

تحلیل انرژی و اگسرژی سامانه ترکیبی تولید بیوهیدروژن و توان الکتریکی با استفاده از بیوگاز

فرهاد صیرفی^۱، رحیم ابراهیمی^{۲*}، هادی غائبی^۳ و مرتضی بیاره^۴

چکیده

در این مقاله، انرژی و اگسرژی یک سامانه جدید تولید بیوهیدروژن، گرما و توان الکتریکی از سوخت تجدیدپذیر بیوگاز که تولید آن وابسته به ضایعات کشاورزی است مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت. فرآیند تولید بیوهیدروژن از طریق رفورمینگ بخار آب- بیوگاز و رفورمینگ دی اکسید کربن- بیوگاز با نرم‌افزار EES کدنویسی گردید. در این تحقیق، گرمای ناشی از سوختن بیوگاز، انرژی لازم برای واکنش رفورمینگ بیوگاز را تأمین می‌نماید که این مهم باعث می‌شود تا بازده حرارتی و اگسرژی سامانه به ترتیب به بالای ۷۴٪ و ۵۸/۳۴٪ برسند. با در نظر گرفتن توان لازم الکتریکی بین ۵ تا ۴۰ مگاوات، میزان تولید بیوهیدروژن در بازه ۰/۱۱ تا ۰/۸۳ kg/s به دست آمد. بررسی میزان نرخ تخریب اگسرژی در اجزای سامانه مشخص کرد که محفظه سوخت بیشترین تخریب اگسرژی را با مقدار تقریبی ۵۱٪ دارد. یک تحلیل عاملی دقیق برای مقدار بهینه تولید بیوهیدروژن نیز انجام شد تا عامل‌های کلیدی و مهم سامانه ارزیابی شوند. نتایج نشان داد که نقطه بهینه تولید بیوهیدروژن در شرایطی که نسبت مولی دی اکسید کربن به متان در ورودی رفورمینگ بین ۰/۵ تا ۰/۶۶، نسبت مولی مخلوط بخار آب به متان بین ۲ تا ۳/۶ و دمای واکنش رفورمینگ نیز بین ۹۶۵ تا ۱۰۳۶ کلوین قرار دارند به دست می‌آید. از سوی دیگر در دمای واکنش بالاتر از ۹۶۵ کلوین، مقدار تبدیل گاز متان به ۹۷٪ و دی اکسید کربن به ۸۶٪ می‌رسد که نشان‌گر کاهش بیشتر گازهای گلخانه‌ای است. این پژوهش روش جدیدی جهت تحلیل عاملی سامانه ترمودینامیکی تولید بیوهیدروژن، فقط با استفاده از انرژی بیوگاز، ارائه داده است.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، رفورمینگ، تحلیل ترمودینامیکی، اگسرژی، توان الکتریکی.

ارجاع: صیرفی، ه. و غائبی، ر. ابراهیمی، رحیم. ۱۴۰۲. تحلیل انرژی و اگسرژی سامانه ترکیبی تولید بیوهیدروژن و توان الکتریکی با استفاده از بیوگاز. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۹: ۹۴-۹۹. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14235.651>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استاد تمام گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۴- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: Rahim.ebrahimi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به علت فراوانی، جایگزین بسیار مناسبی برای انرژی‌های فسیلی، در حال اتمام و باعث آلودگی محیط زیست هستند. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۵ میلادی بیش از ۳۰ درصد انرژی مصرفی در کل دنیا از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به دست آید (Zhu *et al.*, 2015). یکی از اصلی‌ترین اهداف استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش گازهای گلخانه‌ای است. اصلی‌ترین گازهای مخرب گلخانه‌ای، متان و دی‌اکسیدکربن، بخار آب، نیتروژن و مونواکسیدکربن است. متان و دی‌اکسیدکربن به ترتیب ۹-۴ و ۲۶-۹ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهند، بنابراین باید مقدار انتشار آنها را کنترل نمود (Fan *et al.*, 2009). بیوگاز محصول تجزیه و تخمیر بی‌هوازی ضایعات کشاورزی، حیوانی و انسانی در دمای تقریبی ۴۰ درجه سلسیوس است. مواد جامد و مایع این تخمیر، به عنوان کمپوست و کود، جهت غنی‌سازی خاک بکار برده می‌شود و گاز آن در تانک‌های بزرگ ذخیره می‌گردد. این گاز اغلب شامل ۶۰ درصد متان، ۳۵ درصد دی‌اکسیدکربن، ۳ درصد نیتروژن و ۲ درصد بخار آب است (Mahmoodi-Eshkaftaki & Ebrahimi., 2019). بیوگاز به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی، به علت دارا بودن مقدار زیادی گاز متان و دی‌اکسیدکربن که هر دو گاز گلخانه‌ای محسوب می‌شوند، از مخرب‌ترین گازهای موجود از نظر زیست محیطی است که روزانه صدها تن تشکیل می‌شود. حال اگر از بیوگاز به عنوان منبع انرژی استفاده گردد علاوه بر تولید انرژی، گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده‌ایم، بنابراین استفاده از بیوگاز در کاهش آلودگی‌های محیط زیست، اهمیت دوچندان دارد.

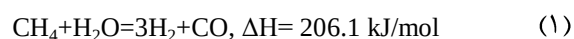
تولید هیدروژن، امروزه به عنوان پاک‌ترین سوخت مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است که از سوختن آن درفضایماها، صنایع پتروشیمی، پالایشگاهی و غذایی و مهم‌تر از همه، جهت راه‌اندازی پیل‌های سوختی جهت تولید الکتریسیته استفاده می‌شود. ارزش حرارتی هیدروژن ۱۲۰ مگاژول برکیلوگرم و ارزش حرارتی گاز متان ۵۰ مگاژول برکیلوگرم است (Alves *et al.*, 2013)، که اهمیت استفاده از هیدروژن را نسبت به گاز متان بیان می‌کند. به-علاوه، از سوختن هیدروژن آب به دست می‌آید که فاقد هرگونه ماده آلاینده محیط زیست است. از آنجا که

هیدروژن در طبیعت به صورت ترکیب با عناصر دیگر وجود دارد، روش‌های مختلفی برای تولید آن به کار می‌رود. هیدروژن اغلب از الکترولیز آب و تغییر حالت هیدروکربن‌های سبک و همچنین از فرآوری ذغال‌سنگ به دست می‌آید. الکترولیز آب نیازمند صرف انرژی فراوانی است و استفاده از ذغال‌سنگ و سوخت‌های فسیلی دیگر نیز علاوه بر نیاز به انرژی بالا، دارای اثرات مخرب زیست محیطی هستند. متداول‌ترین و تجاری‌ترین روش، تولید هیدروژن از گاز متان است که ۵۰ درصد نیاز دنیا به این روش برآورده می‌گردد (Muradov & Veziroğlu, 2005). تحلیل فرآیند سامانه نیز براساس قانون اول ترمودینامیک که به قانون انرژی معروف است و قانون دوم ترمودینامیک که از آن نیز می‌توان به عنوان قانون اگسرژی نام برد، استفاده نمود. اگسرژی قابلیت انجام کار یک سامانه را نشان می‌دهد. گاز متان نیز به چند شیوه که عبارتند از تغییر حالت گازمتان-بخار آب، تغییر حالت اتوترمال، تغییر حالت خشک، استحصال گاز و بخار آب از گازمتان و اکسیداسیون جزئی به هیدروژن تبدیل می‌شود (Chattanathan *et al.*, 2012). هرکدام از این روش‌ها در شرایط خاص ترمودینامیکی از قبیل دما و فشار و نقش کاتالیزورها انجام می‌شوند، اما میزان تولید هیدروژن از روش تغییر حالت گازطبیعی-بخار آب در مقایسه با روش‌های دیگر استحصال هیدروژن از گاز متان موجود در گازطبیعی، مانند اکسیداسیون جزئی و تغییر حالت اتوترمال بیشتر است (Nahar *et al.*, 2017). بنابراین استفاده از بیوگاز به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر به جای سوخت گازطبیعی یک مزیت بالقوه در حفظ محیط زیست و انرژی است. در تغییر حالت بیوگاز، بیوگاز از یکسو و بخار آب از سوی دیگر، بوسیله پمپ‌ها و کنترل‌کننده دبی با هم مخلوط می‌شوند. هر دو جریان توسط حرارت اتلافی سوختن بیوگاز پیش‌گرم می‌شوند تا مخلوط بیوگاز به دمای تقریبی ۶۵۰ درجه سلسیوس رسیده و بخار آب هم به صورت اشباع درآید. سپس این دو جریان با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا آماده واکنش تغییر حالت در راکتور مخصوص تغییر حالت شوند. فرایند کلی تغییر حالت بخار آب-بیوگاز براساس واکنش‌های ترمودینامیکی زیر تحلیل می‌گردد (Chiodo *et al.*, 2015):

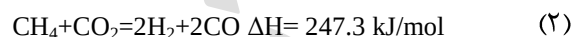
زیرسامانه‌های تولید توان الکتریکی از طریق توربین بخار یا گاز از ۱ مگاوات تا ۴۰ مگاوات امکان‌پذیر است که در چرخه‌های مختلف ترمودینامیکی، بنا بر نیاز مدار، طراحی و اجرا می‌گردد. در اینجا پس از احتراق بیوگاز، گازهای متصاعد شده که شامل O_2 ، CO_2 و بخار آب است مستقیماً به توربین گازی کوچک می‌رود و توسط ژنراتور به جریان الکتریسیته تبدیل می‌شوند. تنظیم عامل‌های فشار و دما در ورودی توربین، منجر به تغییر عامل‌های خروجی آن می‌گردد و از خروجی توربین‌ها نیز می‌توان برای تغذیه زیرسامانه‌های دیگر بهره برد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی به روی سامانه‌های ترمودینامیکی تولید چندگانه تولید هیدروژن صورت گرفته است. یک سامانه تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی توسط Chouhan et al. (2021) ارزیابی گردید و مقدار بهینه دمای واکنش تغییر حالت ۹۷۳ کلوین و نسبت بخار آب به متان، ۴ معرفی شد. Dan et al. (2020) تحقیقات گسترده‌ای به روی عامل‌های مؤثر بر سامانه‌های ترمودینامیکی تولید هیدروژن از گاز متان به روش تغییر حالت بخار آب انجام دادند و دریافتند در دمای ۹۷۵ کلوین و نسبت بخار آب به گاز متان ۶/۱، تغییر حالت متان بطور کامل انجام می‌شود. Avraam et al. (2010) تغییر حالت آزمایشگاهی تولید هیدروژن از متان را در دماهای مختلف انجام دادند و در دمای ۹۸۸ کلوین و نسبت بخار آب به متان ۲ بیشترین مقدار هیدروژن حاصل گردید. Minutillo et al. (2019) واکنش تغییر حالت را با واکنش اتوترمال به صورت همزمان بررسی و ارزیابی نمودند و دریافتند که جهت تولید هیدروژن بیشتر نیاز به انرژی حرارتی بیشتری است. Ghaebi et al. (2019a) چرخه ترمودینامیکی تغییر حالت بیوگاز را با چرخه رنکین و با گاز R600 ادغام نمودند و در دمای ۹۸۸ کلوین و فشار اتمسفر بهترین نتایج تولید بیوهیدروژن را به دست آوردند. Gargari et al. (2019) چرخه ترمودینامیکی تغییر حالت بیوگاز را با توربین گاز هلیوم ترکیب نموده و افزایش قابل توجهی در بازده انرژی و اگسرژی سامانه مورد نظر ایجاد شد. Cruz et al. (2018) نیز ارزیابی اگسرژی تغییر حالت خشک را انجام دادند و در تولید هیدروژن به بازده اگسرژی ۵۵ درصد دست یافتند. Wegeng et al. (2014) با بشقاب خورشیدی انرژی مورد نیاز تغییر حالت متان را تأمین نمودند و تحلیل کامل

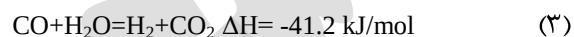
الف) واکنش تغییر حالت متان و بخار آب طبق معادله (۱) به شدت یک واکنش گرماگیر است و در فشار اتمسفر انجام می‌شود. تولید سه مول هیدروژن در این واکنش حائز اهمیت است (Yari et al., 2019).



ب) واکنش تغییر حالت متان و دی‌اکسیدکربن نیز طبق معادله (۲) یک واکنشی به شدت گرماگیر است و در دمای بالا و فشار اتمسفر انجام می‌شود.



ج) واکنش گاز مونواکسیدکربن با آب طبق معادله (۳) یک واکنش گرمازا است و در دمای پایین‌تری نسبت به واکنش‌های (۱) و (۲) روی می‌دهد.



د) واکنش تجزیه گاز متان طبق معادله (۴) یک واکنش گرماگیر است (Yari et al., 2019).



از آنجا که در تغییر حالت بیوگاز، حرارت خروجی اتلافی در چند زیرسامانه از قبیل توان، تبرید، گرمایش و سامانه آب شیرین‌کن می‌تواند استفاده شود، به این نوع طراحی مدارهای ترمودینامیکی و ترکیب چند سامانه با یکدیگر سامانه‌های چندگانه تولید می‌گویند. به طور کلی سامانه‌های تولید چندگانه، راه‌حلی قابل اعتماد برای افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات انرژی است و در صنعت، کارخانجات و حتی ساختمان‌ها به وفور دیده می‌شوند (Carvalho et al., 2012). این سامانه‌ها به صورت یکپارچه عمل می‌کنند و از حرارت اتلاف شده یک واحد، برای راهاندازی چند زیرسامانه بهره می‌گیرند. زیرسامانه‌های تبرید، گرما، برق و غیره در اکثر سامانه‌های تولید چندگانه به کار می‌روند تا از حرارت اتلافی استفاده کرده و باعث افزایش بازده حرارتی سامانه کل گردند. امروزه مدل‌سازی ریاضی این سامانه‌های ترکیبی، برای بیان کارایی و تحلیل عامل‌های ترمودینامیکی و تعیین مقادیر ورودی و خروجی توسعه پیدا کرده است (Jannelli et al., 2014). از سوی دیگر، به کارگیری مدل‌سازی سامانه‌های ترکیبی چندگانه تولید گرما، تبرید، برق و همچنین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، منجر به طراحی و بهره‌برداری با صرفه اقتصادی و با کمترین اثرات مخرب زیست محیطی می‌شود (Tuna et al., 2018).

انرژی و اگسرژی چرخه ترمودینامیکی آن را انجام دادند. Lin & Wu (2020) به جای استفاده از بخار آب جهت تغییر حالت بیوگاز از محلول اوره آبی استفاده کردند و به نتایج بهتری در میزان تولید هیدروژن رسیدند.

بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون هیچ‌گونه گزارشی مبنی بر تولید بیهیدروژن از بیوگاز همزمان با استفاده از آن به عنوان تأمین کننده انرژی در محفظه احتراق ارائه نشده است. بنابراین با توجه به بحران‌های جهانی در استفاده از سوخت‌های فسیلی و نیاز جهانی به سوخت‌های تجدیدپذیر، استفاده از سامانه‌های چندگانه به همراه منابع تجدیدپذیر بسیار امیدوارکننده خواهد بود. مطالعه حاضر با اهداف طراحی سامانه ترمودینامیکی جهت تولید چند محصول، ارائه مدل ریاضی سامانه ترمودینامیکی، تعیین شرایط بهینه و تحلیل انرژی و اگسرژی سامانه ترکیبی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

هدف این طرح، تولید بیهیدروژن از بیوگاز به روش تغییر حالت است. در مدل پیشنهادی، از درصدهای مختلف ترکیبی بین متان با دی اکسید کربن (۵۵، ۶۰ و ۶۵ درصد متان و ۴۵، ۴۰ و ۳۵ درصد گاز دی اکسید کربن) استفاده شده است. شکل ۱ طرح سامانه پیشنهادی را با سه زیرسامانه نشان می‌دهد:

۱) سامانه تولید توان و احتراق: این قسمت شامل کمپرسور هوا، مخزن سوخت بیوگاز، پیش‌گرم کن هوا، سوخت، محفظه احتراق و توربین گاز است. یک واحد سامانه زدودن گازهای سولفید هیدروژن که به مقدار ناچیز موجود است نیز بعد از مخزن سوخت در نظر گرفته شده است.

۲) سامانه تولید بیهیدروژن: این قسمت شامل محفظه تغییر حالت، پیش‌گرم کن بیوگاز و آب، مخلوط کننده، رکوپراتور و رادیاتور است. در این بخش نیز یک واحد تلخیص هیدروژن به کار می‌رود تا هیدروژن خالص در مخازن ویژه ذخیره گردد.

۳) سامانه تولید حرارت: این قسمت متشکل از مبدل گرم کن برای تولید حرارت در مصرف خانگی یا کشاورزی است.

در این طرح برای تولید بیهیدروژن، دو مخزن بیوگاز در نظر گرفته شده که یکی برای سوختن در محفظه احتراق جهت تولید توان و حرارت و دیگری جهت ترکیب با بخار آب برای ورود به راکتور تغییر حالت جهت تولید بیهیدروژن است. جریان مخلوط بیوگاز (شماره ۱۰) به وسیله کنترل کننده دبی با دمای ۴۰۰ کلوین و فشار تقریبی ۱۰۰۰ کیلوپاسکال پیش آماده می‌شود و به محفظه احتراق وارد می‌گردد. از سوی دیگر جریان هوا (شماره ۱) با فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۳۰۰ کلوین نیز وارد شده و پس از گرم شدن وارد فرایند احتراق می‌شود. محصول احتراق (شماره ۴) که شامل ترکیبات بخار آب، نیتروژن، دی اکسید کربن و اکسیژن است با دمای بالا وارد توربین گاز می‌گردد و باعث دوران توربین و متعاقباً ژنراتور برق شده و انرژی الکتریکی ایجاد می‌کند. بعد از تخلیه انرژی در توربین، جریان گاز (شماره ۵) منبسط می‌گردد و به عنوان جریان گرم به رفورمر تولید بیهیدروژن وارد می‌شود. از سوی دیگر جریان بیوگاز (شماره ۱۳) با شیر کنترل دبی، به مقدار لازم وارد مرحله پیش‌گرمایش شده و با بخار آب (جریان ۱۷) مخلوط می‌گردد. عامل‌های ترمودینامیکی در این نقطه از مدار (جریان ۱۹)، از نظر درصد ترکیبات و دبی آن بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که با دریافت گرمای جریان ۵، عملاً تغییر حالت بیوگاز انجام شده و مخلوطی بنام Syngas تولید می‌شود.

این مخلوط (جریان ۲۱) شامل گاز بیهیدروژن، دی اکسید کربن، مونواکسید کربن و کمی هم گاز متان است که می‌تواند مستقیماً برای تغذیه پیل‌های سوختی به کار رود و یا طبق طرح ترمودینامیکی این تحقیق مطابق با شکل ۱، پس از انتقال حرارت اضافی خود به زیرسامانه تولید حرارت خانگی، گاز بیهیدروژن خالص تولید می‌گردد. در ادامه گاز تولیدی در مخازن ویژه جهت صنایع مختلف ذخیره می‌شود.

تمرکز این تحقیق، بیشتر بر میزان تولید بیهیدروژن از بیوگاز با استفاده از حرارت و انرژی حاصل از احتراق بیوگاز است، اما فرآیندهای زیرسامانه‌های توان و حرارت نیز بررسی شده و تأثیر عامل‌های مختلف بر این تولیدات مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

می‌شود، سپس واکنش‌های شیمیایی و روابط حاکم بر آنها که شامل معادلات موازنه انرژی، اگسرژی و جرم سامانه مورد نظر است، به وسیله نرم‌افزار حل کننده معادلات مهندسی (EES Pro (Engineering Equation Solution) 10.561 مدل‌سازی می‌گردد. روابط موازنه انرژی برای هر عنصر سامانه در جدول ۱ تشریح شده است. در مدل‌سازی انجام گرفته فرض‌های زیر مدنظر قرار گرفته شده است:

- کلیه مدل‌سازی‌ها در شرایط پایا انجام گردید.
- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در همه اجزای سامانه چشم‌پوشی می‌شود.
- تلفات حرارتی در اجزای ارتباطی صرف‌نظر شده است.
- از تشکیل کربن جامد در فرآیند رفرمینگ به علت دمای بالای واکنش تغییر حالت صرف‌نظر می‌گردد.
- خروجی تبخیرکننده آب برای ترکیب با بیوگاز به صورت بخار اشباع در نظر گرفته شده است.
- از تغییرات اگسرژی شیمیایی در پیش‌گرم‌کن‌ها، مخلوط‌کننده و تبخیرکننده صرف‌نظر می‌شود.
- از افت فشار در هر بخش سامانه صرف‌نظر می‌گردد.
- مقادیر متغیرهای استفاده شده در این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

میزان کاهش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و همچنین میزان تبدیل گاز متان در انتهای واکنش نیز از عامل‌های مهم نتایج تحقیق است که بیانگر کاهش آلودگی زیست محیطی است و با توجه به معادلات (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر تعیین می‌گردند. (Gargari et al., 2018):

$$CH_4 \text{ conversion (\%)} = \left(\frac{(n_{CH_4})_{in} - (n_{CH_4})_{out}}{(n_{CH_4})_{in}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$CO_2 \text{ conversion (\%)} = \left(\frac{(n_{CO_2})_{in} - (n_{CO_2})_{out}}{(n_{CO_2})_{in}} \right) \times 100 \quad (12)$$

نسبت مولی بخار آب به متان در مخلوط آماده تغییر حالت در ابتدای واکنش که یکی از عامل‌های مهم تغییر حالت است عبارت است از (Gargari et al., 2018):

$$S_C = \left(\frac{n_{H_2O}}{n_{CH_4}} \right)_{in} \quad (13)$$

نسبت مولی دی‌اکسیدکربن به متان موجود در مخلوط نیز از دیگر عامل مهم تغییر حالت است که طبق معادله زیر تعیین می‌گردد. (Gargari et al., 2018):

$$C_m = \left(\frac{n_{CO_2}}{n_{CH_4}} \right)_{in} \quad (14)$$

بازگشت‌ناپذیری سامانه، می‌تواند داخلی یا خارجی باشد. بازگشت‌ناپذیری داخلی شامل مواردی همچون اصطکاک، انبساط آزاد، اختلاط و همچنین واکنش‌های شیمیایی است. بازگشت‌ناپذیری‌های خارجی نیز در اثر انتقال حرارت بین دو دمای محدود روی می‌دهد. رابطه واکنش سوختن بیوگاز عبارت است از: (Dincer & Safari, 2019)

$$\begin{aligned} \dot{n}_{fuel}(y_{CH_4}CH_4 + y_{CO_2}CO_2) + \dot{n}_{air} \\ (0.7748N_2 + 0.2059O_2) \\ + (0.0003CO_2 + 0.019H_2O) = \\ \dot{n}_{product}(y_{N_2}N_2 + y_{O_2}O_2 + y_{CO_2}CO_2 \\ + y_{H_2O}H_2O) \end{aligned} \quad (5)$$

تحلیل انرژی

معادلات حاکم بر سامانه ترمودینامیکی بر اساس قانون اول ترمودینامیک عبارتند از (Bejan & Moran, 1996):

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} = \sum (\dot{m}h)_{out} - \sum (\dot{m}h)_{in} \quad (6)$$

$$\sum \dot{m}_{out} = \sum \dot{m}_{in} \quad (7)$$

توان الکتریکی سامانه چندگانه عبارت است از (Bejan & Moran, 1996):

$$\dot{W}_{Net} = \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{PUMP} \quad (8)$$

در چرخه ترمودینامیکی مقدار گرمای ورودی مورد نیاز سامانه جهت دستگاه ایجاد بخار زیرسامانه تولید بیوهیدروژن، از بیرون تأمین می‌شود. همچنین مقدار گرمای حرارتی خروجی سامانه نیز در رادیاتور زیرسامانه تولید بیوهیدروژن ارزیابی می‌شود که عبارتند از (Ghaebi et al., 2019b):

$$\dot{Q}_{Output} = \dot{Q}_{Radiator} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{Input} = \dot{Q}_{Vaporizer}$$

با در نظر گرفتن موارد فوق، محصولات سامانه چندگانه شامل بیوهیدروژن، توان و حرارت، در صورت کسر بازده حرارتی سامانه ترمودینامیکی قرار دارند و انرژی بیوگاز مورد نیاز سامانه و همچنین انرژی مورد نیاز جهت تولید بخار اشباع از آب، در مخرج کسر قرار می‌گیرند. بر این اساس، بازده حرارتی سامانه چندگانه عبارت است از (Gargari et al., 2018):

$$\eta_{en} (\%) = \quad (10)$$

$$\left(\frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2} + \dot{W}_{net} + \dot{Q}_{out}}{\dot{m}_{Fuel} LHV_{Fuel} + \dot{m}_{Biogas} LHV_{Biogas} + \dot{Q}_{in}} \right) \times 100$$

برای تحلیل کلیه داده‌های سامانه چندگانه ترمودینامیکی، ابتدا روابط حاکم بر هر عنصر سامانه ترمودینامیکی نوشته

این مقادیر با نتایج تحقیقات گذشته صحت‌سنجی می‌گردد و تأثیر عامل‌های کلیدی برای هر زیرسامانه نیز به طور جداگانه، تحلیل و تفسیر خواهد شد.

عامل زیر نیز به عنوان شاخص تولید هیدروژن، مقدار مولاریته هیدروژن به دست آمده را نسبت به مقدار مولی متان ابتدای واکنش بیان می‌نماید (Roy et al., 2018):

$$\text{Hydrogen yield} = \left(\frac{(n_{H_2})_{out}}{(n_{CH_4})_{in}} \right) \quad (15)$$

جدول ۱- روابط موازنه انرژی برای اجزای تشکیل دهنده سامانه ترمودینامیکی (Ahmed et al., 2015; Gargari et al., 2018; Ghaebi et al., 2019b)

معادلات موازنه انرژی	اجزا
$\eta_{AC} = \frac{(h_{2is} - h_1)}{(h_2 - h_1)}$ $\dot{W}_{AC} = \dot{m}_{air}(h_2 - h_1)$	کمپرسور هوا
$\eta_{APH} = \frac{\dot{m}_{air}(h_3 - h_2)}{\dot{m}_{product}(h_6 - h_7)}$	پیش گرم کن
$\dot{m}_{product} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air}$ $\dot{m}_{fuel}h_{12} + \dot{m}_{air}h_3 = \dot{m}_{product}h_4 + 0.02\dot{m}_{fuel}LHV_{fuel}$	محفظه احتراق
$\eta_{GT} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_{5is})}$ $\dot{W}_{GT} = \dot{m}_{product}(h_4 - h_5)$	توربین گازی
$\eta_{BPH} = \frac{\dot{m}_{biogas}(h_{14} - h_{13})}{\dot{m}_{ref}(h_{22} - h_{23})}$	پیش گرم کن بیوگاز
$\eta_{WPH} = \frac{\dot{m}_{water}(h_{16} - h_{15})}{\dot{m}_{ref}(h_{23} - h_{24})}$	پیش گرم کن آب
$\dot{m}_{water} + \dot{m}_{biogas} = \dot{m}_{reactant}$ $\dot{m}_{water}h_{17} + \dot{m}_{biogas}h_{14} = \dot{m}_{reactant}h_{19}$	میکسر
$\dot{Q}_{RAD} = \dot{m}_{ref}(h_{24} - h_{25}) = \dot{m}_{water1}(h_{30} - h_{29})$	رادیاتور
$\dot{Q}_{RF} = \dot{m}_{ref}h_{21} - \dot{m}_{reactant}h_{20} = \dot{m}_{product}(h_5 - h_6)$	ریفرمر
$\dot{Q}_{VP} = \dot{m}_{H_2O}(h_{17} - h_{16})$	بخار ساز
$\eta_{REC} = (T_{19} - T_{20}) / (T_{19} - T_{21})$ $h_{21} - h_{22} = h_{19} - h_{20}$	بازیاب کننده
$\dot{Q}_{HU} = \dot{m}_{product}(h_8 - h_9) = \dot{m}_{water2}(h_{28} - h_{27})$	واحد گرمایش
$\dot{m}_{fuel}(h_{12} - h_{11}) = \dot{m}_{product}(h_7 - h_8)$	پیش گرم کن سوخت

خواهیم داشت (Bejan & Moran, 1996):

$$\dot{E}_k = \dot{E}_{ch,k} + \dot{E}_{ph,k} \quad (16)$$

$$\dot{E}_{ch,k} = \dot{m}_k \left[\sum y_k (e_{ch,k} + RT_0 \ln(y_k)) \right] \quad (17)$$

$$\dot{E}_{ph,k} = \dot{m}_k [h - h_0 - T_0(s - s_0)] \quad (18)$$

عبارت‌های این معادلات در جدول ۳ آورده شده است. اندیس ° نیز نشانگر شرایط مرده خواهد بود که برابر با $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ و $T_0 = 298.15 \text{ K}$ است.

تحلیل اگسرژی

اگسرژی هر جریان در سامانه پیشنهادی، بیشترین کار نظری قابل حصول از آن جریان است، در حالی که به دما و فشار محیط آورده شود. با صرف نظر کردن از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل جریان‌ها، معادلات اگسرژی هر جریان با عبارات زیر بیان می‌شود که خود بیان‌گر مفهوم قانون دوم ترمودینامیکی است. اگسرژی هر جریان مجموع اگسرژی فیزیکی و شیمیایی آن جریان است، بنابراین

جدول ۲- مقادیر فرضیات عامل‌های ورودی سامانه تولید چندگانه

محدوده	مقدار	پارامترها
	۲۹۸/۱۵	دمای مرجع، T0 (K)
	۱۰۱/۳	فشار مرجع، P0 (kPa)
۱۰۰-۸۰	۹۰	راندمان پیش گرم‌کن هوا، $\epsilon_{APH}(\%)$
۲۹۳/۳۱۳-۱۵/۱۵	۲۹۸/۱۵	دمای خروجی مخزن بیوگاز، T13 (K)
۱۰۰-۸۰	۸۵	راندمان کمپرسور، $\epsilon_{AC}(\%)$
۱۵-۵	۱۰	نسبت فشار کمپرسور، r_p
۱۰۰۰-۶۰۰	۸۰۰	دمای ورودی محفظه احتراق، T3 (K)
۲۹۳/۳۱۳-۱۵/۱۵	۲۹۸/۱۵	دمای خروجی مخزن آب، T15 (K)
۱۶۰۰-۱۲۰۰	۱۵۴۰	دمای ورودی توربین، T4 (K)
۱۰۰-۸۰	۸۵	راندمان پیش گرم‌کن بیوگاز، $\epsilon_{BPH}(\%)$
۱۰۰-۸۰	۸۵	راندمان پیش گرم‌کن آب، $\epsilon_{WPH}(\%)$
۱۰۰-۸۰	۹۰	راندمان بازیابی، $\epsilon_{REC}(\%)$
۳۰-۵	۱۵	دمای نقطه پینچ ریفرمر، ΔTRF (K)
۱۰۰-۸۰	۸۵	راندمان توربین، $\epsilon_{GT}(\%)$
۴۰۰۰-۳۰۰۰	۳۲۰۰	بار بخارساز، Q_{VP} (kW)
۱۰۱/۳-۱۰۱/۳	۱۰۱/۳	فشار واکنش، P_{ref} (kPa)
۶-۱	۲	نسبت مولی بخار به متان، SC
۰/۲-۱/۵	۰/۵	نسبت مولی دی‌اکسید کربن به متان، سانتی‌متر
۱۰۰-۴۰	۶۰	کسر مولی متان در سوخت بیوگاز، $y_{CH4}(\%)$
۶۰-۰	۴۰	کسر دی‌اکسید کربن در سوخت بیوگاز، $y_{CO2}(\%)$
۴۰۰۰۰-۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	بار قدرت ژنراتور، W_{net} (kW)
۶۰۰-۳۰۰	۴۰۰	دمای سوخت (بیوگاز) در احتراق، T12 (K)
۱۰۱/۳-۱۰۱/۳	۱۰۱/۳	فشار سوخت (بیوگاز) در احتراق، P12 (kPa)
۴۰۰-۳۰۰	۳۵۰	دمای آگزوز، T9 (K)
۱۲۰-۵۰	۷۰	دمای پیش گرم شده بیوگاز و آب، ΔT (K)

جدول ۳- اگسرژی شیمیایی اجزای سامانه در شرایط مرده

(Szargut et al., 1987)

مواد	فرمول	اگسرژی شیمیایی (kJ/mol)
نیتروژن	N_2	۷۲۰
اکسیژن	O_2	۳۹۷۰
دی‌اکسید کربن	CO_2	۱۹۸۷۰
آب (گاز)	H_2O	۹۵۰۰
آب (مایع)	H_2O	۹۰۰
هیدروژن	H_2	۲۳۶۱۰۰
مونوکسید کربن	CO	۲۷۵۱۰۰
متان	CH_4	۸۳۶۵۰

حال برای درک بهتر مقدار اگسرژی که قابل تبدیل به کار مفید نیست، نسبت اگسرژی تخریبی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم که برابر است با اگسرژی تخریبی هر عنصر سامانه ترمودینامیکی به کل اگسرژی تخریب شده (Ghaebi et al., 2019a):

$$Y_{D,k} = 100 \times \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{D,total}} \quad (20)$$

بازده اگسرژی نیز همانند بازده تحلیل انرژی نقش مهمی در تحلیل عملکرد سامانه ترمودینامیکی دارد و برای سامانه پیشنهادی چندگانه تولید بیوهیدروژن، توان و حرارت عبارت است از (Ghaebi et al., 2019a):

$$\eta_{ex} (\%) = \left(\frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{H_2} + \dot{E}_{HU}}{\dot{E}_{biogas} + \dot{E}_{fuel} + \dot{E}_{VP}} \right) \times 100 \quad (21)$$

معادله (۲۱) بیان‌گر مجموع اگسرژی توان و حرارت تولیدی و همچنین اگسرژی هیدروژن تولیدی تقسیم بر مجموع اگسرژی بیوگاز مورد استفاده جهت احتراق و تغییر حالت و همچنین اگسرژی سامانه تولید بخار است.

جهت ارزیابی هر چه بهتر تحلیل اگسرژی سامانه، اگسرژی تخریب که تفاوت اگسرژی ورودی و خروجی هر بخش از سامانه ترمودینامیکی است، تعریف می‌شود که خود بیان‌گر میزان بازگشت ناپذیری هر جزئی از چرخه ترمودینامیکی است (Ghaebi et al., 2019b):

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{in,k} - \dot{E}_{out,k} \quad (19)$$

جدول ۴ کلیه روابط اگسرژی اجزای تشکیل دهنده سامانه ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. جریان‌های مختلف سامانه ترمودینامیکی پیشنهادی در جدول ۵ آورده شده است.

خواص ترمودینامیکی شامل فشار و دما و آنتالپی و انتروپی و همچنین دبی جرمی و مقدار اگسرژی

جدول ۴- روابط تحلیل اگسرژی بر اجزای سامانه ترمودینامیکی (Ahmed et al., 2015; Gargari et al., 2018; Ghaebi et al., 2019b)

بخش‌های مختلف	معادله موازنه انرژی
کمپرسور هوا	$\dot{E}_{D,AC} = \dot{W}_{AC} - (\dot{E}_2 - \dot{E}_1)$
پیش گرم کن هوا	$\dot{E}_{D,APH} = (\dot{E}_6 - \dot{E}_7) - (\dot{E}_3 - \dot{E}_2)$
محفظه احتراق	$\dot{E}_{D,CC} = \dot{E}_3 + \dot{E}_{12} - \dot{E}_4$
توربین گازی	$\dot{E}_{D,GT} = \dot{E}_4 - \dot{E}_5 - \dot{W}_{GT}$
پیش گرم کن بیوگاز	$\dot{E}_{D,BPH} = (\dot{E}_{22} - \dot{E}_{23}) - (\dot{E}_{14} - \dot{E}_{13})$
پیش گرم کن آب	$\dot{E}_{D,WPH} = (\dot{E}_{23} - \dot{E}_{24}) - (\dot{E}_{16} - \dot{E}_{15})$
میکسر	$\dot{E}_{D,MIX} = \dot{E}_{14} + \dot{E}_{17} - \dot{E}_{19}$
رادیاتور	$\dot{E}_{D,RAD} = (\dot{E}_{24} - \dot{E}_{25}) - (\dot{E}_{30} - \dot{E}_{29})$
ریفرمر	$\dot{E}_{D,RF} = (\dot{E}_5 - \dot{E}_6) - (\dot{E}_{21} - \dot{E}_{20})$
بخارساز	$\dot{E}_{VP} = \dot{Q}_{VP}(1 - \frac{T_0}{T_{HS}})$
	$\dot{E}_{D,VP} = \dot{E}_{VP} - (\dot{E}_{17} - \dot{E}_{16})$
بازیابی کننده	$\dot{E}_{D,REC} = (\dot{E}_{21} - \dot{E}_{22}) - (\dot{E}_{20} - \dot{E}_{19})$
واحد گرمایش	$\dot{E}_{D,HU} = (\dot{E}_8 - \dot{E}_9) - (\dot{E}_{28} - \dot{E}_{27})$
پیش گرم کن سوخت بیوگاز	$\dot{E}_{D,FPH} = (\dot{E}_7 - \dot{E}_8) - (\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11})$

جدول ۵- خواص ترمودینامیکی جریان‌های سامانه ترمودینامیکی (Ahmed et al., 2015; Gargari et al., 2018; Ghaebi et al., 2019b)

ردیف	جریان	T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg)	m (kg/s)	EX (kW)
۱	هوا	۲۹۸/۲	۱۰۱/۳	-۱۶۲/۷	۶/۷۰۶	۲۹/۷۹	۰
۲	هوا	۶۱۴/۴	۱۰۱۳	۱۶۳/۷	۶/۷۸۹	۲۹/۷۹	۸۹۸۷
۳	هوا	۸۰۰	۹۶۲/۴	۳۶۵	۷/۰۸۹	۲۹/۷۹	۱۲۳۱۲
۴	جریان گاز	۱۵۴۲	۹۱۴/۲	-۸۰/۱۷	۸/۰۶	۳۱/۵۵	۳۶۰۲۲
۵	جریان گاز	۱۰۵۱	۱۱۸/۲	-۷۰۵/۳	۸/۱۶۶	۳۱/۵۵	۱۵۳۰۸
۶	جریان گاز	۸۲۰	۱۱۲/۲	-۹۸۷/۹	۷/۸۸۲	۳۱/۵۵	۹۰۶۵
۷	جریان گاز	۶۳۷/۱	۱۰۶/۶	-۱۱۹۹	۷/۶۰۶	۳۱/۵۵	۵۰۰۱
۸	جریان گاز	۶۲۹/۹	۱۰۱/۳	-۱۲۰۷	۷/۶۰۸	۳۱/۵۵	۴۷۲۵
۹	گاز اگزوز	۳۵۰	۱۰۱/۳	-۱۵۱۳	۶/۹۶۸	۳۱/۵۵	۱۱۰۲
۱۰	سوخت بیوگاز	۲۹۸/۲	۱۰۱/۳	-۷۴۲۴	۷/۲۴۳	۱/۷۵۶	۳۲۵۸۳
۱۱	سوخت بیوگاز	۲۹۸/۲	۱۰۱۳	-۷۴۲۴	۶/۵۴۴	۱/۷۵۶	۳۲۹۵۰
۱۲	سوخت بیوگاز	۴۰۰	۱۰۱۳	-۷۲۷۹	۶/۹۶۱	۱/۷۵۶	۳۲۹۸۶
۱۳	بیوگاز	۲۹۸/۲	۳۰۳/۹	-۷۱۳۱	۷/۳۴۳	۱/۴۴	۳۱۹۰۶
۱۴	بیوگاز	۳۶۸/۲	۳۰۳/۹	-۷۰۲۷	۷/۶۵۸	۱/۴۴	۳۱۹۲۱
۱۵	آب	۲۹۸/۲	۳۰۳/۹	-۱۵۸۶۴	۰/۳۶۷	۱/۳۶۳	۶۸۳۸
۱۶	آب	۳۶۸/۲	۳۰۳/۹	-۱۵۵۷۱	۱/۲۵	۱/۳۶۳	۱۰۹/۱
۱۷	آب	۴۱۸/۲	۳۰۳/۹	-۱۳۱۹۶	۱۰/۶	۱/۳۶۳	۹۷۴/۳
۱۹	واکنش دهنده‌ها	۳۹۴/۷	۳۰۳/۹	-۱۰۰۲۷	۹/۰۹۵	۲/۸۰۳	۳۲۶۶۸
۲۰	واکنش دهنده‌ها	۹۷۱/۵	۲۰۲/۶	-۸۸۱۲	۱۱/۱	۲/۸۰۳	۳۴۳۹۴
۲۱	محصولات	۱۰۳۶	۱۰۱/۳	-۵۶۳۲	۱۴/۹۱	۲/۸۰۳	۳۹۸۳۹
۲۲	محصولات	۵۴۷/۷	۱۰۱/۳	-۶۸۴۷	۱۳/۳۳	۲/۸۰۳	۳۷۷۵۲

ادامه جدول ۵- خواص ترمودینامیکی جریان‌های سامانه ترمودینامیکی (Ahmed et al., 2015; Gargari et al., 2018; Ghaebi et al., 2019b)

ردیف	جریان	T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg)	m (kg/s)	EX (kW)
۲۳	محصولات	۵۲۰/۹	۱۰/۱۳	-۶۹۱۱	۱۳/۲۲	۲/۸۰۳	۳۷۶۷۴
۲۴	محصولات	۴۴۹/۳	۱۰/۱۳	-۷۰۷۸	۱۲/۸۷	۲/۸۰۳	۳۷۴۹۳
۲۵	محصولات	۳۴۰	۱۰/۱۳	-۷۳۳۰	۱۲/۲۳	۲/۸۰۳	۳۷۳۲۴
۲۶	هیدروژن	۳۴۰	۱۰/۱۳	۶۰۱/۹	۶۶/۶۵	۰/۲۲۲۹	۲۶۱۰۸
۲۷	آب	۲۹۸/۲	۱۰/۱۳	۱۰۴/۹	۰/۳۶۷	۴۴/۴۳	۲۲۲۰
۲۸	آب	۳۵۰	۱۰/۱۳	۳۲۱/۸	۱/۰۳۸	۴۴/۴۳	۲۹۷۲
۲۹	آب	۲۹۸/۲	۱۰/۱۳	۱۰۴/۹	۰/۳۶۷	۴/۰۳۲	۲۰۱/۴
۳۰	آب	۳۴۰	۱۰/۱۳	۲۷۹/۹	۰/۹۱۶	۴/۰۳۲	۲۴۶/۸

بحث و نتایج

مدل سازی سامانه ترمودینامیکی چرخه مورد نظر، کلیه عامل‌های موجود در فرایند تولید بیوهیدروژن و حرارت و همچنین انرژی الکتریکی را تحلیل می‌کند. سامانه پیشنهادی توانایی تولید ۵ الی ۴۰ مگاوات برق را دارد. در اینجا خروجی الکتریکی ۱۰ مگاوات برای تحلیل عامل‌های در نظر گرفته می‌شود.

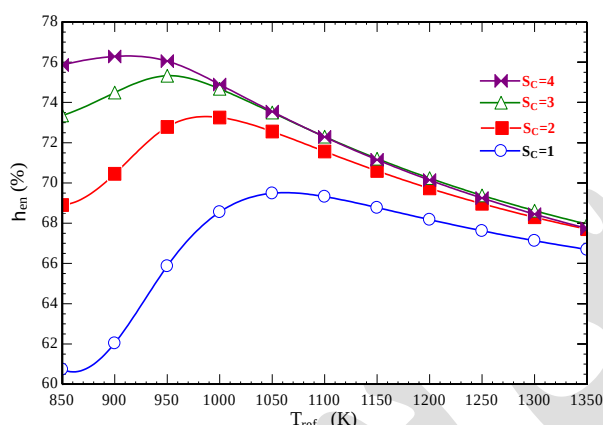
تأثیر دمای واکنش تغییر حالت بر سامانه ترمودینامیکی

با توجه به اینکه واکنش تغییر حالت به شدت گرماگیر است، دمای بین ۸۵۰ تا ۱۳۵۰ کلین در این تحقیق در نظر گرفته می‌شود (Ghaebi et al., 2019a). اشاره می‌گردد که افزایش بازده سامانه بستگی به عامل‌های مهم دیگری مانند نسبت مولی بخار آب به متان موجود در بیوگاز نیز دارد.

نمودار نمایش داده شده در شکل ۲ تغییرات بازده حرارتی را با توجه به افزایش دما از ۸۵۰ تا ۱۳۵۰ کلین در مقادیر مختلف S_C نشان می‌دهد. میزان بهینه بازده حرارتی در مقادیر $C_m = 0.50 - 0.66$ و $S_C = 2 - 3.6$ در حالی که دمای واکنش تغییر حالت بین ۹۶۵ تا ۱۰۳۶ کلین قرار گرفت به دست آمد. به عنوان مثال، در $S_C = 2$ و $C_m = 0.5$ بیشینه بازده حرارتی سامانه ۷۳/۲۹ درصد به دست آمد که این بیشینه بازده حرارتی در دمای واکنش تغییر حالت ۹۸۸ کلین رخ داد که منجر به مقدار تولید 0.1994 kg/s بیوهیدروژن شد.

نمودار شکل ۲ به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مولی بخار آب به متان، بازده حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش حرارت واکنش تغییر حالت، بازده حرارتی ابتدا افزایش و سپس کاهش را نشان می‌دهد. همچنین با

افزایش نسبت مولی بخار آب به گاز متان، اگرچه بازده حرارتی افزایش می‌یابد اما منجر به کاهش درجه حرارت واکنش تغییر حالت می‌شود. طبق این نتایج، با بهینه سازی میزان بخار آب می‌توان مناسب‌ترین دما را برای واکنش در نظر گرفت.

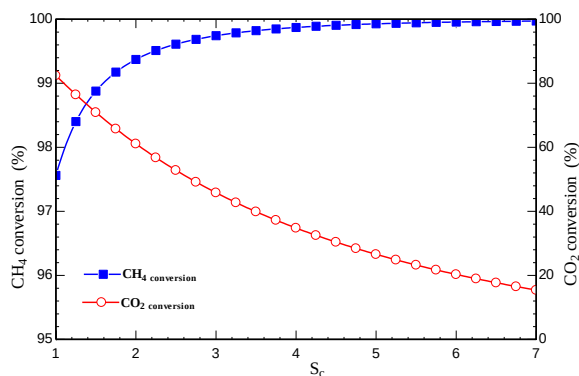


شکل ۲- تأثیر دمای واکنش تغییر حالت بر بازده حرارتی سامانه در مقادیر مختلف S_C

شکل ۳ تأثیر دمای واکنش بر بازده اگسرژی سامانه چندگانه را با توجه به مقادیر مختلف نسبت مولی بخار آب به متان موجود در بیوگاز نشان می‌دهد. از این شکل دیده می‌شود که با افزایش دمای واکنش تغییر حالت، بازده اگسرژی ابتدا افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیش از حد دمای واکنش تغییر حالت، بازده اگسرژی سامانه تولید بیوهیدروژن کاهش می‌یابد.

تأثیر افزایش نسبت مولی بخار آب به گاز متان موجود در مخلوط آماده تغییر حالت بر سامانه

چنانچه از شکل ۴ دیده می‌شود با افزایش S_C ، بازده حرارتی و اگسرژی سامانه هر دو در ابتدا افزایش می‌یابند و به نقطه اوج خود می‌رسند و پس از آن با افزایش مجدد



شکل ۵- تأثیر S_c بر نرخ تبدیل گاز متان و دی‌اکسیدکربن

تأثیر میزان نسبت مولی دی‌اکسیدکربن به متان بر عامل‌های سامانه

تأثیر میزان نسبت مولی دی‌اکسیدکربن به متان موجود در بیوگاز در فرایند تغییر حالت بر عامل‌های سامانه حائز اهمیت است. این مقدار از 0.2 تا $1/5$ می‌تواند متغیر باشد که در شکل ۶ دیده می‌شود. به طوری که با افزایش C_m بازده حرارتی و همچنین میزان تولید بیوهیدروژن کاهش می‌یابد. شکل ۷ تأثیر افزایش نسبت مولی دی‌اکسیدکربن به متان موجود در مخلوط آماده تغییر حالت را بر میزان تبدیل متان و دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش C_m میزان تبدیل گاز متان افزایش و گاز دی‌اکسیدکربن کاهش می‌یابد.

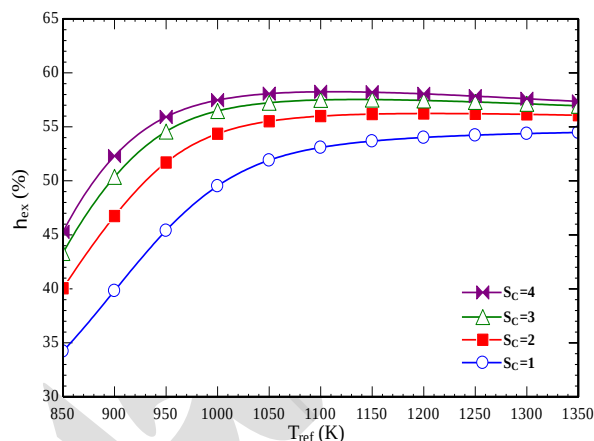
مقادیر تخریب اگسرژی در بخش‌های مختلف سامانه

شکل ۸ مقادیر مختلف نسبت تخریب اگسرژی را در اجزای سامانه ترمودینامیکی نشان می‌دهد که می‌تواند منجر به بهینه‌سازی اقتصادی و طراحی مجدد چرخه ترمودینامیکی برای اجزایی که نسبت تخریب اگسرژی بالایی دارند شود. همان‌طور که از شکل پیداست بیشترین نرخ تخریب اگسرژی مربوط به محفظه سوخت با حدود ۵۱ درصد و همچنین واحد تأمین حرارت مصارف خانگی با ۱۶ درصد و پس از آن سامانه تولید بخار با حدود ۸ درصد نرخ تخریب اگسرژی است.

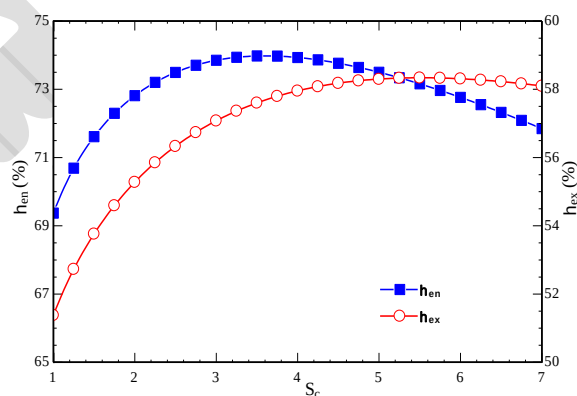
مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی

جدول ۶ مقایسه نتایج تأثیر دمای تغییر حالت در تحقیق حاضر را با دو پژوهش انجام شده مشابه نشان می‌دهد. اختلاف ناچیز اعداد گزارش شده در این تحقیق با کارهای قبلی خود بیان‌گر صحت داده‌های خروجی سامانه ترمودینامیکی در این مطالعه است.

S_c بازده حرارتی و اگسرژی نزولی می‌شود. تولید بیوهیدروژن با افزایش مقدار بخار آب افزایش می‌یابد، که علت آن کامل شدن واکنش بخار آب و متان است، به طوری که نرخ تبدیل متان به بیوهیدروژن به حداکثر می‌رسد.



شکل ۳- تأثیر دمای واکنش تغییر حالت بر بازده اگسرژی سامانه در مقادیر مختلف S_c



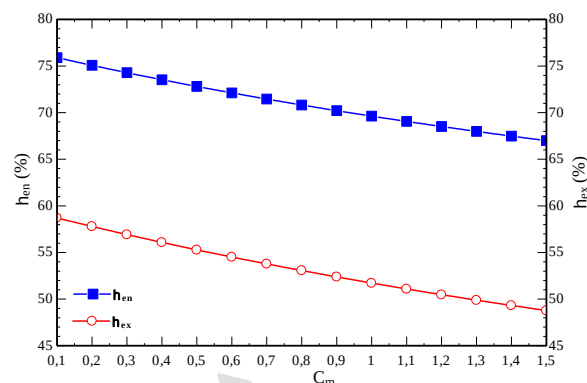
شکل ۴- تأثیر S_c بر بازده حرارتی و اگسرژی

بازده حرارتی سامانه در $S_c = 3/588$ به بیشینه مقدار خود (۷۴/۲۸ درصد) می‌رسد و بعد از آن روند بازده حرارتی سامانه کاهشی می‌شود.

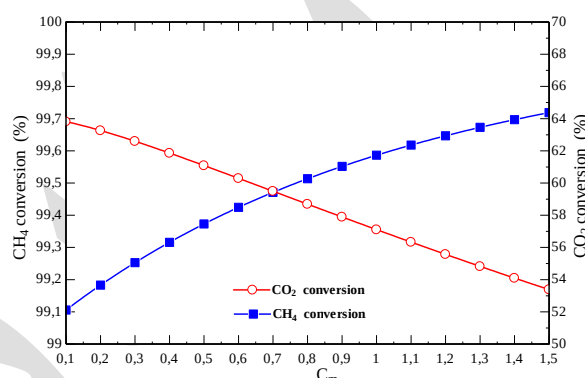
شکل ۵ تأثیر S_c بر میزان تبدیل گازهای متان و دی‌اکسیدکربن موجود در بیوگاز را نشان می‌دهد که عامل مهمی در کاهش اثر زیست محیطی این گازها است. همان‌طور که از شکل پیداست با افزایش نسبت مولی بخار آب به متان، مقدار تبدیل گاز متان افزایش می‌یابد و در نهایت به بیشینه ۱۰۰ درصدی می‌رسد، اما نرخ تبدیل گاز دی‌اکسید کربن از حدود ۸۲ درصد تا ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

گرفت. توان الکتریکی خروجی سامانه بین ۱۰ تا ۴۰ مگاوات است که در این تحقیق مقدار ۱۰ مگاوات در نظر گرفته شد. کلیه متغیرهای تصمیم‌گیری داده‌گذاری شدند و نتایج زیر حاصل شد:

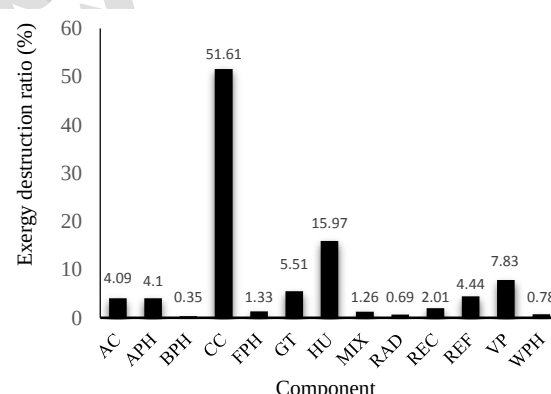
- تمامی داده‌های سامانه ترمودینامیکی پیشنهادی منطقی بوده و امکان استفاده از انرژی حرارتی سوختن بیوگاز به تنهایی جهت تولید توان الکتریکی و تولید هیدروژن به روش تغییر حالت بیوگاز مقدور است.
- زمانی که نسبت مولی بخار آب به متان موجود در بیوگاز در محدوده بین ۳/۶-۵/۵ قرار بگیرد، مقدار بازده حرارتی و اگسرژی به مقدار بیشینه خود خواهند رسید.
- در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ کلوین، وقتی نسبت مولی بخار آب به متان موجود در بیوگاز از ۱/۶ بزرگ‌تر است، تمامی متان به بیوهیدروژن و مونو اکسید کربن تبدیل می‌شود که از نظر زیست محیطی حائز اهمیت است.
- زمانی که CO_2 و CH_4 بترتیب برابر با ۰/۵۰ و ۰/۶۶ است و دمای واکنش تغییر حالت بین دمای ۱۰۳۶-۹۶۵ کلوین قرار دارد، مقدار تولید بیوهیدروژن به بیشینه مقادیر خود می‌رسد.
- سامانه ترمودینامیکی پیشنهادی توانایی ارائه ۵ الی ۴۰ مگاوات برق را داراست که در این حالت میزان تولید بیوهیدروژن بین ۰/۱۱ الی ۰/۸۹۱ کیلوگرم بر ثانیه خواهد بود.
- محفظه سوخت با مقدار ۵۱ درصد، واحد تأمین حرارت مصارف خانگی با مقدار ۱۶ درصد و سامانه تولید بخار با ۸ درصد به ترتیب دارای بیشترین نرخ تخریب اگسرژی هستند.



شکل ۶- تأثیر C_m بر بازده حرارتی و اگسرژی سامانه



شکل ۷- تأثیر C_m بر نرخ تبدیل گاز متان و دی‌اکسیدکربن



شکل ۸- نرخ تخریب اگسرژی در اجزای سامانه ترمودینامیکی

جدول ۶- مقایسه نتایج تأثیر دمای تغییر حالت بر اساس درجه

کلوین بر روی نسبت تولید بیوهیدروژن بر متان ورودی

منبع	۹۰۰	۹۵۰	۱۰۰۰
(Ahmed et al., 2015)	۲/۳۵	۲/۶	۲/۸۵
(Gargari et al., 2018)	۲/۴	۲/۶۵	۲/۸
تحقیق حاضر	۲/۵۵	۲/۷۵	۲/۸۵

نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک سامانه چندگانه تولید بیوهیدروژن، توان الکتریکی و حرارت مصارف خانگی مورد بررسی قرار

منابع

- Ahmed, S., Lee, S. H., & Ferrandon, M. S. (2015). Catalytic steam reforming of biogas—effects of feed composition and operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(2): 1005-1015.
- Alves, H. J., Junior, C. B., Niklevicz, R. R., Frigo, E. P., Frigo, M. S., & Coimbra-Araújo, C. H. (2013). Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. *International journal of hydrogen energy*, 38(13): 5215-5225.
- Avraam, D. G., Halkides, T. I., Liguras, D. K., Bereketidou, O. A., & Goula, M. A. (2010).

- Ghaebi H., Yari M., & Ghavami gargari S. (2019b). Modeling a Novel Integrated System for Production Hydrogen and Power by Combining ORC Cycle & Solar Biogas Steam Reforming System. *Journal of Mechanical Engineering*, 49(2): 189-198 (In Persian)
- Ghaebi, H., Yari, M., Gargari, S. G., & Rostamzadeh, H. (2019a). Thermodynamic modeling and optimization of a combined biogas steam reforming system and organic Rankine cycle for coproduction of power and hydrogen. *Renewable energy*, 130: 87-102.
- Jannelli, E., Minutillo, M., Cozzolino, R., & Falcucci, G. (2014). Thermodynamic performance assessment of a small size CCHP (combined cooling heating and power) system with numerical models. *Energy*, 65: 240-249.
- Lin, K. W., & Wu, H. W. (2020). Hydrogen-rich syngas production and carbon dioxide formation using aqueous urea solution in biogas steam reforming by thermodynamic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20): 11593-11604.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Ebrahimi, R. (2019). Assess a new strategy and develop a new mixer to improve anaerobic microbial activities and clean biogas production. *Journal of Cleaner Production*, 206: 797-807.
- Minutillo, M., Perna, A., & Sorce, A. (2019). Combined hydrogen, heat and electricity generation via biogas reforming: Energy and economic assessments. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(43): 23880-23898.
- Muradov, N. Z., & Veziroğlu, T. N. (2005). From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy. *International journal of hydrogen energy*, 30(3): 225-237.
- Nahar, G., Mote, D., & Dupont, V. (2017). Hydrogen production from reforming of biogas: Review of technological advances and an Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 1032-1052.
- Roy, P. S., Song, J., Kim, K., Park, C. S., & Raju, A. S. (2018). CO₂ conversion to syngas through the steam-biogas reforming process. *Journal of CO₂ Utilization*, 25: 275-282.
- Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1987). Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes
- Tuna, C. E., Silveira, J. L., da Silva, M. E., Boloy, R. M., Braga, L. B., & Pérez, N. P. (2018). Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of the reformer prototype and catalysts. *International*
- An experimental and theoretical approach for the biogas steam reforming reaction. *international journal of hydrogen energy*, 35(18): 9818-9827.
- Bejan, A., & Moran, M. (1996). Tsatsaronis. G., Moran, M., "Thermal Design and Optimization.
- Carvalho, M., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2012). Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy*, 91(1): 245-254.
- Chattanathan, S. A., Adhikari, S., & Taylor, S. (2012). Conversion of carbon dioxide and methane in biomass synthesis gas for liquid fuels production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(23): 18031-18039.
- Chiodo, V., Galvagno, A., Lanzini, A., Papurello, D., Urbani, F., Santarelli, M., & Freni, S. (2015). Biogas reforming process investigation for SOFC application. *Energy Conversion and Management*, 98: 252-258.
- Chouhan, K., Sinha, S., Kumar, S., & Kumar, S. (2021). Simulation of steam reforming of biogas in an industrial reformer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(53): 26809-26824.
- Cruz, P. L., Navas-Anguila, Z., Iribarren, D., & Dufour, J. (2018). Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(26): 11688-11695.
- Dan, M., Mihet, M., & Lazar, M. D. (2020). Hydrogen and/or syngas production by combined steam and dry reforming of methane on nickel catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49): 26254-26264.
- Dincer, I., & Safari, F. (2019). Development and analysis of a novel biomass-based integrated system for multigeneration with hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(7): 3511-3526.
- Fan, Mun-Sing, Ahmad Zuhairi Abdullah, and Subhash Bhatia. "Catalytic technology for carbon dioxide reforming of methane to synthesis gas." *ChemCatChem* 1.2 (2009): 192-208.
- Gargari, S. G., Rahimi, M., & Ghaebi, H. (2018). Thermodynamic analysis of a novel power-hydrogen cogeneration system. *Energy Conversion and Management*, 171: 1093-1105.
- Gargari, S. G., Rahimi, M., & Ghaebi, H. (2019). Energy, exergy, economic and environmental analysis and optimization of a novel biogas-based multigeneration system based on Gas Turbine-Modular Helium Reactor cycle. *Energy Conversion and Management*, 185: 816-835.

Hydrogen Production using Solar Energy. *Journal of Mechanical Engineering*, 48(4): 319-328 (In Persian)

Zhu, J., Hu, K., Lu, X., Huang, X., Liu, K., & Wu, X. (2015). A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects. *Energy*, 93: 466-483.

Journal of Hydrogen Energy, 43(4): 2108-2120.

Wegeng, R., Diver, R., & Humble, P. (2014). Second law analysis of a solar methane reforming system. *Energy Procedia*, 49: 1248-1258.

Yari M., Ghaebi H., & Ghayami gargari S. (2019). Energy and Exergy Analysis of a Novel Biogas Steam Reforming System for

فهرست علائم

T_0	دمای مرده	AC (Air Compressor)	کمپرسور هوا
T_{HS}	دمای منبع گرمایی	APH (Air Preheater)	پیش گرم کن هوا
VP (Vaporizer)	بخارساز	BPH (Biogas Preheater)	پیش گرم کن بیوگاز
WPH (Water Preheater)	آب پیش گرم کن	CC (Combustion Chamber)	محفظه احتراق
$\dot{W}$	نرخ کار	C_m	نسبت مولی دی اکسید کربن به متان در مخلوط بیوگاز
$Y_{D,k}$	نسبت اگسرژی تخریبی	CV	حجم کنترل
$e_{ch,k}$	اگسرژی شیمیایی در حالت مرده	$\dot{E}_k$	اگسرژی عنصر
h	آنتالپی	$\dot{E}_{D,k}$	اگسرژی تخریبی عنصر
HU (Heating Unit)	واحد حرارت	$\dot{E}_{ch,k}$	اگسرژی شیمیایی عنصر
MIX (Mixer)	مخلوط کننده	$\dot{E}_{ph,k}$	اگسرژی فیزیکی عنصر
$\dot{m}$	نرخ جرمی	$\dot{E}_D$	اگسرژی تخریبی
$\dot{m}_k$	نرخ جرم جریان	$\dot{E}_{VP}$	نرخ اگسرژی بخارساز
$\dot{m}_{ref}$	نرخ جرم رفورمر	FPH (Fuel Preheater)	پیش گرم کن سوخت
$\dot{n}$	نرخ مولی	GT (Gas Turbine)	توربین گازی
n_{CO_2}	مولاریته دی اکسید کربن	LHV	ارزش حرارتی پایین
s	آنتروپی	Net	خالص
s_0	آنتروپی در حالت مرده	$\dot{Q}$	انرژی گرمایی حجم کنترل
y	نسبت مولی	$\dot{Q}_{HU}$	انرژی گرمایی دستگاه
y_k	نسبت مولی	R	ثابت جهانی گاز
ΔH	آنتالپی واکنش	RAD (Radiator)	رادیاتور
η_{en}	بازده حرارتی	REF (Reformer)	رفورمینگ
η_{ex}	بازده اگسرژی	REC (Recuperator)	بازیافت گرما (رکوپراتور)
η_{REC}	بازده رکوپراتور	S_C	نسبت مولی بخار آب به متان در مخلوط بیوگاز

Research paper

Energy and exergy analysis of power-hydrogen cogeneration system fueled by biogas

F. Seirafi¹, R. Ebrahimi^{2*}, H. Ghaebi³ and M. Bayareh⁴

Abstract

This paper aims to examine a combined heating, power, and hydrogen system production using biogas energy. Biogas steam and dry reforming methods are designed based on equilibrium data with the EES software. The results show that biogas has two principal roles for combustion and reforming processes simultaneously. The heating energy produced from biogas causes the reforming of biogas and improves the system efficiency by 74%. The maximum exergy efficiency and hydrogen production are obtained at 58.34% and 0.11-0.83 kg/s, respectively. The results also show that the combustion chamber has the highest exergy destruction by about 51% when the amount of electric power plant is considered between 5 to 40 MW. A parametric study for optimizing hydrogen production analyzes the key parameters. The optimal scenarios are when $CO_2/CH_4=0.50-0.66$, $H_2O/CH_4=2-3.6$, and the reforming temperature is 965-1036K. The conversion of methane and carbon dioxide shows the environmental effect of decreasing greenhouse gases. At 965K or higher, methane and carbon dioxide conversion rates reach 97% and 86%, respectively. This paper aims to develop a novel methodology for identifying thermodynamic cycle conditions and reforming processes only by use of biogas as the source of energy.

Keywords: Biogas, Reforming, Thermodynamic analysis, Exergy, Electric power.

Citation: Seirafi F. Ebrahimi R. Ghaebi H. and Bayareh M. 2023. Energy and exergy analysis of power-hydrogen cogeneration system fueled by biogas. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 29: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14235.651>

1- Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

* Corresponding Author: Rahim.Ebrahimi@gmail.com

Received: 2023/01/23

Accepted: 2023/03/31

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14235.651>