

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

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

وحید اعظمی\*  
مرتضی یاری

### چکیده

در این مقاله، برای کاربردهای تولید توان به صورت غیر متمرکز، سیستم یکپارچه‌ی گازی سازی زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز-چرخه آلی رانکین ارائه شده 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. تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا برای این سیستم پیشنهاد شده است. عملکرد سیستم توسط محاسبات ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با سیستم یکپارچه گازی سازی زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز-چرخه آلی رانکین با تولید توان خالص ۲/۳ MW<sub>e</sub> می توان به راندمان انرژی خالص ۵۵/۷۳٪ بر مبنای ارزش گرمای پایین دست یافت. از نرم افزار ترمودینامیکی Cycle-Tempo برای مدل سازی سیستم پیشنهادی استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** انرژی، انرژی، گاز، گاز، پیل سوختی اکسید جامد.

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

V. azami  
M. yari

Faculty of Technical and Engineering, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran  
Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

In this paper, an integrated biomass gasifier-SOFC-GT-ORC system for decentralized power generation application is presented. The proposed system includes a gasification unit, a gas cleaning unit, a SOFC-GT hybrid system and an organic Rankine bottoming cycle. High temperature gas cleaning system (HTGCS), were proposed for this integration. The performance of the system is evaluated using thermodynamic calculations. The results obtained indicate that for the integrated biomass gasifier-SOFC-GT-ORC power generation plant the net electrical efficiency based on lower heating value (LHV) is 55.73%, when 2.3 MW<sub>e</sub> power was produced. The proposed system has been modeled using Cycle-Tempo software.

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

### ۱- مقدمه

فرایند گازی سازی یک روش کارآمد برای تبدیل زیست توده جامد به محصول گازی می باشد. این محصول گازی به عنوان گاز سنتز یا زیست گاز 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، ترکیبات قلیایی، ترکیبات سولفوردار و ترکیبات هالوژندار 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 سنتز می توان آن را در سیستم های پیشرفته تبدیل انرژی مانند پیل سوختی و یا توربین گاز به عنوان سوخت به کار برد. بین انواع پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد به دلیل راندمان بالا، دمای عملیاتی بالا و قابلیت کار با سوخت های مختلف، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

در چند دهه اخیر، نگرانی ها در خصوص تغییرات آب و هوایی، کاهش منابع سوخت های فسیلی، افزایش انتشار گازهای گلخانه ای و انتشار آلاینده ها به طور فزاینده ای افزایش یافته است. مجموعه این عوامل و نگرانی ها منجر به جستجو برای یافتن منابع انرژی تجدیدپذیر برای آینده و روش های کارآمدتر تبدیل سوخت به انرژی شده است. یکی از این منابع انرژی امید بخش زیست توده می باشد. فرایندهای مختلفی جهت تبدیل زیست توده به حامل انرژی ثانویه در دسترس می باشند. این فرایندها اساساً بر مبنای تبدیلات ترموشیمیایی مانند احتراق، تجزیه در اثر گرما، گازی کردن<sup>۱</sup> و آبگونی-سازی<sup>۲</sup> و یا بر مبنای تبدیلات بیولوژیکی مانند گوارش<sup>۳</sup> و تخمیر<sup>۴</sup> می باشند [۱].

1Biomass  
2Thermo-chemical  
3Pyrolysis  
4Gasification  
5Liquefaction  
6Biological

1Digestion  
2Fermentation  
3Tars  
4Solid oxide fuel cell

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vazami@uma.ac.ir

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. در مجموع می‌توان گفت بررسی پیکربندی سیستم یکپارچه گازی سازی زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد- توربین گاز-چرخه آلی رانکین و استفاده از تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌باشند.

در این مقاله چرخه پیشنهادی جدیدی بر مبنای ترکیب گازی-ساز زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین برای تولید توان الکتریسته به صورت غیر متمرکز و برای ظرفیت‌های تولید توان پایین پیشنهاد شده است و عملکرد آن توسط محاسبات ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا جهت حذف آلاینده‌های موجود در گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز استفاده شده است. از نرم‌افزار ترمودینامیکی سایکل-تمپو<sup>۲</sup> [۸] 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 بازگردش سوخت و هوا می‌باشد. زیست توده به همراه سیال عامل گازی‌سازی (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 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 بالا برای پاکسازی گاز سنتز خروجی از گازی‌ساز انتخاب شده است، در این روش تصفیه گاز در بین دماهای نسبتاً بالای ۵۰۰ °C تا ۸۰۰ °C صورت می‌گیرد.

سیستم تصفیه گاز دما بالا برای این منظور انتخاب شده است. این واحد شامل فیلتر سرامیکی حذف ذرات<sup>۳</sup> و راکتور دولومیتی حذف قطران<sup>۴</sup> می‌باشد. گاز سنتز ورودی به واحد تصفیه ابتدا وارد فیلتر حذف ذرات می‌شود در این دستگاه ذرات موجود در گاز سنتز حذف می‌شود. سپس گاز سنتز وارد راکتور حذف قطران می‌شود. هر دوی این دستگاه‌ها در دمای ۸۰۰ °C کار می‌کنند که دمای عملیاتی راکتور گازی‌ساز می‌باشد. در شکل ۱ هر دوی این دستگاه‌ها با واحد ۵۰۱ مدل‌سازی شده است. پس از حذف ذرات و قطران موجود در گاز سنتز،

ترکیب گازی‌ساز زیست توده و پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از پژوهش‌های اولیه در این زمینه مربوط به الوچی و همکارانش [۲] می‌باشد. در این مطالعه، ترکیب گازی‌ساز زیست توده با سیال عامل‌های مختلف و پیل سوختی اکسید جامد مورد ارزیابی ترمودینامیکی قرار گرفته است. 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 [۳] 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 گرمای پایین سوخت، ۳۸٪ گزارش کرده‌اند. در مطالعه صورت گرفته توسط فرایدا و همکارانش [۴]، گازی‌ساز توسط لوله‌های گرمایی به پیل سوختی اکسید جامد کوپلینگ گرمایی شده بود. در این روش گرمای استخراج شده از پیل سوختی توسط لوله‌های گرمایی به سیستم گازی‌ساز تغذیه می‌شد. آنها آنالیز آگزوری را برای این سیستم انجام داده و برای تولید توان ۱۷۰ kW راندمان آگزوری را ۳۶٪ گزارش کرده‌اند.

در مطالعه انجام یافته توسط نگال و همکارانش [۵]، هفت سیستم مختلف تولید توان بر مبنای گازی‌سازی 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 گازی‌سازی زیست‌توده بودند. در پایان استنتاج شده بود که ترکیب گازساز بستر ثابت جریان بالا سو<sup>۵</sup> با پیل سوختی اکسید جامد بهترین عملکرد را داراست.

در پژوهش انجام یافته توسط رکنی و همکاران [۶]، یک سیستم تولید توان ۱۰۰ Kw شامل گازی‌سازی زیست توده، پیل سوختی اکسید جامد و چرخه آلی رانکین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که با سیال عامل پروپوسایکلوهگزان<sup>۶</sup> در فشار ۱۵/۹ بار می‌توان به راندمان الکتریکی ۵۶/۴٪ دست یافت.

در مطالعه انجام یافته توسط غلامیان و همکاران [۷]، آنالیز ترمودینامیکی سیستم تولید همزمان توان، سرما و گرما (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 ۳۸٪ می‌باشد که نسبت به سیستم تنهای پیل سوختی اکسید جامد دارای ۵۰٪ افزایش راندمان می‌باشد.

مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تولید توان الکتریسته از زیست توده نشان می‌دهد که اکثر این مطالعات بر مبنای ترکیب گازی‌سازی 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 گازی‌سازی زیست‌توده، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین انجام داده نشده

<sup>۱</sup>Cycle-Tempo  
<sup>۲</sup>ceramic particulate filter  
<sup>۳</sup>dolomite based tar-cleaning reactor

<sup>۴</sup>Fixed bed updraft gasifier  
<sup>۵</sup>propylcyclohexane

گازهای داغ خروجی از توربین گاز پس از استفاده در واحدهای ۴۰۳، ۲۰۳ و ۱۰۳، هنوز هم دارای کیفیت گرمایی بالایی می‌باشند که می‌توان در چرخه پایین دست برای تولید توان اضافی مورد استفاده قرار داد. لذا باقیمانده گرمای گازهای خروجی از توربین گاز پیش از تخلیه به اتمسفر، جهت تولید توان اضافی در چرخه پایین دست آلی رانکین بازیافت می‌شود.

### ۳- مدل‌سازی سیستم

شبیه‌سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی توسط نرم‌افزار سایکل-تمپو انجام شده است. این نرم‌افزار از روش کمینه انرژی گیبس<sup>۱</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 [۱۰]. در جدول ۲ نیز پارامترهای لازم برای توسعه مدل‌سازی گازی‌ساز آورده شده است. برخی از فرضیات به کار گرفته شده در شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی در ذیل آمده است:

- سیستم در حالت پایدار کار می‌کند.
  - همه فرایندها به صورت بی‌دررو می‌باشند.
  - هیچ نشستی جریان در سیستم وجود ندارد.
  - تمام فرایندهای سیستم آدیباتیک می‌باشند.
  - جریان مبادله کن‌های گرمایی به صورت ناهمسوآمی‌باشد.
- محاسبات انجام شده در گازی‌ساز، پیل سوختی اکسید جامد و محفظه احتراق بر مبنای کمینه انرژی گیبس می‌باشد. در جدول ۲ پارامترهای لازم برای توسعه مدل هیبرید پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز آورده شده است. مجموعه‌ای از روابط استفاده شده در مدل‌سازی سیستم در روابط (۱) تا (۹) آورده شده است.

در این روابط،  $\Phi_{m,a,i,n}$  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 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

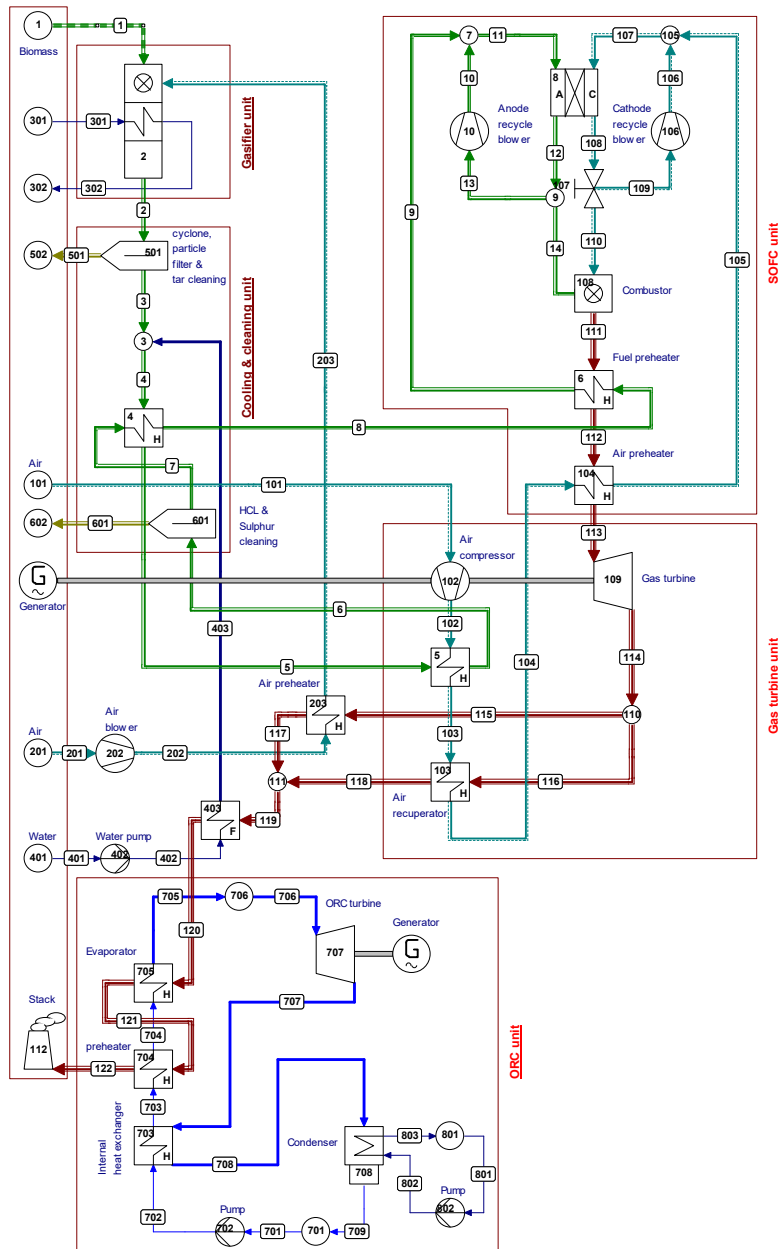
این گاز جهت حذف ترکیبات هالوژنی (HCL) و سولفوری (H2S) موجود در آن وارد واحد تصفیه می‌شود. برای این منظور ابتدا دمای گاز تا  $600^\circ\text{C}$  پایین آورده می‌شود که دمای عملیاتی واحد تصفیه گاز می‌باشد. این کار توسط مبدل‌های گرمای گاز به گاز انجام می‌گیرد. قبل از اینکه دمای گاز پایین آورده شود، مقداری بخار به گاز سنتز اضافه می‌گردد.

در واقع وظیفه اصلی بخار اضافه شده به سیستم، جلوگیری از رسوب‌گیری کربن در رژیم‌های دمایی پایینی می‌باشد که گاز سنتز قبل از ورود به پیل سوختی از آنها عبور می‌کند [۹]. پس از تزریق بخار گاز سنتز ابتدا وارد مبادله کن‌های گرمایی اول (دستگاه شماره ۴) شده و تا دمای  $670^\circ\text{C}$  خنک می‌شود گرمای استخراج شده از این مبادله کن جهت افزایش دمای گاز سنتز ورودی به پیل سوختی استفاده می‌شود. پس از آن گاز سنتز برای خنک کاری مجدد تا دمای  $600^\circ\text{C}$  وارد مبادله کن‌های گرمایی دوم (دستگاه شماره ۵) می‌شود گرمای استخراج شده از این مبادله کن جهت پیش گرمایش هوای خروجی از کمپرسور به کار برده می‌شود. سپس گاز سنتز جهت حذف ترکیبات هالوژنی و سولفوری از روی بسترهای جاذب حاوی کربنات و اکسید روی عبور می‌کند (دستگاه شماره ۶۰۱). در نهایت گاز سنتز خروجی از مبادله کن‌های گرمایی ۶ 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 پژوهش، پیل سوختی اکسید جامد با رفورمینگ داخلی مستقیم می‌باشد. از این رو سوخت تغذیه شده به قسمت آند پیل سوختی به صورت مستقیم به هیدروژن و مونوکسیدکربن تبدیل می‌شود. دمای عملیاتی پیل سوختی اکسید جامد  $950^\circ\text{C}$  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 ۱۰۲ وارد مبادله کن‌های گرمایی شماره ۵ و توسط گاز سنتز خروجی از مبادله کن‌های گرمایی شماره ۴ پیش‌گرم می‌شود. سپس توسط مبادله کن‌های گرمایی شماره ۱۰۳ 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 مبادله کن‌های گرمایی ۱۰۴ توسط گرمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق تا دمای  $806^\circ\text{C}$  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.

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



شکل ۱- طرحواره سیستم ترکیب سازی زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز-چرخه آبی رانکین با سیستم تصفیه گاز دما بالا

$$\Delta V_x = V_{rev,x} - V \quad (\delta)$$

$$i_x = \frac{\Delta V_x}{R_{eq}} \quad (\epsilon)$$

$$P_e = V \times I \times \eta_{DC/AC} \quad (\gamma)$$

$$h_o = h_i - \eta_s(h_i - h_{o,s}) \quad (\lambda)$$

$$h_o = h_i + \frac{(h_{o,s} - h_i)}{\eta_s} \quad (\alpha)$$

$$I_F = \frac{\Phi_{m,a,in}}{M_a} \times \frac{(y_{H_2}^0 + y_{CO}^0 + 4y_{CH_4}^0)}{2F} \quad (1)$$

$$I = I_F \times U_F \quad (2)$$

$$V_{rev,x} = V_{rev}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{y_{O_2,c}^{1/2} y_{H_2,a}}{y_{H_2O,a}} \times P_{cell}^{1/2} \right) \quad (3)$$

$$V_{rev}^0 = \frac{\Delta G_{rev}^0}{2F} \quad (4)$$

داشته باشد. در جدول ۲ پارامترهای لازم برای توسعه مدل چرخه آلی رانکین آورده شده است. علاوه بر محاسبات سیستم، نرم افزار چرخه-تمپو قادر به انجام محاسبات انرژی نیز هست. این کار بوسیله تعیین مقدار کار مورد نیاز یا مقدار کار تولید شده هنگامی که سیال عامل با محیط اطراف به حالت تعادل می رسد، صورت می گیرد. علاوه بر محاسبات انرژی، دما و فشار محیط برای محاسبات ارزش گرمای سوخت نیز استفاده می شود. تلفات انرژی نیز از طریق بالانس انرژی فرایندهای مختلف بوسیله نرم افزار محاسبه می گردد. راندمان الکتریکی ناخالص، خالص و راندمان انرژی ناخالص و خالص نیز طبق معادلات ۱۰ تا ۱۳ محاسبه می شود.

#### ۴- نتایج

در جدول ۳ ترکیب گاز سنتز به دست آمده از محاسبات نرم افزار Cycle-Tempo نشان داده شده است. این نتایج با داده های تجربی راکتور سازی انکور<sup>۲</sup> [۱۲] مورد مقایسه قرار گرفته است. این نتایج بر حسب ترکیب مولی محصول سازی، مقدار  $X_{OF}$  و ارزش گرمای پایین سوخت گاز سنتز نمایش داده شده است. همانطور که از جدول ۳ مشاهده می شود، نتایج به دست آمده از مدل سازی گاز سازی سازگاری قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. لذا می توان با اطمینان خاطر مدل سازی ساز را برای بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی مورد مطالعه به کار برد.

در شکل ۲ مقایسه بین داده های تجربی و نتایج شبیه سازی برای تک سل پیل سوختی اکسید جامد نشان داده شده است. دمای عملیاتی تک سل پیل سوختی  $900^{\circ}C$  فرض شده است. جهت مقایسه درست بین نتایج نرم افزار و داده های تجربی، ترکیب سوخت ورودی به آند و مقادیر فشار و فاکتور مصرف سوخت پیل سوختی برابر مقادیر فرض شده در مراجع [۱۳ و ۱۴] در نظر گرفته شده است. بیشینه اختلاف بین نتایج مدل سازی و داده های تجربی کمتر از ۴٪ می باشد، که نشان می دهد نتایج مدل سازی سازگاری قابل قبولی با داده های تجربی دارد.

$$(10) \quad \text{مجموع توان الکتریکی خروجی} = \frac{\text{راندمان الکتریکی ناخالص}}{\text{مجموع انرژی ورودی}}$$

$$(11) \quad \text{توان مصرفی کمکی} - \text{مجموع توان الکتریکی خروجی} = \frac{\text{راندمان الکتریکی خالص}}{\text{مجموع انرژی ورودی}}$$

$$(12) \quad \text{مجموع توان الکتریکی خروجی} = \frac{\text{راندمان انرژی ورودی}}{\text{مجموع انرژی ورودی}}$$

$$(13) \quad \text{توان مصرفی کمکی} - \text{مجموع توان الکتریکی خروجی} = \frac{\text{راندمان انرژی ورودی}}{\text{مجموع انرژی ورودی}}$$

جدول ۱- ترکیب زیست توده مورد استفاده در مدل سازی [۱۰].

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

جدول ۲- شرایط شبیه سازی سیستم پیشنهادی [۹، ۱۰ و ۱۱]

واحد	مقدار	پارامتر
گاز سازی:		
°C	800	دمای عملیاتی گاز سازی
bar	1.013	فشار عملیاتی گاز سازی
°C	300	دمای هوای ورودی به گاز سازی
bar	0.02	افت فشار در گاز سازی
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> )
%	۸۵	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 ایزنروپیک توربین گاز
---	0.8	راندمان ایزنروپیک 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 مبادله کن های گرمایی داخلی
---	0.94	راندمان ژنراتور

چرخه پایین دست به کار گرفته شده در این مقاله، چرخه آلی رانکین با مبادله کن های گرمایی داخلی می باشد. سیال آلی انتخاب شده نیز سایکلوهگزان می باشد. فشار سیال ورودی توربین آلی رانکین طوری انتخاب شده است که در شرایط عملیاتی مختلف و با توجه به محدودیت های اختلاف دمای در نقطه پینچ و دمای گازهای تخلیه شده به اتمسفر، بیشترین استخراج گرما را از گازهای گرم خروجی از توربین

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل چرخه تمپو با داده‌های تجربی [۹]

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.

پس از پیش‌گرمایش هوا و سوخت و تولید بخار، گازهای خروجی جهت تولید توان اضافی وارد چرخه آلی رانکین می‌شوند. مقدار گرمای بازیافت شده در قسمت بویلر بازیافت توسط مبدل‌های گرمای ۷۰۴ و ۷۰۵ برابر ۱۰۵۱ kW می‌باشد. فشار و دمای سیال آلی در ورودی توربین آلی رانکین به ترتیب ۱۷۸ °C و ۹/۳ bar می‌باشد.

توان تولیدی چرخه آلی رانکین، ۲۲۳ kW و راندمان الکتریکی آن ۱۰/۲۷٪ می‌باشد. راندمان چرخه آلی رانکین به صورت نسبت توان تولیدی ژنراتور بر انرژی جریان ورودی به بویلر بازیافت گرما محاسبه می‌شود. در نهایت گازهای خروجی از واحد بویلر بازیافت گرما در دمای ۱۰۰ °C به اتمسفر تخلیه می‌شود.

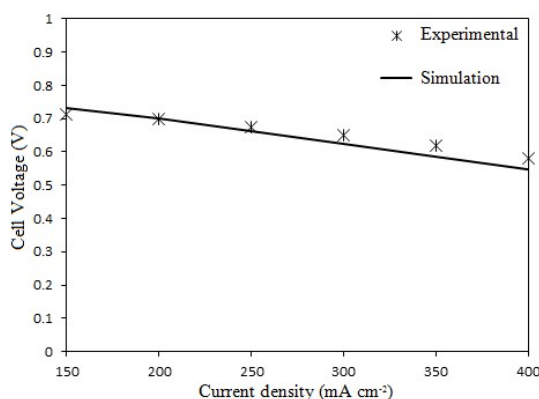
توان تولید ناخالص سیستم ۲۴۳۷ kW و مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی ۱۰۲ kW می‌باشد. توان تولیدی خالص پس از کم کردن توان مصرفی واحدهای کمکی ۲۳۳۵ kW می‌باشد. راندمان‌های انرژی الکتریکی ناخالص و خالص سیستم پیشنهادی به ترتیب ۵۸/۱۶٪ و ۵۵/۱۳٪ می‌باشد. این در حالی است که راندمان‌های انرژی الکتریکی ناخالص و خالص سیستم هیبریدی به ترتیب ۵۱/۸۷٪ و ۴۹/۱۷٪ می‌باشد.

جهت تعیین سهم هر دستگاه در کل بازگشت ناپذیری سیستم آنالیز انرژی سیستم انجام شده است و نتایج آن برای شرایط طراحی در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تلفات انرژی مربوط به واحد گازی‌ساز زیست توده می‌باشد (kW) ۱۰۷۳ یا (۴۶٪). سپس به ترتیب واحدهای توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد، توربین Stack، ORC (دودکش)، واحد تصفیه گاز و محفظه احتراق، به ترتیب با ۳۸۳ kW، ۲۶۰ kW، ۱۷۷ kW، ۱۵۵ kW، ۱۴۰ kW و ۱۳۸ کیلووات دارای بیشترین سهم تخریب انرژی می‌باشند. تلفات انرژی 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.

جدول ۴- عملکرد انرژی سیستم پیشنهادی

واحد	مقدار	پارامتر
kW	4190	انرژی ورودی به سیستم
kW	1656	توان DC تولیدی پیل سوختی
kW	606	توان تولیدی ژنراتور
kW	223	توان تولیدی چرخه ORC
kW	102	مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی
kW	2437	توان تولیدی ناخالص سیستم
kW	2335	توان تولیدی خالص سیستم*
%	38.35	راندمان پیل سوختی اکسید جامد
%	23.94	راندمان توربین گاز
%	10.27	راندمان چرخه ORC
%	58.16	راندمان انرژی ناخالص سیستم
%	55.73	راندمان انرژی خالص سیستم

<sup>(\*)</sup> توان خالص برابر توان ناخالص منهای مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه داده‌های تجربی با نتایج مدل‌سازی برای تک سل پیل سوختی در دمای ۱۰۰۰ °C

عملکرد سیستم هیبریدی پیشنهادی بر مبنای انرژی و انرژی به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. دبی زیست‌توده ورودی به گازی‌ساز ثابت فرض شده و برابر ۰/۲۵ kg/s می‌باشد. انرژی متناظر با این دبی ورودی بر مبنای ارزش گرمای پایین سوخت kW ۴۱۹۰ می‌باشد. این در حالی است که انرژی ورودی به سیستم kW ۴۶۹۶ می‌باشد. در داخل پیل سوختی واکنش‌های الکتروشیمیایی بین سوخت و اکسیدان روی می‌دهد.

توان تولیدی متناوب پیل سوختی اکسید جامد kW ۱۶۰۷ و راندمان الکتریکی آن ۳۸/۳۵٪ می‌باشد. این راندمان به صورت نسبت توان تولیدی پیل سوختی به انرژی زیست‌توده ورودی به سیستم و بر مبنای ارزش گرمای پایین سوخت تعریف می‌شود.

گازهای خروجی از محفظه احتراق پس از گرمایش سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی اکسید جامد در دمای ۸۵۰ °C وارد توربین گاز شده و تا دمای ۶۴۹ °C و فشار ۱/۰۹۳ bar منبسط می‌شوند. فشار بالای خروجی توربین گاز جهت غلبه بر افت فشار مسیر پایین دست می‌باشد. توان تولیدی توربین گاز ۶۰۶ kW و راندمان الکتریکی آن ۲۳/۹۴٪ می‌باشد. راندمان توربین گاز به صورت نسبت توان تولیدی ژنراتور بر اختلاف بین انرژی ورودی به سیستم و توان تولیدی پیل سوختی تعریف می‌شود.

(به ترتیب 2437 kW و 2335 kW) به دلیل توان بالای چرخه آلی رانکین بیشتر از مقادیر مشابه سیستم تصفیه گاز دما پایین (به ترتیب 2264 kW و 2102 kW) می باشد. از این رو راندمان انرژی و انرژی خالص سیستم تصفیه گاز دما بالا (به ترتیب 55/73 و 49/7 درصد) نیز بیشتر از مقادیر مشابه در سیستم دما پایین (به ترتیب 50/17 و 44/75 درصد) می باشند.

جدول ۶- مقایسه بین عملکرد سیستم دما بالا و دما پایین

واحد	سیستم دما بالا	سیستم دما پایین	پارامتر
kW	1607	1616	توان AC تولیدی پیل سوختی
kW	606	594	توان تولیدی ژنراتور
kW	223	54	توان تولیدی چرخه ORC
kW	2437	2264	توان تولیدی ناخالص سیستم
kW	2335	2102	توان تولیدی خالص سیستم
%	55.73	50.17	راندمان انرژی خالص سیستم
%	49.7	44.75	راندمان انرژی خالص سیستم

### ۵- نتیجه گیری

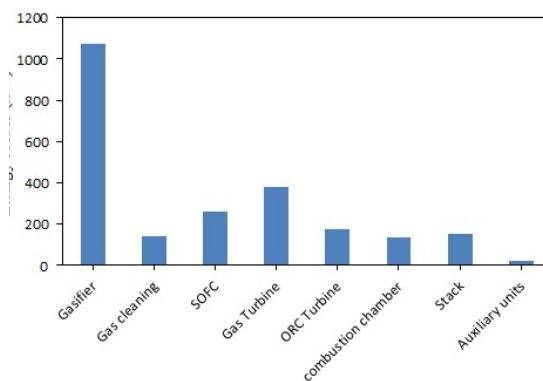
در این مقاله چرخه پیشنهادی جدیدی بر مبنای ترکیب گازی-ساز زیست توده-پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز-چرخه آلی رانکین با سیستم تصفیه گاز دما بالا برای تولید توان الکتریسیته به صورت غیر متمرکز و برای ظرفیت های تولید توان پایین ارائه شد. نتایج مهم حاصل از شبیه سازی به طور خلاصه در ذیل ذکر شده اند.

- با یک چنین سیستمی می توان به راندمان انرژی ناخالص 58/16 دست یافت، در حالیکه راندمان انرژی خالص سیستم به 55/73 می رسد.
- توان تولید ناخالص سیستم پیشنهادی 2437 kW و مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی 102 kW می باشد. توان تولیدی خالص نیز پس از کاستن توان مصرفی واحدهای کمکی 2335 kW می باشد.
- راندمان های انرژی خالص و ناخالص سیستم به ترتیب 55/73 و 49/7 درصد می باشند.
- برای سیستم پیشنهادی، راندمان واحدهای پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز و چرخه آلی رانکین به ترتیب 50/17، 44/75 و 23/94 درصد می باشند.
- آنالیز انرژی نشان می دهد که بیشترین تخریب انرژی در گازی ساز (با 1073 kW یا 46٪ تخریب انرژی) روی می دهد.
- سیستم پیشنهادی با تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا دارای راندمان انرژی و انرژی (به ترتیب 55/73 و 49/7 درصد) بیشتری نسبت به مقادیر مشابه در سیستم تصفیه گاز دما پایین (به ترتیب 50/17 و 44/75 درصد) می باشد.

جدول ۵- عملکرد انرژی سیستم پیشنهادی

واحد	مقدار	پارامتر
kW	4698	انرژی ورودی به سیستم
kW	1607	توان AC تولیدی پیل سوختی*
kW	606	توان تولیدی ژنراتور
kW	223	توان تولیدی چرخه ORC
kW	102	مجموع توان مصرفی واحدهای کمکی
kW	2437	توان تولیدی ناخالص سیستم
kW	2335	توان تولیدی خالص سیستم**
%	51.87	راندمان انرژی ناخالص سیستم
%	49.7	راندمان انرژی خالص سیستم

\*توان AC پیل سوختی برابر ضرب راندمان تبدیل اینورتر در توان DC می باشد.



شکل ۳- تلفات انرژی در سیستم پیشنهادی

در پایان نیز مقایسه ای بین تکنولوژی های مختلف تصفیه گاز (تکنولوژی تصفیه گاز پایین و تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا) انجام گرفته است نتایج این مقایسه در جدول ۶ آورده شده است. همانطور که از این جدول مشاهده می شود توان تولیدی پیل سوختی در سیستم تصفیه گاز دما پایین بیشتر از سیستم تصفیه گاز دما بالا می باشد. علت این امر این است که در سیستم تصفیه گاز دما پایین بخار آب موجود در گاز سنتز خروجی از گازی ساز در واحد تصفیه و توسط دستگاه اسکرابر زوده می شود (طی این مرحله محتوای آب موجود در گاز سنتز از 9 mol% به 5 mol% کاهش می یابد) و لذا توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد بدلیل ارزش گرمای بالای گاز سنتز ورودی به پیل سوختی بیشتر می باشد. این در حالی است که توان تولیدی ژنراتور توربین گاز سیستم تصفیه گاز دما بالا به دلیل بالا بودن دبی عبوری از توربین گاز (بدلیل عدم حذف بخار موجود در گاز سنتز در واحد تصفیه گاز دما بالا) توان بیشتری را تولید می کند (606 kW در مقابل 504 kW).

همانطور که از این جدول مشاهده می شود توان تولیدی چرخه آلی رانکین در سیستم تصفیه گاز دما بالا بدلیل باز یافت گرمای موجود در گاز سنتز خروجی از گازی ساز بیشتر از توان تولیدی در سیستم تصفیه گاز دما پایین می باشد (223 kW در مقابل 54 kW). توان تولیدی خالص و ناخالص سیستم دارای تکنولوژی تصفیه گاز دما بالا

۶- نمادها

نسبت 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 ( $\Omega\ m^2$ )	$R_{eq}$
ارش گرمای پایین سوخت ( $MJ\ kg^{-1}$ )	LHV

۷- مراجع

- [1] McKendry P., Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, *Bioresour Technol*, Vol. 83, No. 1, pp. 47-54, 2002.
- [2] Alderucci V., Antonucci P.L., Maggio G., Giordano N., Antonucci V., Thermodynamic analysis of SOFC fuelled by biomass-derived gas, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 19, No. 4, pp. 369-76, 1994.
- [3] Hutton P.N., Musich M.A., Patel N., Schmidt D.D, Timpe R.C., Feasibility study of a thermally integrated SOFC-gasification system for biomass power generation, Phase 1 Interim report, DE-FC26-98FT40321, 2003.
- [4] Fryda L., Panopoulos K.D, Karl J., Kakaras E., Exergetic analysis of solid oxide fuel cell and biomass gasification integration with heat pipes, *Energy*, Vol. 33, No. 2, pp. 292-9, 2008.
- [5] Nagel F.P., Schildhauer T.J., McCaughey N., Biollaz S.M.A., Biomass-integrated gasification fuel cell systems e part 2: economic analysis, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 16, pp. 6826-44, 2009.
- [6] 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.
- [7] Gholamian E., Zare V., Mousavi 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.
- [8] Cycle-Tempo 5.0, TU Delft, 2006, [www.cycle-tempo.nl](http://www.cycle-tempo.nl).
- [9] Aravind P.V., Woudstra T., N. Woudstra H., Spliethoff, 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.
- [10] Toonssen R., Sollai S., Aravind P.V., Woudstra N., Verkooijen A.H.M., Alternative system designs of biomass gasification SOFC/GT hybrid systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 10414-25, 2011.
- [11] 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.
- [12] Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd. [www.ankurscientific.com/range.htm#wbg](http://www.ankurscientific.com/range.htm#wbg), 2011.
- [13] Singhal S.C., Kendall K., High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design, and applicatons, Elsevier Science, 2003.
- [14] Williams M.C., Strakey J.P., Singhal S.C., U.S. distributed generation fuel cell program, *Journal of Power Sources*, Vol. 131, No. 1-2, pp. 79-85, 2004.