



Thermodynamic, Economic and Case Study of Synthesis Gas Using the Biomass Gasification Reactor in Distributed Generation Systems

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rahimi M.J.¹ MSc,
Hamed M.H.*¹ PhD,
Amidpour M.² PhD

How to cite this article

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.

ABSTRACT

The present paper presents the results of the thermodynamic and economical study of the use of synthesis gas from a biomass gasification reactor instead of natural gas at a synchronous power plant. First, the analysis of the system at the Pars khodro factory, which is fed with natural gas, was done, and the use of a gasifier for the synthesis of natural gas for the replacement of natural gas is investigated. The results of thermodynamic analysis indicate that the increase in the percentage of biomass fuel moisture had a slight effect on CH₄ and N₂ in synthetic gas, but it has a relatively modest effect on CO and CO₂ and also low thermal value. By using a gasifier reactor, a natural gas consumption of 4468316 cubic meters per year will be saved. The results of economic analysis indicate that due to the price of natural gas of 700 Rials per cubic meter, the purchase price of electricity is 650 Rials per kWh, the number of years of operation of 7 years and the profit rate of 7%, the net present value is at the zero frontier and this investment is at the threshold of being economically feasible. But if the rate of profit is to be raised, the lower the natural gas purchase price, or the lower price of electricity purchase, the improved system from the economic point of view is not profitable. In this regard, at a profit rate of 7%, the price of the biodegradable fuel is at most equal to 100,000 rials per ton, the net present value is at the zero frontier and the investment will have economic justification, But in larger quantities of biomass, investment will not be economically profitable.

Keywords Biomass; Gas Generator Engine; Gasifier; Net Present Value

¹Mechanical Engineering Department, KNT University of Technology, Tehran, Iran

²Energy Systems Department, KNT University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, KNT University of Technology, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

hamedm@kntu.ac.ir

Article History

Received: May 01, 2018

Accepted: November 03, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Comprehensive guide for combined heat and power ... [2] Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy ... [3] 11- Biomass gasification for synthetic liquid fuel ... [4] New concepts in biomass ... [5] Process simulation of biomass gasification integrated ... [6] Modeling of biomass gasification: A review. Renewable and Sustainable ... [7] Artificial neural network based modeling of biomass gasification ... [8] Thermodynamic analysis and comparison of downdraft ... [9] Modeling of trigeneration configurations based on biomass ... [10] Design optimization and analysis of a biomass gasification ... [11] Biomass gasification systems for residential ... [12] Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled ... [13] Comparative techno-economic analysis of biomass fuelled combined ... [14] Integrated biomass gasification combined cycle distributed ... [15] Review and analysis of biomass ... [16] Biomass gasification and pyrolysis: Practical ... [17] Thermodynamic equilibrium analysis of coal ... [18] Thermodynamics: An engineering ... [19] Experimental performance evaluation of aerogel ... [20] Thermal design and ... [21] Prediction of performance of a downdraft gasifier ... [22] Performance and characteristics of a biomass ... [23] Perry's Chemical Engineers' ...

آنالیز ترمودینامیک، اقتصادی و مطالعه موردی استفاده از گاز سنتز حاصل از راکتور گازی ساز زیست توده در سامانه های تولید پراکنده

محمدجواد رحیمی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

محمدحسین حامدی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مجید عمیدپور PhD

گروه مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،

ایران

چکیده

مقاله حاضر حاوی نتایج بررسی ترمودینامیک و اقتصادی استفاده از گاز سنتز حاصل از راکتور گازی ساز زیست توده به جای گاز طبیعی، در یک نیروگاه تولید همزمان است. ابتدا تحلیل سیستم موجود در کارخانه پارس خودرو که با گاز طبیعی تغذیه می شود، صورت پذیرفت و در ادامه به کارگیری گازی ساز در راستای تولید گاز سنتزی برای جایگزینی گاز طبیعی بررسی می شود. نتایج تحلیل ترمودینامیک نشان می دهد که افزایش درصد رطوبت سوخت زیست توده اثر جزئی روی درصد CH_4 و N_2 در گاز سنتزی داشته است، اما اثر کاهشی نسبتاً شدیدی بر درصد CO و CO_2 و همچنین ارزش حرارتی پایین دارد. با به کارگیری راکتور گازی ساز، به میزان 468316 متر مکعب در سال صرفه جویی در مصرف گاز طبیعی ایجاد می شود. نتایج تحلیل اقتصادی مبین این مطلب است که به ازای قیمت گاز طبیعی 700 ریال بر متر مکعب، قیمت خرید برق 650 ریال بر کیلووات ساعت، تعداد سال های عملکرد 7 سال و نرخ سود 7% ، ارزش خالص حال حاضر در مرز صفر است و سرمایه گذاری در مرز توجیه پذیری اقتصادی خواهد بود. اما در صورت بالاتر بودن نرخ سود، کمتر بودن نرخ خرید گاز طبیعی یا کم تر بودن قیمت خرید برق، سیستم ارتقا یافته از دیدگاه اقتصادی توجیه پذیر نیست. در همین ارتباط، در نرخ سود 7% ، به ازای قیمت سوخت زیست توده حداکثر برابر با 60000 ریال بر تن، ارزش خالص حال حاضر در مرز صفر است و سرمایه گذاری توجیه اقتصادی خواهد داشت، اما در مقادیر بالاتر قیمت زیست توده، سرمایه گذاری توجیه اقتصادی نخواهد داشت.

کلیدواژه ها: زیست توده، موتور ژنراتور گازسوز، گازی ساز، ارزش خالص حال حاضر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۲

نویسنده مسئول: hamedj@kntu.ac.ir

ویژگی در کنار یکدیگر، کارایی سیستم ها را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. منبع تغذیه کننده سیستم های فوق الذکر در ساده ترین حالت، منابع انرژی تجدیدناپذیر مانند گاز طبیعی بوده، اما گزینه های دیگری از نوع تجدیدپذیر نیز برای تغذیه این سیستم ها متصور است [1].

از مهم ترین گزینه هایی که در سال های اخیر تحقیقات گسترده ای راجع به آنها صورت گرفته است، منابع انرژی تجدیدپذیر زیست توده هستند. زیست توده یکی از منابع عمده در میان انواع منابع انرژی های نو بوده و تعاریف متعدد و گوناگونی از این منابع شده است. تعریف اتحادیه اروپا از زیست توده بدین صورت بوده که "زیست توده عبارت از اجزای قابل تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی (شامل مواد گیاهی و دامی)، جنگل ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل تجزیه است [2].

منابع زیست توده انواع گوناگونی دارند که مهم ترین آنها شامل زباله ها، فاضلاب های شهری و صنعتی، زائدات جنگلی - کشاورزی و دامی می شود. منابع زیست توده در حالت کلی از جنبه های منبع استخراج، دردسترس بودن، ارزش حرارتی و مشخصات ویژه مورد بررسی قرار می گیرند. ارزش حرارتی منابع زیست توده وابسته به نوع و مشخصات آنها بوده و برای انواع مختلف منابع زیست توده، در منابع آمده است [3-5]. همچنین بعضی از مشخصات خاص دیگر مانند میزان رطوبت منبع زیست توده نیز از پارامترهای تاثیرگذار هستند. مهم ترین مشخصاتی از منبع زیست توده که بر میزان و کیفیت انرژی قابل حصول از آن اثرگذارند، عبارت از درصد رطوبت موجود، درصد مواد فرار موجود، میزان خاکستر و زغال، میزان مواد آلی و غیرآلی تشکیل دهنده و هدایت حرارتی هستند [6]. این مشخصات از آنالیزهای تقریبی و نهایی سوخت زیست توده به دست می آیند. آنالیز تقریبی، کیفیت سوخت و در نتیجه مناسب بودن آن برای یک کاربرد خاص را آشکار می سازد. محتوای رطوبت، مواد فرار، کربن ثابت و خاکستر موجود در سوخت از طریق این آنالیز مشخص می شوند. آنالیز نهایی، نوع و درصد عناصر تشکیل دهنده سوخت را به دست می دهد. درصد کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و اجزای دیگر از قبیل سولفور و کلر از طریق این آنالیز مشخص می شود.

۲- پیشینه تحقیق

در حال حاضر مطالعه در خصوص سیستم های تغذیه شونده از منابع انرژی تجدیدپذیر علاقه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است، به نحوی که آرایش های گوناگونی از این سیستم ها با انواع از سیستم های استحصال انرژی از منابع تجدیدپذیر شامل گازی ساز از زیست توده، سیستم های انرژی خورشیدی و غیره مورد بررسی ترمودینامیک و اقتصادی قرار گرفته است. در ذیل به مهم ترین تحقیقاتی اشاره می شود که اخیراً در رابطه با سیستم های گازی ساز و استفاده از گاز خروجی آنها در موتور ژنراتورهای گازسوز صورت گرفته است.

شبیه سازی گازی ساز بستر ثابت فروکشند توسط روش شبکه عصبی مصنوعی موضوع یک پژوهش بوده است که در آن با در نظر گرفتن ورودی های لازم شامل ترکیب، میزان رطوبت و میزان خاکستر موجود در سوخت و نیز دمای ناحیه احیای راکتور، ترکیب محصولات خروجی و نسبت سوخت به هوا تعیین شد. در این رابطه نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد. همچنین اهمیت نسبی پارامترهای ورودی از

۱- مقدمه

در سه دهه اخیر پس از افزایش عمده بهای سوخت، اهمیت بحث سوخت جایگزین، افزایش کارایی انرژی، کاهش آلودگی زیست محیطی و تمایل به استفاده از فناوری های جدید از جمله تولید همزمان برق و حرارت به کمک سوخت های جایگزین افزایش یافته است. در روش های معمول برای تامین نیازهای الکتریکی و حرارتی، الکتریسته از شبکه توزیع سراسری و حرارت به وسیله سوزاندن سوخت های تجدیدناپذیر معمول (مانند گاز طبیعی و زغال سنگ) در بویلرها و تجهیزات گرمازا به روش تولید جداگانه تامین می شود. در مقابل این سیستم های متمرکز، روش های تولید غیرمتمرکز و مستقل با استفاده از فناوری تولید همزمان برق و حرارت (CHP) قرار دارد. از لحاظ ترمودینامیک این روش به معنی تولید همزمان دو شکل معمول انرژی یعنی انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی با استفاده از یک منبع انرژی اولیه است. انرژی گرمایی از بازیافت تلفات حرارتی این مولدهای مستقل به دست می آید و این حرارت در بخش های مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی به کار گرفته می شود. از طرفی الکتریسته تولیدی توسط این فناوری به صورت محلی، مستقل و غیرمتمرکز است که این دو

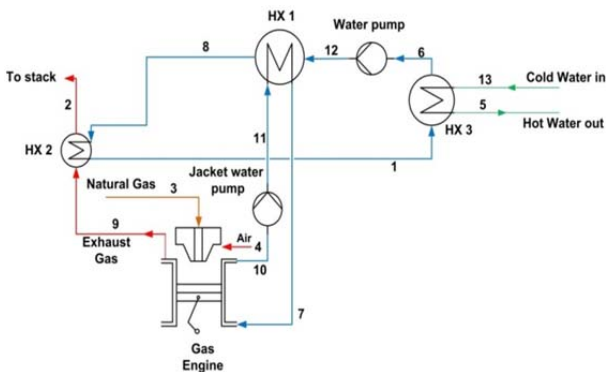
نباشد و هدف تولید توان خروجی بیشتر باشد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سیستم فوق در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [14].

با توجه به نیاز کارخانه پارس خودرو به ۲ مگاوات برق، از میان گزینه‌های توربین گاز، موتور پیستونی گازسوز و میکروتوربین، بهترین گزینه استفاده از موتور گازسوز پیستونی تشخیص داده شد. علل این امر از یک طرف ویژگی‌های شاخص این نوع موتورها از قبیل بازدهی مناسب و از طرف دیگر امکان تامین آنها از میان سازندگان مختلف خارجی بود. در قسمت اول تحقیق، مدل‌سازی سیستم تولید همزمان در حالتی که با گاز طبیعی تغذیه می‌شود (سیستم پایه)، انجام می‌گیرد و در بخش دوم با اضافه کردن ماژول گازی‌سازی که متشکل از راکتور گازی‌ساز، مبدل حرارتی پایین‌دست و سیستم تصفیه گازهای تولیدی است، به شبیه‌سازی سیستم ارتقایافته مبادرت می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از دو قسمت با هم مقایسه می‌شود.

۳- توصیف سیستم

۳-۱- حالت اول: سیستم پایه

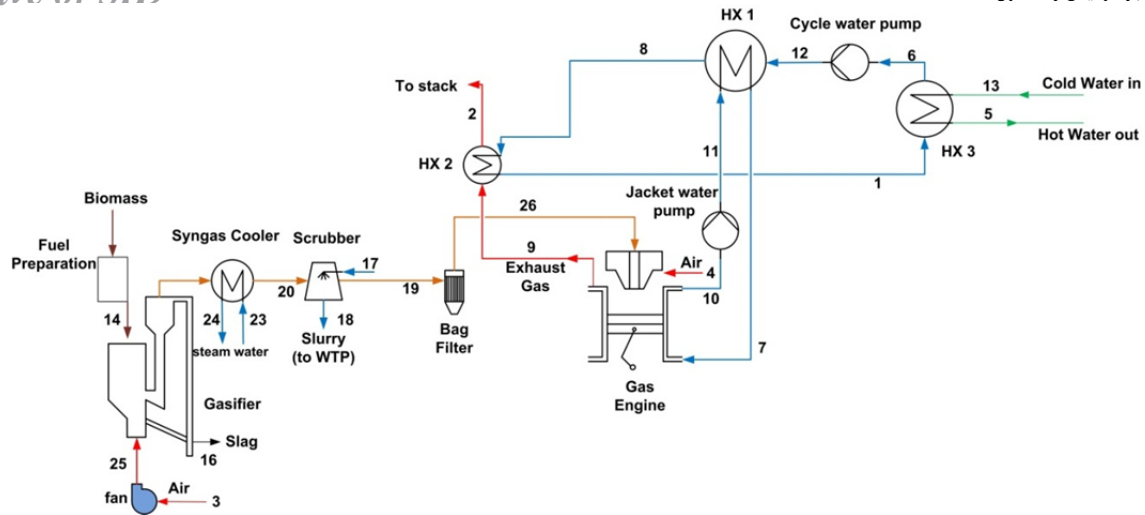
شکل شماتیک سیستم پایه تولید همزمان در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با ورود سوخت و هوای مورد نیاز به موتور، تولید توان صورت می‌گیرد. منابع ایجاد گرما در موتور عبارت از آب خنک‌کاری موتور، روغن روان‌کاری و گازهای داغ خروجی هستند. از میان این سه مورد، روغن روان‌کاری ارزش حرارتی زیادی نداشته است و حرارت آن ارزش بازیابی ندارد، اما حرارت دو جریان دیگر بازیابی می‌شود. روند بازیابی حرارت به این صورت است که سیال واسطه (در اینجا آب در نظر گرفته شده است)، ابتدا با عبور از یک مبدل حرارتی و از طریق آب خنک‌کاری موتور، گرم می‌شود. طی این فرآیند، دمای آب خنک‌کاری نیز کاهش می‌یابد و به موتور باز می‌گردد تا دوباره عملیات خنک‌کاری موتور را انجام دهد. سیال واسطه در ادامه وارد مبدل حرارتی دیگری می‌شود و این بار از طریق گازهای خروجی از موتور ژنراتور، بیشتر گرم می‌شود و به دمای لازم برای استفاده در مبدل نهایی (یعنی مبدلی که برای تهیه قسمتی از آب گرم مورد نیاز مجموعه به کار گرفته می‌شود) می‌رسد. سیال واسطه پس از انتقال حرارت خود در مبدل نهایی، دوباره وارد مبدل حرارت اول می‌شود و سیکل فوق تکرار می‌شود. در شکل ۲، شماتیک سیکل ارتقایافته مشاهده می‌شود که در آن ماژول گازی‌ساز به مجموعه اضافه شده است. مشخص بوده که مصرف گاز طبیعی در سیستم ارتقایافته وجود نخواهد داشت و سوخت ورودی سیستم، زیست‌توده است.



شکل ۱) فلودیگرام سیکل پایه

طریق معادله گارسون بررسی شد [7]. در مقاله دیگر کولپینگ سیستم گازی‌ساز نوع جریان رو به پایین با سه سیستم موتور اشتعال جرقه‌ای، موتور اشتعال تراکمی و توربین گاز در ۴ وضعیت عامل گازی‌ساز به شرح زیر بررسی شده است:

- ۱- عامل گازی‌ساز هوا باشد.
 - ۲- عامل گازی‌ساز اکسیژن خالص باشد.
 - ۳- عامل گازی‌ساز به نسبت ۶۰ به ۴۰ از اکسیژن و بخار باشد.
 - ۴- عامل گازی‌ساز به نسبت ۶۰ به ۴۰ از هوا و بخار باشد.
- در نهایت نسبت توان در حالات مختلف با هم مقایسه شده است. هدف این مقاله، یافتن توان خروجی از سیستم بوده که برای این منظور از دو مدل، یکی مدل تعادلی غیراستوکیومتریکی برای یافتن ترکیب و ارزش حرارتی گاز سنتز تولیدی و دومی مدلی در راستای یافتن توان حرارتی خروجی و بازدهی استفاده شده است. در نهایت، خروجی‌های مدل‌های فوق با نتایج آزمایشی انتشاریافته در مقالات مقایسه شده است [8]. در تحقیق دیگری تحلیل ترمودینامیک و اقتصادی کولپینگ سیستم گازی‌ساز با موتور گازسوز و چیلر جذبی در پنج حالت مختلف بررسی شده است. بخش‌های مشترک ۵ آرایش عبارت از سیستم گازی‌ساز، چیلر جذبی، مبدل‌های حرارتی برای بازیابی حرارت، موتور گازسوز احتراق داخلی و سیستم تصفیه گاز هستند. تفاوت ۵ آرایش در نوع چیلر جذبی به‌کارگرفته شده از نظر تک‌اثره یا دو اثره بودن و کارکردن با آب داغ یا بخار و نحوه بازیابی حرارت است. ظرفیت برق تولیدی سیستم بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلووات است [9]. در فعالیت تحقیقی دیگر، سیستمی ترکیبی متشکل از سیستم تولید گاز بستر شناور از زیست‌توده و سیستم تولید همزمان توان، حرارت و سرمایش (هیبریدی) بهینه شده است. تابع هدف، هزینه کل سالانه در نظر گرفته شده است [10]. در مقاله‌ای، استفاده از چوب صنوبر به‌عنوان منبع زیست‌توده در کنار سیستم گازی‌ساز بستر ثابت با جریان هوا به سمت پایین و کولپینگ آنها با موتور احتراق داخلی و مبدل‌های حرارتی در راستای تامین نیازهای الکتریکی و حرارتی بلوک ساختمان در حالت بار پایه مورد بررسی واقع شده و برق تولیدی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات بوده است. محاسبه ذخیره انرژی با بهره‌گیری از روش‌های ارزیابی اقتصادی صورت گرفته است [11]. در یک مقاله، شبیه‌سازی ترمودینامیک کولپینگ سیستم گازی‌ساز بستر ثابت با جریان رو به پایین و موتور اشتعال جرقه‌ای با بهره‌گیری از زائدات صنعت تولید روغن زیتون صورت گرفته است. شبیه‌سازی سیستم گازی‌ساز و سیستم فیلتراسیون و خنک‌کاری گازهای تولیدی در نرم‌افزار شبیه‌ساز سایکل تمپو و شبیه‌سازی موتور گازسوز و اتصال به شبکه در محیط MATLAB صورت گرفته است. خروجی سیستم، ۷۰ کیلووات انرژی الکتریکی و ۱۱۰ کیلووات انرژی حرارتی به‌ازای مصرف ۱۰۵ کیلوگرم بر ساعت انرژی زیست‌توده (شاخه و برگ درخت زیتون یا هسته ریزشده زیتون) است. بازدهی الکتریکی ۱۴٪ و بازدهی کلی ۳۶٪ گزارش شده است [12]. در مقاله دیگر، تحلیل فنی و اقتصادی برای بهره‌گیری از دو منبع زیست‌توده شامل ذرات درخت بید و علف میسکانتوس در ساختمان‌های تجاری با دو روش مختلف صورت گرفته است. هدف تولید ۱۵۰ کیلووات برق به‌همراه حرارت مازاد بوده است [13]. در تحقیق دیگر، سیستمی شامل گازی‌ساز با جریان رو به پایین به‌همراه تجهیزات جانبی برای تصفیه گاز تولیدشده و موتور گازسوز به‌همراه سیکل رنگین ارگانیک مورد بررسی ترمودینامیک قرار گرفته است. این سیستم برای زمانی که نیازی به حرارت از سیکل تولید همزمان



شکل ۲) فلودیگرام سیکل ارتقایافته

۴- تحلیل ترمودینامیک

در این قسمت، تحلیل ترمودینامیک سیستم تولید همزمان ارایه می‌شود. با توجه به نیاز ۲ مگاواتی مجموعه به برق، یک عدد موتور ژنراتور گازسوز MTU AE 20V4000 با ظرفیت اسمی ۲ مگاوات ساخت شرکت MTU برای مجموعه در نظر گرفته شده است. بدیهی است که نتایج حاصل کلی است و قابل تعمیم به هر تعداد موتور ژنراتور خواهد بود.

۴-۱- ورودی‌های مورد نیاز برای تحلیل ترمودینامیک

به منظور انجام تحلیل ترمودینامیک که خروجی نهایی آن، محاسبه میزان برق تولیدی خروجی، بازده حرارتی و دما، دبی و فشار در نقاط مختلف سیکل است، نیاز به اطلاعات ورودی سیستم داریم. این اطلاعات در مقاله حاضر در جدول ۱ آورده شده است (بعضی از اطلاعات جدول ۱ از مشخصات فنی سازنده موتور ژنراتور شرکت MTU استخراج شده است). همچنین سوخت زیست‌توده ورودی به گازی‌ساز، ذرات چوب در نظر گرفته شده که مشخصات آن مطابق با جدول ۲ است.

جدول ۱) ورودی‌های مورد نیاز برای تحلیل ترمودینامیک

پارامتر	حالت پایه	حالت ارتقایافته
دمای هوای ورودی (دمای طراحی: °C)	۲۵	۲۵
ارتفاع محل نصب موتور (m)	۱۵۰۰	۱۵۰۰
نوع سوخت ورودی	متان	گاز سنتز
دمای سوخت ورودی (°C)	۲۵	۵۸/۶
دمای گازهای خروجی از موتور (°C)	۴۷۰	۴۷۰
دمای گازهای خروجی از مبدل حرارتی (۲: °C)	۱۰۰	۱۰۰
دمای آب خنک‌کننده خروجی از موتور (°C)	۹۰	۹۰
دمای آب خنک‌کننده ورودی به موتور (°C)	۷۸	۷۸
دمای آب ورودی به مبدل حرارتی نهایی (۳: °C)	۶۰	۶۰
دبی آب ورودی به مبدل حرارتی نهایی (۳: kg/s)	۲۰	۲۰

جدول ۲) مشخصات سوخت زیست‌توده ورودی (آنالیز نهایی)

سخت	واحد	مقدار
کربن	درصد وزنی	۵۰
هیدروژن	درصد وزنی	۶
اکسیژن	درصد وزنی	۳۳
نیترژن	درصد وزنی	۱
سولفور	درصد وزنی	۰
خاکستر	درصد وزنی	۰
میزان رطوبت	درصد وزنی	۱۰

۴-۲- تحلیل ترمودینامیک گازی‌ساز

بهر برداری موثر از سیستم گازی‌ساز وابسته به تعدادی واکنش پیچیده شیمیایی شامل تجزیه در اثر حرارت (آتشکافت)، اکسیداسیون جزئی محصول حاصل از آتشکافت، تبدیل به گاز شدن کربن باقیمانده (زغال)، تبدیل قیر و هیدروکربن‌های سنگین ایجاد شده و غیره است. این فرآیندهای پیچیده و همچنین موارد دیگری از قبیل تاثیر زمان ماندگاری در راکتور، نیاز به توسعه مدل‌های ریاضی را آشکار می‌سازد. این مدل‌ها در حالت کلی شامل مدل‌های نرخ سینتیک، مدل‌های بر مبنای تعادل شیمیایی و ترمودینامیک و مدل‌های بر مبنای شبکه‌های عصبی هستند. بعضی مدل‌ها نیز از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز فرآیندی به‌عنوان مکمل مدل‌های نرخ سینتیک و تعادل شیمیایی بهره می‌گیرند [15].

۴-۲-۱- مدل‌های بر مبنای تعادل

مدل‌ها بر مبنای این فرض استوار است که مواد واکنش‌دهنده، تحت شرایط اختلاط کامل برای مدت زمان نامحدودی قرار می‌گیرند [16]. مدل‌های تعادلی به دو گروه مدل‌های استوکیومتریک و غیراستوکیومتریک تقسیم می‌شوند. در مدل‌های استوکیومتریک، واکنش‌های شیمیایی داخل راکتور و گونه‌های موجود شناسایی می‌شوند و برای تخمین ترکیب گازهای خروجی از راکتور به کار می‌روند. در این مدل‌ها، اغلب واکنش‌های مهم راکتور در نظر گرفته می‌شوند و از واکنش‌های دیگر صرف نظر می‌شود که این امر می‌تواند منجر به تولید خطا در نتایج حاصل شود. مشکل اخیر با بهره‌گیری از مدل‌های غیراستوکیومتریک قابل حل است که در آنها از اصل حداقل‌سازی انرژی آزاد گیبز استفاده می‌شود [17]. مطابق با این اصل، یک واکنش شیمیایی در دما و فشار مشخص در راستای کاهش تابع گیبز پیش می‌رود. وقتی تابع گیبز به مقدار حداقل خود می‌رسد، واکنش، متوقف و تعادل شیمیایی برقرار می‌شود. بنابراین معیار تعادل شیمیایی را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ نوشت [18].

$$(dG)_{T,p} = 0 \quad (1)$$

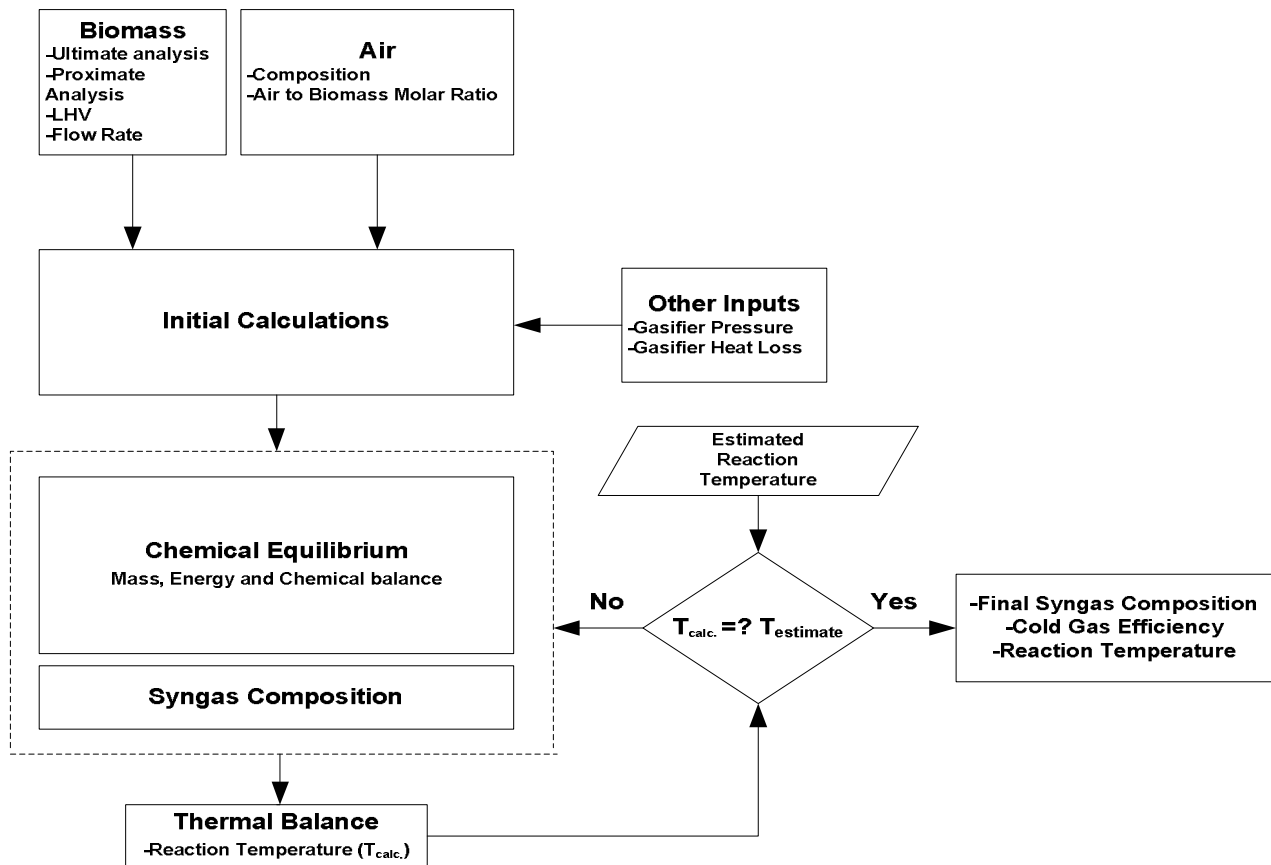
مزیت مدل این است که اولاً نیازی به شناسایی واکنش‌هایی که در راکتور رخ می‌دهد، نخواهد بود و ثانیاً محاسبات مستقل از طراحی راکتور است و در عین سادگی، قادر به شناسایی فرآیند گازی‌سازی با تقریب خوب است. علی‌رغم این که مدل‌های تعادلی مزایای زیادی داشته‌اند و به‌عنوان مثال سریع‌تر همگرا می‌شوند،

آزاد گیبز و محاسبه ثوابت تعادلی، ترکیب گازهای تولیدی در فرآیند گازی سازی تخمین زده می شود. در این راستا از روش نیوتن رافسون برای اصلاح مرحله به مرحله نتایج استفاده می شود. بدین صورت که با مساوی قراردادن آنتالپی گازهای تولیدی در فرآیند گازی سازی و آنتالپی سوخت زیست توده ورودی و رطوبت همراه، دمای واکنش متناظر با ترکیب گازهای تولیدی تخمین زده شده محاسبه می شود. دمای محاسبه شده به عنوان ورودی لازم برای مرحله بعدی تخمین ترکیب گازهای حاصله استفاده می شود و این فرآیند تا رسیدن به شرایط تعادل ترمودینامیک و شیمیایی ادامه می یابد. زمانی که ترکیب نهایی گازهای حاصل و دمای متناظر واکنش مشخص شد، ارزش حرارتی گازهای حاصل و بازدهی فرآیند گازی سازی به آسانی قابل محاسبه خواهد بود.

محدودیت هایی نیز دارند [19]. علی رغم این موضوع، مدل های تعادلی به صورت گسترده ای در مدل سازی سیستم های گاز ساز بستر ثابت و بستر شناور استفاده شده است.

۴-۲-۲- روش مدل سازی گازی ساز

در شکل ۳ ساختار مدل بر مبنای تعادل به صورت کلی نشان داده شده است. در شروع مدل سازی با استفاده از جزء جرمی کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد، منبع سوخت زیست توده مورد بررسی قرار می گیرد و نیز درصد جرمی رطوبت موجود در آن، ترکیب ساختاری سوخت و محتوای رطوبت مولی در آن به دست می آید. با بهره گیری از نسبت سوخت به عامل گاز ساز، میزان مولی عامل گاز ساز به دست می آید و آنتالپی کل واکنش دهنده ها محاسبه می شود. در مرحله بعدی با استفاده از حداقل سازی انرژی



شکل ۳) فلوچارت روند تحلیل ترمودینامیک گازی ساز

از فرمول سوخت زیست توده، وزن مولی سوخت، میزان مول آب در هر مول سوخت زیست توده، نسبت استوکیومتریک هوا به سوخت و آنتالپی تشکیل سوخت قابل تعیین خواهد بود.

$$w = \frac{M_{bm} h}{M_{H_2O} (1 - h)} \quad (6)$$

$$h_{f,bm} = LHV_{db} + \frac{1}{M_{bm}} \sum_{i=prod} \nu_i \tilde{h}_{f,i} \quad (7)$$

در رابطه ۷ ارزش حرارتی پایین زیست توده از رابطه ۸ محاسبه می شود [16]:

$$LHV_{db} = HHV_{db} - 9Hh_{fg} \quad (8)$$

همچنین ارزش حرارتی بالای زیست توده از رابطه ۹ محاسبه

ترکیب سوخت زیست توده: با استفاده از آنالیز نهایی سوخت زیست توده و جزء جرمی اجزای کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد، فرمول ساختاری سوخت زیست توده به صورت $C_n H_m O_p N_q S_r$ قابل محاسبه خواهد بود. با فرض این که n را برابر یک بگیریم، روابط زیر را خواهیم داشت:

$$m = \frac{HM_C}{CM_H} \quad (2)$$

$$p = \frac{OM_C}{CM_O} \quad (3)$$

$$q = \frac{NM_C}{CM_N} \quad (4)$$

$$r = \frac{SM_C}{CM_S} \quad (5)$$

محاسبه است:

$$K_p = \exp(-\Delta G^0_T / R_u T) \quad (۲۲)$$

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (۲۳)$$

با جای‌گذاری مقادیر انرژی آزاد گیبز در روابط مربوط به ثوابت تعادلی، روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$K_1 = \exp(-(G^0_{T,CH_4} - 2G^0_{T,H_2}) / R_u T) \quad (۲۴)$$

$$K_2 = \exp(-(G^0_{T,H_2} + G^0_{T,CO_2} - G^0_{T,CO} - G^0_{T,H_2O}) / R_u T) \quad (۲۵)$$

که در آن:

$$G^0_{T,i} = \Delta \tilde{h}^0_{f,298} + \int_{298}^T C_p dT - T S^0 \quad (۲۶)$$

بر مبنای قانون اول ترمودینامیک، بالانس انرژی به صورت روابط ۲۷-۲۹ فرموله می‌شود.

$$H_{pr}(T_k) = H_{reac} + Q_{in} + Q_{out} \quad (۲۷)$$

$$H_{reac} = \sum_{reac} n_i \tilde{h}^0_{f,298} + \sum_{reac} n_i \int_{298}^{T_i} C_{pi} dT \quad (۲۸)$$

$$H_{pr} = \sum_{prod} n_{pg} \tilde{h}^0_{f,298} + \sum_{prod} n_{pg} \int_{298}^k C_{ppg} dT \quad (۲۹)$$

در صورت ارضاشدن معادلات بالا، دمای تخمین زده شده برای T_k برابر با دمای واکنش خواهد بود، در غیر این صورت باید دمای جدیدی با بهره‌گیری از رابطه ۳۰ تخمین زده شود.

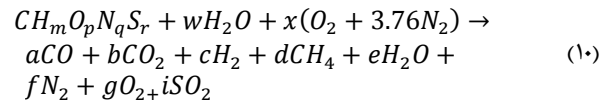
$$T_{k+1} = T_k + \frac{H_{reac} + Q_{in} + Q_{out} - H_{prod}(T_k)}{C_{pprod}(T_k)} \quad (۳۰)$$

۳-۲-۴- نرم‌افزار شبیه‌سازی گازی‌ساز

هدف اصلی از فرآیند شبیه‌سازی، پیش‌بینی ترکیب و ارزش حرارتی گازهای حاصل از فرآیند گازی‌سازی و بازدهی فرآیند گازی‌سازی، با توجه به ورودی‌های متغیر مساله (شامل دمای گازی‌ساز یا نسبت مولی هوا به سوخت، ترکیب سوخت زیست‌توده ورودی و درصد رطوبت آن و نوع گازی‌ساز) خواهد بود. با توجه به این که در فرآیند شبیه‌سازی نیاز به حل دستگاهی از معادلات خطی و غیرخطی است، محاسبات مربوطه فرآیند وقت‌گیری خواهد بود، در نتیجه نیاز به نرم‌افزاری حس می‌شود که با کمک آن بتوان شبیه‌سازی فرآیند گازی‌ساز را در حداقل زمان ممکن به انجام رساند. در راستای حصول این هدف، نرم‌افزاری در محیط برنامه‌نویسی سی‌شارپ توسعه داده شد که قابلیت شبیه‌سازی راکتورهای گازی‌ساز بستر ثابت و بستر شناور را دارد. در شکل‌های ۴-۶ تصاویری از محیط این شبیه‌ساز مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاربر در تب‌های اول و دوم نرم‌افزار اطلاعات کلی (شامل مشخصات سوخت، شرایط اتمسفری و غیره) را وارد می‌کند و در تب‌های سوم و چهارم به ترتیب امکان شبیه‌سازی راکتورهای بستر ثابت و بستر شناور را خواهد داشت. در جدول ۳، نتایج حاصل از نرم‌افزار شبیه‌ساز در خصوص ترکیب گاز سنتزی حاصل، با مدل تحقیقاتی توسعه‌داده شده توسط زینال و همکاران [21] و نتایج کار تجربی علاء‌الدین [22] مقایسه شده است.

$$HHV_{db} = 0.3491C + 1.1783H + 0.10051S - 0.1034O - 0.015N - 0.0211Ash \quad (۹)$$

تعادل شیمیایی: الگوریتمی که ترکیب شیمیایی محصولات حاصل از فرآیند گازی‌سازی را تخمین می‌زند، بر مبنای فرض تعادل شیمیایی بین گونه‌های مختلف و با در نظر گرفتن این فرض است که از حضور قیر در محصول نهایی صرف نظر شود. واکنش کلی در راکتور گازی‌ساز مطابق با رابطه ۱۰ است.



در ادامه از نوشتن بالانس اتم‌های کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد، روابط ۱۱-۱۵ به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$a + b + d = 1 \quad (۱۱)$$

$$m + 2w = 2c + 4d + 2e \quad (۱۲)$$

$$q + 3.76 \times 2x = 2f \quad (۱۳)$$

$$p + w + 2x = a + 2b + e + 2g + 2l \quad (۱۴)$$

$$r = 1 \quad (۱۵)$$

طی فرآیند گازی‌سازی صرفاً بین ۲۰ تا ۴۰٪ میزان هوای استوکیومتریکی استفاده می‌شود، در نتیجه هیچ اکسیژنی در گازهای حاصل از فرآیند گازی‌سازی موجود نخواهد بود. در این شرایط، ۶ معادله و ۸ متغیر خواهیم داشت، در نتیجه نیاز به دو معادله اضافی داریم. این دو معادله از نوشتن دو معادله در شرایط تعادل به دست خواهد آمد. در ناحیه کاهش، هیدروژن از طریق رابطه ۱۶ به متان کاهیده می‌شود.



ثابت تعادلی این واکنش تابعی از فشارهای جزئی واکنش به صورت زیر است:

$$K_1 = \frac{(P_{CH_4}/P_0)}{(P_{H_2}/P_0)^2} \quad (۱۷)$$

یا به صورت تابعی از ترکیب‌های مولی به صورت رابطه ۱۸ است.

$$K_1 = \frac{dn_T}{c^2} \quad (۱۸)$$

واکنش دیگر بیانگر تعادل بین مونواکسیدکربن و هیدروژن در حضور آب است.



ثابت تعادلی این واکنش تابعی از فشارهای جزئی عبارت از رابطه زیر است:

$$K_2 = \frac{(P_{CO_2}/P_0)(P_{H_2}/P_0)}{(P_{CO}/P_0)(P_{H_2O}/P_0)} \quad (۲۰)$$

یا به صورت تابعی از ترکیب‌های مولی به صورت رابطه ۲۱ است.

$$K_2 = \frac{bc}{ae} \quad (۲۱)$$

مقادیر ثوابت تعادلی از طریق انرژی آزاد گیبز به صورت زیر قابل

در نظر گرفتن صرفه جویی در بررسی اقتصادی پروژه‌هایی مانند سیستم تولید همزمان و تکنولوژی‌های نو بسیار با اهمیت است. سود در اینجا به عنوان یک مفهوم کلی به کار می‌رود. F_0 به طور خاص مبین ارزش فعلی سرمایه‌گذاری در زمان صفر بوده و منفی است. d_t نرخ بهره بازاری طی دوره زمانی t بوده و N تعداد سال‌های کارکرد سیستم است.

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1 + d_t)^t} \quad (31)$$

در این روش دو حالت زیر وجود دارد:

$NPV > 0$: سرمایه‌گذاری تحت شرایط خاص (d, N) توجیه اقتصادی دارد.

$NPV < 0$: سرمایه‌گذاری تحت شرایط خاص (d, N) توجیه اقتصادی ندارد.

۱-۵- روند تحلیل اقتصادی سیستم تولید همزمان

به منظور محاسبه مقدار معیار تعریف شده در بخش قبل لازم است تا پارامترهای زیر محاسبه شوند:

الف) جریان نقدی اولیه (F_0)

ب) جریان نقدی خالص (F_t) در سال ($t \geq 1$)

جریان نقدی اولیه: برای ارزیابی هزینه سرمایه‌گذاری سیستم می‌توان از منابع مختلف مانند فروشندگان تجهیزات استفاده کرد.

C ارزش حال حاضر هزینه ($t=0$) فرض می‌شود.

جریان نقدی خالص برای سال‌های تحلیل: عملکرد یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت موجب هزینه‌هایی می‌شود، البته صرفه‌جویی نیز به دنبال خواهد داشت (حذف هزینه برقی که باید از شبکه، خریداری و گرمایی که باید توسط بویلر تولید می‌شد).

همچنین در مورد درآمدها نیز می‌توان به برق اضافی فروخته شده اشاره نمود. سود سالیانه عملکرد سیستم تولید همزمان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_t = (C_e + R_e + C_h - C_f - C_{om})_t \quad (32)$$

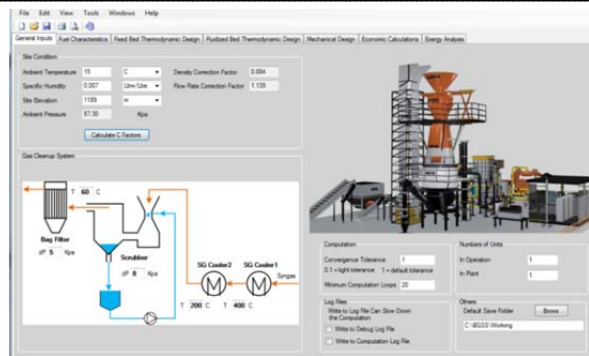
که در رابطه ۳۲، C_e هزینه حذف شده برق است، به طور مثال هزینه برقی که در صورت عدم وجود تولید همزمان باید از شبکه خریداری می‌شد. R_e درآمد ناشی از فروش برق اضافی به شبکه اگر وجود داشته باشد. C_h هزینه حذف شده حرارت است، به طور مثال هزینه‌ای که برای تولید حرارت در حالت بدون تولید همزمان در بویلر ایجاد می‌شد. C_f هزینه سوخت سیستم تولید همزمان و C_{om} هزینه عملکرد، تعمیر و نگهداری سیستم تولید همزمان است. زیرنویس t نشان‌دهنده سال است.

هزینه کاهش یافته گرمایش شامل هزینه سوخت برای بویلر، هزینه‌های تعمیر، نگهداری و عملکرد بویلر و تجهیزات جانبی آن است. هزینه سوخت تابعی از کیفیت سوخت و تعرفه آن است. هزینه کاهش یافته سوخت بویلر طی یک سال در صورتی که از سیستم تولید همزمان بهره گیریم، از رابطه ۳۳ محاسبه می‌شود.

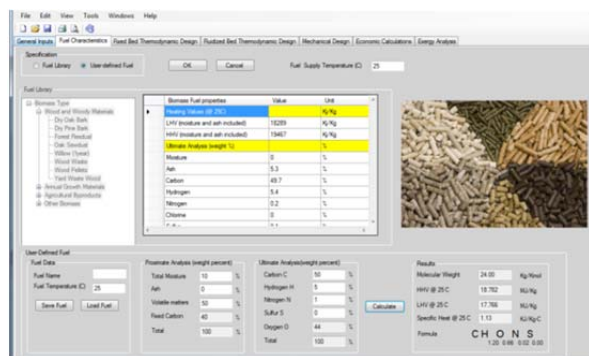
$$C_h = \frac{Q}{HV_{fb} \times \eta_b} \times C_h \quad (33)$$

هزینه سوخت سیستم تولید همزمان نیز تابعی از مقدار سوخت و تعرفه آن است و از رابطه ۳۴ محاسبه می‌شود.

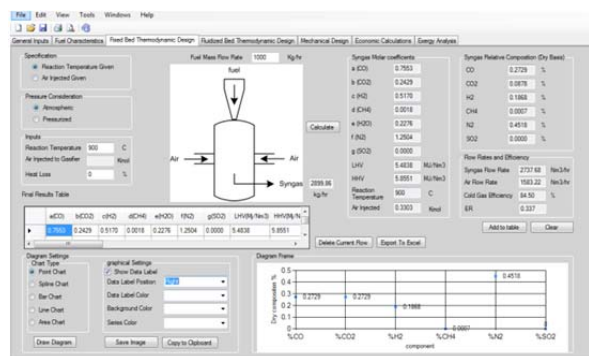
$$C_f = \frac{W}{HV_{fchp} \times \eta_e} \times C_f \quad (34)$$



شکل ۴) تب اول نرم افزار توسعه داده شده (اطلاعات کلی)



شکل ۵) تب دوم نرم افزار توسعه داده شده (مشخصات سوخت)



شکل ۶) تب سوم نرم افزار توسعه داده شده (شبیه سازی گازی ساز بستر ثابت)

جدول ۳) مقایسه ترکیب اجزا در گاز سنتز بین تحقیق حاضر و سایر مطالعات (دمای ۸۰۰°C و درصد رطوبت ۲۰٪)

اجزای خروجی	درصد اجزا در گاز سنتزی	
	مدل تجربی علاء‌الدین [23]	مدل زینال و دیگران [22]
هیدروژن	۲۳/۱۵	۲۱/۰۶
مونواکسیدکربن	۲۳/۰۴	۱۹/۶۱
متان	۱/۵۸	۰/۶۴
دی‌اکسیدکربن	۱۶/۴۲	۱۲/۰۱
نیترژن	۴۲/۳۱	۴۶/۶۸
اکسیژن	۱/۴۲	.

۵- تحلیل اقتصادی

هدف از تحلیل اقتصادی در این بخش استفاده از مفهوم ارزش خالص فعلی سود در بررسی اقتصادی بودن یا نبودن سناریوی مورد بررسی است. ارزش فعلی سود کل یک سرمایه‌گذاری از تفاضل بین ارزش فعلی کل مخارج و درآمدها (شامل صرفه‌جویی نیز می‌شود) طی دوره عمر سرمایه‌گذاری به دست می‌آید. بیان کلی ارزش خالص فعلی سود مطابق با رابطه ۳۱ است. در این رابطه F_t بیانگر سود یا جریان نقدی خالص (درآمد+صرفه‌جویی-مخارج) در سال t است.

جدول ۵) مشخصات جریان‌های سیکل در حالت ارتقایافته

شماره جریان	سیال	فشار (bar)	دما (°C)	دبی (kg/s)
۱	آب	۴/۹۰۲	۹۱/۳	۲۳/۸۲
۲	گاز خروجی	۰/۸۴۵۵	۱۰۰	۲/۶۵۵
۳	هوا	۰/۸۴۵۵	۲۵	۰/۶۲۹
۴	هوا	۰/۸۴۵۵	۲۵	۱/۶۴۷
۵	آب	۱/۴۷۱	۸۵/۱۵	۲۰
۶	آب	۴/۸۰۶	۷۰	۲۳/۸۲
۷	آب	۲/۷۵	۷۸	۱۹/۹۹
۸	آب	۵	۸۰	۲۳/۸۲
۹	گاز خروجی	۰/۸۶۲۴	۴۷۰	۲/۶۵۵
۱۰	آب	۲/۵	۹۰	۱۹/۹۹
۱۱	آب	۲/۸۰۵	۹۰/۱	۱۹/۹۹
۱۲	آب	۵/۱	۷۰/۱	۲۳/۸۲
۱۳	آب	۱/۵	۶۰	۲۰
۱۴	زیست‌توده	۰/۸۴۵۵	۲۵	۰/۲۹
۱۵	آب	۱/۰۳۵	۱۵	۰
۱۶	لجن	۱/۰۳۵	۱۰۰	۰
۱۷	آب	۲	۱۵	۰/۱۸۱
۱۸	آب	۱/۰۳۵	۵۸/۶۲	۰/۰۹۲
۱۹	گاز سنتز	۱/۱۴	۵۸/۶۳	۱/۰۰۸
۲۰	گاز سنتز	۱/۱۴	۲۶۰	۰/۹۱۹
۲۳	آب	۳	۶۰	۰/۲۸۵
۲۴	بخار	۳	۱۳۳/۵۴	۰/۲۸۵
۲۵	هوا	۱/۲	۶۳/۹۱	۰/۶۲۹
۲۶	گاز سنتز	۱/۰۸۶	۵۸/۶۳	۱/۰۰۸

۶-۲- اثر تغییر مشخصات سوخت ورودی روی گاز سنتزی خروجی

در این بخش اثر تغییر نوع، ترکیب و درصد رطوبت سوخت ورودی روی ترکیب و ارزش حرارتی گاز سنتزی خروجی از راکتور گازی ساز بستر ثابت را بررسی می‌کنیم. در این راستا سه نوع سوخت شامل چوب، سبوس برنج و کاغذ با درصد رطوبت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند. در جدول ۶ آنالیز نهایی بر مبنای خشک این سوخت‌ها داده شده است [23].

جدول ۶) آنالیز نهایی سه نوع سوخت زیست‌توده بر مبنای خشک

اجزا	درصد اجزا		
	سبوس برنج	چوب	کاغذ
کربن	۳۸/۵	۵۰	۴۳/۴
هیدروژن	۵/۷	۶	۵/۸
نیتروژن	۰/۵	۰	۰/۳
گوگرد	۰	۰	۰/۲
اکسیژن	۳۹/۸	۴۴	۴۴/۳
خاکستر	۱۵/۵	۰	۶

در نمودار ۱، اثر تغییر نوع سوخت زیست‌توده (و به تبع آن درصد نسبی عناصر تشکیل‌دهنده) روی ترکیب گاز سنتزی را مشاهده می‌کنیم. نتایج به‌ازای دمای گازی‌سازی ۸۰۰°C و رطوبت ۲۰% سوخت به دست آمده است. از نمودار چنین بر می‌آید که درصد گازهای H₂ و CO به‌ازای سوخت ورودی چوب، حداکثر و به‌ازای سبوس برنج، حداقل است. در نتیجه ارزش حرارتی گاز سنتز حاصل از چوب بیشترین و در مرتبه بعد کاغذ و سبوس برنج خواهند بود. در نمودار ۲، اثر تغییر رطوبت سوخت زیست‌توده روی ترکیب گاز سنتزی و ارزش حرارتی پایین آن را مشاهده می‌کنیم. نتایج به‌ازای دمای گازی‌سازی ۸۰۰°C به دست آمده است. مشاهده می‌شود که افزایش درصد رطوبت، اثر جزئی روی درصد CH₄ و N₂ در گاز سنتزی خروجی داشته است، اما اثر نسبتاً شدیدی بر درصد CO و CO₂ دارد. همچنین روند کاهش LHV در اثر افزایش درصد

پس از یافتن کلیه درآمدها (صرفه‌جویی‌ها) و هزینه‌ها در سال مورد بررسی، باید هزینه‌ها را از درآمدها کم نمود تا بدین وسیله درآمد خالص سیستم در سال مورد بررسی به دست آید. در مرحله بعد با در نظر گرفتن مقدار نرخ بهره از رابطه مربوطه، ارزش فعلی سود سیستم در سال مورد بررسی (سال اول) به دست می‌آید و در نهایت مراحل انجام‌شده در بالا که برای سال اول عملکرد مجموعه بود، برای سایر سال‌ها نیز تکرار و از رابطه ۳۱، ارزش خالص حال حاضر محاسبه خواهد شد. قابل ذکر است که F_0 ارزش فعلی سرمایه‌گذاری با فرض ۵۰۰ دلار بر کیلووات محاسبه شده است.

۶- نتایج

نتایج حاصل از محاسبات ترمودینامیک و اقتصادی سیستم پایه و سیستم ارتقایافته در این بخش بیان می‌شود.

۶-۱- نتایج تحلیل ترمودینامیک

تحلیل ترمودینامیک سیکل پایه و سیکل ارتقایافته منجر به نتایجی شد که بیان می‌شود. در جدول‌های ۴ و ۵ به ترتیب مشخصات جریان‌های سیکل‌های پایه و ارتقایافته نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت پایه و ارتقایافته با بهره‌گیری از گرمای مازاد موتور گازسوز، امکان تامین آب گرم با دبی ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه و با دمای ۸۵/۱۷°C وجود دارد (جریان ۱۳) که باعث می‌شود مصرف گاز طبیعی بویلر گازسوز کارخانه که برای تامین آب گرم استفاده می‌شود، به میزان ۲۰۸۸۶۹۹ متر مکعب در سال کاهش یابد (با فرض ۸۰۰۰ ساعت کارکرد موتور گاز سوز در سال). فراتر از این در حالت ارتقایافته، امکان تولید بخار اشباع در فشار سه بار به میزان ۰/۲۸۵ کیلوگرم در ثانیه (۱/۰۲۶ اثن در ساعت) وجود دارد (جریان ۲۴) که این میزان، درصد قابل ملاحظه‌ای از نیاز بخار کارخانه پارس خودرو را پوشش خواهد داد.

نتایج تحلیل ترمودینامیک حاکی از آن بوده که مصرف گاز طبیعی در وضعیت پایه برابر با ۰/۰۹۴ کیلوگرم بر ثانیه است. این مصرف معادل با ۳۷۶۳۵۱۱ متر مکعب در سال است. در نتیجه در وضعیت ارتقایافته که به سبب تولید گاز سنتز از منبع زیست‌توده، مصرف گاز طبیعی وجود ندارد، به میزان ۳۷۶۳۵۱۱ متر مکعب در سال صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی وجود خواهد داشت. با احتساب صرفه‌جویی ۷۰۴۸۰۵ متر مکعب گاز طبیعی که در اثر تولید بخار در مبدل حرارتی پایین‌دست گازی‌ساز حاصل می‌شود، در مجموع، صرفه‌جویی سالانه معادل با ۴۴۶۸۳۱۶ متر مکعب گاز طبیعی با به‌کارگیری سیستم ارتقایافته به‌جای سیستم پایه پدید می‌آید که معادل با ۳۱۳ میلیون تومان در سال است.

جدول ۴) مشخصات جریان‌های سیکل در حالت پایه

شماره جریان	سیال	فشار (bar)	دما (°C)	دبی (kg/s)
۱	آب	۴/۹۰۲	۹۰/۸۳	۲۴/۳۸
۲	گاز خروجی	۰/۸۴۵۵	۱۰۰	۲/۶۵۵
۳	سوخت	۰/۸۵	۲۵	۰/۰۹۴
۴	هوا	۰/۸۴۵۵	۲۵	۲/۵۶۲
۵	آب	۱/۴۷۱	۸۵/۱۷	۲۰
۶	آب	۴/۸۰۶	۷۰	۲۴/۳۸
۷	آب	۲/۷۵	۷۸	۲۰/۴۶
۸	آب	۵	۸۰	۲۴/۳۸
۹	گاز خروجی	۰/۸۶۲۴	۴۷۰	۲/۶۵۵
۱۰	آب	۲/۵	۹۰	۲۰/۴۶
۱۱	آب	۲/۸۰۵	۹۰/۱	۲۰/۴۶
۱۲	آب	۵/۱	۷۰/۱	۲۴/۳۸
۱۳	آب	۳	۶۰	۲۰

جدول ۷) فرضیات و نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی در سال اول

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	قیمت خرید برق از شبکه	Rls/kWh	۶۵۰
۲	توان خروجی ژنراتور	kW	۱۹۴۸
۳	انرژی الکتریکی خروجی کل سالانه	kWh	۱۵۵۸۴۰۰۰
۴	درآمد حاصل از عدم خرید برق از شبکه	Rls	۱۰,۱۲۹,۶۰۰,۰۰۰
۵	درآمد کل حاصل از برق تولیدی	Rls	۱۰,۱۲۹,۶۰۰,۰۰۰
۶	توان حرارتی قابل استفاده	kW	۲۷۹۳/۴۹
۷	بازدهی بویلرها در حال حاضر	%	۸۰
۸	ارزش حرارتی سوخت مصرفی بویلرها	kWh/m ³	۱۰
۹	مقدار سوخت مصرفی مورد نیاز بویلرها	m ³	۲۷۹۳۴۹۰
۱۰	قیمت خرید سوخت مصرفی بویلرها	Rls/m ³	۷۰۰
۱۱	صرفه جویی حاصل از کاهش سوخت	Rls	۱,۹۵۵,۴۴۳,۰۰۰
۱۲	بازدهی موتور ژنراتور	%	۴۱/۵۷
۱۳	ارزش حرارتی گاز طبیعی مصرفی	kWh/m ³	۱۰
۱۴	مصرف گاز طبیعی موتور ژنراتور	m ³	۰
۱۵	نرخ مصرف سوخت زیست توده	kg/s	۰/۲۹
۱۶	مصرف سالیانه سوخت زیست توده	ton	۸۳۵۲
۱۷	قیمت خرید سوخت زیست توده	Rls/ton	۱۰۰۰۰
۱۸	هزینه ناشی از مصرف سوخت موتور ژنراتور	Rls	۸۳۵,۲۰۰,۰۰۰
۱۹	مجموع هزینه تعمیر و نگهداری	Rls	۲,۸۱۵,۹۹۱,۵۲۰
۲۰	کل درآمدهای سیستم تولید همزمان	Rls	۸,۴۳۳,۸۵۱,۴۸۰
۲۱	ارزش فعلی درآمدهای سیستم تولید همزمان	Rls	۴,۸۲۲,۰۸۱,۹۵۷

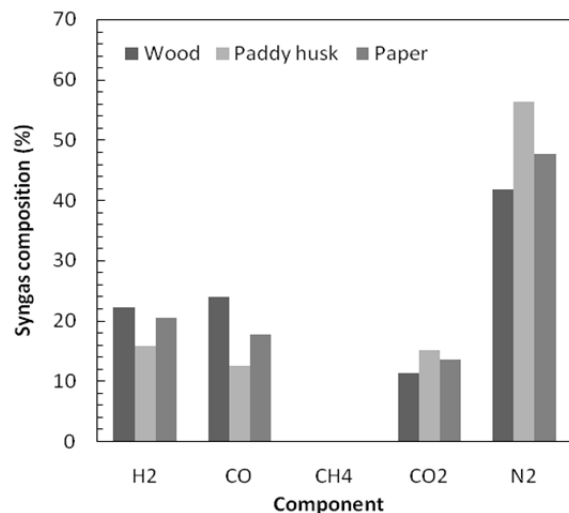
جدول ۸) جمع بندی نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سیستم ارتقایافته

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	هزینه سرمایه گذاری اولیه	\$/kW	۵۰۰
۲	توان خروجی موتور (۱ دستگاه)	kW	۲۱۵۶
۳	توان خروجی ژنراتور (۱ دستگاه)	kW	۱۹۴۸
۴	بازده الکتریکی مولد	%	۴۱/۵۷
۵	بازده حرارتی مولد	%	۲۸/۰۰
۶	بازدهی تولید همزمان	%	۶۹/۵۷
۷	ضریب استفاده از بخش بازیافت	%	۰/۷
۸	تلفات شبکه برق کشور	%	۵
۹	ارزش حرارتی سوخت موتور ژنراتور	kWh/m ³	۱۰
۱۰	بازده الکتریکی موثر	%	۰/۴۹۵۴۸۸۷۵۲
۱۱	نرخ آزاد گاز طبیعی	Rls/m ³	۷۰۰
۱۲	ارزش فعلی سرمایه گذاری	Rls	۴,۹۶۴,۰۰۰,۰۰۰
۱۳	ارزش خالص سود در حال حاضر	Rls	-۱۰,۷۱۹,۴۰۰,۵۴۲

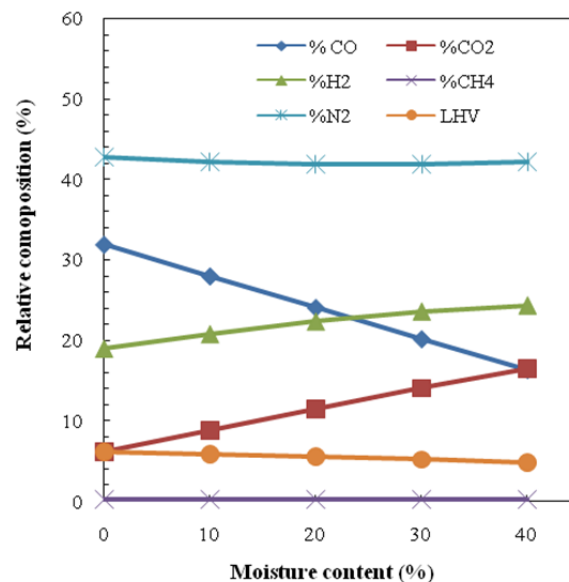
۴-۶- اثر تغییر پارامترهای اقتصادی روی ارزش خالص سود حال حاضر

در این بخش اثر تغییر پارامترهای اقتصادی را روی ارزش خالص سود حال حاضر بررسی می کنیم که پارامتر نهایی تحلیل اقتصادی است.

در نمودار ۳، اثر تغییر قیمت خرید برق از شبکه روی ارزش خالص سود سیستم ارتقایافته در سه وضعیت نرخ سود ۱۵، ۱۲ و ۷٪ نشان داده شده است. در وضعیت پایه با نرخ سود ۱۵٪ و قیمت خرید برق از شبکه ۶۵۰ ریال بر کیلووات ساعت، ارزش خالص سود منفی است. مشاهده می شود که در این وضعیت با افزایش قیمت خرید برق از شبکه تا ۸۲۵ ریال بر کیلووات ساعت و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها، ارزش خالص سود سیستم ارتقایافته از مقدار منفی به مرز صفر می رسد که نشان می دهد سرمایه گذاری به مرز توجیه پذیری اقتصادی رسیده است. همچنین در نرخ سودهای ۱۲ و ۷٪ نیز به ترتیب با افزایش قیمت خرید برق از شبکه تا ۷۵۰ و ۶۰ ریال بر کیلووات ساعت، سرمایه گذاری به مرز توجیه پذیری اقتصادی خواهد رسید. در نمودار ۴، اثر تغییر هزینه سرمایه گذاری اولیه روی ارزش خالص حال حاضر سیستم ارتقایافته در سه



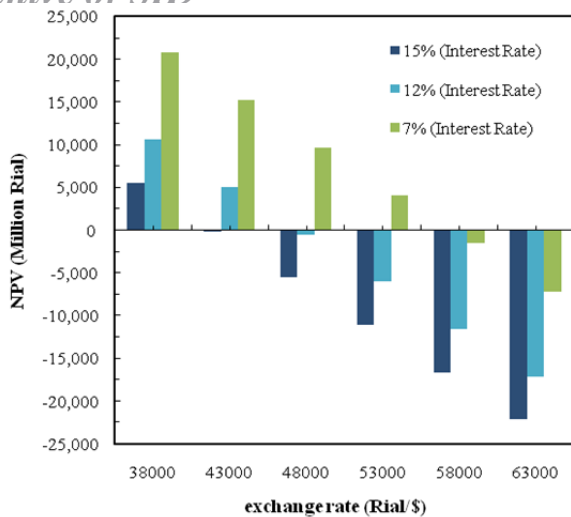
نمودار ۱) اثر تغییر نوع سوخت بر روی ترکیب گاز سنتزی



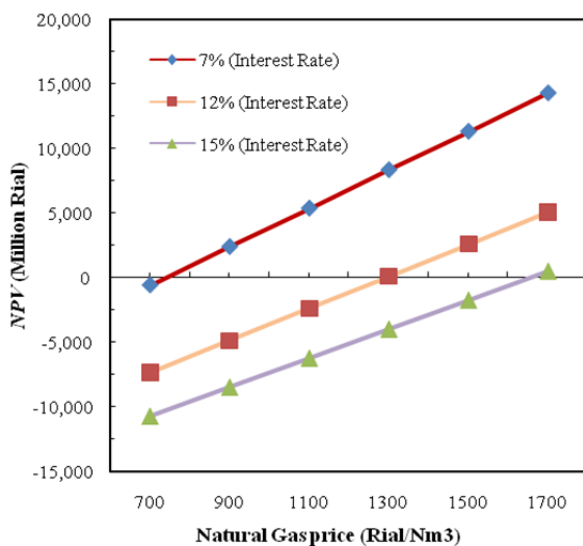
نمودار ۲) اثر تغییر رطوبت روی ترکیب گاز سنتزی و ارزش حرارتی پایین

۳-۶- نتایج تحلیل اقتصادی

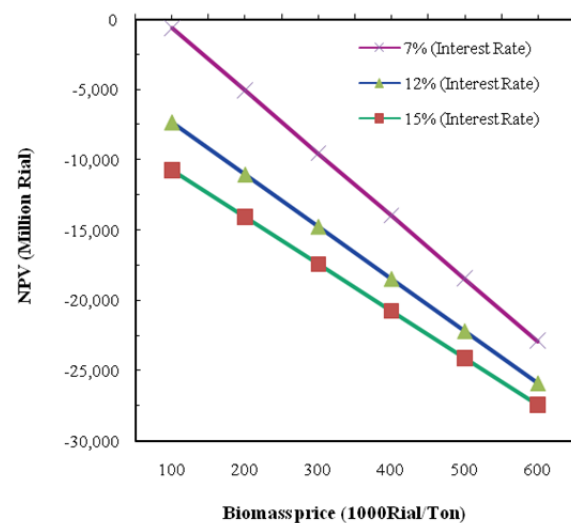
نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سیکل پایه و سیکل ارتقایافته در این بخش بیان می شوند. در این راستا ابتدا ارزش فعلی سود سیستم را در سال مورد بررسی (سال اول)، محاسبه و سپس با روند مشابهی، ارزش فعلی سود سیستم برای سایر سالها نیز محاسبه می شود. در جدول ۷ ورودی های لازم و فرضیات در نظر گرفته شده برای تحلیل اقتصادی، درآمدها و هزینه های سیستم ارتقایافته و در نهایت ارزش فعلی سود سیستم در سال اول مشاهده می شود. در جدول ۸ جمع بندی نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی سیستم ارتقایافته مشاهده می شود. به ازای نرخ ارز دولتی ۳۸۰۰۰ ریال به ازای هر دلار (مطابق با اطلاعات بانک مرکزی در اسفند ۱۳۹۶)، هزینه سرمایه گذاری اولیه برابر با ۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات برق تولیدی، نرخ آزاد گاز طبیعی برابر با ۷۰۰ ریال به ازای هر متر مکعب، ۷ سال کارکرد مجموعه و نرخ بهره ۱۵٪، ارزش خالص حال حاضر، منفی است و سرمایه گذاری در شرایط فوق الذکر از دیدگاه اقتصادی توجیه پذیر نیست.



نمودار ۵) اثر تغییر نرخ ارز روی ارزش خالص سود



نمودار ۶) اثر تغییر قیمت سوخت گاز طبیعی روی ارزش خالص سود

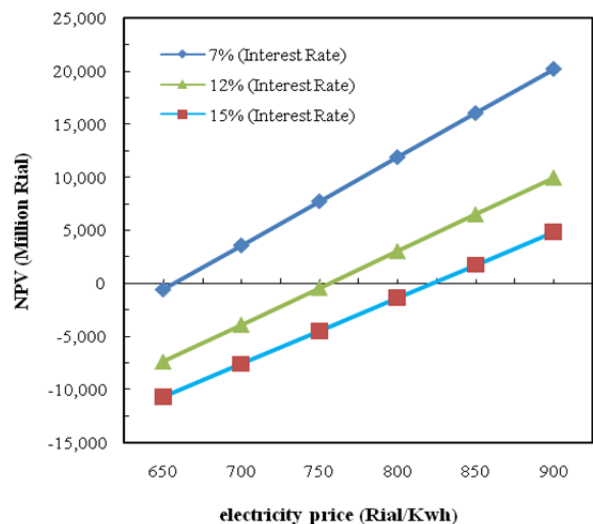


نمودار ۷) اثر تغییر قیمت زیست توده روی ارزش خالص سود

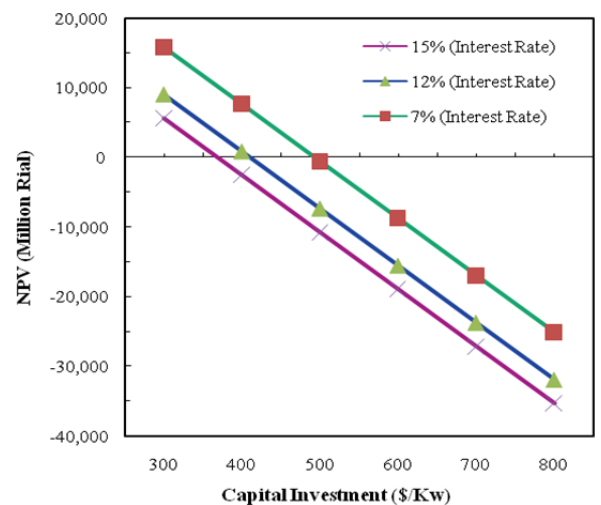
در نمودار ۷، اثر تغییر قیمت زیست توده روی ارزش خالص سود سیستم ارتقایافته در سه وضعیت نرخ سود ۷، ۱۲ و ۱۵٪ نشان

وضعیت نرخ سود ۱۵، ۱۲ و ۷٪ نشان داده شده است. در سه وضعیت نرخ سود مذکور با ثابت فرض کردن مابقی پارامترهای اقتصادی، در صورتی که هزینه سرمایه گذاری اولیه به ترتیب کمتر یا مساوی با ۳۶۹، ۴۱۰ و ۴۹۲ دلار بر کیلووات باشد، سرمایه گذاری از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر خواهد بود. در نمودار ۵، اثر تغییر نرخ ارز از ۳۸۰۰۰ تا ۶۳۰۰۰ ریال به ازای هر دلار، روی ارزش خالص سود سیستم ارتقایافته در سه وضعیت نرخ سود ۱۵، ۱۲ و ۷٪ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش نرخ ارز، روند کاهش ارزش خالص حال حاضر تا منفی شدن آن را شاهد هستیم که منفی شدن این مقدار بیانگر غیراقتصادی بودن سرمایه گذاری روی این پلنت است.

در نمودار ۶، اثر تغییر قیمت سوخت گاز طبیعی روی ارزش خالص سود سیستم ارتقایافته در سه وضعیت نرخ سود ۱۵، ۱۲ و ۷٪ نشان داده شده است. قیمت پایه سوخت گاز طبیعی برابر با ۷۰۰ ریال بر متر مکعب فرض شد. در سه وضعیت، نرخ سود مذکور به ترتیب با افزایش قیمت سوخت گاز طبیعی تا ۱۷۰۰، ۱۳۰۰ و ۷۳۰ ریال بر متر مکعب، ارزش خالص سود از مقدار منفی به مرز صفر می رسد که نشان می دهد سرمایه گذاری به مرز توجیه پذیری اقتصادی رسیده است.



نمودار ۸) اثر تغییر قیمت خرید برق از شبکه روی ارزش خالص سود



نمودار ۹) اثر تغییر هزینه سرمایه گذاری اولیه روی ارزش خالص سود

<i>db</i>	آنتالپی زیست‌توده
<i>e</i>	برق
<i>f</i>	سوخت
<i>h</i>	حرارت
<i>om</i>	تعمیر و نگهداری
<i>pr</i>	محصولات
<i>reac</i>	واکنش‌دهنده‌ها

داده شده است. در سه وضعیت نرخ سود مذکور، با توجه به فرضیات اقتصادی ذکر شده در جدول ۷، تنها در نرخ سود ۷٪ و به‌ازای قیمت ۰۰۰۰۰۰ ریال بر تن زیست‌توده، ارزش خالص حال حاضر در مرز صفر است و سرمایه‌گذاری در مرز توجیه اقتصادی خواهد بود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: محمدجواد رحیمی (نویسنده اول)، نگارنده

مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۳/۴٪)؛ محمدحسین

حامدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر

آماري (۳۳/۳٪)؛ مجید عمیدپور (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی

یا کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- Iran Ministry of Power. Comprehensive guide for combined heat and power production [Internet]. Tehran: Iran Ministry of Power; 2005. [Persian].
- European Commission. Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources [Internet]. Brussels: European Commission; 2009. Available from: <http://www.buildup.eu/en/practices/publications/directive-200928ec-promotion-use-energy-renewable-sources-23-april-2009>
- Yang H, Chen H. 11- Biomass gasification for synthetic liquid fuel production. In: Luque R, Speight JG, Editors. Gasification for synthetic fuel production: Fundamentals, processes and applications. Sawston: Woodhead Publishing; 2015. pp. 241-275
- Heidenreich S, Foscolo PU. New concepts in biomass gasification. Progress in Energy and Combustion Science. 2015;46:72-95.
- Doherty W, Reynolds A, Kennedy D. Process simulation of biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell stack. Journal of Power Sources. 2015;277:292-303.
- Baruah D, Baruah DC. Modeling of biomass gasification: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;39:806-815.
- Baruah D, Baruah DC, Hazarika MK. Artificial neural network based modeling of biomass gasification in fixed bed downdraft gasifiers. Biomass and Bioenergy. 2017;98:264-271.
- Mendiburu AZ, Roberts JJ, Carvalho Jr JA, Silveira JL. Thermodynamic analysis and comparison of downdraft gasifiers integrated with gas turbine, spark and compression ignition engines for distributed power generation. Applied Thermal Engineering. 2014;66(1-2):290-297.
- Puig-Arnabat M, Bruno JC, Coronas A. Modeling of trigeneration configurations based on biomass gasification and comparison of performance. Applied Energy. 2014;114:845-856.
- Wang JJ, Xu ZL, Jin HG, Shi GH, Fu Ch, Yang K. Design optimization and analysis of a biomass gasification based BCHP system: A case study in Harbin, China. Renewable Energy. 2014;71:572-583.
- Prando D, Patuzzi F, Pernigotto G, Gasparella A, Baratieri M. Biomass gasification systems for residential application: An integrated simulation approach. Applied Thermal Engineering. 2014;71(1):152-160.
- Vera D, De Mena B, Jurado F, Schories G. Study of a downdraft gasifier and gas engine fueled with olive oil industry wastes. Applied Thermal Engineering. 2013;51(1-2):119-129.
- Huang Y, McIlveen-Wright DR, Rezvani S, Huang MJ, Wang YD, Roskilly AP, et al. Comparative techno-economic analysis of biomass fuelled combined heat and power for commercial buildings. Applied Energy. 2013;112:518-525.
- Kalina J. Integrated biomass gasification combined

۷- پی‌نوشت

علام

<i>a</i>	ضریب مولی مونواکسیدکربن در محصولات
<i>b</i>	ضریب مولی دی‌اکسیدکربن در محصولات
<i>C_p</i>	گرمای ویژه فشار ثابت ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
<i>c</i>	ضریب مولی هیدروژن در محصولات
<i>d</i>	ضریب مولی متان در محصولات
<i>e</i>	ضریب مولی آب در محصولات
<i>F</i>	جریان نقدی (Rial)
<i>f</i>	ضریب مولی نیتروژن در محصولات
<i>G</i>	تابع گیبز ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>g</i>	ضریب مولی اکسیژن در محصولات
<i>H</i>	آنتالپی ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>H</i>	درصد وزنی هیدروژن (%)
<i>HHV</i>	ارزش حرارتی بالا ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>h</i>	رطوبت نسبی سوخت زیست‌توده (%)
<i>h_{f,bm}</i>	آنتالپی تشکیل سوخت زیست‌توده ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>h_{f,g}</i>	گرمای نهان تبخیر ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>i</i>	ضریب مولی دی‌اکسیدگوگرد در محصولات
<i>K</i>	ثابت تعادل
<i>LHV</i>	ارزش حرارتی پایین ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
<i>M</i>	وزن مولکولی ($\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$)
<i>m</i>	ضریب هیدروژن در فرمول ساختاری زیست‌توده
<i>ṁ</i>	دبی جرمی ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>N</i>	تعداد سال‌های عملکرد
<i>NPV</i>	ارزش خالص حال حاضر (Rial)
<i>n</i>	مول کلی
<i>n</i>	ضریب کربن در فرمول ساختاری زیست‌توده
<i>O</i>	درصد وزنی اکسیژن (%)
<i>P</i>	فشار جزئی (kp)
<i>p</i>	ضریب اکسیژن در فرمول ساختاری زیست‌توده
<i>Q</i>	انرژی (JkJ)
<i>q</i>	ضریب نیتروژن در فرمول ساختاری زیست‌توده
<i>R_u</i>	ثابت جهانی گازهای کامل ($\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
<i>r</i>	ضریب سولفور در فرمول ساختاری زیست‌توده
<i>S</i>	درصد وزنی سولفور (%)
<i>S</i>	آنتروپی ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
<i>w</i>	ضریب مولی آب در سوخت زیست‌توده
<i>x</i>	ضریب مولی هوا

علام یونانی

η_b	راندمان بویلر
η_e	بازدهی الکتریکی موتور ژنراتور گازسوز

زیرنویس‌ها

<i>bm</i>	زیست‌توده
-----------	-----------

- 19- Bridgwater AV. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel*. 1995;74(5):631-653.
- 20- Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. Hoboken: John Wiley & Sons; 1996.
- 21- Zainal ZA, Ali R, Lean CH, Seetharamu KN. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management*. 2001;42(12):1499-1515.
- 22- Alauddin ZAZ. Performance and characteristics of a biomass gasifier system [Dissertation]. Cardiff: University of Wales; 1996.
- 23- RH Perry, Chilton CH. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 5th Edition. Volume 5. New York: McGraw-Hill; 1973.
- cycle distributed generation plant with reciprocating gas engine and ORC. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(14-15):2829-2840.
- 15- Puig-Arnavat M, Bruno JC, Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(9):2841-2851.
- 16- Basu P. Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. Cambridge: Academic press; 2010.
- 17- Shabbar S, Janajreh I. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method. *Energy Conversion and Management*. 2013;65:755-763.
- 18- Çengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An engineering approach. 4th Edition. Volume 1. New York: McGraw-Hill; 2002.