

# آنالیز انرژی و انرژی سیستم مجتمع گازی سازی زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد (قسمت اول): تکنولوژی تصفیه گاز دما پایین

دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

وحید اعظمی\*  
مرتضی یاری

## چکیده

در این مقاله، سیستم قدرت یکپارچه‌ی جدیدی، بر پایه گازی سازی زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد با سیستم تصفیه گاز دما پایین پیشنهاد شده و عملکرد آن به وسیله محاسبات ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیستم پیشنهادی شامل واحد گازی سازی، واحد تصفیه گاز، هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز و چرخه پایین دست آلی رانکین می‌باشد. گاز سنتز قبل از استفاده در پیل سوختی اکسید جامد باید در واحد تصفیه گاز مورد پاکسازی قرار گیرد. تکنولوژی تصفیه گاز دما پایین برای تصفیه گاز سنتز خروجی از گازی ساز به کار گرفته شده است. مطالعه پارامتریک، جهت بررسی پاسخ سیستم به تغییرات پارامترهای عملیاتی انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با یک چنین سیستمی می‌توان به ترتیب به راندمان انرژی ناخالص و خالص، ۵۴/۵۶٪ و ۵۰/۵۵٪ دست یافت. این در حالی است که راندمان انرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب ۴۸/۵۷٪ و ۴۵/۰۸٪ می‌باشد. از نرم افزار ترمودینامیکی Cycle-Tempo برای مدل سازی سیستم پیشنهادی استفاده شده است. **واژه‌های کلیدی:** انرژی، انرژی، گازی ساز، سیستم تصفیه گاز، پیل سوختی اکسید جامد.

## Energy and Exergy Analyses of an Integrated Biomass Gasification and SOFC System (part I): Low Temperature Gas Cleaning Technology

V. azami  
M. yari

Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran  
Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### Abstract

In this paper, a new integrated power system based on biomass gasification and solid oxide fuel cell with low temperature gas cleaning system is proposed and the performance of the system is evaluated using thermodynamic calculations. The proposed system includes a gasification unit, a gas cleaning unit, a SOFC-GT hybrid system and an organic Rankine bottoming cycle. The generated raw syngas need to be purification before it can be used in SOFC system. For this reason, low temperature gas cleaning system is selected. A sensitivity study is carried out to investigate plant responses to different working parameters. The results obtained indicate that for the current system, the gross and net energy efficiency of the system are 54.56% and 50.55% respectively, while the gross and net exergy efficiency are 48.57% and 45.08% respectively. The proposed system has been modeled using Cycle-Tempo software.

**Keywords:** Energy, Exergy, Gasification, Gas cleaning, SOFC.

### ۱- مقدمه

زیست توده یک منبع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، که همه مواد اورگانیک<sup>۱</sup> به دست آمده از پوشش‌های گیاهی مانند چوب یا باقیمانده‌های زراعی، ضایعات کشاورزی و دیگر منابع بیولوژیکی<sup>۲</sup> را شامل می‌شود [۱].

فرایند گازی سازی یک روش کارآمد برای تبدیل زیست توده جامد به محصول گازی می‌باشد. این محصول گازی به عنوان گاز سنتز یا بیوگاز سنتز شناخته می‌شود. گاز سنتز عمدتاً شامل ترکیباتی مانند هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، متان و نیتروژن می‌باشد. علاوه بر ترکیبات شمرده شده، گاز سنتز همچنین دارای ناخالصی‌هایی مانند ذرات، قطران<sup>۳</sup>، ترکیبات قلیایی، ترکیبات سولفوردار و ترکیبات هالوژندار می‌باشد. وجود این ناخالصی‌ها در گاز سنتز ممکن است به دستگاه‌های پایین دست آسیب برساند، لذا قبل از استفاده از گاز سنتز به عنوان سوخت باید آن را تصفیه نمود. پس از

پاکسازی گاز سنتز می‌توان آن را در سیستم‌های پیشرفته تبدیل انرژی مانند پیل سوختی و یا توربین گاز به عنوان سوخت به کار برد. پیل سوختی به عنوان یک وسیله تبدیل انرژی مطرح می‌شود که محدودیت چرخه کارنو<sup>۴</sup> را ندارد و ویژگی بارز آن راندمان بالای آن می‌باشد. در داخل پیل سوختی، فرایند تبدیل انرژی توسط واکنش الکتروشیمیایی اکسایش سوخت رخ می‌دهد در این روش تخریب انرژی بسیار کمتر از روش مرسوم احتراق می‌باشد [۲]. بین انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد<sup>۵</sup> به دلیل راندمان بالا، دمای عملیاتی بالا و قابلیت کار با سوخت‌های مختلف، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. ترکیب گازی ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از پژوهش‌های اولیه در این زمینه مربوط به آلدروچای و همکارانش [۳] می‌باشد. در این مطالعه، ترکیب گازی ساز زیست توده با سیال عامل‌های مختلف و پیل سوختی اکسید جامد مورد ارزیابی ترمودینامیکی قرار گرفته است.

- 1 Organic
- 2 Biological
- 3 Tars

- 4 Carnot cycle
- 5 Solid oxide fuel cell

نتایج این تحقیق نشان می‌داد که ترکیب گازی‌ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد با سیال عامل بخار دارای راندمان ۴۷٪ و با سیال عامل CO<sub>2</sub> دارای راندمان ۵۱٪ می‌باشد.

هاتن و همکارانش [۴] به بررسی امکان سنجی ترکیب گازی‌ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد از طریق کوپلینگ گرمایی پرداخته‌اند. برای این منظور گرمای گازهای محفظه احتراق پیل سوختی به گازی‌ساز منقل می‌شد. آنها راندمان الکتریکی خالص سیستم را بر مبنای ارزش حرارتی پایین سوخت، ۳۸٪ گزارش کرده‌اند. در مطالعه صورت گرفته توسط فرایدا و همکارانش [۵]، گازی‌ساز توسط هیت پایپ‌ها به پیل سوختی اکسید جامد کوپلینگ گرمایی شده بود. در این روش گرمای استخراج شده از پیل سوختی توسط هیت پایپ‌ها به سیستم گازی‌ساز تغذیه می‌شد. آنها آنالیز انرژی را برای این سیستم انجام داده و راندمان انرژی را برای تولید توان kW ۱۷۰، ۳۶٪ گزارش کرده‌اند.

در مطالعه انجام یافته توسط نگال و همکارانش [۶]، هفت سیستم مختلف تولید توان بر مبنای گازی‌ساز زیست‌توده و پیل سوختی اکسید جامد مورد مقایسه قرار گرفته بود. تمام این سیستم‌ها برای تولید توان تقریبی ۱ MWe طراحی شده بودند. سیستم‌های مطالعه شده شامل چهار طرح مختلف برای پیل سوختی اکسید جامد و سه طرح مختلف برای گازی‌ساز زیست‌توده بودند. در پایان استنتاج شده بود که ترکیب گازساز بستر ثابت جریان بالا سو<sup>۱</sup> با پیل سوختی اکسید جامد بهترین عملکرد را داراست.

در پژوهش انجام یافته توسط رکنی و همکاران [۷]، یک سیستم تولید توان ۱۰۰ Kw شامل گازی‌ساز زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد و چرخه آلی رانکین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که با سیال عامل پروپوسیکلوهگزان<sup>۲</sup> در فشار ۱۵/۹ بار می‌توان به راندمان الکتریکی ۵۶/۴٪ دست یافت.

در مطالعه انجام یافته توسط غلامیان و همکاران [۸]، آنالیز ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان توان، سرما و حرارت (CCHP) با سوخت زیست توده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌داد که بیشینه راندمان انرژی قابل حصول در سیستم CCHP برابر ۳۸٪ می‌باشد که نسبت به سیستم تنه‌ای پیل سوختی اکسید جامد دارای ۵۰٪ افزایش راندمان می‌باشد.

مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تولید توان از زیست توده نشان می‌دهد که اکثر این مطالعات بر مبنای ترکیب گازی‌ساز زیست توده با پیل سوختی اکسید جامد یا توربین گاز و یا هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز می‌باشد و تاکنون مطالعه‌ای در زمینه ترکیب گازی‌ساز زیست‌توده، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین انجام داده نشده است. لذا تحلیل انرژی و انرژی یک چنین سیستمی برای نخستین بار صورت می‌گیرد. از طرفی دیگر، تعداد مقالات اندکی به بررسی تاثیر تکنولوژی تصفیه گاز بر روی عملکرد سیستم پرداخته‌اند. این در حالی است که، دانستن تاثیر تکنولوژی تصفیه گاز بر روی عملکرد واحدهای پیل سوختی، توربین گاز و چرخه آلی رانکین منجر به طراحی بهینه سیستم یکپارچه تولید توان بر پایه گازی‌ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد

می‌شود. در ادامه این پژوهش به بررسی تاثیر تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا بر روی عملکرد پیل سوختی، توربین گاز و چرخه آلی رانکین پرداخته شده است، که نتایج آن در مقاله بعدی آورده شده است.

در این مقاله چرخه پیشنهادی جدیدی بر مبنای ترکیب گازی-ساز زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین ارائه شده است. این سیستم برای تولید توان الکتریسیته به صورت غیر متمرکز و برای ظرفیت‌های تولید توان پایین طراحی و مدل‌سازی شده است. از تکنولوژی تصفیه گاز دما پایین جهت حذف آلاینده‌های موجود در گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز استفاده شده است. عملکرد سیستم توسط محاسبات ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج آن به صورت ترم‌های راندمان انرژی و انرژی گزارش شده است. از نرم‌افزار ترمودینامیکی چرخه -تمپو<sup>۳</sup> [۹] جهت شبیه سازی سیستم پیشنهادی در شرایط پایدار استفاده شده است.

## ۲- تشریح سیستم

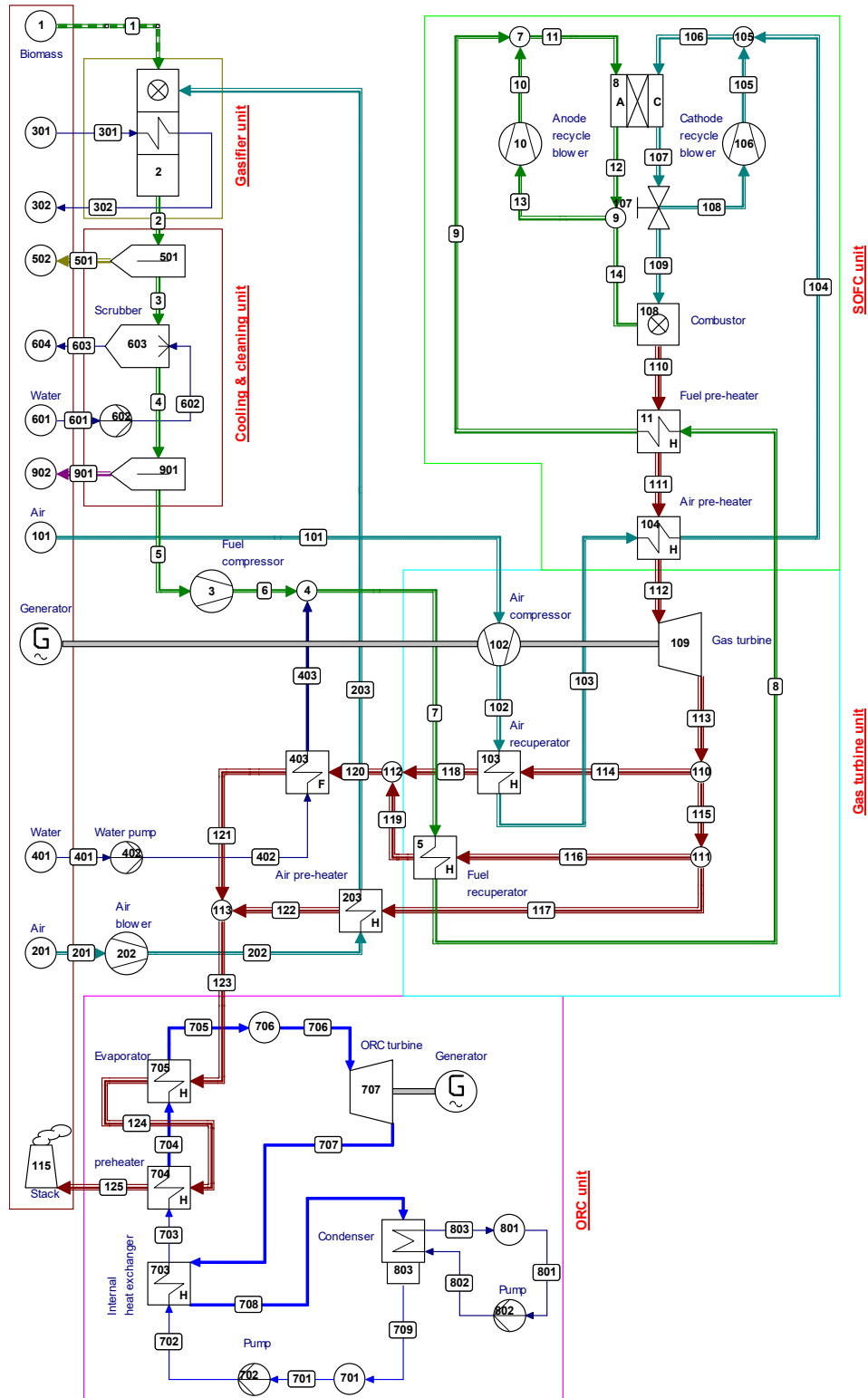
در شکل ۱، طرحواره سیستم پیشنهادی مورد مطالعه نشان داده شده است. این سیستم شامل واحد گازی‌ساز، واحد تصفیه گاز، پیل سوختی اکسید جامد با رفورمینگ داخلی مستقیم، محفظه احتراق، توربین گاز، چرخه پایین دست آلی رانکین، پیش‌گرمکن، کمپرسور هوا و سوخت، پمپ و دستگاه‌هایی برای باز گردش سوخت و هوا می‌باشد. زیست توده به همراه سیال عامل گازی‌ساز (هوا) وارد راکتور گازی‌ساز می‌شود، جایی که در آن فرایندهای ترموشیمیایی تبدیل زیست توده جامد به محصول گازی صورت می‌گیرد. هوای ورودی به سیستم قبل از ورود به راکتور گازی‌ساز تا دمای ۳۰۰ C<sup>۰</sup> پیش‌گرم می‌شود.

گاز سنتز خروجی از گاز ساز پیش از ورود به واحد پیل سوختی، جهت حذف آلاینده‌های موجود در آن وارد واحد تصفیه گاز می‌شود. از لحاظ سطح دمایی، تکنولوژی تصفیه گاز سنتز را می‌توان به دو نوع تکنولوژی تصفیه گاز دما پایین و تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا تقسیم بندی کرد. در این مقاله تکنولوژی تصفیه گاز دما پایین برای پاکسازی گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز انتخاب شده است، زیرا این تکنولوژی از لحاظ فنی نسبت به سایر تکنولوژی‌ها به بلوغ بیشتری رسیده است.

گاز سنتز ورودی به واحد تصفیه گاز، ابتدا وارد سیکلون<sup>۴</sup> می‌شود، جایی که در آن عمل جداسازی ذرات درشت از گاز سنتز انجام می‌گیرد. سپس گاز سنتز جهت حذف ذرات ریز موجود در آن وارد فیلتر سرامیکی<sup>۵</sup> حذف ذرات می‌شود. هر دوی این دستگاه‌ها در دمای ۸۰۰ C<sup>۰</sup> کار می‌کنند که دمای عملیاتی راکتور گازی‌ساز می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است هر دوی این دستگاه‌ها

3 Cycle-Tempo  
4 Cyclone  
5 Ceramic filter

1 Fixed bed updraft gasifier  
2 propylcyclohexane



شکل ۱- دیاگرام طرحواره سیستم مجتمع گازی ساز زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز- چرخه آلی رانکین با سیستم تصفیه گاز دما پایین

با واحد ۵۰۱ مدل سازی شده است. گاز سنتز خروجی از این دو دستگاه عاری از هرگونه ذرات می باشد [۱۰]. پس از حذف ذرات، گاز سنتز وارد دستگاه اسکرابر<sup>۱</sup> (دستگاه شماره ۶۰۳) می شود. در این واحد دمای گاز سنتز توسط آب تغذیه شده به دستگاه به طور ناگهانی تا نزدیکی های دمای محیط افت می کند. در چنین شرایطی امکان رسوب گیری کربن انتظار نمی رود، با این وجود، حتی اگر چنین اتفاقی هم روی دهد، کربن جامد رسوب شده توسط مایع پاک کننده (آب) زدوده می شود [۱۱]. در این واحد بیشتر ناخالصی های موجود در گاز سنتز از قبیل، ذرات، ترکیبات قلیایی و ترکیبات هالوژنی، پاکسازی می شود. پس از آن، گاز سنتز جهت حذف ترکیبات سولفوری موجود در آن از روی بستر جاذب حاوی کربن فعال شده (دستگاه شماره ۹۰۱) عبور می کند. بستر کربن فعال شده برای جذب ترکیبات سولفوردار و سایر ترکیباتی که ممکن است در دستگاه اسکرابر حذف نشده باشد، به کار می رود.

گاز خروجی از واحد تصفیه پیش از ورود به قسمت آند پیل سوختی لازم است که دمایش تا دمای ورودی پیل سوختی اکسید جامد و فشارش تا فشار ورودی توربین گاز افزایش یابد. برای این منظور، گاز سنتز تصفیه شده و فشرده شده با کمپرسور سوخت (دستگاه شماره ۳)، ابتدا در مبادله کن گرمایی شماره ۵ توسط بخشی از گازهای خروجی از توربین گاز تا دمای  $595^{\circ}\text{C}$  گرم می شود و سپس در مبادله کن گرمایی شماره ۱۱ توسط گرمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق تا دمای  $716^{\circ}\text{C}$  گرم می شود. پیش از گرمایش گاز سنتز و جهت جلوگیری از رسوب گیری کربن، مقداری بخار به جریان گاز سنتز خروجی از کمپرسور سوخت اضافه می شود [۱۱].

در نهایت گاز سنتز خروجی از مبادله کن گرمایی ۱۱ با بخشی از گازهای بازگشتی از خروجی آند مخلوط شده و دمای آن تا  $900^{\circ}\text{C}$  که دمای ورودی پیل سوختی می باشد، افزایش می یابد. پس از آن گاز مخلوط شده وارد قسمت آند پیل سوختی می شود. پیل سوختی مورد استفاده در این مقاله، پیل سوختی اکسید جامد با رفورمینگ داخلی مستقیم می باشد. دمای عملیاتی پیل سوختی  $950^{\circ}\text{C}$  می باشد، این در حالی است که دمای خروجی پیل سوختی اکسید جامد  $1000^{\circ}\text{C}$  می باشد.

در سمت کاتد پیل سوختی، هوا ورودی پس از متراکم شدن در کمپرسور شماره ۲۰۲ وارد مبادله کن گرمایی شماره ۲۰۳ شده و توسط گازهای گرم خروجی از توربین گاز پیش گرم می شود. علاوه بر این پیش گرمایش، جریان هوا جهت رسیدن به دمای ورودی کاتد نیاز به گرمایش مجدد دارد. برای این منظور هوای متراکم و پیش گرم شده ابتدا در مبادله کن گرمایی ۱۰۴ توسط گرمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق تا دمای  $799^{\circ}\text{C}$  گرم می شود و سپس با بخشی از گازهای بازگشتی از خروجی کاتد مخلوط شده و دمای آن تا  $900^{\circ}\text{C}$  که دمای ورودی پیل سوختی می باشد، افزایش می یابد. در نهایت هوای مخلوط شده وارد قسمت کاتد پیل سوختی می شود. در داخل پیل سوختی واکنش های الکتروشیمیایی تبدیل سوخت به جریان الکتروسیسته روی می دهد.

سوخت و هوای خروجی از پیل سوختی وارد محفظه احتراق می شود و گرمای لازم برای پیش گرمایش هوا ورودی به کاتد و سوخت ورودی به آند را فراهم می سازد. پس از آن گازهای گرم و پرفشار خروجی از مبادله کن گرمایی داخل توربین گاز منبسط شده و توان مورد نیاز کمپرسور و ژنراتور را فراهم می سازد.

گازهای خروجی از توربین گاز جهت پیش گرم کردن هوا و سوخت ورودی به پیل سوختی، هوای تغذیه شده به گازی ساز و تهیه بخار مورد نیاز گاز سنتز مورد استفاده قرار می گیرد. گازهای داغ خروجی از توربین گاز پس از استفاده در واحدهای ۵، ۴۰۳، ۲۰۳ و ۱۰۳، هنوز هم دارای کیفیت گرمایی بالایی می باشند که می توان در چرخه پایین دست آلی رانکین برای تولید توان اضافی مورد استفاده قرار داد.

### ۳- مدل سازی سیستم

شبیه سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی توسط نرم افزار چرخه - تمپو انجام شده است. این نرم افزار از روش کمینه انرژی گیبس<sup>۲</sup> برای انجام محاسبات در گازی ساز، پیل سوختی و محفظه احتراق بهره می گیرد. زیست توده مورد استفاده در مدل سازی، چوب با محتوای رطوبت ۱۰٪ می باشد که ترکیب آن در جدول ۱ آورده شده است [۱۲]. در جدول ۲ نیز پارامترهای لازم برای توسعه مدل گازی ساز آورده شده است. برخی از فرضیات به کار برده شده در شبیه سازی سیستم پیشنهادی در ذیل آمده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می کند.
- همه فرایندها به صورت بی دررو می باشند.
- هیچ نشتی جریانی در سیستم وجود ندارد.
- مبادله کن های گرمایی گرمایی به صورت جریان ناهمسو<sup>۳</sup> کار می کنند.
- تمام فرایندهای سیستم آدیاباتیک می باشند.

محاسبات انجام شده در گازی ساز، پیل سوختی اکسید جامد و محفظه احتراق بر مبنای کمینه انرژی گیبس می باشد. مجموعه ای از معادلات استفاده شده در مدل سازی پیل سوختی و توربین گاز در روابط (۱) تا (۹) آورده شده است.

در این روابط،  $\Phi_{m,a,in}$  نمایانگر دبی جرمی ورودی به آند،  $\gamma_l^0$  غلظت گونه ها در ورودی آند،  $M_a$  نمایانگر جرم مولکولی آند،  $F$  ثابت فارادی،  $U_F$  نمایانگر فاکتور مصرف سوخت،  $V_{rev,x}$  نمایانگر ولتاژ برگشت پذیر،  $V_{rev}^0$  نمایانگر ولتاژ برگشت پذیر استاندارد برای هیدروژن،  $i_x$  چگالی جریان،  $R_{eq}$  مقاومت معادل،  $\Delta V_x$  تلفات ولتاژ،  $T$  دمای کاری پیل سوختی،  $R$  نمایانگر ثابت جهانی گازها،  $P_{cell}$  فشار کاری پیل سوختی و  $\eta_{DC/AC}$  راندمان تبدیل DC به AC اینورتر<sup>۴</sup> می باشد. علاوه بر این،  $h_i$  نمایانگر آنتالپی ورودی به توربین یا کمپرسور،  $h_0$  نمایانگر آنتالپی خروجی از توربین یا کمپرسور،  $\eta_s$  نمایانگر راندمان ایزنتروپیک توربین و یا کمپرسور و  $h_{0,s}$  نمایانگر آنتالپی خروجی توربین یا کمپرسور هنگام انبساط ایزنتروپیک می باشد.

2 Minimization of the Gibbs free energy

3 Counter current flow

4 Inverter

1 Scrubber

انتخاب شده است که در شرایط عملیاتی مختلف بیشترین استخراج گرما را از گازهای گرم خروجی توربین داشته باشد. البته این فشار با توجه به محدودیت‌های اختلاف دما در نقطه پینچ و دمای گازهای تخلیه شده به اتمسفر انتخاب می‌شود. در جدول ۲ پارامترهای لازم برای توسعه مدل چرخه آلی رانکین آورده شده است.

#### ۴- نتایج

در جدول ۳ ترکیب گاز سنتز به دست آمده از محاسبات نرم افزار Cycle-Tempo نشان داده شده است. این نتایج با نتایج تجربی راکتور گازی‌سازی انکور<sup>۲</sup> [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته است. این نتایج بر حسب ترکیب مولی محصول گازی، مقدار  $X_{OF}$  و ارزش حرارتی پایین سوخت گاز سنتز نمایش داده شده است. همانطور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج با نتایج تجربی دارند. لذا می‌توان با اطمینان خاطر مدل گازی‌ساز را برای بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی مورد مطالعه به کار برد.

عملکرد ترمودینامیکی سیستم هیبریدی پیشنهادی بر مبنای انرژی و انرژی در جدول ۴ نمایش داده شده است. دبی زیست‌توده ورودی به گازی‌ساز ثابت فرض شده و برابر  $0.25 \text{ kg/s}$  می‌باشد. انرژی متناظر با این دبی ورودی بر مبنای ارزش حرارتی پایین سوخت  $\text{kW}$   $4190$  می‌باشد. این در حالی است که انرژی ورودی به سیستم  $\text{kW}$   $4696$  می‌باشد. در داخل پیل سوختی واکنش‌های الکتروشیمیایی بین سوخت و اکسیدان روی می‌دهد. توان تولیدی متناوب پیل سوختی اکسید جامد  $\text{kW}$   $1616$  و راندمان الکتریکی آن  $38/57\%$  می‌باشد. این راندمان به صورت نسبت توان تولیدی پیل سوختی به انرژی زیست‌توده ورودی به سیستم و بر مبنای ارزش حرارتی پایین سوخت تعریف می‌شود.

گازهای خروجی از محفظه احتراق پس از گرمایش سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی اکسید جامد در دمای  $850^\circ\text{C}$  وارد توربین گاز شده و تا دمای  $645^\circ\text{C}$  و فشار  $1.073 \text{ bar}$  منبسط می‌شوند. فشار بالای خروجی توربین گاز جهت غلبه بر افت فشار مسیر پایین دست می‌باشد. توان تولیدی توربین گاز  $\text{kW}$   $613$  و راندمان الکتریکی آن  $24/29\%$  می‌باشد. راندمان توربین گاز به صورت نسبت توان تولیدی ژنراتور بر اختلاف بین انرژی ورودی به سیستم و توان تولیدی پیل سوختی تعریف می‌شود.

جدول ۳- نتایج مدل چرخه تمپو و داده‌های تجربی [۱۳]

تجربی	مدل	ترکیب گاز سنتز بر حسب درصد مولی
Up to 3	1.5	CH4
18±2	18.75	H2
---	8.64	<sup>(*)</sup> H2O
45-50	42	N2
10±3	9.57	CO2
19±3	19.05	CO
1.5-1.8	1.88	X <sub>OF</sub>
4400-5400	4699	LHV (kJ/mol)

<sup>(\*)</sup>نتایج تجربی مربوط به مقدار بخار آب موجود در گاز سنتز گزارش نشده است.

جدول ۱- ترکیب زیست‌توده مورد استفاده در مدل‌سازی [۱۲]

واحد	مقدار	پارامتر
wt%	49.97	کربن (C)
wt%	6.12	هیدروژن (H)
wt%	42.49	اکسیژن (O)
wt%	0.55	نیترोजن (N)
wt%	0.06	گوگرد (S)
wt%	0.8	خاکستر (SiO <sub>2</sub> )
MJ kg <sup>-1</sup>	18.62	ارزش حرارتی پایین (LHV)
MJ kg <sup>-1</sup>	20.61	انرژی زیست‌توده

جدول ۲- شرایط شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی [۱۰، ۱۱ و ۱۲]

واحد	مقدار	پارامتر
		گازی‌ساز:
°C	800	دمای عملیاتی گازی‌ساز
bar	1.013	فشار عملیاتی گازی‌ساز
°C	300	دمای هوای ورودی به گازی‌ساز
bar	0.02	افت فشار در گازی‌ساز
		پیل سوختی اکسید جامد:
mA cm <sup>-2</sup>	2500	چگالی جریان (i)
Ω m <sup>2</sup>	5e-5	مقاومت معادل پیل سوختی (R <sub>eq</sub> )
%	85	فاکتور مصرف سوخت (U <sub>F</sub> )
°C	900	دمای ورودی کاتد و آند پیل سوختی
°C	950	دمای کاری پیل سوختی (T <sub>cell</sub> )
bar	3	فشار کاری پیل سوختی (P <sub>cell</sub> )
°C	1000	دمای خروجی پیل سوختی
---	0.97	راندمان تبدیل DC به AC
		توربین گاز:
°C	850	دمای ورودی توربین
---	0.85	راندمان ایزنتروپیک توربین گاز
---	0.8	راندمان ایزنتروپیک کمپرسور
---	0.97	راندمان مکانیکی توربین گاز
---	0.97	راندمان مکانیکی کمپرسور
---	0.94	راندمان ژنراتور
		چرخه آلی رانکین:
°C	5	اختلاف دمای در نقطه پینچ
°C	100	کمینه دمای گازهای تخلیه شده به اتمسفر
°C	5	کمینه اختلاف دمای مبادله‌کن گرمایی داخلی
---	0.94	راندمان ژنراتور

در جدول ۲ پارامترهای لازم برای توسعه مدل هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز آورده شده است. جزئیات مدل‌سازی هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز در مراجع [۱۱ و ۱۲] آورده شده است.

چرخه پایین دست به کار گرفته شده در این مقاله، چرخه آلی رانکین با مبادله‌کن گرمایی داخلی می‌باشد. سیال آلی انتخاب شده نیز سیکلوهگزان<sup>۱</sup> می‌باشد. فشار سیال ورودی توربین آلی رانکین طوری

جدول ۴- عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی

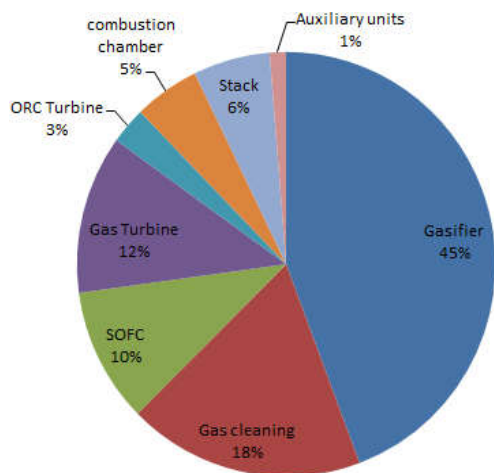
واحد	مقدار	پارامتر
kW	4190	انرژی ورودی به سیستم
kW	4698	اگزرژی ورودی به سیستم
kW	1616	توان AC تولیدی پیل سوختی
kW	1666	توان DC تولیدی پیل سوختی*
kW	594	توان تولیدی ژنراتور
kW	54	توان تولیدی چرخه ORC
kW	162	مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی
kW	2264	توان تولیدی ناخالص سیستم
kW	2102	توان تولیدی خالص سیستم**
%	38.57	راندمان پیل سوختی اکسید جامد
%	24.29	راندمان توربین گاز
%	3.78	راندمان چرخه ORC
%	54.46	راندمان انرژی ناخالص سیستم
%	50.55	راندمان انرژی خالص سیستم
%	48.57	راندمان اگزرژی ناخالص سیستم
%	45.08	راندمان اگزرژی خالص سیستم

(\*) توان AC برابر ضرب راندمان تبدیل اینورتر در توان DC می-باشد.

(\*\*) توان خالص برابر توان ناخالص منهای مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی می-باشد.

پس از پیش گرمایش هوا و سوخت و تولید بخار، گازهای خروجی هنوز دارای کیفیت گرمایی بالایی می-باشند، لذا این گازها جهت تولید توان اضافی وارد چرخه آلی رانکین می-شوند. مقدار گرمای بازیافت شده در قسمت بویلر بازیافت توسط مبادله کن-های گرمایی ۷۰۴ و ۷۰۵ برابر ۳۶۷ kW می-باشد. فشار و دمای سیال آلی در ورودی توربین آلی رانکین به ترتیب ۱۱۴ °C و ۲/۴۸ bar می-باشد. توان تولیدی چرخه آلی رانکین، ۵۳ kW و راندمان الکتریکی آن ۳/۷۸٪ می-باشد. راندمان چرخه آلی رانکین به صورت نسبت توان تولیدی ژنراتور بر انرژی جریان ورودی به بویلر بازیافت حرارت محاسبه می-شود. در نهایت گازهای خروجی از واحد بویلر بازیافت حرارت در دمای ۱۰۰ °C به اتمسفر تخلیه می-شود.

توان تولید ناخالص سیستم ۲۲۸۲ kW و مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی ۱۶۴ kW می-باشد. توان تولیدی خالص پس از کم کردن توان مصرفی واحدهای کمکی ۲۱۱۸ kW می-باشد. راندمان‌های انرژی الکتریکی ناخالص و خالص سیستم پیشنهادی به ترتیب ۵۴/۴۶٪ و ۵۰/۵۵٪ می-باشد. این در حالی است که راندمان‌های اگزرژی الکتریکی ناخالص و خالص سیستم هیبریدی به ترتیب ۴۸/۵۷٪ و ۴۵/۰۸٪ می-باشد.



شکل ۲- تلفات اگزرژی در سیستم پیشنهادی

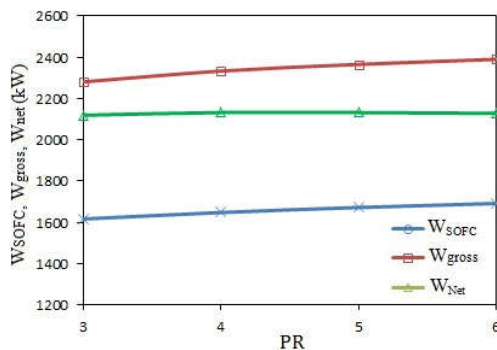
جهت تعیین سهم هر دستگاه در کل بازگشت ناپذیری سیستم آنالیز اگزرژی سیستم انجام شده است و نتایج آن برای شرایط طراحی در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می-شود بیشترین تلفات اگزرژی در گازی‌ساز (۴۵٪) و واحد تصفیه گاز (۱۸٪) می-باشد. سپس به ترتیب واحدهای توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد، stack (دودکش)، محفظه احتراق و توربین ORC به ترتیب با ۱۲٪، ۱۰٪، ۶٪، ۵٪ و ۳ درصد دارای بیشترین سهم تخریب اگزرژی می-باشند. تلفات اگزرژی در گازی‌ساز ناشی از اختلاف دمای بین محصول گازی خروجی از گازی‌ساز در دمای بالا و زیست توده ورودی به گازی-ساز با دمای پایین به اضافه تلفات ناشی از کرن تبدیل نشده می-باشد. تلفات اگزرژی در واحد تصفیه نیز ناشی از افت دمای ناگهانی گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز می-باشد که تا دمای محیط خنک شده است. همانطور که ملاحظه می-شود بدلیل افت ناگهانی دمای گاز سنتز از ۸۰۰ °C تا ۳۲ °C در واحد تصفیه گاز دما پایین، تخریب اگزرژی در این واحد از تخریب اگزرژی در واحد های پیل سوختی، محفظه احتراق و توربین گاز بیشتر است.

در شکل ۳ و ۴ تاثیر دمای ورودی توربین بر روی توان تولیدی اجزای مختلف سیستم و توان مصرفی واحدهای کمکی نشان داده شده است. با افزایش دمای ورودی توربین، توان تولیدی توربین گاز افزایش می-یابد. این در حالی است که افزایش دمای ورودی توربین تاثیر چندانی بر روی توان تولیدی پیل سوختی و چرخه آلی رانکین ندارد. با این وجود با افزایش دمای ورودی توربین توان تولیدی ناخالص و راندمان الکتریکی ناخالص سیستم بدلیل افزایش توان تولیدی توربین گاز افزایش می-یابد.

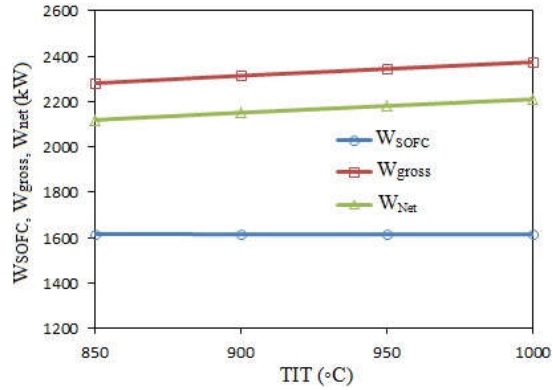
۱۰۰۰، راندمان‌های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب از ۴۸/۵۵ تا ۵۰/۵۳٪ و ۴۵/۱۱ تا ۴۷/۰۵٪ افزایش می‌یابند.

در شکل ۶ و ۷ تاثیر نرخ فشار بر روی توان تولیدی و مصرفی واحدهای مختلف سیستم نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش نرخ فشار توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد به دلیل افزایش ولتاژ نرست افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر توربین گاز دارای بازیاب در نرخ فشار پایین حدود ۴ دارای بیشینه توان می‌باشد. با افزایش نرخ فشار، توان مصرفی واحدهای کمکی و توان تولیدی چرخه پایین دست ORC افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش نرخ فشار گرمای کمتری برای گرمایش هوای ورودی به کاند مصرف می‌شود و لذا بیشتر گرمای گازهای خروجی از توربین گاز در چرخه پایین دست آلی رانکین بازیافت می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش نرخ فشار، توان تولیدی ناخالص سیستم به دلیل افزایش توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد، افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ فشار کمپرسور از ۳ تا ۶، توان تولیدی ناخالص سیستم از ۲۲۸۱ تا ۲۳۹۰ kW افزایش می‌یابد. این در حالی است که به دلیل افزایش توان مصرفی واحدهای کمکی در فشارهای بالا، توان تولیدی خالص و راندمان الکتریکی خالص سیستم با افزایش نرخ فشار تغییر چندانی نمی‌کند و مقادیر آن‌ها در نرخ فشار ۴ به ترتیب در حدود ۲۱۳۲ kW و ۵۱٪ می‌باشند. زیرا در فشارهای بالا، سرعت افزایش توان تولیدی پیل سوختی و چرخه ORC با سرعت افزایش توان مصرفی واحدهای کمکی یکسان است.

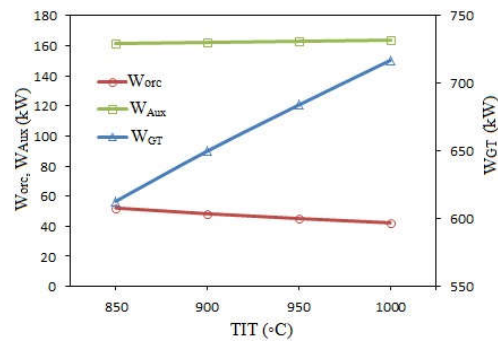
همانطور که از شکل ۸ ملاحظه می‌شود، راندمان‌های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب تغییرات مشابهی با راندمان انرژی ناخالص و خالص سیستم دارند. با افزایش نرخ فشار کمپرسور از ۳ تا ۶، راندمان های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب از ۴۸/۵۷ تا ۵۰/۸۷٪ و ۴۵/۰۸ تا ۴۵/۳۱٪ افزایش می‌یابند. با این وجود، کارکرد سیستم در فشارهای بالا سبب فرسایش زودرس پیل سوختی و افزایش هزینه‌های ساخت می‌شود، از این رو در این مقاله برای سیستم پیشنهادی از نرخ فشار ۳ برای شرایط طراحی سیستم استفاده شده است.



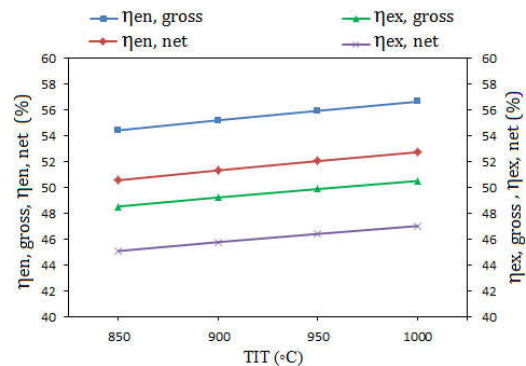
شکل ۶- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی توان تولیدی پیل سوختی، ناخالص و خالص سیستم



شکل ۳- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی توان تولیدی پیل سوختی، ناخالص و خالص سیستم



شکل ۴- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی توان تولیدی توربین گاز، چرخه آلی رانکین و توان مصرفی کمکی سیستم



شکل ۵- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی عملکرد سیستم

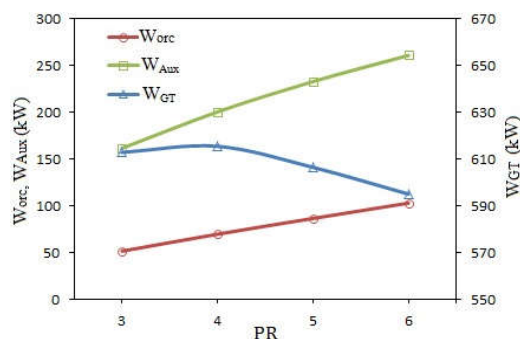
همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای ورودی توربین گاز از ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ °C توان تولیدی ناخالص و راندمان الکتریکی ناخالص سیستم به ترتیب از ۲۲۸۱ تا ۲۳۷۴ kW و ۵۴/۴۴ تا ۵۶/۶۶٪ افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر با توجه به شکل ۵، با افزایش دمای ورودی توربین گاز به دلیل ثابت ماندن توان تولیدی سایر واحدها، توان تولیدی خالص و راندمان الکتریکی خالص سیستم به ترتیب از ۲۱۱۹ تا ۲۲۱۰ kW و ۵۰/۵۸ تا ۵۲/۷۵٪ افزایش می‌یابد. راندمان‌های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم تغییرات مشابهی با راندمان انرژی ناخالص و خالص سیستم دارند. با افزایش دمای ورودی توربین گاز از ۸۵۰ تا

### ۶- نمادها

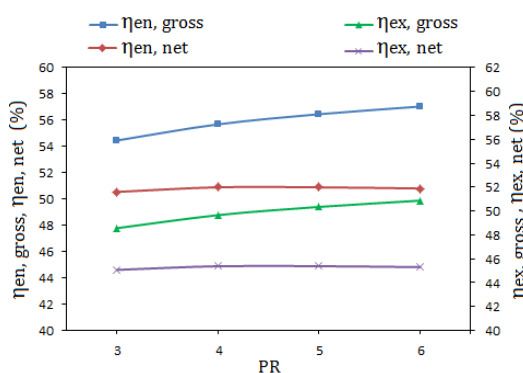
نرخ اکسیژن به سوخت	$X_{OF}$
فاکتور مصرف سوخت (%)	$U_F$
فشار کاری پیل سوختی (bar)	$P_{cell}$
دمای کاری پیل سوختی ( $^{\circ}C$ )	$T_{cell}$
چگالی جریان ( $mA\ cm^{-2}$ )	$i$
مقاومت معادل ( $\Omega\ m^2$ )	$R_{eq}$
ارزش حرارتی پایین سوخت ( $MJ\ kg^{-1}$ )	LHV

### ۷- مراجع

- [1] McKendry P., Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresour Technol, Vol. 83, No. 1, pp. 37-46, 2002.
- [2] F.R.A.M., Standard Analytical fuel cell modelling and exergy analysis of fuel cells, PhD thesis, Delft University of Technology, 1998.
- [3] V Alderucci, PL Antonucci, G Maggio, N Giordano, V Antonucci, Thermodynamic analysis of SOFC fuelled by biomass-derived gas, Int J Hydrogen Energy, Vol. 19, No. 4, pp. 369-76, 1994.
- [4] PN Hutton, MA Musich, N Patel, DD Schmidt, RC Timpe, Feasibility study of a thermally integrated SOFC-gasification system for biomass power generation, Phase 1 Interim report, DE-FC26-98FT40321, 2003.
- [5] Fryda L., KD Panopoulos, J Karl, E Kakaras, Exergetic analysis of solid oxide fuel cell and biomass gasification integration with heat pipes, Energy, Vol. 33, No. 2, pp. 292-9, 2008.
- [6] Nagel F.P., Schildhauer T.J., McCaughey N., SMA Biollaz, Biomass-integrated gasification fuel cell systems e part 2: economic analysis, Int J Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 16, pp. 6826-44, 2009.
- [7] Pierobon L., Rokni M., Larsen U., Haglind F., Thermodynamic analysis of an integrated gasification solid oxide fuel cell plant combined with an organic Rankine cycle, Renewable Energy, Vol. 60 pp. 226-234, 2013.
- [8] Gholamian E., Zare V. Mousavi b. S. M., Integration of biomass gasification with a solid oxide fuel cell in a combined cooling, heating and power system: A thermodynamic and environmental analysis, Int J Hydrogen Energy, Vol. 41 pp. 1-11, 2016.
- [9] Cycle-Tempo 5.0, TU Delft, 2006, www.cycle-tempo.nl.
- [10] Liua M., Aravind P.V., Woudstra T., Cobas V.R.M., Verkooijen A.H.M., Development of an integrated gasifier-solid oxide fuel cell test system: A detailed system study, J Power Sources, Vol. 196, No. 2, pp. 7277-89, 2011.
- [11] Aravind P.V., Woudstra T., Woudstra N., Spliethoff H., Thermodynamic evaluation of small scale systems with biomass gasifiers, solid oxide fuel cells with Ni/GDC anodes and gas turbines, J Power Sources, Vol. 190, No. 2, pp. 461-75, 2009.
- [12] Toonssen R., Sollai S., Aravind P.V., Woudstra N., A.H.M. Verkooijen, Alternative system designs of biomass gasification SOFC/GT hybrid systems, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 2, pp. 10414-25, 2011.
- [13] Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd. www.ankurscientific.com/range.htm#wbg, 2011.



شکل ۷- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی توان تولیدی توربین گاز، چرخه آلی رانکین و توان مصرفی کمکی سیستم



شکل ۸- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی عملکرد سیستم

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله چرخه پیشنهادی جدیدی بر مبنای ترکیب گازی-ساز زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز- چرخه آلی رانکین به برای تولید توان الکتریسیته به صورت غیر متمرکز و برای ظرفیت‌های تولید توان پایین ارائه شد. نتایج مهم حاصل از شبیه‌سازی به طور خلاصه در ذیل ذکر شده‌اند.

- (۱) با یک چنین سیستمی می‌توان به راندمان انرژی ناخالص ۵۴/۴۶٪ دست یافت، در حالیکه راندمان انرژی خالص سیستم ۵۰/۵۵٪ می‌باشد.
- (۲) توان مصرفی واحدهای کمکی ۱۶۴ kW می‌باشد و راندمان انرژی خالص و ناخالص سیستم به ترتیب ۴۵/۰۸٪ و ۴۸/۵۷٪ می‌باشند.
- (۳) برای سیستم پیشنهادی، راندمان واحدهای پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین به ترتیب ۲۴/۲۹٪، ۳/۷۸٪ و ۲۴/۲۹٪ می‌باشند.
- (۴) آنالیز انرژی نشان می‌دهد که بیشتری تخریب انرژی در گازی‌ساز (با ۴۵٪ تخریب انرژی) و واحد تصفیه گاز (با ۱۸٪ تخریب انرژی) رخ می‌دهد.
- (۵) افزایش دمای ورودی توربین سبب افزایش توان تولیدی توربین گاز و راندمان سیستم می‌شود.
- (۶) افزایش نرخ فشار سبب افزایش راندمان ناخالص سیستم می‌شود، ولی با این وجود تاثیر چندانی بر روی راندمان خالص سیستم ندارد.