



تحلیل چهارگانه و بهینه‌سازی چندهدفه تولید هیدروژن به کمک گازی‌سازی زیست‌توده

بهزاد عزیزی‌مهر، طاهر ارمغانی*، رامین قاسمی‌اصل، عبدالرزاق کعبی‌نژادیان

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۱/۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۲

چکیده

با توجه به بحران‌های انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، این پژوهش به بررسی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید هیدروژن از طریق فرآیند گازی‌سازی زیست‌توده باگاس نیشکر می‌پردازد. در این راستا، یک تحلیل چهارگانه جامع شامل تحلیل‌های انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی بر روی سیستم انجام شده است. سیستم پیشنهادی شامل واحدهای خشک‌کن، گازساز، راکتور شیفت آب-گاز و جداکننده هیدروژن است. هدف اصلی، بهینه‌سازی چندهدفه برای بیشینه‌سازی راندمان انرژی و انرژی و هم‌زمان کمینه‌سازی نرخ هزینه کل و دبی انتشار دی‌اکسیدکربن با استفاده از الگوریتم زنبور عسل می‌باشد. نتایج اولیه سیستم، راندمان انرژی ۷۳/۶۲٪ و راندمان انرژی ۱۵/۲۸٪ را نشان داد. پس از فرآیند بهینه‌سازی، راندمان انرژی و انرژی به ترتیب به ۴۱/۶۲٪ و ۱۹/۱۷٪ افزایش یافتند، در حالی که هزینه کل و انتشار دی‌اکسیدکربن کاهش پیدا کردند. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که افزایش دمای گاز سنتز و کاهش رطوبت زیست‌توده، موثرترین پارامترها برای بهبود عملکرد سیستم بدون ایجاد تبعات منفی اقتصادی و زیست‌محیطی هستند.

*عهده‌دار مکاتبات: taherarmaghani@iaui.ac.ir

کلمات کلیدی: تولید هیدروژن، گازی‌سازی زیست‌توده، باگاس نیشکر، تحلیل چهارگانه، بهینه‌سازی چندهدفه

نحوه استناد به این مقاله بهزاد عزیزی‌مهر، طاهر ارمغانی، رامین قاسمی‌اصل، عبدالرزاق کعبی‌نژادیان. تحلیل چهارگانه و بهینه‌سازی چندهدفه تولید هیدروژن به کمک گازی‌سازی زیست‌توده. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴؛ ۱۲ (۲): ۳۴-۱۵.

۱- مقدمه

بحران‌های روزافزون انرژی، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، جامعه جهانی را به سمت توسعه و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک سوق داده است. در این میان، هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک با چگالی انرژی بالا و محصول احتراق بدون کربن (آب)، جایگاه ویژه‌ای در سید انرژی آینده به خود اختصاص داده است. با این حال، تولید هیدروژن به روش‌های پایدار و اقتصادی یکی از بزرگترین چالش‌های پیش‌روی تحقق «اقتصاد هیدروژنی» است. یکی از امیدوارکننده‌ترین مسیرها برای تولید هیدروژن تجدیدپذیر، بهره‌گیری از زیست‌توده از طریق فرآیندهای ترموشیمیایی است. زیست‌توده، به‌عنوان منبعی کربن‌خنثی، فراوان و در دسترس، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی و سوخت‌های زیستی دارد. در این بین، باگاس نیشکر که محصول جانبی اصلی صنعت تولید قند و شکر است، به دلیل حجم تولید بالا، هزینه پایین و عدم رقابت با زنجیره غذایی، به‌عنوان یک خوراک بسیار جذاب برای فرآیندهای تبدیل انرژی مطرح می‌شود. فرآیند گازی‌سازی، یک تکنولوژی کلیدی است که طی آن، زیست‌توده در حضور یک عامل گازی‌کننده (مانند هوا، اکسیژن یا بخار آب) به یک مخلوط گازی قابل اشتعال به نام گاز سنتز تبدیل می‌شود. این گاز عمدتاً از هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و متان تشکیل شده است.

پژوهش‌های متعددی در ارتباط با پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید هیدروژن با استفاده از زیست‌توده انجام شده است. برای مثال، اُبیورا و همکاران [۱] به بررسی روش‌های مختلف تبدیل زیست‌توده به هیدروژن، شامل فرآیندهای ترموشیمیایی (مانند گازی‌سازی)، بیولوژیکی (مانند تخمیر)، الکتروشیمیایی (مانند الکترولیز آب) و هیبریدی پرداختند. نتایج آن‌ها بر پتانسیل هیدروژن به‌عنوان حامل انرژی تجدیدپذیر و نقش زیست‌توده در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید دارد و نشان می‌دهد که تولید هیدروژن از زیست‌توده می‌تواند به اقتصاد هیدروژن پایدار کمک کند، اما نیازمند پیشرفت‌های فناورانه و سیاست‌گذاری‌های هماهنگ است. داری و همکاران [۲] به بررسی پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای تولید هیدروژن زیستی از طریق تخمیر پرداختند. آن‌ها نشان دادند که که تولید هیدروژن از زیست‌توده، به‌ویژه از طریق تخمیر تاریک و نوری، به دلیل پایداری، عدم تولید گازهای آلاینده و امکان استفاده از ضایعات کشاورزی و صنعتی، توجه فزاینده‌ای را جلب کرده است. نگوین - ثی و همکاران [۳] مروری جامع بر پیشرفت‌های اخیر در تولید هیدروژن از ضایعات زیست‌توده با تمرکز بر فرآیندهای پیرولیز و گازی‌سازی ارائه دادند. آن‌ها منابع زیست‌توده، فرآیندهای پیش‌تصفیه و استراتژی‌های تولید هیدروژن را بررسی کرده و چالش‌های فنی، کارایی، و مکانیزم‌های مرتبط را تحلیل کردند. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای زیست‌توده به‌عنوان منبعی پایدار برای تولید هیدروژن بود اما بر نیاز به پیشرفت‌های علمی بیش‌تر برای رقابت اقتصادی و کاهش اثرات زیست‌محیطی در مقیاس صنعتی تأکید شد.

از دیگر حوزه‌های موردتوجه در این زمینه می‌توان به تحلیل چهارگانه (انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی) و بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های تولید هیدروژن اشاره کرد که البته، اغلب به‌صورت کوپل‌شده با یک چرخه تولید توان همراه هستند. برای مثال، جواهریان و همکاران [۴] یک سیستم هم‌تولید نوین مبتنی بر پیل سوختی اکسید جامد شعله‌دار یکپارچه با چرخه ترموشیمیایی و انادیوم-کلر را برای تولید هم‌زمان توان الکتریکی و هیدروژن سبز پیشنهاد کردند. هیدروژن سبز از طریق چرخه ترموشیمیایی و انادیوم-کلر با استفاده از توان الکتریکی سبز برای فشرده‌سازی هوا تولید شد. تحلیل‌های انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی همراه با سه بهینه‌سازی چند هدفه برای بررسی عملکرد سیستم انجام گرفت. نتایج نشان داد که سیستم بهینه به راندمان اگزرژی ۹۳/۴۸٪، هزینه هم‌سطح‌شده محصولات ۰/۰۸۳۱۸ دلار بر کیلووات‌ساعت و شاخص انتشار دی‌اکسید کربن ۰/۳۴۳۷ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت دست یافت. الفاتح و همکاران [۵] به بررسی تولید هیدروژن از ضایعات پلاستیکی از طریق فرآیندهای پیرولیز و گازی‌سازی کاتالیزوری با تأکید بر تأثیر پارامترهای فرآیند و انتخاب مواد پرداختند. آن‌ها از روش‌های پیرولیز، پیرولیز-گازی و اصلاح کاتالیزوری با استفاده از کاتالیست‌هایی مانند زئولیت و نیکل برای تولید هیدروژن استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای بالا (تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد)، استفاده از بخار و کاتالیست‌های تهیه‌شده با روش سول-ژل بازده هیدروژن را افزایش داده و خلوص هیدروژن تا ۸۸/۴٪ با سیستم‌های پیشرفته قابل دستیابی

است که این روش را به عنوان جایگزینی پایدار برای مدیریت ضایعات پلاستیکی و تولید سوخت پاک تأیید می کند. لیم و همکاران [۶] به بررسی یک فرآیند نوین تولید هیدروژن بدون کربن از طریق اصلاح بخار متان یکپارچه با استفاده از پساب نمک زدایی برای جذب و استفاده از CO₂ پرداختند. آن ها از روش اصلاح بخار متان برای تولید هیدروژن استفاده کردند و CO₂ تولید شده را با استفاده از یون های Na⁺، Ca²⁺ و Mg²⁺ موجود در پساب نمک زدایی به کربنات های معدنی تبدیل نمودند. نتایج نشان داد که این فرآیند ۹۴/۵٪ از CO₂ تولیدی را جذب کرده و صرفاً ۰/۱۶ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم هیدروژن CO₂ منتشر کرده و هزینه سطح بندی شده هیدروژن برابر با ۲/۶ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم هیدروژن است که از نظر اقتصادی و زیست محیطی نسبت به روش های مرسوم اصلاح بخار متان با فناوری های جذب کربن رقابتی است. جدول (۱) به بررسی پژوهش های اخیر برای روش های مختلف تولید هیدروژن اختصاص دارد.

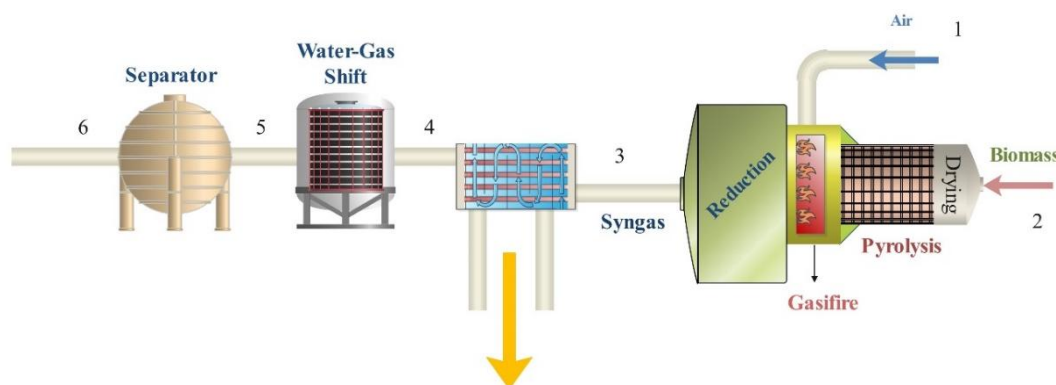
جدول ۱: بررسی پژوهش های اخیر در روش های مختلف تولید هیدروژن

توضیحات اضافی	رد پای کربن	هزینه تولید	نرخ تولید هیدروژن	منبع سوخت یا انرژی	سیکل	روش تولید هیدروژن	رفرنس
میزان تخریب انرژی و بازدهی در این سیستم ۵۱/۳٪ - ۹۲/۶٪	کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید	-	تولید روزانه ۶،۲۱ کیلوگرم هیدروژن	توان خورشیدی	رانکین آلی	الکترولایز غشای تبادل پروتون	[۷]
افزایش بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۲۲/۳۳٪ و ۶۱٪	کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید	۱۴۰/۴۱ دلار بر ساعت	نرخ تولید هیدروژن ۲/۸ گرم بر ثانیه	توان خورشیدی	-	ریفرمینگ بخار متان	[۸]
۲٪ افزایش میزان تولید کل هیدروژن	کاهش میزان انتشار از ۸/۵ به ۸/۳ کیلوگرم کربن دی اکسید به ازای هر کیلوگرم هیدروژن	هزینه تولید هیدروژن ۰/۹۹ دلار به ازای هر کیلوگرم	تولید روزانه ۵/۰۷ تن هیدروژن	گاز طبیعی		ریفرمینگ بخار آب	[۹]
راندمان های انرژی و انرژی برابر با ۵۹/۵۸٪ و ۴۹/۳۸٪	کاهش و تخمین میزان انتشار کربن دی اکسید	هزینه تولید هیدروژن ۰/۸۷ دلار به ازای هر کیلوگرم	بیش ترین راندمان تولید هیدروژن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد	زیست توده	-	گاز ساز	[۱۰]
بررسی اثرات گلخانه ای و پیشنهاد بهترین روش برای کنترل گرمایش جهانی	گازی سازی زیست توده بیش ترین پتانسیل را برای کاهش اثر گرمایش جهانی دارد	-	افزایش میزان تولید هیدروژن	-	-	ریفرمینگ متان/گازی سازی	[۱۱]
خروجی خالص قدرت برابر با ۸۶۱۳ کیلووات، نرخ تولید آب شیرین شده ۹/۵۰۲ کیلوگرم بر ثانیه، راندمان انرژی ۱۲/۹۶ و راندمان انرژی ۵۳/۷۹	کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید	تخمین هزینه تولید هیدروژن و تولید همزمان	نرخ تولید هیدروژن معادل ۲،۰۳۸ کیلوگرم بر ساعت	چرخه تولید همزمان برق، گرما و سرما	چرخه آلی رانکین	الکترولایزر غشای تبادل پروتون	[۱۲]

پژوهش حاضر به تحلیل چهارگانه و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید هیدروژن با استفاده از زیست‌توده می‌پردازد. در این پژوهش از تحلیل‌های انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین الگوریتم زنبورعسل برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی استفاده شده است. زیست‌توده مورد استفاده نیز باگاس نیشکر است.

۲- سیستم پیشنهادی و روش‌شناسی تحلیل

این بخش به معرفی سیستم پیشنهادی برای تولید هیدروژن و تحلیل چهارگانه اجزای آن می‌پردازد. سیستم پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: سیستم پیشنهادی برای تولید هیدروژن

این سیستم برای تبدیل زیست‌توده به گاز، سنتز و سپس افزایش غلظت هیدروژن در آن طراحی شده است. محصول نهایی، جریانی از گاز است که عمدتاً از هیدروژن تشکیل شده است. هوا به‌عنوان عامل اکسیدکننده وارد راکتور اصلی (گازی‌ساز) می‌شود. اکسیژن موجود در هوا برای ایجاد واکنش‌های احتراق جزئی و تولید حرارت لازم برای فرآیندهای دیگر استفاده می‌شود. زیست‌توده که در این جا باگاس نیشکر است، به عنوان ماده اولیه به سیستم تزریق می‌شود. در اولین مرحله، رطوبت زیست‌توده با استفاده از حرارت گرفته می‌شود. زیست‌توده خشک‌شده در غیاب اکسیژن حرارت می‌بیند و به گازهای فرار، زغال و قطران تجزیه می‌شود. محصولات پیرولیز با هوا و بخار آب واکنش می‌دهند. واکنش‌های اصلی منجر به تولید گاز سنتز می‌شود که مخلوطی از هیدروژن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن و متان است. گاز سنتز داغ از گازساز خارج می‌شود. این گاز سپس وارد یک مبدل حرارتی می‌شود تا دمای آن کاهش یابد. حرارت بازیافت‌شده از این مرحله می‌تواند برای مصارف دیگر مانند تولید برق یا تأمین حرارت برای خود فرآیند استفاده شود که به افزایش بهره‌وری کلی سیستم کمک می‌کند. گاز سنتز خنک‌شده وارد راکتور تغییر آب - گاز می‌شود. در این جا، برای افزایش میزان هیدروژن، مونوکسید کربن با بخار آب واکنش می‌دهد و در نتیجه این واکنش، غلظت هیدروژن افزایش و غلظت مونوکسید کربن کاهش می‌یابد. جریان گاز خروجی از مرحله قبل، که اکنون غنی از هیدروژن است، وارد یک واحد جداکننده می‌شود. این واحد وظیفه دارد هیدروژن را از سایر گازها مانند دی‌اکسید کربن، نیتروژن (از هوا) و سایر ناخالصی‌ها جدا کند. این کار معمولاً با استفاده از فناوری‌هایی مانند جذب نوسانی فشار یا فیلترهای غشایی انجام می‌شود.

۲-۱- تحلیل انرژی

مبنای اصلی تحلیل انرژی در هر سیستم ترمودینامیکی، قانون بقای جرم و قانون اول ترمودینامیک است [۱۳]

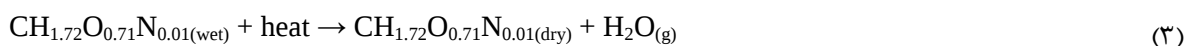
$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o + \left(\sum \dot{Q}_i - \sum \dot{Q}_o \right) + \dot{W} = 0 \quad (2)$$

که در این روابط، $\dot{m}_i$ دبی جرمی ورودی، $\dot{m}_o$ دبی جرمی خروجی، h_i آنتالپی ورودی، h_o آنتالپی خروجی، $\dot{Q}_i$ نرخ حرارت ورودی، $\dot{Q}_o$ نرخ حرارت خروجی و $\dot{W}$ کار انجام شده برای یک سیستم یا حجم کنترل هستند. با نوشتن این دو رابطه برای هریک از اجزای سیستم و یا کل آن می توان به محاسبه مشخصه های ترمودینامیکی جریان های مختلف در سیستم پرداخت. جدول (۱) مقادیر مفروض برای برخی پارامترهای سیستم به عنوان ورودی تحلیل را نشان می دهد.

جدول ۲: مشخصات ورودی چرخه پیشنهادی [۱۴]		
پارامتر	نماد	مقدار
دمای زیست توده	T_2	25 °C
دمای هوای ورودی به گازساز	T_1	673.3 °C
فشار در کل چرخه	P_i	101 kPa
ثابت جهانی گازها	R	8.134 kJ/kmol°K
دبی جرمی زیست توده	$\dot{m}_2$	1 kg/s
رطوبت زیست توده برحسب مول زیست توده	MC	12%
درصد کربن در زیست توده	C%	46.38%
درصد هیدروژن در زیست توده	H%	4.68%
درصد اکسیژن در زیست توده	O%	44.11%
درصد نیتروژن در زیست توده	N%	0.5%
درصد خاکستر در زیست توده	Ash%	4.33%
ارزش حرارتی بالای باگاس نیشکر	HHV	449,568 kJ/kmol
ارزش حرارتی پایین باگاس نیشکر	LHV	423,118 kJ/kmol

همان طور که پیش تر تشریح شد، در بخش خشک کن گازساز، رطوبت زیست توده تا حد ممکن کاهش می یابد.



در ناحیه پیرولیز، زیست توده خشک شده در غیاب اکسیژن و در دمای بالا به صورت حرارتی تجزیه می شود. این فرآیند گرماگیر است.



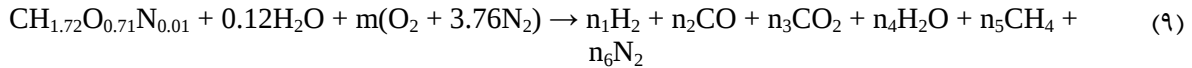
در ناحیه احتراق، محصولات پیرولیز با هوا واکنش می دهند و واکنش های متعددی انجام می شود. در اولین واکنش، زغال و هیدروژن موجود در محصولات پیرولیز با اکسیژن هوا واکنش داده و حرارت تولید می کند.



اکنون، دی اکسید کربن و به خاطر آب تولید شده با کربن باقی مانده واکنش می دهند.



دو واکنش (۷) و (۸) گرماگیر هستند و به ترتیب به واکنش‌های بوردوارد و آب - گاز شناخته می‌شوند [۱۵]. پس واکنش گازی‌سازی یک مول زیست‌توده باگاس نیشکر به کمک گازساز هوا به صورت زیر خواهد بود.



واکنش (۹) دارای ۷ مجهول است. برای یافتن مجهولات این واکنش، چهار معادله برای موازنه عناصر هیدروژن، کربن، اکسیژن و نیتروژن نوشته می‌شود. دو معادله دیگر نیز از ثابت تعادلی واکنش‌های (۷) و (۸) حاصل می‌شود. ثابت تعادلی برای واکنش فرضی $\nu_A\mu_A + \nu_B\mu_B \leftrightarrow \nu_C\mu_C + \nu_D\mu_D$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]

$$K = \frac{n_C^{\nu_C} n_D^{\nu_D}}{n_A^{\nu_A} n_B^{\nu_B}} \left(\frac{P}{n_t} \right)^{\nu_C + \nu_D - \nu_A - \nu_B} \quad (10)$$

که در این رابطه، K ثابت تعادلی واکنش، n تعداد مول، ν ضریب استوکیومتری و P فشار است. رابطه بین ثابت تعادلی واکنش و تغییر انرژی گیبس استاندارد به صورت زیر است [۱۶]

$$-\frac{\Delta G^0}{RT} = \ln K \quad (11)$$

که ΔG^0 تغییر انرژی گیبس استاندارد و $\bar{R}$ ثابت جهانی گازها برحسب مول است. از طرفی، ΔG^0 طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]

$$\Delta G^0 = \Delta \bar{H} - T\Delta \bar{S}^0 \quad (12)$$

در این رابطه، T دما، $\bar{H}$ آنتالپی مولی و $\bar{S}^0$ آنتروپی مولی در شرایط استاندارد است. اگر گازساز عایق فرض شود ($\dot{Q} = \dot{W} = 0$)، تمام تغییرات انرژی ناشی از واکنش‌های شیمیایی و انرژی داخلی سیستم خواهد بود و رابطه (۳-۲) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$HHV_{\text{biomass}} + wH_{H_2O} + m(H_{O_2} + 3.76H_{N_2}) = n_1H_{H_2} + n_2H_{CO} + n_3H_{CO_2} + n_4H_{H_2O} + n_5H_{CH_4} + n_6H_{N_2} \quad (13)$$

در رابطه بالا، HHV_{biomass} ارزش حرارتی بالای زیست‌توده و H آنتالپی ماده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]

$$H = H_f^0 + \Delta H = H_f^0 + C_p(T)\Delta T \quad (14)$$

در این رابطه، H_f^0 آنتالپی استاندارد تشکیل، $\Delta H = C_p(T)\Delta T$ تغییر آنتالپی محسوس از حالت استاندارد، $C_p(T)$ ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برحسب دما و ΔT تغییر دما بین حالت استاندارد و دمای ماده است.

بدین ترتیب، دستگاهی متشکل از هفت معادله و هفت مجهول برای واکنش گازساز تشکیل می‌شود و ضرایب استوکیومتری واکنش (۹) تعیین می‌گردند.

اگر کل گازساز به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شود، طبق قانون اول ترمودینامیک و با فرض آدیاباتیک بودن،

$$\dot{n}_{\text{syngas}} \bar{h}_{\text{syngas}} = \dot{n}_{\text{air}} \bar{h}_{\text{air}} + \dot{n}_{\text{biomass}} \bar{h}_{\text{biomass}} \quad (15)$$

برای محاسبه آنتالپی مولی جریان‌های مخلوط گازی (گاز سنتز و هوا) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۳]

$$\bar{h} = \sum_i y_i (\bar{h}_f^0 + \bar{C}_{p_i} \Delta T) \quad (16)$$

که در این رابطه، y_i کسر مولی هر جزء در مخلوط گاز است. برای محاسبه آنتالپی جریان زیست توده نیز از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\bar{h}_{\text{biomass}} = (n_{\text{CO}_2} \bar{h}_{f_{\text{CO}_2}}^0 + n_{\text{H}_2\text{O}} \bar{h}_{f_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})}}^0) + \text{LHV}_{\text{biomass}} + \bar{C}_{p_{\text{biomass}}} \Delta T \quad (17)$$

که n_{CO_2} و $n_{\text{H}_2\text{O}}$ به ترتیب ضرایب استوکیومتری دی اکسید کربن و آب در محصولات واکنش (۹) هستند. با استفاده از رابطه زیر می توان حرارت انتقال یافته بین گاز سنتز و سیال دوم درون مبدل حرارتی را تعیین کرد

$$Q_{\text{heat exchanger}} = \dot{m}_{\text{syngas}} C_{p_{\text{syngas}}} (T_3 - T_4) \quad (18)$$

سپس گاز سنتز وارد راکتور شیف آب - گاز می شود. هدف اصلی این راکتور، افزایش مقدار هیدروژن در جریان گاز سنتز است. این کار از طریق واکنش بین مونوکسید کربن و بخار آب انجام می شود. واکنش اصلی که در این راکتور رخ می دهد واکنش شیف آب - گاز است.



این واکنش گرماده است. با نوشتن قانون اول ترمودینامیک برای راکتور به عنوان یک حجم کنترل،

$$\dot{n}_4 \bar{h}_4 = \dot{n}_5 \bar{h}_5 + \dot{Q}_{\text{WGS}} \quad (20)$$

که $\dot{Q}_{\text{WGS}}$ حرارت آزاد شده در اثر واکنش شیف آب - گاز است. مقدار آنتالپی مولی در نقاط ۴ و ۵ نیز طبق رابطه (۱۶) محاسبه می شود.

۲-۲- تحلیل انرژی

انرژی یک سیستم یا یک جریان ماده یا انرژی، حداکثر کار مفیدی است که می توان از آن به دست آورد هنگامی که سیستم یا جریان با یک محیط مرجع معین به تعادل کامل (ترمودینامیکی، مکانیکی، شیمیایی و ...) می رسد. انرژی را می توان بر اساس منشأ و ماهیت آن به انواع فیزیکی (شامل انرژی حرارتی ناشی از اختلاف دما و انرژی مکانیکی ناشی از اختلاف فشار)، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل تقسیم بندی کرد. از آنجایی که انرژی جنبشی و پتانسیل در سیستم پیشنهادی تغییرات چندانی ندارد، می توان از این نوع انرژی ها در مدل سازی صرف نظر کرد.

رابطه کلی انرژی به صورت زیر است [۱۳]

$$\dot{E}x = \dot{E}x^{\text{ph}} + \dot{E}x^{\text{ch}} \quad (21)$$

که $\dot{E}x^{\text{ph}}$ انرژی فیزیکی و $\dot{E}x^{\text{ch}}$ انرژی شیمیایی است. انرژی فیزیکی برای جریان پایدار طبق رابطه زیر محاسبه می گردد [۷]

$$\dot{E}x^{\text{ph}} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (22)$$

در این رابطه، $\dot{E}x^{\text{ph}}$ انرژی فیزیکی، h و s به ترتیب آنتالپی و آنترپی در شرایط فعلی جریان و h_0 و T_0 و s_0 به ترتیب آنتالپی، دما و آنترپی در شرایط استاندارد است. برای انرژی شیمیایی می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۳]

$$\dot{E}x^{ch} = \dot{m} \left(\sum_i x_i ex_i^{CH} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \right) \quad (23)$$

که x کسر مولی، ex^{CH} اگزرژی شیمیایی استاندارد، R ثابت جهانی گازها و T_0 دمای مرجع است. اگزرژی شیمیایی زیست‌توده اغلب با استفاده از ارزش حرارتی پایین (LHV) محاسبه می‌شود [۱۵]

$$\dot{E}x_{biomass}^{ch} = \dot{m} \beta LHV_{biomass} \quad (24)$$

در این رابطه، β ضریب معرف نسبت اگزرژی شیمیایی زیست‌توده به ارزش حرارتی پایین و LHV ارزش حرارتی پایین زیست‌توده است. روابط متعددی برای β وجود دارد ولی در این پژوهش از رابطه سارگات و همکاران [۱۷] استفاده شده است.

$$\beta = \frac{1.044 + 0.16 \frac{m_H}{m_C} - 0.34493 \frac{m_O}{m_C} \left(1 + 0.0531 \frac{m_H}{m_C} \right)}{1 - 0.4142 \frac{m_O}{m_C}} \quad (25)$$

که در این رابطه، m نماد جرم است.

تخریب اگزرژی معیاری برای سنجش ناکارآمدی ترمودینامیکی یک فرآیند یا یک جزء از سیستم است. هرچه میزان تخریب اگزرژی بیش‌تر باشد، آن فرآیند از حالت ایده‌آل (فرآیند برگشت‌پذیر) دورتر بوده و پتانسیل بیش‌تری برای انجام کار مفید به هدر رفته است. برای یک حجم کنترل در حالت پایدار بدون تغییرات اگزرژی ذخیره‌شده در سیستم، نرخ تخریب انرژی اگزرژی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]

$$\dot{E}x_D = \left(\sum_{in} \dot{E}x_{in} + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k \right) - \left(\sum_{out} \dot{E}x_{out} + \dot{W} \right) \quad (26)$$

که در این رابطه، $\dot{E}x_{in}$ و $\dot{E}x_{out}$ به‌ترتیب اگزرژی ورودی و خروجی شامل اگزرژی فیزیکی و شیمیایی، $\dot{Q}_k$ نرخ انتقال حرارت در مرز k در دمای T_k و $\dot{W}$ نرخ توان خروجی از مرز حجم کنترل است.

۳-۲- تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی یک فرآیند ارزیابی جامع برای تعیین امکان‌سنجی مالی و مقرون‌به‌صرفه بودن طراحی، پیاده‌سازی و بهره‌برداری از یک سیستم است. هدف تحلیل اگزرژی-اقتصادی این است که هزینه‌ای که به دلیل این اتلاف‌ها ایجاد می‌شود را محاسبه کند.

برای هر جزء از سیستم، یک معادله موازنه هزینه نوشته می‌شود. این معادله بیان می‌کند که مجموع نرخ هزینه‌های جریان‌های اگزرژی خروجی از یک جزء برابر است با مجموع نرخ هزینه‌های جریان‌های اگزرژی ورودی به آن جزء به‌علاوه نرخ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری مربوط به خود آن جزء [۱۸]

$$\sum_{out} \dot{C}_j = \sum_{in} \dot{C}_i + \dot{Z}_k \quad (27)$$

که $\dot{C}_j = c_j \dot{E}x_j$ نرخ هزینه جریان اگزرژی j ، c_j هزینه واحد اگزرژی جریان j ، $\dot{E}x_j$ نرخ اگزرژی جریان j و $\dot{Z}_k$ مجموع نرخ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری و نگهداری سالانه برای جزء k است [۱۸].

$$\dot{Z}_k = \frac{z_k CRF \phi}{3600N} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، Z_k هزینه خرید تجهیزات برای جزء k CRF ضریب بازافت سرمایه، ϕ ضریب نگهداری تجهیزات و N تعداد ساعات کارکرد سالانه است. برای CRF نیز از رابطه زیر استفاده می شود [۱۸]

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (29)$$

که i نرخ بهره و n عمر عملیاتی تجهیز است. نرخ هزینه زیست توده طبق رابطه زیر محاسبه می گردد [۱۸]

$$\dot{C}_{\text{biomass}} = \left(\frac{40}{1000}\right) \left(\frac{3.6}{LHV}\right) \quad (30)$$

۴-۲- تحلیل زیست محیطی

هدف اصلی این تحلیل، شناسایی، کمی سازی و ارزیابی این تأثیرات برای درک ردپای زیست محیطی سیستم، مقایسه آن با گزینه های دیگر و یافتن راه هایی برای بهبود عملکرد زیست محیطی آن است. برای هر جزء k از سیستم، یک معادله موازنه برای نرخ بار زیست محیطی نوشته می شود که طبق آن، مجموع نرخ بارهای زیست محیطی جریان های انرژی خروجی از جزء برابر است با مجموع نرخ بارهای زیست محیطی جریان های انرژی ورودی به آن جزء به علاوه نرخ بار زیست محیطی مرتبط با خود آن جزء [۱۹]

$$\sum_{out} \dot{B}_j = \sum_{in} \dot{B}_i + \dot{Y}_k \quad (31)$$

که در این رابطه، $\dot{B}_j = b_j \dot{E}x_j$ نرخ بار زیست محیطی جریان انرژی از جزء j بار زیست محیطی ویژه و $\dot{Y}_k$ نرخ بار زیست محیطی جزء k است.

انتشار ویژه دی اکسید کربن شاخصی کلیدی در ارزیابی زیست محیطی سیستم های انرژی است و کاربرد مهمی در چارچوب تحلیل انرژی زیست محیطی پیدا می کند. انتشار ویژه دی اکسید کربن معمولاً به صورت نرخ انتشار جرمی دی اکسید کربن تقسیم بر نرخ تولید یک محصول مفید تعریف می شود. اگر محصول صرفاً توان الکتریکی باشد، رابطه انتشار ویژه دی اکسید کربن به صورت زیر درمی آید [۱۹]

$$\xi_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{W}} \quad (32)$$

برای محاسبه دی انتشار مستقیم دی اکسید کربن از احتراق سوخت می توان از رابطه زیر بهره برد [۱۹]

$$\dot{m}_{CO_2} = 3.66 \dot{m}_{\text{fuel}} C\%_{\text{fuel}} \quad (33)$$

که در این رابطه، $\dot{m}_{\text{fuel}}$ دی سوخت و $C\%_{\text{fuel}}$ درصد کربن موجود در سوخت است.

۵-۲- عملکرد کلی سیستم

راندمان کلی انرژی سیستم به صورت انرژی شیمیایی هیدروژن تولیدی به انرژی شیمیایی زیست توده ورودی تعریف می شود.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\dot{m}_{\text{biomass}} LHV_{\text{biomass}}} \quad (34)$$

راندمان انرژی نیز به صورت نرخ انرژی هیدروژن خروجی به نرخ انرژی های ورودی (هوا و زیست توده) تعریف می شود.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{H_2}}{\dot{E}x_{biomass} + \dot{E}x_{air}} \quad (35)$$

راندمان تولید هیدروژن عبارت است از مقدار هیدروژن تولید شده به ازای هر واحد از زیست‌توده مصرفی که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{biomass}} \quad (36)$$

۲-۶- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه شاخه‌ای از بهینه‌سازی است که با مسائلی سروکار دارد که در آن‌ها به جای یک هدف واحد، چندین تابع هدف (معمولاً متعارض و متضاد) باید به طور همزمان بهینه شوند. در دنیای واقعی، بسیاری از مسائل مهندسی، اقتصادی، مدیریتی و علمی ذاتاً چندهدفه هستند. برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه که در آن معمولاً یک جواب بهینه منحصر به فرد وجود دارد، در بهینه‌سازی چندهدفه به ندرت می‌توان یک جواب واحد یافت که تمام اهداف را به طور همزمان به بهترین شکل ممکن برآورده سازد.

در این پژوهش از روش بهینه‌سازی مبتنی بر جایگزین با استفاده از الگوریتم زنبور عسل استفاده شده است. این روش یک تکنیک قدرتمند در علم بهینه‌سازی است که برای حل مسائلی به کار می‌رود که تابع هدف آن‌ها بسیار زمان‌بر، پرهزینه یا پیچیده برای ارزیابی است. در این روش، به جای کار مستقیم با تابع هدف اصلی و گران، یک مدل تقریبی و ارزان‌تر به نام مدل جایگزین ساخته می‌شود و بهینه‌سازی بر روی این مدل ساده‌تر انجام می‌گیرد. شکل (۲) فلوچارت روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۲: فلوچارت روش بهینه‌سازی

۳- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج مدل سازی سیستم پیشنهادی پرداخته می شود. از جدول (۱) و روابط ارائه شده در بخش ۲ برای محاسبه نتایج مدل سازی استفاده شد. برای تحلیل ترمودینامیکی چرخه پیشنهادی، از رویکرد حجم کنترل استفاده شده است. در این آنالیز، با هدف ساده سازی محاسبات و تمرکز بر تحلیل انرژی اصلی جریان، از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده و همچنین اتلافات ناشی از اصطکاک در خطوط انتقال (لوله ها و کانال ها) نادیده گرفته شده اند. افت فشار در اجزای کلیدی سیستم نیز ناچیز بوده و در نتیجه، فشار در کل چرخه ثابت است. جدول (۲) نتایج مدل تعادلی مورد استفاده برای گازساز را ارائه می کند.

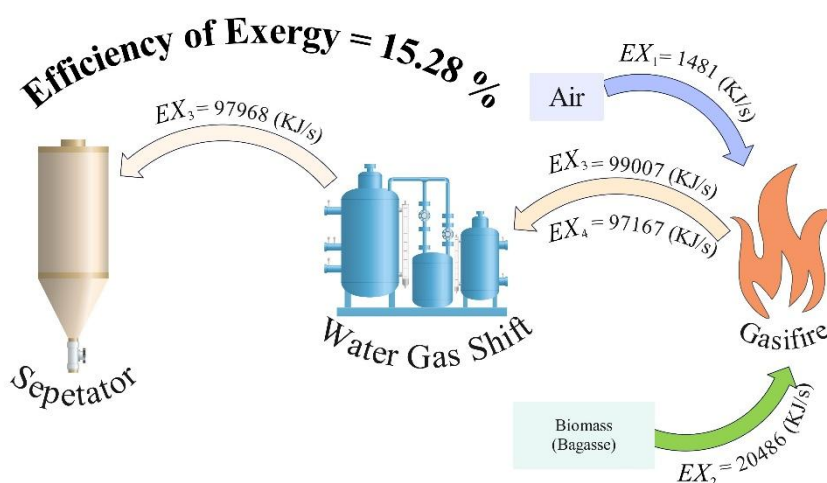
جدول ۳: نتایج مدل ثابت تعادلی برای گازساز		
پارامتر	نماد	مقدار
انرژی آزاد گیبس کربن	G_C^0	557,750 J/mol
انرژی آزاد گیبس مونوکسید کربن	G_{CO}^0	310,770 J/mol
انرژی آزاد گیبس هیدروژن	$G_{H_2}^0$	136,552 J/mol
انرژی آزاد گیبس متان	$G_{CH_4}^0$	271,041 J/mol
تغییر انرژی آزاد گیبس واکنش گازساز	ΔG	2,063 J/mol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی فرآورده ها	$\bar{H}_f^0 \text{ products}$	420,528 kJ/kmol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی واکنش دهنده ها	$\bar{H}_f^0 \text{ reactants}$	382,257 kJ/kmol
ثابت تعادلی واکنش بوردوارد	K_1	0.7694
ثابت تعادلی واکنش آب - گاز	K_2	1.819
تعداد کل مول های محصولات	n_t	2.87 mol
کسر متان	x_{CH_4}	3.12%
کسر مونوکسید کربن	x_{CO}	13.05%
کسر دی اکسید کربن	x_{CO_2}	18.76%
کسر هیدروژن	x_{H_2}	11.89%
کسر نیتروژن	x_{N_2}	53.27%
کسر بخار آب	x_{H_2O}	9.35%

نتایج جدول (۲) نشان می دهند که فرآیند شبیه سازی شده یک گازی سازی هواسوز است که ماهیتی گرماگیر دارد و در نزدیکی تعادل ترمودینامیکی کار می کند. با وجود کیفیت متوسط گاز سنتز به دلیل وجود نیتروژن زیاد، این گاز حاوی مقادیر قابل قبولی مونواکسید کربن و هیدروژن است و خوراک مناسبی برای راکتور شیفت آب - گاز محسوب می شود تا غلظت هیدروژن در آن افزایش یابد.

جدول (۳) میزان تولید هیدروژن، حرارت های دو بخش گازساز و راکتور شیفت آب - گاز و شاخص های عملکردی کل فرآیند را ارائه می کند.

جدول ۴: نتایج شاخص‌های عملکرد فرآیند		
پارامتر	نماد	مقدار
نرخ هیدروژن تولیدی	$\dot{m}_{H_2}$	0.247 kg/s
حرارت بخش گازساز	$\dot{Q}_{\text{gasifier}}$	5,790 kJ/s
حرارت بخش راکتور شیفت آب - گاز	$\dot{Q}_{\text{WGS}}$	1,274 kJ/s
بازده تولید هیدروژن	η_{H_2}	24.93%
بازده انرژی	η_{ex}	15.28%
بازده فرآیند	η	37.62%

شکل (۳) نتایج مربوط به تحلیل انرژی را برای اجزای مختلف سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل ۳: نتایج مربوط به تحلیل انرژی

شکل (۳) نشان می‌دهد که گازساز بزرگترین منبع تخریب انرژی در کل سیستم است. دلیل این امر، فرآیندهای بسیار برگشتناپذیر است. در راکتور شیفت آب - گاز نیز به دلیل برگشتناپذیری واکنش شیمیایی و انتقال حرارت برای خنک‌کاری راکتور، انرژی تخریب می‌شود. این تخریب نسبت به گازساز بسیار کم‌تر است. جدول (۴) نتایج مربوط به تحلیل اقتصادی سیستم پیشنهادی تولید هیدروژن با استفاده از زیست‌توده را نشان می‌دهد.

جدول ۵: نتایج تحلیل اقتصادی		
پارامتر	نماد	مقدار
نرخ بازگشت سرمایه	CRF	0.1339
نرخ هزینه گازساز	$\dot{Z}_{\text{gasifier}}$	0.01157 \$/s
نرخ هزینه راکتور شیفت آب - گاز	$\dot{Z}_{\text{WGS}}$	0.002045 \$/s
نرخ هزینه جداساز	$\dot{Z}_{\text{separator}}$	0.004851 \$/s
نرخ هزینه کل	$\dot{Z}_{\text{total}}$	0.004672 \$/s

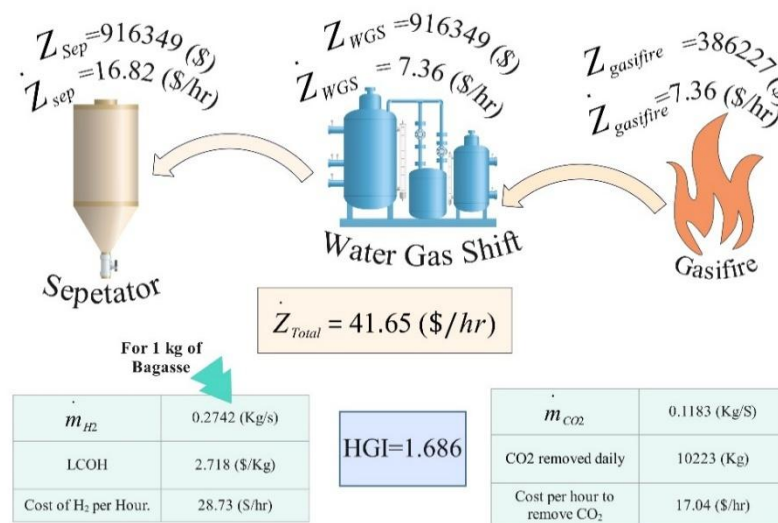
جدول (۴) نشان می‌دهد که هزینه مرتبط با گازساز به مراتب از سایر اجزا بیش‌تر است (بیش از دو برابر هزینه جداکننده و بیش از پنج برابر هزینه راکتور WGS). این موضوع قابل انتظار است زیرا گازساز یک تجهیز پیچیده، دما-بالا و معمولاً فشار-بالا است که به مواد ساخت پیشرفته نیاز دارد و قلب کل فرآیند محسوب می‌شود. واحد جداسازی هیدروژن نیز هزینه قابل توجهی دارد. این واحدها به دلیل نیاز به کمپرسورها، شیرآلات کنترلی متعدد و بسترهای جاذب، هم از نظر سرمایه‌گذاری و هم از نظر مصرف انرژی، گران هستند.

جدول (۵) نتایج مربوط به تحلیل محیط‌زیستی را برای سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد.

جدول ۵: نتایج تحلیل زیست‌محیطی		
پارامتر	نماد	مقدار
دبی انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن	$\dot{m}_{CO_2}$	0.1183 kg/s
شدت انتشار دی‌اکسید کربن	ξ_{CO_2}	4.776
هزینه حذف هر تن دی‌اکسید کربن	-	40 \$/ton
هزینه حذف دی‌اکسید کربن در هر ساعت	-	17.04 \$/h
هزینه حذف روزانه دی‌اکسید کربن	-	10,224 kg
کل هزینه سالانه تولید هیدروژن	-	251,708 \$

جدول (۵) نشان می‌دهد که این فرآیند به‌طور قابل توجهی (حدود ۵۰٪) شدت انتشار کربن کم‌تری نسبت به تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی دارد. مزیت اصلی سیستم، استفاده از خوراک تجدیدپذیر و کربن زیست‌زاد است. اگر دی‌اکسید کربن منتشر شده در اتمسفر رها شود، فرآیند تقریباً کربن-خنثی است. اگر دی‌اکسید کربن جذب و ذخیره شود، محصول نهایی یک هیدروژن آبی با ردپای کربنی منفی خواهد بود. این سیستم یک راه‌حل میانی و یک گام مثبت به سمت اقتصاد هیدروژن است. اگرچه انتشار-صفر نیست، اما با مدیریت صحیح دی‌اکسید کربن می‌تواند هیدروژنی با ردپای کربنی بسیار پایین و حتی منفی تولید کند که از نظر زیست‌محیطی بسیار مطلوب است.

نتایج مربوط به دو تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی در شکل (۴) خلاصه شده‌اند.



شکل ۴: نتایج مربوط به تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی

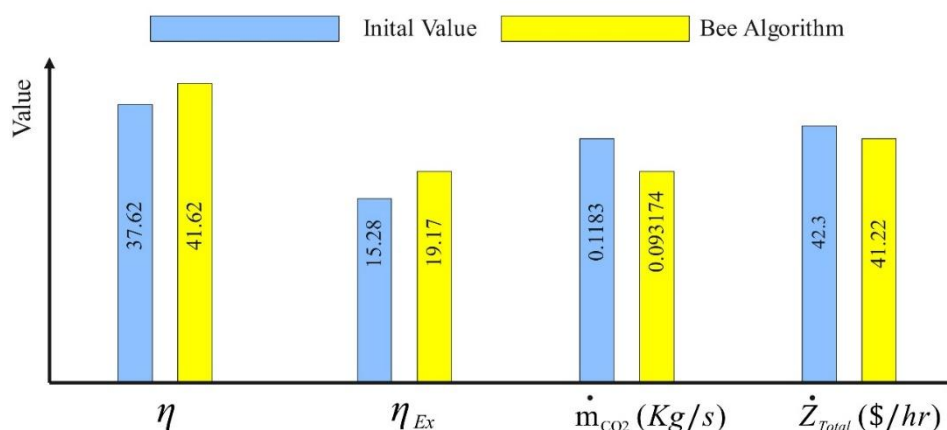
جدول (۶) پارامترهای تنظیمی الگوریتم زنبور عسل را ارائه می‌دهد.

جدول ۷: پارامترهای الگوریتم زنبور عسل	
پارامتر	مقدار
تعداد کل زنبورها	20
تعداد سایت‌های منتخب	5
تعداد سایت‌های نخبه	2
اندازه اولیه جستجو	0.1
حداکثر تعداد تکرار	100
ضریب کاهش اندازه جستجو	0.95
محدوده دبی زیست‌توده	0.8-2 kg/s
محدوده دمای گاز سنتز	500-750 °C
محدوده فشار گاز سنتز	100-200 kPa
محدوده رطوبت زیست‌توده	0.1-0.2

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، چهار متغیر دبی زیست‌توده، دمای گاز سنتز، فشار گاز سنتز و رطوبت زیست‌توده به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. هدف از بهینه‌سازی، بیشینه‌سازی بازده انرژی و آگزروی و کمینه‌سازی هزینه کل و دبی انتشار دی‌اکسیدکربن است. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج بهینه متغیرهای طراحی و مقادیر توابع هدف متناظر با این مقادیر در جدول (۷) ارائه شده‌اند.

جدول ۸: مقدار بهینه متغیرهای طراحی و مقدار متناظر توابع هدف	
پارامتر	مقدار بهینه
دبی زیست‌توده	2 kg/s
دمای گاز سنتز	672.45 °C
فشار گاز سنتز	190.66 kPa
رطوبت زیست‌توده	0.2
بازده انرژی	41.6124%
بازده آگزروی	19.1697%
هزینه کل	0.011452 \$/hr
دبی انتشار دی‌اکسیدکربن	0.09317 kg/s

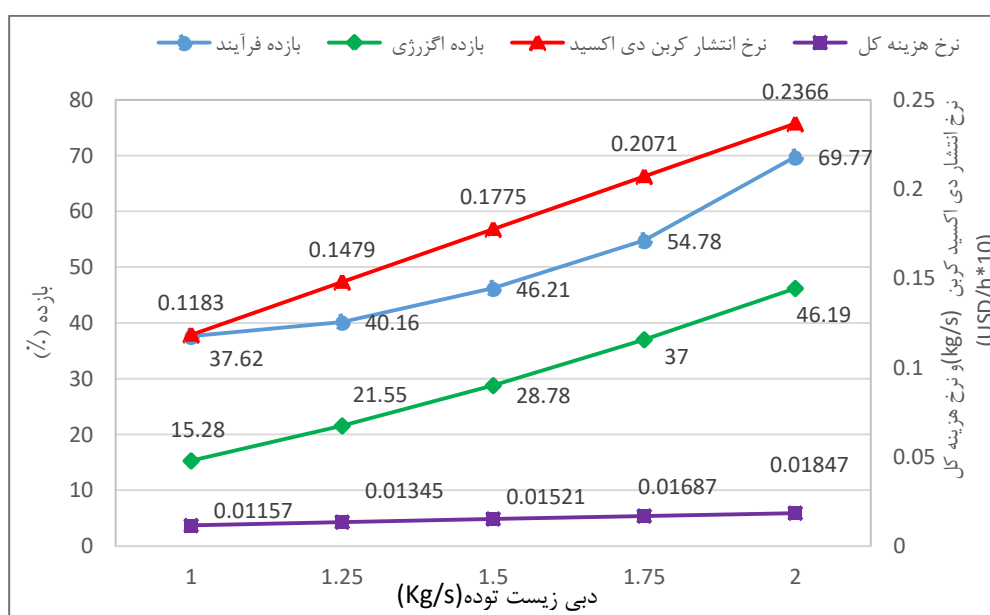
شکل (۵) به مقایسه مقادیر اولیه و مقادیر بهینه توابع هدف در پژوهش حاضر می‌پردازد.



شکل ۵: مقایسه مقادیر اولیه و بهینه توابع هدف

داده‌های جدول (۷) و شکل (۵) نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل با موفقیت توانسته است این سیستم را از دیدگاه‌های مختلف بهینه کند. نتایج نشان می‌دهند که این الگوریتم یک راه حل مصالحه‌ای موفق پیدا کرده است که در آن عملکرد ترمودینامیکی (راندمان انرژی و اگزرژی) بهبود یافته، اثرات زیست‌محیطی کاهش پیدا کرده و صرفه اقتصادی حاصل شده است.

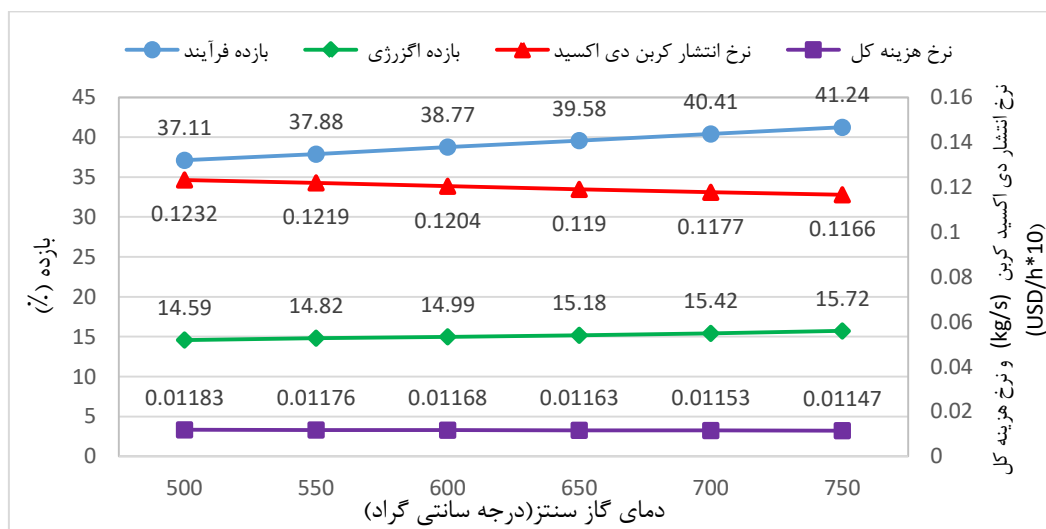
شکل‌های (۶) تا (۹) به ترتیب تأثیر پارامترهای دبی زیست‌توده، دمای گاز سنتز، فشار گاز سنتز و رطوبت زیست‌توده را بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل نشان می‌دهد.



شکل ۶: تأثیر دبی زیست‌توده بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

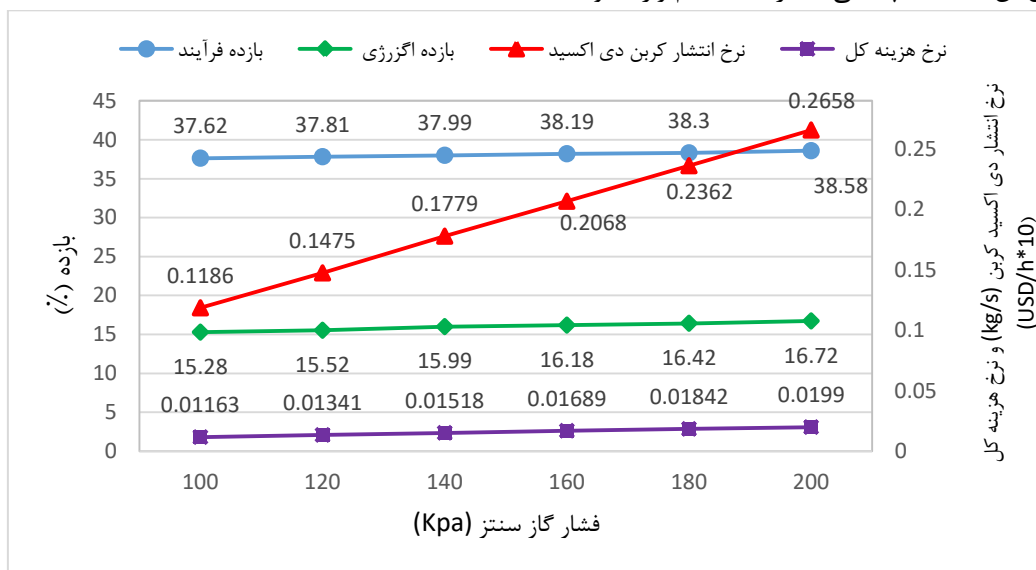
طبق شکل (۶)، با افزایش دبی زیست‌توده از ۰/۱ به ۲/۰ کیلوگرم بر ثانیه، بازده انرژی و بازده اگزرژی هر دو به‌طور پیوسته و قابل توجهی افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده بهبود عملکرد ترمودینامیکی در نرخ‌های ورودی بالاتر است. با این حال، این بهبود با یک مصالحه همراه است زیرا هم‌زمان نرخ هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن نیز روندی صعودی دارند. این امر نشان می‌دهد که درحالی‌که افزایش دبی ورودی به کارایی بالاتر سیستم منجر می‌شود، اما هزینه‌های عملیاتی و اثرات منفی زیست‌محیطی را نیز افزایش می‌دهد و انتخاب یک نقطه کارکرد بهینه نیازمند توازن میان این اهداف متضاد است.

طبق شکل (۷)، با افزایش دمای گاز سنتز، بازده انرژی و بازده اگزرژی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابند که به معنای بهبود عملکرد ترمودینامیکی سیستم در دماهای بالاتر است. نکته بسیار مهم در این تحلیل آن است که این افزایش بازده، تأثیر منفی قابل توجهی بر سایر شاخص‌ها ندارد؛ به‌طوری‌که نرخ هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسید کربن در کل این بازه دمایی تقریباً ثابت باقی می‌مانند. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش دمای گاز سنتز یک راهکار موثر برای بهینه‌سازی سیستم است زیرا باعث افزایش چشمگیر بازدهی بدون تحمیل هزینه اضافی یا افزایش آلاینده‌گی زیست‌محیطی می‌شود.



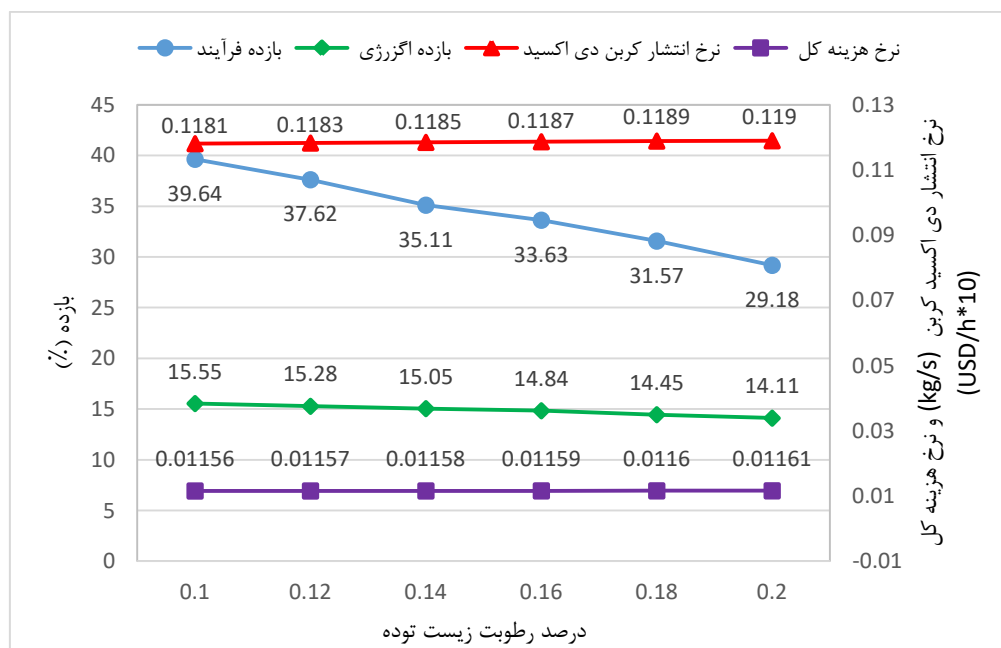
شکل ۷: تأثیر دمای گاز سنتز بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

طبق شکل (۸)، با افزایش فشار گاز سنتز، بازده فرآیند تنها به میزان بسیار جزئی بهبود می‌یابد. در مقابل، این بهبود ناچیز با یک هزینه قابل توجه همراه است زیرا هم نرخ هزینه کل و هم نرخ انتشار دی‌اکسید کربن به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابند. بنابراین، این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که افزایش فشار گاز سنتز از دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی نامطلوب است و بهترین نقطه عملکرد، در فشارهای پایین‌تر (مانند ۱۰۰ کیلوپاسکال) قرار دارد؛ جایی که هزینه‌ها و آلاینده‌گی به حداقل می‌رسد بدون آن‌که لطمه‌چندانی به بازده سیستم وارد شود.



شکل ۸: تأثیر فشار گاز سنتز بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

طبق شکل (۹)، با افزایش رطوبت از ۱۰٪ به ۲۰٪، بازده فرآیند و بازده انرژی هر دو به صورت چشمگیری کاهش می‌یابند. این افت بازده به این دلیل است که بخشی از انرژی سیستم صرف تبخیر آب اضافی موجود در زیست توده می‌شود. در مقابل، نرخ هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسیدکربن تقریباً ثابت باقی می‌مانند و تغییر محسوسی با افزایش رطوبت نشان نمی‌دهند. بنابراین، این نمودار قویاً نشان می‌دهد که برای دستیابی به حداکثر کارایی ترمودینامیکی، باید از زیست توده با کم‌ترین میزان رطوبت ممکن استفاده کرد زیرا رطوبت بالا ضمن کاهش شدید بازده، هیچ مزیت اقتصادی یا زیست محیطی به همراه ندارد.



شکل ۹: تأثیر رطوبت زیست توده بر بازده انرژی، بازده انرژی، دی اکسید کربن و نرخ هزینه کل

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک سیستم تولید هیدروژن پاک از طریق گازی سازی باگاس نیشکر با رویکردی جامع مورد مطالعه و بهینه سازی قرار گرفت. تحلیل های چهارگانه (انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی) نشان داد که راکتور گازساز، به دلیل برگشت ناپذیری های ترمودینامیکی بالا، هم بزرگ ترین منبع تخریب انرژی و هم پرهزینه ترین جزء سیستم است. از منظر زیست محیطی، مشخص شد که این فرآیند شدت انتشار کربن کمتری نسبت به روش های مبتنی بر سوخت فسیلی دارد و پتانسیل دستیابی به رد پای کربنی منفی را نیز داراست. فرآیند بهینه سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل توانست با موفقیت یک نقطه کارکرد بهینه را شناسایی کند که در آن، راندمان انرژی و انرژی به ترتیب از ۳۷/۶۲٪ و ۱۵/۲۸٪ به ۴۱/۶۲٪ و ۱۹/۱۷٪ بهبود یافت و همزمان، هزینه کل سیستم و میزان انتشار دی اکسیدکربن نیز کاهش پیدا کرد. علاوه بر این، تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی، نشان داد که افزایش دمای گاز سنتز و کاهش رطوبت زیست توده منجر به افزایش چشمگیر بازده بدون تحمیل هزینه اضافی می شود؛ در حالی که افزایش فشار گاز سنتز به دلیل افزایش قابل توجه هزینه ها و آلودگی در ازای بهبود جزئی بازده، نامطلوب است. در مجموع، نتایج این تحقیق کارایی سیستم پیشنهادی را تأیید کرده و یک چارچوب تحلیلی و بهینه سازی قدرتمند برای توسعه فناوری های تولید هیدروژن پایدار ارائه می دهد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی			
$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s	b	بار زیست‌محیطی ویژه
n	تعداد مول، mol	$\dot{B}$	نرخ بار زیست‌محیطی
$\dot{n}$	دبی مولی، mol/s	c	هزینه واحد انرژی، J/\$
N	تعداد ساعات کارکرد سالانه، hr/yr	$\dot{C}$	نرخ هزینه جریان انرژی، hr/\$
P	فشار، kPa	$\bar{C}_p$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، kJ/kmol.K
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت، kW	CRF	ضریب بازیافت سرمایه
R	ثابت جهانی گازها، kJ/kmol.K	ex	انرژی شیمیایی استاندارد، kJ/kmol
$\bar{s}$	آنترپی مولی ویژه، kJ/kmol.K	$\dot{E}x$	نرخ انرژی، kJ/s
$\bar{S}$	آنترپی مولی، kJ/kmol.K	$\dot{E}x_D$	نرخ تخریب انرژی، kJ/s
T	دما، °C یا K	G^0	انرژی آزاد استاندارد گیبس، J/mol
$\dot{W}$	نرخ انجام کار، kW	$\bar{h}$	آنتالپی ویژه مولی، kJ/kmol
x	کسر مولی	$\bar{H}$	آنتالپی مولی، kJ/kmol
y	کسر مولی مخلوط گاز	H_f^0	آنتالپی استاندارد تشکیل، kJ/kmol
$\dot{Y}$	نرخ بار زیست‌محیطی	HHV	ارزش حرارتی بالا، kJ/kmol
z	هزینه خرید تجهیز، \$	i	نرخ بهره
$\dot{Z}$	نرخ هزینه، \$/hr	K	ثابت تعادلی واکنش
$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s	LHV	ارزش حرارتی پایین، kJ/kmol
علائم یونانی			
ν	ضریب استوکیومتری	β	ضریب نسبت انرژی شیمیایی به LHV زیست‌توده
ξ	شدت انتشار ویژه، kg/kWh	η	بازده انرژی، %
ϕ	ضریب نگهداری تجهیز	η_{ex}	بازده انرژی، %
		η_{H_2}	بازده تولید هیدروژن، %

مراجع

- [1] Obiora, N. K., Ujah, C. O., Asadu, C. O., Kolawole, F. O., Ekwueme, B. N., Production of hydrogen energy from biomass: prospects and challenges, *Green Technologies and Sustainability*, (2024) 100100.
- [2] Dari, D. N., Freitas, I. S., Aires, F. I. D. S., Melo, R. L. F., dos Santos, K. M., da Silva Sousa, P., Santos, J. C. D., An updated review of recent applications and perspectives of hydrogen production from biomass by fermentation: A comprehensive analysis, *Biomass*, 4 (2024) 132-163.
- [3] Nguyen-Thi, T. X., Nguyen, P. Q. P., Tran, V. D., Ağbulut, Ü., Nguyen, L. H., Balasubramanian, D., Pham, N. D. K., Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification, *International Journal of Hydrogen Energy*, 54 (2024) 127-160.

- [4] Javaherian, A., Yari, M., Gholamian, E., Carton, J. G., Mehr, A. S., Proposal and comprehensive analysis of power and green hydrogen production using a novel integration of flame-assisted fuel cell system and Vanadium-Chlorine cycle: An application of multi-objective optimization, *Energy Conversion and Management*, 277 (2023) 116659.
- [5] Al-Fatesh, A. S., AL-Garadi, N. Y., Osman, A. I., Al-Mubaddel, F. S., Ibrahim, A. A., Khan, W. U., Alothman, O. Y., From plastic waste pyrolysis to Fuel: Impact of process parameters and material selection on hydrogen production, *Fuel*, 344 (2023) 128107.
- [6] Lim, J., Joo, C., Lee, J., Cho, H., Kim, J., Novel carbon-neutral hydrogen production process of steam methane reforming integrated with desalination wastewater-based CO₂ utilization, *Desalination*, 548 (2023) 116284.
- [7] Wang, G., He, D., Lin, J., Jiang, T., & Chen, Z., Exergy estimate of a novel hybrid solar-gas power and organic Rankine cycle-based hydrogen-production system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, (2022), 101961.
- [8] Moltames, R., Assareh, E., Mohammadi Bouri, F., & Azizimehr, B., Simulation and optimization of a solar based trigeneration system incorporating PEM electrolyzer and fuel cell. *Journal of Solar Energy Research*, 6(1) (2021), 664-677.
- [9] Katebah, M., Al-Rawashdeh, M. M., & Linke, P., Analysis of hydrogen production costs in Steam-Methane Reforming considering integration with electrolysis and CO₂ capture. *Cleaner Engineering and Technology*, (2022), 10, 100552.
- [10] Santasnachok, M., & Nakyai, T., Exergetic and environmental assessments of hydrogen production via waste tire gasification with co-feeding of CO₂ recycled. *Energy Reports*, 8, (2022), 859-867.
- [11] Cho, H. H., Strezov, V., & Evans, T. J., Environmental impact assessment of hydrogen production via steam methane reforming based on emissions data. *Energy Reports*, 8 (2022), 13585-13595.
- [12] Abdolalipouradi, M., Mohammadkhani, F., Khalilarya, S., & Yari, M., Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 226 (2020), 113544.
- [13] Cengel, Y. A., Boles, M. A., *Thermodynamics: An engineering approach*, McGraw-Hill Education, (2019).
- [14] Zainal, Z. A., Ali, R., Lean, C. H., Seetharamu, K. N., Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials, *Energy Conversion and Management*, 42 (2001), 1499-1515.
- [15] Basu, P., *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, Academic Press, (2010).
- [16] Dahiya, A., *Bioenergy: Biomass to biofuels*, Academic Press, (2014).
- [17] Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R., *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*, (1987).
- [18] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. J., *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, (1995).
- [19] Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., Schebek, L., Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems, *Energy*, 34 (2009) 75-89.
- [20] Forrester, A., Sobester, A., Keane, A., *Engineering design via surrogate modelling: a practical guide*, John Wiley & Sons, (2008).

4E Analysis and Multiobjective Optimization of Hydrogen Production via Biomass Gasification

Behzad Azizimher, Taher Armaghani*, Ramin Ghasemiasl, Abdolrazzagah Kaabi Nejadian

Department of Mechanical Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: Spring 2025 Accepted: Summer 2025

Abstract

Given the growing energy crises and environmental concerns, this study investigates and optimizes a hydrogen production system based on the gasification of sugarcane bagasse biomass. To this end, a comprehensive quadruple (4E) analysis, comprising energy, exergy, economic, and environmental assessments, was conducted. The proposed system consists of a drying unit, a gasifier, a water-gas shift reactor, and a hydrogen separator. The primary objective was multi-objective optimization to maximize energy and exergy efficiencies while simultaneously minimizing the total cost rate and carbon dioxide emission rate, utilizing the Bee Algorithm. The initial analysis of the system indicated an energy efficiency of 37.62% and an exergy efficiency of 15.28%. Following the optimization process, these efficiencies increased to 41.62% and 19.17%, respectively, while the total cost and CO₂ emissions were reduced. Furthermore, a sensitivity analysis revealed that increasing the syngas temperature and decreasing the biomass moisture were the most effective parameters for enhancing system performance without adverse economic or environmental consequences.

Keywords: hydrogen production, biomass gasification, sugarcane bagasse, 4E analysis, Multiobjective optimization

*Corresponding author: taherarmaghani@iau.ac.ir

Cite this article as Behzad Azizimher, Taher Armaghani, Ramin Ghasemiasl, Abdolrazzagah Kaabi Nejadian, 4E Analysis and Multiobjective Optimization of Hydrogen Production via Biomass Gasification, **Journal of Energy Conversion**, 2025, 12(2), 15-34.