

# 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 مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

وحید اعظمی\*  
مرتضی یاری

## چکیده

در این مقاله، سیستم قدرت یکپارچه 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 می باشد. 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 می دهد که با یک چنین سیستمی می توان 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٪ می باشد. از نرم افزار ترمودینامیکی Cycle-Tempo برای مدل سازی سیستم پیشنهادی استفاده شده است. **واژه های 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 Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 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

سنتز می توان آن را در سیستم های 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 می شود که محدودیت چرخه کارنو<sup>۱</sup> را ندارد و ویژگی بارز آن راندمان بالای آن می باشد. در داخل پیل سوختی، فرایند تبدیل انرژی توسط واکنش الکتروشیمیایی اکسایش سوخت رخ می دهد در این روش تخریب انرژی بسیار کمتر از روش مرسوم احتراق می باشد [۲].

بین انواع پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد<sup>۳</sup> به دلیل راندمان بالا، دمای عملیاتی بالا و قابلیت کار با سوخت های 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 پژوهش های اولیه در این زمینه مربوط به آلدروچای و همکارانش [۳] می باشد. در این مطالعه، ترکیب گازی ساز زیست توده با سیال عامل های مختلف و پیل سوختی اکسید جامد مورد ارزیابی ترمودینامیکی قرار گرفته است.

زیست توده یک منبع انرژی تجدیدپذیر می باشد، که همه مواد اورگانیک<sup>۱</sup> به دست آمده از پوشش های گیاهی مانند چوب یا باقیمانده های زراعی، ضایعات کشاورزی و دیگر منابع بیولوژیکی<sup>۲</sup> را شامل می شود [۱].

فرایند گازی سازی یک روش کارآمد برای تبدیل زیست توده جامد به محصول گازی می باشد. این محصول گازی به عنوان گاز سنتز یا بیوگاز سنتز شناخته می شود. گاز سنتز عمدتاً شامل ترکیباتی مانند هیدروژن، مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، متان و نیتروژن می باشد. علاوه بر ترکیبات شمرده شده، گاز سنتز همچنین دارای ناخالصی هایی مانند ذرات، قطران<sup>۳</sup>، ترکیبات قلیایی، ترکیبات سولفوردار و ترکیبات هالوژن دار می باشد. وجود این ناخالصی ها در گاز سنتز ممکن است به دستگاه های پایین دست آسیب برساند، لذا قبل از استفاده از گاز سنتز به عنوان سوخت باید آن را تصفیه نمود. پس از پاکسازی گاز

- 1 Organic
- 2 Biological
- 3 Tars

- 4 Carnot cycle
- 5 Solid oxide fuel cell

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 آگزوری 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  $300^{\circ}\text{C}$  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  $800^{\circ}\text{C}$  کار می‌کنند که دمای عملیاتی راکتور گازی‌ساز می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است هر دوی این دستگاه‌ها

نتایج این تحقیق نشان می‌داد که ترکیب گازی‌ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد با سیال عامل بخار دارای راندمان  $47\%$  و با سیال عامل  $\text{CO}_2$  دارای راندمان  $51\%$  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،  $38\%$  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 آگزوری را برای این سیستم انجام داده و راندمان آگزوری را برای تولید توان  $170$ ،  $36\%$  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  $1\text{ MWe}$  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 گازی‌ساز بستر ثابت جریان بالا سو<sup>۱</sup> با پیل سوختی اکسید جامد بهترین عملکرد را داراست.

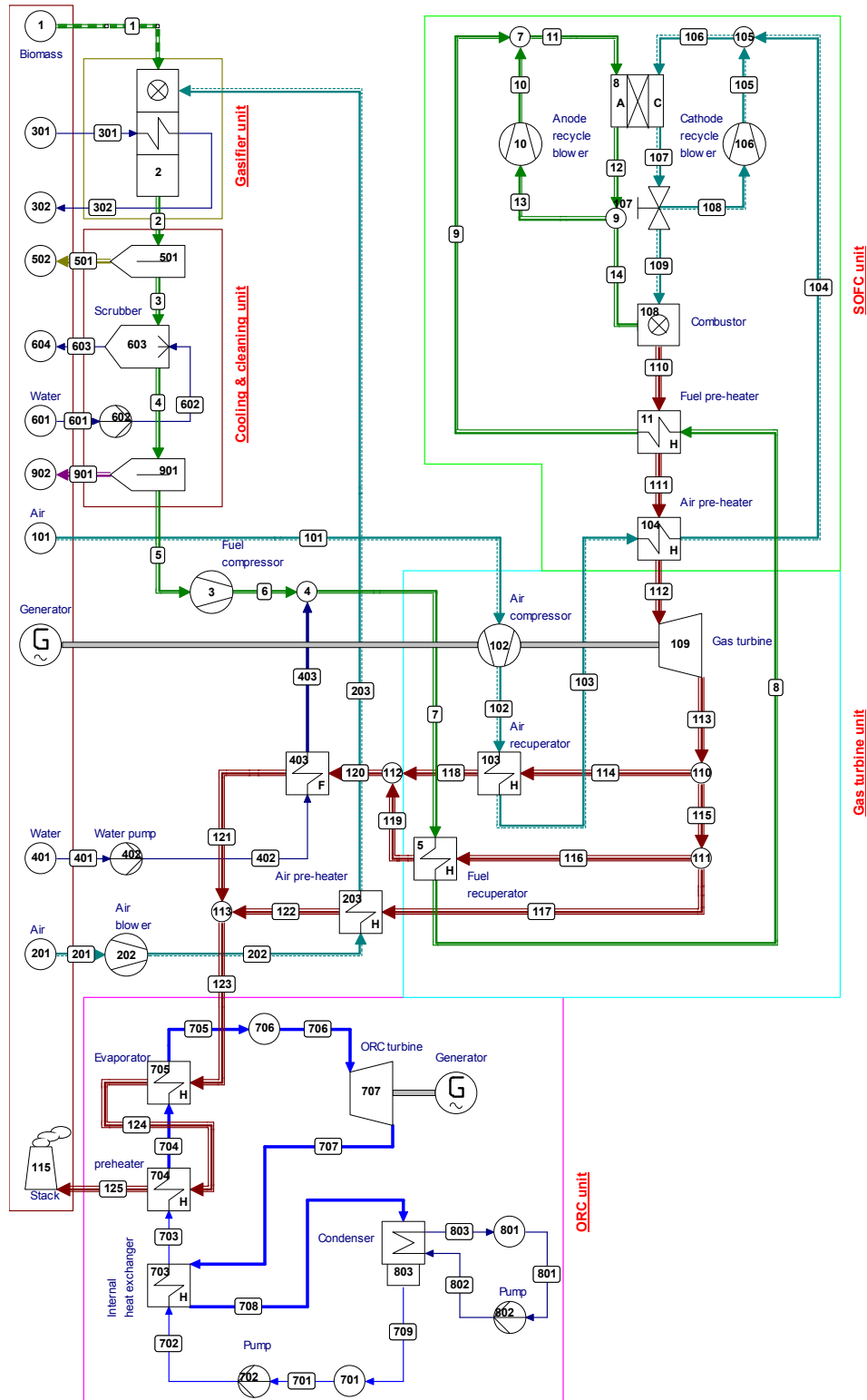
در پژوهش انجام یافته توسط رکنی و همکاران [۷]، یک سیستم تولید توان  $100\text{ Kw}$  شامل گازی‌ساز زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد و چرخه آلی رانکین مورد مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که با سیال عامل پروپوسیکلوهگزان<sup>۲</sup> در فشار  $15/9$  بار می‌توان به راندمان الکتریکی  $56/4\%$  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 آگزوری قابل حصول در سیستم CCHP برابر  $38\%$  می‌باشد که نسبت به سیستم تنهای پیل سوختی اکسید جامد دارای  $50\%$  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 آگزوری 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

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

سوخت و هوای خروجی از پیل سوختی وارد محفظه احتراق می‌شود و گرمای لازم برای پیش‌گرمایش هوا ورودی به کاتد و سوخت ورودی به آنرا فراهم می‌سازد. پس از آن گازهای گرم و پرفشار خروجی از مبادله‌کن گرمایی داخل توربین گاز منبسط شده و توان مورد نیاز کمپرسور و ژنراتور را فراهم می‌سازد.

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

### ۳- مدل‌سازی سیستم

شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی توسط نرم‌افزار چرخه-تمیو انجام شده است. این نرم‌افزار از روش کمینه انرژی گیبس<sup>۲</sup> برای انجام محاسبات در گازی‌ساز، پیل سوختی و محفظه احتراق بهره می‌گیرد. زیست‌توده مورد استفاده در مدل‌سازی، چوب با محتوای رطوبت ۱۰٪ می‌باشد که ترکیب آن در جدول ۱ آورده شده است [۱۲]. در جدول ۲ نیز پارامترهای لازم برای توسعه مدل گازی‌ساز آورده شده است. برخی از فرضیات به کار برده شده در شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی در ذیل آمده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می‌کند.
  - همه فرایندها به صورت بی‌دررو می‌باشند.
  - هیچ نشتی جریانی در سیستم وجود ندارد.
  - مبادله‌کن‌های گرمایی گرمایی به صورت جریان ناهمسو<sup>۳</sup> کار می‌کنند.
  - تمام فرایندهای سیستم آدیاباتیک می‌باشند.
- محاسبات انجام شده در گازی‌ساز، پیل سوختی اکسید جامد و محفظه احتراق بر مبنای کمینه انرژی گیبس می‌باشد. مجموعه‌ای از معادلات استفاده شده در مدل‌سازی 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،  $y_i^0$  غلظت گونه‌ها در ورودی آند،  $M_a$  نمایانگر جرم مولکولی آند،  $F$  ثابت فارادی،  $U_F$  نمایانگر فاکتور مصرف سوخت،  $V_{rev,x}$  نمایانگر ولتاژ برگشت‌پذیر،  $V_{rev}^0$  نمایانگر ولتاژ برگشت‌پذیر 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> می‌باشد. علاوه بر این،  $h_i$  نمایانگر آنتالپی ورودی به توربین یا کمپرسور،  $h_o$  نمایانگر آنتالپی خروجی از توربین یا کمپرسور،  $\eta_s$  نمایانگر راندمان ایزنتروپیک توربین و یا کمپرسور و  $h_{o,s}$  نمایانگر آنتالپی خروجی توربین یا کمپرسور هنگام انبساط ایزنتروپیک می‌باشد.

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

گاز خروجی از واحد تصفیه پیش از ورود به قسمت آند پیل سوختی لازم است که دمای آن 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 مبادله‌کن گرمایی شماره ۵ توسط بخشی از گازهای خروجی از توربین گاز تا دمای  $595^\circ\text{C}$  گرم می‌شود و سپس در مبادله‌کن گرمایی شماره ۱۱ توسط گرمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق تا دمای  $716^\circ\text{C}$  گرم می‌شود. پیش از گرمایش گاز سنتز و جهت جلوگیری از رسوب‌گیری کربن، مقداری بخار به جریان گاز سنتز خروجی از کمپرسور سوخت اضافه می‌شود [۱۱].

در نهایت گاز سنتز خروجی از مبادله‌کن 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 می‌باشد، افزایش می‌یابد. پس از آن گاز مخلوط شده وارد قسمت آند پیل سوختی می‌شود. پیل سوختی مورد استفاده در این مقاله، پیل سوختی اکسید جامد با رفورمینگ داخلی مستقیم می‌باشد. دمای عملیاتی پیل سوختی  $950^\circ\text{C}$  می‌باشد، این در حالی است که دمای خروجی پیل سوختی اکسید جامد  $1000^\circ\text{C}$  می‌باشد.

در سمت کاتد پیل سوختی، هوا ورودی پس از متراکم شدن در کمپرسور شماره ۲۰۲ وارد مبادله‌کن گرمایی شماره ۲۰۳ شده و توسط گازهای گرم خروجی از توربین گاز پیش‌گرم می‌شود. علاوه بر این پیش‌گرمایش، جریان هوا جهت رسیدن به دمای ورودی کاتد نیاز به گرمایش مجدد دارد. برای این منظور هوای متراکم و پیش‌گرم شده ابتدا در مبادله‌کن گرمایی ۱۰۴ توسط گرمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق تا دمای  $799^\circ\text{C}$  گرم می‌شود 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 می‌باشد، افزایش می‌یابد. در نهایت هوای مخلوط شده وارد قسمت کاتد پیل سوختی می‌شود. در داخل پیل سوختی واکنش‌های الکتروشیمیایی تبدیل سوخت به جریان الکتروسیسته روی می‌دهد.

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>۶</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 به دست آمده از مدل‌سازی گازی‌ساز سازگاری قابل قبولی 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  $19.0 \text{ kW}$  می‌باشد. این در حالی است که انرژی ورودی به سیستم  $46.96 \text{ kW}$  می‌باشد. در داخل پیل سوختی واکنش‌های الکتروشیمیایی بین سوخت و اکسیدان روی می‌دهد. توان تولیدی متناوب پیل سوختی اکسید جامد  $1616 \text{ kW}$  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  $613 \text{ kW}$  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]

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

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

جدول ۱- ترکیب زیست توده مورد استفاده در مدل سازی [۱۲]

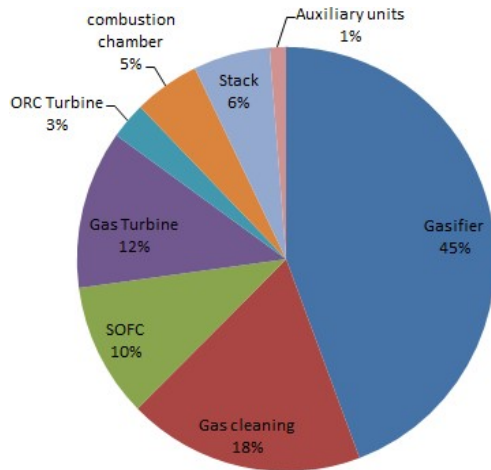
پارامتر	مقدار	واحد
کربن (C)	49.97	wt%
هیدروژن (H)	6.12	wt%
اکسیژن (O)	42.49	wt%
نیترोजن (N)	0.55	wt%
گوگرد (S)	0.06	wt%
خاکستر (SiO <sub>2</sub> )	0.8	wt%
ارزش حرارتی پایین (LHV)	18.62	MJ kg <sup>-1</sup>
انرژی زیست توده	20.61	MJ kg <sup>-1</sup>

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

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

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>۵</sup> می‌باشد. فشار سیال ورودی توربین آلی رانکین طوری



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 می‌شود بیشترین تلفات اگزرژی در گازی‌ساز (۴۵٪) و واحد تصفیه گاز (۱۸٪) می‌باشد. 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 می‌باشند. تلفات اگزرژی در گازی‌ساز ناشی از اختلاف دمای بین محصول گازی خروجی از گازی‌ساز در دمای بالا و زیست‌توده ورودی به گازی‌ساز با دمای پایین به اضافه تلفات ناشی از کربن تبدیل نشده می‌باشد. تلفات اگزرژی در واحد تصفیه نیز ناشی از افت دمای ناگهانی گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز می‌باشد که تا دمای محیط خنک شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بدلیل افت ناگهانی دمای گاز سنتز از ۸۰۰ 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 می‌یابد. 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 می‌یابد.

جدول ۴- عملکرد ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی

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

(\*) توان AC برابر ضرب راندمان تبدیل اینورتر در توان DC می‌باشد.

(\*\*) توان خالص برابر توان ناخالص منهای مجموع توان مصرفی

واحدهای کمکی می‌باشد.

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

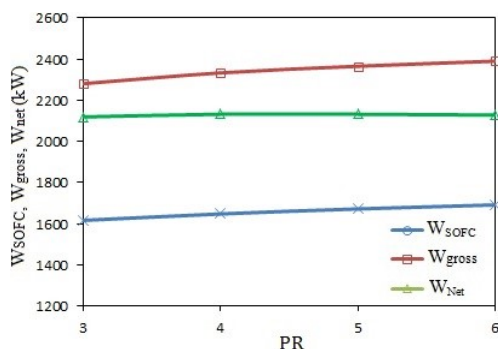
توان تولید ناخالص سیستم ۲۲۸۲ kW و مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی ۱۶۴ kW می‌باشد. توان تولیدی خالص پس از کم کردن توان مصرفی واحدهای کمکی ۲۱۱۸ kW می‌باشد. راندمان‌های انرژی الکتریکی ناخالص و خالص سیستم پیشنهادی به ترتیب ۵۴/۴۶٪ و ۵۰/۵۵٪ می‌باشد. این در حالی است که راندمان‌های اگزرژی الکتریکی ناخالص و خالص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



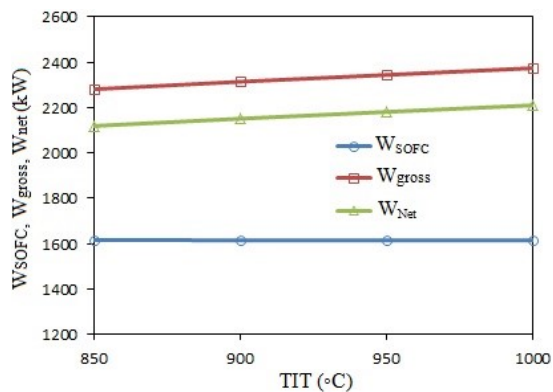
۱۰۰۰، راندمان‌های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب از ۴۸/۵۵ تا ۵۰/۵۳٪ و ۴۵/۱۱ تا ۴۷/۰۵٪ افزایش می‌یابند.

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.

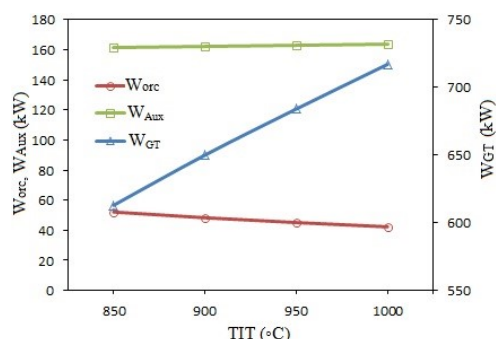
همانطور که از شکل ۸ ملاحظه می‌شود، راندمان‌های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب تغییرات مشابهی با راندمان انرژی ناخالص و خالص سیستم دارند. با افزایش نرخ فشار کمپرسور از ۳ تا ۶، راندمان های اگزرژی ناخالص و خالص سیستم به ترتیب از ۴۸/۵۷ تا ۵۰/۸۷٪ و ۴۵/۰۸ تا ۴۵/۳۱٪ افزایش می‌یابند. با این وجود، کارکرد 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.



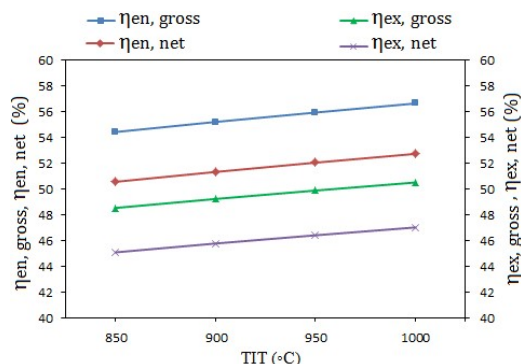
شکل ۶- تاثیر نرخ بخار اضافه شده بر روی توان تولیدی پیل سوختی، ناخالص و خالص سیستم



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

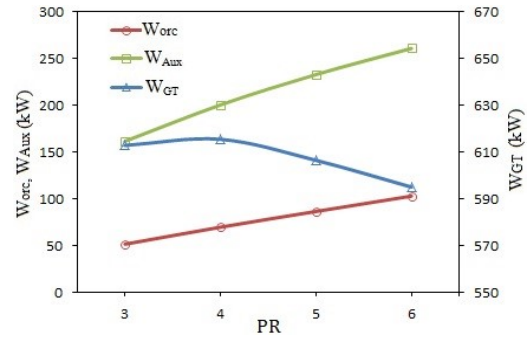
همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای ورودی توربین گاز از ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ °C توان تولیدی ناخالص و راندمان الکتریکی ناخالص سیستم به ترتیب از ۲۲۸۱ تا ۲۳۷۴ kW و ۵۴/۴۴ تا ۵۶/۶۶٪ افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر با توجه به شکل ۵، با افزایش دمای ورودی توربین گاز به دلیل ثابت ماندن توان تولیدی سایر واحدها، توان 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 ۱۰۰۰ °C

۶- نمادها

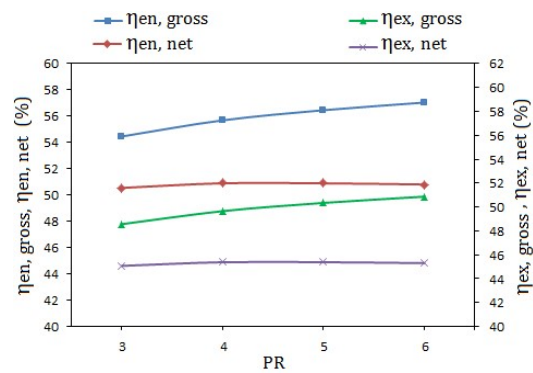
نرخ اکسیژن به سوخت	$X_{OF}$
فاکتور مصرف سوخت (%)	$U_F$
فشار کاری پیل سوختی (bar)	$P_{cell}$
دمای کاری پیل سوختی ( $^{\circ}C$ )	$T_{cell}$
چگالی جریان ( $mA\ cm^{-2}$ )	$i$
مقاومت معادل ( $\Omega\ m^2$ )	$R_{eq}$
ارزش حرارتی پایین سوخت ( $MJ\ kg^{-1}$ )	LHV

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-سازی 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 اگزرژی 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 ۳۸/۵۷٪، ۲۴/۲۹٪ و ۳/۷۸٪ می‌باشند.
- (۴) آنالیز اگزرژی نشان می‌دهد که بیشتری تخریب اگزرژی در گازی‌ساز (با ۴۵٪ تخریب اگزرژی) و واحد تصفیه گاز (با ۱۸٪ تخریب اگزرژی) 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.