



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2065516.2002



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Thermodynamic and Environmental Assessment of a Tri-Generation Power Plant Utilizing Municipal Solid Waste

Reza Bagheri¹, Parviz Darvishi^{2*}

¹ Process Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Chemical Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: 11 Jul 2025

Accepted: 17 Nov 2025

Abstract

In this study, a detailed thermodynamic and CO₂ emission analysis was carried out for an integrated biomass-fueled tri-generation system that simultaneously produces electricity, desalinated water, and cooling. The main novelty of the new proposed configuration lies in its combined use of urban solid waste as fuel to generate three useful energy outputs, improving overall efficiency and reducing CO₂ emissions compared with previous studies. According to the baseline simulation, the system can generate 4,994 kW of net electrical power, 1,034 kW of cooling, and 11,960 kg/h of desalinated water with a 33.28% recovery rate. The overall energy and electrical efficiencies are 73.82 and 39.92%, respectively, with a CO₂ footprint of only 0.2 kg CO₂/kWh. Parametric analyses indicate that optimizing the gas turbine inlet temperature and the Organic Rankine Cycle pressure further enhances performance. Overall, the system offers a sustainable and practical solution for coastal, island, and small industrial or residential applications.

Keyword: Biomass, Thermodynamic Efficiency, Absorption Refrigeration, Tri-Generation, Desalination

* pdarvishi@yu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Bagheri, R., Darvishi, P., "Thermodynamic and Environmental Assessment of a Tri-Generation Power Plant Utilizing Municipal Solid Waste", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 91, pp. 37-54, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2065516.2002



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

تحلیل ترمودینامیکی و زیست محیطی نیروگاه تولید سه منظوره با استفاده از زباله های جامد شهری

رضا باقری¹، پرویز درویشی^{2*}

¹ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی فرآیند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

² دانشیار مهندسی شیمی، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

دریافت: 1404/04/20 پذیرش: 1404/08/26

چکیده

در این مطالعه، تحلیل جامع ترمودینامیکی و انتشار دی اکسید کربن برای یک سامانه سه منظوره یکپارچه با سوخت زیست توده انجام شد. نوآوری اصلی پژوهش، ارائه یک پیکربندی جدید جهت یکپارچه سازی همزمان سه نوع خروجی انرژی با استفاده از زباله های جامد شهری به عنوان سوخت است که باعث افزایش بازده کلی و کاهش انتشار دی اکسید کربن نسبت به مطالعات پیشین می شود. بر اساس شبیه سازی حالت پایه، سیستم قادر است 4994 کیلووات توان الکتریکی خالص، 1034 کیلووات سرمایه گذاری معادل و 11960 kg/h آب شیرین با نرخ بازیافت 33/28 درصد تولید کند. بازده کلی انرژی و بازده الکتریکی به ترتیب 73/82 و 39/92 درصد و رد پای کربن معادل kg 0/2 CO₂/kWh است. تحلیل های پارامتری نشان می دهد افزایش دمای ورودی توربین گازی و فشار سیکل ارگانیک رانکین موجب بهبود عملکرد انرژی و کاهش انتشار می شود. نتایج، پتانسیل بالای این سامانه را به عنوان راهکاری پایدار برای مناطق ساحلی و جوامع کوچک تا متوسط تأیید می کند.

کلمات کلیدی: زیست توده، راندمان ترمودینامیکی، تبرید جذبی، تولید سه گانه، نمک زدایی

* pdarvishi@yu.ac.ir

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده نسبت به گرمایش جهانی، امنیت انرژی، و تخریب محیط‌زیست موجب افزایش چشمگیر گرایش جهانی به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر شده است [1, 2]. بحران جاری انرژی، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، و چالش‌های زیست‌محیطی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، جامعه بین‌المللی را بر آن داشته است تا تمرکز بیشتری بر توسعه‌ی سامانه‌های انرژی پایدار و تجدیدپذیر داشته باشد [3, 4]. مقیاس جهانی، یکی از اصلی‌ترین راهبردها برای پاسخ به رشد فزاینده‌ی تقاضای انرژی، شناسایی و بهره‌برداری از منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست است. به منظور دستیابی به این اهداف، پژوهشگران و سیاست‌گذاران حوزه انرژی مجموعه‌ای از فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر مانند سامانه‌های خورشیدی، زمین‌گرمایی، بادی و زیست‌توده‌ای را توسعه داده و بکار گرفته‌اند [5]. منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه به دلیل فراوانی، در دسترس بودن و هزینه‌های عملیاتی پایین از جذابیت بالایی برخوردارند [6]. در میان گزینه‌های مختلف انرژی تجدیدپذیر، زیست‌توده به دلیل دسترس‌پذیری گسترده، تجدیدپذیری بالا، و ویژگی بی‌طرفی کربنی جایگاه ویژه‌ای دارد و می‌تواند نقش قابل‌توجهی در تأمین انرژی آینده جهان ایفا کند [6]. برخلاف سوخت‌های فسیلی که برای بازتولید به دوره‌های زمین‌شناسی بسیار طولانی نیاز دارند، زیست‌توده را می‌توان در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تری جایگزین کرد. علاوه بر این، اگرچه احتراق زیست‌توده موجب انتشار دی‌اکسیدکربن در جو می‌شود، اما این CO₂ زیستی، از دیدگاه زیست‌محیطی، بی‌طرف کربنی محسوب می‌شود، زیرا در چرخه‌ی رشد گیاهان دوباره جذب می‌گردد و در نتیجه باعث افزایش خالص گرمایش جهانی نمی‌شود. این امر، زیست‌توده را به یک منبع سوخت مفید و یک انتخاب غالب برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی تبدیل می‌کند. در حال حاضر، سوخت زیست‌توده که از مواد آلی تجدیدپذیر به‌دست می‌آید، یکی از بزرگ‌ترین منابع بالقوه انرژی در جهان به‌شمار می‌رود و از نظر سهم جهانی در جایگاه سوم پس از زغال‌سنگ و نفت قرار دارد [7]. امروزه، مواد زیست‌توده پسماندهای کشاورزی مانند کاه، باگاس و پوسته و پسماندهای صنایع مرتبط با جنگل مانند تراشه‌های چوب، خاک اره و پوست درخت را شامل می‌شوند [7, 8].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه سیستم‌های ترکیبی تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرمایش (CCHP)¹ که از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه زیست‌توده استفاده می‌کنند، انجام شده است. عبدوس² و همکاران [9] عملکرد یک سیستم تولید ترکیبی مبتنی بر احتراق مستقیم زیست‌توده را مورد بررسی قرار دادند. این سیستم شامل سه بخش اصلی مشعل زیست‌توده، سیکل رانکین بخار و سیکل تبرید جذبی بود. نتایج تحلیل آنان نشان داد که ضریب عملکرد چیلر جذبی برابر با 45/34 درصد و بازده اکسرژی کل سیستم معادل 24/3 درصد است که بیانگر کارایی حرارتی قابل قبول سیستم در مقیاس عملیاتی می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر، سانچز³ و همکاران [10] با ترکیب انرژی‌های زیست‌توده و خورشیدی در یک سیستم CCHP، به بازده الکتریکی 18/2 درصد، بازده کلی 62 درصد، دوره بازگشت سرمایه 6/8 سال و هزینه تولید انرژی (LEC) معادل 0/287 \$/kwh دست یافتند. این نتایج نشان داد که ترکیب دو منبع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به بهبود شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم کمک کند. همچنین

¹ Combined cooling, heating, and power

² Abdoos

³ Sánchez

⁴ Levelized energy cost

الستار⁵ و همکاران [11] یک سیستم CCHP مبتنی بر احتراق مستقیم زیست توده را معرفی کردند که شامل مشعل زیست توده، سیکل ارگانیک رانکین (ORC)⁶، توربین گازی و سیکل تبرید جذبی بود. در این سامانه، راندمان الکتریکی 24/2 درصد، بازده کلی 43/5 درصد، و توان سرمایشی خروجی 38/5 کیلووات بدست آمد. ضریب عملکرد سیکل تبرید جذبی نیز 57 درصد گزارش شد که حاکی از امکان استفاده مؤثر از حرارت بازیافتی در فرآیند سرمایش است. وانگ⁷ و همکاران [12] نیز با بهره‌گیری هم‌زمان از انرژی زیست توده و خورشیدی در یک سیستم CCHP، بازده اکسرژی 16/1 درصدی گزارش کردند. این مقدار نسبت به سیستم‌های تک‌منبعی نشانگر بهبود بهره‌وری انرژی و پایداری عملکرد سیستم در شرایط تغییرپذیر محیطی است.

با مرور مطالعات اخیر، می‌توان گفت که اغلب پژوهش‌ها بر مدلسازی ترمودینامیکی سیستم‌های ترکیبی زیست توده-خورشیدی و ارزیابی عملکرد انرژی و اکسرژی متمرکز بوده‌اند، اما در بسیاری از آنها بهینه‌سازی هم‌زمان جنبه‌های حرارتی، اقتصادی و زیست محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی اصلی پژوهش حاضر در طراحی و تحلیل یک نیروگاه زیست تجدیدپذیر سه منظوره (برق، آب شیرین و سرمایش) نهفته است. در حالی که اغلب مطالعات پیشین بر سیستم‌های دومانظوره مانند برق-حرارت یا برق-آب متمرکز بوده‌اند، این تحقیق با ادغام هم‌زمان سه محصول انرژی در یک ساختار یکپارچه، مبتنی بر زیست توده، متمایز می‌باشد. در پیکربندی پیشنهادی، حرارت خروجی از توربین گازی برای تغذیه هم‌زمان سیکل ارگانیک رانکین و واحد نمک‌زدایی حرارتی مورد استفاده قرار گرفته و حرارت پایین درجه باقیمانده نیز به سیستم سرمایش جذبی منتقل می‌شود. این رویکرد بازیافت پلکانی انرژی ضمن افزایش بازده کل سامانه، موجب کاهش محسوس ردپای کربن در مقایسه با سیستم‌های هیبرید مرسوم شده است.

یکی دیگر از جنبه‌های متمایز این پژوهش، به‌کارگیری پسماند جامد شهری به‌عنوان سوخت پایه است، در حالی که اغلب مطالعات مشابه از زیست توده‌های کشاورزی مانند نیشکر یا چوب بهره گرفته‌اند. این انتخاب علاوه بر فراهمی آسان سوخت، به کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از دفن زباله‌های شهری کمک می‌کند و یک رویکرد بومی برای مدیریت انرژی و پسماند ارائه می‌دهد. در بخش تحلیل پارامتری نیز، تأثیر هم‌زمان دمای ورودی توربین گازی و فشار تبخیر در سیکل بر بازده و شدت انتشار دی‌اکسید کربن بررسی شده است. این تحلیل دوپارامتری، که در تحقیقات پیشین کمتر گزارش شده، به درک عمیق‌تری از روابط عملکردی و بهینه‌سازی انرژی در سامانه‌های ترکیبی منجر می‌شود. سیستم پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده که با شرایط مناطق ساحلی و جزیره‌ای سازگار بوده و به عنوان یک راهکار پایدار، بومی و کارآمد برای تولید انرژی، آب و سرمایش مطرح است.

در مجموع، نوآوری‌های پژوهش حاضر در سه بعد فنی (پیکربندی جدید و تحلیل حرارتی دقیق)، زیست محیطی (کاهش انتشار و استفاده از سوخت پسماند) و کاربردی (قابلیت استفاده در جزایر و مناطق ساحلی) قابل تمایز از مطالعات اخیر است.

2- شرح فرآیند

در شکل 1، پیکربندی فرآیند پیشنهادی نشان داده شده است. سیستم دارای بخش‌های زیر است که به صورت یکپارچه به یکدیگر متصل شده‌اند:

⁵ El-Sattar

⁶ Organic Rankine cycle

⁷ Wang

- سیکل توربین گازی
- سیکل ارگانیک رانکین با سیال عامل اکتان نرمال
- سیکل تبرید جذبی آب-آمونیاک [13] که از حرارت بیهوده سیکل ارگانیک رانکین تغذیه شده است.
- سیستم نمک‌زدایی حرارتی [14] دواثره که از گرمای بیهوده سیکل تبرید جذبی و گاز دودکش تغذیه می‌شود.

سوخت زیست‌توده (MSW)⁸ [15] مستقیماً وارد مشعل می‌شود، جایی که هوای مورد نیاز برای احتراق نیز از توربین گازی به صورت منبسط شده وارد می‌گردد (جریان 6). احتراق مستقیم زیست‌توده در مشعل طبق واکنش زیر صورت می‌پذیرد [16]:



هوا ابتدا توسط کمپرسور متراکم شده و دمای آن با عبور از هیتر هوا افزایش می‌یابد (جریان 5). این افزایش دما به وسیله انتقال حرارت با گاز داغ خروجی از مشعل (جریان 3) انجام می‌شود. گاز داغ در بخارساز با سیال عامل اکتان [17] تبادل حرارت نموده و در حالت بخار فوق اشباع بخارساز خارج می‌گردد (جریان 10). با انبساط اکتان در توربین برق تولید می‌شود. همچنین، حرارت بیهوده اکتان در مبدل‌های حرارتی رکوپراتور و بخارساز 2 بازیابی می‌شود. استفاده از رکوپراتور باعث بهینه‌سازی سیکل ارگانیک رانکین می‌شود. علاوه بر این، رکوپراتور و بخارساز 2 به نوعی عملیات چگالش را برای اکتان پیش از ورود به پمپ ایفا می‌کنند. اکتان در پمپ به فشار بالاتری رسیده و دمای آن با عبور از رکوپراتور [18] افزایش می‌یابد (جریان 14). سیال عامل سیکل تبرید جذبی (جریان‌های 21-37) در فشار بالا با عبور از بخارساز 2 افزایش یافته و فازهای مایع و بخار توسط D-101 تفکیک می‌شوند. فاز بخار (جریان 23) بالغ بر 97 درصد مولی آمونیاک دارد، که با عبور از کندانسور (جریان 25) در فاز مایع اشباع وارد شیر کاهنده فشار Valve-1 می‌گردد، جایی که فشار تا 360 کیلوپاسکال افت دارد. افت فشار باعث کاهش دمای سیال می‌شود (جریان 26) و از دمای پایین آن در تبخیرکننده برای تولید محصول آب سرد (جریان 29) با دمای 5 درجه سانتیگراد استفاده می‌گردد. از طرف دیگر، مایع گرفته شده از D-101 (جریان 24) جهت انتگراسیون حرارتی از مبدل گرمایی تبخیرکننده کم فشار عبور کرده و دمای جریان آب شور را که در فشار پایینی قرار دارد، افزایش می‌دهد. این امر باعث تبخیر آب و افزایش تولید محصول آب شیرین در مرحله دوم می‌گردد.

پس از انتقال حرارت، سیال عامل سیکل تبرید با عبور از Valve-2 دچار کاهش فشار شده و در میکسر با مبرد خروجی از تبخیرکننده ترکیب می‌شود. این جریان ترکیبی در جاذب، تحت شرایط ایزوباریک، به طور کامل به فاز مایع تبدیل می‌گردد. سیال عامل (جریان 36) که در خروجی جاذب دارای فشاری کمتر از فشار موجود در بخارساز 2 است، توسط پمپ به فشار بالاتر رسانده شده و سپس مجدداً به بخارساز 2 بازگردانده می‌شود. سیکل نمک‌زدایی آب دریا دارای دو مرحله⁹ است:

- در مرحله نخست، آب دریا پس از عبور از مبدل حرارتی هیتر آب شور، از طریق انتقال حرارت با گاز دودکش (جریان 8) گرم می‌شود. سپس با عبور از شیر کنترلی Valve-3 و به دنبال افت فشار تا حدود 9 کیلوپاسکال،

⁸ Municipal solid waste

⁹ Effect

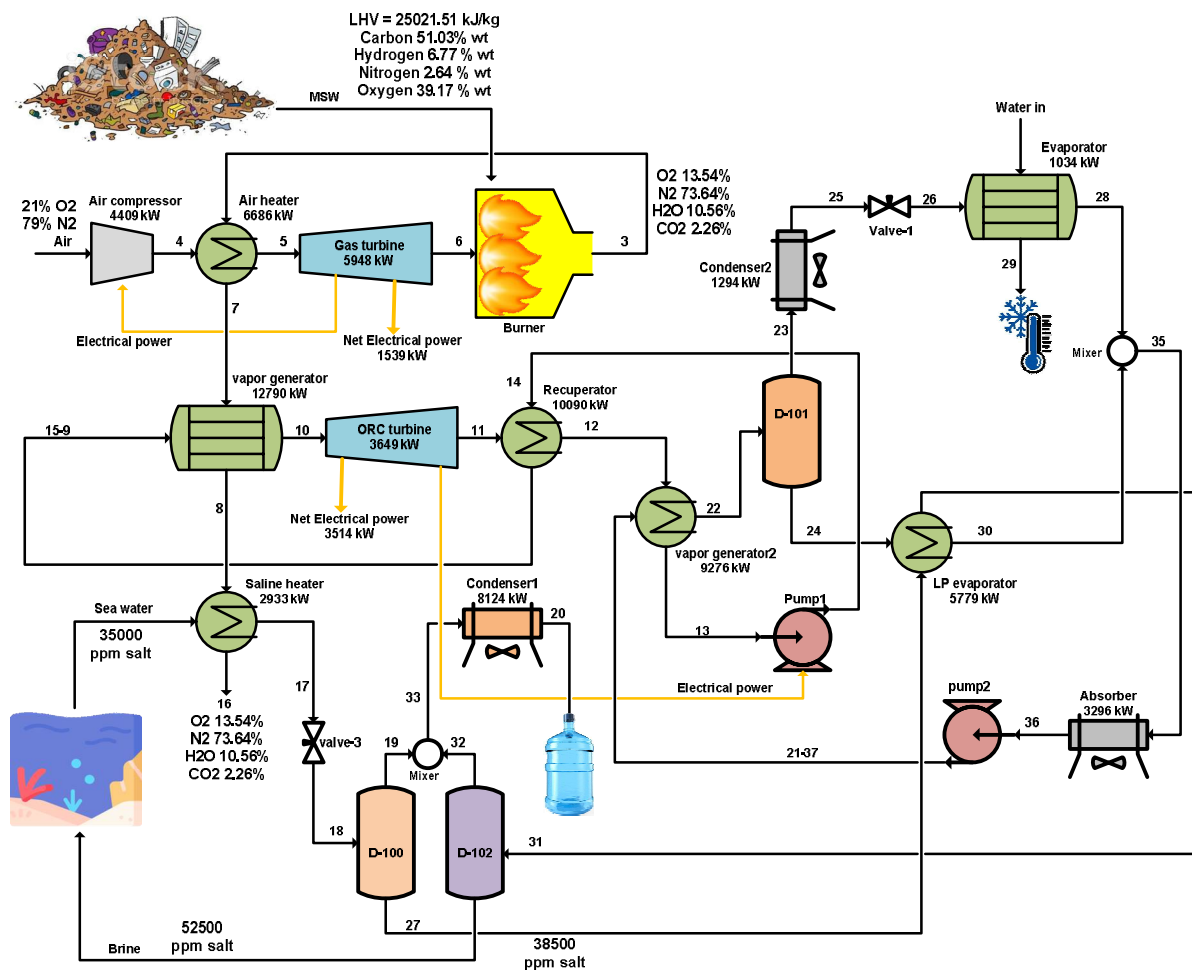
فرآیند فلش تبخیری انجام گرفته و بخار حاصل توسط تفکیک کننده D-100 جدا شده و از طریق جریان 19 به میکسر ارسال می گردد.

در مرحله دوم، جریان آب شور خروجی از بخش پایینی تفکیک کننده D-100 به منظور افزایش میزان تبخیر و ارتقای بازیابی آب شیرین، وارد تبخیر کننده کم فشار می شود. در این واحد، بخش دیگری از آب شور تبخیر شده و فاز بخار حاصل توسط تفکیک کننده D-102 جدا می گردد (جریان 32). بخار تولیدی در این مرحله با بخار خروجی از بالای D-100 ترکیب شده و در نهایت از طریق کندانسور شماره 2 تقطیر می شود. محصول مایع حاصل به عنوان آب شیرین تولیدی از طریق جریان 20 از سیستم خارج می گردد.

3- شبیه سازی سیستم

برای شبیه سازی فرآیند پیشنهادی در این مطالعه از فرضیات و جزئیات شبیه سازی زیر استفاده شده است:

- تبدیل زیست توده در مشعل به صورت کامل (100 درصد) انجام می گیرد [7].
- سیستم در حالت پایا بوده و حجم کنترل به عنوان مرز تحلیل انتخاب شده است [8].
- بازده بی دررو پمپ و کمپرسور به ترتیب 75 و 85 درصد در نظر گرفته شده است.
- بازده بی دررو توربین برابر با 85 درصد فرض شده است.
- اتلاف حرارت و افت فشار در تجهیزات مورد استفاده در این سامانه ناچیز در نظر گرفته شده است.
- جریان های مایع و بخار خروجی از جداکننده ها در حالت اشباع فرض شده و از افت فشار در خطوط ارتباطی صرف نظر شده است.
- شوری آب دریا برابر با 35000 ppmw در نظر گرفته شده است [9].
- فرآیند در حالت پایا با استفاده از نرم افزار Aspen HYSYS v12.1 شبیه سازی شده است. شرایط مرزی شامل فشار و دمای ورودی جریان های اصلی، بر اساس داده های عملیاتی و مراجع مشابه تعیین گردید. ضرایب انتقال حرارت مبدل ها توسط مدل داخلی HYSYS بر پایه روابط تجربی Kern method محاسبه و سپس با مقادیر تجربی تطبیق داده شد. برای حصول پایداری و همگرایی مدل، الگوریتم Successive Substitution به همراه تنظیمات دقیق تکرارها (حداکثر 50 iteration و دقت همگرایی 10^{-4}) مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، صحت عملکرد شبیه سازی با بررسی موازنه جرم و انرژی و مقایسه با داده های مطالعات مشابه اعتبار سنجی شده است.
- شبیه سازی فرآیند در حالت پایا با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون در نرم افزار اسپن هایسیس انجام شده است. بسته ویژگی ترمودینامیکی پنگ-رابینسون، مطابق با معادله 2، قادر است سیستم های تک مرحله ای، دو مرحله ای و سه مرحله ای را با دقت و قابلیت اطمینان بالا حل کند و در محدوده وسیعی از شرایط عملیاتی قابل استفاده است. انتخاب معادله ترمودینامیکی مناسب به شرایط فرآیندی، ماهیت اجزاء تشکیل دهنده و نوع زیرسیستم ها بستگی دارد:



شکل 1- نمودار جریان فرآیند برای نیروگاه سوخت زیست توده با تولید همزمان برق، توان سرمایشی و آب شیرین

$$P = \frac{RT}{v_{mix} - b} - \frac{a}{v_{mix}(v_{mix} + b) + b(v_{mix} - b)} \quad (2)$$

جایی که P نشان دهنده فشار، T دما، R ثابت گازها، p_c فشار بحرانی، T_c دمای بحرانی، α ضریب تصحیح معادله وابسته به دما، v_{mix} حجم مولی مخلوط و a و b ثابت‌های معادله هستند. شرایط عملیاتی حاکم بر جریان‌های فرآیند، که از خروجی‌های شبیه‌سازی هستند، در جدول 1 لیست شده‌اند:

جدول 1- شرایط عملیاتی حاصل از نتایج شبیه‌سازی برای جریان‌های فرآیندی مختلف

جریان‌ها	دما (°C)	فشار (kPa)	دبی ($\frac{\text{kmole}}{\text{h}}$)
MWS	25	101/3	140/3
هوا	25	101/3	1734
3	1338	101/3	1861
4	329/1	960	1734
5	760	960	1734
6	378/1	105	1734
7	981/5	101/3	1861
8	244/7	101/3	1861
9	234/7	3500	623/1
10	400	3500	623/1
11	316/6	20	623/1
12	110	20	623/1
13	50	20	623/1
14	51/4	3500	623/1
16	60	101/3	1861
آب دریا	25	101/3	1947
17	96	101/3	1947
18	43/66	9	1947
19	43/66	9	181
20	30	9	664/1
21	35/86	140	6898
22	90	1400	6898
23	90	1400	205
24	90	140	6693
25	37	1400	205
26	-3/629	360	205
27	43/66	9	1766
28	15	360	205
آب ورودی	25	101/3	2551
29	5	101/3	2551
30	50	1400	6693
31	43/74	9	1766
32	43/74	9	483
آب شور	43/74	9	1283
33	43/82	9	664/1
36	35/69	360	6898

2-3- اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی

به دلیل نوآوری و منحصر بفرد بودن فرآیند پیشنهادی، تاکنون هیچ سامانه مشابهی در مطالعات پیشین گزارش نشده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، در جداول 2 تا 4 مقایسه عملکرد زیرسیستم‌ها ارائه شده است. در این اعتبارسنجی، برای سیستم ارگانیک رانکین، سیستم توربین گازی و واحد نمک‌زدایی آب دریا از داده‌ها و یافته‌های منتشر شده توسط سایر پژوهشگران استفاده گردیده است. داده‌های استخراج شده از منابع معتبر، به‌عنوان ورودی مدل در نرم‌افزار اسپن هایسیس به کار رفته و شبیه‌سازی در شرایط مشابه انجام شده است.

خروجی هر زیرسیستم در این پژوهش با مقادیر گزارش شده در مطالعات مرجع مقایسه شده و میزان انحراف نسبی برای هر مورد محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار انحراف بسیار کم بوده و این امر بیانگر کارایی مناسب معادله حالت انتخاب شده در شبیه‌سازی بخش‌هایی نظیر واحد نمک‌زدایی، سیکل ارگانیک رانکین (با انبساط اکتان در شرایط بحرانی در توربین) و فرآیند آب‌شیرین‌کن است. بر این اساس، استفاده از این معادله حالت برای شبیه‌سازی فرآیندهای مشابه نیز توصیه می‌شود.

جدول 2- مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیکل ارگانیک رانکین

پارامترها	[10]	شبیه‌سازی
سیال عامل در سیکل	R-123	R-123
بازده انرژی (درصد)	13/5	13/77
توان الکتریکی خالص سیکل (کیلووات)	534	538

جدول 3- مقایسه نتایج شبیه‌سازی فرآیند نمک‌زدایی آب دریا

پارامترها	[11]	شبیه‌سازی
دبی آب شیرین (کیلوگرم بر ثانیه)	17/36	18
دبی آب دریا (کیلوگرم بر ثانیه)	51/31	51/31
دمای محصول آب شیرین (سانتیگراد)	52/17	53/1
تعداد تاثیرات	4	4
دمای منبع حرارتی (سانتیگراد)	213/59	213

جدول 4- مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیکل توربین گازی

پارامترها	[12]	شبیه‌سازی
دمای محفظه احتراق اول (سانتیگراد)	549/85	566
دمای محفظه احتراق دوم (سانتیگراد)	826/85	841
توان الکتریکی توربین فشار بالا (کیلوپاسکال)	9230	9299
توان الکتریکی توربین فشار پایین (کیلوپاسکال)	19770	19898

3-1- آنالیز ترمودینامیکی فرآیند

عملکرد هر سیستم تولید برق را می‌توان با تجزیه و تحلیل انرژی ارزیابی کرد. در این تحلیل، با استفاده از معادلات حاکم مناسب، میزان تولید برق و بازده انرژی بدست می‌آید. همچنین، جهت تحلیل بازده قانون اول بر روی برای فرآیند پیشنهادی شکل 1، از معادلات اساسی زیر در حالت حجم کنترل استفاده شده است [7, 1]:

$$\sum \dot{m}_{inlet} - \sum \dot{m}_{outlet} = 0 \quad (3)$$

$$\dot{W} - \dot{Q} = \sum (\dot{m}h)_{inlet} - \sum (\dot{m}h)_{outlet} \quad (4)$$

جایی که \dot{m} دبی جرمی، h آنتالپی ویژه جریان، \dot{W} کار محوری و \dot{Q} نرخ انتقال حرارت هستند. معادله کلی بازده قانون اول ترمودینامیک (η_I) برای فرآیند تولید انرژی به صورت زیر تعریف شده است [13]:

$$\eta_I = \frac{\sum \text{energy out}}{\sum \text{energy in}} \quad (5)$$

با توجه به رابطه 5، معادلات کارایی انرژی و کارایی الکتریکی ($\eta_{I,el}$) برای فرآیند جدید عبارتند از:

$$\eta_I = 100 \times \frac{\dot{Q}_{evap} + \dot{W}_{net} + \dot{Q}_{water}}{\dot{m}_{MSW} LHV_{MSW}} \quad (6)$$

$$\eta_{I,el} = 100 \times \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{MSW} LHV_{MSW}} \quad (7)$$

در اینجا، \dot{W}_{net} توان الکتریکی خالص سیستم، \dot{m}_{MSW} دبی جرمی سوخت زیست توده، \dot{Q}_{evap} انتقال حرارت در تبخیر کننده سیکل تبرید، LHV_{MSW} ارزش حرارتی زیست توده و \dot{Q}_{water} انرژی ناشی از تولید آب شیرین هستند. برای محاسبه \dot{W}_{net} و \dot{Q}_{water} از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{gas\ turbine} + \dot{W}_{ORC\ turbine} - \dot{W}_{pump1} - \dot{W}_{pump2} - \dot{W}_{air\ compressor} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{water} = \dot{m}_{water} \times h_{fg}^{water} \quad (9)$$

در رابطه 9، h_{fg}^{water} اشاره به آنتالپی تبخیر آب در دمای کندانسور دارد [14]. مقدار \dot{Q}_{evap} از طریق شبیه سازی محاسبه و در شکل 1 ارائه شده است. ارزش حرارتی زیست توده نیز معادل با 25021/51 kJ/kg است.

3-2- آنالیز زیست محیطی فرآیند

هدف از آنالیز زیست محیطی، تعیین پارامتر اساسی رد پای دی اکسید کربن [15] برای سیستم پیشنهادی است. معادله 10 برای تخمین رد پای دی اکسید کربن (ϵ_{CO_2})⁰ در نظر گرفته شده است:

$$\epsilon_{CO_2} \left(\frac{kg_{CO_2}}{kWh} \right) = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\sum \text{energy out}} \quad (10)$$

که در این معادله، \dot{m}_{CO_2} نشان دهنده کل انتشار دی اکسید کربن از فرآیند است. مطابق شکل 1، کل دی اکسید کربن حاصل از احتراق زیست توده در مشعل، از طریق جریان گاز دودکش خروجی از مبدل حرارتی هیتر آب شور به اتمسفر تخلیه می شود. بر اساس نتایج شبیه سازی انجام شده، مقدار این جریان برابر با 1852 kg/h است.

4- نتایج و بحث

4-1- نتایج شبیه سازی فرآیند پیشنهادی

در جدول 5، نتایج تحلیل های ترمودینامیکی و زیست محیطی برای فرآیند پیشنهادی ارائه شده است. بر اساس شبیه سازی حالت پایه، سیستم پیشنهادی با مصرف 12510 کیلووات انرژی زیست توده قادر به تولید 4994 کیلووات توان الکتریکی خالص، 1034 کیلووات توان سرمایی معادل با 45960 kg/h آب سرد 5 درجه سانتیگراد و 11960 kg/h آب شیرین با میزان ریکاوری 33/28 درصد است. این در حالی است که کارایی قانون اول و بازده

¹ Carbon dioxide footprint

الکتریکی فرآیند به ترتیب 73/82 درصد و 39/92 درصد بدست آمده و سیستم تبرید که با سیکل ارگانیک رانکین ادغام حرارتی شده است، دارای ضریب عملکرد (COP)¹ معادل با 11/08 درصد می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که فرآیند پیشنهادی در مقایسه با مطالعات مشابه از کارایی قانون اول بالاتری برخوردار است.

جدول 5- خروجی‌های کلیدی ترمودینامیکی و زیست محیطی برای فرآیند پیشنهادی

پارامتر	مقدار
انرژی سوخت زیست‌توده (کیلووات)	12510
توان الکتریکی خالص سیستم (کیلووات)	4994
توان سرمای خروجی فرآیند (کیلووات)	1034
انرژی ناشی از تولید آب شیرین (کیلووات)	3208
میزان بازیابی آب شیرین $(\frac{m_{20}}{m_{sea\ water}})$	33/28 درصد
ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی $(\frac{Q_{evap}}{Q_{vapor\ generator} + W_{pump2}})$	11/08 درصد
بازده کلی انرژی	73/82 درصد
بازده الکتریکی	39/92 درصد
ردپای دی‌اکسید کربن $(\frac{kgCO_2}{kWh})$	0/2

در مطالعه منتشر شده توسط لیو² و همکاران [16]، که در آن از زیست‌توده به‌عنوان سوخت در فرآیند احتراق مستقیم استفاده شده و محصولات شامل برق، گرمایش و سرمایش هستند، بازده انرژی برابر با 58/4 درصد گزارش شده است. همچنین، تیان³ و همکاران [17] سامانه‌ای برای تولید هم‌زمان برق، گرمایش و سرمایش با استفاده از بیوگاز به‌عنوان سوخت ارائه کردند که بازده قانون اول ترمودینامیک برای این فرآیند یکپارچه 61 درصد بدست آمد. در مطالعه دیگری توسط نوتاکی⁴ و همکاران [18]، از سوخت زیست‌توده در یک فرآیند احتراق مستقیم برای تولید برق، گرمایش، سرمایش و آب شیرین استفاده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که بازده انرژی کل فرآیند برابر با 54/26 درصد می‌باشد.

مقایسه نتایج این مطالعات با فرآیند پیشنهادی در شکل 1 نشان می‌دهد که فرآیند جدید از کارایی انرژی بالاتری برخوردار بوده و از ادغام حرارتی مؤثری بهره می‌برد. به‌کارگیری مکانیزم‌های چندگانه بازیابی حرارت و حداکثر استفاده از انرژی حرارتی خروجی توربین گازی موجب شده است تا فرآیند کنونی بیشترین بازده انرژی را در میان پژوهش‌های مشابه به خود اختصاص دهد.

ارزیابی زیست محیطی نشان می‌دهد که ردپای دی‌اکسیدکربن در این سیستم جدید و یکپارچه معادل $0/2 \frac{kgCO_2}{kWh}$ می‌باشد. این مقدار در مقایسه با مطالعات قبلی دارای کاهش محسوسی است و از این حیث نیز سیستم دارای نوآوری و برتری است. به‌عنوان مثال، در کار ارائه شده توسط نوتاکی و همکاران [18] با سوخت زیست‌توده، ردپای دی-اکسیدکربن معادل با $0/6544 \frac{kgCO_2}{kWh}$ بدست آمد. در مطالعه منتشر شده توسط احمدی و همکاران [19] از احتراق

¹ Coefficient of performance 1
¹ Liu 2
¹ Tian 3
¹ Nutakki 4

مستقیم زیست توده در سیستم تولید ترکیبی برق، گرمایش، سرمایش و هیدروژن تجدیدپذیر از طریق الکترولایزر غشائی تبادل یونی¹⁵ (PEME) استفاده نمودند که ردپای دی اکسید کربن برای سیستم مورد بررسی معادل $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$ 0/5188 گزارش شد. مقایسه این مقادیر نشان می دهد که سیستم پیشنهادی در کار تحقیقی حاضر با انتشار کمتری از دی اکسید کربن محصولات را تولید می نماید. همچنین، کارایی قانون اول و مقدار ردپای دی اکسید کربن برای سیستم پیشنهادی یک ارتباط عمیق را بین ادغام حرارتی در سیستم های انرژی و محیط زیست نشان می دهد. در نتیجه، با وجود آنکه فرآیند دارای کارایی انرژی بالاتری است، آلاینده گی آن نیز کاهش یافته و تأثیرات بد ناشی از احتراق سوخت در محیط زیست کمتر خواهد شد.

4-2- آنالیز حساسیت فرآیند پیشنهادی

در این بخش، تحلیل و ارزیابی پارامتری فرآیند پیشنهادی انجام گرفته است. سه پارامتر انتخاب شده (دمای خروجی رکوپراتور، دمای ورودی هوا به توربین گازی، و فشار ورودی توربین از دیدگاه ترمودینامیکی بیشترین تأثیر را بر موازنه انرژی کل فرآیند دارند، زیرا مستقیماً نرخ انتقال حرارت، اختلاف آنتالپی در انبساط توربین ها و در نتیجه توان خالص تولیدی را تعیین می کنند [1]. علاوه بر این، هدف مطالعه حاضر تمرکز بر پارامترهای با بیشترین تأثیر ترمودینامیکی و عملیاتی بوده است تا مهم ترین عوامل مؤثر بر بازده انرژی و ردپای کربن سیستم مشخص شوند.

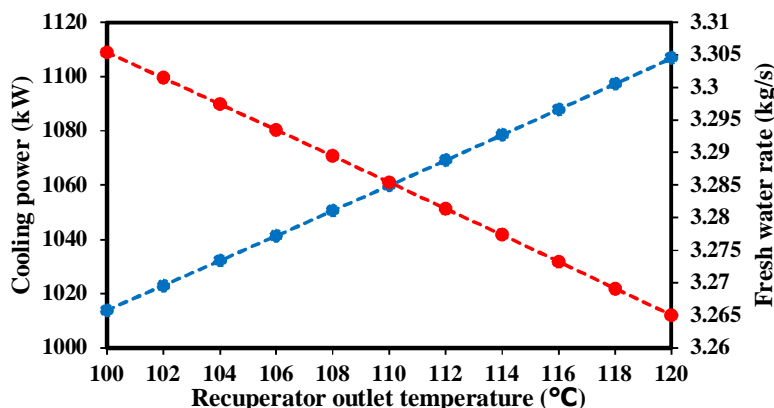
از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک، تغییر در پارامترهایی مانند دمای سیال عامل و فشار ورودی توربین، مستقیماً بر اختلاف آنتالپی بین ورودی و خروجی تجهیزات اصلی (به ویژه توربین ها، مبدل ها و چیلر جذبی) اثر گذاشته و بنابراین بر موازنه انرژی کلی سیستم تأثیرگذار است. افزایش اختلاف آنتالپی منجر به افزایش کار خروجی توربین و بهبود بازده انرژی می شود.

از سوی دیگر، قانون دوم ترمودینامیک مبنای تحلیل کیفی فرآیند و تعیین جهت انتقال انرژی در اجزای ادغام شده است. افزایش دمای ورودی به توربین یا رکوپراتور باعث افزایش توان در دسترس برای انجام کار مفید و کاهش اتلاف انرژی در سطوح پایین تر ادغام حرارتی می شود. بنابراین، تغییرات اعمال شده در سه پارامتر انتخابی مستقیماً با بهبود کارایی انرژی و کاهش اتلاف انرژی در ارتباط هستند. همچنین، در معادله انرژی توربین ها و معادله تعادل انرژی چیلر جذبی، تغییرات دما و فشار ورودی مستقیماً منجر به تغییر در نرخ انتقال حرارت، بازده حرارتی و ضریب عملکرد سیستم می گردند. این روابط پایه، دلیل انتخاب پارامترهای ذکر شده برای تحلیل حساسیت و تمرکز بر رفتار ترمودینامیکی کل فرآیند هستند [2, 20].

نخستین پارامتر مورد بررسی، دمای سیال عامل (اکتان) خروجی از رکوپراتور در سیکل ارگانیک رانکین است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل 2، افزایش این دما منجر به افزایش توان سرمایی تولیدی در سیکل تبرید و در مقابل، کاهش نرخ تولید آب شیرین می شود. افزایش توان سرمایی در سیکل تبرید به این دلیل رخ می دهد که با افزایش دمای اکتان خروجی از رکوپراتور، نرخ انتقال حرارت در بخارساز دوم سیکل تبرید بیشتر شده و در نتیجه، بخش بزرگ تری از سیال آب-آمونیاک تبخیر می گردد. این افزایش نرخ تبخیر باعث می شود تا مقدار سیال در گردش در تبخیرکننده بیشتر شده و توان سرمایی خروجی سیستم افزایش یابد. در مقابل، کاهش تولید آب شیرین ناشی از کاهش نرخ انتقال حرارت در هیتر آب شور است. به این صورت که با افزایش دمای اکتان خروجی از رکوپراتور، دمای

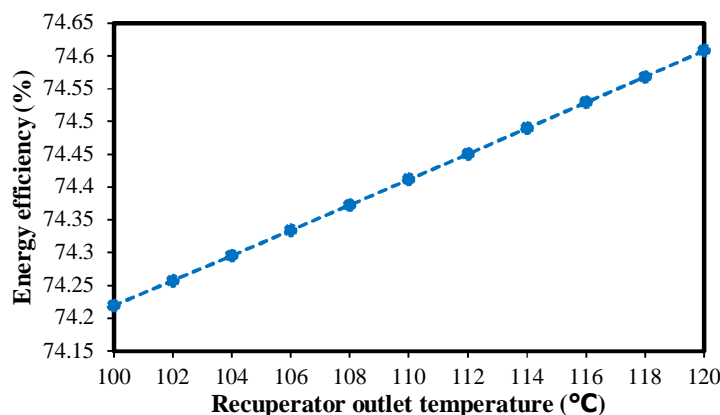
¹ Proton exchange membrane electrolyser

اكتان ورودی به بخارساز سیکل ارگانیک رانکین کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، گاز دودکش پس از تبادل حرارت، با دمای پایین‌تری به هیتر آب شور وارد می‌شود. این افت دما سبب می‌گردد بخش کمتری از آب دریا در مرحله نخست نمک‌زدایی تبخیر شده و به تبع آن، میزان تولید آب شیرین کاهش یابد.



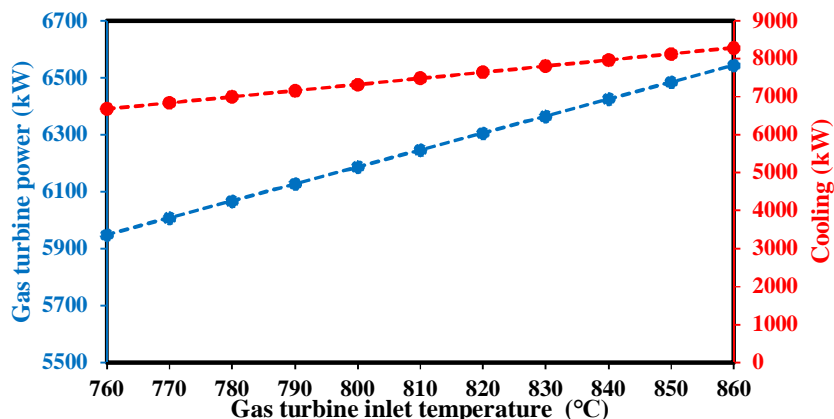
شکل 2- تغییرات تولید توان سرمایی و تولید آب شیرین بر حسب تغییرات دمای اکتان خروجی از رکوپراتور

مطابق نتایج نشان داده شده در شکل 3، افزایش دمای اکتان در خروجی رکوپراتور منجر به افزایش نسبتاً محدود در کارایی کلی انرژی سیستم می‌شود. در این شرایط، تولید برق سیستم ثابت باقی می‌ماند، اما افزایش توان سرمایی حاصل از چیلر جذبی موجب بهبود بازده انرژی کل سامانه می‌گردد. در واقع، با افزایش دمای اکتان خروجی، میزان انرژی مفید تولیدی در قالب توان سرمایی رشد یافته و در نتیجه نسبت مجموع انرژی خروجی مفید به انرژی ورودی افزایش می‌یابد.



شکل 3- تغییرات بازده کلی انرژی سیستم بر حسب تغییرات دمای اکتان خروجی از رکوپراتور

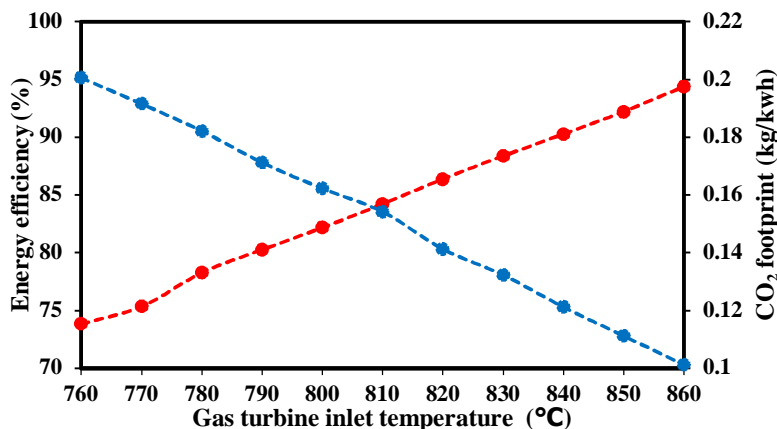
دومین پارامتر مورد بررسی، دمای هوای ورودی به توربین گازی است. همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، با افزایش دمای هوا، تولید برق در توربین گازی و همچنین توان سرمایی حاصل از سیکل تبرید جذبی افزایش می‌یابد. علت افزایش توان الکتریکی توربین گازی آن است که با بالا رفتن دمای هوای ورودی، انرژی ویژه گازهای عامل افزایش یافته و در نتیجه، فرایند انبساط در توربین با تولید کار مکانیکی بیشتری همراه می‌شود. به بیان دیگر، از آنجا که تولید توان در توربین گازی تابعی از اختلاف فشار، دما و دبی جرمی سیال کاری است، افزایش دمای ورودی موجب افزایش انرژی حرارتی گاز و در نهایت ارتقای توان خروجی توربین می‌گردد.



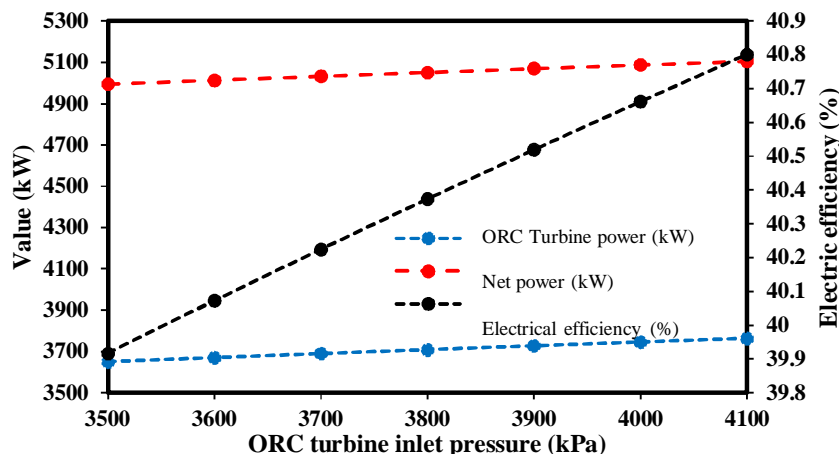
شکل 4- تغییرات تولید توان الکتریکی خالص و توان سرمایی بر حسب تغییرات دمای هوا به توربین گازی

در ارتباط با افزایش تولید توان سرمایی می‌توان بیان کرد که با افزایش دمای هوای ورودی به سیکل توربین گازی، دمای گاز خروجی از مشعل زیست‌توده نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، گاز داغ پس از تبادل حرارت در هیتر هوا، با دمای بالاتری وارد بخارساز سیکل رانکین ارگانیک می‌شود و در نتیجه انرژی حرارتی بیشتری به این سیکل منتقل می‌گردد. از آنجا که سیکل رانکین به صورت آبشاری با چیلر جذبی در ادغام حرارتی قرار دارد، افزایش انرژی ورودی به سیکل رانکین منجر به انتقال حرارت بیشتر به سیکل تبرید می‌شود. مطابق قانون اول ترمودینامیک، ورود انرژی بیشتر به سیستم، با افزایش توان سرمایی خروجی همراه خواهد بود.

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل 5، افزایش دمای هوای ورودی به توربین گازی موجب افزایش بازده انرژی کلی سیستم و در عین حال کاهش ردپای دی‌اکسیدکربن می‌گردد. افزایش بازده انرژی ارتباط مستقیمی با نرخ تولید محصولات سیستم دارد؛ به طوری که افزایش هم‌زمان تولید برق و توان سرمایی باعث رشد محسوس بازده انرژی می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای هوای ورودی به توربین گازی یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود کارایی فرآیند پیشنهادی است. از سوی دیگر، با توجه به ثابت بودن میزان کل انتشار دی‌اکسیدکربن و افزایش نرخ تولید انرژی، طبق رابطه 10، شدت انتشار کاهش می‌یابد. بنابراین، در سیستم پیشنهادی، افزایش کارایی انرژی به طور هم‌زمان با کاهش شدت انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است.



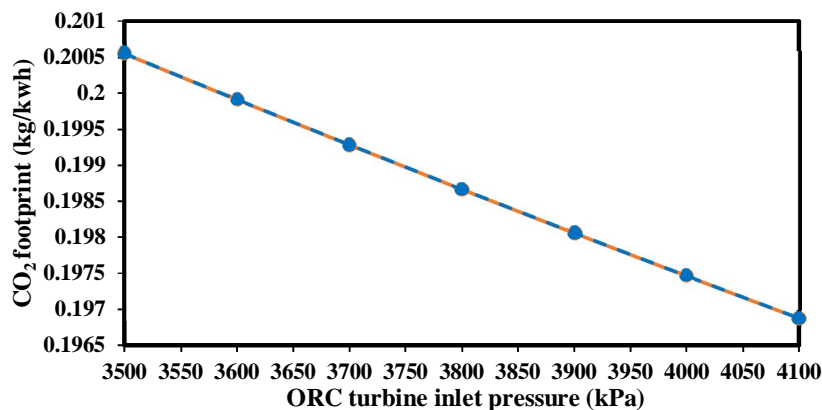
شکل 5- تغییرات ردپای دی‌اکسیدکربن و راندمان انرژی سیستم بر حسب تغییرات دمای هوا به توربین گازی



شکل 6- تغییرات تولید برق از توربین سیکل ارگانیک رانکین، توان الکتریکی خالص کلی و راندمان انرژی سیستم بر حسب تغییرات فشار توربین سیکل ارگانیک رانکین

سومین پارامتر مورد بررسی، فشار ورودی توربین در سیکل رانکین ارگانیک است. همان گونه که در شکل 6 نشان داده شده است، افزایش فشار ورودی توربین موجب افزایش توان تولیدی توربین، افزایش توان خالص الکتریکی کل سیستم و در نتیجه افزایش راندمان الکتریکی ($\eta_{I,el}$) شده است. افزایش توان تولیدی از توربین مستقیماً به اختلاف فشار در دو سر توربین وابسته است، زیرا دمای کاری ثابت فرض شده است. بدین ترتیب، با افزایش اختلاف فشار، کار خروجی توربین نیز افزایش می یابد. از آنجا که تولید توان در توربین گازی ثابت در نظر گرفته شده است، پارامتر \dot{W}_{net} تنها تابعی از توان الکتریکی تولیدی در توربین سیکل ارگانیک رانکین است. بنابراین، با افزایش توان تولیدی از سیکل ارگانیک رانکین، مقدار \dot{W}_{net} نیز افزایش می یابد.

افزایش کارایی الکتریکی فرآیند براساس رابطه 7 به تولید \dot{W}_{net} بستگی دارد. توجه شود که پارامترهای بررسی شده در حالی هستند که دبی سوخت ورودی به سیستم ثابت است و همه تغییرات برای بهبود انتگراسیون حرارتی هستند.



شکل 7- تغییرات ردپای دی اکسید کربن بر حسب تغییرات فشار توربین سیکل ارگانیک رانکین

در حالی که نرخ سوخت ورودی ثابت در نظر گرفته شده است، هرگونه افزایش در تولید سیستم با بهبود بازده انرژی و کاهش ردپای کربنی همراه خواهد بود؛ این روند در شکل 7 نیز به وضوح مشاهده می شود. بر اساس ارزیابی های

انجام شده، افزایش فشار توربین در سیکل رانیکن ارگانیک موجب افزایش تولید توان الکتریکی کل سیستم می‌گردد که در نتیجه، نرخ تولید محصولات در تمامی زیرفرآیندها افزایش می‌یابد. از آنجا که دبی زیست توده ورودی ثابت است، مقدار کل انتشار دی‌اکسید کربن بدون تغییر باقی می‌ماند؛ اما با توجه به افزایش تولید، شدت انتشار یا همان ردپای دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. در نهایت، باید اشاره کرد که شدت تأثیرگذاری پارامترهای عملیاتی بر بازده انرژی و ردپای کربنی سیستم به‌طور مستقیم به تأثیر آن‌ها بر نرخ تولید محصولات وابسته است. به بیان دیگر، هر پارامتری که تغییر آن بتواند موجب افزایش تولید گردد، بیشترین اثر را در بهبود بازده کل خواهد داشت. این اثرگذاری به‌ویژه در مورد دمای هوای ورودی به توربین گازی مشهود بوده است.

از آنجا که سوخت سیستم پیشنهادی از زیست توده حاصل از پسماند جامد شهری تأمین می‌شود، امکان استقرار این نیروگاه در اغلب مناطق دارای دسترسی به آب دریا، از جمله نواحی ساحلی و جزایر، وجود دارد. افزون بر این، فناوری‌های به‌کاررفته در سامانه (نظیر توربین گازی، سیکل ارگانیک رانیکن و واحد آب‌شیرین‌سازی حرارتی) از نوع تجاری و اثبات شده هستند؛ بنابراین می‌توان از ترکیب آن‌ها به‌عنوان یک نیروگاه جمع‌شده برای تأمین هم‌زمان برق، آب‌شیرین و سرمایه‌ش در مقیاس‌های کوچک و متوسط استفاده نمود. بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، میزان انرژی الکتریکی و آب تولیدی سامانه در محدوده‌ای قرار دارد که پاسخ‌گوی نیاز انرژی و آب یک شهرک صنعتی یا مجموعه مسکونی متوسط است؛ از این رو، کاربرد آن در مناطق هدف مانند جزایر یا نواحی ساحلی از نظر فنی و زیست‌محیطی کاملاً توجیه پذیر است.

5- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک نیروگاه جدید و یکپارچه با استفاده از سوخت ضایعات جامد شهری مورد تحلیل فرآیندی، ترمودینامیکی و زیست‌محیطی قرار گرفته است. پیکربندی پیشنهادی شامل چهار زیرسیستم اصلی یعنی سیکل توربین گازی، سیکل ارگانیک رانیکن، سیکل تبرید جذبی و واحد نمک‌زدایی حرارتی دومرحله‌ای است که به‌صورت آبشاری و بهینه از نظر انتقال حرارت با یکدیگر ادغام شده‌اند. نوآوری‌های اصلی این پژوهش شامل طراحی پیکربندی جدید نیروگاه، توسعه رویکرد ترمودینامیکی، دستیابی به بازده انرژی بالاتر نسبت به مطالعات پیشین و کاهش قابل توجه شدت انتشار دی‌اکسید کربن در مقایسه با سیستم‌های مشابه است. علاوه بر این، اثر پارامترهای عملیاتی کلیدی بر عملکرد کلی فرآیند نیز به‌صورت جامع مورد ارزیابی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق عبارتند از:

- بر اساس شبیه‌سازی حالت پایه، سیستم پیشنهادی با مصرف 12510 کیلووات انرژی زیست توده قادر به تولید 4994 کیلو وات توان الکتریکی خالص، 1034 کیلو وات توان سرمایی معادل با 45960 kg/h آب سرد 5 درجه سانتیگراد و 11960 kg/h آب شیرین با میزان ریکواری 33/28 درصد است.
- شدت تأثیرگذاری پارامترهای مورد بررسی بر کارایی انرژی و ردپای دی‌اکسید کربن کاملاً به تأثیر تغییرات در نرخ تولید محصولات سیستم بستگی دارد. یعنی هر پارامتری که بتواند با تغییراتش باعث افزایش تولید بیشتری شود، در نتیجه اثر بیشتری بر بهبود کارایی خواهد داشت و در اینجا این اثرگذاری برای دمای هوا به توربین گازی بوده است.

- از لحاظ زیست محیطی مشخص شد که ردپای دی‌اکسیدکربن در این سیستم جدید و یکپارچه معادل با $0/2 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$ می‌باشد.
- کارایی قانون اول ترمودینامیک و بازده الکتریکی فرآیند به ترتیب $73/82$ درصد و $39/92$ درصد محاسبه شده و سیستم تبرید که با سیکل ارگانیک رانکین ادغام حرارتی شده است دارای ضریب عملکرد معادل با $11/08$ درصد می‌باشد.
- بررسی‌ها نشان داد افزایش دمای هوای ورودی به توربین گازی علاوه بر افزایش تولید برق و سرمایه‌ش منجر به افزایش کارایی انرژی و کاهش ردپای دی‌اکسید کربن شده است.
- افزایش فشار سیال عامل در ورودی توربین سیکل ارگانیک رانکین، تولید برق را افزایش داده و منجر به بالا رفتن بازده الکتریکی کلی سیستم شده است.
- افزایش دمای سیال در خروجی رکوپراتور، تولید توان سرمایی در سیکل تبرید را افزایش داده ولی تولید آب شیرین را کاهش داده است.

در ادامه این پژوهش، می‌توان مسیر توسعه آینده را بر پایه‌ی گسترش پایداری و کارایی سیستم دنبال کرد. جایگزینی یا ترکیب منبع حرارتی زیست‌توده با انرژی خورشیدی می‌تواند ضمن کاهش ردپای کربن، پایداری و خودکفایی انرژی سامانه را افزایش دهد. همچنین بررسی سیالات عامل گوناگون در سیکل ارگانیک رانکین و مقایسه عملکرد آن‌ها در شرایط اقلیمی متفاوت، مسیر مناسبی برای ارتقای بازده حرارتی فراهم می‌کند. از سوی دیگر، جایگزینی فرایند نمک‌زدایی حرارتی با فناوری‌های غشایی مانند اسمز معکوس، امکان استفاده بهینه از توان الکتریکی تولیدی را فراهم خواهد کرد. در نهایت، انجام تحلیل‌های اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر همراه با مطالعات مقیاس‌پذیری برای کاربرد در مناطق جزیره‌ای و شهرک‌های صنعتی، می‌تواند گام مؤثری در جهت توسعه صنعتی و بومی‌سازی این فناوری باشد.

6- منابع

- [1] M. Shamsi, M. Sheidaei, B. Karami, A. Cheraghdar, S. Bakhsheshi, A. Afshardoost, Development of an off-grid polygeneration system utilizing multi-waste heat recovery from low-grade heat sources for sustainable production of e-methanol, potable water, liquefied CO₂, and utilities, *Renewable Energy Focus*, pp. 100728, 2025.
- [2] L. Wang, G. Bo, R. Gao, M. Ayadi, W. Chamman, J.B. Ooi, M. Qin, Thermoeconomic assessment of an innovative combined cooling, heating, and power system based on biomass combustion, T-CO₂ cycle, absorption chiller, and desalination, *Process Safety and Environmental Protection*, 184, pp. 151-169, 2024.
- [3] S. Jarunthammachote, A. Dutta, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier, *Energy*, 32, pp. 1660-1669, 2007.
- [4] F. Khalid, I. Dincer, M.A. Rosen, Energy and exergy analyses of a solar-biomass integrated cycle for multigeneration, *Solar Energy*, 112, pp. 290-299, 2015.
- [5] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, Exergo-environmental analysis of an integrated organic Rankine cycle for trigeneration, *Energy Conversion and Management*, 64, pp. 447-453, 2012.
- [6] S. Jafary, S. Khalilarya, A. Shawabkeh, M. Wae-hayee, M. Hashemian, A complete energetic and exergetic analysis of a solar powered trigeneration system with two novel organic Rankine cycle (ORC) configurations, *Journal of Cleaner Production*.

- [7] A. Afshardoost, M. Shamsi, Sustainable development and optimization of a geothermal-biomass hybrid energy system for green hydrogen production, *Energy Conversion and Management*, pp. 101106, 2025.
- [8] M. Shamsi, J.T. Darian, M. Afkhamipour, A process intensification approach for industrial plant decarbonization: Scale-up, techno-economic, and environmental assessment, *Results in Engineering*, pp. 107153, 2025.
- [9] J.A. Aguilar-Jiménez, N. Velázquez, R. López-Zavala, R. Beltrán, L. Hernández-Callejo, L.A. González-Urbe, V. Alonso-Gómez, Low-temperature multiple-effect desalination/organic Rankine cycle system with a novel integration for fresh water and electrical energy production, *Desalination* 477, pp. 114269, 2020.
- [10] Y. Li, X.D. Ren, Investigation of the organic Rankine cycle (ORC) system and the radial-inflow turbine design, *Applied Thermal Engineering*, 96, pp. 547-554, 2016.
- [11] B. Ghorbani, M. Miansari, S. Zendejboudi, M.H. Hamedi, Exergetic and economic evaluation of carbon dioxide liquefaction process in a hybridized system of water desalination, power generation, and liquefied natural gas regasification, *Energy Conversion and Management*, 205, pp. 112374, 2020.
- [12] P. Zhao, J. Wang, Y. Dai, L. Gao, Thermodynamic analysis of a hybrid energy system based on CAES system and CO₂ transcritical power cycle with LNG cold energy utilization, *Applied Thermal Engineering*, 91, pp. 718-730, 2015.
- [13] M. Shamsi, S. Mousavian, S. Rooeentan, B. Karami, S. Moghaddas, A. Afshardoost, Performance assessment of a geothermal-and LNG-driven zero-carbon multi-generation system for production of potable water, green hydrogen, and utilities, *Thermal Science and Engineering Progress*, 60, pp. 103396, 2025.
- [14] L. Awerbuch, *Understanding of Thermal Distillation Desalination Processes*, IDA Academy, Singapore, 2012.
- [15] M. Abou Houran, M.A. Habila, F. Riaz, M.K. Agrawal, K. Shi, Process development for a novel polygeneration purpose based on tars produced by a biomass gasification unit; feasibility study from the thermodynamic, economic, and environmental viewpoints, *Journal of Cleaner Production*, 2023.
- [16] L. Caibo, H. Chou-Yi, M.K. Agrawal, J. Zhang, S.F. Ahmad, A.H. Seikh, V. Mohanavel, S.T. Chauhdary, F. Chi, Design and thermo-enviro-economic analyses of an innovative environmentally friendly trigeneration process fueled by biomass feedstock integrated with a post-combustion CO₂ capture unit, *Journal of Cleaner Production*, 443, pp. 141137, 2024.
- [17] H. Tian, X. Chen, S.F. Ahmad, Manoj Kumar Agrawal, A.H. Seikh, N.A. Shah, Q. Su, Modeling and analysis of a new combined cooling, heating, and power energy system based on biogas combustion and hot oil for heat supply, *Process Safety and Environmental Protection*, 184, pp. 1484-1501, 2024.
- [18] T.U.K. Nutakki, M.K.A. S.T. Chauhdary, S.F. Ahmad, M. Ayadi, E. Hedi, T. Muhammad, F. Xiao, Thermo-economic-environmental analysis of a sustainable heat integration design for biomass-fueled power plant using integration of CCHP and sweater desalination application, *Desalination*, 577, pp. 117404, 2024.
- [19] P. Ahmadi, I. Dincer, M.A. Rosen, Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system, *Energy*, 56, pp. 155-166, 2013.
- [20] S. Anvari, S. Khalilarya, V. Zare, Power generation enhancement in a biomass-based combined cycle using solar energy: Thermodynamic and environmental analysis, *Applied Thermal Engineering*, 2019.