نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص: ۳۴-۱۵

J. Energy Conversion

Volume: 12, Issue:2, 2025: 15-34

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، اگزرژی، 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 اگزرژی 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 اگزرژی ٪۱۵/۲۸را نشان داد. پس از فرآیند بهینه‌سازی، راندمان انرژی و اگزرژی به ترتیب به ٪۴۱/۶۲ و ٪۱۹/۱۷ افزایش یافتند، در حالی‌که 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@iau.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.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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 سبد انرژی آینده به خود اختصاص داده است. با این‌حال، 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، مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن 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 وانادیوم-کلر را برای تولید هم‌زمان توان الکتریکی و هیدروژن سبز پیشنهاد کردند. هیدروژن سبز از طریق چرخه ترموشیمیایی وانادیوم-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 دی‌اکسیدکربن ۰/۳۴۳۷ کیلوگرم بر کیلووات‌ساعت دست یافت. الفاتح و همکاران [۵] به بررسی تولید هیدروژن از ضایعات پلاستیکی از طریق فرآیندهای پیرولیز و گازسازی کاتالیزوری با تأکید بر تأثیر پارامترهای فرآیند و انتخاب مواد پرداختند. آن‌ها از روش‌های پیرولیز، پیرولیز-گازسازی 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

است که این روش را به‌عنوان جایگزینی پایدار برای مدیریت ضایعات پلاستیکی و تولید سوخت پاک تأیید می‌کند. لیم و همکاران [۶] به بررسی یک فرآیند نوین تولید هیدروژن بدون کربن از طریق اصلاح بخار متان یکپارچه با استفاده از پساب نمک‌زدایی برای جذب و استفاده از CO_2 پرداختند. آن‌ها از روش اصلاح بخار متان برای تولید هیدروژن استفاده کردند و CO_2 تولیدشده را با استفاده از یون‌های Na^+، Ca^{2+} و Mg^{2+} موجود در پساب نمک‌زدایی به کربنات‌های معدنی تبدیل نمودند. نتایج نشان داد که این فرآیند ٪۹۴/۵ از CO_2 تولیدی را جذب کرده و صرفا ۰/۰۱۶ کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم هیدروژن CO_2 منتشر کرده و هزینه سطح‌بندی شده هیدروژن برابر با ۲/۶ دلار آمریکا به ازای هر کیلوگرم هیدروژن است که از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نسبت به روش‌های مرسوم اصلاح بخار متان با فناوری‌های جذب کربن رقابتی است. جدول (۱) به بررسی پژوهش‌های اخیر برای روش‌های مختلف تولید هیدروژن اختصاص دارد.

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

توضیحات اضافی	ردپای کربن	هزینه تولید	نرخ تولید هیدروژن	منبع سوخت یا انرژی	سیکل	روش تولید هیدروژن	رفرنس
میزان تخریب اگزرژی و بازدهی در این سیستم ٪۵۱/۲ - ٪۹۲/۶	کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید	-	تولید روزانه ۶,۲۱ کیلوگرم هیدروژن	توان خورشیدی	رانکین آلی	الکترولایز غشای تبادل پروتونر	[۷]
افزایش بازده انرژی و اگزرژی به ترتیب ٪۲۲/۳۳ و ٪۶۱	کاهش میزان انتشار کربن دی اکسید	۱۴۰/۴۱ دلار بر ساعت	نرخ تولید هیدروژن ۲/۸گرم 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]
راندمان‌های انرژی و اگزرژی 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	بیش‌ترین راندمان تولید هیدروژن در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد	زیست توده	-	گازساز	[۱۰]
بررسی اثرات گلخانه‌ایی و پیشنهاد بهترین روش برای کنترل گرمایش جهانی	گازی‌سازی زیست‌توده بیش‌ترین پتانسیل را برای کاهش اثر گرمایش جهانی دارد	-	افزایش میزان تولید هیدرون	-	-	ریفرمینگ متان/گازیسازی	[۱۱]
خروجی خالص قدرت برابر با ۸۶۱۳ کیلووات، نرخ تولید آب شیرین‌شده ۹/۵۰۲ کیلوگرم بر ثانیه، راندمان انرژی ۱۲/۹۶ و راندمان اگزرژی ۵۳/۷۹	کاهش میزان انتشار کربن دی‌اکسید	تخیمن 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]

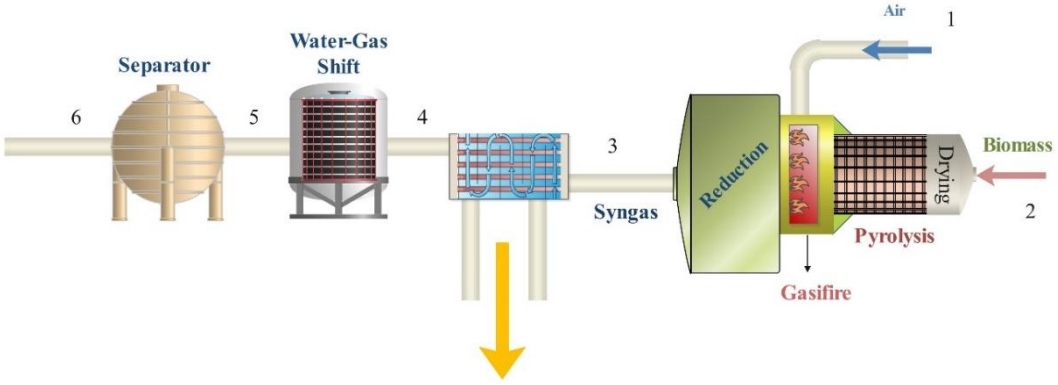
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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 این‌جا 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 این‌جا، 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 دی‌اکسیدکربن، 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]

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \qquad (۱)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

$$\sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o + \left(\sum \dot{Q}_i - \sum \dot{Q}_o\right) + \dot{W} = 0 \quad (۲)$$

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 انجام‌شده برای یک سیستم یا حجم کنترل هستند. با نوشتن این دو رابطه برای هریک از اجزای سیستم و یا کل آن می‌توان به محاسبه مشخصه‌های ترمودینامیکی جریان‌های مختلف در سیستم پرداخت.
جدول (۱) مقادیر مفروض برای برخی پارامترهای سیستم به‌عنوان ورودی تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات ورودی چرخه پیشنهادی [۱۴]

پارامتر	نماد	مقدار
دمای زیست‌توده	T_2	25 ºC
دمای هوای ورودی به گازساز	T_1	673.3 ºC
فشار در کل چرخه	P_i	101 kPa
ثابت جهانی گازها	R	8.134 kJ/kmolºK
دبی جرمی زیست‌توده	$\dot{m}_2$	1 kg/s
رطوبت زیست‌توده برحسب مول زیست‌توده	MC	12%
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%
ارزش حرارتی بالای باگاس نیشکر	HHV	449,568 kJ/kmol
ارزش حرارتی پایین باگاس نیشکر	LHV	423,118 kJ/kmol

همان‌طور که پیش‌تر تشریح شد، در بخش خشک‌کن گازساز، رطوبت زیست‌توده تا حد ممکن کاهش می‌یابد.

$$CH_{1.72}O_{0.71}N_{0.01(wet)} + heat \rightarrow CH_{1.72}O_{0.71}N_{0.01(dry)} + H_2O_{(g)} \quad (۳)$$

در ناحیه پیرولیز، زیست‌توده خشک‌شده در غیاب اکسیژن و در دمای بالا به‌صورت حرارتی تجزیه می‌شود. این فرآیند گرماگیر است.

$$CH_{1.72}O_{0.71}N_{0.01} + heat \rightarrow C_{(s)} + H_{2(g)} + CO_{(g)} + CO_{2(g)} + CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} + N_{2(g)} \quad (۴)$$

در ناحیه احتراق، محصولات پیرولیز با هوا واکنش می‌دهند و واکنش‌های متعددی انجام می‌شود. در اولین واکنش، زغال و هیدروژن موجود در محصولات پیرولیز با اکسیژن هوا واکنش داده و حرارت تولید می‌کند.

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + heat \quad (۵)$$

$$H_{2(g)} + 0.5O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} + heat \quad (۶)$$

اکنون، دی‌اکسیدکربن و به‌خاطر آب تولیدشده با کربن باقی‌مانده واکنش می‌دهند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

$$C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)} \quad (۷)$$

$$C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)} \quad (۸)$$

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

$$CH_{1.72}O_{0.71}N_{0.01} + 0.12H_2O + m(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow n_1H_2 + n_2CO + n_3CO_2 + n_4H_2O + n_5CH_4 + n_6N_2 \quad (۹)$$

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 $\nu_A\mu_A + \nu_B\mu_B \leftrightarrow \nu_C\mu_C + \nu_D\mu_D$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]

$$K = \frac{n_C^{\nu_C} n_D^{\nu_D}}{n_A^{\nu_A} n_B^{\nu_B}} \left(\frac{P}{n_t}\right)^{\nu_C+\nu_D-\nu_A-\nu_B} \quad (۱۰)$$

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]

$$-\frac{\Delta G^0}{\bar{R}T} = \ln K \quad (۱۱)$$

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]

$$\Delta G^0 = \Delta\bar{H} - T\Delta\bar{S}^0 \quad (۱۲)$$

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.

$$HHV_{biomass} + wH_{H_2O} + m\left(H_{O_2} + 3.76H_{N_2}\right) = n_1H_{H_2} + n_2H_{CO} + n_3H_{CO_2} + n_4H_{H_2O} + n_5H_{CH_4} + n_6H_{N_2} \quad (۱۳)$$

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

$$H = H_f^0 + \Delta H = H_f^0 + C_p(T)\Delta T \quad (۱۴)$$

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،

$$\dot{n}_{syngas}\bar{h}_{syngas} = \dot{n}_{air}\bar{h}_{air} + \dot{n}_{biomass}\bar{h}_{biomass} \quad (۱۵)$$

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

$$\bar{h} = \sum_i y_i \left(\bar{h}^0_{f\,i} + \bar{C}_{p_i} \Delta T \right) \quad (۱۶)$$

که در این رابطه، y_i کسر مولی هر جزء در مخلوط گاز است. برای محاسبه آنتالپی جریان زیست‌توده نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\bar{h}_{\text{biomass}} = \left(n_{CO_2} \bar{h}^0_{f\,CO_2} + n_{H_2O} \bar{h}^0_{f\,H_2O(g)} \right) + \text{LHV}_{\text{biomass}} + \bar{C}_{p_{\text{biomass}}} \Delta T \quad (۱۷)$$

که n_{CO_2} و n_{H_2O} به ترتیب ضرایب استوکیومتری دی‌اکسید کربن و آب در محصولات واکنش (۹) هستند.

با استفاده از رابطه زیر می‌توان حرارت انتقال‌یافته بین گاز سنتز و سیال دوم درون مبدل حرارتی را تعیین کرد

$$Q_{\text{heat exchanger}} = \dot{m}_{\text{syngas}} C_{p_{\text{syngas}}} (T_3 - T_4) \quad (۱۸)$$

سپس گاز سنتز وارد راکتور شیفت آب – گاز می‌شود. هدف اصلی این راکتور، افزایش مقدار هیدروژن در جریان گاز سنتز است. این کار از طریق واکنش بین مونوکسیدکربن و بخار آب انجام می‌شود. واکنش اصلی که در این راکتور رخ می‌دهد واکنش شیفت آب - گاز آست.

$$CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)} \quad (۱۹)$$

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

$$\dot{n}_4 \bar{h}_4 = \dot{n}_5 \bar{h}_5 + \dot{Q}_{\text{WGS}} \quad (۲۰)$$

که $\dot{Q}_{\text{WGS}}$ حرارت آزادشده در اثر واکنش شیفت آب – گاز است. مقدار آنتالپی مولی در نقاط ۴ و ۵ نیز طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

۲-۲- تحلیل اگزرژی

اگزرژی یک سیستم یا یک جریان ماده یا انرژی، حداکثر کار مفیدی است که می‌توان از آن به‌دست آورد هنگامی که سیستم یا جریان با یک محیط مرجع معین به تعادل کامل (ترمودینامیکی، مکانیکی، شیمیایی و . . .) می‌رسد. اگزرژی را می‌توان بر اساس منشأ و ماهیت آن به انواع فیزیکی (شامل اگزرژی حرارتی ناشی از اختلاف دما و اگزرژی مکانیکی ناشی از اختلاف فشار)، شیمیایی، جنبشی و پتانسیل تقسیم‌بندی کرد. از آن‌جایی‌که انرژی جنبشی و پتانسیل در سیستم پیشنهادی تغییرات چندانی ندارد، می‌توان از این نوع اگزرژی‌ها در مدل‌سازی صرف‌نظر کرد.

رابطه کلی اگزرژی به صورت زیر است [۱۳]

$$\dot{Ex} = \dot{Ex}^{\text{ph}} + \dot{Ex}^{\text{ch}} \quad (۲۱)$$

که $\dot{Ex}^{\text{ph}}$ اگزرژی فیزیکی و $\dot{Ex}^{\text{ch}}$ اگزرژی شیمیایی است. اگزرژی فیزیکی برای جریان پایدار طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۷]

$$\dot{Ex}^{\text{ph}} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (۲۲)$$

در این رابطه، $\dot{Ex}^{\text{ph}}$ اگزرژی فیزیکی، h و s به‌ترتیب آنتالپی و آنتروپی در شرایط فعلی جریان و h_0، T_0 و s_0 به‌ترتیب آنتالپی، دما و آنتروپی در شرایط استاندارد است. برای اگزرژی شیمیایی می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۳]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

$$\dot{E}x^{\mathrm{ch}} = \dot{m}(\sum_i x_i ex_i^{\mathrm{CH}} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i) \quad (۲۳)$$

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]

$$\dot{E}x_{biomass}^{ch} = \dot{m}\beta LHV_{biomass} \quad (۲۴)$$

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.

$$\beta = \frac{1.044 + 0.16\frac{m_H}{m_C} - 0.34493\frac{m_O}{m_C}\left(1 + 0.0531\frac{m_H}{m_C}\right)}{1 - 0.4142\frac{m_O}{m_C}} \quad (۲۵)$$

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]

$$\dot{E}x_D = \left(\sum_{in} \dot{E}x_{in} + \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k\right) - \left(\sum_{out} \dot{E}x_{out} + \dot{W}\right) \quad (۲۶)$$

که در این رابطه، $\dot{E}x_{\mathrm{in}}$ و $\dot{E}x_{\mathrm{out}}$ 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.

۲-۳- 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]

$$\sum_{out} \dot{C}_j = \sum_{in} \dot{C}_i + \dot{Z}_k \quad (۲۷)$$

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 هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه برای جزء k است [۱۸].

$$\dot{Z}_k = \frac{z_k \mathrm{CRF}\phi}{3600N} \quad (۲۸)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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

$$\mathrm{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{۲۹}$$

که i نرخ بهره و n عمر عملیاتی تجهیز است. نرخ هزینه زیست‌توده طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد[۱۸]

$$\dot{C}_{\mathrm{biomass}} = \left(\frac{40}{1000}\right)\left(\frac{3.6}{\mathrm{LHV}}\right) \tag{۳۰}$$

۲-۴- تحلیل زیست‌محیطی

هدف اصلی این تحلیل، شناسایی، کمی‌سازی و ارزیابی این تأثیرات برای درک ردپای زیست‌محیطی سیستم، مقایسه آن با گزینه‌های دیگر و یافتن راه‌هایی برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی آن است. برای هر جزء k از سیستم، یک معادله موازنه برای نرخ بار زیست‌محیطی نوشته می‌شود که طبق آن، مجموع نرخ بارهای زیست‌محیطی جریان‌های اگزرژی خروجی از جزء برابر است با مجموع نرخ بارهای زیست‌محیطی جریان‌های اگزرژی ورودی به آن جزء به‌علاوه نرخ بار زیست‌محیطی مرتبط با خود آن جزء [۱۹]

$$\sum_{out} \dot{B}_j = \sum_{in} \dot{B}_i + \dot{Y}_k \tag{۳۱}$$

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

انتشار ویژه دی‌اکسیدکربن شاخصی کلیدی در ارزیابی زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی است و کاربرد مهمی در چارچوب تحلیل اگزرژوزیست‌محیطی پیدا می‌کند. انتشار ویژه دی‌اکسیدکربن معمولاً به‌صورت نرخ انتشار جرمی دی‌اکسیدکربن تقسیم بر نرخ تولید یک محصول مفید تعریف می‌شود. اگر محصول صرفا توان الکتریکی باشد، رابطه انتشار ویژه دی‌اکسیدکربن به‌صورت زیر درمی‌آید [۱۹]

$$\xi_{\mathrm{CO_2}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{CO_2}}}{\dot{W}} \tag{۳۲}$$

برای محاسبه دبی انتشار مستقیم دی‌اکسیدکربن از احتراق سوخت می‌توان از رابطه زیر بهره برد [۱۹]

$$\dot{m}_{\mathrm{CO_2}} = 3.66 \dot{m}_{\mathrm{fuel}} C\%_{\mathrm{fuel}} \tag{۳۳}$$

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

۲-۵- عملکرد کلی سیستم

راندمان کلی انرژی سیستم به‌صورت انرژی شیمیایی هیدروژن تولیدی به انرژی شیمیایی زیست‌توده ورودی تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\mathrm{H_2}} \mathrm{LHV}_{\mathrm{H_2}}}{\dot{m}_{\mathrm{biomass}} \mathrm{LHV}_{\mathrm{biomass}}} \tag{۳۴}$$

راندمان اگزرژی نیز به‌صورت نرخ اگزرژی هیدروژن خروجی به نرخ اگزرژی‌های ورودی (هوا و زیست‌توده) تعریف می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{H_2}}}{\dot{E}x_{\mathrm{biomass}} + \dot{E}x_{\mathrm{air}}} \quad (۳۵)$$

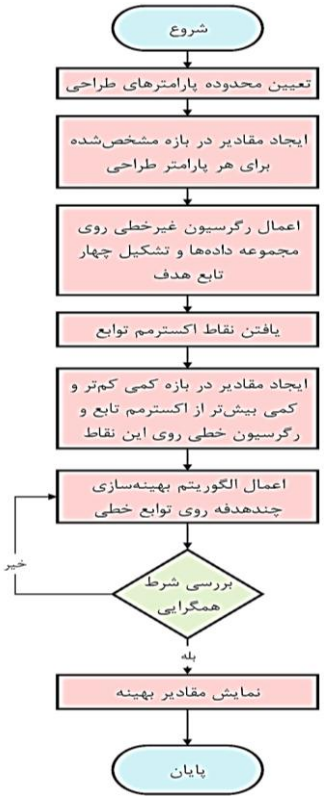
راندمان تولید هیدروژن عبارت است از مقدار هیدروژن تولید شده به ازای هر واحد از زیست‌توده مصرفی که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\eta_{\mathrm{H_2}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{H_2}}}{\dot{m}_{\mathrm{biomass}}} \quad (۳۶)$$

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 (معمولا 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 منحصربه‌فرد وجود دارد، در بهینه‌سازی چندهدفه به‌ندرت 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 زنبورعسل 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

۳- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه و تحلیل نتایج مدل‌سازی سیستم پیشنهادی پرداخته می‌شود. از جدول (۱) و روابط ارائه‌شده در بخش ۲ برای محاسبه نتایج مدل‌سازی استفاده شد. برای تحلیل ترمودینامیکی چرخه پیشنهادی، از رویکرد حجم کنترل استفاده شده است. در این آنالیز، با هدف ساده‌سازی محاسبات و تمرکز بر تحلیل انرژی اصلی جریان، از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شده و هم‌چنین اتلافات ناشی از اصطکاک در خطوط انتقال (لوله‌ها و کانال‌ها) نادیده گرفته شده‌اند. 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 می‌کند.

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	$G_{\mathrm{H_2}}^{0}$	136,552 J/mol
انرژی آزاد گیبس متان	$G_{\mathrm{CH_4}}^{0}$	271,041 J/mol
تغییر انرژی آزاد گیبس واکنش گازساز	ΔG	2,063 J/mol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی فرآورده‌ها	$\overline{H}_{f\ \mathrm{products}}^{0}$	420,528 kJ/kmol
آنتالپی استاندارد تشکیل مولی واکنش‌دهنده‌ها	$\overline{H}_{f\ \mathrm{reactants}}^{0}$	382,257 kJ/kmol
ثابت تعادلی واکنش بوردوارد	K_1	0.7694
ثابت تعادلی واکنش آب - گاز	K_2	1.819
تعداد کل مول‌های محصولات	n_t	2.87 mol
کسر متان	$x_{\mathrm{CH_4}}$	3.12%
کسر مونوکسید کربن	x_{CO}	13.05%
کسر دی‌اکسید کربن	$x_{\mathrm{CO_2}}$	18.76%
کسر هیدروژن	$x_{\mathrm{H_2}}$	11.89%
کسر نیتروژن	$x_{\mathrm{N_2}}$	53.27%
کسر بخار آب	$x_{\mathrm{H_2O}}$	9.35%

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند که فرآیند شبیه‌سازی شده یک گازی‌سازی هواسوز است که ماهیتی گرماگیر دارد و در نزدیکی تعادل ترمودینامیکی کار می‌کند. با وجود کیفیت متوسط گاز سنتز به دلیل وجود نیتروژن زیاد، این گاز حاوی مقادیر قابل قبولی مونواکسیدکربن و هیدروژن است و خوراک مناسبی برای راکتور شیفت آب - گاز محسوب می‌شود تا غلظت هیدروژن در آن افزایش یابد.

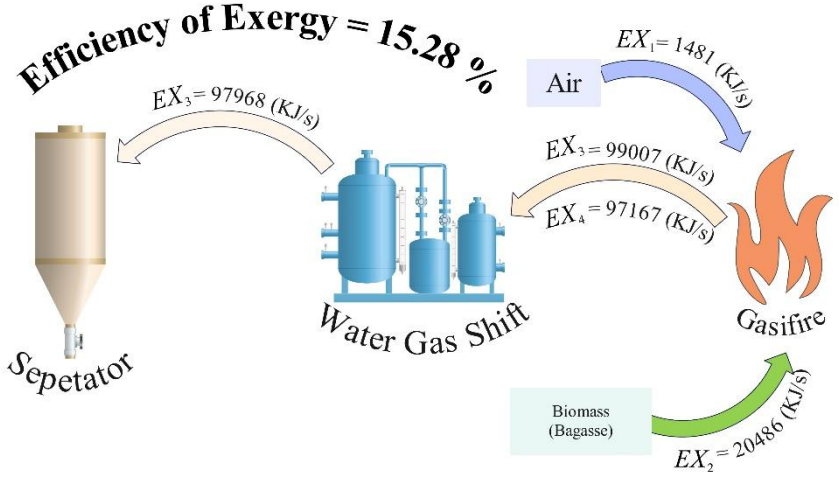
جدول (۳) میزان تولید هیدروژن، حرارت‌های دو بخش گازساز و راکتور شیفت آب – گاز و شاخص‌های عملکردی کل فرآیند را ارائه می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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

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



شکل ۳: نتایج مربوط به تحلیل اگزرژی

شکل (۳) نشان می‌دهد که گازساز بزرگترین منبع تخریب اگزرژی 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، اگزرژی 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 بازیافت سرمایه	CRF	0.1339
نرخ هزینه گازساز	$\dot{Z}_{gasifier}$	0.01157 $/s
نرخ هزینه راکتور شیفت آب - گاز	$\dot{Z}_{WGS}$	0.002045 $/s
نرخ هزینه جداساز	$\dot{Z}_{separator}$	0.004851 $/s
نرخ هزینه کل	$\dot{Z}_{total}$	0.004672 $/s

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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.

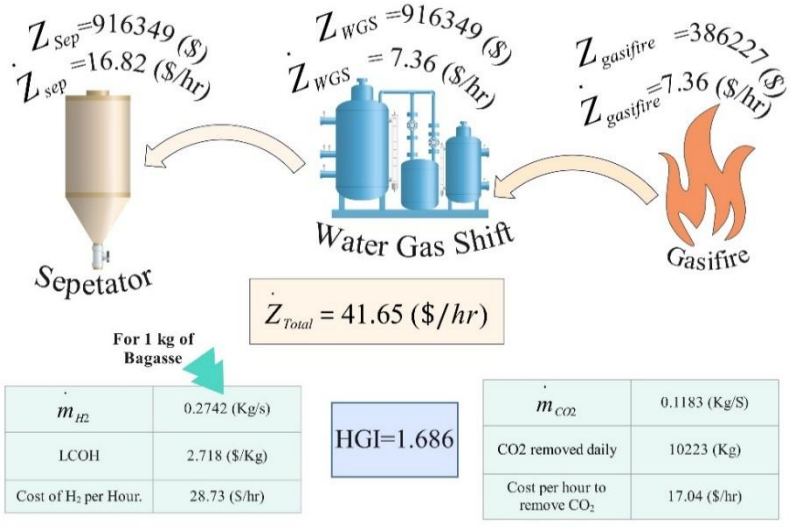
جدول (۵) نتایج مربوط به تحلیل محیط‌زیستی را برای سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد.

جدول ۶: 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 دی‌اکسیدکربن منتشر شده در اتمسفر رها شود، فرآیند تقریباً کربن-خنثی است. اگر دی‌اکسیدکربن 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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 ºC
محدوده فشار گاز سنتز	100-200 kPa
محدوده رطوبت زیست‌توده	0.1-0.2

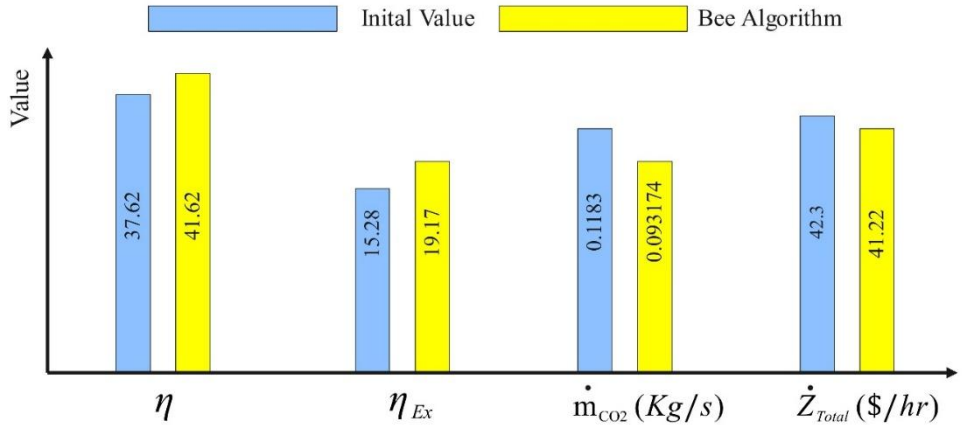
همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، چهار متغیر دبی زیست‌توده، دمای گاز سنتز، فشار گاز سنتز و رطوبت زیست‌توده به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. هدف از بهینه‌سازی، بیشینه‌سازی بازده انرژی و اگزرژی و کمینه‌سازی هزینه کل و دبی انتشار دی‌اکسیدکربن است. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در 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 ºC
فشار گاز سنتز	190.66 kPa
رطوبت زیست‌توده	0.2
بازده انرژی	41.6124%
بازده اگزرژی	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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

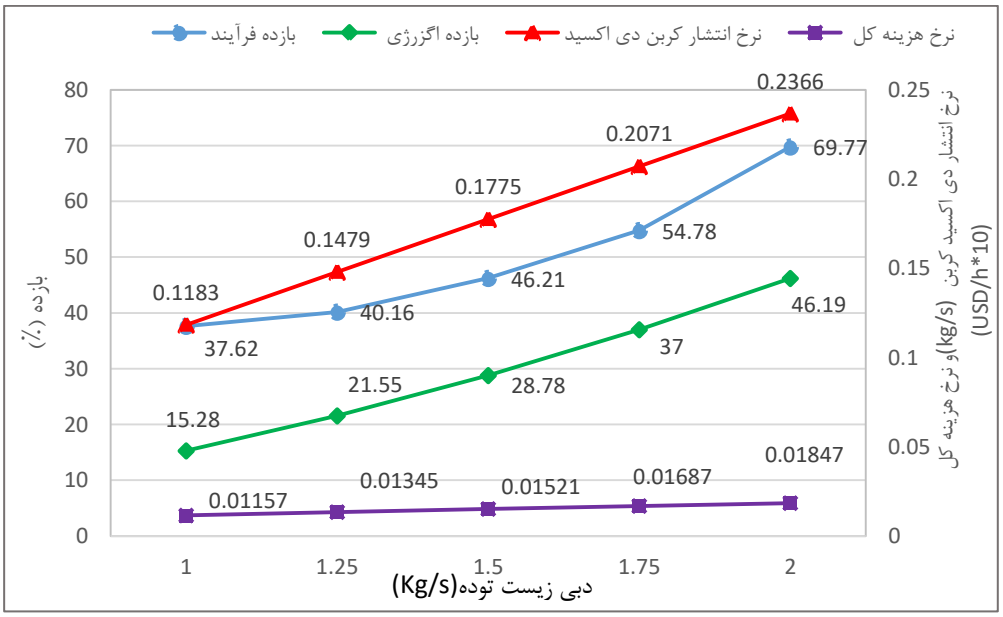
[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]



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 دی‌اکسیدکربن و نرخ هزینه کل نشان می‌دهد.



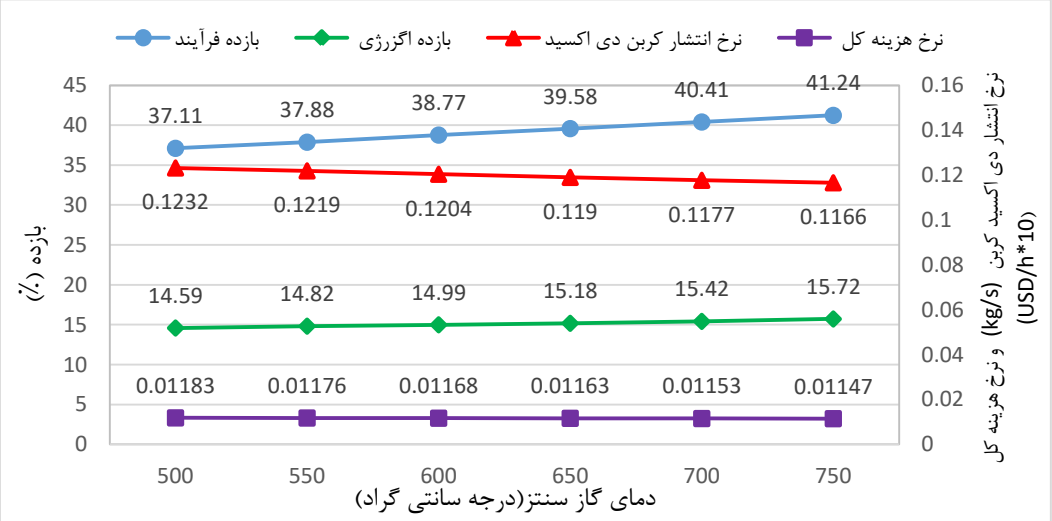
شکل ۶: تأثیر دبی زیست‌توده بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

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 این‌حال، این بهبود با یک مصالحه همراه است زیرا هم‌زمان نرخ هزینه کل و نرخ انتشار دی‌اکسیدکربن 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

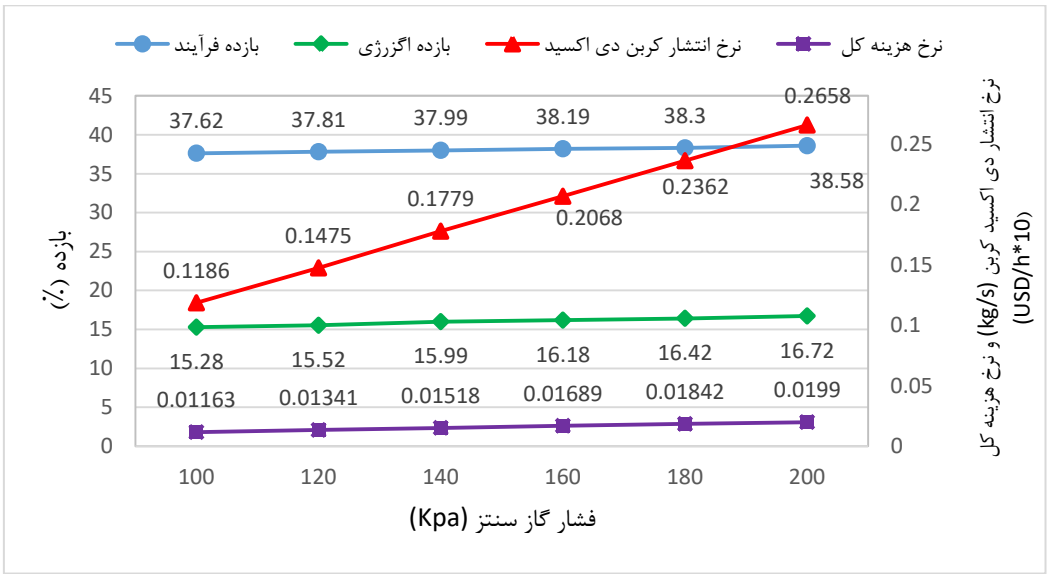
[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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 دی‌اکسیدکربن 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 آلایندگی زیست‌محیطی می‌شود.



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

طبق شکل (۸)، با افزایش فشار گاز سنتز، بازده فرآیند تنها به میزان بسیار جزئی بهبود می‌یابند. 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 آلایندگی به حداقل می‌رسد بدون آن‌که لطمه چندانی به بازده سیستم وارد شود.

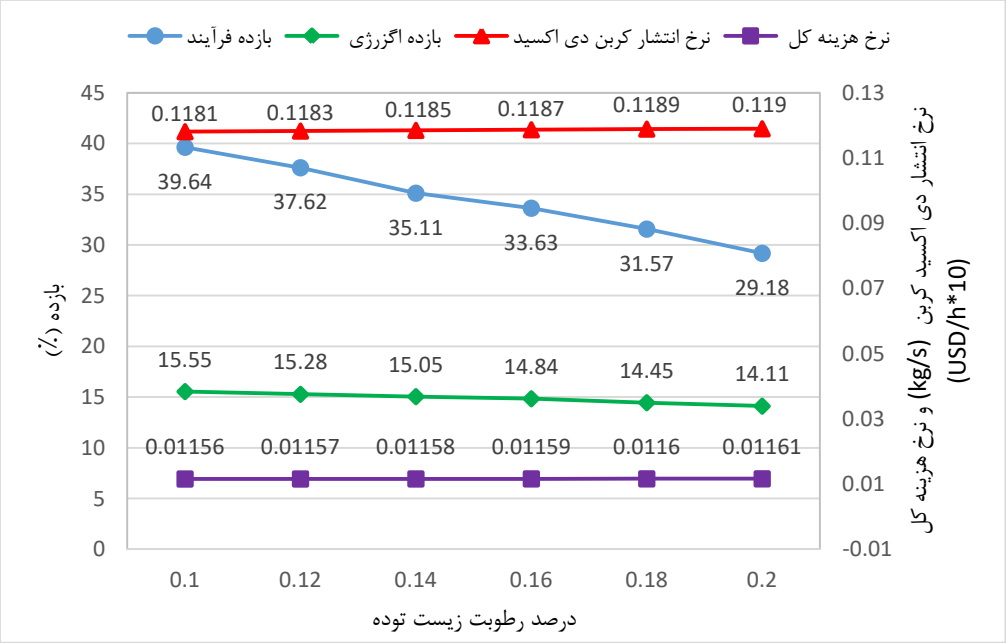


شکل ۸: تأثیر فشار گاز سنتز بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

طبق شکل (۹)، با افزایش رطوبت از ۱۰٪ به ۲۰٪، بازده فرآیند و بازده اگزرژی 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 زیست‌توده 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 زیست‌توده با کم‌ترین میزان رطوبت ممکن استفاده کرد زیرا رطوبت بالا ضمن کاهش شدید بازده، هیچ مزیت اقتصادی یا زیست‌محیطی به همراه ندارد.



شکل ۹: تأثیر رطوبت زیست‌توده بر بازده انرژی، بازده اگزرژی، دبی انتشار دی‌اکسید کربن و نرخ هزینه کل

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم تولید هیدروژن پاک از طریق گازی‌سازی باگاس نیشکر با رویکردی جامع مورد مطالعه و بهینه‌سازی قرار گرفت. تحلیل‌های چهارگانه (انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی) نشان داد که راکتور گازساز، به دلیل برگشت‌ناپذیری‌های ترمودینامیکی بالا، هم بزرگ‌ترین منبع تخریب اگزرژی و هم پرهزینه‌ترین جزء سیستم است.

از منظر زیست‌محیطی، مشخص شد که این فرآیند شدت انتشار کربن کم‌تری نسبت به روش‌های مبتنی بر سوخت فسیلی دارد و پتانسیل دست‌یابی به ردپای کربنی منفی را نیز داراست. فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل توانست با موفقیت یک نقطه کارکرد بهینه را شناسایی کند که در آن، راندمان انرژی و اگزرژی به ترتیب از ٪۳۷/۶۲و ٪۱۵/۲۸ به ٪۴۱/۶۲ و ٪۱۹/۱۷بهبود یافت و هم‌زمان، هزینه کل سیستم و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن نیز کاهش پیدا کرد.

علاوه براین، تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی، نشان داد که افزایش دمای گاز سنتز و کاهش رطوبت زیست‌توده منجر به افزایش چشم‌گیر بازده بدون تحمیل هزینه اضافی می‌شود؛ در حالی‌که افزایش فشار گاز سنتز به دلیل افزایش قابل توجه هزینه‌ها و آلایندگی در ازای بهبود جزئی بازده، نامطلوب است. در مجموع، نتایج این تحقیق کارایی سیستم پیشنهادی را تأیید کرده و یک چارچوب تحلیلی و بهینه‌سازی قدرتمند برای توسعه فناوری‌های تولید هیدروژن پایدار ارائه می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

فهرست علائم

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

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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

[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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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] Abdolalipouradl, 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).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]

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

Behzad Azizimher, Taher Armaghani*, Ramin Ghasemiasl, Abdolrazzagh 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 CO_2 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 anaylsis, Multiobjective optimization

*Corresponding author: taherarmaghani@iau.ac.ir

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.556]