این تحقیق یک سیستم ترکیبی شامل چرخه پیل سوختی اکسید جامد، مبادله کن گرما تولید آب گرم خانگی و چیلر جذبی تک مرحله ای آب-آمونیاک به منظور تولید همزمان قدرت، برودت و آب گرم شیبه سازی و از منظر انرژی، اگزرژی و اگزرژی-اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد 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 می‌گیرد. نتایج حالت پایه حاکی از آن است که کار کلی ۴۱۸/۴ کیلووات، بازگشت ناپذیری کلی ۶۵۰/۱ کیلووات و بازده اگزرژی کلی ۰/۳۷۸ می‌باشد. همچنین مبادله کن گرما هوا، مبادله کن گرما آب و پیل سوختی به عنوان اجزایی معرفی می‌شوند که باید بیشتر از سایر اجزا از منظر اگزرژی-اقتصادی مورد توجه قرار بگیرند چون تقریباً بیشترین مقدار نرخ هزینه متعلق به این اجزا می‌باشد.

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

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

M. Zoghi

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

M. R. Aikhabazjorshary

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

K. Javaherdeh

Department Of Mechanical Engineering, University Of Guilan, Rasht, Iran

### Abstract

In this study, a hybrid system including of 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:** Trigenation system, Solid oxide fuel cell, Exergy, Exergoeconomic, parametric analyses.

### ۱- مقدمه

[۳]، پیل سوختی و چرخه رانکین بخار، آلی و چرخه کالینا [۴-۶]، 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 سیستم‌های تولید همزمان توان، گرما و سرما به دلیل نیاز همزمان به برق و گرما و یا برق 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 می‌آید که دارای صرفه اقتصادی مناسبی می‌باشد. بازده چرخه های تولید قدرت متداول حدود ۳۰ درصد و کمتر است و در این سیستم‌ها قسمت عمده انرژی محرک به هدر می‌رود [۱۲]. در حالی که می‌توان با استفاده از سیستم‌های 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 می‌رسد [۱۳]. در سیستم‌های تولید همزمان، اکثراً از انرژی اتلافی دستگاه تولید قدرت به منظور ایجاد

درسال‌های اخیر استفاده فزاینده از سوخت‌های فسیلی مشکلات زیست‌محیطی فراوانی مانند آلودگی شهرها، تخریب لایه اوزون، باران‌های اسیدی و غیره را در پی داشته است. علاوه بر این با افزایش مراکز صنعتی و مصرف بیشتر این سوخت‌ها دورنمای پایان ذخایر انرژی‌های فسیلی واضح‌تر 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 پیل‌های سوختی برای تولید الکتریسیته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، پیل‌های سوختی به عنوان یک فناوری نسبتاً جدید در تبدیل انرژی مطرح بوده و از بین انواع مختلف پیل‌های 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 توربین‌های گازی و یا سایر انواع چرخه های تولید قدرت، گرما و سرما دما پایین را دارا است که در تحقیقات مختلفی چرخه ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گازی [۱-

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: javaherdeh\_k@yahoo.com

تعریف جریان اگزوزی سوخت، محصول و تخریب برای اجزای مختلف چیلر، آنالیز اگزوزی-اقتصادی را برای بدست آوردن فاکتور اگزوزی-اقتصادی در هر یک از اجزا انجام دادند. بیشترین مقدار این فاکتور به ترتیب برای پمپ مخلول، ژنراتور، مبدل گرمایی مخلول و مجموعه جذب کننده و چگالنده و تبخیرکن بدست آمد. امان و همکاران [۲۱] تحلیل انرژی و اگزوزی را برای چیلر جذبی تک مرحله ای آب-آمونیاک با محرک انرژی خورشیدی انجام دادند و سپس اثر تغییر دمای بخشهای مختلف چرخه را بر روی عملکرد سیستم از منظر انرژی و اگزوزی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که بالاترین بازگشت ناپذیری در بین اجزای چیلر جذبی ابتدا در جذب کننده و سپس در ژنراتور و چگالنده رخ می‌دهد.

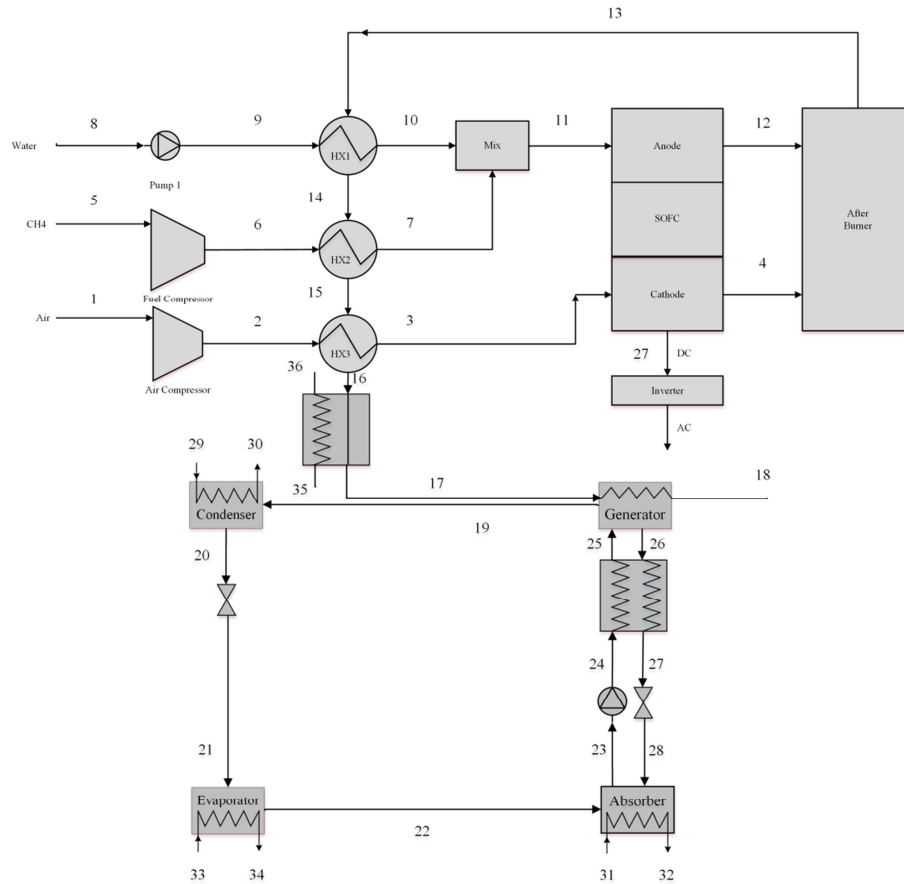
در تحقیق حاضر سیستم ترکیبی شامل سیکل پیل سوختی اکسید جامد، مبادله کن گرما تولید آب گرم خانگی و چیلر جذبی تک مرحله ای آب-آمونیاک به منظور تولید همزمان قدرت، سرما و آب گرم شبیه‌سازی و از منظر انرژی، اگزوزی و اگزوزی-اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. چرخه جذبی آب-آمونیاک تا کنون نسبت به چرخه جذبی لیتیومی برماید-آب به خصوص از منظر اگزوزی-اقتصادی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، به همین دلیل از چرخه جذبی آب-آمونیاک به منظور تولید بروت استفاده می‌شود. همچنین بررسی عملکرد اگزوزی-اقتصادی چرخه تولید همزمان پیل سوختی اکسید جامد، مبادله کن گرما تولید آب گرم و چرخه تبرید جذبی از نوآوری های این تحقیق بوده که تا کنون در تحقیق دیگری انجام نشده است.

## ۲- شرح عملکرد چرخه ترکیبی

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

گرمایش و یا سرمایش استفاده می‌شود. برای مثال از دفع گرما در چگالنده چرخه رانکین می‌توان به عنوان محرک 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 محرک همزمان انرژی زمین گرمایی و خورشیدی از منظر انرژی، اگزوزی و اقتصادی شبیه‌سازی کردند. بویاقچی و همکاران [۱۵] چرخه تولید همزمان قدرت، حرارت و برودت با محرک انرژی خورشیدی همراه با تانک ذخیره را برای دو فصل زمستان و تابستان از منظر انرژی، اگزوزی و اگزوزی-اقتصادی شبیه‌سازی نمودند. احمدی و همکاران [۱۶] یک سیستم تولید همزمان چند منظوره متشکل 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 الکترولیزر را شبیه‌سازی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی دو هدفه نمودند. خلجانی و همکاران [۱۷] یک چرخه ترکیبی توربین گاز و رانکین آلی به منظور تولید همزمان گرما و قدرت را از منظر انرژی، اگزوزی و اگزوزی-اقتصادی مورد بررسی قرار دادند.

سرمایش مورد نیاز برای تهویه 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 محرک استفاده می‌کنند که به آنها چرخه های تولید سرما 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 محرک انرژی گرمایی هستند که به دلیل قابلیت استفاده از انواع انرژی‌های پاک و تجدید پذیر دما پایین به عنوان محرک آنها، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. ترکیبات متداول در این سیستم‌ها لیتیوم برماید-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 اگزوزی را برای یک چیلر جذبی تک مرحله‌ای لیتیوم برماید-آب با در نظر گرفتن دماهای آب گرم، آب خنک و آب سرد ورودی به چیلر جذبی انجام دادند. کابوشیک و آرورا [۱۹] تحلیل انرژی و اگزوزی را برای چیلر جذبی تک مرحله ای و دو مرحله ای لیتیوم برماید-آب انجام داده و ابتدا تخریب اگزوزی را در هر یک از اجزای چیلر جذبی بدست آوردند. بیشترین مقدار تخریب اگزوزی در ابربر چیلر جذبی رخ داده و بعد از آن به ترتیب چگالنده، تبخیرکن، ژنراتور و مبادله کن گرما بالاترین مقدار تخریب اگزوزی را دارا بودند. گروسو و همکاران [۲۰] تحلیل اگزوزی-اقتصادی را برای چیلر جذبی دو مرحله ای لیتیوم برماید-آب انجام دادند و در انتها با



شکل ۱- طرحواره چرخه ترکیبی

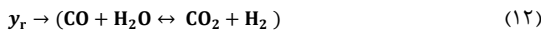
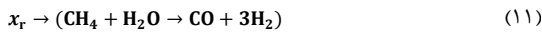
می‌شود.

- ۳- هوا با درصد مولی ۷۹ درصد نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن وارد پیل سوختی می‌شود.
- ۴- هوا، سوخت و بخار آب با دمای یکسان وارد پیل سوختی می‌شوند.
- ۵- محصولات خروجی آند و کاتد با دمای یکسان از پیل سوختی خارج می‌شوند.
- ۶- مخلوط گازهای خروجی از پیل سوختی در تعادل شیمیایی می‌باشند.
- 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 می‌شود.
- ۹- کمپرسور، توربین و پمپ بازده آیزونتروپیک ثابت دارند.
- ۱۰- افت فشار پیل سوختی ۲ درصد و افت فشار محفظه پس سوز ۳ درصد فرض می‌شود.
- 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 جذبی صرفنظر می‌شود.
- ۱۲- حداقل دمای گاز اتلافی خروجی برای جلوگیری از تشکیل مواد خوردنده، ۱۰۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود.
- ۱۳- در چرخه جذبی مبرد خروجی از چگالنده مایع اشباع و مبرد خروجی از تبخیرکن بخار اشباع فرض می‌شود.

چگالنده و جذب کننده چرخه جذبی با آب، در دما و فشار محیط خنک شده و سرما مطلوب خروجی در تبخیر کن تولید می‌شود. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود چرخه جذبی 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 می‌کند، سپس در جذب کننده بخار مبرد، جذب ماده جذب می‌شود و سپس این مخلوط توسط پمپ به ژنراتور فرستاده می‌شود. گرمای خارجی در ژنراتور موجب می‌گردد که دمای مخلوط بالا رفته و بخار مبرد از مخلوط جدا شود. در چگالنده بخار مبرد تولید شده در ژنراتور، سرد می‌گردد و با دفع گرما تقطیر می‌شود. سپس مایع مبرد تولید شده در چگالنده، با کاهش فشار توسط شیر فشارشکن وارد تبخیر کن می‌گردد و مخلوط غلیظ ایجاد شده در ژنراتور به جذب کننده فرستاده می‌شود تا بخار مبرد تولید شده در تبخیرکن را مجدداً جذب کند. معمولاً یک مبادله کن گرما در مسیر رفت و برگشت مخلوط غلیظ دما بالا و مخلوط رقیق دما پایین بین ژنراتور و جذب کننده قرار می‌گیرد که باعث بازیابی حرارت و در نتیجه افزایش راندمان چرخه جذبی می‌شود. به منظور شبیه سازی چرخه ترکیبی فرضیات ساده کننده زیر در نظر گرفته می‌شود [۲۱-۲۳]:

- ۱- سیستم در حالت پایا کار می‌کند.
- ۲- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در اجزای مختلف صرفنظر

بوده که به ترتیب مطابق معادلات (۱۱) تا (۱۳) است و با نرخ مولی  $z_r, y_r, x_r$  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 گرماگیر به‌سازی از گرمای آزاد شده دو واکنش دیگر، یعنی واکنش کلی الکتروشیمیایی و واکنش دگرگونی تامین می‌شود. با فرض اینکه واکنش به‌سازی به‌طور کامل انجام می‌شود [۷، ۲۲] (به دلیل دمای بالای پیل سوختی و اثر کاتالیستی مواد بکار رفته در آند پیل سوختی)، ثابت تعادل واکنش دگرگونی مطابق رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$\ln(K_s) = \ln\left(\frac{y_r(3x_r + y_r - z_r)}{(x_r - y_r)(1.5x_r - y_r + z_r)}\right) \quad (14)$$

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

$$\log(K_s) = A_s(t_{SOFC, out})^4 + B_s(t_{SOFC, out})^3 + \quad (15)$$

$$C_s(t_{SOFC, out})^2 + D_s(t_{SOFC, out}) + E_s$$

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 رابطه‌ی چگالی جریان  $j$  و ضریب مصرف سوخت  $U_f$  نیز استفاده می‌شود.

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

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

قابل ذکر است که ثوابت موجود در رابطه (۱۶) در جدول موارد ابتدایی ورودی 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].

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

$$\dot{n}_{h2o,11} = r_{sc} \cdot x_r \quad (19)$$

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

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

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

$$\dot{n}_{h2o,12} = 1.5x_r - y_r + z_r \quad (23)$$

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

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

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

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

که در رابطه (۱۹)  $r_{sc}$  نسبت بخار به کربن بوده و در رابطه (۲۴)  $U_0$  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

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

۱۵- برای تحلیل آگزروی، 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 آگزروی اجزای چرخه گفته می‌شود و در قسمت ۳-۱ روابط مربوط به شبیه‌سازی پیل سوختی اکسید جامد که جزء عمده و اصلی چرخه ترکیبی است شرح داده می‌شود.

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

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

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

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

$$\dot{E}x_Q + \dot{m}_i ex_i = \dot{E}x_w + \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_D \quad (4)$$

که زیرنویس  $i$  و  $e$  به ترتیب ورودی و خروجی از حجم کنترل  $\dot{E}x_D$  تخریب آگزروی در هر جزء بوده و  $\dot{E}x_Q$  آگزروی متناظر با انتقال گرما،  $\dot{E}x_w$  آگزروی متناظر با توان و  $ex$  آگزروی مربوط به هر جریان بوده که از روابط (۵) تا (۷) به دست آمده است [۲۴].

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

$$\dot{E}x_w = \dot{W} \quad (6)$$

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

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

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

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

که زیرنویس 0 مربوط به خواص در دما و فشار محیط بوده و در رابطه (۹)،  $x_i$  و  $ex_i^{ch}$  به ترتیب، کسر مولی و آگزروی شیمیایی استاندارد هر جزء می‌باشند. همچنین به منظور سنجش حقیقی کار آرایبی هر جز در چرخه ترکیبی بازده آگزروی مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد [۲۴].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_p}{\dot{E}x_f} = 1 - \frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_f} \quad (10)$$

که  $\dot{E}x_p$  و  $\dot{E}x_f$  به ترتیب مربوط به جریان آگزروی محصول سوخت هر جزء می‌باشند. سوخت آگزروی بیانگر منابعی است که محرک جزء بوده و در نهایت محصول را تولید می‌کند و محصول آگزروی، جریان آگزروی مفید حاصله از یک دستگاه است که مربوط به محصول ترمودینامیکی دستگاه است.

### ۳-۱- پیل سوختی اکسید جامد

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

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

آخرین رابطه برای حل مجموعه معادلات مربوط به پیل سوختی، رابطه پایستگی انرژی بوده که با توجه به آدیاباتیک بودن پیل، مطابق رابطه (۳۴) نوشته می‌شود [۲۵].

$$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} + \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{W}_{SOFC} \quad (34)$$

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

$$\dot{W}_{SOFC,DC} = \dot{W}_{SOFC} \eta_{inverter} \quad (35)$$

#### ۴- تحلیل انرژی-اقتصادی

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

$$\sum (c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{Q,k} \dot{E}_{Q,k} + \sum (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k \quad (36)$$

که  $c$  هزینه واحد انرژی و  $\dot{Z}_k$  نرخ هزینه برای جزء  $k$  ام است و از رابطه (۳۷) بدست می‌آید [۲۴].

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N} \quad (37)$$

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

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (38)$$

که  $i$  نرخ سود سرمایه برابر با ۱۰ درصد و  $n$  تعداد سال‌های عملکرد سیستم برابر با ۲۰ سال است. همچنین  $\varphi = 1/0.6$  بوده و  $N = 7446$  ساعت در نظر گرفته می‌شود [۸]. روابط موازنه 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 انرژی تمام جریان‌ها محاسبه می‌شود [۲۷]. معادلات اصلی و کمکی مربوط به تحلیل انرژی-اقتصادی اجزای مختلف سیکل ترکیبی پیل سوختی و چرخه سه‌گانه بازیاب در جدول ۲ آمده است. تعریف سوخت و محصول برای محاسبات بازده انرژی در یک جزء منجر به تعریف 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) به دست می‌آید [۲۴].

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (39)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \quad (40)$$

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

$$\dot{C}_{dest,k} = c_{F,k} \dot{E}x_{D,k} \quad (41)$$

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].

$$I = j \cdot A_a \quad (28)$$

$$\dot{W}_{SOFC} = N_{FC} \cdot I \cdot V_c \quad (29)$$

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

$$V_c = V_n - V_{loss} \quad (30)$$

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].

$$V_{loss} = V_{ohm} + V_{act} + V_{conc} \quad (31)$$

افت ولتاژ مجموعه پیل سوختی نیز حاصل جمع سه نوع افت ولتاژ فعال سازی ( $V_{act}$ )، افت ولتاژ اهمی ( $V_{ohm}$ ) و افت ولتاژ غلظتی ( $V_{conc}$ ) 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].

$$V_n = \frac{\Delta g^0}{2 \cdot F} + \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{a_{H2,12} \cdot a_{O2,4}^{0.5}}{a_{H2O,12}}\right) \quad (32)$$

که در رابطه (۳۲)  $\bar{g}^0$  تابع گیبس استاندارد بر مبنای مولی بوده و  $a_{i,12}$  از رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود.

$$a_{i,12} = y_{i,12} \cdot \frac{P_{12}}{p_{ref}} \quad (33)$$

که  $y$  کسر مولی جریانات مختلف بوده و  $p_{ref}$  فشار مرجع برابر ۱۰/۱۳ 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 الکتروشیمیایی [۲۲]

عنوان	روابط
اتلاف اهمی	$V_{ohm} = (R_c + \rho_c \cdot L_c + \rho_a \cdot L_a + \rho_e \cdot L_e + \rho_{int} \cdot L_{int}) \cdot \frac{j}{j_0}$
	$\rho_c = \left(\frac{42 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \cdot \exp\left(\frac{-1200}{t_{SOFC,out}}\right)\right)^{-1}$
	$\rho_a = \left(\frac{95 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \cdot \exp\left(\frac{-1150}{t_{SOFC,out}}\right)\right)^{-1}$
	$\rho_e = \left(\frac{9.3 \cdot 10^6}{t_{SOFC,out}} \cdot \exp\left(\frac{-1100}{t_{SOFC,out}}\right)\right)^{-1}$
اتلاف فعال سازی	$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c}$
	$V_{act,a} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{F} \cdot \text{arcsinh}\left(\frac{j}{j_{0a}}\right)$
	$V_{act,c} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{F} \cdot \text{arcsinh}\left(\frac{j}{j_{0c}}\right)$
اتلاف غلظتی	$V_{conc} = V_{conc,a} + V_{conc,c}$
	$V_{conc,a} = \frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F} \left( \ln\left(1 + \frac{P_{H2,12} \cdot j}{P_{H2O,12} \cdot j_{as}}\right) - \ln\left(1 - \frac{j}{j_{as}}\right) \right)$
	$V_{conc,c} = -\left(\frac{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out})}{2 \cdot F}\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{cs}}\right)$
	$j_{as} = \frac{2 \cdot F \cdot P_{H2,12} \cdot D_{aeff}}{\bar{R} \cdot (t_{SOFC,out}) \cdot L_a}$

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

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

۶- نتایج و بحث

۶-۱- نتایج حالت پایه

کلیه معادلات پایداری جرم و انرژی و روابط برگشتناپذیری، همچنین روابط مربوط به تحلیل انرژی-اقتصادی در اجزای مختلف چرخه ترکیبی به وسیله نرم افزار EBS 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

پارامتر	تحقیق حاضر	مرجع [۲۲]
$V_n (V)$	۰/۸۴۳۱	۰/۸۴۳
$V_{loss} (V)$	۰/۲۸۸۷	۰/۲۸۸۱
$\dot{W}_{SOFC} (kW)$	۴۷۸/۹	۴۸۹/۲۱۱

در نهایت فاکتور انرژی-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 انرژی و نرخ هزینه کل چرخه ترکیبی از روابط (۴۳) تا (۴۵) محاسبه می شوند.

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

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

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

که نرخ هزینه سوخت  $\dot{C}_{fuel}$  از رابطه (۴۶) به دست می آید.

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

۰/۹۹	بازده محفظه پس سوز	$\eta_{AB}$
۲۵	دمای آب ورودی مبادله کن گرما تولید آب گرم	$t_{35}(^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱۳	فشار آب ورودی مبادله کن گرما تولید آب گرم	$p_{33}(kPa)$
۲۵	دمای آب خروجی مبادله کن گرما تولید آب گرم	$t_{36}(^{\circ}\text{C})$
۸۰	دمای ژنراتور چیلر جذبی	$t_{19}, t_{26}(^{\circ}\text{C})$
۳۰	دمای جذب کننده چیلر جذبی	$t_{23}(^{\circ}\text{C})$
۳۰	دمای چگالنده چیلر جذبی	$t_{20}(^{\circ}\text{C})$
۲	دمای تبخیرکن چیلر جذبی	$t_{22}(^{\circ}\text{C})$
۸	اختلاف دمای گاز اتلافی ورودی و خروجی ژنراتور	$\Delta T_{gas}(^{\circ}\text{C})$
۲۵	دمای آب خنک ورودی چگالنده و جذب کننده	$t_{29}, t_{31}(^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱۳	فشار آب خنک ورودی چگالنده و جذب کننده	$p_{29}(kPa)$
۲۵	دمای آب خنک خروجی چگالنده و جذب کننده	$t_{30}, t_{32}(^{\circ}\text{C})$
۱۲	دمای آب سرد ورودی تبخیرکن	$t_{33}(^{\circ}\text{C})$
۱۰/۱۳	فشار آب سرد ورودی تبخیرکن	$p_{33}(kPa)$
۷	دمای آب سرد خروجی تبخیرکن	$t_{34}(^{\circ}\text{C})$
۰/۸	کارایی مبادله کن گرما محلول	$\epsilon_{shx}$
۰/۸	بازده پمپ محلول	$\eta_{sp}$
۹۶۴۸۵	ثابت فارادی	$F(\frac{C}{mol})$
۷۲۶/۸۵	دمای ورودی پیل سوختی	$t_{sofc,in}(^{\circ}\text{C})$
۸۲۶/۸۵	دمای 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 کاتد	$j_{cs}(\frac{A}{m^2})$
$3 \times 10^{-5}$	ضریب پخش موثر آند	$D_{aeff}(\frac{m^2}{s})$
$5 \times 10^{-6}$	ضریب پخش موثر کاتد	$D_{ceff}(\frac{m^2}{s})$
۱۱۰۰۰	تعداد سلولهای پیل سوختی	$N_{FC}$
۲/۵	نسبت بخار به کربن	$r_{sc}$
$5 \times 10^{-4}$	ضخامت آند	$L_a(m)$
$2 \times 10^{-5}$	ضخامت کاتد	$L_c(m)$
$1 \times 10^{-5}$	ضخامت الکترولیت	$L_e(m)$
۰/۰۰۳	ضخامت اتصال	$L_{int}(m)$

برای شبیه سازی چرخه ترکیبی موارد ابتدایی ورودی چرخه در حالت پایه مطابق جدول ۴ می باشد، با استفاده از موارد ورودی و معادلات توازن جرم و انرژی و روابط مربوط به تحلیل انرژی و انرژی-اقتصادی، مقادیر خروجی مربوط نرخ انرژی، نرخ انرژی، انرژی-اقتصادی، اقتصادبازده انرژی اجزای مختلف سیستم ترکیبی در جدول ۵ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین مقدار تخریب انرژی در مبادله کن گرمای هوا، مبادله کن گرمای آب و پیل سوختی رخ می دهد، بالاترین بازده انرژی مربوط به کمپرسورها و شیرهای فشار شکن و کمترین مقدار بازده انرژی مربوط به مبادله کن گرمای تولید آب گرم و ژنراتور چیلر جذبی است. همچنین در حالت ورودی پایه کار کلی ۴/۱۸۴ کیلووات، بازگشت ناپذیری کلی ۱/۶۵ کیلووات و بازده انرژی کلی ۰/۳۷۸ می باشد.

در این تحقیق مبادله کن گرمای هوا، مبدل حرارتی آب و پیل سوختی به عنوان اجزایی معرفی می شوند که باید بیشتر از سایر اجزا از منظر انرژی-اقتصادی مورد توجه قرار بگیرند چون تقریباً بیشترین مقدار  $\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}$  متعلق به این اجزا می باشد. همچنین همان طور از جدول پیداست کمپرسور سوخت، محفظه پس سوز و مبدل حرارتی آب کمترین مقدار فاکتور انرژی-اقتصادی را دارا می باشد. مقادیر بدست آمده برای اجزای ذکر شده به این معنی است که قیمت تخریب انرژی بر قیمت ابتدایی غالب بوده که باعث کاهش فاکتور انرژی-اقتصادی می شود. در مورد چنین اجزایی در چرخه افزایش قیمت ابتدایی به منظور کاهش مقدار تخریب انرژی توصیه می شود. این مورد در مبادله کن گرمای بوسیله افزایش مساحت مبادله کن گرما (که منجر به افزایش قیمت ابتدایی آن می شود) و از سوی دیگر کاهش اختلاف دما در مبادله کن گرمای (که منجر به کاهش برگشت ناپذیری در مبدل حرارتی می گردد) محقق می شود. همچنین مقدار هزینه واحد انرژی الکتریکی تولید شده بوسیله اینورتر ۲۹/۶۶۵ دلار بر گیگاوات می باشد. در انتها قابل ذکر است که مقدار کلی فاکتور انرژی-اقتصادی برای چرخه ترکیبی ۱۲/۴۴ درصد می باشد. این مقدار نشان دهنده این است که ۸۷/۵۶ درصد هزینه سیستم در اثر هزینه متناظر با تخریب انرژی می باشد. در نتیجه به کار بردن اجزای با قیمت بالاتر که منجر به کاهش هزینه تخریب انرژی و افزایش هزینه ابتدایی سیستم می شود، عملکرد سیستم را از منظر انرژی-اقتصادی بهبود می بخشد.

جدول ۴- موارد ابتدایی به منظور شبیه سازی [۲۲، ۲۱]

پارامتر	توضیح	مقدار
$t_0(^{\circ}\text{C})$	دمای محیط	۲۵
$p_0(kPa)$	فشار محیط	۱۰/۱۳
$r_{p,com}, r_{p,pump}$	نسبت فشار کمپرسور و پمپ	۱/۱۹
$\eta_{com}$	بازده آیزوتروپیک کمپرسور هوا و سوخت	۰/۸۵
$\eta_{water,p}$	بازده آیزوتروپیک پمپ آب	۰/۸۵

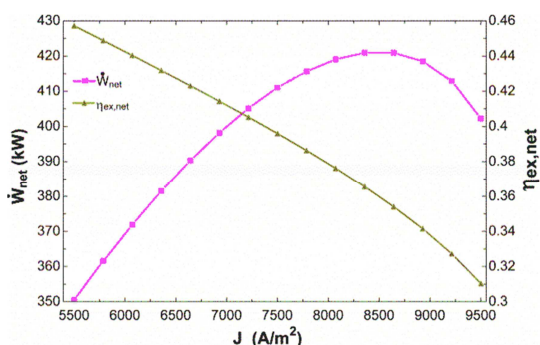
جدول ۵- نتایج خروجی مربوط به نرخ انرژی، انرژی‌های مختلف، انرژی-اقتصادی بازده انرژی اجزای مختلف سیکل

جزء	$\dot{Q}_i W (kW)$	$\dot{E}x_i (kW)$	$\dot{E}x_p (kW)$	$\dot{E}x_D (kW)$	$\eta_{ex}$	$c_p (\$/GJ)$	$c_D (\$/h)$	$\dot{Z} (\$/h)$	$f(\%)$
کمپرسور هوا	۵۴/۰۵	۵۴/۰۵	۴۶/۳۷	۷/۶۷۹	۰/۸۵۷	۲۹/۶۶۵	۳۴/۶۹۳	۰/۰۱۸	۲/۱۴۷
کمپرسور سوخت	۰/۷۱۷	۰/۷۱۷	۰/۶۱۴	۰/۱۰۳	۰/۸۵۶	۲۹/۶۶۵	۳۴/۶۹۳	۰/۰۰۰۱۳	۱/۱۹۹
پمپ آب	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۲	۰/۸۱۷	۲۹/۶۶۵	۱۰۷/۱۳۵	۰/۰۰۰۰۳	۹۱/۴۳
مبادله کن گرمای هوا	۲۲۰۶	۱۳۱۶	۱۱۰۸	۲۰۸/۲	۰/۸۴۱	۲۹/۶۶۵	۳۶/۲۴۸	۲۲/۱	۱۸/۳۳
مبادله کن گرمای سوخت	۵۲/۲	۴۳/۴	۲۷/۴۹	۱۵/۹۱	۰/۶۳۳	۲۹/۶۶۴	۴۶/۶۶۵	۱/۶۸۹	۲/۲۱۹
مبادله کن گرمای سوخت آب	۲۴۲/۵۷	۲۰۳/۲	۷۵/۸۷	۱۲۷/۳	۰/۳۷۳	۲۹/۶۶۴	۷۹/۲۴۷	۱۳/۵۱	۰/۶۴۱۷
پیل سوختی	۴۷۳/۳	۵۹۸/۶	۴۸۷/۹	۱۱۰/۶	۰/۸۱۵	۲۱/۲۵۴	۳۷/۷۰۲	۸/۴۶۶	۲۵/۲۴
محفظه پس سوز	-	۱۸۰۸	۱۷۰۱	۱۰۷/۸	۰/۹۴	۲۷/۷۰۲	۲۹/۶۶۴	۱۰/۷۵	۱/۰۳۹
مبادله کن گرمای سوخت آب گرم	۲۴۶/۱	۷۶/۴۹	۱۳/۵۲	۶۲/۹۷	۰/۱۷۶	۲۹/۶۶۴	۱۷۴/۱۳۴	۶/۶۸۲	۰/۳۵۹
ژنراتور	۲۵/۸۶	۱۰/۹۲	۳/۱۸	۷/۷۴۴	۰/۲۹۱	۲۹/۶۶۴	۱۱۸/۲۱۷	۰/۸۲۱	۱۸/۲۶
جذب کننده	۲۳/۷۴	۰/۹۹۸	۰/۴۰۱	۰/۵۹۷	۰/۴۰۱	۱۸۷/۶	۵۹۴/۱۵	۰/۴۰۳	۳۱/۲۶
چگالنده	۱۷/۳۵	۰/۴۲۹	۰/۲۹۳	۰/۱۳۶	۰/۶۸۳	۱۴۱/۰۷۹	۳۸۰/۵۴۴	۰/۰۶۹	۷۲/۶۵
تبخیرکن	۱۵/۱۵	۱/۲۵۷	۰/۸۲۳	۰/۴۳۴	۰/۶۵۴	۱۴۱/۱۳۴	۲۷۷/۴۹۲	۰/۲۲	۴۵/۴۱
مبادله کن گرمای سوخت محلول	۱۰/۳	۱/۰۸	۰/۶۷۷	۰/۴۰۲	۰/۶۲۷	۱۴۱/۱۳۴	۳۰۰/۲۶۹	۰/۲۰۴	۴۷/۲۸
پمپ محلول	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۶۱	۰/۰۱۵	۰/۷۹۵	۱۰	۲۳/۵۷۱	۰/۰۰۰۵	۸۱/۰۶
شیر فشارشکن محلول	-	۵۱۶/۴	۵۱۶/۳	۰/۰۴۵	۰/۹۹۹	۱۴۱/۱۳۴	۱۴۱/۱۳۸	۰/۰۲۲	-
شیر فشارشکن مبرد	-	۲۷۱/۱	۲۷۱	۰/۱۰۸	۰/۹۹۹	۱۴۱/۰۷۹	۱۴۱/۱۰۷	۰/۰۵۵	-

### ۶-۲- نتایج تحلیل پارامتری

در این قسمت اثر تغییر چگالی جریان پیل سوختی و ضریب مصرف سوخت بر روی عملکرد سیستم از منظر انرژی، انرژی و انرژی-اقتصادی بررسی می‌شود. دقت شود که به منظور تحلیل پارامتری تنها پارامتر مورد نظر در بازه 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 پیل سوختی بر روی کار و بازده انرژی کلی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش چگالی جریان در محدوده مورد نظر، کار دارای مقدار بیشینه بوده و بازده کاهش پیدا می‌کند. افزایش چگالی جریان عبوری از پیل سوختی، افزایش جریان عبوری و کاهش ولتاژ پیل 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 پیل 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 پیل سوختی باعث ایجاد بیشینه در کار خروجی کلی می‌شود. گورداز سوی دیگر افزایش چگالی جریان، افزایش دبی آب گرم 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 انرژی، اثر افزایش دبی مورد نیاز متان در مخرج کسر بازده

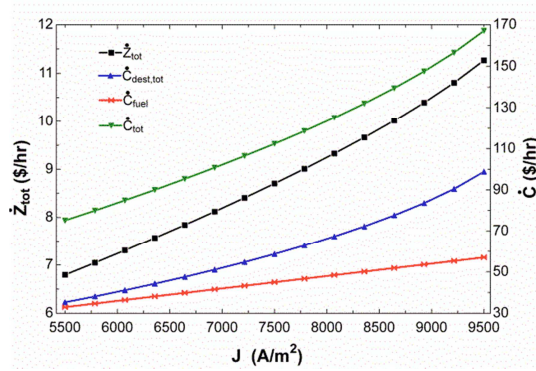
انرژی بیشتر بوده و باعث کاهش بازده انرژی می‌شود.



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

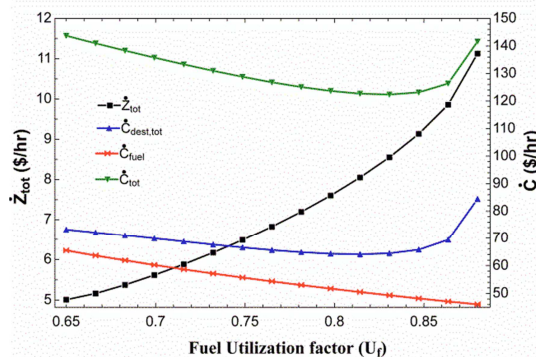
در شکل ۲ اثر تغییر ضریب مصرف سوخت پیل سوختی بر روی کار و بازده انرژی کلی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب مصرف سوخت در بازه ذکر شده کار خروجی کاهش یافته و بازده انرژی دارای بیشینه است. افزایش ضریب مصرف سوخت باعث کاهش ولتاژ عبوری پیل سوختی می‌شود که با ثابت ماندن بقیه موارد، تنها عامل موثر در کاهش کار خروجی پیل 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 نرخ‌های هزینه

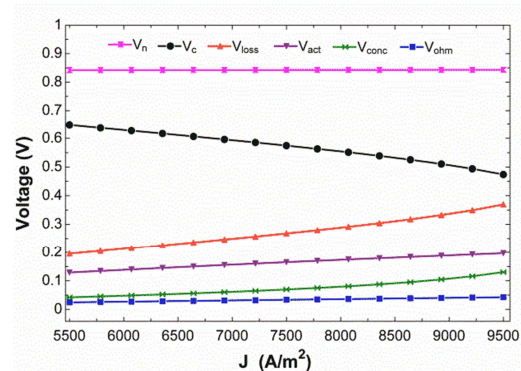
قیمت ابتدایی، تغییرات دبی ذکر شده اثر پیچیده و متناقضی در اجزای مختلف داشته که نهایتاً افزایش قیمت ابتدایی کلی را باعث می‌شود. اما در مورد نرخ هزینه تخریب اگزوزی، این هزینه در تمامی اجزای سیکل ترکیبی افزایش و مبادله کن گرما تولید آب گرم به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که ایجاد کمینه را برای نرخ هزینه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



شکل ۶- اثر تغییر ضریب مصرف سوخت بر روی نرخ‌های هزینه

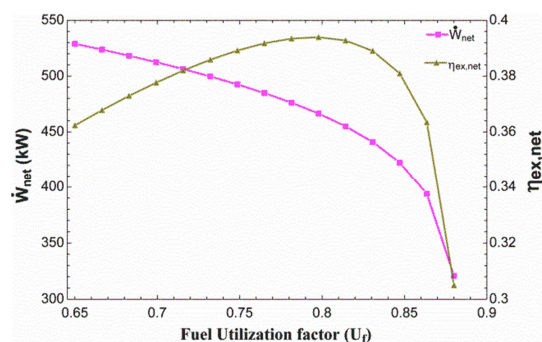
## ۷- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر سیستم ترکیبی تولید سه گانه پیل سوختی اکسید جامد، مبادله کن گرما تولید آب گرم و چرخه تبرید جذبی آب- آمونیاک از منظر انرژی، اگزوزی و اگزوزی- 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 اگزوزی کلی ۰/۳۷۸ برای سیستم ترکیبی بود. همچنین مقدار کلی فاکتور اگزوزی- 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 اگزوزی بوده و در نتیجه به کار بردن اجزای با قیمت بالاتر، عملکرد سیستم را از منظر اگزوزی- اقتصادی بهبود می‌بخشد. نتایج تحلیل پارامتری حاکی از آن بود که افزایش چگالی جریان باعث کاهش بازده اگزوزی، ایجاد بیشینه برای کار کلی و افزایش تمامی نرخ‌های هزینه می‌گردد. افزایش ضریب مصرف سوخت نیز باعث کاهش کار کلی، ایجاد بیشینه برای بازده اگزوزی و ایجاد کمینه برای نرخ هزینه



شکل ۳- اثر تغییر چگالی جریان بر روی ولتاژهای مختلف

مورد نیاز کمپرسور هوا و کاهش کار مورد نیاز کمپرسور سوخت و پمپ آب می‌گردد. در نهایت کار کلی با روندی مشابه روند کاهش کار پیل سوختی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش ضریب مصرف سوخت علاوه بر موارد ذکر شده کاهش دبی آب گرم تولیدی و افزایش دبی آب سرد تولیدی را نتیجه می‌دهد که مجموع عوامل متناقض ذکر شده باعث ایجاد بیشینه برای بازده اگزوزی می‌گردد.



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

در شکل ۵ اثر تغییر چگالی جریان پیل سوختی بر روی نرخ هزینه ابتدایی، نرخ هزینه تخریب اگزوزی، نرخ هزینه سوخت و نرخ هزینه کلی نشان داده شده است. افزایش چگالی جریان پیل سوختی، افزایش دبی بخش‌های مختلف چرخه ترکیبی را نتیجه می‌دهد که عامل موثر در افزایش قیمت ابتدایی تمامی اجزای چرخه ترکیبی می‌باشد. در میان اجزا تنها قیمت ابتدایی پیل سوختی بدون تغییر می‌ماند. 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 می‌یابد.

در شکل ۶ اثر تغییر ضریب مصرف سوخت پیل سوختی بر روی نرخ هزینه ابتدایی، نرخ هزینه تخریب اگزوزی، نرخ هزینه سوخت و نرخ هزینه کلی نشان داده شده است. افزایش ضریب مصرف سوخت همانطور که قبلاً اشاره شد باعث افزایش دبی مورد نیاز هوا و کاهش دبی سوخت و آب مورد نیاز ورودی پیل سوختی، همچنین کاهش دبی آب گرم تولیدی و افزایش دبی آب سرد تولیدی می‌شود. در مورد نرخ

۸- مراجع

- [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 . Heidamejad P., Thermo-economic 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] Şencan 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-objective optimization 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, Thermo-economic 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 .