

تحلیل انرژی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم تولید سه گانه بر پایه پیل سوختی اکسید جامد به همراه گاز سازی

مر تضاوی مرتضایی
دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
مصطفی رحیمی*
دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این مقاله یک سیستم ترکیبی به منظور تولید توان، گرما و سرما با استفاده از سوخت زیست توده، بر پایه ی پیل سوختی اکسید جامد پیشنهاد شده و تحلیل کامل ترمودینامیکی و انرژی و نیز بررسی اثرات زیست محیطی انجام گرفته است. با استفاده از نرم افزار EES (حل گر معادلات مهندسی) سیستم ترکیبی جهت تعیین بازگشت ناپذیری ها در اجزا مختلف، به منظور تعیین نقاط ضعف سیستم، تحلیل انرژی می شود. همچنین معادلات موازنه اقتصادی به منظور یافتن هزینه محصول نوشته می شود. در این راستا به اثرات زیست محیطی سیستم توجه شده و این پارامتر برای سه حالت متفاوت بر اساس چرخه های سازنده ی سیستم ترکیبی محاسبه می شود. برای درک بهتر کارکرد سیستم تاثیر تغییر متغیرهای طراحی تاثیر گذار سیستم بر روی توان تولیدی و بازده قانون دوم ترمودینامیک بررسی می شود. نتایج نشان می دهد که افزایش اختلاف دمای سلول پیل سوختی به میزان ۷۵ درجه سلسیوس باعث ۹۹/۸٪ افزایش بازده انرژی و ۴۷/۱۷٪ افزایش بازده انرژی می شود. همچنین تولید توان سیستم نسبت به چگالی جریان و فاکتور مصرف سوخت دارای مقادیر بهینه می باشد. نتایج همچنین حاکی از این است که سیستم ترکیبی نسبت به سیستم تولید توان تنها دارای ۰۴/۱۲٪ بازده قانون دوم بیشتر و ۳۴/۶۲٪ تولید کربن دی اکسید کمتر می باشد. نتایج معرف این مهم نیز هست که هزینه واحد محصول توان ۷۶/۱۵ دلار بر گیگاژول می باشد.

واژه های کلیدی: انرژی اقتصادی، زیست محیطی، تولید سه گانه، پیل سوختی، گاز سازی.

Exergy, Economic, and Environmental Analysis of a Trigeneration System Based on a Solid oxide Fuel Cell and Gasifier

M. Mortazaei
M. Rahimi

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

Abstract

A new combined system based on a biomass gasifier, SOFC and single effect Li-Br refrigeration cycle for generation of power, heating and cooling is proposed and assessed thermodynamically. With the aid of the Engineering Equation Solver software (EES) Exergy analysis is conducted to determine the irreversibilities in system components. In addition, an environmental impact assessment is performed for each of the three cases in combined system based on each cycle of the proposed system. Also an economic analysis to find unit product cost is carried out. To understand the system performance more comprehensively, a parametric study is performed to investigate the effect of several important design parameters on the net power output as well as exergy efficiency of the system. The results demonstrate that an increase of 75°C in stack temperature difference results in 8.99% and 17.47% increases for the exergy and energy efficiencies, respectively. Also net power output is maximized at certain values of current density and fuel utilization factor. In addition, compared to the SOFC system (power generation system alone), the exergy efficiency of the combined system is 12.04% higher and the CO₂ emission of the combined system is 62.34% lower. Results demonstrate that power unit product cost becomes 15.76 \$/GJ.

Keywords: Exergeonomic, environmental impact, trigeneration, fuel cell, gasification.

حمل و نقل را نمایان می کند. مهم ترین منبع انرژی مورد استفاده به همین منظور انرژی فسیلی می باشد که سوزاندن آن باعث تولید مقادیر زیاد کربن دی اکسید می شود. به همین منظور استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک نظیر: انرژی خورشیدی، باد، زمین

۱- مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت و پیشرفت اقتصادی و تکنولوژی، افزایش نیاز به تولید برق، گرمایش، سرمایش و کارمورد نیاز برای

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

بهینه برای گاز های خروجی از آند که در آن بازده سیستم بهینه می- شود وجود دارد.

جیا و همکاران [۱۲] سیستم ترکیبی پیل سوختی با سوخت چوب و گاز عامل های متفاوت گاز سازی را بررسی کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین تخریب انرژی در گازساز رخ می دهد در حالی که اگر عامل گاز سازی بخار باشد بیشترین تخریب انرژی در مبادله کن گرمایی هوا رخ می دهد.

در تحقیق دیگری کارتا و همکاران [۱۳] پیل سوختی در مقیاس کوچک را برای مصارف خانگی بررسی کردند. گازساز مورد استفاده از نوع پایین سو بود چرا که این نوع گاز ساز صنعتی سازی شده و دارای مقدار کمی قیر بوده و دارای فرآیند پاک سازی گاز آسان تری می- باشد. بازده این سیستم در ترکیب با توربین گاز ۴۳.۴٪ گزارش شده است.

جیراردو و همکاران [۱۴] گزینه های بازیافت گرما از پیل سوختی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ۳۵ کیلو وات از گرما می تواند در چرخه ORC تولید توان انجام دهد. همچنین بازده کل از ۴۴٪ به ۴۹٪ افزایش یافت.

همچنین در سالیان اخیر مطالعات زیادی در زمینه بررسی بازیافت گرمایی از چرخه ها با استفاده از چرخه های تبرید جذبی شده است [۱۵].

قمری [۱۶] عملکرد چرخه های تبرید جذبی یک اثره و چند اثره را بررسی کرد و دریافت که ضریب عملکرد سیستم تک اثره در مقایسه با پیچیدگی و اقتصادی بودن آن بهتر است و مقرون به صرفه است که در بازیافت گرمایی سیستم های متداول تولید توان مورد استفاده قرار گیرد.

احمدی و همکاران [۱] یک سیستم تولید چندگانه بر مبنای گازساز پایین سو و چرخه تبرید جذبی تک اثره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها شامل بررسی پارامترهای موثر و گزارش نحوه تغییرات گسیل کربن دی اکسید به محیط بود.

با این حال علی رغم تحقیقات فراوان در زمینه پیل های سوختی و گازسازی، بررسی تحقیقی که شامل تحلیل انرژی و زیست محیطی سیستمی باشد که زیست توده را به گاز سنتزی تبدیل کرده و در پیل سوختی مورد استفاده قرار می دهد ضروری می نماید.

در کار حاضر یک سیستم تولید سه گانه بر مبنای گازساز و پیل سوختی معرفی شده و به طور کامل از لحاظ ترمودینامیکی و زیست محیطی بررسی می شود. تاثیر پارامترهای تصمیم موثر مانند چگالی جریان، ضریب مصرف سوخت و اختلاف دمای استک پیل سوختی در عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین اثرات زیست محیطی برای سه حالت متفاوت تولید توان، تولید توان و گرما تولید سه گانه محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شده اند. هدف اصلی این مقاله مدل سازی ترمودینامیکی و تحلیل انرژی سیستم پیشنهادی می باشد. به همین منظور مراحل زیر در طی مقاله انجام شده است:

- مدل سازی سیستم پیشنهادی
- تحلیل انرژی و زیست محیطی سیستم و محاسبه نابودی انرژی در اجرا سیستم

گرمایی، زیست توده و... مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا زیست توده به عنوان یک ماده بیولوژیکی به عنوان سوخت جایگزین استفاده شده است [۱].

تجدیدپذیری و قابلیت انتشار کربن دی اکسید پایین از مهمترین ویژگی های سوخت های زیست توده مانند: چوب، خاکاره، فضولات شهری و... می باشد [۲].

گازسازی زیست توده یکی از موثرترین روش ها در تبدیل سوخت های جامد به سوخت های قابل استفاده است که در این راستا روش های متعدد و اقتصادی فراوان برای تولید برق از انرژی زیست- توده پیشنهاد شده است [۳].

انرژی زیست توده را می توان از دو طریق احتراق مستقیم و یا گازسازی و احتراق در محفظه احتراق ثانویه مورد استفاده قرار داد که در مقیاس های تولید توان در چرخه های ترکیبی بزرگ، می توان از گازسازی زیست توده بهره جست [۴]. اگرچه تحقیقات زیادی در مورد آرایش های گوناگون چرخه های ترکیبی با استفاده از انرژی زیست توده انجام گرفته، ولی نیاز به بررسی روش های نوین تولید توان با تمرکز بر روی تحلیل ترمودینامیکی چرخه ها از دید قانون دوم ترمودینامیک ضروری می نماید [۵].

همچنین پیشرفت های اخیر در زمینه تولید الکتریسیته توسط پیل های سوختی توجه محققین و کارشناسان را به آن سمت جلب کرده است چرا که خروجی آن قابلیت استفاده در سیستم تولید همزمان توان و گرما را داراست [۶].

سینگ و همکاران [۷] انتشار کربن دی اکسید در یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت زیست توده را بررسی کردند. نتایج نشان گر این مهم بود که انتشار کربن دی اکسید با افزایش درصد آب خروجی و تغییرات شرایط سوخت به صفر زدیک تر می شد.

آتناسیو [۸] و همکاران ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و گازسازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بازده الکتریکی این سیستم در مقایسه با سیستم گازسازی و توربین گاز دارای بازده الکتریکی بیشتر به میزان ۶۸٪ می باشد.

پیل سوختی با ریفرم داخلی با سوخت گاز سنتزی توسط کاپلان و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان گر این مهم بود که نسبت گردش گاز داخلی در چگالی جریان پایین تاثیر به سزایی ندارد اما در چگالی جریان بالا، بالا بردن نسبت گردش^۱ بازده پیل سوختی کاهش می یابد.

جنگ و همکاران [۱۰] تبدیل انرژی مستقیم از ضایعات دانه قهوه را در پیل سوختی بررسی نمودند. سیستم مورد بررسی آنها به ریفرم خارجی نیاز نداشت، نتایج آنها نشان داد که نوع زیست توده در کارایی پیل سوختی تاثیر به سزایی دارد. همچنین در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس بازده بیشینه برای دانه های قهوه دو برابر بازده بیشینه کربن سیاه است.

لرنزو و همکاران [۱۱] یک پیل سوختی با سوخت گاز سنتزی را مورد بررسی قرار دادند، نتایج آنها نشان داد که یک نسبت گردش

^۱ Recycle Ratio

$0.7 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$	نسبت پخش موثر گاز در آند
$0.105 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$	نسبت پخش موثر گاز در کاتد
$0.105 \times 10^{-2} \text{ (m)}$	ضخامت آند
$0.105 \times 10^{-2} \text{ (m)}$	ضخامت کاتد
$0.101 \times 10^{-2} \text{ (m)}$	ضخامت الکترولیت
$0.7 \times 10^{-2} \text{ (m)}$	ضخامت قسمت اتصال
85 (%)	بازده آیزنتروپیک کمپرسور سوخت
85 (%)	بازده آیزنتروپیک کمپرسور هوا
85 (%)	بازده آیزنتروپیک پمپ
11,000 (-)	تعداد سلول
99 (%)	بازده آیزنتروپیک پس سوز
2 (%)	افت فشار استک
3 (%)	افت فشار مبادله کن بازیاب گرمایی
5 (%)	افت فشار پس سوز
875 (K)	دمای خروجی گاز ساز
353 (K)	دمای ژنراتور
279 (K)	دمای تبخیر کن

*ضریب مصرف سوخت بدون واحد میباشد.

علاوه بر فرضیات نشان داده شده در جدول ۱ فرضیات دیگر شامل موارد زیر می‌باشد:

- تمامی اجزای دستگاه در حالات پایا کار می‌کنند.
- هوا و محصولات احتراق ترکیبی از گازهای ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند
- تحلیل در شرایط تعادل شیمیایی برای واکنش‌های تعادلی انجام گرفته است
- مقاومت تماسی در پیل سوختی قابل چشم پوشی است
- گازهای خروجی از پس سوز کامل اکسید شده اند
- پیل سوختی کاملاً عایق است
- از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم پوشی شده است

۳- مدل سازی و تحلیل

مدل سازی سیستم پیشنهادی متشکل از مدل سازی ۳ بخش می‌باشد: گاز ساز پایین‌سو، پیل سوختی اکسید جامد، و سایر اجزای سیستم مانند چرخه تبرید جذبی لیتیوم بروماید آب تک اثره. در کار حاضر بازده انرژی سیستم و تخریب انرژی اجزا و همچنین اثرات زیست محیطی سیستم ترکیبی بررسی شده‌اند. جزئیات تحلیل در بخش‌های زیر بحث شده‌اند.

۳-۱- تحلیل قانون اول ترمودینامیک

۳-۱-۱- گاز ساز پایین سو

برای مدل سازی گازساز از روش ثابت‌های تعادلی استفاده شده است. در این روش فرض می‌شود که تمامی واکنش‌ها در حالت تعادل

- بررسی تاثیر متغیرهای مهم بر عملکرد سیستم
- بررسی اثرات زیست محیطی برای سه حالت: تولید توان، توان و گرما، توان گرما و سرما.

۲- معرفی سیستم و فرضیات

شکل ۱ نمای سیستم ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد. چوب به عنوان زیست توده و هوا به عنوان عامل گاز سازی انتخاب شده‌است و گازهای تولیدی در گازساز پایین سو پس از عبور از واحد اختلاط آند وارد آند پیل سوختی می‌شوند. از طرفی هوای فشرده شده از طریق گازهای احتراق خروجی از پس سوز پیش گرم شده و پس از عبور از واحد اختلاط کاتد، وارد کاتد پیل سوختی می‌شود. هوا و سوخت ورودی طی واکنش‌های الکتروشیمیایی رخ داده در پیل سوختی توان الکتریکی تولید می‌کنند. سوخت ورودی در ریفرمر داخلی تغییر شکل یافته و به هیدروژن مورد استفاده در واکنش کلی پیل سوختی تبدیل می‌شود.

در خروجی استک پیل سوختی مقداری هیدروژن و کربن واکنش نداده با دمای بسیار بالا وجود دارند که قابلیت احتراق در پس سوز با هوای خروجی از کاتد را دارند.

مقداری از این گازها برای اختلاط به محفظه اختلاط جهت بالا بردن دما و تامین آب ورودی به مجموعه پیل سوختی گردش داده می‌شود و مقدار دیگر وارد پس سوز شده و محترق می‌شوند.

گاز های احتراق با دمای بالا وارد مبادله کن گرمایی هوا جهت بالا بردن دمای هوا شده و پس از آن جهت تامین آب داغ وارد مبادله کن گرمایی تولید آب داغ می‌شوند. گاز های احتراق در خروج از مبدل تولید آب داغ وارد ژنراتور چرخه تبرید جذبی جهت تولید سرما می‌شوند.

در ژنراتور گاز های حاصل از احتراق گرمای خود را به محلول نمک لیتیوم بروماید آب داده و بخار آب اشباع از ژنراتور وارد چگالنده می‌شود.

آب چگالنده شده جهت تولید برودت از شیر فشار شکن رد شده و وارد تبخیرکن می‌شود. مبرد پس از عبور از تبخیرکن وارد جاذب شده و در آنجا با محلول نمک غلیظ مخلوط شده و محلول ضعیف توسط پمپ دوباره به ژنراتور فرستاده می‌شود.

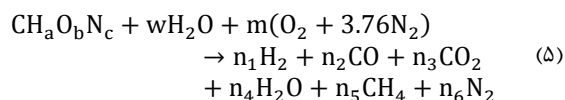
جدول ۱ فرضیات به کار رفته در مدل سازی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- فرضیات به کار رفته در مدل سازی [۲۰-۱۷]

اختلاف دمای دو طرف سلول پیل سوختی	100 (K)
ضریب مصرف سوخت	0.185 (-)*
مساحت سطح فعال	0.1 (m ²)
چگالی جریان	6000 (Am ²)
بازده اینورتر	97 (%)
دمای سلول پیل سوختی	1000 (K)
چگالی جریان تبدیلی آند	6500 (Am ²)
چگالی جریان تبدیلی کاتد	2500 (Am ²)



معادله کلی گازسازی را می‌توان به صورت معادله (۵) نوشت:

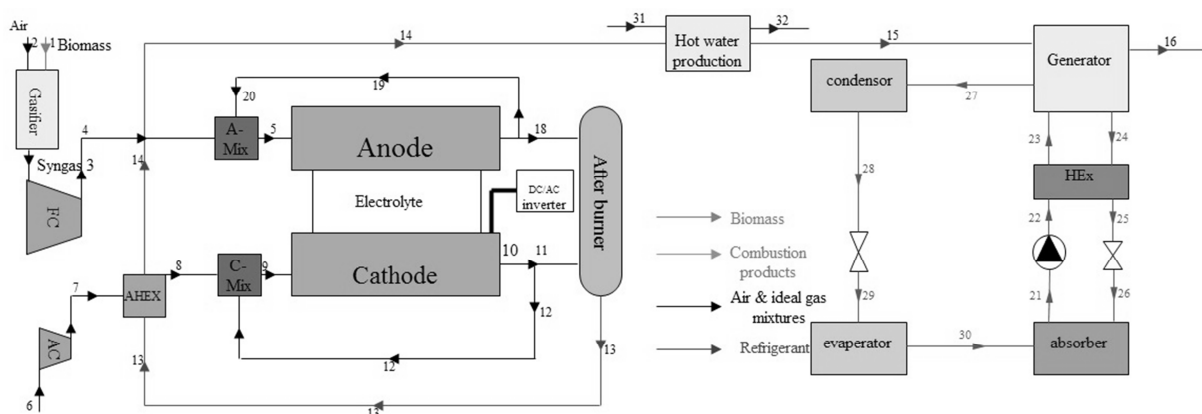


که در آن $CH_aO_bN_c$ معرف زیست‌توده، w معرف درصد رطوبت موجود در زیست توده و m تعداد کیلومول‌های اکسیژن به ازای هر کیلومول زیست‌توده می‌باشد. m همچنین معرف نسبت هوا به سوخت در رابطه (۵) می‌باشد و به ازای دمای گازسازی معلوم دارای مقدار معینی است. ضرایب n_1 تا n_6 را می‌توان از موازنه جرمی واکنش رابطه (۵) یافت.

ترمودینامیکی بوده و محصولات پیرولیز شده قبل از ترک گازساز، در منطقه کاهش، به تعادل ترمودینامیکی می‌رسند. واکنش‌های منطقه کاهش گازساز پایین سو به صورت معادلات (۱) و (۲) و (۳) است: [۲۱]



با ترکیب معادلات (۱) و (۲) معادله (۴) به دست می‌آید که به معادله گاز-آب یا شیفت معروف است:



شکل ۱- طرحواره سیستم ترکیبی معرفی شد

$$K_2 = \frac{n_1 n_3}{n_2 n_4} \left(\frac{P/P_{ref}}{n_{tot}} \right)^0 \quad (9)$$

که در روابط (۸) و (۹) ثابت‌های تعادلی را می‌توان از تغییر تابع گیبس برای واکنش‌ها، مطابق معادلات (۱۰) و (۱۱) به دست آورد: [۱۸]

$$\frac{-\Delta G_1^0}{RT_g} = \ln K_1 \quad (10)$$

$$\frac{-\Delta G_2^0}{RT_g} = \ln K_2 \quad (11)$$

که تغییر تابع گیبس در معادلات (۱۰) و (۱۱) را می‌توان به ترتیب از معادلات (۱۲) و (۱۳) یافت:

$$-\Delta G_1^0 = (\bar{h}_{CH_4} - T_g \bar{s}_{CH_4}^0) - 2(\bar{h}_{H_2} - T_g \bar{s}_{H_2}^0) \quad (12)$$

بر اساس تحلیل نهایی چوب (به عنوان زیست‌توده) که در جدول ۲ آورده شده است و با توجه به فرمول شیمیایی چوب با یک اتم کربن: $CH_{1.44}O_{0.66}$ ، درصد رطوبت موجود در زیست توده به صورت رابطه (۶) است:

$$w = \frac{M_{biomass} MC}{18(1 - MC)} \quad (6)$$

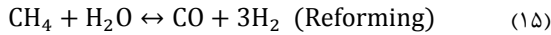
که در آن MC از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$MC = 100 \times (\text{جرم زیست‌توده مرطوب/جرم آب}) \quad (7)$$

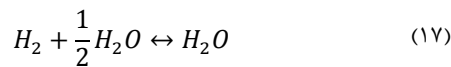
با در نظر داشتن معادله کلی گازسازی ثابت‌های تعادلی واکنش تشکیل متان و واکنش گاز-آب را می‌توان به صورت معادلات (۸) و (۹) نوشت [۱۸]:

$$K_1 = \frac{n_5}{n_1^2} \left(\frac{P/P_{ref}}{n_{tot}} \right)^{-1} \quad (8)$$

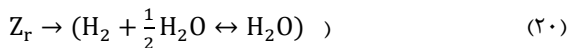
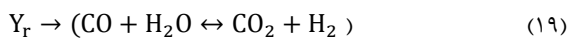
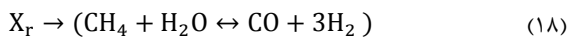
پیل سوختی را به سیستم خنک کنندگی کاهش می‌دهد. معادلات شیمیایی درون پیل سوختی به شکل معادلات (۱۵) و (۱۶) می‌باشند [۲۳]:



واکنش (۱۵) واکنش ریفرم و واکنش (۱۶) واکنش شیفت است. کربن مونو اکسید در واکنش ریفرم، با آبی که در گاز های گردشی وجود دارد واکنش می‌دهد. هیدروژن تولیدی از واکنش شیفت در واکنش (۱۷) که واکنش الکتروشیمیایی است شرکت می‌کند:



نرخ واکنش برای معادلات ریفرم، شیفت و واکنش الکترو شیمیایی به ترتیب X_r ، Y_r و Z_r است. به این ترتیب نرخ مصرف و تولید اجزا طبق معادلات (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) به دست می‌آید:



که در معادله (۲۰)، Z_r به کمک دانسیته جریان و قانون فارادی و سطح موثر پیل از طریق معادله (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$Z_r = \frac{j \cdot N_{FC} A_a}{2 \cdot F} \quad (21)$$

با اعمال معادلات موازنه جرمی و موازنه انرژی برای پیل سوختی و واحد های اختلاط به همراه معادلات (۱۸) تا (۲۱) ترکیب گازهای خروجی از پیل سوختی را می‌توان یافت. به منظور حل سیستم معادلات، سه معادله دیگر مورد نیاز است. با نگاه به معادلات تعادلی ثابت های تعادلی معادلات شیفت و ریفرم را می‌توان به ترتیب به صورت معادلات (۲۲) و (۲۳) نوشت:

$$\frac{-\Delta g_s^0}{RT_{FC,e}} = \text{Ln} K_s = \text{Ln} \left(\frac{(\dot{n}_{\text{CO}_2,17}) \cdot (\dot{n}_{\text{H}_2,17})}{(\dot{n}_{\text{CO},17}) \cdot (\dot{n}_{\text{H}_2\text{O},17})} \right) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{-\Delta g_R^0}{RT_{FC,e}} &= \text{Ln} K_R \\ &= \text{Ln} \left(\frac{(\dot{n}_{\text{CO},17}) \cdot (\dot{n}_{\text{H}_2,17})}{(\dot{n}_{\text{CH}_4,17}) \cdot (\dot{n}_{\text{H}_2\text{O},17})} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} -\Delta G_2^0 &= (\bar{h}_{\text{CO}_2} - T_g \bar{s}_{\text{CO}_2}^0) - 2(\bar{h}_{\text{H}_2} - T_g \bar{s}_{\text{H}_2}^0) \\ &\quad - (\bar{h}_{\text{CO}} - T_g \bar{s}_{\text{CO}}^0) - 2(\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - T_g \bar{s}_{\text{H}_2\text{O}}^0) \end{aligned} \quad (13)$$

با فرض دمای گازسازی برابر ۸۰۰ درجه سلسیوس و گازساز آدیاباتیک می‌توان معادله موازنه انرژی برای گاز ساز را به صورت معادله ۱۴ نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{f-\text{wood}}^0 + w \times \bar{h}_{f-\text{H}_2\text{O}}^0 + n_{\text{air},6} \times \bar{h}_{\text{air},6} \\ = n_1 (\bar{h}_{f-\text{H}_2}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{H}_2}) \\ + n_2 (\bar{h}_{f-\text{CO}}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{CO}}) \\ + n_3 (\bar{h}_{f-\text{CO}_2}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{CO}_2}) \\ + n_4 (\bar{h}_{f-\text{H}_2\text{O}}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) \\ + n_5 (\bar{h}_{f-\text{CH}_4}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{CH}_4}) \\ + n_6 (\bar{h}_{f-\text{N}_2}^0 + \Delta \bar{h}_{\text{N}_2}) \end{aligned} \quad (14)$$

به منظور بررسی صحت مدل سازی، نتایج گازسازی کار حاضر با نتایج موجود در ادبیات فن (به ازای رطوبت ۲۰٪ و دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس) در جدول ۳ مقایسه شده است. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که مجموع مقدار گاز هیدروژن و مونواکسیدکربن که نقش مهمی در ارزش گرمایی گاز تولیدی دارد در مدل حاضر ۴۱/۰۸٪ است که تطابق خوبی با نتایج تجربی ۳۸/۲۷٪ دارد. همچنین این نتایج با نتایج تحلیلی زاینال هم خوانی خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۲- تحلیل نهایی زیست توده [۱۹]

زیست- توده	CH	H	O	N	S	Ash	HHV(Kj/Kmol)
چوب	۵۰	۴۴	۶	۰	۰	۰	۴۴۹۵۶۸

جدول ۳- نتایج کار حاضر و نتایج تجربی و تحلیلی در دمای گازسازی ۸۰۰ درجه سلسیوس و درصد رطوبت ۲۰٪

ترکیبات	مدل حاضر	نتایج تجربی [۱۷]	نتایج تحلیلی [۱۷]
هیدروژن	۲۱/۰۶	۱۵/۲۳	۲۱/۰۶
مونواکسیدکربن	۲۰/۴۸	۲۳/۰۴	۱۹/۶۱
متان	۱/۰۳	۱/۵۸	۰/۶۴
دی اکسیدکربن	۱۲/۴۰	۱۶/۴۲	۱۲/۰۱
نیتروژن	۴۴/۴۸	۴۲/۳۱	۴۶/۶۸
اکسیژن	۰	۱/۴۲	۰

۳-۱-۲- پیل سوختی اکسید جامد

موازنه انرژی و مولی برای پیل سوختی با گردش گاز های آند و کاتد در کار حاضر بررسی شده است. از آنجایی که ریفرمر خارجی گران قیمت می‌باشد [۲۲] و گاز سنتزی دارای مقدار زیادی هیدروژن است و دارای مقدار کمی متان و کربن مونو اکسید است، از ریفرمر داخلی استفاده شده است. استفاده از ریفرمر داخلی همچنان وابستگی

با توجه به تعاریف فوق می‌توان بازده قانون اول سیستم را به شکل معادله (۳۱) تعریف کرد:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{cooling}}{\dot{m}_{biomass} LHV_{biomass}} \quad (31)$$

که در آن توان خالص از معادله (۳۲) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC,stack,ac} - \dot{W}_{Ac} - \dot{W}_{Fc} - \dot{W}_p \quad (32)$$

۳-۲- تحلیل قانون دوم ترمودینامیک

تحلیل سیستم های ترمودینامیکی از دید انرژی کمک شایانی به درک بهتر و ارائه روش‌های بهینه در سیستم‌های تبدیل انرژی از قبیل تولیدتوان، توان-گرما و توان-گرما- سرما می‌نماید. انرژی کل دارای چهار بخش: فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل می‌باشد. برای فرآیند های سیستم حاضر از انرژی جنبشی و پتانسیل به دلیل ناچیز بودن تغییرات سرعت و ارتفاع چشم پوشی می‌شود. بنابراین انرژی ویژه برای هر جریان را مطابق معادله (۳۳) می‌توان تعریف کرد:

$$e = e_{ph} + e_{ch} \quad (33)$$

که انرژی فیزیکی هر جریان از معادله (۳۴) بدست می‌آید [۲۲]:

$$e_{ph,i} = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0) \quad (34)$$

همچنین انرژی شیمیایی سوخت زیست‌توده جامد به شکل معادله (۳۵) می‌باشد [۲۴]:

$$e_{biomass}^{ch} = \beta LHV_{biomass} \quad (35)$$

ضریب بتا در معادله (۳۵) معرف نسبت انرژی شیمیایی زیست-توده به ارزش گرمایی پایین آن می‌باشد [۲۵]. رابطه‌ای برای بتا توسط سارگات و همکاران مطابق معادله (۳۶) ارائه شده است [۲۴]:

$$\beta = \frac{1.044 + 0.16 \frac{Z_H}{Z_C} - 0.34493 \frac{Z_O}{Z_C} (1 + 0.0531 \frac{Z}{Z^2})}{1 - 0.4142 \frac{Z_O}{Z_C}} \quad (36)$$

که در آن Z_O و Z_C ، Z_H به ترتیب معرف نسبت‌های جرمی هیدروژن، کربن و اکسیژن می‌باشند. همچنین انرژی شیمیایی مخلوط گازهای ایده‌آل به صورت معادله (۳۷) است [۲۶]:

که در آن R ثابت جهانی گاز ها می‌باشد و $\Delta \bar{g}$ تغییرات تابع گیبس در واکنش شیفیت و ریفرم می‌باشد [۲۲].

آخرین معادله برای تکمیل سیستم معادلات با نوشتن موازنه انرژی برای کل پیل سوختی به دست می‌آید. با صرف نظر از اتلاف انرژی گرمایی از پیل سوختی موازنه انرژی به صورت معادله (۲۴) نوشته می‌شود:

$$\dot{W}_{FC,stack} = \sum \dot{n}_{k,17} \bar{h}_{k,17} + \sum \dot{n}_{1,10} \bar{h}_{1,10} - \sum \dot{n}_{m,9} \bar{h}_{m,9} - \sum \dot{n}_{n,5} \bar{h}_{n,5} \quad (24)$$

که در آن L و k و m و n ترکیبات گازهای خروجی را در حالت های ورودی و خروجی نشان می‌دهند. تز طرف دیگر نرخ کار تولیدی توسط پیل سوختی از رابطه (۲۵) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{FC,stack} = j \cdot N_{FC} \cdot A_a \cdot V_c \quad (25)$$

که در آن ولتاژ سلول از رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$V_c = V_N - V_{loss} \quad (26)$$

که در آن V_N ولتاژ نرنست و V_{loss} افت ولتاژ است که از جمع سه نوع افت ولتاژ اهمیت، فعال سازی و غلظتی مانند معادله (۲۷) بدست می‌آید:

$$V_{loss} = V_{ohm} + V_{act} + V_{conc} \quad (27)$$

با توجه دیگر در معادلات ولتاژ و افت ولتاژ معلوم است که ولتاژ به شدت به نسبت مولی، فشار، دمای پیل و نوع الکترولیت وابسته است.

۳-۱-۳- سایر اجزای سیستم

معادلات موازنه جرمی و بالانس انرژی برای سایر اجزای سیستم شامل: کمپرسور سوخت، کمپرسور هوا، مبادله کن های گرما، پمپ، شیر فشارشکن، ژنراتور، جاذب، چگالنده، تبخیرکن و پمپ از طریق معادلات (۲۸) و (۲۹) به دست می‌آیند:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (28)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (29)$$

همچنین برای اجزای سیستم تبرید جذبی میتوان معادله موازنه غلظت را نیز مانند معادله (۳۰) نوشت:

$$\sum x \dot{m}_{in} = \sum x \dot{m}_{out} \quad (30)$$

۳-۴- تحلیل اقتصادی

به منظور بررسی کامل یک سیستم بررسی از دیدگاه اقتصادی ضروری مینماید. بررسی اقتصادی اولین بار توسط تسارونیس برای سیستم‌های ترمودینامیکی معرفی گردید [۲۸]. هدف تحلیل اقتصادی مشخص کردن هزینه واحد محصول و هزینه هر جریان بر حسب تحلیل اقتصادی است [۲۶]. برای یک سیستم ترمودینامیکی که انرژی گرمایی را دریافت کرده و توان تولید می‌کند معادله موازنه هزینه به صورت زیر است:

$$\sum \dot{C}_{out,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum \dot{C}_{in,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_{k,PY} \quad (44)$$

که در آن معادله (۴۵) را داریم:

$$\dot{C} = c \cdot E\dot{x} \quad (45)$$

که C در آن هزینه واحد محصول است.

در معادله (۴۴) $\dot{Z}_{k,PY}$ هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگه داری است که در سال مرجع محاسبه می‌شود. نحوه محاسبه هزینه واحد محصول با کمک معادلات زیر و مرجع کتاب بیژن قابل محاسبه است [۲۶]:

$$\dot{Z}_k^o = \dot{Z}_k^{o,CI} + \dot{Z}_k^{o,OM} \quad (46)$$

$$\dot{Z}_{k,PY}^o = \dot{Z}_k^o \cdot \frac{CI_{k,PY}}{CI^o} \quad (47)$$

$$\dot{Z}_k^o = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \phi}{N} \quad (48)$$

$$CRF = \frac{i_r (1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (48)$$

که در آن N و ϕ به ترتیب تعداد ساعات کارکرد سیستم در سال بر حسب ساعت و فاکتور نگه داری می باشند [۲۶، ۲۹].

۴- تحلیل قانون دوم ترمودینامیک

در این بخش نتایج مدل سازی ترمودینامیکی، تحلیل انرژی و اثرات زیست محیطی بررسی شده‌اند و تاثیر پارامترهای مهم بر عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴-۱- نتایج مطالعه پارامتری

تغییرات پارامترهای مهم طراحی بر روی عملکرد ترمودینامیکی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل اینکه چگالی جریان، اختلاف دمای سلول پیل سوختی و فاکتور مصرف سوخت به همراه دمای ژنراتور اثرات مهمی در کارکرد سیستم دارند، تمرکز مطالعه پارامتری به این متغیرها معطوف شده است.

چگالی جریان تاثیر کلیدی در عملکرد سیستم دارد. افزایش چگالی جریان باعث کاهش بازده قانون اول و بازده قانون دوم سیستم شده ولی در مورد توان تولیدی این چنین نیست. شکل ۲ نحوه تغییرات بازده قانون اول و قانون دوم سیستم ترکیبی را با تغییرات

$$\beta = e_i^{ch} = \sum_i x_i e_{0,i}^{ch} + \bar{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (37)$$

که در آن X نسبت مولی جز i ام و $e_{0,i}^{ch}$ انرژی شیمیایی استاندارد همان جز می‌باشد [۲۷]. معادله (۳۸) معادله موازنه انرژی برای اجزای سیستم را نشان می‌دهد:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} + \dot{E}_D \quad (38)$$

که در آن $\sum \dot{E}_{in}$ و $\sum \dot{E}_{out}$ به ترتیب معرف مجموع انرژی‌های ورودی و خروجی از حجم کنترل می‌باشند و جمله آخر در سمت راست معادله (۳۸) معرف تخریب انرژی هر جز است.

بازده انرژی سیستم را می‌توان به صورت نسبت توان خالص خروجی به انرژی ورودی به سیستم مطابق معادله (۳۹) محاسبه کرد:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{Heating} + \dot{E}x_{Cooling}}{\dot{E}_{in}} \quad (39)$$

که در آن مخرج معادله معرف انرژی ورودی به سیستم است که به صورت معادله (۴۰) تعریف می‌شود:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{biomass}^{ch} + \dot{E}_{Water}^{ch} + \dot{E}_{Air}^{ch} \quad (40)$$

۳-۳- اثرات زیست محیطی

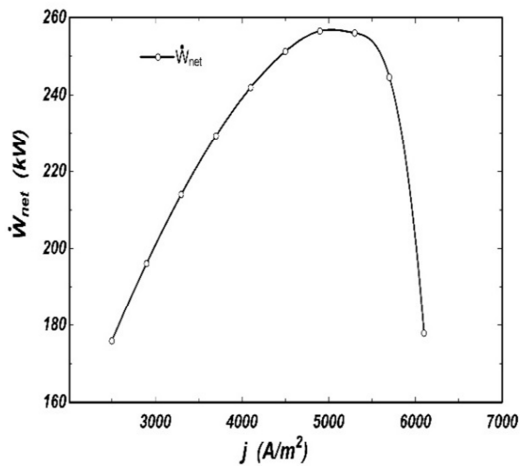
برای بررسی اثرات زیست محیطی سیستم پیشنهادی، مقدار کربن دی‌اکسید تولید شده برای هر چرخه تولید توان به وسیله معادلات (۴۱) و (۴۲) و (۴۳) نشان داده شده‌اند. در حالت اول تولید کربن دی‌اکسید فقط برای توربین گاز، در حالت دوم برای چرخه توربین گاز و کربن دی‌اکسید فرا بحرانی و در نهایت تولید کربن دی‌اکسید برای سیستم ترکیبی پیشنهادی تولید توان، ارائه شده است که در حالات ۱ و ۲ انرژی به ترتیب، بعد از جریان ۹ و ۱۰ به صورت انرژی اتلافی در نظر گرفته می‌شود [۱].

کربن دی‌اکسید تولید شده در هر حالت عبارت است از:

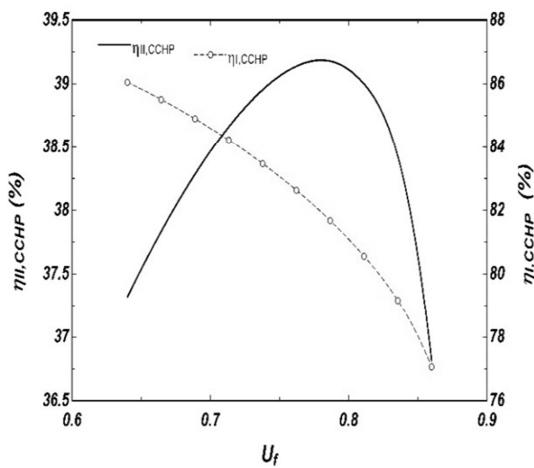
$$\varepsilon_{em,GT} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{W}_{net,SOFC}} \quad (41)$$

$$\varepsilon_{em,GT+S-CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{W}_{net,GT} + \dot{Q}_{heating}} \quad (41)$$

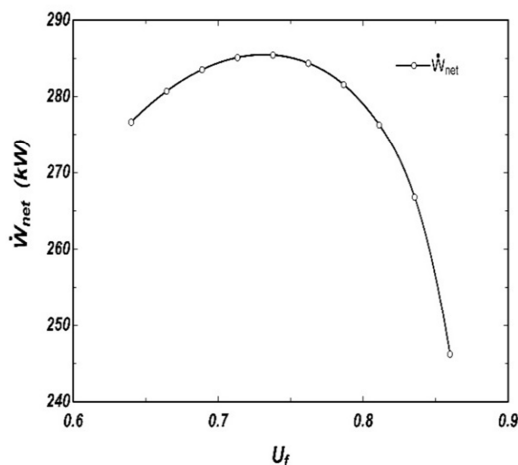
$$\varepsilon_{em,power} = \frac{\dot{m}_{CO_2,emitted}}{\dot{W}_{net,GT} + \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{cooling}} \quad (43)$$



شکل ۳- تغییرات توان خالص تولیدی و چگالی جریان



شکل ۴- تغییرات بازده قانون اول و دوم با فاکتور مصرف سوخت



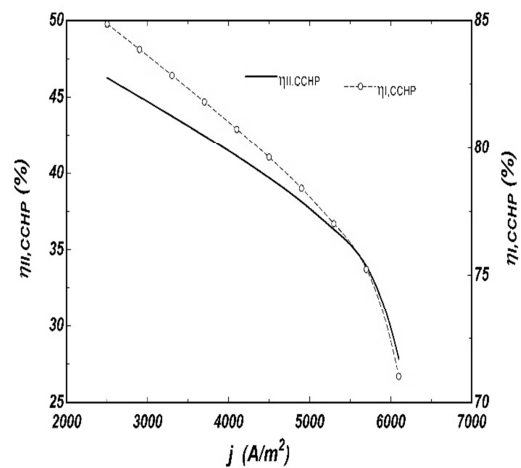
شکل ۵- تغییرات توان خالص خروجی سیستم ترکیبی با تغییرات فاکتور مصرف سوخت

چگالی جریان نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که بازده قانون دوم با افزایش چگالی جریان تا مقدار $(Am^2) 6100$ ، $27/87\%$ کاهش یافته و بعد از آن به صفر میل میکند. همچنین بازده قانون اول نیز کاهش $13/84\%$ را تجربه می‌کند. دلیل کاهش بازده ها به دلیل افزایش دبی سوخت ورودی به سیستم با افزایش چگالی جریان می‌باشد.

نحوه تغییرات توان خالص تولیدی و چگالی جریان در شکل ۳ نشان داده شده اند. با توجه به شکل ۳ با افزایش چگالی جریان توان تولیدی ابتدا به نقطه بهینه خود میرسد و سپس کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه توان تولیدی در چگالی جریان $(Am^2) 5081$ رخ می‌دهد که برابر است با 257.2 کیلو وات.

یکی دیگر از پارامترهای کلیدی و تاثیر گذار در عملکرد سیستم ترکیبی، فاکتور مصرف سوخت این سیستم است که نحوه تاثیر آن در عملکرد سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در محدوده‌ی مورد بررسی برای این فاکتور قانون اول همواره نزولی است و به مقدار $8/99\%$ کاهش می‌یابد ولی بازده قانون دوم به مقدار بیشینه خود در مقدار $78/02$ از فاکتور مصرف سوخت می‌رسد که برابر است با $39/18\%$.

تاثیر فاکتور مصرف سوخت بر روی توان خالص خروجی در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه در شکل ۵ مشاهده می‌شود توان خالص خروجی در فاکتور $73/18$ درصد بهینه شده و به بیشترین مقدار خود که برابر $285/5 kW$ میرسد و سپس سیر نزولی در پیش میگیرد.

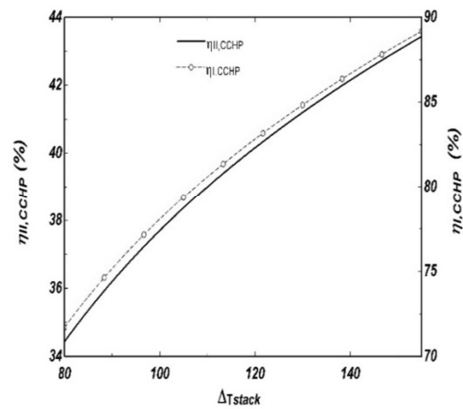


شکل ۲- تغییرات بازده قانون اول و قانون دوم سیستم ترکیبی با تغییرات چگالی جریان

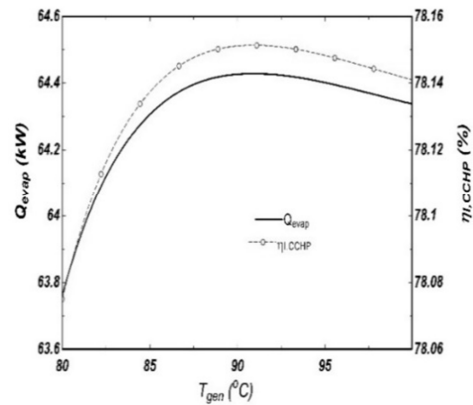
یکی دیگر از پارامترهای مهم و موثر در بازده و کارایی سیستم تولید سه گانه، اختلاف دمای سلول پیل سوختی است. تاثیر اختلاف دمای سلول پیل سوختی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ می توان دریافت که با افزایش اختلاف دمای دو انتهای سلول پیل سوختی به میزان ۷۵ درجه بازده قانون اول و قانون دوم به ترتیب ۱۷/۴۷ و ۸/۹۹ درصد افزایش می یابند.

پارامتر مهم تاثیر گذار دیگر در عملکرد سیستم ترکیبی دمای ژنراتور سیستم تبرید جذبی تک اثره لیتیوم بروماید آب است که در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه سیستم تبرید جذبی در انتهای سیستم واقع شده است، انرژی و انرژی ورودی به ژنراتور در مقایسه با سیستم کلی بسیار ناچیز بوده و در عملکرد کلی سیستم تاثیر به سزایی ندارد به طوری که افزایش ۲۰ درجه ای این دما باعث تغییرات ۰/۰۷٪ در بازده قانون اول و ۰/۹٪ درصد در سرمایه گذاری تولیدی می شود.

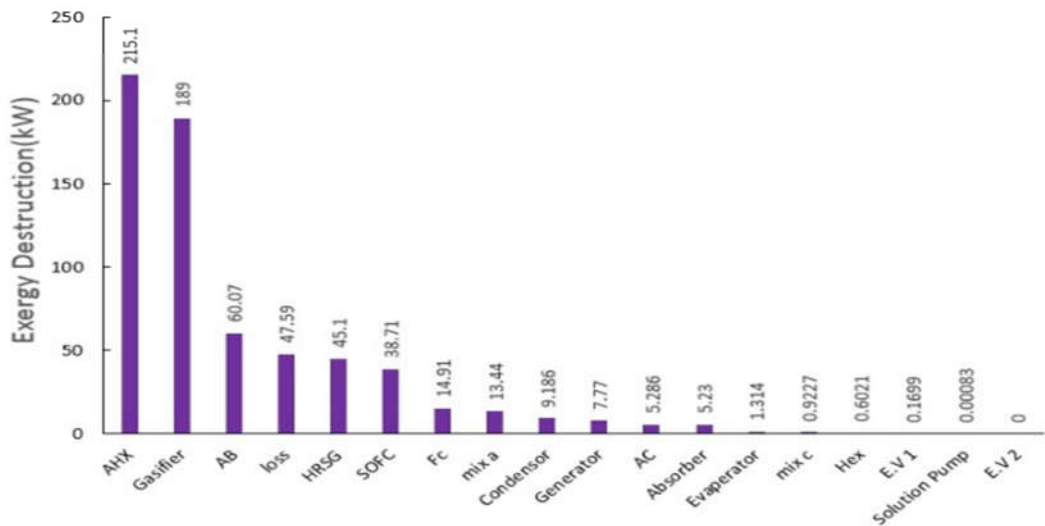
شکل ۸ تخریب انرژی در اجزای سیستم ترکیبی را نشان می دهد. تخریب انرژی در هر یک از اجزا با استفاده از رابطه گوی-استودلا و یا معادله (۳۸) قابل محاسبه است. تخریب انرژی در مبدل حرارتی هوا به دلیل اختلاف دمای بسیار زیاد در این مبدل ۲۱۵/۱ کیلووات است و سپس گازساز و پس سوز در رتبه های بعدی قرار دارند، چرا که هر سه عامل برگشت ناپذیری شامل: اختلاف دمای محدود، واکنش شیمیایی و اختلاط در این اجزا رخ می دهند. تخریب انرژی در گازساز ۱۸۹ و در پس سوز ۶۰/۰۷ کیلووات محاسبه شده است.



شکل ۶- تغییرات بازده قانون اول و قانون دوم با اختلاف دمای دو انتهای پیل سوختی



شکل ۷- نحوه تغییرات بازده قانون اول و نرخ سرمایه گذاری با دمای ژنراتور سیستم تبرید



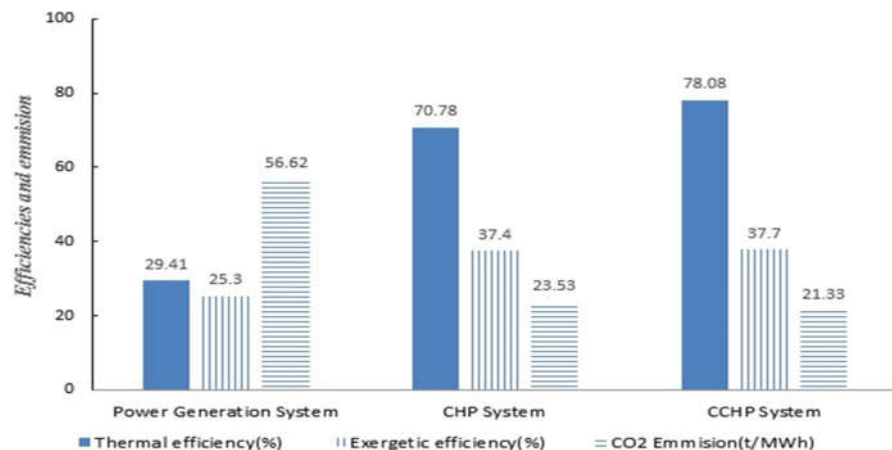
شکل ۸- نرخ تخریب انرژی برای اجزای سیستم ترکیبی

۷۸٪ انرژی ورودی را به توان و گرمایش و سرمایش تبدیل می‌کند ولی بازده قانون دوم این سیستم ۲۷/۷٪ می‌باشد. که این اعداد ضعف قانون اول را در تعریف کردن بازده سیستم نشان می‌دهد. نکته مهم دیگر در شکل ۹ مقایسه بازده قانون اول و قانون دوم در سیستم تولید توان و تولید توان و گرمایش می‌باشد. با اضافه کردن سیستم تولید گرما به سیستم تولید توان بازده قانون اول به میزان ۴۱/۳۷٪ و بازده قانون دوم به میزان ۱۲/۱٪ افزایش یافته است که مزیت استفاده از سیستم ترکیبی را در مقایسه با سیستم تولید توان توسط پیل سوختی را آشکارتر می‌سازد. دارد چرا که از انرژی اتلافی استفاده می‌کند. همچنین واضح است که قیمت واحد محصول توان به مقدار ۲۵/۷۶٪ از قیمت واحد محصول گرما بالاست و به میزان ۴۶/۷۶٪ از قیمت واحد محصول سرمایش بالاتر است.

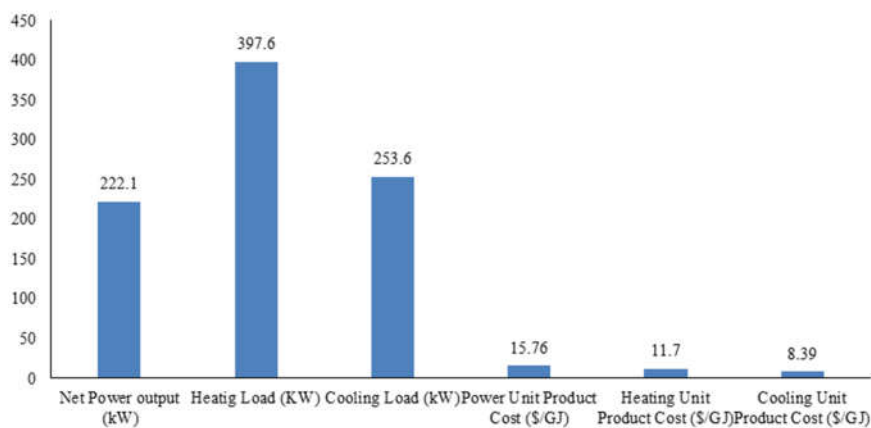
به منظور بررسی اثرات زیست محیطی، تولید کربن‌دی‌اکسید در سه حالت تولید توان با پیل سوختی، تولید توان و گرما به طور همزمان و تولید سه گانه در سیستم ترکیبی پیشنهادی با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۹ واضح است که سیستم ترکیبی تولید کربن‌دی‌اکسید کمتر و بازده انرژی بیشتری دارد. که به ترتیب دارای ۲۷/۳٪ و ۰۷/۱۰٪ بازده بیشتر و ۰/۰۷۲ و ۰/۲۷۳ تن بر مگاوات ساعت تولید کربن‌دی‌اکسید کمتر نسبت به سیستم تولید توان تنها می‌باشد. این مقادیر مزیت استفاده از سیستم ترکیبی را آشکار می‌سازند. همچنین به لحاظ بررسی قانون اول سیستم ترکیبی

۲-۴- نتایج تحلیل اقتصادی

نتایج تحلیل انرژی اقتصادی در این بخش نشان داده شده اند. با توجه به شکل ۱۰ مشخص می‌شود که علی‌رغم اینکه توان گرمایی سیستم HRSG بالاست ولی قیمت تمام شده محصول پایین تری



شکل ۹- تولید کربن دی اکسید و بازده های سه حالت متفاوت تولید توان، تولید همزمان توان و گرما و سیستم ترکیبی



شکل ۱۰- نتایج تحلیل اقتصادی

ارزش حرارتی بالا (KJ.Kmol^{-1})	HHV
اینوترتر	I NV
ثابت تعادلی واکنش	K_i
ارزش گرمایی پایین (KJ.Kmol^{-1})	LHV
دبی جرمی (Kg.s^{-1})	m
درصد رطوبت	MC
تعداد مول ماده (Kmol)	n_i
فشار (Kpa)	P
آهنگ انتقال گرما (kW)	\dot{Q}
پیل سوختی اکسید جامد	SOFC
دما (K)	T
توان (KW)	\dot{W}
	علائم یونانی
تولید کربن دی اکسید ($\text{t.MW}^{-1}\text{h}^{-1}$)	ϵ
بازده (%)	η
نسبت انرژی شیمیایی به ارزش گرمایی پایین	β
زیست توده	زیر نویسها
هوا	air
زیست توده	biomass
کمپرسور	C
شیمیایی	ch
تخریب	D
تولید شده	em
گازسازی	g
ورودی	in
کل	net
خروجی	out
فیزیکی	ph
پمپ	pump
مبرد	R
آب	water

۷- مراجع

- [1] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M. a., Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system, Energy, Vol. 56, pp. 155–166, 2013.
- [2] Gholamian E., Mahmoudi S. M. S., Zare V., Proposal, exergy analysis and optimization of a new biomass-based cogeneration system, Applied Thermal Engineering, Vol. 93, pp. 223-235, 2016.
- [3] Soltani S., S. Mahmoudi M. S., Yari M., Morosuk T., M. a. Rosen, Zare V., A comparative exergoeconomic analysis of two biomass and co-firing combined power plants, Energy Conversion and Management, Vol. 76, pp. 83–91, 2013.
- [4] Datta A., Ganguly R., Sarkar L., Energy and exergy analyses of an externally fired gas turbine (EFGT) cycle integrated with biomass gasifier for distributed power generation, Energy, Vol. 35, No. 1, pp. 341–350, 2010.
- [5] Soltani S., Mahmoudi S. M. S., Yari M., Rosen M. a., Thermodynamic analyses of a biomass integrated fired

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم ترکیبی به منظور تولید توان، حرارت و برودت با استفاده از سوخت زیست توده، بر پایه ی پیل سوختی اکسید جامد پیشنهاد شده و تحلیل کامل ترمودینامیکی و انرژی و نیز بررسی اثرات زیست محیطی انجام گرفته است. نتایج تحلیل انرژی نشان دهنده ی آن است که مبدل حرارتی هوا به دلیل اختلاف دمای محدود زیاد، و همچنین پس سوز و گازساز به دلیل فرآیند احتراق دارای بیشترین بازگشت ناپذیریها می باشند. همچنین انرژی اتلافی همراه با گازهای خروجی و ناپودی انرژی در پیل سوختی و مبادلهکن باز یافت گرمایی از دیگر منابع مهم اتلاف انرژی در سیستم هستند. کارایی سیستم شدیداً تحت تاثیر اختلاف دمای انتهای پیل سوختی، چگالی جریان و فاکتور مصرف سوخت است. سایر نتایج به صورت زیر است:

- ✓ تغییرات بازده های قانون اول و دوم با افزایش چگالی جریان، کاهش یافته است ولی توان تولیدی دارای نقطه بهینه می باشد.
- ✓ بازده قانون دوم و توان تولیدی به ازای مقادیر خاصی از فاکتور مصرف سوخت بهینه می شوند.
- ✓ افزایش اختلاف دمای انتهای پیل سوختی باعث افزایش بازده سیستم ترکیبی می شود.
- ✓ سیستم ترکیبی دارای بازده قانون دوم بیشتر و تولید کربن دی اکسید کمتر می باشد که اهمیت استفاده از سیستم ترکیبی را آشکار می سازد.
- ✓ بازده پیل های سوختی با سوخت زیست توده در مقایسه با نیروگاه های با سوخت متان کمتر است ولی کاهش اثرات زیست محیطی، استفاده از این نوع سیستم ها را توجیه پذیر می نماید.
- ✓ اگر از انرژی اتلافی در تولید حرارت و برودت استفاده شود، علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی هزینه واحد محصول تولیدی در باز یافت کمتر می شود.

۶- فهرست علائم

پس سوز	AB
کمپرسور هوا	AC
مبادله کن گرمای هوا	AHX
آند	Anode
کاتد	Cathode
انرژی ویژه جریان (KW.Kmol^{-1})	e
انرژی جریان (KW)	\dot{E}
شیر فشار شکن	EV
کمپرسور سوخت	FC
آنتالپی تشکیل (KJ.Kmol^{-1})	\bar{h}_f^0
مبادله کن گرما	HEX

Energy Conversion and Management, Vol. 70, pp. 107–115, Jun. 2013.
 [26] Bejan A., Moran M. J., Thermal design and optimization, John Wiley & Sons, 1996.
 [27] Landau L., Moran M. J., Shapiro H. N., Boettner D. D., M. Bailey, Fundamentals of engineering thermodynamics, John Wiley & Sons, 2010.
 [28] Tsatsaronis G, Lin L, Pisa J. Exergy costing in exergoeconomics. J Energy Resour Technol 1993;115:9–16.
 [29] Zare V, Mahmoudi SMS, Yari M. On the exergoeconomic assessment of employing Kalina cycle for GT-MHR waste heat utilization. Energy Convers Manag 2015;90:364–74. doi:10.1016/j.enconman.2014.11.039.

combined cycle, Applied Thermal Engineering, Vol. 59, no. 1–2, pp. 60–68, 2013.
 [6] Handbook F. C., EG&G technical services, Albuquerque, Inc., NM, DOE/NETL-2004/1206, 2004.
 [7] Singh D., Hern E., Hutton P. N., Pate N. I, Mann M. D., Carbon deposition in an SOFC fueled by tar-laden biomass gas : a thermodynamic analysis, Journal of Power Sources, Vol. 142, No. 1-2, pp. 194–199, 2005.
 [8] Athanasiou C., Coutelieres F., Vakouftsi E., Skoulou V., E. Antonakou, From biomass to electricity through integrated gasification / SOFC system-optimization and energy balance, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 3, pp. 337–342, 2007.
 [9] Colpan C. O., Dincer, Hamdullahpur F., Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 7, pp. 787–795, 2007.
 [10] Jang H., Ocon J. D., Lee S., Lee J. K., Lee J., Direct power generation from waste coffee grounds in a biomass fuel cell, Journal of Power Sources, Vol. 296, pp. 433–439, 2015.
 [11] De Lorenzo G., Fragiaco P., Energy analysis of an SOFC system fed by syngas, Energy Conversion and Management, Vol. 93, pp. 175–186, 2015.
 [12] Jia J., Abudula A., Wei L., Sun B., Shi Y., Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system, Renewable Energy, Vol. 81, pp. 400–410, 2015.
 [13] Kartha S., Kreutz T. G., Williams R. H., Small-scale biomass fuel cell/gas turbine power systems for rural areas, Energy for Sustainable Development, ol. 4, no. 1, pp. 85–89, 2000.
 [14] Ghirardo F., Santin M., Traverso A., Massardo A., Heat recovery options for onboard fuel cell systems, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, no. 13, pp. 8134–8142, 2011.
 [15] Gomri R., Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems, Energy Conversion and Management, Vol. 51, no. 8, pp. 1629–1636, 2010.
 [16] Gomri R., Second law comparison of single effect and double effect vapour absorption refrigeration systems, Energy Conversion and Management, Vol. 50, no. 5, pp. 1279–1287, 2009
 [17] Wellinger A., Murphy J. D., Baxter D., *The biogas handbook: science, production and applications*, Elsevier, 2013.
 [18] Al-sulaiman F. A., Dincer L., Hamdullahpur F. Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle, Energy, Vol. 45, no. 1, pp. 975–985, 2012.
 [19] Mehr A. S., Mahmoudi S. M. S., Yari M., Chitsaz a., Thermodynamic and exergoeconomic analysis of biogas fed solid oxide fuel cell power plants emphasizing on anode and cathode recycling: A comparative study, Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 596–606, 2015.
 [20] Al-sulaiman F. A., Dincer L., Hamdullahpur F., Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, no. 10, pp. 5104–5113, 2010.
 [21] Zainal Z. A., Ali R., Lean C. H., Seetharamu K. N., Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials, Energy Conversion and Management, Vol. 42, no. 12, pp. 1499–1515, 2001.
 [22] Ranjbar F., Chitsaz A., Mahmoudi S. M. 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.
 [23] Chan S. H., Ho H. K., 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.
 [24] Ptasinski K. J., Prins M. J., Pierik A., Exergetic evaluation of biomass gasification”, Energy, Vol. 32, no. 4, pp. 568–574, 2007.
 [25] Soltani S., Mahmoudi S. M. S., Yari M., Rosen M. a., Thermodynamic analyses of an externally fired gas turbine combined cycle integrated with a biomass gasification plant,