

تحلیل انرژی، انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه چندتولیده خورشیدی مبتنی بر ریفرورمر بخار متان و الکترولیز PEM

روح الله یزدان پناه^۱، نیما غیائی طبری^۲*

۱- محصل دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان، بوشهر، rohola.yzn@gmail.com

۲- استادیار مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان، بوشهر، Nima_ghiasi_te@yahoo.co.uk

چکیده

در این پژوهش، در این پژوهش، یک سامانه چندتولیده خورشیدی-ریفرورمینگ بخار متان-الکترولیز PEM جهت تولید هم‌زمان برق، گرمایش، سرمایش و هیدروژن طراحی، مدل‌سازی و تحلیل شده است. ارزیابی سامانه بر پایه‌ی تحلیل‌های انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی انجام گرفت تا عملکرد کلی، هزینه تولید و پایداری سیستم تعیین شود. نتایج نشان داد که با افزایش دمای ورودی به توربین گازی از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ °C، بازده کلی انرژی از ۴۷٪ به ۴۸٫۶٪ و بازده انرژی از ۳۹٪ به ۴۱٪ افزایش یافته است. هزینه تراز شده انرژی (LCOE) از ۰٫۱۶ دلار/کیلووات‌ساعت (USD/kWh) به ۰٫۱۳ دلار/کیلووات‌ساعت کاهش یافته و هزینه کل واحد محصولات (UTCP) نیز از ۲۴٫۸ دلار/گیگاژول (USD/GJ) به ۲۴٫۵ دلار/گیگاژول کاهش یافته است. نتایج نشان داد نسبت تراکم کمپرسور (PR) بهینه در بازه‌ی ۶ تا ۸ و دمای ریفورمر بهینه در محدوده‌ی ۷۰۰ تا ۷۵۰ °C قرار دارد. از منظر زیست‌محیطی، سامانه قادر به کاهش قابل توجه انتشار CO₂ در مقایسه با سیستم‌های فسیلی بوده و دوره بازگشت سرمایه آن ۷ سال برآورد گردید. بنابراین، استفاده از انرژی خورشیدی متمرکز در ترکیب با فرایندهای ریفورمینگ و الکترولیز می‌تواند راهکاری اقتصادی، کم‌کربن و پایدار برای تولید هم‌زمان انرژی و سوخت پاک فراهم نماید.

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی، تولید هم‌زمان، سوخت، تحلیل انرژی، تحلیل انرژی

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، سرعت رشد مصرف انرژی در جهان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به‌طور چشمگیری افزایش یافته و این روند، مشکلات جدی در تأمین پایدار انرژی و مدیریت آثار زیست‌محیطی آن ایجاد کرده است. وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی سبب شده است تا بخش قابل توجهی از انرژی جهانی از منبعی تأمین گردد که هم تجدیدناپذیر است و هم با انتشار وسیع گازهای گلخانه‌ای همراه می‌باشد. پیامد چنین الگویی، افزایش دمای زمین، تغییرات اقلیمی، و کاهش امنیت انرژی است؛ به همین دلیل، حرکت به سوی سیستم‌های انرژی پایدار، پاک و با بازده بالا به یکی از اولویت‌های اساسی راهبردهای انرژی در سطح بین‌المللی تبدیل شده است. در این میان، استفاده از منابع تجدیدپذیر با ضریب تابش بالا مانند انرژی خورشیدی، و ترکیب آنها با فناوری‌های مدرن تولید هیدروژن و بازیابی حرارت، می‌تواند چشم‌اندازی نوین برای پاسخ‌گویی هم‌زمان به نیازهای انرژی، محیط زیست و توسعه اقتصادی ارائه دهد.



مفهوم سامانه‌های چندتولیده به عنوان نسل جدیدی از ساختارهای تولید انرژی، بدین معناست که با یک منبع اصلی انرژی، چند نوع حامل انرژی شامل برق، حرارت، برودت یا سوخت پاک تولید می‌شود. این ساختار موجب کاهش تلفات تبدیل، افزایش راندمان کل و صرفه‌جویی در مصرف اولیه سوخت می‌گردد. در سطح صنعتی، ترکیب فناوری‌های برج خورشیدی متمرکزکننده با ریفورمینگ بخار متان و الکترولیز غشایی، یکی از کارآمدترین و پیشرفته‌ترین مدل‌های سامانه چندتولیده محسوب می‌شود. این ترکیب نه تنها توان برق تولید می‌کند بلکه با استفاده از انرژی مازاد حرارتی و الکتریکی، به تولید هیدروژن سبز و بازیافت حرارتی برای مصارف گرمایی نیز می‌پردازد. چنین نظامی می‌تواند جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در مناطق دارای تابش خورشیدی بالا باشد.

با وجود مزایای فنی و ترمودینامیکی این سیستم‌ها، چالش اصلی در مسیر تجاری‌سازی آن‌ها، جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی است. از یک‌سو، سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی و تجهیزات الکترولیزکننده بالاست؛ از سوی دیگر، بازده سیستم در شرایط متغیر اقلیمی دچار نوسان می‌شود. بنابراین تحلیل اقتصادی جامع بر مبنای هزینه تراز شده انرژی (LCOE)، هزینه کل واحد محصولات (UTCP)، ارزش فعلی خالص (NPV)، دوره بازگشت سرمایه (PBP) و نرخ بازده داخلی (IRR) ضروری است. همچنین، از منظر زیست‌محیطی، باید میزان انتشار معادل دی‌اکسید کربن ($\text{CO}_2 \text{ eq}$)، صرفه‌جویی در آلاینده‌ها و کاهش ردپای کربنی مورد بررسی قرار گیرد تا مشخص شود این فناوری می‌تواند جایگزین مؤثری برای سیستم‌های متداول باشد یا خیر.

در چارچوب تحلیل‌های چندبعدی موسوم به تحلیل 4E (انرژی، اگزرژی، ارزیابی، اقتصادی و زیست‌محیطی) اقتصادی و زیست‌محیطی دو محور اساسی تصمیم‌گیری برای توسعه پایدار تلقی می‌شوند. در این منظر، تحلیل اقتصادی تعیین‌کننده سودآوری پروژه، قابلیت رقابت با فناوری‌های مرسوم، و بازگشت سرمایه در بازه عمر مفید سیستم است؛ درحالی‌که تحلیل زیست‌محیطی سهم سیستم را در کاهش آلودگی‌های هوا، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و تطبیق با اهداف جهانی پایداری انرژی مطرح می‌کند. ادغام این دو تحلیل منجر می‌شود که شاخص‌های پایداری مانند هزینه چرخه عمر انرژی (LCAE) و کربن چرخه عمر (LCCE) به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شوند و راهکارهایی برای تنظیم دمای ریفورمر، نسبت بخار به کربن (S/C)، و ظرفیت واحد الکترولیز، جهت کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی ارائه گردد.

ایران، به‌عنوان یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان از نظر منابع گازی و تابش خورشیدی، موقعیتی ممتاز برای بهره‌گیری از سیستم‌های خورشیدی-هیدروژنی دارد. با توجه به روند فزاینده‌ی مصرف انرژی در کشور، توسعه چنین سامانه‌هایی می‌تواند علاوه بر ارتقای شاخص‌های اقتصاد انرژی، موجب کاهش ناترازی عرضه و تقاضا، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و بهبود تاب‌آوری زیست‌محیطی شود. از منظر ملی و منطقه‌ای، جایگزینی انرژی خورشیدی برای تأمین بخشی از بار حرارتی ریفورمر و استفاده از الکترولیز جهت تولید هیدروژن سبز، می‌تواند نقش مهمی در تحقق سیاست‌های کربن‌زدایی و توسعه پایدار ایفا کند.

Chen و همکاران (۲۰۲۱) یک ارزیابی جامع از سامانه‌ی تولید هم‌زمان حرارت، سرمایش و برق (CCHP) مبتنی بر گازی‌سازی و موتور استرلینگ ارائه کردند. هدف این طراحی، تأمین هم‌زمان برق، گرما و سرمایش برای ساختمان‌های تجاری با کاهش رسوب تار و گازهای آلاینده بود. بر اساس نتایج، پیکربندی بهینه در مناطق گرم و مرطوب مانند سنگاپور و شانگهای به ترتیب موجب کاهش ۷۵٫۹٪ و ۷۰٫۵٪ در هزینه کل نسبت به سیستم‌های متداول شد. همچنین، سامانه‌ی مبتنی بر موتور استرلینگ نسبت به مدل‌های دارای موتور احتراق داخلی (ICE)، از لحاظ صرفه‌جویی انرژی اولیه و هزینه سرمایه‌ای کمتر عملکرد بهتری داشت [۱].

Ding و همکاران (۲۰۲۱) رویکردی نوین برای زمان‌بندی بازه‌ای و کنترل پیش‌بینی‌گر در سیستم‌های تولید هم‌زمان حرارت، سرمایش و برق ترکیبی با انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه دادند. این مدل با بهینه‌سازی شبکه عصبی از طریق الگوریتم



ژنتیک و داده‌های تاریخی-اقلیمی، دقت پیش‌بینی منابع خورشیدی و بادی را بالا برد. مدل هزینه‌سازی بازه‌ای تدوین‌شده، خطای پیش‌بینی را در کاربرد واقعی (نمونه موردی بیمارستان) تا حد زیادی کاهش داد و در یک روز تابستانی به کاهش ۱۶٪ هزینه برق و ۱۷٪ هزینه حرارت منجر شد [۲].

Kang و همکاران (۲۰۲۱) اثر سیاست‌های انرژی را بر عملکرد اقتصادی سیستم‌های تولید هم‌زمان حرارت، سرمایش و برق در چهار نوع ساختمان (مسکونی، اداری، هتل، بیمارستان) بررسی کردند. مدل بهینه‌سازی دوسطحی آنها نشان داد یارانه سرمایه‌ای تنها زمانی مؤثر است که ظرفیت واحد بالا باشد، اما تعرفه خرید برق در محدوده مناسب می‌تواند سودآوری سیستم به‌ویژه برای هتل‌ها و بیمارستان‌ها را بهبود دهد. سیستم‌های مسکونی کم‌صرف‌تر ولی اقتصادی کمتر بودند [۳].

آقای (۲۰۲۱) به بهینه‌سازی سیستم CCHP-دیگ بخار مبتنی بر توربین گازی برای صنایع لبنی پرداخت. سه استراتژی مختلف با توابع هدف متفاوت (شامل بازده انرژی و هزینه سالانه) تحلیل شد. نتایج نشان داد فشار بهینه کمپرسور باید کمتر از طرح پایه باشد و حذف پیش‌گرم‌کن هوا به کاهش پیچیدگی و هزینه منجر می‌شود [۴].

صادقی و احمدی (۲۰۲۱) یک بهینه‌سازی ترمو-اقتصادی چندهدفه برای سیستم CCHP با ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) و سامانه سرمایش با اجکتور CO₂ ارائه کردند. در حالت پایه، توان مصرفی در تراکم هوا برابر ۷۲ مگاوات و توان خروجی هنگام تخلیه ۱۳۶ MW بود؛ سیستم CCHP نیز حدود ۱۹۶ MW سرمایش و ۶۵۸ مگاوات گرمایش تولید می‌کرد. نسخه بهینه ضمن کاهش هزینه‌ها، راندمان انرژی را تا ۶۸.۲٪ و انتشار دی‌اکسیدکربن را تا ۱۵۷ kg/MWh کاهش داد [۵].

Zhou و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد و تحلیل انرژی سیستم CCHP-LAES (ذخیره‌سازی انرژی با هوای مایع) را بررسی کردند. در طراحی پیشنهادی، سیکل آلی رانکین گرمای فشار بالا را بازیافت کرده و سیستم جذبی برای گرمایش و سرمایش باکیفیت پایین به‌کار رفت. نتایج راندمان برگشت‌پذیری و انرژی را به ترتیب ۶۹.۶٪ و ۵۷٪ نشان داد که نسبت به سیستم پایه LAES بهبود ۳۷.۷٪ و ۱۲.۷٪ دارد [۶].

Ding و همکاران (۲۰۲۴) سامانه‌ی نوینی از ذخیره‌سازی انرژی هوای مایع یکپارچه با گرمایش خورشیدی را برای تولید هم‌زمان برق، سرمایش، گرمایش، آب گرم و هیدروژن ارائه کردند. تحلیل‌های انرژی، انرژی و اقتصادی نشان داد سیستم قادر به تولید هم‌زمان حدود ۵۸.۸ مگاوات برق، ۲۶.۹ مگاوات سرمایش، ۳۴.۹ مگاوات گرمایش، ۶۷.۹ kg/s آب گرم و ۱۲.۱۷ mol/s هیدروژن است. در مقایسه با سیستم استاندارد LAES، راندمان انرژی ۲۰.۸٪ افزایش و راندمان انرژی ۱۴.۶٪ کاهش داشت. تحلیل اقتصادی در منطقه پکن افزایش ۴۲۲ میلیون دلار در NPV و کاهش دوره بازگشت سرمایه به حدود ۷.۵ سال را نشان داد [۷].

Xia Qing (۲۰۲۴) یک سیستم خورشیدی چندمنظوره تولید برق، سرمایش و هیدروژن مایع را مدل‌سازی کرد. سیستم می‌تواند ۱۳.۴۵ مگاوات توان خالص، ۳.۴۱ مگاوات سرمایش، و ۲۷.۳ kg/h هیدروژن مایع تولید کند و با هزینه محصول ۱۲۸۰.۹ دلار/ساعت بازگشت سرمایه ۶۰.۴ ساله داشته باشد. پس از بهینه‌سازی، توان و تولید هیدروژن افزایش و دوره بازگشت به ۵.۷۷ سال کاهش یافت. تحلیل حساسیت نشان داد افزایش توان ورودی الکترولایزر از ۵٪ به ۱۵٪ توان کل، تولید هیدروژن را از ۱۴.۸ به ۴۱.۲ kg/h افزایش می‌دهد، گرچه بازده انرژی اندکی افت می‌کند [۸].

Tera و همکاران (۲۰۲۴) یک سیستم چندمنظوره ترکیبی مبتنی بر گازی‌سازی زیست‌توده، پیل سوختی SOFC، توربین گازی، سیکل رانکین آلی (ORC) و سیکل برایتون با CO₂ فوق‌بحرانی پیشنهاد کردند. تحلیل جامع انرژی-انرژی-اقتصادی-اکرژی (E4) نشان داد بازده‌های کلی انرژی و انرژی به ترتیب ۷۶.۸٪ و ۶۰.۶٪ است. هزینه تولید هیدروژن ۴۰۶ دلار/kg و درآمد سالانه محصولات حدود ۵۸.۴ میلیون دلار برآورد شد. تحلیل اکرژی وابستگی به منابع خریداری‌شده را

نشان داد اما اثرات زیست‌محیطی بلندمدت پایین بود، که سامانه را گزینه‌ای کم‌کربن و اقتصادی برای کاربردهای چندتولیده معرفی می‌کند [۹].

هدف پژوهش حاضر، ارائه یک تحلیل جامع اقتصادی-زیست‌محیطی و ارزیابی پایداری برای سیستم چندتولیده مبتنی بر برج خورشیدی، ریفورمر بخار متان و واحد الکترولیز نوع PEM است. این مقاله با بررسی دقیق تأثیر پارامترهای کلیدی عملیاتی و شرایط اقلیمی بر شاخص‌های هزینه و انتشار، می‌کوشد نقطه‌ای بهینه‌ای تعیین کند که در آن سیستم از دیدگاه انرژی، اقتصاد و محیط زیست در حالت تعادل پایدار قرار گیرد. نتایج می‌تواند مبنای طراحی اقتصادی و سیاست‌گذاری اجرایی نیروگاه‌های خورشیدی چندمنظوره در مناطق پرتابش ایران و سایر نقاط جهان باشد.

در ادبیات پژوهش، بسیاری از مطالعات تنها به ارزیابی انرژی یا توان خروجی این سیستم‌ها پرداخته‌اند و جنبه‌های مرتبط با بازده انرژی، تلفات در اجزای اصلی و بهینه‌سازی هم‌زمان شرایط عملکردی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که تحلیل انرژی دیدی دقیق‌تر از محدودیت‌های ترمودینامیکی ارائه می‌دهد و می‌تواند راهنمایی مطمئن برای طراحی سامانه‌ای با کمترین اتلاف و بیشترین کارایی باشد. از سوی دیگر، افزایش کارایی در سیستم‌های ترکیبی تنها تابع بهره‌گیری از منابع حرارتی نیست، بلکه به نحوه ارزیابی، طراحی و هم‌زمان‌سازی مؤلفه‌های گوناگون سیستم نیز بستگی دارد. انتخاب صحیح دماهای کاری، نسبت‌های ترکیب واکنش‌ها، و پارامترهای انتقال حرارت می‌تواند تفاوت چشمگیری در بازده کلی ایجاد کند. افزون بر آن، مطالعات جدید نشان می‌دهند که بهره‌گیری از ذخیره حرارت و سامانه‌های بازیافت انرژی در فرآیندهای خورشیدی می‌تواند پایداری عملکرد را در شرایط نوسان تابشی به مقدار زیادی ارتقا دهد.

۲. روش پژوهش

در این پژوهش، هدف ارزیابی جامع اقتصادی-زیست‌محیطی و پایداری سامانه چندتولیده مبتنی بر انرژی خورشیدی و فناوری‌های تولید هیدروژن است که شامل سه زیرسامانه اصلی می‌باشد: برج خورشیدی متمرکزکننده (SPT)، ریفورمر بخار متان (SMR)، و الکترولیز غشای تبادل پروتونی. فرآیند مدل‌سازی و تحلیل در این مقاله بر پایه نتایج ترمودینامیکی مقاله‌ی نخست بنا شده اما با تمرکز بر شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و پایداری سیستم انجام گرفته است. این بخش، تمامی فرضیات، روابط اصلی محاسبات و شاخص‌های مورد استفاده در تحلیل اقتصادی-زیست‌محیطی را تشریح می‌کند.

در تحلیل اقتصادی-زیست‌محیطی، سیستم در حالت پایا در نظر گرفته شده است. شرایط مرجع به صورت فشار محیط $P_0=1 \text{ atm}$ و دمای محیط $T=298 \text{ K}$ تنظیم شده است. تمامی داده‌های ورودی از نتایج بخش ترمودینامیک به دست آمده و شامل توان خروجی، دمای کار اجزا، نرخ تولید هیدروژن، و بازده کل سیستم می‌باشد. دوره عمر سامانه برابر ۲۰ سال و نرخ تنزیل مالی برابر ۱۰٪ فرض شده است.

نرخ بهره سرمایه و هزینه‌های تعمیرات سالانه نیز بر اساس نسبت‌های متعارف نیروگاه‌های خورشیدی ترکیبی محاسبه گردیده‌اند؛ هزینه نگهداری سالانه حدود ۲٪ از هزینه سرمایه‌ای کل و هزینه جایگزینی تجهیزات اصلی در انتهای سال دهم در نظر گرفته شده است.

تحلیل اقتصادی با استفاده از سه شاخص پایه انجام می‌شود:

۱. هزینه تراز شده انرژی (LCOE)؛
۲. هزینه کل واحد محصولات (UTCP)؛
۳. شاخص‌های اقتصادی ارزیابی سرمایه (NPV، IRR، و PBP).

1-2- آنالیز اقتصادی

در این بخش به آنالیز اقتصادی و روابط حاکم بر آن (هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه های سالیانه سیستم، درآمد سالانه سیستم، مدت زمان بازگشت سرمایه و...) پرداخته شده است [۸۰، ۸۱]

$$Total_{CapitalCost} = 1.2 * (PEC_{SYSARC} + PEC_{SYSGTC} + PEC_{SYSORC} + PEC_{SYSsRC} + PEC_{SYSsolar} + PEC_{SYSOthers}) \quad (1)$$

$$Total_{CapitalCost_n} = Total_{CapitalCost} * (i + 1)^{LT} \quad (2)$$

$$Total_{AnnualCost} = \Phi * CRF * Total_{CapitalCost} + Annual_{CostBG} + CO2_{EmissionCost} \quad (3)$$

$$Total_{AnnualIncome} = AI_{power} + AI_{cooling} + AI_{heating} + AI_{hydrogen} \quad (4)$$

$$SPBP = \frac{Total_{CapitalCost_n}}{Total_{AnnualIncome}} \quad (5)$$

$$PBP = \frac{\ln\left(\frac{Total_{AnnualIncome}}{(Total_{AnnualIncome} - i * Total_{CapitalCost_n})}\right)}{\ln(i + 1)} \quad (6)$$

$$NPV = Total_{AnnualIncome} * \left(\frac{((i + 1)^{LT} - 1)}{(i * (i + 1)^{LT})}\right) - Total_{CapitalCost_n} \quad (7)$$

$$IRR = \frac{Total_{AnnualIncome}}{Total_{CapitalCost_n}} * \left(1 - \frac{1}{(1 + IRR)^{LT}}\right) \quad (8)$$

$$UCTP = \frac{Total_{AnnualCost}}{(3.6 * (AP_{power} + AP_{cooling} + AP_{heating}) + \dot{n} [23] * LHV_{H_2} * Annual_{operation} * 3600) * 1E-9} \quad (9)$$

$$LCOE = \frac{Total_{AnnualCost}}{AP_{power}} \quad (10)$$

۲-۲- آنالیز زیست محیطی

تحلیل زیست محیطی با رویکرد چرخه عمر انرژی و انتشار (LCAE و LCCE) انجام شده است. میزان انتشار دی اکسید کربن و آلاینده های اصلی در هر زیرسامانه بر اساس ضرایب انتشار تجربی (Emission Factors) محاسبه و سپس با انرژی خروجی مقایسه می شود تا شاخص کارایی کربنی (Carbon Efficiency Index) استخراج گردد. روابط پایه به صورت زیر بیان می شوند:

در این قسمت به روابط حاکم بر آنالیز زیست محیطی مانند میزان انتشار کربن دی اکسید که مهم ترین گاز گلخانه ای است، هزینه انتشار کربن دی اکسید و... پرداخته شده است [۸۲، ۸۳].

$$CO2_{Emission} = \dot{n}_{CO_2} [37] * M(CO_2) * Annual_{operation} * 3600 \quad (11)$$

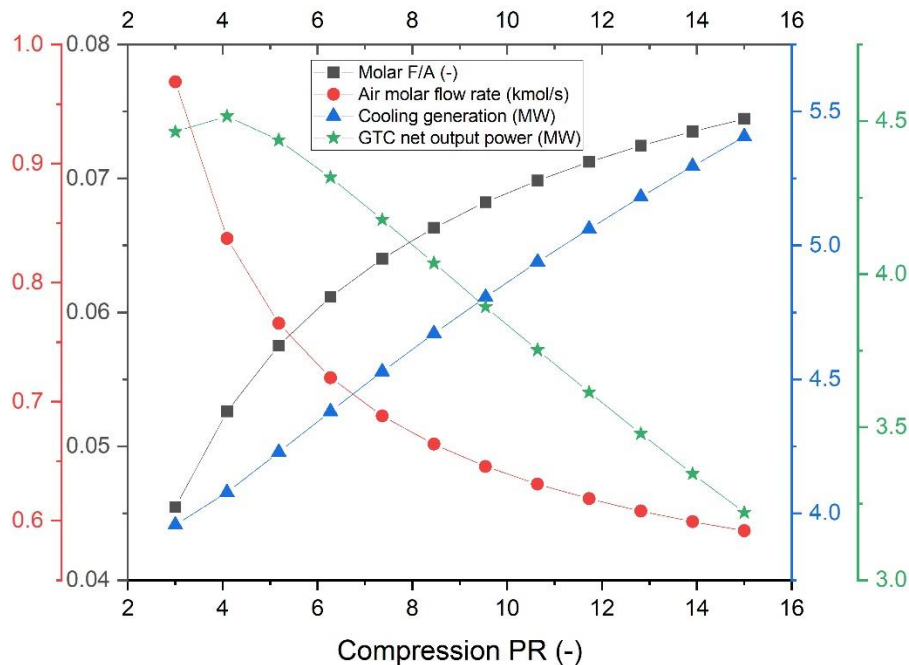
$$CO2_{Emission_{Cost}} = Penalty * CO2_{Emission} \quad (12)$$

$$(CO2_{Emission_{Unit}}) = \dot{n}_{CO_2} [37] * M(CO_2) / (Total_{power} + Total_{heating} + Total_{cooling} + \dot{n}_{[23]} * LHV_{H2} * 1E - 3) / 1E - 6 \quad (13)$$

در مجموع، مدل ارائه شده بر پایه ی تحلیل چرخه عمر انرژی و هزینه، در کنار مدل انتشار گازهای گلخانه ای، تعادل سه گانه ی اقتصاد-انرژی-محیط زیست را در سامانه چندتولیده خورشیدی ایجاد می کند. خروجی این بخش مبنایی برای تحلیل نتایج و تعیین نقاط بهینه طراحی از منظر پایداری اقتصادی و زیست محیطی خواهد بود.

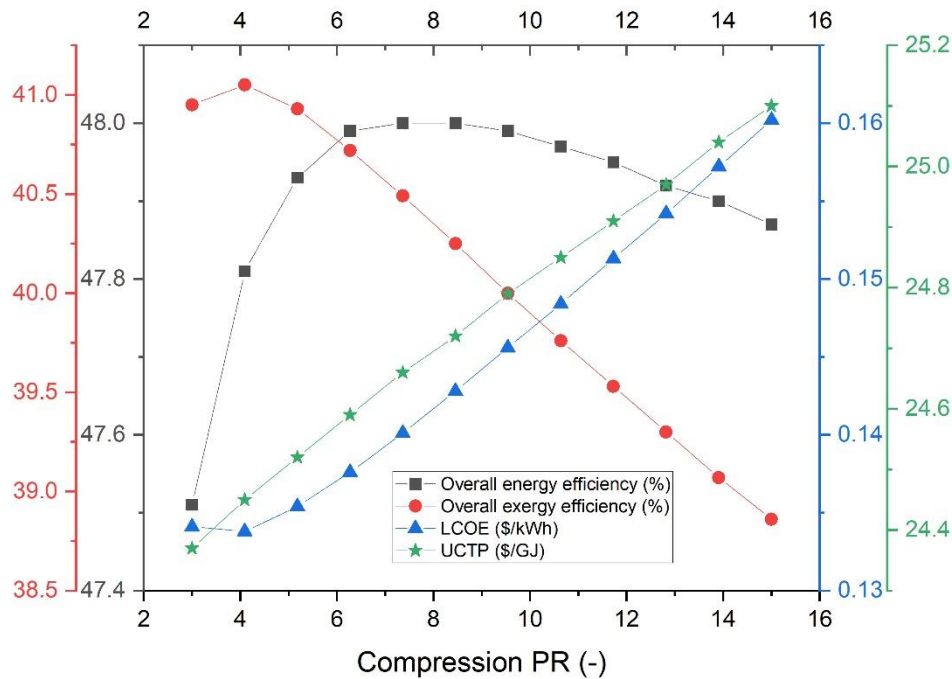
۳. نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی پرداخته خواهد شد. با افزایش نسبت تراکم کمپرسور (PR) از ۲ تا ۱۶، رفتار پارامترهای کلیدی سیستم چندتولیده تغییرات قابل توجهی نشان می دهد؛ نسبت مولی سوخت به هوا (F/A) به دلیل افزایش دمای هوای فشرده و نیاز بیشتر به سوخت برای حفظ دمای احتراق، روندی افزایشی دارد، درحالی که دبی مولی هوای ورودی به دلیل افزایش چگالی هوا و کاهش حجم جرمی جریان، کاهش می یابد (شکل ۱). در همین حین، تولید سرمایش به صورت پیوسته افزایش پیدا می کند زیرا دمای گازهای خروجی از توربین بالا رفته و انرژی حرارتی بیشتری برای سیکل جذبی در دسترس قرار می گیرد. در مقابل، توان خالص خروجی توربین گازی (GTC) به دلیل افزایش کار مصرفی کمپرسور، با افزایش PR روندی کاهشی دارد. توازن این رفتارها نشان می دهد که بازه بهینه عملکرد سیستم در محدوده نسبت تراکم ۶ تا ۸ قرار دارد؛ جایی که بازده انرژی و سرمایش در وضعیت تعادلی بوده و نسبت به سایر حالات، ترکیب بهینه ای از عملکرد ترمودینامیکی، هزینه ای و زیست محیطی را فراهم می کند.



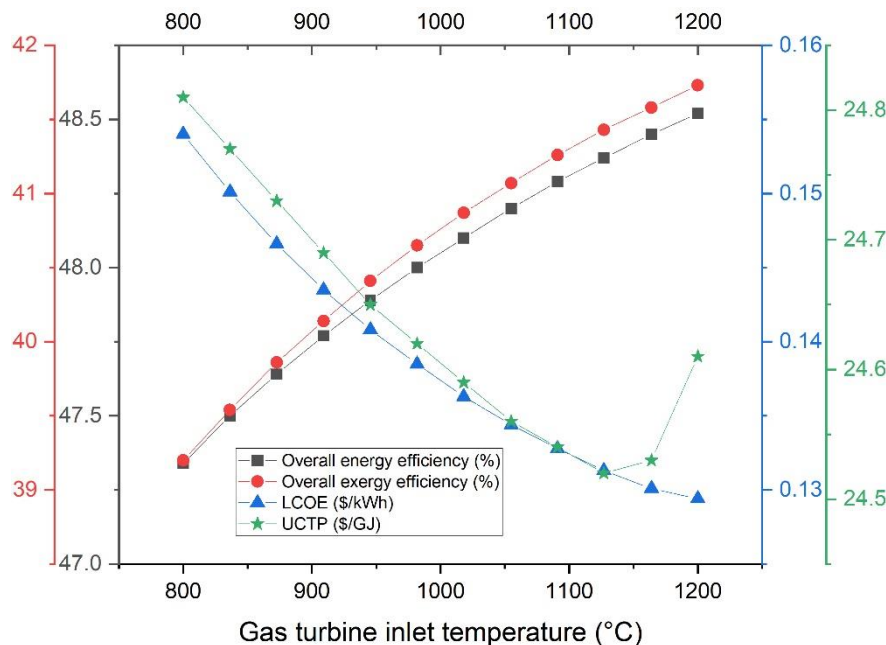
شکل ۱: تاثیر نسبت فشار کمپرسور بر برخی پارامترهای عملکردی سیستم چندگانه

با افزایش نسبت تراکم کمپرسور (PR) از ۲ تا ۱۶، پارامترهای عملکردی سیستم چندتولیده روندهای متفاوتی را نشان می‌دهند. بازده کلی انرژی ابتدا افزایش یافته و در حدود $PR=6$ تا ۸ به بیشینه‌ی خود (حدود ۴۸٪) می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر PR اندکی کاهش می‌یابد؛ رفتاری که ناشی از افزایش کار مصرفی کمپرسور و افت توان خالص توربین گازی است. بازده کلی انرژی نیز تا $PR \approx 4$ افزایش یافته و سپس با شیبی یکنواخت افت می‌کند، زیرا با افزایش نسبت تراکم، اتلافات انرژی در اجزای داغ‌تر سیکل (به‌ویژه در محفظه احتراق و مبدل حرارتی) تشدید می‌شود (شکل ۲). در مقابل، دو شاخص اقتصادی LCOE و UTCP روندی صعودی دارند؛ به‌طوری‌که LCOE از حدود ۰.۱۳ به بیش از ۰.۱۶ دلار/کیلووات‌ساعت و UTCP از ۲۴.۳ به حدود ۲۵.۲ دلار/گیگاژول افزایش می‌یابد. نتیجه‌گیری کلی نشان می‌دهد که به‌رغم بهبود نسبی بازده‌ها در نواحی پایین‌تر PR، افزایش بیش از حد تراکم باعث رشد هزینه‌های واحد، کاهش بازده انرژی، و تضعیف کارایی اقتصادی کل سیستم می‌گردد. بنابراین بازه‌ی بهینه‌ی نسبت تراکم بین ۶ تا ۸ پیشنهاد می‌شود؛ جایی که توازن مناسبی میان بهره‌وری ترمودینامیکی و شاخص‌های اقتصادی-زیست‌محیطی برقرار است.



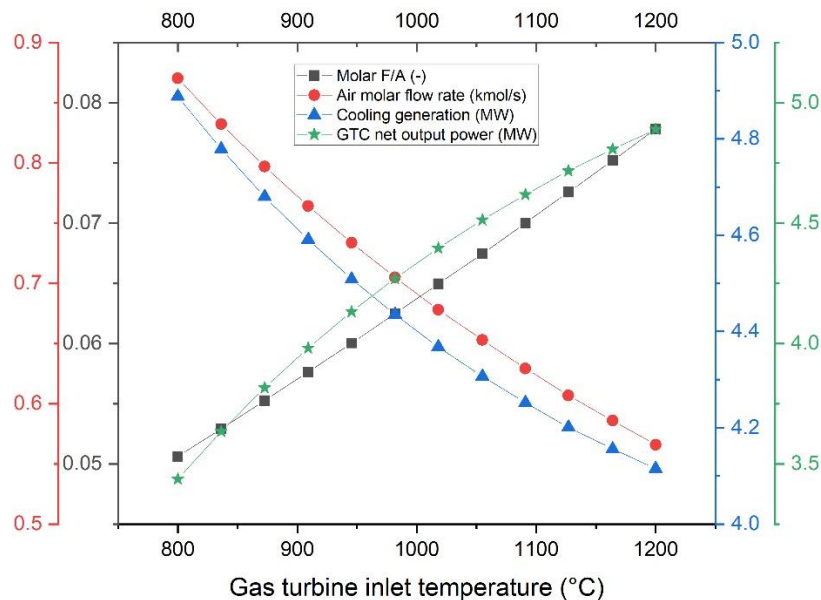
شکل ۲: تاثیر نسبت فشار کمپرسور بر برخی پارامترهای عملکردی سیستم چندگانه

با افزایش دمای ورودی به توربین گاز از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، بهبود آشکاری در عملکرد ترمودینامیکی کل سیستم چندتولیده مشاهده می‌شود. هر دو شاخص بازده کلی انرژی و بازده کلی اگزرژی روندی صعودی دارند؛ به‌طوری‌که بازده انرژی از حدود ۴۷٪ در دمای ۸۰۰ C° به نزدیک ۴۸.۶٪ در دمای ۱۲۰۰ C° و بازده اگزرژی از حدود ۳۹٪ به بیش از ۴۱٪ افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده بهبود کیفیت تبدیل انرژی به‌واسطه افزایش اختلاف دمایی مؤثر میان منبع داغ و سرد و نیز کاهش نسبت تلفات اگزرژی در اجزای حرارتی سیکل است. در مقابل، شاخص‌های اقتصادی رفتار معکوسی نشان می‌دهند؛ هزینه تراز شده انرژی (LCOE) با افزایش دما کاهش قابل‌توجهی داشته و از حدود ۰.۱۶ به نزدیکی ۰.۱۳ دلار بر کیلووات‌ساعت رسیده است، در حالی‌که هزینه کل محصولات چندگانه (UCTP) نیز تا حدود ۲۴.۵ دلار بر گیگاژول پایین آمده و در دماهای بالا به حداقل می‌رسد. این روند بیانگر آن است که افزایش دمای ورودی به توربین گاز موجب افزایش توان خالص، بهبود بازده‌ها، و کاهش هزینه‌های تولید انرژی و محصولات جانبی (سرمایش، گرمایش و هیدروژن) می‌شود. بنابراین، از منظر هم‌زمان ترمودینامیکی و اقتصادی، محدوده دمایی ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ C° برای ورودی توربین گاز به‌عنوان منطقه بهینه عملکرد سیستم شناسایی می‌شود.



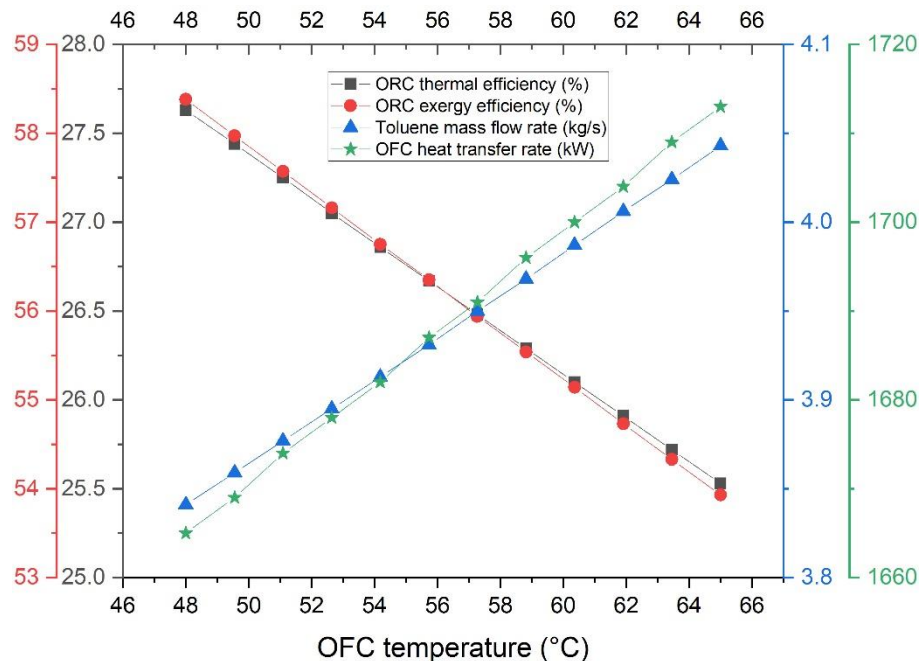
شکل ۳: بررسی تاثیر دما ورودی به توربین گازی بر عملکرد سیستم چندانگانه

با افزایش دمای ورودی به توربین گاز از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس، رفتار پارامترهای عملکردی اجزای سیکل گازی دارای روندهای متضاد است. نسبت مولی سوخت به هوا (F/A) به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد؛ زیرا برای حفظ توان خروجی و دمای احتراق در دمای‌های بالا، نیاز به تأمین سوخت بیشتر وجود دارد. هم‌زمان با این افزایش، نرخ جریان مولی هوا به دلیل محدودیت‌های حرارتی در نسبت تراکم و افزایش دمای گازهای خروجی کاهش می‌یابد، به طوری که از حدود ۰/۰۸ تا حدود ۰/۰۵ kmol/s افت می‌کند. در مورد عملکرد برودتی سامانه، مقدار توان سرمایش تولیدی ابتدا در دمای‌های پایین‌تر بیشینه بوده و با افزایش دمای ورودی به توربین کاهش یافته و از حدود ۴/۹ MW به ۴/۱ MW می‌رسد؛ این روند به سبب کاهش دمای نسبی منبع سرد و افت ظرفیت جذب حرارت در چیلر جذبی مرتبط با سیکل گاز است. در مقابل، توان خالص خروجی توربین گازی با شیب افزایشی از ۳/۹ MW در ۸۰۰ °C به بیش از ۴/۸ MW در ۱۲۰۰ °C می‌رسد که ناشی از افزایش اختلاف دمای مؤثر در انبساط گاز و بالا رفتن کار توان تولیدی توربین است. در جمع‌بندی، دمای ورودی بالاتر موجب افزایش توان خالص و نسبت F/A اما کاهش نرخ جریان هوا و تولید سرمایش می‌شود. از نظر تعادل حرارتی-کارکردی، محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ °C برای ورودی توربین گاز به عنوان بازه‌ی بهینه عملکرد سیستم چندتولیده معرفی می‌شود؛ جایی که توان خالص، کارایی حرارتی و ظرفیت سرمایش در وضعیت متعادل قرار دارند.



شکل ۴: بررسی تاثیر دما ورودی به توربین گازی بر عملکرد سیستم چندگانه

این با افزایش دمای مبدل حرارتی سیکل آلی رانکین (ORC) از ۴۶ تا ۶۶ °C، رفتار پارامترهای مختلف سیکل روندی متقاطع و وابسته به تعادل حرارتی نشان می‌دهد. بازده حرارتی ORC و بازده اگزرژی هر دو به صورت یکنواخت کاهش می‌یابند؛ به طوری که بازده حرارتی از حدود ۲۷.۸٪ در ۴۶ °C به ۲۵.۴٪ در ۶۶ °C و بازده اگزرژی از ۵۸٪ به حدود ۵۳٪ افت می‌کند. این کاهش ناشی از کمتر شدن اختلاف دمای مؤثر بین منبع حرارتی و کندانسور و افزایش اتلاف‌های حرارتی در مبدل‌های داخلی سیکل است. در مقابل، دبی جرمی تولوئن (سیال عامل ORC) به دلیل نیاز به جبران توان تولیدی و حفظ شار حرارتی مؤثر، روندی افزایشی دارد و از حدود ۳.۸ kg/s به نزدیک ۴.۱ kg/s می‌رسد. همچنین نرخ انتقال حرارت در OFC نیز از ۱۶۶۰ kW به بیش از ۱۷۲۰ kW بالا می‌رود، که بیانگر افزایش توان جذب حرارت در مبدل و افزایش بار حرارتی سیکل است. در جمع‌بندی، افزایش دمای OFC موجب رشد بار حرارتی و دبی جرمی سیال در گردش می‌گردد، ولی به دلیل تشدید تلفات حرارتی و کاهش گرادیان دمایی، کارایی حرارتی و اگزرژی سیستم افت می‌کند. از دیدگاه تلفیق بازده و بار حرارتی، محدوده‌ی دمایی ۵۵ تا ۵۸ °C برای OFC به عنوان نقطه‌ی بهینه عملکرد سیکل ORC پیشنهاد می‌شود، زیرا در این بازه توان تولیدی و بهره‌وری ترمودینامیکی در حالت پایدار و متعادل قرار دارند.



شکل ۵: نمودار تاثیر دما کندانسور سیکل رانکین آلی بر راندمان حرارتی و اگزرژی سیکل آلی رانکین

۴. نتیجه گیری کلی

در پژوهش حاضر اثبات کرد که سامانه‌های چندتولیدهای خورشیدی با آرایش ریفرم-برج خورشیدی-الکترولایزر، در صورت طراحی بهینه‌ی حرارتی و ترمودینامیکی، قادرند بازده و سوددهی بالاتری نسبت به سیستم‌های فسیلی و بازده پایین ایجاد کنند. نقطه‌ی تعادل عملکردی از نظر انرژی، اقتصاد و محیط زیست در محدوده‌ی دمای ورودی توربین گاز ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ °C و نسبت تراکم ۶ تا ۸ حاصل شد. همچنین بیشترین تخریب اگزرژی به ترتیب در محفظه احتراق و دفع‌کننده حرارت رخ می‌دهد که باید مبنای اصلاح طراحی حرارتی و بازیافت انرژی قرار گیرد. از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی، سامانه قادر به کاهش چشمگیر انتشار CO₂ و دستیابی به هزینه ترازشده‌ی انرژی کمتر از ۰.۱۳۸ kWh/\$ بوده است. پیشنهادات آینده شامل اجرای پیلوت صنعتی جهت صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، توسعه مدل برای توان‌های بالاتر از ۱۰ MW، و ترکیب سیستم با ذخیره‌سازهای حرارتی یا هوای فشرده (CAES و LAES) جهت افزایش پایداری عملکرد در شرایط نوسان تابش خورشید است.

۵. مراجع

- 1.Chen, J., et al., *Energetic, economic, and environmental assessment of a Stirling engine based gasification CCHP system*. Applied Energy, 2021. **281**: p. 116067.
- 2.Ma, D., L. Zhang, and B. Sun, *An interval scheduling method for the CCHP system containing renewable energy sources based on model predictive control*. Energy, 2021. **236**: p. 121418.
- 3.Kang, L., et al., *Influence analysis of energy policies on comprehensive performance of CCHP system in different buildings*. Energy, 2021. **233**: p. 121159.

- 4.Aghaei, A.T. and R.K. Saray, *Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry*. Energy, 2021. **229**: p. 120788.
- 5.Sadeghi, S. and P. Ahmadi, *Thermo-economic optimization of a high-performance CCHP system integrated with compressed air energy storage (CAES) and carbon dioxide ejector cooling system*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021. **45**: p. 101112.
- 6.Xue, X.-D., et al., *Performance evaluation and exergy analysis of a novel combined cooling, heating and power (CCHP) system based on liquid air energy storage*. Energy, 2021. **222**: p. 119975.
- 7.Ding, X., et al., *Energy, exergy, and economic analyses of a novel liquid air energy storage system with cooling, heating, power, hot water, and hydrogen cogeneration*. Energy Conversion and Management, 2024. **305**: p. 118262.
- 8.Qing, X., *Solar-driven multi-generation system: Thermoeconomic and environmental optimization for power, cooling, and liquefied hydrogen production*. Energy, 2024. **293**: p. 130409.
- 9.Tera, I., S. Zhang, and G. Liu, *A conceptual hydrogen, heat and power polygeneration system based on biomass gasification, SOFC and waste heat recovery units: energy, exergy, economic and emergy (4E) assessment*. Energy, 2024. **295**: p. 131015.