



تحلیل جامع انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی و بهینه سازی چندهدفه سیستم تولید هیدروژن از گازی سازی باگاس نیشکر به کمک بخار آب

فرهاد دولت آبادی¹، بهزاد عزیزی مهر²، رامین قاسمی اصل^{3*}، طاهر ارمغانی⁴

1- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

4- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* تهران، 1468763785، ghasemiasl@iau.ac.ir

چکیده

بهره گیری از زیست توده باگاس نیشکر از طریق فرآیند گازی سازی، راهکاری امیدبخش برای تولید پایدار هیدروژن و مدیریت پسماندهای کشاورزی به شمار می رود. در این پژوهش، یک سیستم تولید هیدروژن مبتنی بر گازی سازی زیست توده باگاس نیشکر به کمک بخار آب با استفاده از تحلیل های چهارگانه انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی به طور جامع ارزیابی شد. نتایج تحلیل ترمودینامیکی نشان داد که راکتور گازساز به دلیل برگشتناپذیری بالای فرآیندها، اصلی ترین منبع تخریب انرژی و هزینه در سیستم است. سپس، بهینه سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری زنبور عسل برای بهبود همزمان بازده انرژی، بازده انرژی، هزینه کل و نرخ انتشار دی اکسید کربن انجام گرفت. نتایج بهینه سازی منجر به افزایش بازده انرژی از ۳۶.۵۷٪ به ۴۱.۳۷٪ و بازده انرژی از ۲۹.۹۱٪ به ۳۱.۱۶٪ شد. همچنین، هزینه کل سیستم و دبی انتشار دی اکسید کربن کاهش یافتند. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که افزایش دمای گاز سنتز و کاهش رطوبت زیست توده، عملکرد سیستم را بهبود می بخشد، در حالی که افزایش فشار، تأثیر منفی بر هزینه ها و آلاینده ها دارد. این پژوهش نشان می دهد که گازی سازی باگاس نیشکر، یک مسیر امیدوارکننده برای تولید هیدروژن پایدار است و رویکرد بهینه سازی چندهدفه می تواند به تحقق سیستم های کارآمدتر و اقتصادی تر کمک کند.

کلیدواژه ها: تولید هیدروژن، گازی سازی زیست توده، باگاس نیشکر، تحلیل چهارگانه، بهینه سازی چندهدفه.

Comprehensive energy, exergy, economic, and environmental analysis and multi-objective optimization of a hydrogen production system via sugarcane bagasse gasification using steam

Farhad Dowlatabadi¹, Behzad Azizimehr², Ramin Ghasemi Asl^{3*}, Taher Armaghani⁴

1- M.Sc., Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Ph.D., Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B 1468763785, Tehran, Iran, ghasemiasl@iau.ac.ir

Received: 24 August 2025 Accepted: 27 November 2025

Abstract

The gasification of sugarcane bagasse biomass presents a promising pathway for sustainable hydrogen production and effective agricultural waste management. In this study, a hydrogen production system based on the gasification of sugarcane bagasse biomass using steam was comprehensively evaluated using energy, exergy, economic, and environmental analyses. The results of the thermodynamic analysis indicated that the gasifier reactor is the primary source of exergy destruction and cost within the system, owing to the high irreversibility of its processes. Subsequently, multi-objective optimization was performed using the Bees metaheuristic algorithm to simultaneously improve energy

efficiency, exergy efficiency, total cost, and the rate of carbon dioxide emissions. The optimization results led to an increase in energy efficiency from 36.57% to 41.37% and exergy efficiency from 29.91% to 31.16%. Furthermore, the total system cost and CO₂ emission rate were reduced. Sensitivity analysis also revealed that increasing the syngas temperature and decreasing biomass moisture enhances system performance, whereas increasing pressure has a negative impact on costs and emissions. This research demonstrates that sugarcane bagasse gasification is a promising pathway for sustainable hydrogen production, and the multi-objective optimization approach can facilitate the development of more efficient and economical systems.

Keywords: Hydrogen Production, Biomass Gasification, Sugarcane Bagasse, 4E Analysis, Multi-Objective Optimization.

1- مقدمه

آب به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در حوزه تبدیل انرژی، طی سال‌های اخیر مورد توجه گسترده‌ای در میان روش‌های حرارتی بازیافت انرژی از زیست‌توده و پسماندهای آلی قرار گرفته‌اند. در این فرآیند، بخار آب به‌عنوان عامل گازی‌ساز اصلی به واکنش با ترکیبات کربن‌دار موجود در خوراک ورودی می‌پردازد و موجب تولید گازهای ارزشمندی نظیر هیدروژن (H₂)، مونوکسید کربن (CO)، و متان (CH₄) می‌شود.

در شرایط مناسب، واکنش بخار با کربن ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) منجر به تولید گاز سنتز می‌شود. این گاز نه تنها می‌تواند به‌صورت مستقیم در تولید انرژی حرارتی و الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد، بلکه قابلیت تبدیل به سوخت‌های مایع مانند دیزل زیستی یا متانول و نیز مواد شیمیایی صنعتی را داراست. استفاده از بخار به جای اکسیژن یا هوا، باعث افزایش خلوص گاز سنتز و کاهش تولید نیتروژن بی‌اثر در محصول نهایی می‌شود. از منظر زیست‌محیطی، این فناوری با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر متان و به حداقل رساندن پساب و پسماند جامد، گزینه‌ای پایدار برای مدیریت منابع آلی محسوب می‌شود. با این وجود، برای دستیابی به بهره‌برداری صنعتی از این سیستم، نیازمند تحقیقات بیشتر در حوزه بهینه‌سازی طراحی، کنترل دقیق پارامترهای عملیاتی، و توسعه مواد مقاوم به حرارت و خوردگی هستیم [1].

بررسی حاضر با هدف ارائه تحلیلی جامع از اجزای اصلی سیستم‌های گازی‌سازی با بخار آب تدوین شده است. این اجزا شامل طراحی و عملکرد راکتور، آماده‌سازی خوراک، راهبردهای کنترل واکنش و مراحل پالایش و بازیابی گازهای تولیدی می‌باشند. هدف نهایی ارائه بینش‌های کلیدی و پیشنهادات فنی برای پژوهشگران و مهندسان علاقه‌مند به توسعه و تجاری‌سازی پایدار این فناوری در مقیاس‌های بزرگ‌تر صنعتی است.

پژوهش‌های فراوان در سال‌های اخیر در زمینه تولید هیدروژن انجام شده است که همگی این پیشرفت‌ها و روش‌های نوین در صد راه‌اندازی سیستم‌های جدید هیدروژن و بررسی ردپای کربن در تولید هیدروژن می‌باشد. برای نمونه، زینال و همکاران [2] به بررسی جامع روش‌های تولید هیدروژن با تمرکز ویژه بر کدهای رنگی هیدروژن پرداختند که قبلاً کمتر در ادبیات علمی مورد توجه قرار گرفته بود. در این مطالعه، روش‌های تولید هیدروژن بر اساس هزینه، اثرات زیست‌محیطی و بلوغ فناوری ارزیابی شدند و بر مزایای هیدروژن سبز تولیدشده از منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید تأکید گردید. نتایج نشان داد که هزینه تولید هیدروژن سبز به طور قابل توجهی کاهش یافته و رقابت‌پذیر با هیدروژن آبی شده است. همچنین، فناوری‌هایی مانند سلول الکترولیز اکسید جامد، غشای تبادل آنیونی و اصلاح بخار الکتریکی متان از جمله گزینه‌های نویدبخش شناخته شدند. این مقاله با مرور وضعیت جهانی زیرساخت‌ها و سیاست‌های مرتبط با هیدروژن، تصویری جامع از چشم‌انداز آینده انرژی هیدروژنی ارائه داد.

استفاده بیش از حد انسان از سوخت‌های فسیلی منجر به افزایش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای، آلودگی‌های زیست‌محیطی و همچنین محدود شدن منابع قابل دسترس شده است. در نتیجه، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان راه‌کاری اساسی برای مقابله با این چالش‌ها در اولویت قرار گرفته است. یکی از گزینه‌های نویدبخش در این زمینه، تولید هیدروژن به عنوان سوختی پاک و پرانرژی است. هیدروژن به دلیل نداشتن ترکیبات کربنی در محصولات احتراق می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش آلودگی و توسعه سیستم‌های انرژی پایدار ایفا کند. با این حال، چالش اصلی در مسیر گسترش مصرف هیدروژن، روش‌های تولید آن است چرا که بسیاری از فناوری‌های رایج تولید هیدروژن هنوز وابسته به منابع فسیلی‌اند یا از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند. در این میان، زیست‌توده به عنوان منبعی تجدیدپذیر، کربن خنثی و در دسترس، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. بهره‌گیری از زیست‌توده به ویژه از طریق فرآیندهایی نظیر گازی‌سازی می‌تواند مسیر مناسبی برای تولید هیدروژن سبز فراهم سازد.

تولید هیدروژن از منابع مختلفی امکان‌پذیر است که به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و روش‌های تجدیدپذیر. در روش‌های فسیلی، فرآیندهایی مانند اصلاح بخار و گازی‌سازی زغال‌سنگ بیش‌ترین کاربرد را دارند اما این روش‌ها با تولید دی‌اکسید کربن همراه بوده و پایداری زیست‌محیطی پایینی دارند. در مقابل، روش‌های تجدیدپذیر همچون الکترولیز آب (با استفاده از برق تجدیدپذیر) و تبدیل زیست‌توده، به‌عنوان مسیرهای پایدار برای تولید هیدروژن مورد توجه قرار گرفته‌اند. الکترولیز به تجهیزات گران‌قیمت و برق پاک نیاز دارد، در حالی که زیست‌توده منبعی ارزان، در دسترس و تجدیدپذیر محسوب می‌شود.

از میان روش‌های مبتنی بر زیست‌توده، فرآیند گازی‌سازی یکی از مهم‌ترین فناوری‌ها برای تولید هیدروژن به شمار می‌رود. در میان مسیرهای مختلف تولید هیدروژن، گازی‌سازی زیست‌توده به‌عنوان گزینه‌ای برجسته و امیدوارکننده مطرح است. این فناوری با استفاده از مواد ارگانیک ارزان و فراوان مانند پسماندهای کشاورزی امکان تولید گاز سنتز حاوی هیدروژن را فراهم می‌سازد. ویژگی کربن‌خنثی بودن زیست‌توده موجب می‌شود تا این روش تأثیرات زیست‌محیطی کم‌تری نسبت به روش‌های فسیلی داشته باشد. همچنین، عدم رقابت با زنجیره غذایی، کاهش آلاینده‌ها و قابلیت بازیافت زباله‌های آلی از دیگر مزایای آن به شمار می‌روند. قابلیت ترکیب این فناوری با سیستم‌های تولید برق و گرما و امکان بهره‌برداری در مقیاس‌های مختلف و مناطق دورافتاده، گازی‌سازی را به یکی از بهترین گزینه‌ها برای توسعه پایدار و تحقق اقتصاد هیدروژنی تبدیل کرده است. سیستم‌های گازی‌سازی با بخار

نسیم و همکاران [3] به بررسی جامع ویژگی‌ها، مزایا، چالش‌ها و فناوری‌های مرتبط با انرژی هیدروژن پرداختند. آن‌ها با تأکید بر نقش هیدروژن به عنوان حامل انرژی پاک، به ویژگی‌هایی مانند چگالی بالای انرژی جرمی و سازگاری زیست‌محیطی آن اشاره کرده و آن را جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی در کاربردهای ثابت و متحرک دانسته‌اند. اگرچه هیدروژن پتانسیل بالایی در کاهش آلایندگی‌ها و دمای جهانی دارد، اما اشتعال‌پذیری بالا نیازمند اقدامات ایمنی جدی در مراحل تولید، ذخیره و استفاده است. این مطالعه، انواع روش‌های ذخیره‌سازی شامل گاز فشرده، مایع و ذخیره‌سازی در حالت جامد را مرور کرده و بر ایمنی و فشرده‌گی بالای روش‌های حالت جامد تأکید کرده است. همچنین، روش‌های سنتز، ذخیره‌سازی، انتقال ایمن و کاربرد هیدروژن معرفی شده‌اند. نویسندگان با وجود دسترسی تجاری به برخی فناوری‌های تولید هیدروژن، بر لزوم تحقیقات بیشتر برای توسعه پایدارتر این فناوری‌ها به منظور کاهش آلایندگی‌های جهانی تأکید دارد. یانگ و همکاران [4] با تمرکز بر زنجیره تأمین هیدروژن سبز، به بررسی امکان‌سنجی تولید، ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پرداختند. آن‌ها با تأکید بر الکترولیز آب به کمک انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یکی از پاک‌ترین و آینده‌دارترین روش‌های تولید هیدروژن، به تحلیل تفاوت‌ها و ویژگی‌های عملکردی فناوری‌های مختلف الکترولایزر پرداختند. در ادامه، سیستم‌های تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر بر اساس طراحی یکپارچه، بازه انرژی، هزینه تولید و اثرات زیست‌محیطی مقایسه شدند. همچنین روش‌های مختلف ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل هیدروژن متناسب با مقیاس و فاصله‌های مورد نیاز، به صورت دقیق بررسی می‌شود. در پایان، چشم‌اندازی از زنجیره کامل صنعت هیدروژن ارائه شد. پارتاساراتی و همکاران [5] گازی‌سازی با بخار را به عنوان یکی از کارآمدترین و مؤثرترین روش‌های ترموشیمیایی برای تولید هیدروژن از زیست‌توده معرفی کردند. این روش در مقایسه با سایر روش‌های ترموشیمیایی، بیش‌ترین بازده استوکیومتری هیدروژن را دارد. در این مطالعه، عوامل مختلف مؤثر بر میزان تولید هیدروژن در فرآیند گازی‌سازی با بخار مانند نوع زیست‌توده، اندازه ذرات خوراک، دمای واکنش، نسبت بخار به زیست‌توده، افزودن کاتالیست و نسبت جاذب به زیست‌توده بررسی شدند. تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل اثر این پارامترهای عملیاتی بر میزان بازدهی هیدروژن و بهینه‌سازی فرآیند برای تولید بیشتر و کارآمدتر است. ژانگ و همکاران [6] به مرور تحلیل انرژی فرآیند تولید هیدروژن از طریق گازی‌سازی با بخار زیست‌توده پرداخت. در این بررسی، تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله ویژگی‌های زیست‌توده، اندازه ذرات، دمای گازی‌سازی، نسبت بخار به زیست‌توده، نرخ جریان بخار، نوع کاتالیست و زمان اقامت بر راندمان انرژی تولید و بحث شد. نتایج نشان داد که بازده انرژی عمده تحت تأثیر میزان تولید هیدروژن و انرژی شیمیایی زیست‌توده قرار دارد. افزایش دمای گازی‌سازی باعث بهبود راندمان انرژی می‌شود، در حالی که افزایش اندازه ذرات خوراک عموماً باعث کاهش آن می‌شود. نسبت بخار به زیست‌توده و نرخ جریان بخار در ابتدا موجب افزایش و در ادامه باعث کاهش بازده انرژی می‌شوند. اثر کاتالیست می‌تواند مثبت، منفی یا ناچیز باشد، در حالی که زمان اقامت تأثیر اندکی بر بازده انرژی دارد. این مطالعه بر اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جهت ارتقاء عملکرد انرژی در تولید هیدروژن از زیست‌توده تأکید دارد. روبین‌سین و همکاران [7] به بررسی مزایا و چالش‌های تولید

هیدروژن از گازی‌سازی زیست‌توده پرداختند. در این مطالعه با اشاره به نقش کاتالیست‌ها در افزایش بازده و کاهش تشکیل کک، به مشکلاتی مانند غیرفعال شدن کاتالیست به دلیل رسوب کربن و زینتر شدن نیز اشاره می‌شود. به دلیل گرماگیر بودن واکنش، تأمین انرژی یکی از محدودیت‌های اصلی فرآیند است. این مقاله منابع زیست‌توده و کاتالیست‌ها، عوامل مؤثر، بهینه‌سازی پارامترها و تحلیل اقتصادی را مرور و در پایان، مزایا، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده گازی‌سازی زیست‌توده را جمع‌بندی کرد. چانگ و همکاران [8] گازی‌سازی زیست‌توده در بستر سیال برای تولید زیست‌هیدروژن و گاز سنتز را بررسی کردند. مواد اولیه شامل آلفا-سلولز و ضایعات کشاورزی بوده که در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و با نسبت‌های مختلف معادل و بخار به زیست‌توده مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف، بهینه‌سازی تولید هیدروژن زیستی و گاز سنتز بود. همچنین، مدلی سینتیکی برای تعیین مرتبه واکنش و انرژی فعال‌سازی ارائه شد. نتایج نشان داد که در دمای ۱۰۰۰ درجه و نسبت معادل ۰.۲، بدون بخار، بیش‌ترین بازده هیدروژن زیستی (۲۹.۵٪) و CO حاصل شد، در حالی که غلظت CO₂ تنها ۱۰.۹٪ بود. ترکیب H₂ و CO به عنوان گاز سنتز، می‌تواند در تولید سوخت مایع یا تصفیه بیشتر برای تولید هیدروژن استفاده شود. سبحان مریام و همکاران [9] در یک مطالعه مروری، تولید هیدروژن از گازی‌سازی و فرایندهای هیدروترمال با استفاده از هیدروچار زیست‌توده را بررسی کردند. نتایج نشان داد ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای هیدروچار موجب بهبود کیفیت گاز سنتز و افزایش بازده هیدروژن می‌شود. در گازی‌سازی با آب فوق بحرانی پوسته بادام، بازده هیدروژن تا ۱۱.۶۳ میلی‌مول بر گرم و در تاپرهای فرسوده تا ۱۹.۷ میلی‌مول بر گرم گزارش شد. همچنین، گازی‌سازی ترکیبی با کربنیزاسیون هیدروترمال تا ۷۶.۷ گرم هیدروژن بر کیلوگرم بیوجار از لجن فاضلاب تولید کرد. این پژوهش بر نقش کاتالیزوری هیدروچار، افزودنی‌ها و فلزات قلیایی در کاهش تشکیل قیر، افزایش نسبت هیدروژن به کربن مونوکسید و بهبود ارزش حرارتی گاز سنتز تأکید دارد. فروق شیر و همکاران [10] در یک مرور نوین، فرایند گازی‌سازی زیست‌توده را به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی تولید انرژی زیستی و دستیابی به انتشار خالص صفر بررسی کردند. این مطالعه به جنبه‌های مختلف گازی‌سازی از جمله طراحی راکتور، فناوری‌های نوین پاک‌سازی گاز سنتز، چالش‌های مقیاس‌پذیری، تحلیل فنی-اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی پرداخته است. گازی‌سازی معمولاً در دماهای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۰.۹۸ تا ۲.۹۴ اتمسفر، نسبت بخار به زیست‌توده ۰.۳ تا ۱ و رطوبت کم‌تر از ۳۵٪ انجام می‌شود. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی این پارامترها موجب کاهش ناخالصی‌ها و بهبود کیفیت گاز سنتز می‌گردد. طراحی گازی‌فایر نقش مهمی در تشکیل قیر دارد، به طوری که گازی‌فایرهای جریان‌روبه‌بالا حدود ۱۰۰ g/Nm³ قیر تولید می‌کنند، در حالی که نوع جریان‌روبه‌پایین تنها حدود ۱ g/Nm³ و بستر سیال حدود ۱۰ g/Nm³ قیر ایجاد می‌کند. روش‌های فیزیکی-مکانیکی بازدهی ۹۹٪ دارند ولی موجب کاهش بازده انرژی و تولید پسماند خطرناک می‌شوند. در مقابل، روش‌های شکست حرارتی و کاتالیستی تا ۹۸٪-۱۰۰٪ کارایی دارند که در آن کاتالیست‌های پایه نیکل بسیار مؤثر هستند. گازی‌سازی زیست‌توده در سطح آمادگی فناوری بین ۸ تا ۹ قرار دارد که بیانگر قابلیت اجرای صنعتی آن است، هرچند هزینه‌ها حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد. این مطالعه تأکید می‌کند که

واکنش‌های جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیست‌توده مورد استفاده در این فرآیند باگاس نیشکر به عنوان سوخت مورد استفاده برای تولید گاز سنتز و تولید هیدروژن است. همچنین، رطوبت اضافی زیست‌توده در مرحله اولیه این فرآیند حذف شده و تنها ۱۲٪ از رطوبت زیست‌توده باقی می‌ماند. مدل‌سازی این بخش بر اساس موازنه جرم و انرژی و واکنش‌های شیمیایی اصلی گازی‌سازی شامل پیرولیز، اکسیداسیون جزئی و واکنش شیفت آب-گاز انجام شده است تا توزیع اجزای گاز و دمای بهینه واکنش تعیین می‌شود. زیست‌توده در مرحله بعدی بدون حضور هوا در محفظه پیرولیز واکنش داده و منجر به تولید گاز می‌شود. و آماده واکنش با آب و هوا در مرحله بعدی می‌شود. در مرحله گازساز، مخلوطی از گازهای هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و متان تولید خواهد شد. سپس در مرحله بعد، واکنش کاهش رخ می‌دهد. در این مرحله، گاز تولیدشده از محفظه پیرولیز که عمدتاً شامل مونوکسید کربن، هیدروژن، کربن دی‌اکسید و متان است، با بخار آب وارد واکنش می‌شود. این فرآیند به منظور افزایش مقدار هیدروژن و کاهش ترکیبات ناخواسته مانند قیر و ذرات سنگین صورت می‌گیرد. در واکنش کاهش، مونوکسید کربن و بخار آب وارد واکنش شیفت آب-گاز می‌شوند و منجر به تولید هیدروژن و دی‌اکسید کربن می‌شود. گرمای اضافی از این فرآیند به منظور استفاده در سایر چرخه‌ها به کمک مبدل حرارتی قابل بازیافت است. سپس گاز سنتز تولید شده وارد محفظه واکنش شیفت آب-گاز می‌شود. در این محفظه، مونوکسید کربن موجود در جریان گاز سنتز با بخار آب وارد واکنش شده و مقدار بیش‌تری هیدروژن تولید می‌شود. این واکنش گرمازا نبوده و معمولاً در دو مرحله دمای بالا و دمای پایین انجام می‌گیرد تا بیش‌ترین بازدهی در تبدیل CO به H_2 حاصل شود. در نتیجه این واکنش، ترکیب نهایی گاز شامل درصد بیش‌تری از هیدروژن و درصد کم‌تری از مونوکسید کربن خواهد بود. این مرحله برای بهبود راندمان تولید هیدروژن استفاده می‌شود.

با این حال، لازم به ذکر است که مدل توسعه‌یافته بر پایه فرضیات ساده‌کننده‌ای همچون رفتار ایده‌آل گازها، شرایط پایدار و یکنواخت واکنش، و صرف‌نظر از تلفات حرارتی و مکانیکی بنا شده است؛ بنابراین، نتایج ممکن است در شرایط واقعی با اندکی انحراف همراه باشند. افزون بر این، از دیگر محدودیت‌های مدل می‌توان به نیاز خوراک زیست‌توده با رطوبت کم‌تر از ۲۰٪ اشاره کرد زیرا در مقادیر بالاتر، راندمان گازی‌سازی و کیفیت گاز سنتز به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. با وجود این، این فرضیات برای اهداف تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی چندهدفه مناسب ارزیابی می‌شوند. همچنین فرضیات مدل‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

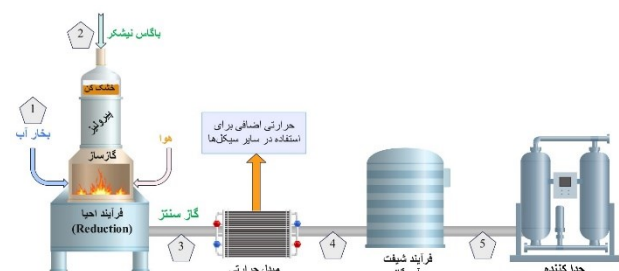
- فرآیند گازی‌سازی در شرایط پایا در نظر گرفته شده است.
- تلفات حرارتی به محیط اطراف در تمامی اجزا و تجهیزات نادیده گرفته شده است.
- خواص ترمودینامیکی گازها بر اساس رفتار گاز ایده‌آل محاسبه شده است.
- رطوبت اولیه زیست‌توده پس از مرحله خشک‌سازی ۱۲٪ فرض شده است.
- واکنش‌های شیمیایی اصلی گازی‌سازی شامل پیرولیز، اکسیداسیون جزئی، واکنش بونس و شیفت آب-گاز فرض شده‌اند.

2-1- تحلیل انرژی

تبدیل گاز سنتز به محصولات بارزش برای دستیابی به کاهش خالص گازهای گلخانه‌ای حیاتی است و توسعه روش‌های نوآورانه برای استفاده بهینه از تمامی محصولات جانبی گازی‌سازی، کلید گسترش جهانی این فناوری محسوب می‌شود. کانی وینستون کاتین و همکاران [11] در یک مرور جامع، گازی‌سازی زیست‌توده کربنیزه‌شده را به‌عنوان یکی از مسیرهای مهم و پرتحقیق برای تولید انرژی از زیست‌توده بررسی کردند. گازی‌سازی فرایندی ترموشیمیایی است که درون یک گازی‌فایر انجام می‌شود و عوامل متعددی بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند. گازی‌سازی زیست‌توده کربنیزه‌شده، به‌ویژه برای زیست‌توده‌های با رطوبت بالا یا ساختار ناممکن، روشی کارآمد برای تولید انرژی محسوب می‌شود. اگرچه این نوع گازی‌سازی می‌تواند تشکیل قیر را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد که یکی از چالش‌برانگیزترین جنبه‌های طراحی و بهره‌برداری گازساز است. اما تاکنون کم‌تر از حد شایسته مورد توجه قرار گرفته است. یونگ‌نان ژانگ و همکاران [12] در یک مطالعه مروری، به بررسی تولید گاز پیرولیز از زیست‌توده به‌عنوان یکی از منابع مهم انرژی زیستی پرداختند. زیست‌توده به‌دلیل فراوانی منابع آن، پس از زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی، چهارمین منبع بزرگ انرژی در جهان محسوب می‌شود. در حال حاضر، محصولات اصلی فرایند پیرولیز شامل روغن پیرولیز و بیوجاز هستند، اما گاز پیرولیز همچنان ظرفیتی کشف‌نشده دارد که نیازمند بررسی بیش‌تر است. پژوهش‌ها در زمینه گاز پیرولیز به‌تدریج پیشرفت کرده و در حال رسیدن به سطح تجاری هستند. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان گاز پیرولیز را بر اساس نیاز، تصفیه و از قیر و ناخالصی پاک‌سازی کرده و اجزای آن را برای مصارف مختلف جدا و استخراج نمود. این مطالعه به بررسی مکانیسم تبدیل زیست‌توده به گاز پیرولیز، تجهیزات فرایند، اثر پارامترهای عملیاتی، روش‌های تحلیل، کاربردهای بالقوه گاز پیرولیز و راهکارهای ارتقای محصولات آن در آینده پرداخته است.

2- روش‌شناسی و سیستم پیشنهادی

در این بخش به بررسی سیستم پیشنهادی برای تولید هیدروژن به کمک آب پرداخته شده است و در ادامه به تحلیل چهارگانه انرژی، اگزرژی، اقتصادی و محیط زیست، سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. شماتیک پیشنهادی سیستم در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل 1 شماتیک سیستم پیشنهادی برای تولید هیدروژن

در این سیستم با ورود زیست‌توده به راکتور اصلی (گازساز)، زیست‌توده تبدیل به گاز سنتز شده و در مراحل بعدی غلظت هیدروژن افزایش می‌یابد. محصولات نهایی در این فرایند عمدتاً غنی از هیدروژن مورد نیاز برای استخراج و جداسازی است. آب به همراه مقداری هوا به عنوان عامل گازی‌سازی و آغاز

مبنای اصلی این تحلیل بر پایه قوانین اول ترمودینامیک و اصل بقای جرم پایه گذاری شده است [13]

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} + \left(\sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{Q}_{out} \right) + \dot{W} = 0 \quad (2)$$

که در این دو رابطه $\dot{m}_{in}$ دبی جرم ورودی و $\dot{m}_{out}$ دبی جرم خروجی می‌باشد. همچنین h به آنتالپی ورودی و خروجی سیستم و $\dot{Q}$ نرخ حرارتی سیستم و $\dot{W}$ نرخ کار انجام شده در سیستم می‌باشد. جدول ۱ واکنش‌های انجام شده در این فرآیند را نشان می‌دهد.

جدول ۱ واکنش‌های مربوط به فرآیند گازسازی و تولید هیدروژن [2]

واکنش شیمیایی	نوع واکنش
$\text{CH}_{1.72}\text{O}_{0.71}\text{N}_{0.01}(\text{wet}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CH}_{1.72}\text{O}_{0.71}\text{N}_{0.01}(\text{dry}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	خشک‌کن
$\text{CH}_{1.72}\text{O}_{0.71}\text{N}_{0.01} + \text{C}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{CH}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{N}_2(\text{g})$	پیرولیز
$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ گرما $\text{H}_2(\text{g}) + 0.5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ گرما	واکنش‌های احتراقی
$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$ $\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$	واکنش دی‌اکسید کربن و بخار آب

پارامترهای ورودی سیستم در نظر گرفته شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات ورودی چرخه [2و14]

پارامتر	نماد	مقدار
دمای محیط	T_0	25 °C
فشار محیط	P_0	101.3 kPa
فشار در مراحل گازسازی	P_i	101.3 kPa
میزان رطوبت زیست‌توده	MC	12%
دمای ورودی زیست‌توده	T_2	25 °C
میزان درصد بخار به زیست‌توده	STB	30%
دبی جرم ورودی زیست‌توده	$\dot{m}_2$	1 kg/s
نسبت هوا به بخار تزریقی	α	5%
ارزش حرارتی پایین باگاس نیشکر	LHV	423,118 kJ/kmol
ارزش حرارتی بالای باگاس نیشکر	HHV	449,568 kJ/kmol
درصد کربن در زیست‌توده	C%	46.38%
درصد هیدروژن در زیست‌توده	H%	4.68%
درصد اکسیژن در زیست‌توده	O%	44.11%
درصد نیتروژن در زیست‌توده	N%	0.5%
درصد خاکستر در زیست‌توده	Ash%	4.33%

در ادامه، ثابت تعادلی (K) محاسبه می‌شود که در این رابطه ΔG^0 تغییرات انرژی گیبس استاندارد مواد و $\bar{R}$ ثابت جهانی گازها می‌باشد [2و15].

$$-\frac{\Delta G^0}{RT} = \ln K \quad (3)$$

تغییرات انرژی گیبس استاندارد از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\Delta G^0 = \Delta \bar{H} - T \Delta \bar{S}^0 \quad (4)$$

که در این رابطه، $\bar{H}$ آنتالپی استاندارد مواد و $\bar{S}^0$ آنتروپی استاندارد مواد در حالت مرده است.

نسبت مولی آب به کربن به صورت زیر تعریف می‌شود [16].

$$S/G = \frac{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{mol}_{\text{C}}} \quad (5)$$

دبی مورد نیاز آب برای این فرآیند به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [15و16].

$$\dot{m}_{\text{steam}} = \alpha \times S/G \quad (6)$$

برای محاسبه نسبت مولی مواد تشکیل‌دهنده گاز سنتز از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$X = \frac{n_x}{n_{\text{total}}} \quad (7)$$

2-2- تحلیل انرژی

انرژی بیاگر حداکثر میزان کار مفید قابل استخراج از یک سیستم یا جریان ماده/انرژی است؛ هنگامی که آن سیستم با محیط مرجع (محیط مرده) به تعادل کامل ترمودینامیکی، مکانیکی و شیمیایی می‌رسد. برخلاف انرژی که طبق قانون اول ترمودینامیک پایسته است، انرژی به واسطه پدیده‌های غیرقابل بازگشت مانند اصطکاک، انتقال گرما از طریق گرادیان دما، اختلاط و واکنش‌های شیمیایی، کاهشی و نابودشدنی است. انرژی را می‌توان با توجه به منشأ و ماهیت آن به دسته‌های مختلف تقسیم کرد که شامل انرژی فیزیکی، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل می‌باشد [17].

در بسیاری از تحلیل‌های سیستم‌های مهندسی مانند نیروگاه‌ها یا سامانه‌های زیست‌توده، سهم انرژی جنبشی و پتانسیل به دلیل ناچیز بودن، در مدل‌سازی قابل صرف‌نظر است و تمرکز بر روی انرژی‌های فیزیکی و شیمیایی خواهد بود. به صورت کلی می‌توان رابطه انرژی را برای هر نقطه از رابطه زیر به دست آورد [17-19].

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{ph} + \dot{E}x^{ch} + \dot{E}x^{po} + \dot{E}x^{ke} \quad (8)$$

در رابطه (8)، بالانویس ph به منظور انرژی فیزیکی، ch به معنی شیمیایی و po و ke به ترتیب نماینده انرژی‌های پتانسیل و جنبشی است. به دلیل تغییرات ناچیز در انرژی‌های پتانسیل و جنبشی از این دو پارامتر می‌توان چشم‌پوشی نمود. انرژی فیزیکی از رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\dot{E}x^{ph} = \dot{m}[(h - h_0) + T_0(s - s_0)] \quad (9)$$

در رابطه (9)، $\dot{m}$ دبی جرمی و h و s به ترتیب آنتالپی و آنتروپی جریان هستند. همچنین، زیروند 0 به حالت مرده اشاره دارد. همچنین، انرژی شیمیایی ماده از رابطه (10) قابل محاسبه است [20].

$$\dot{E}x^{ch} = \dot{m}\beta LHV_{\text{bagass}} \quad (10)$$

در رابطه (10)، β نسبت انرژی شیمیایی زیست‌توده به ارزش حرارتی پایین است و از رابطه (11) محاسبه می‌شود.

$$\beta = \frac{1.044 + 0.16 \frac{M_H}{M_C} - 0.33493 \frac{M_O}{M_C} \left(1 + 0.0531 \frac{M_H}{M_C} \right)}{1 - 0.4124 \frac{M_O}{M_C}} \quad (11)$$

2-3- تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی یکی از ارکان اصلی در ارزیابی و مقایسه گزینه‌های فنی برای طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های انرژی است. این تحلیل با هدف تعیین هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و دوره بازگشت سرمایه انجام می‌شود. در سیستم‌های زیست‌توده، تحلیل اقتصادی اهمیت

می‌شود. در مواردی که محصول نهایی سیستم صرفاً توان الکتریکی باشد، انتشار ویژه دی‌اکسید کربن به صورت زیر تعریف می‌شود [27].

$$\xi_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{W}} \quad (14)$$

برای محاسبه نرخ تولید جرمی دی‌اکسید کربن در خروجی سیستم از رابطه زیر استفاده می‌شود که بر پایه ترکیب جرمی گاز سنتز و نرخ جرمی کل آن تدوین شده است [27].

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{W_{CO_2} \times M_{CO_2}}{W_{syngas}} \times \dot{m}_{syngas} \quad (15)$$

در این رابطه W_{CO_2} درصد وزن دی‌اکسید کربن در ترکیب گاز سنتز، $\dot{m}_{syngas}$ درصد وزنی گاز سنتز، M_{CO_2} جرم مولی دی‌اکسید کربن و $\dot{m}_{syngas}$ دبی جرمی گاز سنتز است.

2-5- راندمان سیستم

راندمان کلی انرژی سیستم بیانگر نسبت انرژی شیمیایی حاصل از هیدروژن تولیدشده به انرژی شیمیایی موجود در زیست‌توده ورودی می‌باشد. این راندمان با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [4].

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\dot{m}_{biomass} LHV_{biomass}} \quad (16)$$

$\dot{m}_{H_2}$ نرخ تولید جرمی هیدروژن، LHV_{H_2} ارزش حرارتی پایین هیدروژن، $\dot{m}_{biomass}$ نرخ جرمی ورودی زیست‌توده و $LHV_{biomass}$ ارزش حرارت پایین زیست‌توده است. در ادامه، برای محاسبه راندمان انرژی سیستم از رابطه زیر استفاده می‌شود [4].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{H_2}}{\dot{E}x_{biomass} + \dot{E}x_{H_2O}} \quad (17)$$

در این رابطه، $\dot{E}x_{H_2}$ انرژی خروجی هیدروژن، $\dot{E}x_{biomass}$ انرژی زیست‌توده و $\dot{E}x_{H_2O}$ انرژی آب است. همچنین، شاخص بازده تولید هیدروژن نشان می‌دهد که چه مقدار هیدروژن از هر واحد جرم زیست‌توده حاصل می‌شود. این نسبت طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [4].

$$\eta_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{biomass}} \quad (18)$$

این شاخص‌ها برای ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی و بازده تبدیل زیست‌توده به هیدروژن نقش اساسی دارند و مبنایی برای مقایسه و بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های گازی‌سازی فراهم می‌کنند.

2-6- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه یکی از زیرشاخه‌های مهم در علم بهینه‌سازی است که به بررسی مسائلی می‌پردازد که در آن‌ها بیش از یک تابع هدف به‌طور هم‌زمان باید بهینه شوند. این توابع هدف معمولاً با یکدیگر در تضاد هستند، به‌طوری‌که بهبود یکی از آن‌ها ممکن است به کاهش کیفیت تابع دیگر منجر شود. در بسیاری از مسائل واقعی در حوزه‌های مهندسی با چنین موقعیت‌هایی مواجه هستیم. در این پژوهش، برای حل مسئله چندهدفه مطرح‌شده از روش بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین بهره گرفته شده است. در فرآیند مدل‌سازی، توابع هدف، قیود ترمودینامیکی و متغیرهای تصمیم (از جمله دما، فشار و نرخ جریان) به‌صورت دقیق تعریف شده و مراحل پیاده‌سازی الگوریتم به‌طور گام‌به‌گام در محیط محاسباتی توسعه یافته‌اند تا اطمینان از دقت مدل حاصل شود. این روش زمانی مفید واقع می‌شود که ارزیابی تابع هدف اصلی

دوچندانی دارد چرا که بهره‌وری پایین و هزینه‌های بالای پیش‌تصفیه می‌تواند بر بازده نهایی سرمایه‌گذاری تأثیرگذار باشد. بر این اساس، تحلیل اقتصادی به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا پایداری مالی، بازدهی سرمایه و امکان‌سنجی تجاری پروژه را به‌درستی بسنجند [21].

در این مطالعه برای برآورد هزینه‌های اقتصادی سیستم گازی‌سازی زیست‌توده، از یک مدل مهندسی مبتنی بر روابط تجربی و روش نرخ سرمایه‌سازی سالیانه استفاده شده است. ضریب سرمایه‌سازی به‌صورت زیر محاسبه شد [22 و 23].

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (12)$$

در این رابطه، i نرخ بهره سالیانه و N طول عمر مفروض پروژه براساس سال است. هزینه ساعتی سرمایه‌ای اجزای مختلف سیستم طبق رابطه (13) محاسبه می‌شود [24].

$$Z_{coefficient} = \frac{CRF \times \phi}{n \times 3600} \quad (13)$$

n تعداد ساعات عملکرد سالیانه سیستم و ϕ ضریب هزینه‌های نگهداری و جانبی است. جدول 3 مقادیر مفروض برای تحلیل اقتصادی را ارائه می‌کند.

جدول 3 پارامترهای ورودی تحلیل اقتصادی [24]

پارامتر	نماد	مقدار
طول عمر مفروض پروژه	N	20 yr.
نرخ بهره سالیانه	i	12%
ضریب هزینه‌های نگهداری	ϕ	1.06
تعداد ساعات عملکرد سالیانه سیستم	n	7466 hr.

2-4- تحلیل زیست‌محیطی

هدف از تحلیل زیست‌محیطی سیستم‌های ترموشیمیایی مانند گازی‌سازی زیست‌توده، ارزیابی کمی انتشار آلاینده‌هایی نظیر دی‌اکسید کربن و برآورد اثرات مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها بر محیط‌زیست است. در این رویکرد، برای هر جزء از سیستم یک معادله موازنه برای نرخ بار زیست‌محیطی تعریف می‌شود که در آن، مجموع بارهای زیست‌محیطی جریان‌های خروجی برابر با مجموع جریان‌های ورودی به‌علاوه بار ناشی از عملکرد داخلی آن جزء در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌هایی مانند نرخ تولید CO_2 ، هزینه اجتماعی انتشار آن و نسبت هزینه اقتصادی به بار زیست‌محیطی به‌عنوان ابزارهایی برای درک عملکرد زیست‌محیطی سیستم در شرایط کاری مختلف به کار گرفته می‌شوند. این نوع تحلیل‌ها امکان مقایسه بین گزینه‌های فناورانه مختلف و بهینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی سیستم را فراهم می‌کنند. بر اساس مطالعات پیشین، استفاده از این چارچوب‌های کمی در طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های تولید انرژی از زیست‌توده نقش مهمی در کاهش ردپای کربنی و افزایش پایداری محیطی دارد [25 و 26].

انتشار ویژه دی‌اکسید کربن یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی محسوب می‌شود و نقش مهمی در چارچوب تحلیل انرژی-زیست‌محیطی ایفا می‌کند. این شاخص، میزان آلاینده‌گی مرتبط با تولید یک واحد از محصول مفید سیستم را بیان می‌کند و به‌طور معمول از تقسیم نرخ جرمی انتشار CO_2 بر نرخ تولید انرژی یا محصول مفید محاسبه

2 و روابط موجود در بخش دوم استفاده شده است. تحلیل سیستم بر مبنای رویکرد حجم کنترل انجام پذیرفته است؛ روشی که امکان بررسی تبادل انرژی و جرم در مرزهای مشخص سیستم را فراهم می‌سازد.

به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و تمرکز بر تحلیل انرژی حرارتی جریان‌ها، فرضیات ساده‌ساز متعددی در نظر گرفته شده‌اند. از جمله، تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل نادیده گرفته شده و اتلافات ناشی از اصطکاک در مسیرهای انتقال سیال (لوله‌ها و مجاری) در محاسبات لحاظ نشده‌اند. همچنین، افت فشار در اجزای مختلف سیستم به‌دلیل ناچیز بودن، صرف‌نظر شده و بنابراین، فرض شده است که فشار در تمام نقاط چرخه ثابت باقی می‌ماند. نتایج حاصل از مدل تعادلی گازساز در جدول 4 ارائه شده‌اند و مبنای ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی بخش تولید گاز سنتز و هیدروژن سیستم قرار گرفته‌اند.

جدول 4 نتایج مدل ثابت تعادلی برای گازساز

پارامتر	نماد	مقدار
انرژی آزاد گیبس کربن	G_C^0	557,750 J/mol
انرژی آزاد گیبس مونوکسید کربن	G_{CO}^0	310,770 J/mol
انرژی آزاد گیبس هیدروژن	$G_{H_2}^0$	136,552 J/mol
انرژی آزاد گیبس متان	$G_{CH_4}^0$	271,041 J/mol
تغییر انرژی آزاد گیبس واکنش گازساز	ΔG	2,045 J/mol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی فرآورده‌ها	$\bar{H}_f^0 \text{ products}$	480,355 kJ/kmol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی واکنش‌دهنده‌ها	$\bar{H}_f^0 \text{ reactants}$	377,246 kJ/kmol
ثابت تعادلی واکنش بوردارد	K_1	0.7694
ثابت تعادلی واکنش آب - گاز	K_2	1.819
تعداد کل مول‌های محصولات	n_{total}	3.139 mol
کسر متان	y_{CH_4}	2.85%
کسر مونوکسید کربن	y_{CO}	11.93%
کسر دی‌اکسید کربن	y_{CO_2}	17.08%
کسر هیدروژن	y_{H_2}	13.87%
کسر نیتروژن	y_{N_2}	48.72%
کسر بخار آب	y_{H_2O}	8.55%

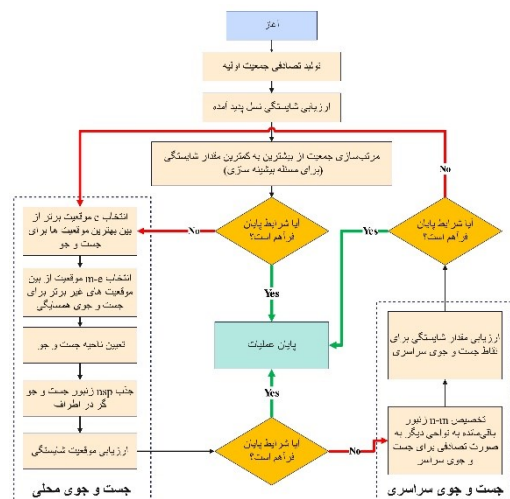
همچنین، جدول 5 میزان تولید هیدروژن، حرارت‌های دو بخش گازساز و راکتور شیف آب - گاز و شاخص‌های عملکردی کل فرآیند را ارائه می‌کند.

جدول 5 نتایج مدل ثابت تعادلی برای گازساز

پارامتر	نماد	مقدار
نرخ هیدروژن تولیدی	$\dot{m}_{H_2}$	718.3 kg/hr
حرارت بخش گازساز	$\dot{Q}_{\text{gasifier}}$	14,263 kJ/s
حرارت بخش راکتور شیف آب - گاز	$\dot{Q}_{\text{WGS}}$	3,137 kJ/s
بازده تولید هیدروژن	η_{H_2}	31.16%
بازده انرژی	η_{ex}	29.91%
بازده فرآیند	η	36.57%

نتایج تحلیل انرژی نشان می‌دهد که در میان اجزای مختلف سیستم، گازساز به‌عنوان اصلی‌ترین منبع اتلاف انرژی شناخته می‌شود. این میزان بالای تخریب انرژی عمده ناشی از ماهیت شدیداً برگشت‌ناپذیر فرآیندهای

بسیار پرهزینه، زمان‌بر یا پیچیده باشد. در این رویکرد، یک مدل تقریبی و کم‌هزینه که به آن مدل جایگزین گفته می‌شود، به‌جای تابع هدف اصلی ساخته می‌شود. سپس فرآیند بهینه‌سازی بر پایه این مدل ساده‌شده انجام می‌گیرد. استفاده از این تکنیک به طور قابل توجهی زمان محاسباتی را کاهش داده و امکان بررسی فضای بیش‌تری از پاسخ‌ها را فراهم می‌سازد. در این پژوهش برای پیاده‌سازی این چارچوب از الگوریتم زنبورعسل که یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری شناخته‌شده است، استفاده شده است. این الگوریتم با الهام از رفتار جست‌وجوی غذای زنبورها طراحی شده و برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده عملکرد مناسبی دارد. فلوجارت کلی روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه در شکل 2 ارائه شده است [28-30].



شکل 2 فلوجارت الگوریتم زنبورعسل [30]

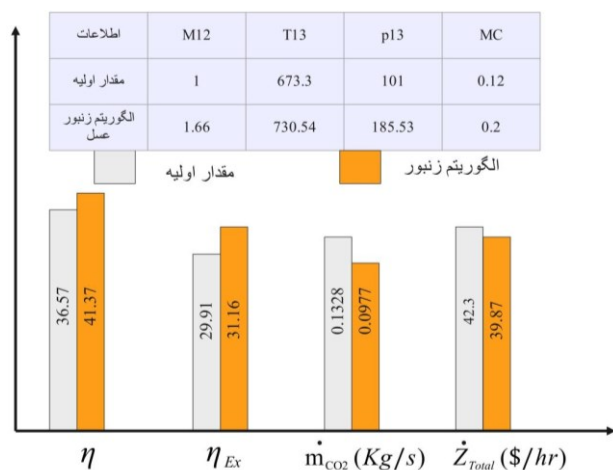
جزئیات کامل پارامترهای کلیدی این الگوریتم که بر عملکرد آن تأثیر مستقیم دارند، به شرح زیر تنظیم گردیدند. اندازه جمعیت اولیه زنبورها برابر با 20 در نظر گرفته شد تا فضای جست‌جوی مناسبی پوشش داده شود. تعداد حداکثر تکرار یا نسل‌ها که به عنوان معیار توقف اصلی الگوریتم عمل می‌کند، 100 تعیین گردید تا فرآیند بهینه‌سازی زمان کافی برای همگرایی داشته باشد. از میان این جمعیت، در هر تکرار 5 سایت برتر برای جست‌جوی محلی انتخاب شد که 2 سایت از آن‌ها به عنوان سایت‌های نخبه در نظر گرفته شدند تا جست‌جوی متمرکزتری در اطراف بهترین راه‌حل‌ها انجام شود. اندازه اولیه ناحیه جست‌جو برای تولید راه‌حل‌های جدید در اطراف سایت‌های منتخب، 0.1 انتخاب شد. نکته قابل توجه این است که اندازه این ناحیه جست‌جو در هر تکرار به میزان 5٪ کاهش می‌یابد تا با پیشرفت الگوریتم، جست‌جو در نواحی امیدبخش با دقت بیش‌تری انجام شود. این مجموعه از پارامترها با هدف ایجاد تعادل مناسب بین اکتشاف در فضای کلی مسئله و بهره‌برداری از بهترین راه‌حل‌های یافته‌شده انتخاب شده است تا از همگرایی الگوریتم به نقطه بهینه جهانی اطمینان حاصل گردد.

3- نتایج و تحلیل

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور انجام محاسبات، از داده‌های ارائه‌شده در جدول

برای انجام بهینه‌سازی چندهدفه در سیستم تولید هیدروژن زیستی، از الگوریتم فرا-ابتکاری زنبور عسل استفاده شد. پارامترهای این الگوریتم به گونه‌ای انتخاب شدند که تعادل مناسبی میان جستجوی سراسری و محلی برقرار شود. در مجموع، تعداد ۲۰ زنبور در هر نسل مورد استفاده قرار گرفت که از میان آن‌ها، ۵ سایت به عنوان نقاط منتخب برای جستجوی محلی انتخاب شدند. از این میان، ۲ سایت نیز به عنوان سایت‌های نخبه در نظر گرفته شدند که جستجوی دقیق‌تری پیرامون آن‌ها انجام گرفت.

اندازه اولیه ناحیه جستجوی محلی برابر با ۰.۱ تنظیم شد و به منظور افزایش تمرکز جستجو در مراحل پایانی، ضریب کاهش اندازه جستجو برابر با ۰.۹۵ در نظر گرفته شد. تعداد کل تکرارهای الگوریتم نیز برابر با ۱۰۰ تعیین شد تا فرصت کافی برای همگرایی راه‌حل‌ها فراهم شود. محدوده‌های متغیرهای تصمیم‌گیری نیز به گونه‌ای تعریف شدند که محدوده عملیاتی واقعی سیستم را پوشش دهند. دبی زیست‌توده در بازه ۰.۸ تا ۲ کیلوگرم بر ثانیه، دمای گاز سنتز در محدوده ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس، فشار گاز سنتز در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال و رطوبت زیست‌توده در محدوده ۰.۱ تا ۰.۲ در نظر گرفته شدند. این محدوده‌ها بر اساس محدودیت‌های ترمودینامیکی و عملیاتی سیستم تعیین شد تا از صحت نتایج بهینه‌سازی اطمینان حاصل شود. شکل ۴ مقایسه‌ای بین مقادیر اولیه و نتایج بهینه‌سازی توابع هدف انجام می‌دهد.



شکل ۴ مقایسه بین مقادیر اولیه و نتایج بهینه‌سازی

مطابق نتایج ارائه‌شده در شکل ۴، الگوریتم زنبور عسل توانسته است به طور مؤثر سیستم مورد نظر را از ابعاد مختلف بهینه‌سازی نماید. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که این الگوریتم با موفقیت به یک راه‌حل مصالحه‌ای میان معیارهای مختلف عملکردی دست یافته است. بهینه‌سازی انجام‌شده منجر به بهبود قابل توجهی در شاخص‌های ترمودینامیکی نظیر بازده انرژی و راندمان انرژی شده است. علاوه بر ارتقای عملکرد، نتایج به دست آمده نشان‌دهنده کاهش اثرات زیست‌محیطی سیستم، به ویژه در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای، هستند. همچنین، از منظر اقتصادی نیز شرایطی فراهم شده که عملکرد سیستم به صرفه‌تر باشد. این موضوع اهمیت انتخاب مناسب پارامترهای بهینه‌سازی و قابلیت بالای الگوریتم زنبور عسل در رسیدن به پاسخ‌های مؤثر چندهدفه را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵ تا ۸ به ترتیب تأثیر پارامترهای دبی زیست‌توده،

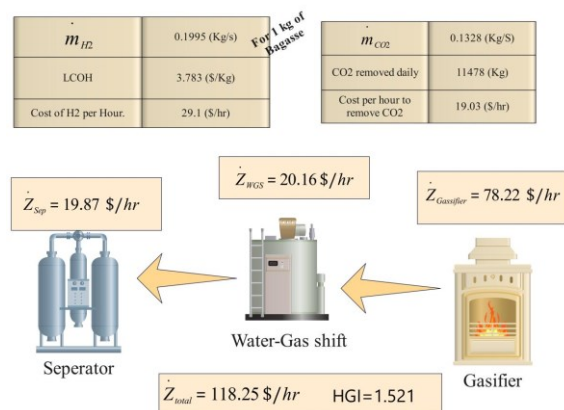
شیمیایی و حرارتی در این واحد است. همچنین، در راکتور شیفت آب-گاز نیز مقدار مشخصی از انرژی به دلیل برگشت‌ناپذیری واکنش‌های شیمیایی و همچنین انتقال حرارت لازم برای خنک‌سازی راکتور از بین می‌رود؛ هرچند میزان این اتلاف نسبت به گازساز به مراتب کم‌تر است.

جدول ۶ نتایج مربوط به تحلیل اقتصادی سیستم پیشنهادی تولید هیدروژن با استفاده از زیست‌توده را نشان می‌دهد. طبق داده‌های جدول ۶، سیستم پیشنهادی انتشار دی‌اکسید کربن به مراتب کم‌تری نسبت به فرایندهای متداول تولید هیدروژن از منابع فسیلی دارد؛ به طوری که میزان کاهش انتشار به حدود ۴۰٪ می‌رسد. یکی از مزایای کلیدی این فناوری، استفاده از منابع زیست‌توده‌ای تجدیدپذیر و کربن زیست‌زاد است که در چرخه طبیعی کربن شرکت دارند. در صورتی که دی‌اکسید کربن حاصل از فرایند به جو آزاد شود، سیستم در بهترین حالت می‌تواند کربن-خنثی تلقی شود؛ چرا که کربن آزادشده پیش‌تر از جو جذب شده بود. با این حال، در صورت اعمال فناوری‌های جذب و ذخیره کربن، امکان کاهش خالص گازهای گلخانه‌ای وجود دارد که می‌تواند به تولید هیدروژن با ردپای کربنی نزدیک به صفر یا حتی منفی منجر شود. چنین شرایطی این سیستم را به گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست و قابل قبول در مسیر گذار به اقتصاد هیدروژنی تبدیل می‌کند. با وجود این مزایا، باید توجه داشت که سیستم مورد بررسی به طور کامل بدون کربن نیست، اما با طراحی مناسب، مدیریت انتشار و ادغام فناوری‌های مکمل، قابلیت ارائه راه‌حلی با انتشار بسیار پایین گازهای گلخانه‌ای را داراست.

جدول ۶ نتایج تحلیل اقتصادی

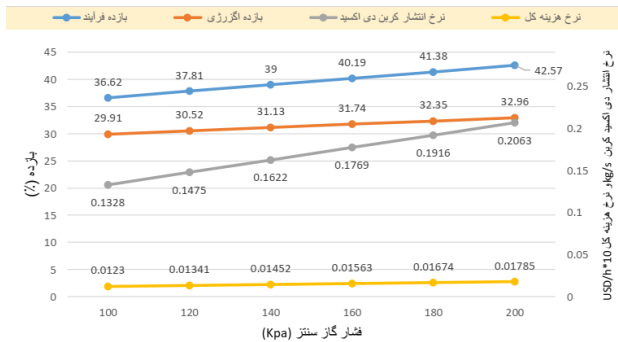
پارامتر	نماد	مقدار
نرخ بازایست سرمایه	CRF	0.1339
نرخ هزینه گازساز	$\dot{Z}_{\text{gasifier}}$	78.22 \$/hr
نرخ هزینه راکتور شیفت آب - گاز	$\dot{Z}_{\text{WGS}}$	20.16 \$/hr
نرخ هزینه جداساز	$\dot{Z}_{\text{separator}}$	19.87 \$/s
نرخ هزینه کل	$\dot{Z}_{\text{total}}$	118.25 \$/hr

شکل ۳ نتایج مربوط به تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی را به صورت خلاصه گزارش می‌کند.



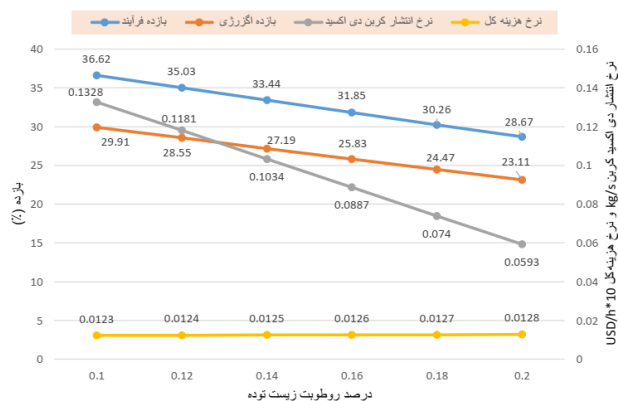
شکل ۳ نتایج زیست‌محیطی و هزینه سیستم

کل و میزان انتشار دی‌اکسید کربن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فشار بالا نه‌تنها فاقد تأثیر چشمگیر بر بهبود عملکرد سیستم است، بلکه موجب افزایش چشمگیر هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی می‌شود. در نتیجه، از دیدگاه اقتصادی و محیط‌زیستی، کارکرد سیستم در فشارهای پایین‌تر (به‌ویژه در حدود 100 کیلوپاسکال) توصیه می‌شود، چرا که در این محدوده، توازن مناسبی میان عملکرد فنی و پایداری محیطی حاصل می‌شود.

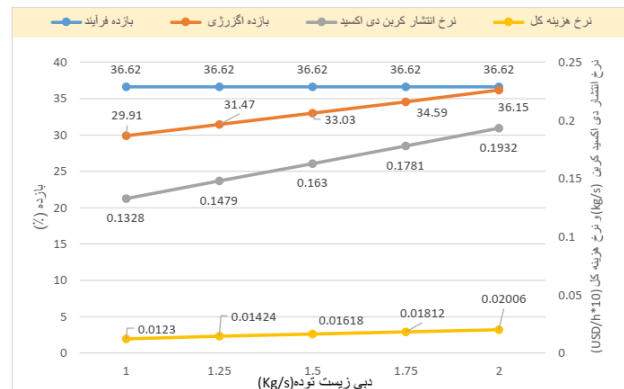


شکل 7 تأثیر فشار گاز سنتر بر بازده انرژی، بازده انرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

بر اساس شکل 8، افزایش رطوبت اولیه زیست‌توده از 10٪ به 20٪ موجب کاهش چشمگیر در راندمان انرژی و راندمان انرژی سیستم می‌شود. این کاهش بازده عمدتاً ناشی از مصرف بخشی از انرژی سیستم برای تبخیر آب اضافی موجود در زیست‌توده است؛ فرآیندی که نه‌تنها سودی برای تولید انرژی ندارد، بلکه موجب اتلاف انرژی مفید نیز می‌شود. در مقابل، نرخ هزینه کل و میزان انتشار دی‌اکسید کربن در این بازه رطوبتی تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند و تغییر محسوسی از خود نشان نمی‌دهند. این پایداری در شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، در حالی که بازده ترمودینامیکی به شدت افت می‌کند، نشان‌دهنده عدم وجود هرگونه مزیت در استفاده از زیست‌توده با رطوبت بالا است. نتیجه‌گیری کلیدی این تحلیل آن است که برای بهینه‌سازی عملکرد ترمودینامیکی سیستم، به‌ویژه در کاربردهای با اهداف بهره‌وری بالا، استفاده از زیست‌توده با حداقل رطوبت ممکن ضروری است. رطوبت بالای ماده اولیه نه‌تنها تأثیری در کاهش هزینه‌ها یا کاهش آلاینده‌گی ندارد، بلکه به‌طور مستقیم باعث تضعیف عملکرد سیستم می‌شود.

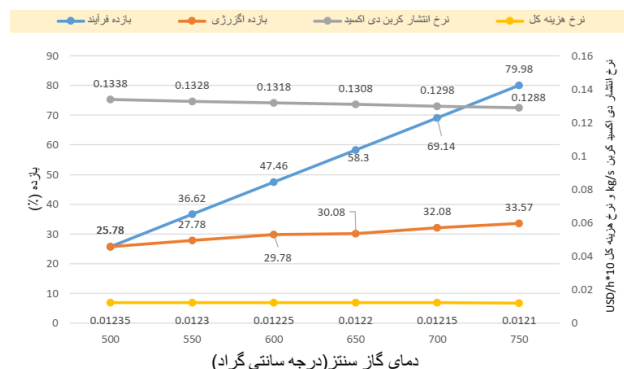


دمای گاز سنتر، فشار گاز سنتر و رطوبت زیست‌توده را بر بازده انرژی، بازده انرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل نشان می‌دهد.



شکل 5 تأثیر دمای زیست‌توده بر بازده انرژی، بازده انرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

مطابق با شکل 5، افزایش نرخ جریان زیست‌توده از 1.0 به 2.0 کیلوگرم بر ثانیه منجر به بهبود قابل توجهی در راندمان انرژی و انرژی می‌شود. این روند افزایشی بیانگر بهبود عملکرد ترمودینامیکی در نرخ‌های بالاتر خوراک ورودی است. با این حال، این پیشرفت با افزایش هم‌زمان در هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن همراه است. به بیان دیگر، در حالی که بهره‌وری سیستم ارتقا می‌یابد، پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی نیز تشدید می‌شوند. بنابراین، انتخاب نقطه عملکرد بهینه مستلزم دستیابی به یک توازن دقیق میان بازده بالا و هزینه/آلودگی پایین است.



شکل 6 تأثیر دمای گاز سنتر بر بازده انرژی، بازده انرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

در شکل 6 مشاهده می‌شود که افزایش دمای گاز سنتر موجب ارتقای مستمر در راندمان انرژی و انرژی می‌شود. نکته قابل توجه در این بخش آن است که برخلاف پارامترهای دیگر، این بهبود عملکرد تأثیر منفی چندانی بر هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ندارد؛ به‌طوری که نرخ هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن در سراسر این بازه دمایی تقریباً ثابت باقی می‌مانند. از این‌رو، افزایش دمای گاز سنتر را می‌توان به‌عنوان یک راهکار مؤثر و کم‌هزینه برای افزایش کارایی سیستم بدون تحمیل تبعات منفی اضافی در نظر گرفت. شکل 7 نشان می‌دهد که افزایش فشار گاز سنتر، به‌جز بهبود بسیار محدود در راندمان سیستم، عمدتاً پیامدهای منفی به‌همراه دارد. در این شرایط، هزینه

شکل 8 تأثیر رطوبت زیست‌توده بر بازده انرژی، بازده انرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک سامانه تولید هیدروژن پاک مبتنی بر گازی‌سازی باگاس نیشکر با رویکردی تلفیقی مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفت. ارزیابی‌های چهاروجهی شامل تحلیل انرژی، انرژی، هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی نشان داد که راکتور گازساز به دلیل وجود فرآیندهای با برگشت‌ناپذیری بالا، نقش اصلی را در تخریب انرژی ایفا کرده و بیش‌ترین سهم را در هزینه‌های سیستم به خود اختصاص می‌دهد. نوآوری اصلی این تحقیق، مدل‌سازی جامع ترمودینامیکی فرآیند گازی‌سازی همراه با بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر مدل جایگزین است که به‌طور هم‌زمان معیارهای انرژی، انرژی و اقتصادی را مورد بررسی قرار می‌دهد. برخلاف مطالعات پیشین که معمولاً تنها بر یک جنبه از عملکرد سیستم (مانند بازده انرژی یا راندمان هیدروژن) تمرکز داشته‌اند، در این تحقیق یک رویکرد یکپارچه ارائه شده است که علاوه بر کاهش زمان محاسباتی، دقت مدل را نیز افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج این پژوهش با کارهای قبلی نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی می‌تواند به بهبود بازده تولید هیدروژن و کاهش هزینه کل سیستم منجر شود. لازم به ذکر است که مدل توسعه‌یافته بر پایه فرضیات ساده‌کننده‌ای همچون رفتار ایده‌آل گازها، شرایط پایدار و یکنواخت واکنش، و صرف‌نظر از تلفات حرارتی و مکانیکی بنا شده است؛ بنابراین، نتایج ممکن است در شرایط واقعی با اندکی انحراف همراه باشند. افزون بر این، از دیگر محدودیت‌های مدل می‌توان به نیاز خوراک زیست‌توده با رطوبت کمتر از ۲۰٪ اشاره کرد زیرا در مقادیر بالاتر، راندمان گازی‌سازی و کیفیت گاز سنتز به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. با وجود این، این فرضیات برای اهداف تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی چندهدفه مناسب ارزیابی می‌شوند.

از منظر زیست‌محیطی، نتایج حاکی از آن است که استفاده از این فناوری، میزان انتشار دی‌اکسید کربن کم‌تری نسبت به تکنولوژی‌های فسیلی دارد و از پتانسیل تحقق ردپای کربنی منفی برخوردار است. در گام بهینه‌سازی چندهدفه، بهره‌گیری از الگوریتم زنبور عسل منجر به شناسایی یک نقطه‌ی بهینه عملکردی شد که در آن، راندمان انرژی و انرژی به ترتیب از ۱۵.۲۸٪ و ۴۱.۶۲٪ و ۱۹.۱۷٪ ارتقاء یافت و هم‌زمان، کاهش در هزینه‌ی کل سیستم و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل شد.

افزون بر این، تحلیل حساسیت طراحی نشان داد که افزایش دمای گاز سنتز و کاهش رطوبت ماده اولیه موجب بهبود قابل توجه عملکرد ترمودینامیکی بدون افزایش محسوس در هزینه‌ها می‌شود. در مقابل، افزایش فشار گاز سنتز با وجود تأثیر محدود بر بازده، باعث افزایش شدید در هزینه و آلاینده‌ی شده و از این رو گزینه‌ای غیربهره‌مند محسوب می‌شود.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر قابلیت بالای این سامانه در تولید هیدروژن پایدار صحنه می‌گذارد و چارچوبی تحلیلی-بهینه‌سازی کارآمد برای توسعه نسل جدید فناوری‌های هیدروژنی فراهم می‌سازد.

5- فهرست علائم

CRF ضریب بازیافت سرمایه
 $\dot{E}_x$ نرخ انرژی (kJ/s)

G	انرژی آزاد گیبس (J/mol)
h	آنتالپی (kJ/kmol)
HHV	ارزش حرارتی بالا (kJ/kmol)
i	نرخ بهره سالیانه
K	ثابت تعادلی واکنش
LHV	ارزش حرارتی پایین (kJ/kmol)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
M	جرم مولی (kg/kmol)
MC	میزان رطوبت زیست‌توده
n	تعداد ساعات عملکرد سالیانه (hr.)
N	طول عمر پروژه (yr.)
P	فشار (kPa)
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت (kJ/s)
R	ثابت جهانی گازها (J/mol.K)
s	آنتروپی (kJ/kg.K)
S/G	نسبت مولی آب به کربن
STB	نسبت بخار به زیست‌توده
T	دما (°C یا K)
$\dot{W}$	نرخ کار (kJ/s)
W	درصد وزنی
X	کسر مولی
y	کسر مولی در فاز گاز
Z	نرخ هزینه ساعتی (\$/hr.)
علائم یونانی	
α	نسبت هوا به بخار تزریقی
β	نسبت انرژی شیمیایی به ارزش حرارت پایین
Δ	تغییرات
η	بازده یا راندمان (%)
φ	ضریب هزینه‌های نگهداری و جانبی
ξ	شدت انتشار ویژه (kg/kJ)
زیرنویس‌ها	
0	حالت مرده یا مرجع
biomass	زیست‌توده
ex	انرژی
gasifier	گازساز
in	ورودی
out	خروجی
separator	جداکننده
syngas	گاز سنتز
total	مجموع
WGS	شیفت آب - گاز
بالانویس‌ها	
0	استاندارد
ch	شیمیایی

- liquefaction process utilising liquefied natural gas regasification system, *Int. J. Exergy*, vol. 38, no. 4, pp. 442–456, 2022.
- [20] J. Szargut, D. R. Morris, and F. R. Steward, *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. New York, NY, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1987.
- [21] Z. T. Lian, K. J. Chua, and S. K. Chou, A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration, *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 84–95, Jan. 2010.
- [22] A. Demirbaş, Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, *Energy Conv. and Mgmt.*, vol. 42, no. 11, pp. 1357–1378, Jul. 2001.
- [23] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, and R. E. West, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [24] E. Azish, E. Assareh, B. Azizimehr, and M. Lee, Exergoeconomic analysis of an integrated electric power generation system based on biomass energy and Organic Rankine cycle, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 149–160, 2025.
- [25] S. Hellweg and L. M. Canals, Environmental assessment of products: A review of life cycle approaches, *Environ. Sci. & Technol.*, vol. 48, no. 15, pp. 9437–9448, Aug. 2014.
- [26] C. Gökcol, B. Dursun, B. Alboyaci, and E. Sunan, Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey, *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 424–431, Feb. 2009.
- [27] M. A. Rosen and I. Dincer, Exergoenvironmental analysis of power plants operating on various fuels, *Energy Sources*, vol. 25, no. 6, pp. 561–572, 2003.
- [28] A. I. Forrester, A. Sobester, and A. J. Keane, *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [29] B. Azizimehr, T. Armaghani, R. Ghasemiasl, A. K. Nejadian, and M. A. Javadi, A comprehensive review of recent developments in hydrogen production methods using a new parameter, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 72, pp. 716–729, Jul. 2024.
- [30] B. Yuce, M. S. Packianather, E. Mastrocinque, D. T. Pham, and A. Lambiase, Honey bees inspired optimization method: the bees algorithm, *Insects*, vol. 4, no. 4, pp. 646–662, Nov. 2013.

جنبشی	ke
فیزیکی	ph
پتانسیل	po

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی افرادی که با ارائه دیدگاه‌ها و پیشنهادهای ارزشمند در انجام و تکمیل این پژوهش همکاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

7- مراجع

- [1] K. S. Santhanam, R. J. Press, M. J. Miri, A. V. Bailey, and G. A. Takacs, *Introduction to Hydrogen Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [2] B. S. Zainal et al., Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113941, Jan. 2024.
- [3] K. Naseem et al., Essential parts of hydrogen economy: Hydrogen production, storage, transportation and application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 210, p. 115196, 2025.
- [4] L. M. Gandia, G. Arzamedi, and P. M. Diéguez, Eds., *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Newnes, 2013.
- [5] P. Parthasarathy and K. S. Narayanan, Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield—a review, *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 570–579, Jun. 2014.
- [6] Y. Zhang, P. Xu, S. Liang, B. Liu, Y. Shuai, and B. Li, Exergy analysis of hydrogen production from steam gasification of biomass: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 28, pp. 14290–14302, May 2024.
- [7] N. J. Rubinsin, N. A. Karim, S. N. Timmiati, K. L. Lim, W. N. R. W. Isahak, and M. Pudukudy, An overview of the enhanced biomass gasification for hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1139–1164, Feb. 2024.
- [8] A. C. Chang, H. F. Chang, F. J. Lin, K. H. Lin, and C. H. Chen, Biomass gasification for hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 21, pp. 14252–14260, Oct. 2011.
- [9] G. Wang, D. He, J. Lin, T. Jiang, and Z. Chen, Exergy estimate of a novel hybrid solar-gas power and organic Rankine cycle-based hydrogen-production system, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 33, Art. no. 101961, May 2022.
- [10] F. Sher et al., Cutting-edge biomass gasification technologies for renewable energy generation and achieving net zero emissions, *Energy Convers. Manage.*, vol. 323, Art. no. 119213, 2025.
- [11] K. W. Kuttin et al., Experimental and numerical modeling of carbonized biomass gasification: A critical review, *Green Carbon*, vol. 2, no. 2, pp. 176–196, 2024.
- [12] Y. Zhang et al., A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades, *Fuel*, vol. 347, Art. no. 128461, 2023.
- [13] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [14] B. Azizimehr, T. Armaghani, R. Ghasemiasl, and A. Kaabi Nejadian, 4E analysis and multiobjective optimization of hydrogen production via biomass gasification, *Energy Conversion*, vol. 12, no. 2, pp. 15–34, 2025.
- [15] P. Atkins, *Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry*. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2010.
- [16] A. Kumar, D. D. Jones, and M. A. Hanna, Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology, *Energies*, vol. 2, no. 3, pp. 556–581, Jul. 2009.
- [17] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press, 2010.
- [18] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, 1996.
- [19] S. Faramarzi, S. M. M. Nainiyan, M. Mafi, and R. Ghasemiasl, Energy, exergy, and economic analyses of an innovative hydrogen