



## تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم تولید همزمان بر پایه محرک هیبریدی موتورهای احتراق داخلی و احتراق خارجی با منبع تغذیه گاز طبیعی و زیست توده

محمد مهدی بالاخلی<sup>۱</sup>، محمود مهرگان<sup>۲\*</sup>، سید مجید هاشمیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

### چکیده

در این مقاله یک سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و توان بر پایه محرک هیبریدی موتور احتراق داخلی و خارجی با منبع تغذیه زیست توده شامل یک راکتور گازی سازی با عامل گازساز هوا و از نوع جریان مخالف بررسی شده است و گاز سنتز حاصل در یک موتور احتراق داخلی گازسوز استفاده می شود. سیستم پیشنهادی با یک سیستم تولید همزمان مشابه با منبع تغذیه گاز طبیعی مقایسه شده و از دیدگاه های انرژی و اقتصادی بررسی شده است. نتایج نشان می دهد سیستم پیشنهادی که از گاز سنتز به عنوان سوخت ورودی بهره می برد، در مقایسه با سوخت گاز طبیعی، دارای برتری قابل توجهی از دیدگاه انرژی و اقتصادی خواهد بود، به طوری که بررسی پارامتر مربوط به درصد کاهش مصرف انرژی اولیه نشان می دهد در صورت استفاده از گاز سنتز به عنوان سوخت در محرک موتور احتراق داخلی در مقایسه با گاز طبیعی سبب صرفه جویی ۴۰/۵۵ درصد در مصرف انرژی ورودی خواهد شد. سیستم پیشنهادی با سوخت گاز سنتز از دیدگاه اقتصادی و درصد کاهش هزینه مصرف سوخت نیز دارای برتری محسوس می باشد به طوری که نتایج نشان از صرفه جویی ۸۳/۹۸ درصد در هزینه های ناشی از مصرف سوخت را نشان می دهد. نتایج همچنین نشان می دهد قیمت تمام شده تولید برق در سیستم پیشنهادی با منبع تغذیه زیست توده و گاز سنتز در دوره های مختلف موتور احتراق داخلی در مقایسه با هزینه مربوط به هزینه تولید برق با سوخت گاز طبیعی کمتر و به صرفه تر خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** سیستم تولید همزمان سرمایش گرمایش و توان؛ انرژی تجدیدپذیر؛ زیست توده؛ راکتور گازی ساز.

## Thermodynamic and economic analyses of combined generation system based on hybrid prime mover of internal and external combustion engines with natural gas and biomass power sources

Mohammaad Mahdi Balakheli<sup>1</sup>, Mahmood Mehregan<sup>2,\*</sup>, Seyed Majid Hashemian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Prof., Faculty of Mechanical Engineering., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Abstract

In this paper, a combined cooling, heating and power system based on hybrid drive of internal and external combustion engines with biomass power source with a gasification reactor with air gasification agent and of the counter flow type is discussed and the synthesis gas obtained from this equipment is used in a gas-burning internal combustion engine. This proposed system has been compared with a similar cogeneration system with a natural gas power source, and energy and economic perspectives have been used for the system. The results show that the proposed system that uses synthesis gas as input fuel will have a significant advantage from energy and economic viewpoints compared to the case where natural gas is used as the main fuel, where the parameter related to the percentage reduction of primary energy consumption shows that if synthesis gas is used as a fuel in the drive of the internal combustion engine, compared to natural gas, it will save 40.55% in input energy consumption. The proposed system with synthetic gas fuel has a significant advantage from the economic point of view and the percentage of fuel consumption reduction, so that the results show a savings of 83.98% in fuel consumption costs. The results also show that the total price of electricity production in the proposed system with biomass and synthesis gas power source in different rotational speeds of the internal combustion engine will be lower and more economical compared to the cost of electricity production with natural gas fuel.

**Keywords:** Combined cooling heating and power system; Renewable energy; Biomass ; Gasification

## ۱- مقدمه

استفاده از سیستم های تولید همزمان گرمایش، سرمایش و قدرت دارای مزیت های قابل توجهی در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی مانند نیروگاه های تولید توان، بویلرها و چیلرهای تراکمی و جذبی به منظور تامین انرژی الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی هستند. از جمله این مزایا می توان به کاهش میزان مصرف انرژی و به دنبال آن کاهش هزینه ناشی از مصرف سوخت و سازگاری با محیط زیست اشاره کرد. امروزه با توجه به پایین بودن راندمان سیستم های متداول تامین انرژی و بالا بودن میزان مصرف انرژی اولیه و انتشار آلاینده های زیست محیطی در آنها، توجه به سمت ارائه سیستم هایی نوین که دارای مزیت هایی مانند راندمان بالاتر، سازگاری بیشتر با محیط زیست و وابستگی کمتر به منابع انرژی تجدید ناپذیر مانند سوخت های فسیلی باشند، بیشتر از گذشته احساس می شود. در این بین استفاده از سیستم های تولید همزمان که قابلیت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر مانند منابع زیست توده به عنوان یک منبع تغذیه قابل اطمینان، پاک و سازگار با محیط زیست، ارزان و همچنین متمرکز نبودن در یک محیط خاص، می تواند یک انتخاب خوب باشد [۱]

از جمله مطالعاتی که در زمینه بهره مندی از منابع زیست توده در سیستم های تولید همزمان با محرک های مختلف به کمک راکتور های گازی سازی انجام شده است. می توان به مطالعات انجام شده توسط عسگری و همکاران [۲] اشاره کرد، آنها در مطالعات خود به ارزیابی یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش بر پایه محرک اصلی توربین گاز پرداختند. آنها در سیستم پیشنهادی خود از گاز طبیعی و گاز سنتز تولیدی به کمک منابع زیست توده به عنوان منبع تغذیه بهره بردند نتایج نشان می دهد در میان تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم پیشنهادی، محفظه احتراق دارای بیشترین تخریب انرژی است. در مطالعه دیگری که توسط بلفکنده و همکاران [۳] انجام گرفته است، آنها به بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش پرداختند آنها در مطالعات خود از گاز سنتز تولیدی در یک واحد گازی سازی با عامل گازساز هوا به عنوان منبع تغذیه بهره بردند و شرایط بهینه را برای عملکرد سیستم پیشنهادی خود ارائه کردند. فخاری و همکاران [۴] نیز به بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان برق و گرما پرداختند، سیستم پیشنهادی آنها شامل واحد

گازی سازی، واحد نمک زدایی، پیل سوختی از نوع پلیمری و سیکل رانکین آلی بود. آن ها در سیستم پیشنهادی خود از حرارت اتلافی در فرآیند اصلاح سوخت جهت تولید آب استفاده کردند و جهت تعیین عملکرد بهینه سیستم پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک بهره بردند.

اکرمی و همکاران [۵] نیز به ارزیابی یک سیستم تولید توان بر پایه محرک پیل سوختی کربنات مذاب و با بهره گیری از منابع زیست توده به کمک راکتور گازی ساز با عامل گازساز اکسیژن پرداختند، آنها در مطالعات خود جهت به حداقل رساندن انتشار آلاینده های کربن دی اکسید دو سناریو مختلف ارائه کردند.

ژانگ و همکاران [۶] به تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش بر پایه محرک اصلی پیل سوختی کربنات مذاب به همراه سیستم جذب کربن دی اکسید پرداختند. نتایج حکایت از صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه در سیستم پیشنهادی دارد. همچنین تحلیل انرژی نشان می دهد راکتور گازی سازی در میان تجهیزات استفاده شده دارای بیشترین تخریب انرژی به میزان ۳۶/۸۰ درصد است. ژی و همکاران [۷] به ارائه و بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان بر پایه محرک پیل سوختی پلیمری و با منبع گاز سنتز بدست آمده از یک راکتور گازی سازی با عامل گاز ساز هوا پرداختند. نتایج نشان می دهد در میان تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته راکتور گازی سازی دارای بیشترین میزان تخریب انرژی می باشد. وانگ و همکاران [۸] در مطالعات خود از سوخت گازی بدست آمده از منابع زیست توده به عنوان منبع تغذیه سیستم تولید همزمان بر پایه محرک پیل سوختی اکسید جامد بهره بردند آن ها در مطالعات خود تاثیر ترکیب سوخت گازی بر روی عملکرد سیستم پیشنهادی را مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان می دهد ارائه اینگونه از سیستم ها سبب بهبود راندمان الکتریکی خواهد شد. اکرمی و همکاران [۹] به ارزیابی یک سیستم تولید همزمان بر پایه محرک هیبریدی پیل سوختی کربنات مذاب و توربین گاز و شامل سیکل رانکین آلی پرداختند نتایج مربوط به تخریب انرژی نشان می دهد در میان تجهیزات استفاده شده، محفظه احتراق و راکتور گازی سازی دارای بیشترین تخریب انرژی می باشند. همچنین مهر و همکاران [۱۰] در مطالعات خود به تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان بر پایه محرک های پیل سوختی دما بالا کربنات مذاب و اکسید

صورت استفاده از عامل گاز ساز بخار آب بیشتر خواهد بود به طوری که میزان توان تولیدی توسط عامل های گازساز اکسیژن، هوا و بخار آب به ترتیب برابر ۲۶۶/۹ کیلووات، ۲۷۹/۴ کیلووات و ۲۸۱/۱ کیلووات خواهد بود.

در زمینه استفاده از منابع زیست توده در سیستم های تولید همزمان با محرک موتور احتراق داخلی نیز می توان به مطالعات انجام شده توسط بوروا و همکاران [۱۶] اشاره کرد آنها در سیستم پیشنهادی خود از بقایای جنگل به عنوان خوراک ورودی ارزان در راکتور گازی سازی بمنظور تولید گاز سنتز بهره بردند. آنها از سوخت تولیدی در محرک دیزلی بهره بردند. نتایج نشان می دهد از دیدگاه زیست محیطی ارائه چنین سیستمی سبب کاهش ۶۵ درصد در انتشار آلاینده  $NO_x$  خواهد شد. در مطالعه دیگری فتیگوسو و همکاران [۱۷] به ارزیابی و مقایسه دو سیستم تولید همزمان بر پایه محرک موتور احتراق داخلی و میکروتوربین گاز به منظور تولید برق با سوخت مصرفی گاز سنتز پرداختند. نتایج نشان می دهد که سیستم پیشنهادی با محرک اصلی موتور احتراق داخلی از دیدگاه ترمودینامیکی در مقایسه با سیستم پیشنهادی دیگر عملکرد مطلوب تری خواهد داشت. نادالتی و همکاران [۱۸] نیز در مطالعات خود به بررسی تاثیر استفاده از گاز سنتز حاصل از منابع زیست توده بر عملکرد موتور گاز سوز از دیدگاه زیست محیطی پرداختند. نتایج نشان می دهد، بین میزان CO موجود در گاز سنتز ورودی و میزان انتشار CO در گازهای خروجی از موتور گاز سوز ارتباط وجود دارد و ثابت نگه داشتن میزان CO و افزایش میزان هیدروژن در محتوای گاز سنتز ورودی سبب کاهش میزان انتشار CO در گازهای خروجی از موتور خواهد شد. صنایع و همکاران [۱۹] نیز به بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و کاغذ بر پایه محرک هیبریدی موتور گازسوز و توربین بخار و شامل یک واحد گازی سازی از نوع جریان موافق پرداختند. آن ها سیستم پیشنهادی خود را در دو حالت فروش و حالت بدون فروش کاغذ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد میزان صرفه جویی در مصرف انرژی و هزینه های ناشی از مصرف سوخت در سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

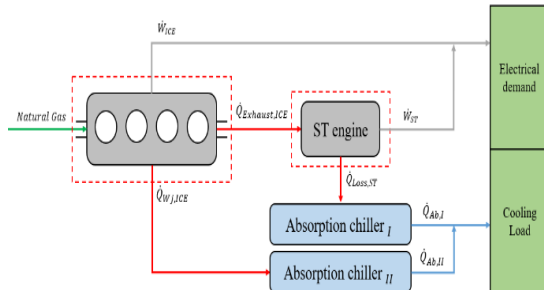
در مطالعات پیشین، بر روی سیستم های تولید همزمان بر پایه محرک های مختلف از جمله موتور احتراق داخلی و خارجی،

جامد پرداختند. آنها از سوخت گازی حاصل شده از منابع تجدیدپذیر زیست توده جهت تامین سوخت مورد نیاز محرک ها استفاده کردند، نتایج نشان می دهد استفاده از اینگونه محرک ها در کنار زیرسیستم هایی که امکان بازریابی حرارتی را دارند مانند چیلر جذبی و مخازن ذخیره گرما، می تواند پارامترهای طراحی از جمله راندمان کلی سیستم را بهبود ببخشد. بدایغی و همکاران [۱۱] نیز، چهار سناریو به منظور دستیابی به یک سیستم تولید همزمان بهینه از دیدگاه اقتصادی و اگرژی با سوخت گاز سنتز پرداختند. رحیمی و همکاران [۱۲]، با جایگزین کردن سوخت گاز سنتز به جای گاز طبیعی در یک سیستم تولید همزمان، به ارزیابی تحلیل ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی پرداختند. نتایج نشان می دهد افزایش رطوبت در زیست توده به عنوان منبع تجدید پذیر ورودی، سبب کاهش ارزش حرارتی سوخت گاز سنتز و همچنین کاهش درصد کربن مونوکسید و کربن دی اکسید در گاز سنتز خواهد شد.

به منظور بررسی تاثیر نوع عامل گازساز و ساختار راکتور گازی ساز بر روی عملکرد سیستم های پیشنهادی تحقیقات گسترده ای صورت گرفته است که از جمله این مطالعات می توان به مطالعات انجام شده توسط شایان و همکاران [۱۳] اشاره کرد، آنها در مطالعات خود به ارزیابی یک سیستم بر پایه محرک پیل سوختی اکسید جامد و شامل واحد گازی سازی پرداختند، آنها از هوا و بخار آب به عنوان عامل گازساز در واحد گازی سازی بهره بردند. نتایج نشان می دهد در شرایط بهینه، استفاده از عامل گازساز بخار آب به جای هوا باعث افزایش ۱۴/۸۰ درصد توان تولیدی خالص میشود. رابه و همکاران [۱۴] نیز به امکان سنجی یک راکتور گازی سازی دوگانه از نوع بستر ثابت و با منبع زیست توده چوب به منظور تولید گاز سنتز با کیفیت بالا پرداختند. نتایج نشان می دهد راندمان تبدیل انرژی سیستم پیشنهادی در حدود ۴۹/۶۰ درصد خواهد بود.

خلیل آریا و همکاران [۱۵] نیز به بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش بر پایه محرک اصلی توربین گاز پرداختند و از گاز سنتز تولیدی از منابع زیست توده به عنوان منبع تغذیه محرک سیستم پیشنهادی استفاده کردند. آنها در مطالعات خود جهت تولید گاز سنتز در واحد گازی سازی از عوامل گازساز هوا، اکسیژن و بخار آب بهره بردند. نتایج نشان می دهد توان تولیدی سیستم پیشنهادی در

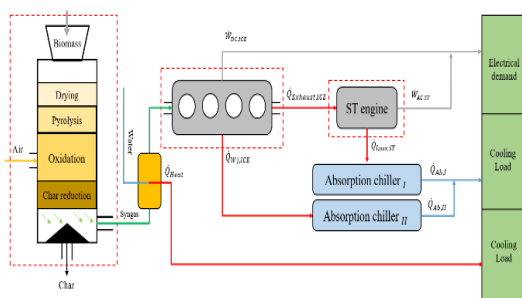
چیلر جذبی و از گازهای داغ خروجی از اگزوز موتور گازسوز در یک موتور استرلینگ استفاده می شود و از حرارت اتلافی این محرک نیز در یک چیلر جذبی بهره برده شده است.



شکل ۱- سیستم پیشنهادی شماره یک

• تشریح عملکرد سیستم شماره دو

سیستم شماره دو، یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش بر پایه محرک هیبریدی موتور گازسوز و موتور استرلینگ با منبع تغذیه زیست توده به عنوان یک منبع تجدید پذیر و پاک می باشد. زیست توده مورد استفاده در این سیستم، چوب است. در این سیستم گاز سنتز به کمک راکتور گازی ساز از نوع جریان موافق با عامل گازساز هوا تولید می شود و سوخت گازی تولید شده به عنوان سوخت مصرفی مورد استفاده قرار می گیرد. از پتانسیل موجود در گاز های داغ خروجی از راکتور گازی جهت تامین بار گرمایشی استفاده شده و از حرارت اتلافی در گازهای داغ خروجی از اگزوز موتور گازسوز جهت تامین انرژی مورد نیاز در گرمکن موتور استرلینگ استفاده می شود. از حرارت اتلافی در موتور استرلینگ نیز جهت تامین بار سرمایشی استفاده شده است.



شکل ۲- سیستم پیشنهادی شماره دو

تمرکز بر روی ارائه سیستم هایی با منبع گاز طبیعی و منابع زیست توده به عنوان یک منبع انرژی پاک و تجدید پذیر به صورت جداگانه بود، از این رو نیاز به مقایسه سیستم های تولید همزمان جدید جهت تامین انرژی الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی با استفاده از دو منبع تغذیه گاز طبیعی و زیست توده به صورت همزمان و بررسی تاثیر استفاده از هر کدام از این منابع بر روی عملکرد سیستم های پیشنهادی لازم به نظر می رسد. در این مطالعه به بررسی تاثیر استفاده از سوخت گاز طبیعی و گاز سنتز بدست آمده از منابع تجدیدپذیر زیست توده بر روی عملکرد سیستم تولید همزمان بر پایه محرک هیبریدی موتور احتراق داخلی گازسوز و موتور احتراق خارجی (موتور استرلینگ نوع آلفا) پرداخته شده است.

در این بخش به بیان نوآوری های کار حاضر به اختصار پرداخته شده است:

- ارائه و مقایسه یک سیستم همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش نوین با دو منبع تغذیه گاز طبیعی و گاز سنتز از دیدگاه انرژی و اقتصادی.
- بررسی عملکرد موتور احتراق داخلی گازسوز در صورت استفاده از منابع تغذیه گاز طبیعی و گاز سنتز.
- برآورد هزینه تولید برق توسط سیستم پیشنهادی با منبع تغذیه گاز طبیعی و گاز سنتز.

۲- طرح سیستم

شماتیک مربوط به سیستم های تولید همزمان پیشنهادی در شکل های ۱ و ۲ ارائه شده است. در سیستم های پیشنهادی از محرک های موتور احتراق داخلی گازسوز و یک موتور استرلینگ نوع آلفا به عنوان محرک هیبریدی استفاده شده است. در ادامه به تشریح عملکرد هر کدام از سیستم ها پرداخته خواهد شد.

• تشریح عملکرد سیستم یک

سیستم شماره یک، یک سیستم تولید همزمان قدرت و سرما بر پایه محرک هیبریدی موتور گازسوز و موتور استرلینگ می باشد. در این سیستم پیشنهادی از گاز طبیعی به عنوان منبع تغذیه استفاده شده است و از حرارت اتلافی سیستم خنک کاری موتور گازسوز به منظور تامین انرژی مورد نیاز در ژنراتور

$$imep = \frac{\oint pdV}{V_d} = \frac{W}{V_d} \quad (7)$$

$$fmep = 0.061 + 1.167P_{max} + 4.9 * 10^{-6} n_r \quad (8)$$

$$\dot{Q}_i = n Q_i \frac{fr}{2} \cdot i = WJ.Exhaust.loss \quad (9)$$

در رابطه (۵)  $\dot{W}_{ICE.AC}$  بیان کننده توان تولیدی موتور احتراق داخلی بر حسب کیلووات و  $fr$ ،  $N_{cyl}$ ،  $V_d$  و  $bmeP$  به ترتیب بیان کننده حجم جابجایی سیلندر بر حسب سانتی متر مکعب، تعداد سیلندر موتور احتراق داخلی، فرکانس موتور احتراق داخلی و فشار موثر متوسط ترمزی می باشند که به کمک رابطه (۶) قابل محاسبه می باشد. در روابط (۶)، (۷) و (۸) پارامترهای  $imep$  و  $fmep$  به ترتیب بیان کننده فشار موثر متوسط اندیکاتوری و فشار موثر متوسط اصطکاکی هستند. در رابطه (۸)،  $n_r$  دور دورانی موتور احتراق داخلی بر حسب دور بر دقیقه و  $P_{max}$  ماکزیمم فشار عملیاتی می باشد. در رابطه (۹) نیز  $\dot{Q}_i$  نرخ حرارت اتلافی بر حسب کیلووات می باشد که در موتور های احتراق داخلی به سه بخش حرارت اتلافی در سیستم خنک کاری، حرارت اتلافی در گازهای خروجی اگزوز و حرارت اتلافی غیر قابل بازیافت تقسیم می شوند و به ترتیب با اندیس های  $WJ.Exhaust$  و  $loss$  قابل نمایش هستند. در جدول (۱) مشخصات هندسی موتور گازسوز Mississippi ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی موتور گازسوز [۲۰].

واحد	پارامتر	مشخصه هندسی موتور
-	4	تعداد سیلندر
cm <sup>3</sup>	1820	حجم جابجایی
mm	84	قطر سیلندر
mm	82	فاصله بین محور میل لنگ و پین پیستون
-	8.5	نسبت تراکم
rpm	1800	سرعت دورانی

• مدل سازی راکتور گازی ساز

در این بخش معادلات حاکم جهت مدل سازی راکتور گازی سازی با عامل هوا ارائه خواهد شد. جهت مدل سازی واحد گازی ساز از روش تعادلی بهره برده شده است.

۳- مدل سازی

در ادامه مدل سازی تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم های پیشنهادی ارائه خواهد شد.

• مدل سازی موتور احتراق داخلی

در این مطالعه به منظور مدل سازی موتور احتراق داخلی از یک مدل ریاضی صفر بعدی- تک منطقه ای استفاده شده است. در مدل پیشنهادی نرخ انرژی داخلی، حرارت ورودی و توان خروجی را می توان به کمک روابط زیر محاسبه کرد [20].

$$\frac{dU}{d\theta} = m C_v \frac{dT}{d\theta} \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{d\theta} = \eta_{comb} LHV_F m_F \frac{dX_b}{d\theta} - \frac{dQ_{JW}}{d\theta} \quad (2)$$

$$\frac{dW}{d\theta} = p \frac{dV}{d\theta} \quad (3)$$

در رابطه (۱) تا (۳)،  $\frac{dT}{d\theta}$ ،  $LHV_{fuel}$ ،  $\eta_{comb}$ ،  $\frac{dX_b}{d\theta}$  و  $\frac{dQ_{JW}}{d\theta}$  به ترتیب بیان کننده نرخ دما، راندمان محفظه احتراق موتور احتراق داخلی، ارزش حرارتی پایین سوخت، نرخ کسر جرمی سوخت، نرخ حرارت اتلافی از سیستم خنک کاری و نرخ تغییر حجم موتور احتراقی می باشند.  $m$ ،  $C_v$  و  $p$  به ترتیب بیان کننده جرم، ظرفیت حرارتی مخصوص در حجم ثابت و فشار کاری (فشار عملیاتی) موتور احتراق داخلی می باشد. کسر جرمی سوخت را نیز می توان به کمک تابع و بر به شکل زیر محاسبه کرد [۲۰].

$$X_b = 1 - \exp \left[ -a_w \left( \frac{\theta - \theta_s}{\theta_a} \right)^{n_w+1} \right] \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $\theta_s$  و  $\theta_a$  به ترتیب زاویه شروع احتراق و مدت زمان احتراق بر حسب زاویه لنگ هستند.  $a_w$  و  $n_w$  ثوابت تابع و بر می باشند که برای موتور اشتغال جرقه ای به ترتیب برابر ۵ و ۲ در نظر گرفته می شوند.

بعد از محاسبه مقدار کار تولید شده و مقدار حرارت اتلافی در بخش های مختلف موتور احتراق داخلی گازسوز به کمک روابط زیر می توان، توان و نرخ حرارت اتلافی در سیستم خنک کاری و گازهای خروجی اگزوز را محاسبه کرد [۲۰].

$$\dot{W}_{ICE.AC} = N_{cyl} bmeP \frac{V_d fr}{2} \quad (5)$$

$$bmeP = imep - fmep \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{n_{H_2} n_{CO_2}}{n_{CO} n_{H_2O}} \left( \frac{P}{P_0} \right)^0 \quad (15)$$

در روابط بالا،  $n_{O_2}, n_{H_2}, n_{CO}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{CH_4}$  دبی مولی مربوط به هر جز بر حسب کیلومول می‌باشد و از واکنش اصلی بدست می‌آیند و ثوابت  $K_1, K_2$  به ترتیب بیان کننده ثوابت تعادل مربوط به واکنش‌های تشکیل متان، گاز-آب را می‌توان می‌باشند که به تغییر تابع گیبس به کمک رابطه زیر ارتباط داده می‌شوند [۸].

$$-\frac{\Delta G_1^0}{RT_g} = \ln K_1 \quad (16)$$

$$-\frac{\Delta G_2^0}{RT_g} = \ln K_2 \quad (17)$$

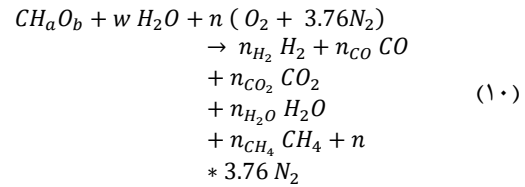
در روابط (۱۶) و (۱۷)،  $\Delta G_1^0, \Delta G_2^0$  به ترتیب تغییر تابع گیبس واکنش تشکیل متان، واکنش گاز-آب بر حسب ژول بر مول، دمای راکتور گازی سازی بر حسب کلویین و  $\bar{R}$  بیان کننده ثابت جهانی گازها می‌باشد و برابر  $8/314$  کیلوژول بر کیلومول کلویین در نظر گرفته می‌شود.

با فرض انجام فرآیند گازی سازی در شرایط بی دررو در یک دمای معین، معادله تعادل انرژی برای عامل گازساز هوا به شکل زیر قابل بیان است [۸].

$$\begin{aligned} \bar{h}_{f-biomass}^0 + w * \bar{h}_{f-H_2O}^0 + n \\ * (\bar{h}_{f-O_2}^0 + 3.76\bar{h}_{f-N_2}^0) \\ = n_{H_2} * (\bar{h}_{f-H_2}^0 + \Delta\bar{h}_{H_2}) \\ + n_{CO} * (\bar{h}_{f-CO}^0 + \Delta\bar{h}_{CO}) \\ + n_{CO_2} * (\bar{h}_{f-CO_2}^0 + \Delta\bar{h}_{CO_2}) \\ + n_{H_2O} * (\bar{h}_{f-H_2O}^0 + \Delta\bar{h}_{H_2O}) \\ + n_{CH_4} * (\bar{h}_{f-CH_4}^0 + \Delta\bar{h}_{CH_4}) \\ + n * 3.76 \\ * (\bar{h}_{f-N_2}^0 + \Delta\bar{h}_{N_2}) \end{aligned} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)،  $\bar{h}_{f-i}^0$  مربوط به آنتالپی تشکیل جز  $i$  ام بر حسب کیلوژول بر کیلومول و  $\Delta\bar{h}_i$  بیان کننده تغییر آنتالپی در جز  $i$  ام می‌باشند.

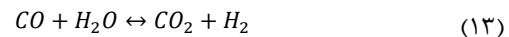
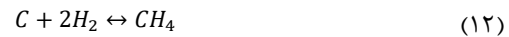
واکنش مربوط به گازی سازی زیست توده با عامل گاز ساز هوا را می‌توان به کمک رابطه زیر بیان کرد [۸،۲۱،۲۲].



در رابطه (۱۰)،  $CH_aO_b$  نشان دهنده فرمول شیمیایی زیست توده،  $w$  بیان کننده محتوی زیست توده می‌باشد.  $n_{O_2}, n_{N_2}, n_{H_2}, n_{CO}, n_{CO_2}, n_{H_2O}, n_{CH_4}, n_{N_2}$  تعداد مول‌های مربوط نیتروژن، متان، بخارآب، کربن دی اکسید، کربن منوکسید، هیدروژن، نیتروژن و اکسیژن در واکنش مربوط به فرآیند گازی سازی هستند، که با استفاده از موازنه جرم بین C, H, O، مقادیر بدست می‌آید.  $n$  نیز تعداد کیلوژول‌های عامل گازی ساز در هر کیلو مول از زیست توده می‌باشد. محتوای رطوبت برای هر مول زیست توده را می‌توان بر حسب رطوبت بر مبنای جرم به شکل زیر تعیین کرد [۸،۲۲].

$$w = \frac{M_{biomass} * MC}{M_{H_2O} * (1 - MC)} \quad (11)$$

در رابطه بالا،  $M_{H_2O}$  و  $M_{biomass}$  به ترتیب وزن مولکولی سوخت زیست توده و آب بر حسب کیلوگرم بر کیلومول و  $w$  بیان کننده محتوی رطوبت در زیست توده می‌باشند. واکنش‌های اصلی که در فرآیند گازی سازی با عامل هوا رخ می‌دهد به صورت زیر قابل بیان می‌باشند [۸].

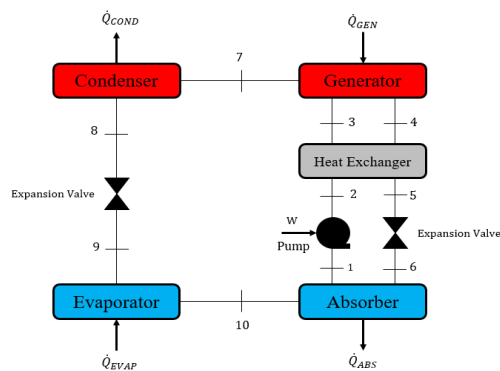


ثوابت تعادل واکنش‌های فوق که شامل واکنش‌های تشکیل متان، گاز-آب می‌باشند را می‌توان به کمک معادلات زیر بدست آورد [۸].

$$K_1 = \frac{n_{CH_4}}{n_{H_2}^2} \left( \frac{P}{P_0} \right)^{-1} \quad (14)$$

داغ خروجی از محرک‌های اولیه نیز باشند به ژنراتور چیلر جذبی تحویل داده می‌شود. از این رو استفاده از این نوع چیلرها می‌تواند یک روش مناسب برای استفاده از حرارت‌های اتلافی در سیستم‌های تولید همزمان می‌باشد.

در مطالعه حاضر از محلول آب و لیتیوم-بروماید به عنوان سیال کاری در چیلر جذبی پیشنهادی استفاده شده است. به طوری که لیتیوم-بروماید به عنوان جذب کننده و آب به عنوان مبرد در نظر گرفته می‌شود. در ادامه نیز روابط مربوط به چیلر جذبی با توجه به شکل (۳) ارائه می‌شود.



شکل ۳- شماتیک چیلر جذبی تک اثره آب-لیتیوم بروماید [۲۳]

برای مبدل حرارتی چیلر جذبی، روابط به شکل زیر قابل بیان هستند [۲۳].

$$Eff_{HX} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (19)$$

$$C_{hot} = \dot{m}_4 \left[ \frac{h_4 - h_5}{T_4 - T_5} \right] \quad (20)$$

$$C_{cold} = \dot{m}_2 \left[ \frac{h_3 - h_2}{T_3 - T_2} \right] \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_1 (h_3 - h_2) = \dot{m}_4 (h_4 - h_5) \quad (22)$$

در روابط (۱۹) تا (۲۲)،  $h$  و  $Eff_{HX}$  به ترتیب بیان کننده آنتالپی و بازده مبدل حرارتی در چیلر جذبی می‌باشند و  $\dot{Q}_{HX}$  حرارتی است که بین جریان‌های ورودی و خروجی از ژنراتور تبادل می‌شود.

برای ژنراتور چیلر جذبی نیز روابط به شکل زیر قابل بیان می‌باشند [۲۳].

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (23)$$

## جدول ۲- مشخصات عملیاتی راکتور گازی ساز با عامل

هوا [۸]

مقدار	پارامتر	نوع راکتور گازی ساز
۸۰۰ درجه سانتی‌گراد	دما راکتور گازی ساز	هوا
۱ بار	فشار راکتور گازی ساز	
۰/۳۵	نسبت هم ارزی	
۲۵ درجه سانتی‌گراد	دما زیست توده ورودی به اکتور گازی ساز	
۲۵ درجه سانتی‌گراد	دما هوا ورودی به راکتور گازی ساز	

در جدول (۳) مشخصات زیست توده چوب که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، ارائه شده است.

## جدول ۳: مشخصات شیمیایی زیست توده چوب [۲۱]

تراشه های چوب	ماده اولیه
	تحلیل نهایی
C(wt%)	۴۳/۸
H(wt%)	۵/۸
O(wt%)	۳۳/۴
N(wt%)	۱/۵
S(wt%)	۰/۸
	تحلیل تقریبی
Ash(wt%)	۶/۳
LHV(MJ/kg)	۱۷/۳
HHV(MJ/kg)	۱۸/۶
ترکیب شیمیایی	CH <sub>1.59</sub> O <sub>0.57</sub>

### • مدل‌سازی چیلر جذبی

در چیلرهای جذبی برخلاف چیلرهای تراکمی که از انرژی الکتریکی به عنوان انرژی اولیه استفاده می‌کنند از حرارت ورودی به عنوان انرژی اولیه بهره برده می‌شود. در چیلرهای جذبی، حرارت ورودی که می‌تواند حرارت بازیافتی از گازهای

موتور استرلینگ یک موتور احتراق خارجی می باشد در این مطالعه از موتور استرلینگ از نوع آلفا استفاده شده است. جهت مدلسازی موتور استرلینگ از رابطه Malmo استفاده شده، طبق این رابطه توان خروجی از موتور استرلینگ به کمک رابطه زیر قابل بیان می باشد [۲۴،۲۵].

$$\dot{W}_{ST} = (\eta_H * \eta_{mech} * \eta_{thermo}) * k_s * \dot{Q}_{input.ST} \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) پارامترهای  $\eta_H$ ،  $\eta_{mech}$  و  $\eta_{thermo}$  به ترتیب بیان کننده راندمان منبع حرارتی، راندمان مکانیکی موتور استرلینگ و راندمان ترمودینامیکی موتور استرلینگ،  $k_s$  ضریب موتور استرلینگ و  $\dot{Q}_{input.ST}$  مقدار حرارت ورودی به گرمکن می باشد که در این مطالعه همان حرارت اتلافی گازهای داغ خروجی از آگزوز موتور احتراق داخلی گازسوز می باشد. مقدار راندمان ترمودینامیکی به کمک رابطه زیر محاسبه می شود [۲۴،۲۵].

$$\eta_{th} = ((1 - \tau) / (1 + (1 - e) * (1 - \tau) / (k - 1)) * \ln \frac{V_1}{V_2}) \quad (31)$$

$$\tau = \frac{T_c}{T_H} \quad (32)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (33)$$

در رابطه (۳۱) تا (۳۳)،  $T_c$  و  $T_H$  دمای منبع حرارتی دما پایین و دما بالا بر حسب کلوین،  $C_p$  و  $C_v$  بیان کننده ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت و حجم ثابت برای سیال کاری،  $e$  ضریب بازیابی احیا کننده و  $V_1$  و  $V_2$  حجم موتور استرلینگ در شرایط انبساط و تراکم بر حسب سانتی متر مکعب هستند. مقدار پارامترهای اصلی جهت مدلسازی موتور استرلینگ در جدول (۵) ارائه شده است.

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 \quad (24)$$

$$\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_7 h_7 + \dot{Q}_{GEN} = 0 \quad (25)$$

در روابط (۲۳) تا (۲۵)،  $x$  و  $\dot{Q}_{GEN}$  به ترتیب بیان کننده کیفیت و حرارت تحویل داده شده به ژنراتور چیلر جذبی بر حسب کیلووات می باشد.  $\dot{m}_i$  بیان کننده دبی جرمی جریان در قسمت های مختلف سیستم چیلر جذبی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. روابط مربوط به کندانسور، اواپراتور و جذب کننده چیلر جذبی نیز با استفاده از روابط زیر قابل بیان هستند [۲۳].

$$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{EVAP} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \quad (27)$$

$$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_6 h_6 - \dot{Q}_{ABS} - \dot{m}_1 h_1 = 0 \quad (28)$$

$$COP_{Ab} = \frac{\dot{Q}_{EVAP}}{\dot{Q}_{GEN}} \quad (29)$$

در روابط (۲۶) تا (۲۹)،  $\dot{Q}_{ABS}$  و  $\dot{Q}_{COND}$  به ترتیب بیان کننده حرارت دفع شده در کندانسور و جذب کننده بر حسب کیلووات و  $\dot{Q}_{EVAP}$  نیز بیان کننده حرارت جذب شده در اواپراتور بر حسب کیلووات می باشند. و  $COP_{Ab}$  ضریب عملکرد چیلر جذبی و  $h$  بیان کننده آنتالپی مخصوص بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم می باشد.

در جدول (۴) داده های مورد نیاز جهت مدلسازی چیلر جذبی تک اثره از نوع آب- لیتیوم بروماید ارائه شده است.

جدول ۴- پارامترهای عملکردی چیلر جذبی تک اثره آب- لیتیوم بروماید [۲۳]

پارامتر	مقدار
فشار بخش پر فشار چیلر جذبی	۵ کیلوپاسکال
فشار بخش کم فشار چیلر جذبی	۰/۹ کیلو پاسکال
دما ژنراتور چیلر جذبی	۸۰ درجه سانتی گراد
دبی جریان ورودی به پمپ چیلر جذبی	۰/۳ کیلوگرم بر ثانیه
راندمان مبدل حرارتی	۰/۷

• مدلسازی موتور استرلینگ



جدول ۵ - مشخصات فنی در طراحی موتور استرلینگ [۲۴،۲۵]

پارامتر	مقدار
دمای منبع حرارتی سرد در موتور استرلینگ (K)	۵۱۰
دمای منبع حرارتی گرم در موتور استرلینگ (K)	۹۲۰
راندمان منبع حرارتی موتور استرلینگ (%)	۰/۹
راندمان مکانیکی موتور استرلینگ (%)	۰/۸۵
راندمان ترمودینامیکی موتور استرلینگ (%)	۰/۷
ضریب موتور استرلینگ (-)	۰/۷

جدول ۶ - توابع هزینه، تجهیزات بکار گرفته شده در سیستم های پیشنهادی [۲۸-۳۶]

پارامتر	تابع هزینه
راکتور گازی ساز	$Z_{\text{Gasifier}} = 1600 * \left( \dot{m}_{\text{biomass}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \right)^{0.67}$
مبدل حرارتی	$Z_{\text{HX}} = 2143 * A_{\text{HX}}^{0.514}$
چیلر جذبی	$Z_{\text{Ab}} = 14740.2 * (\dot{Q}_E)^{-0.6849} + 3.3$
موتور احتراق داخلی گاز سوز	$Z_{\text{ICE}} = \dot{W}_{\text{ICE}} * (0.65 * 16137 * \dot{W}_{\text{ICE}}^{-0.3799})$
موتور استرلینگ	$Z_{\text{ST}} = \dot{W}_{\text{ST}} * (2200)$

در جدول (۷) پارامترهای اقتصادی جهت ارزیابی اقتصادی ارائه شده است.

#### ۴- تحلیل انرژی

میزان مصرف سوخت در این سیستم ها را می توان در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی به کمک رابطه زیر نشان داد [۲۳].

$$TPES = \left( \frac{F^{Conv} - F^{CCHP}}{F^{Conv}} \right) * 100 \quad (34)$$

در رابطه (۳۴)،  $TPES$  بیان کننده درصد کاهش مصرف انرژی اولیه سوخت می باشد.  $F^{Conv}$  و  $F^{CCHP}$  نیز به ترتیب بیان کننده مقدار سوخت مصرفی در سیستم تولید همزمان پیشنهادی و سیستم های متداول تامین انرژی می باشند.

#### ۵- تحلیل اقتصادی

در ابتدا یک تحلیل اقتصادی به منظور برآورد هزینه مربوط به تولید برق ارائه شده است و سپس به محاسبه درصد کاهش هزینه ناشی از مصرف سوخت در صورت استفاده از سیستم های پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول پرداخته می شود. در جدول (۶) توابع هزینه مربوط به تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم پیشنهادی، ارائه شده است.

جدول ۷ - داده های اولیه جهت ارزیابی اقتصادی [۳۱-۳۱]

پارامتر	قیمت	مرجع
قیمت زیست توده چوب	۰/۰۵۸ دلار بر کیلوگرم	[۲۱]
قیمت برق	۰/۱۳ دلار بر کیلووات ساعت	[۲۳]
قیمت گاز طبیعی	۰/۵۲۸ دلار بر مترمکعب	[۲۹]
قیمت بار گرمایشی	۰/۱۲ دلار بر کیلووات ساعت	[۳۰]
قیمت بار سرمایشی	۰/۱۳ دلار بر کیلووات ساعت	[۳۱]
OY	۱۵ سال	[۳۱]
H	۸۰۰۰ ساعت	[۳۱]
$C_{UF}$	۰/۸۵	[۳۱]
$I_{yr}(\%)$	۶/۲۵	[۳۱]
$if(\%)$	۱/۵۴	[۳۱]
$f_{\text{TOP}}(\%)$	۲۰/۲	[۳۱]
$f_{\text{NTRC}}(\%)$	۵۲/۵	[۳۱]
$f_{\text{NOEPC}}(\%)$	۹	[۳۱]
TL(%)	۴	[۳۱]

#### • برآورد هزینه برق تولیدی در سیستم های پیشنهادی

بمنظور برآورد هزینه برق تولیدی از رابطه زیر استفاده شده است [۳۱].

$$CRF = \frac{I_{yr}(1 + I_{yr})^{OY}}{(1 + I_{yr})^{OY} - 1} \quad (38)$$

در رابطه (۳۸)،  $OY$  سال‌های عملیاتی و  $I_{yr}$  بیان کننده نرخ سود سالانه است، که به کمک رابطه زیر بدست می‌آید [۳۱].

$$I_{yr} = \frac{(NIR - if)}{(1 - if)} \quad (39)$$

در رابطه (۳۹)،  $if$  و  $NIR$  به ترتیب بیان کننده نرخ بهره اسمی و نرخ تورم سالانه می‌باشد. در رابطه (۳۷)، هزینه کل پنهان (TOP) به کمک رابطه زیر محاسبه میشود [۳۱].

$$TOP = TCP * (1 + f_{nTOP}) \quad (40)$$

در رابطه (۴۰)،  $TCP$  بیان کننده هزینه کل اجزا بر حسب دلار و  $f_{nTOP}$  بیان کننده فاکتور اصلاح برای ترم  $TOP$  می‌باشد، هزینه کل اجزا ( $TCP$ ) نیز به کمک رابطه زیر و با جمع کردن قیمت همه اجزا بدست می‌آید [۳۱].

$$TCP = \sum Z_{components} \quad (41)$$

در رابطه فوق،  $Z_{components}$  بیان کننده تابع هزینه تجهیزات می‌باشد، توابع هزینه مربوط به اجزا مختلف در جدول (۶) ارائه شده است. توابع هزینه با یک شاخص هزینه به روزرسانی می‌شوند، در مطالعه حاضر سال مرجع سال ۲۰۱۸ در نظر گرفته شده است و بدین ترتیب مولفه  $k$  در سال مرجع را می‌توان به کمک رابطه (۴۲) تعیین کرد [۳۱].

$$Z_{k.2018} = Z_k * \frac{CEPCI_{2018}}{CEPCI_Y} \quad (42)$$

در رابطه (۴۲)،  $CEPCI_{2018}$  و  $CEPCI_Y$  شاخص‌های هزینه برای سال جاری و سال اصلی می‌باشند. در این مطالعه هزینه سرویس و نگهداری سیستم‌های پیشنهادی برابر ۴ درصد از میزان هزینه خالص سرمایه سالانه ( $NCAP^{CCHP}$ ) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب هزینه کل سرویس و نگهداری از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۳۱].

$$OM^{CCHP} = 0.04 * NCAP^{CCHP} \quad (43)$$

$$CE^{CCHP} = \frac{NCAP^{CCHP} + OM^{CCHP} + FC^{CCHP}}{A_{DE}^{CCHP}} \quad (35)$$

در این مطالعه از رابطه فوق به عنوان یک رابطه مفید جهت برآورد قیمت برق تولیدی توسط سیستم پیشنهادی با منبع تغذیه گاز سنتز و گاز طبیعی استفاده می‌شود. در رابطه (۳۵)،  $CE^{CCHP}$  بیان کننده هزینه برق تولید شده توسط سیستم پیشنهادی بر حسب دلار بر کیلووات ساعت،  $NCAP^{CCHP}$  هزینه خالص سرمایه سالانه بر حسب دلار،  $OM^{CCHP}$  هزینه سرویس و نگهداری تجهیزات به کار گرفته شده در سیستم پیشنهادی بر حسب دلار،  $FC^{CCHP}$  هزینه سوخت ورودی به سیستم های پیشنهادی بر حسب دلار می‌باشد که در سیستم شماره یک، سوخت مصرفی گاز سنتز تولید شده از منابع تجدید پذیر زیست توده و در سیستم شماره دو، سوخت مصرفی گاز طبیعی می‌باشد.  $A_{DE}^{CCHP}$  بیان کننده میزان تولید برق سالانه بر حسب کیلووات ساعت توسط هر کدام از سیستم های پیشنهادی می‌باشد که در ادامه نحوه محاسبه و پارامترهای موثر در محاسبه آنها به تفصیل بیان خواهد شد. جهت محاسبه میزان تولید برق سالانه از رابطه زیر استفاده می‌شود [۳۱].

$$A_{DE}^{CCHP} = \dot{W}_{net} * H * C_{UF} * (1 - TL) \quad (36)$$

در رابطه (۳۶)،  $\dot{W}_{net}$  میزان خالص برق تولید شده توسط سیستم پیشنهادی بر حسب کیلووات می‌باشد،  $H$  میزان ساعات کارکرد سیستم در طول سال،  $C_{UF}$  ضریب بهره وری و  $TL$  نیز ضریب تلفات مربوط به انتقال می‌باشد، این مقادیر در جدول (۷) ارائه شده اند.

در رابطه (۳۵)،  $NCAP^{CCHP}$  میزان هزینه خالص سرمایه سالانه است و به کمک رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳۱].

$$NCAP^{CCHP} = TOP * CRF \quad (37)$$

در رابطه (۳۷)،  $TOP$  هزینه کل پنهان و  $CRF$  فاکتور بازایی سرمایه است که به کمک رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳۱].

جدول ۸- نتایج معتبر سازی برای مدل موتور احتراق داخلی گازسوز

$\eta_{EL}(\%)$	$\eta_{loss}(\%)$	$\eta_{Exhaust}(\%)$	$\eta_{WJ}(\%)$	$\eta_{EL}(\%)$
۲۸-۲۵	۱۵-۵	۴۵-۳۴	۲۶-۱۷	داده های سازنده [۳۲]
۲۳	۱۰	۴۰	۲۷	نتایج مدل ماگو [۲۰]
۲۲/۳	۱۰/۹	۴۱/۸	۲۵	نتایج مدل اربابی [۳۲]
۲۸/۲	۵/۴	۳۹/۴	۲۷	نتایج مدل مطالعه حاضر

در جدول (۹) نتایج مدل تعادلی ارائه شده برای واحد گازی ساز با عامل گازساز هوا با فرض آدیاباتیک بودن راکتور گازی سازی در مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی [۳۳] و نتایج مدل ارائه شده توسط زینال [۳۴] مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان از دقت قابل قبول مدل پیشنهادی دارد.

جدول ۹- نتایج معتبر سازی برای راکتور گازی سازی با عامل هوا (با رطوبت ۲۰ درصد)

Hydro gen	Hydro gen	Carbon dioxide	Metha ne	Nitro gen	نتایج مدل زینال [۳۴]
۲۱/۰۶	۲۱/۰۶	۱۲/۰۱	۰/۶۴	۴۶/۶۸	نتایج آزمایشگاهی [۳۳]
۱۵/۲۳	۱۵/۲۳	۱۶/۴۲	۱/۵۸	۴۲/۳۱	نتایج مدل مطالعه حاضر

در رابطه (۴۳)، بیان کننده هزینه سرویس و نگهداری تجهیزات بکار گرفته شده می باشد. هزینه خالص سوخت در یک سال نیز برابر رابطه زیر است [۳۱].

$$FC^{CCHP} = \dot{Z}_{fuel} * \dot{m}_{fuel} * LHV_{fuel} * H \quad (44)$$

در رابطه (۴۴)،  $\dot{Z}_{fuel}$ ،  $LHV_{fuel}$ ،  $\dot{m}_{fuel}$  و  $H$  به ترتیب قیمت سوخت، دبی سوخت ورودی، ارزش حرارتی سوخت و میزان ساعت کارکرد در طول سال می باشد.

• درصد کاهش هزینه مصرف سوخت

رابطه مربوط به درصد کاهش هزینه مصرف سوخت به شکل زیر بیان می شود [۲۳].

$$CR = \left( \frac{FC^{Conv} - FC^{CCHP}}{FC^{Conv}} \right) * 100 \quad (45)$$

در رابط (۴۵)،  $CR$  بیان کننده درصد کاهش هزینه مصرف سوخت می باشد.  $FC^{CCHP}$  و  $FC^{Conv}$  هزینه مصرف سوخت در سیستم تولید متداول تامین انرژی و سیستم تولید همزمان پیشنهادی می باشد.

۶- معتبر سازی

در این بخش به معتبر سازی و بررسی نتایج مدل های ارائه شده برای موتور احتراق داخلی گازسوز و راکتور گازی سازی با نتایج آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از مدل سازی محققان دیگر پرداخته شده است، که در ادامه به بررسی این نتایج پرداخته خواهد شد.

به منظور معتبر سازی موتور احتراق داخلی گازسوز نتایج حاصل از مدل حاضر که یک مدل ریاضی صفر بعدی می باشد با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط سازنده [۳۲] و نتایج مدل ریاضی ارائه شده توسط ماگو [۲۰] و اربابی [۳۲] مورد مقایسه قرار گرفته است، نتایج بدست آمده نشان از دقت مدل سازی انجام شده و صحت مدل سازی دارد. این نتایج شامل راندمان الکتریکی، راندمان گازهای داغ خروجی از اگزوز، راندمان سیستم خنک کاری و راندمان حرارتی غیر قابل بازیافت در موتور احتراق داخلی می باشند. در جدول (۸) این نتایج ارائه شده است.

## ۷- نتایج مدل‌سازی سیستم‌های پیشنهادی

در ادامه نتایج انرژی و اقتصادی بدست آمده از مدل‌سازی سیستم‌های پیشنهادی به تفکیک ارائه خواهد شد.

### • نتایج انرژی

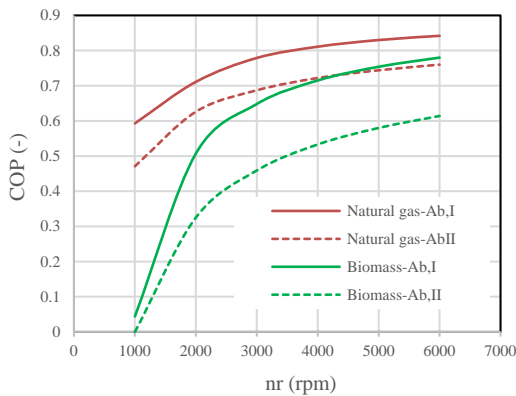
در جدول (۱۰)، نتایج عملکردی موتور احتراق داخلی گازسوز با منبع تغذیه زیست توده و گاز طبیعی بر حسب دور موتور احتراق داخلی به تفکیک ارائه شده است. نتایج عملکردی شامل دو پارامتر توان خروجی و حرارت اتلافی در موتور احتراق داخلی می باشد. همانطور که از جدول (۱۰) مشخص است با توجه به بالاتر بودن ارزش حرارتی منبع تغذیه گاز طبیعی در مقایسه با منبع تغذیه زیست توده و گاز سنتز تولیدی، در دوره‌های مختلف موتور احتراق داخلی سیستمی که گاز طبیعی به عنوان سوخت ورودی بهره می برد دارای توان تولیدی خالص و حرارت اتلافی بالاتر خواهد بود. در این مطالعه حرارت اتلافی در موتور احتراق داخلی در سه بخش حرارت اتلافی در سیستم خنک کاری، حرارت اتلافی در گازهای داغ خروجی از اگزوز و حرارت اتلافی غیرقابل بازیافت در نظر گرفته شده است. که در جدول (۱۰) مقادیر آن‌ها به تفکیک ارائه شده است. همانطور که از نتایج جدول قابل استخراج است به دلیل ارزش حرارتی بالا در سوخت گاز طبیعی، میزان انواع حرارت اتلافی در تمام دوره‌های موتور احتراق داخلی در مقایسه با سوخت گاز سنتز بالاتر می باشد، به طوری که در دور ۴۰۰۰ دور در قیقه توان تولیدی و حرارت اتلافی کل در موتور احتراق داخلی در صورت استفاده از سوخت گاز طبیعی به ترتیب برابر ۵۵/۰۸ کیلووات و ۱۷۸/۴۰ کیلووات می باشد این در حالی است در همین دور کاری میزان توان تولیدی و حرارت اتلافی در صورت استفاده از گاز سنتز به عنوان سوخت مصرفی به ترتیب برابر ۲۷ و ۸۵/۷۰ کیلووات خواهد بود.

جدول ۱۰- نتایج عملکردی موتور احتراق داخلی (شامل حرارت کل تولیدی، توان خالص تولیدی و حرارت‌های اتلافی در سیستم خنک کاری، گازهای خروجی اگزوز و حرارت اتلافی غیر قابل بازیافت)

دور موتور احتراق داخلی		(rpm)۴۰۰۰		(rpm)۲۰۰۰	
نوع سوخت مصرفی		گاز طبیعی	زیست توده	گاز طبیعی	زیست توده
$\dot{Q}_{LICE}$ (kW)	۴۲/۸۴	۸۹/۲۰	۸۵/۷۰	۱۷۸/۴۰	۱۲۸/۵۴
$\dot{W}_{ICE,AC}$ (kW)	۱۲/۹۲	۲۶/۴۱	۲۷/۰۰	۵۵/۰۸	۴۱/۳۷
$\dot{Q}_{ex,ICE}$ (kW)	۱۷/۷۱	۳۷/۱۳	۳۸/۰۷	۸۰/۴۴	۵۹/۱۴
$\dot{Q}_{w,ICE}$ (kW)	۸/۸۱	۱۸/۶۰	۱۳/۸۴	۲۸/۷۵	۱۷/۸۳
$\dot{Q}_{loss,ICE}$ (kW)	۳۳/۹	۷۱/۰۶	۶۷/۸	۱۴/۱۱	۱۰/۱۷

در جدول (۱۱)، میزان حرارت اتلافی ورودی به گرمکن موتور استرلینگ که به وسیله گازهای داغ خروجی از موتور احتراق داخلی گازسوز تامین می شوند و همچنین توان تولیدی موتور استرلینگ و حرارت اتلافی از این محرک که به عنوان حرارت اتلافی وارد ژنراتور چیلر جذبی خواهد شد، ارائه شده است. همانطور که از جدول (۱۱) قابل استخراج است با توجه به اینکه حرارت ورودی از سمت موتور احتراق داخلی گاز سوز به گرمکن موتور استرلینگ در صورت استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت مصرفی، بیشتر از حالتی است که از گاز سنتز استفاده شده است، انتظار می رود که توان تولیدی و حرارت اتلافی در موتور استرلینگ نیز در صورت استفاده از این نوع سوخت بیشتر از حالتی باشد که از گاز سنتز به عنوان سوخت مصرفی استفاده می شود.

در این مطالعه از حرارت اتلافی در سیستم خنک کاری موتور احتراق داخلی و حرارت اتلافی خروجی در موتور استرلینگ به عنوان انرژی ورودی در چیلرهای جذبی استفاده شده است. در شکل (۴) ضریب عملکرد چیلرهای جذبی بر حسب دور موتور گازسوز در صورت استفاده از سوخت گاز طبیعی و گاز سنتز بدست آمده از منبع زیست توده به تفکیک ارائه شده است. ضریب عملکرد چیلرهای جذبی با افزایش میزان حرارت اتلافی و به دنبال آن افزایش حرارت ورودی به ژنراتور چیلر جذبی افزایش می یابد. در این میان با توجه به بیشتر بودن نرخ حرارت اتلافی در موتور احتراق داخلی با سوخت گاز طبیعی و بالاتر بودن نرخ حرارت اتلافی به چیلر جذبی در صورت استفاده از این نوع سوخت انتظار می رود که ضریب عملکرد چیلر جذبی که در این سیستم مورد استفاده قرار می گیرد نیز بالاتر باشد.



شکل ۴- ضریب عملکرد چیلر جذبی در سیستم پیشنهادی با سوخت گاز سنتز و گاز طبیعی

در شکل (۵) به بررسی راندمان الکتریکی موتور احتراق داخلی گازسوز پرداخته شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود راندمان الکتریکی موتور احتراق داخلی به دلیل افزایش توان تولیدی با افزایش دور موتور، افزایش می یابد. از طرفی در صورت استفاده از گاز سنتز در مقابل گاز طبیعی اگر چه به دلیل بودن ارزش حرارتی پایین تر میزان توان تولیدی کمتر می باشد، اما میزان حرارت اتلافی در قسمت های مختلف موتور احتراق داخلی نیز کمتر خواهد بود و در واقع نسبت توان تولیدی به کل انرژی ورودی به موتور احتراق داخلی در حالتی که از سوخت گاز سنتز استفاده شود، بیشتر می شود. از این رو همانطور که نتایج نشان می دهد در تمام دورهای موتور

جدول ۸- نتایج عملکردی موتور احتراق خارجی (شامل توان خالص تولیدی، حرارت ورودی به موتور و حرارت های اتلافی)

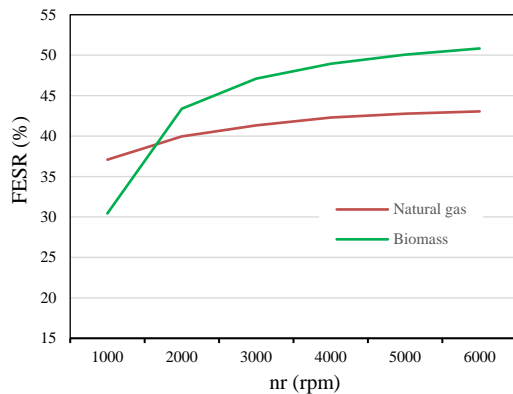
دور موتور احتراق داخلی	(rpm)۶۰۰۰		(rpm)۴۰۰۰		(rpm)۲۰۰۰		نوع سوخت مصرفی
	گاز طبیعی	زیست توده	گاز طبیعی	زیست توده	گاز طبیعی	زیست توده	
$\dot{Q}_{input,ST}$ (kW)	۱۲۵/۳۹	۵۹/۱۷	۸۰/۴۴	۳۸/۰۷	۳۷/۱۳	۱۷/۷۱	
$\dot{W}_{ST,AC}$ (kW)	۳۴/۰۰	۱۶/۰۴	۲۱/۸۱	۱۰/۳۲	۱۰/۰۶	۴/۸۰	
$\dot{Q}_{Output,ST}$ (kW)	۹۱/۳۸	۴۳/۱۲	۵۸/۶۲	۲۷/۷۴	۲۷/۰۶	۱۲/۹۱	

میزان توان، بار سرمایشی و گرمایشی تولیدی توسط سیستم پیشنهادی با منبع تغذیه زیست توده و گاز طبیعی در جدول (۱۱) ارائه شده است. همانطور که از جدول مشخص است میزان توان تولیدی در صورت استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت مصرفی، بدلیل بالاتر بودن ارزش حرارتی این نوع سوخت در مقایسه با گاز سنتز، بیشتر خواهد بود. از طرفی میزان بار سرمایشی تولیدی به دلیل بیشتر بودن میزان حرارت اتلافی در موتور احتراق داخلی در صورت استفاده از سوخت گاز طبیعی و از آنجایی که از حرارت اتلافی در سیستم خنک کاری موتور احتراق داخلی به عنوان انرژی ورودی در چیلرهای جذبی بهره برده شده است می توان انتظار بار سرمایشی تولیدی بالاتر در صورت استفاده از سوخت گاز طبیعی حاصل می شود. همچنین در سیستم پیشنهادی با سوخت گاز سنتز به دلیل استفاده از پتانسیل موجود در گازهای داغ خروجی قابلیت تولید بار گرمایشی وجود خواهد داشت.

جدول ۹- بار الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی تولید شده توسط سیستم پیشنهادی با منبع تغذیه زیست توده و گاز طبیعی

دور موتور احتراق داخلی	(rpm)۶۰۰۰		(rpm)۴۰۰۰		(rpm)۲۰۰۰		نوع سوخت مصرفی
	گاز طبیعی	زیست توده	گاز طبیعی	زیست توده	گاز طبیعی	زیست توده	
$\dot{W}_{EL}$ (kW)	۱۱۲/۳۸	۵۴/۵۴	۷۲/۰۵	۳۵/۴۶	۳۴/۶۵	۱۶/۸۴	
$\dot{Q}_{Heat}$ (kW)	۰	۴/۲۰	۰	۲/۸	۰	۱/۴	
$\dot{Q}_{cool}$ (kW)	۱۰۴/۸۵	۴۴/۵۸	۶۸/۲۹	۲۷/۲۱	۳۰/۸۷	۹/۴	

در مصرف سوخت به حدود ۳۰/۴۴ درصد می رسد و در دورهای بالای موتور احتراق داخلی (۱۰۰۰ دور در دقیقه) میزان درصد کاهش مصرف سوخت در صورت استفاده از سوخت مصرفی گاز سنتز در مقایسه با سوخت گاز طبیعی عملکرد مطلوب تری را نشان می دهد.



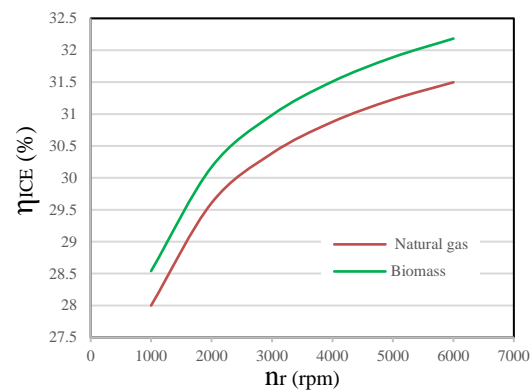
شکل ۶ - درصد کاهش مصرف انرژی اولیه سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی

#### • نتایج اقتصادی

در این مطالعه، نتایج اقتصادی شامل درصد کاهش هزینه مصرف سوخت سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی و هزینه تولید برق بر حسب دلار بر کیلووات ساعت می باشد.

در شکل (۷)، درصد کاهش هزینه مصرف سوخت در سیستم های پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی به عنوان یک پارامتر مهم دیگر جهت ارزیابی سیستم های تولید همزمان ارائه شده است. همانطور که از شکل (۷) مشخص است با افزایش دور موتور احتراق داخلی به دلیل افزایش توان تولیدی، حرارت های اتلافی قابل بازیافت توسط محرک هیبریدی و افزایش ضریب عملکرد چیلر جذبی، درصد کاهش هزینه مصرف سوخت نیز افزایش می یابد. در واقع از دیدگاه اقتصادی و درصد کاهش هزینه مصرف سوخت سیستم های پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول به مراتب عملکرد بهتری خواهند داشت. از طرفی با توجه به اینکه قیمت زیست توده در مقایسه با گاز طبیعی کمتر می باشد پیش بینی می شود سیستمی که از منبع تغذیه زیست توده استفاده می

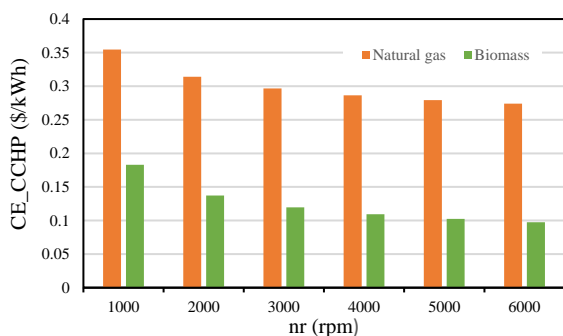
احتراق داخلی راندمان الکتریکی موتور در صورت استفاده از گاز سنتز به عنوان سوخت مصرفی بیشتر از سوخت گاز طبیعی خواهد بود. همانطور که در شکل (۵) مشخص است در دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه راندمان الکتریکی موتور گازسوز با سوخت گاز طبیعی و گاز سنتز به ترتیب در حدود ۳۰/۳۸ و ۳۰/۹۸ درصد می باشد.



شکل ۵- راندمان حرارتی موتور گازسوز در سیستم پیشنهادی با سوخت گاز سنتز و گاز طبیعی

یکی از پارامترهای مهم بمنظور مقایسه و بررسی سیستم پیشنهادی، درصد کاهش مصرف انرژی اولیه می باشد. در شکل (۶) به ارزیابی این پارامتر در سیستم پیشنهادی با سوخت مصرفی گاز طبیعی و گاز سنتز با یکدیگر و در مقایسه با سیستم متداول تامین انرژی پرداخته شده است. میزان مصرف انرژی اولیه در سیستم های تولید همزمان پیشنهادی به دلیل بازیابی حرارت اتلافی در مقایسه با سیستم های متداول کمتر خواهد بود. درصد کاهش مصرف انرژی اولیه در سیستم های پیشنهادی با افزایش دور موتور احتراق داخلی به دلیل افزایش توان تولیدی و افزایش میزان حرارت اتلافی، افزایش خواهد یافت. از طرفی در صورت استفاده از منبع تغذیه زیست توده و گاز سنتز به جز در دور پایین موتور احتراقی که ضریب عملکرد چیلر جذبی و بار سرمایشی تولیدی مقدار کمی می باشد، در دورهای بالا موتور احتراقی عملکرد مطلوب تری خواهد داشت، به طوری که در دور پایین موتور احتراق داخلی (۱۰۰۰ دور در دقیقه) درصد کاهش مصرف انرژی اولیه در سیستم پیشنهادی که از سوخت گاز طبیعی استفاده می کند در مقایسه با سیستم تولید جداگانه حدود ۳۴/۹۲ درصد می باشد در حالی که در صورت استفاده از سوخت گاز سنتز میزان درصد صرفه جویی

منبع تغذیه استفاده می کند در دوره‌های بالای موتور احتراق داخلی (۳۰۰۰ دور در دقیقه و بالاتر)، کمتر از متوسط قیمت برق شبکه می باشد. از این رو استفاده از آنها به همراه بهره مندی از حرارت اتلافی در بخش هایی مانند موتور استرلینگ و چیلر جذبی بسیار جذاب خواهد بود.



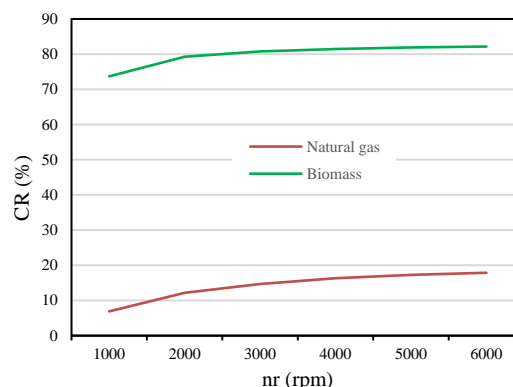
شکل ۸- هزینه تولید برق در سیستم پیشنهادی با سوخت گاز سنتز و گاز طبیعی

### ۸- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی یک سیستم تولید همزمان قدرت، گرمایش و سرمایش بر پایه محرک هیبریدی موتور احتراق داخلی گازسوز و موتور استرلینگ با منابع تغذیه گاز طبیعی و منبع زیست توده و گاز سنتز پرداخته شده است. در ادامه نتایج بدست آمده از کار حاضر به تفصیل بیان شده است.

- نتایج نشان می دهد سیستم های تولید همزمان با توجه به بازیابی و استفاده از حرارت اتلافی در زیر سیستم هایی مانند موتور استرلینگ و چیلرهای جذبی که قابلیت بهره مندی از حرارت اتلافی به منظور تولید توان و تامین بارهای گرمایش و سرمایش را دارند در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی دارای برتری قابل توجهی می باشند. از طرفی همان طور که در بخش قبل بیان شد، سیستم پیشنهادی که از منبع تغذیه زیست توده و گاز سنتز به عنوان سوخت ورودی استفاده می کند از دیدگاه انرژی و صرفه جویی در مصرف انرژی اولیه در مقایسه با سیستم دیگر که از گاز طبیعی به عنوان سوخت مصرفی بهره می برد، عملکرد مطلوب تری دارد. به طوری که در دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه موتور احتراق داخلی درصد کاهش مصرف انرژی اولیه در سیستم پیشنهادی که از

کند در مقایسه با سیستم دیگر عملکرد مطلوب تری داشته باشد، به طوری که مطابق شکل (۷) در تمام دوره‌های موتور احتراق داخلی درصد کاهش مصرف سوخت در سیستم پیشنهادی با سوخت مصرفی زیست توده به مراتب در مقایسه با سیستمی که از سوخت گاز طبیعی بهره می برد عملکرد مطلوب تری خواهد داشت.



شکل ۷- درصد کاهش هزینه مصرف سوخت سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم های متداول تامین انرژی

در شکل (۸)، هزینه برق تولیدی در سیستم های پیشنهادی با منبع تغذیه گاز طبیعی و زیست توده ارائه شده است. نتایج نشان می دهد سیستم پیشنهادی که از منابع زیست توده و گاز سنتز به عنوان سوخت ورودی استفاده می کند هر چند دارای میزان برق تولیدی کمتر در بازه یک سال در مقایسه با سیستم دیگر است، اما با توجه راندمان الکتریکی بالاتر موتور احتراق داخلی در صورت استفاده از سوخت گاز سنتز و از طرفی به دلیل پایین تر بودن هزینه خرید سوخت زیست توده در مقایسه با سوخت گاز طبیعی، دارای هزینه تولید برق کمتری نیز خواهد بود. همانطور که از شکل (۸) مشخص است هزینه تولید برق در تمام دوره‌های موتور احتراق داخلی با سوخت مصرفی گاز طبیعی از متوسط قیمت خرید برق از شبکه که حدود ۰/۱۳ دلار بر کیلووات ساعت می باشد، بیشتر است. از این جهت استفاده از این نوع سیستم به تنهایی و فقط به منظور تولید توان مقرون به صرفه نخواهد بود و عاملی که استفاده و ارائه این نوع سیستم را توجیه می کند امکان بازیابی حرارتی و بهره مندی از حرارت اتلافی در زیر سیستم هایی مانند موتور استرلینگ و چیلرهای جذبی می باشد. همچنین هزینه تولید برق در سیستم پیشنهادی که گاز سنتز به عنوان

- [4] Fakhari, I., Behzadi, A., Gholamian, E., Ahmadi, P. and Arabkoohsar, A.(2021). Design and tri-objective optimization of a hybrid efficient energy system for tri-generation, based on PEM fuel cell and MED using syngas as a fuel. *J. Cleaner Produc.*, 290, p.125205.
- [5] Akrami, E., Ameri, M. and Rocco, M.V.(2020). Integration of biomass-fueled power plant and MCFC-cryogenic CO<sub>2</sub> separation unit for low-carbon power production: Thermodynamic and exergoeconomic comparative analysis. *Energy Conversion and Management*, 223, p.113304.
- [6] Zhang, J., Cui, P., Yang, S., Zhou, Y., Du, W., Wang, Y., Deng, C. and Wang, S.(2023). Thermodynamic analysis of SOFC-CCHP system based on municipal sludge plasma gasification with carbon capture. *Applied Energy*, 336, p.120822.
- [7] Xie, N., Xiao, Z., Du, W., Deng, C., Liu, Z. and Yang, S. (2023) Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a proton exchange membrane fuel cell/absorption chiller CCHP system based on biomass gasification. *Energy*, 262, p.125595.
- [8] Wang, Y., Wehrle, L., Banerjee, A., Shi, Y. and Deutschmann, O.(2021) Analysis of a biogas-fed SOFC CHP system based on multi-scale hierarchical modeling. *Renewable Energy*, 163, pp.78-87.
- [9] Akrami, E., Ameri, M. and Rocco, M.V.(2021). Conceptual design, exergoeconomic analysis and multi-objective optimization for a novel integration of biomass-fueled power plant with MCFC-cryogenic CO<sub>2</sub> separation unit for low-carbon power production. *Energy*, 227, p.120511.
- [10] Mehr, A.S., Lanzini, A., Santarelli, M. and Rosen, M.A.(2021). Polygeneration systems based on high temperature fuel cell (MCFC and SOFC) technology: System design, fuel types, modeling and analysis approaches. *Energy*, 228, p.120613.
- [۱۱] برجی بداغی، مهدی، آتشکاری، کاظم، قربانی، صبا، و نریمان زاده، نادر. (۱۳۹۶). تحلیل ترمودینامیکی و بهینه سازی چندهدفی سیستم هیبرید متشکل از فرآیند گازی سازی زیست توده. پیل سوختی اکسید جامد و میکرو توربین گاز. مکانیک سازه ها و شاره ها، (۷) ۱، SID. <https://sid.ir/paper/212702/fa> ۱۳۳-۱۱۳
- [12] Rahimi M.J, Hamed M.H, Amidpour M, Thermodynamic, Economic and Case Study of Synthesis Gas Using the Biomass Gasification Reactor in Distributed Generation Systems, *Modares Mechanical Engineering*, 2019;19(6):1417-1428
- [13] Shayan, E., Zare, V. and Mirzaee, I., 2019. On the use of different gasification agents in a biomass fueled SOFC by integrated gasifier: A comparative exergo-economic evaluation and optimization. *Energy*, 171, pp.1126-1138.
- [14] Rabea, K., Michailos, S., Hughes, K.J., Ingham, D. and Pourkashanian, M.(2023). Comprehensive

گاز طبیعی استفاده می کند، برابر ۴۱/۳۳ درصد می باشد و برای سیستم پیشنهادی که از گاز سنتز بهره می برد این پارامتر در حدود ۴۷/۱۰ درصد می باشد.

- بررسی سیستم های پیشنهادی از دیدگاه اقتصادی و درصد کاهش هزینه مصرف سوخت نیز نشان می دهد که با توجه به کاهش درصد مصرف انرژی اولیه در سیستمی که از گاز سنتز به عنوان سوخت مصرفی بهره می برد و از طرفی با توجه به پایین بودن قیمت زیست توده در مقایسه با گاز طبیعی، درصد کاهش هزینه مصرف سوخت در این سیستم به شکل قابل توجهی مطلوب خواهد بود به طوری که در دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه میزان درصد کاهش هزینه مصرف سوخت در سیستم های پیشنهادی که از گاز طبیعی و گاز سنتز به عنوان سوخت ورودی بهره می برند به ترتیب در حدود ۱۴/۶۷ درصد و ۸۰/۷۷ درصد می باشد.
- با بررسی هزینه تولید برق در سیستم های پیشنهادی در مقایسه با قیمت خرید برق از شبکه می توان نتیجه گرفت که نقطه قوت استفاده از سیستم های تولید همزمان بهره مندی از حرارت اتلافی در تجهیزاتی می باشد که امکان استفاده از این حرارت را دارند. نتایج نشان می دهد هزینه تولید برق در سیستمی که از گاز سنتز به عنوان سوخت مصرفی استفاده می کند در دورهای متوسط و بالا موتور احتراق داخلی (۳۰۰۰ دور در دقیقه) در مقایسه با خرید برق از شبکه مقرون بصره می باشد.

## مراجع

- [1] Kirubakaran, A., Jain, S. and Nema, R.K. (2009) A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), pp.2430-2440.
- [2] Asgari, N., Saray, R.K. and Mirmasoumi, S.(2020) Energy and exergy analyses of a novel seasonal CCHP system driven by a gas turbine integrated with a biomass gasification unit and a LiBr-water absorption chiller. *Energy Conversion and Management*, 220, p.113096.
- [3] Balafkandeh, S., Zare, V. and Gholamian, E.(2019). Multi-objective optimization of a tri-generation system based on biomass gasification/digestion combined with S-CO<sub>2</sub> cycle and absorption chiller. *Energy Conversion and Management*, 200, p.112057.



- configuration low temperature differential Stirling engines. *Renewable Energy*, 30(3), pp.465-476.
- [25] Mehrpooya, M., Sayyad, S. and Zonouz, M.J. (2017). Energy, exergy and sensitivity analyses of a hybrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine. *J. cleaner produc.*, 148, pp.283-294.
- [26] Ehyaei, M.A., Ahmadi, A., Assad, M.E.H. and Rosen, M.A.(2020) Investigation of an integrated system combining an Organic Rankine Cycle and absorption chiller driven by geothermal energy: Energy, exergy, and economic analyses and optimization. *J. Cleaner Produc.*, 258, p.120780.
- [27] Yao, E., Wang, H., Wang, L., Xi, G. and Maréchal, F (2017) Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. *Energy conversion and management*, 138, pp.199-209.
- [28] Habibollahzade, A., Gholamian, E., Houshfar, E. and Behzadi, A. (2018) Multi-objective optimization of biomass-based solid oxide fuel cell integrated with Stirling engine and electrolyzer. *Energy conversion and management*, 171, pp.1116-1133.
- [29] Zhang, X., Liu, X., Sun, X., Jiang, C., Li, H., Song, Q., Zeng, J. and Zhang, G (2018) Thermodynamic and economic assessment of a novel CCHP integrated system taking biomass, natural gas and geothermal energy as co-feeds. *Energy Conversion and Management*, 172, pp.105-118.
- [30] Wang, S. and Fu, Z.(2019) Thermodynamic and economic analysis of solar assisted CCHP-ORC system with DME as fuel. *Energy Conversion and Management*, 186, pp.535-545.
- [31] Roy, D., Samanta, S. and Ghosh, S.(2020) Performance assessment of a biomass-fuelled distributed hybrid energy system integrating molten carbonate fuel cell, externally fired gas turbine and supercritical carbon dioxide cycle. *Energy Conversion and Management*, 211, p.112740.
- [32] Arbabi, P., Abbassi, A., Mansoori, Z. and Seyfi, M.(2017) Joint numerical-technical analysis and economical evaluation of applying small internal combustion engines in combined heat and power (CHP). *Applied Thermal Engineering*, 113, pp.694-704.
- [33] Shayan, E., Zare, V. and Mirzaee, I.J.E.C.(2018) Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents. *Energy Conversion and management*, 159, pp.30-41.
- [34] Zainal Z.A., Ali R., Lean C.H., Seetharamu K.N (2001), Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and management*, 42, pp. 1499–515
- process simulation of a biomass-based hydrogen production system through gasification within the BECCS concept in a commercial two-stage fixed bed gasifier. *Energy Conversion and Management*, 298, p.117812.
- [15] Khalilarya, S., Chitsaz, A. and Mojaver, P.(2021). Optimization of a combined heat and power system based gasification of municipal solid waste of Urmia University student dormitories via ANOVA and taguchi approaches. *Int. J. Hydr. Energ.*, 46(2), pp.1815-1827.
- [16] Borooah, R., Antolini, D., Piazzzi, S., Cordioli, E., Patuzzi, F. and Baratieri, M.(2023). Investigations into the performance and emissions of a small-scale CHP system using producer gas obtained from gasification of forest residues. *J. Energ. Instit.*, 110, p.101354.
- [17] Fatiguso, M., Valenti, A.R. and Ravelli, S.(2023). Comparative energy performance analysis of micro gas turbine and internal combustion engine in a cogeneration plant based on biomass gasification. *J. Cleaner Produc.*, p.139782.
- [18] Nadaleti, W.C. and Przybyla, G.(2020). NOx, CO and HC emissions and thermodynamic-energetic efficiency of an SI gas engine powered by gases simulated from biomass gasification under different H2 content. *Int. J. Hydr. Energ.*, 45(41), pp.21920-21939.
- [19] Sanaye, S., Khakpaay, N. and Chitsaz, A.(2020) Thermo-economic and environmental multi-objective optimization of a novel arranged biomass-fueled gas engine and backpressure steam turbine combined system for pulp and paper mills. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, p.100778.
- [20] Yun, K.T., Cho, H., Luck, R. and Mago, P.J.(2013) Modeling of reciprocating internal combustion engines for power generation and heat recovery. *Applied energy*, 102, pp.327-335.
- [21] Li, X., Kan, X., Sun, X., Zhao, Y., Ge, T., Dai, Y. and Wang, C.H.(2019) Performance analysis of a biomass gasification-based CCHP system integrated with variable-effect LiBr-H2O absorption cooling and desiccant dehumidification. *Energy*, 176, pp.961-979.
- [22] Sh. Khanmohammadi, K. Atashkari, R. Kouhikamali, Performance assessment and multi-objective optimization of a trigeneration system with modified biomass gasification model, *Modares Mechanical Engineering Vol.15, No. 9, pp. 209-222, 2015 (In Persian)*
- [23] Sheykhi, M., Chahartaghi, M., Balakheli, M.M., Kharkeshi, B.A. and Miri, S.M.(2019) Energy, exergy, environmental, and economic modeling of combined cooling, heating and power system with Stirling engine and absorption chiller. *Energy conversion and management*, 180, pp.183-195.
- [24] Kongtragool, B. and Wongwises, S. (2005). Investigation on power output of the gamma-