

تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی سامانه ترکیبی خورشیدی-ریفرمینگ برای تولید هم‌زمان توان و هیدروژن

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، یک سامانه ترکیبی انرژی مبتنی بر بهره‌گیری از منبع حرارتی خورشیدی و فرآیند ریفورمینگ بخار متان به منظور تولید هم‌زمان توان الکتریکی و هیدروژن مورد تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی قرار گرفته است. مدل‌سازی سیستم بر پایه قوانین اول و دوم ترمودینامیک و در حالت پایا انجام شده و شاخص‌هایی مانند بازده انرژی، بازده انرژی، هزینه تراز شده انرژی (LCOE) و هزینه کل واحد محصولات (UTCP) در شرایط مختلف شدت تابش، دمای ریفورمر و نسبت بخار به کربن (S/C) ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شدت تابش خورشیدی از ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع، بازده انرژی از حدود ۴۳٪ به بیش از ۴۹٪ و بازده انرژی از ۴۲٪ به ۴۸٪ افزایش یافته، در حالی که LCOE از ۰.۱۸ به حدود ۰.۱۲ دلار بر کیلووات‌ساعت کاهش یافته است. همچنین افزایش دمای ریفورمر از ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس موجب کاهش بازده‌های انرژی و انرژی به دلیل افزایش برگشت‌ناپذیری حرارتی و رشد LCOE تا حدود ۰.۱۵ دلار بر کیلووات‌ساعت می‌شود. بررسی نسبت S/C نیز نشان داد که مقدار بهینه آن در بازه ۲ تا ۲.۵ موجب بیشینه شدن بازده کل سامانه و کمینه شدن هزینه واحد محصول است. نتایج تحلیل‌ها اثبات می‌کند که ادغام فناوری خورشیدی با فرآیند ریفورمینگ بخار متان قادر است با افزایش راندمان ترمودینامیکی، بازیافت حرارت و کاهش هزینه‌های تولید انرژی به‌عنوان یک راهکار کارآمد و پایدار در تولید هم‌زمان برق و حامل‌های انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرد.

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

۱. مقدمه

این با افزایش روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی و محدودیت منابع فسیلی، نیاز به توسعه سامانه‌هایی که هم از نظر بازدهی و هم از نظر پایداری زیست‌محیطی برتری داشته باشند، بیش از هر زمان دیگری احساس می‌شود. در دهه‌های اخیر، چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و تهدید امنیت انرژی، رویکرد جدیدی در میان پژوهشگران و سیاست‌گذاران ایجاد کرده است که در آن تأکید بر استفاده از منابع تجدیدپذیر و فناوری‌های چندمنظوره تولید انرژی قرار دارد. سیستم‌های ترکیبی یا هیبریدی انرژی، به‌عنوان نسل پیشرفته فناوری‌های مدرن، با ترکیب چند فرآیند حرارتی و شیمیایی به‌صورت هم‌زمان، راهکاری مؤثر برای افزایش راندمان و کاهش اتلاف منابع انرژی ارائه می‌دهند. در این میان، سامانه‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی جایگاه ویژه‌ای دارند، زیرا این منبع انرژی نه تنها از پتانسیل بسیار بالا برخوردار است، بلکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند به‌صورت پیوسته در سیکل‌های حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. یک استراتژی مؤثر در این حوزه،



هم‌افزایی انرژی خورشید با فرایندهای ارتقای سوخت مانند ریفورمینگ و الکترولیز است. این ترکیب ضمن کاهش شدت وابستگی به سوخت‌های فسیلی، امکان تولید هم‌زمان توان الکتریکی و حامل‌هایی نظیر هیدروژن را فراهم می‌سازد که از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی نیز مزایای قابل توجهی دارد. از دیدگاه مهندسی سیستم، بهره‌گیری از چنین ساختارهای چندمنظوره موجب می‌شود انرژی گرمایی خورشید به شکل‌های گوناگون به کار گرفته شود و در سطوح دمایی مختلف پاسخ‌گوی نیازهای متفاوت باشد؛ به گونه‌ای که بخشی از انرژی برای تولید توان، بخشی برای تأمین حرارت فرآیند و بخش دیگر برای واکنش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر، ترکیب انرژی خورشیدی با فناوری‌های اصلاح گازی، گازی‌سازی زیست‌توده و نیز الکترولیز آبی به‌عنوان مفهومی مطرح شده است که توان ایجاد سامانه‌های صفرکربن را داراست. در ادامه به بررسی برخی از مقالات در این حوزه پرداخته شده است.

آریان‌فر و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی پیشرفته‌ای در قالب تحلیل E4 (انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی) برای یک سامانه تولید هم‌زمان مبتنی بر سیکل ارگانیک رانکین خورشیدی انجام دادند. در این پژوهش از مدل‌سازی ترکیبی منابع مختلف انرژی شامل کلکتورهای تخت و سهموی خورشیدی، بویلر گازی و همچنین صفحات فتوولتائیک جهت توان کمکی بهره گرفته شد تا سناریوهای گوناگون تولید انرژی در ایران مقایسه شوند. نتایج نشان داد که کمترین هزینه تولید انرژی مربوط به بویلرهای گازی و بیشترین مقدار مربوط به کلکتورهای تخت است. استفاده بهینه از منابع در حالت مدار باز موجب افزایش بهره‌وری بیش از ۸ درصد می‌شود، هرچند مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری نسبت به حالت مدار بسته است. سو و همکاران (۲۰۱۸) یک مطالعه بهینه‌سازی بر عملکرد سامانه تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرمایش (CCHP) مبتنی بر انرژی خورشیدی و اصلاح زیست‌گاز انجام دادند. با بهره‌گیری از داده‌های واقعی اقلیمی شهر لاهسا در تبت و الگوریتم ژنتیک برای دنبال کردن بار الکتریکی کامل، مدل بهینه‌ای برای تنظیم دقیق پارامترهای طراحی توسعه یافت. نتایج نشان داد که توان بهینه موتور و زمان ماند هیدرولیکی به ترتیب برابر با ۱۰۵۲ کیلووات و ۲۶۰۰۲ ساعت است. در پیکربندی بهینه، مصرف گاز طبیعی ۳۰۳ درصد و استفاده از برق شبکه ۷۷۰۸ درصد کاهش یافت. تحلیل حساسیت نیز مشخص کرد که قیمت برق بیشترین اثر را بر دوره بازگشت سرمایه دارد و اهمیت اقتصاد محلی انرژی را در چنین سامانه‌هایی برجسته می‌سازد. کیانفراد و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد اگزرژی و اقتصادی سامانه‌ای ترکیبی برای تولید هیدروژن و آب مقطر را بررسی کردند. این سامانه از چرخه ارگانیک رانکین دوبالایی زمین‌گرمایی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون (PEM) و واحد تقطیر اسمز معکوس تشکیل شده بود. تحلیل اگزرژی نشان داد که نزدیک به ۵۹ درصد تخریب کل اگزرژی در بخش ORC رخ می‌دهد و افزایش دمای سیال زمین‌گرمایی منجر به کاهش بازده کلی اگزرژی می‌شود. نتایج اگزرواقتصادی نیز آشکار کرد که ORC حدود ۵۶ درصد از کل هزینه سرمایه‌گذاری را شامل می‌شود و دوره بازگشت سرمایه ۶۰۵ ساله، علی‌رغم هزینه اولیه بالا، پایایی اقتصادی سیستم را توجیه می‌کند. بهزادی و همکاران (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی طراحی چندهدفه سیستم خورشیدی تولید هم‌زمان برق، سرمایش و هیدروژن پرداختند. مطالعه پارامتری نشان داد که افزودن مولد ترموالکتریک سبب افزایش بازده اگزرژی، بهبود نرخ تولید هیدروژن، کاهش نرخ کل هزینه و کوتاه‌تر شدن دوره بازگشت می‌گردد. در شرایط بهینه، بازده اگزرژی سیستم به ۱۲۰۰۱ درصد رسید و نرخ کل هزینه برابر ۰۰۱۷۶۲ دلار در ساعت بود که بر کارایی بالای اگزرواقتصادی پیکربندی پیشنهادی تأکید دارد. نیاسر و همکاران (۲۰۱۹) سامانه‌ای ترکیبی برای تبدیل گاز طبیعی به سوخت مایع همراه با تولید سرمایش جذبی و نمک‌زدایی چندمرحله‌ای طراحی و تحلیل کردند. بیشترین تخریب اگزرژی در راکتورهای اتوترمال ریفورمر (۳۱۰۴ درصد) مشاهده شد. همچنین مبدل حرارتی E110 و شیر انبساط V4 بالاترین (۹۸۰۵۳ درصد) و پایین‌ترین (۴۹۰۱۳ درصد) راندمان اگزرژی را داشتند. ارزیابی اقتصادی، دوره بازگشت سرمایه حدود ۵۰۸ سال و هزینه سوخت مایع اصلی برابر ۲۹۶۰۳ دلار در هر تن را گزارش کرد که نشانگر توجیه‌پذیری سرمایه‌گذاری در این طرح ترکیبی است. محمدخانی و همکاران (۲۰۲۰) سامانه جامع CCHP مبتنی بر انرژی خورشیدی،



زیست‌گاز، زمین‌گرمایی و بادی را طراحی و ارزیابی کردند و بهینه‌سازی لحظه‌ای را بر اساس الگوریتم ژنتیک انجام دادند. مدل‌سازی کامل شامل پنل‌های PV، توربین‌های بادی، کلکتورهای خورشیدی و ذخیره‌ساز ترکیبی بود تا عملکرد اقتصادی و انرژی در شرایط خارج از شبکه به حداکثر برسد. نتایج، کاهش وابستگی به سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌ها را نشان داد و در طرح بهینه، بازده انرژی به ۶۲٫۵ درصد و دوره بازگشت سرمایه به کمتر از ۸ سال رسید. غنایی و همکاران (۲۰۲۱) کارایی و بهینه‌سازی سامانه نمک‌زدایی چنداثره (MED) هیبریدی را بررسی کردند که با انرژی حرارتی خورشیدی و برای آب دریا با شوری بالا کار می‌کرد. نتایج بیانگر افزایش ۲٫۶۸ برابری در تولید آب شیرین و کاهش ۵۷٫۷۸ درصدی مصرف ویژه انرژی با افزودن واحد نمک‌زدایی جذبی بود. در فرآیند بازیافت حرارت از شورابه باقی‌مانده، نرخ تولید آب شیرین و نسبت عملکرد به ترتیب ۱۴٫۷۳ و ۱۲٫۸۶ درصد افزایش یافت، درحالی‌که مصرف ویژه انرژی ۱۱٫۳۴ درصد کاهش یافت. عسگری و امیری (۲۰۲۱) ارزیابی فنی-اقتصادی سامانه‌های نمک‌زدایی چنداثره را که با منابع حرارتی خورشیدی گوناگون ترکیب شده بودند انجام دادند. نتایج بیانگر آن است که هزینه واحد تولید آب شیرین به شدت به نوع فناوری خورشیدی، هزینه سرمایه، شدت تابش، نرخ تولید آب، دمای آب دریا و میزان شوری وابسته است. ترکیب سامانه MED با کلکتورهای خورشیدی دما پایین (۶۰ تا ۹۵ درجه)، متوسط (۱۶۵ تا ۲۰۰ درجه) و بالا (۳۷۰ تا ۵۳۰ درجه) به ترتیب منجر به هزینه تولید آب شیرین در محدوده ۲ تا ۳٫۰۶ دلار به ازای هر مترمکعب شد.

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 حالی‌که 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

کلیه در این پژوهش، چارچوب تحلیلی با هدف ارزیابی رفتار ترمودینامیکی سیستم‌های ترکیبی انرژی خورشیدی طراحی شده است. رویکرد اصلی مبتنی بر مدل‌سازی حالت پایا (steady-state) بوده و بر قانون اول و دوم ترمودینامیک استوار است. برای ارزیابی دقیق عملکرد، هر زیرسامانه به صورت حجم کنترلی مستقل تعریف شده و روابط تعادل انرژی، انرژی و تلفات حرارتی به صورت کلی مورد محاسبه قرار گرفته‌اند.

تحلیل‌ها بر اساس شرایط محیطی استاندارد انجام شده است؛ فشار محیط برابر با $P_0 = 1 \text{ atm}$ و دمای مرجع $T_0 = 298 \text{ K}$ جریان‌های کاری در حالت پایدار در نظر گرفته شده‌اند. انتقال حرارت بین اجزا در حالت پایا، بدون اتلاف مکانیکی جزئی مدل‌سازی گردید. انرژی تابشی خورشید به صورت شار حرارتی معادل تعریف شد:

$$Q_{\text{solar}} = A * I * \eta_{\text{opt}} \quad (1)$$

که در آن I شدت تابش خورشیدی در وات بر متر مربع، A سطح جذب‌کننده و η_{opt} بازده اپتیکی کل سیستم است.

۲.۱. مدل انرژی

قانون اول ترمودینامیک برای هر جزء به صورت کلی بیان می‌شود:

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

که در آن Q نرخ انتقال گرما، W توان مبادله‌شده، و h آنتالپی ویژه جریان‌های ورودی و خروجی است. بازده انرژی کل سیستم از نسبت توان مفید خروجی به مجموع انرژی خورشیدی ورودی محاسبه می‌گردد:

$$\eta_{energy} = \frac{W_{net} + Q_{useful}}{Q_{solar}} \quad (3)$$

برای ارزیابی رفتار حرارتی در شرایط مختلف، تغییر بازده انرژی بر حسب شدت تابش، دمای منبع حرارت، و نرخ جریان سیال شبیه‌سازی شد.

2.2. مدل آگرژی

تحلیل آگرژی دیدی عمیق‌تر از کیفیت تبدیل انرژی ارائه می‌دهد. بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، میزان آگرژی ورودی و خروجی هر جزء مطابق رابطه کلی زیر ارزیابی شده است:

$$E_{in} - E_{out} = E_{destroyed} \quad (2)$$

که در آن $E_{destroyed}$ میزان تخریب آگرژی ناشی از برگشت‌ناپذیری‌ها است. آگرژی انتقال حرارت از منبعی با دمای T به محیط به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$E_Q = (1 - \frac{T_0}{T})Q \quad (3)$$

و آگرژی مرتبط با جریان‌های جرمی از رابطه کلی به دست می‌آید:

$$E_m = m[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (4)$$

بازده آگرژی سیستم برابر است با نسبت آگرژی مفید خروجی به مجموع آگرژی ورودی:

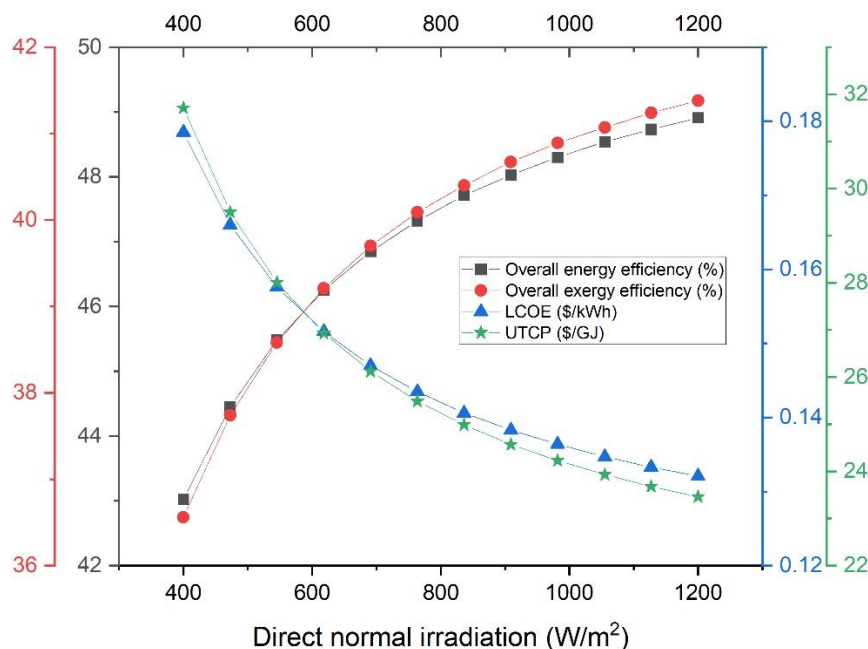
$$\eta_{exergy} = \frac{E_{useful}}{E_{input}} \quad (5)$$

به منظور بررسی پایداری عملکرد سیستم، پارامترهای کلیدی نظیر دمای کاری منبع حرارت، شدت تابش خورشیدی، و نسبت انتقال حرارت میان زیرسامانه‌ها تغییر داده شدند. برای هر سناریو، بازده انرژی و آگرژی محاسبه و نمودارهای تغییرات آن نسبت به پارامترهای مستقل تولید گردید. نتایج نشان دادند که افزایش دمای منبع و کاهش تلفات همرفتی بیشترین تأثیر را بر افزایش راندمان دارد.

مدل‌ها با استفاده از کدنویسی محاسباتی در محیط تحلیلی مانند MATLAB یا EES بر پایه تکرار عددی حل شدند. الگوریتم بهینه‌سازی ساده بر مبنای کاهش تخریب آگرژی اجرا شد تا نقطه عملکرد بهینه حاصل گردد. نرخ همگرایی با معیار کمتر از 10^{-5} برای تغییرات انرژی بین تکرارها تعیین شد.

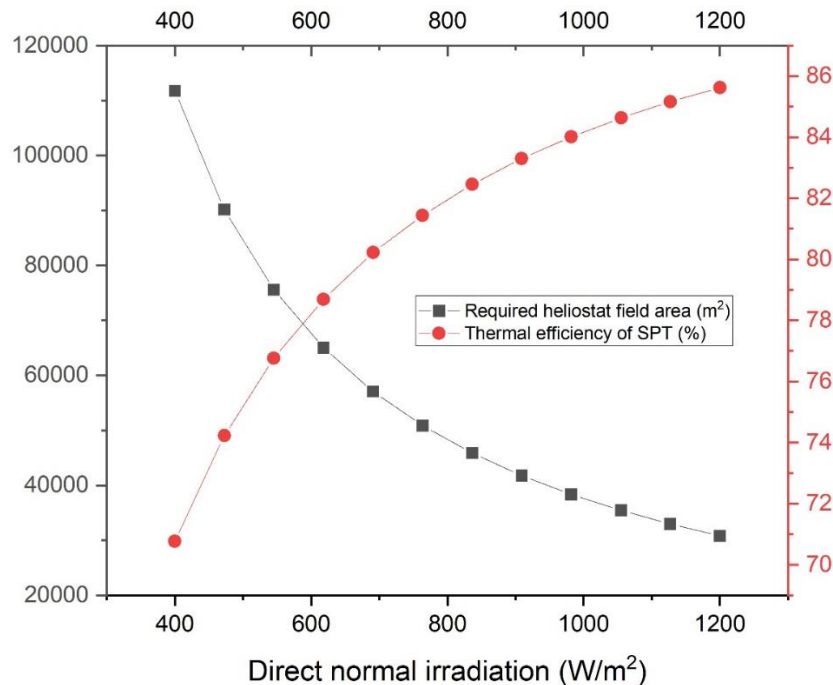
۳. نتایج

در شکل ۱ اثر شدت تابش خورشیدی بر عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی سامانه ترکیبی بررسی شده است. افزایش تابش مستقیم از حدود ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع باعث افزایش دمای کاری و چگالی انرژی جذب‌شده در برج خورشیدی می‌شود که در نتیجه سطح مورد نیاز گیرنده کاهش یافته و بازده کل انرژی و اگزرژی سامانه بهبود می‌یابد. بر اساس نتایج، بازده انرژی حدود ۴ تا ۵ درصد و بازده اگزرژی نزدیک به ۵ تا ۶ درصد افزایش دارد، در حالی که هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت برق از حدود ۰/۱۸ دلار به نزدیک ۰/۱۳ دلار کاهش می‌یابد. همچنین هزینه کل واحد محصولات از حدود ۳۲ دلار بر گیگاژول به حدود ۲۲ دلار بر گیگاژول می‌رسد. روند کلی بیانگر آن است که با افزایش شدت تابش، سامانه از نظر بازده حرارتی و اقتصادی کارآمدتر شده و در مناطق با تابش بالاتر، هم از دید فنی و هم از نظر مالی دارای برتری قابل ملاحظه‌ای خواهد بود.



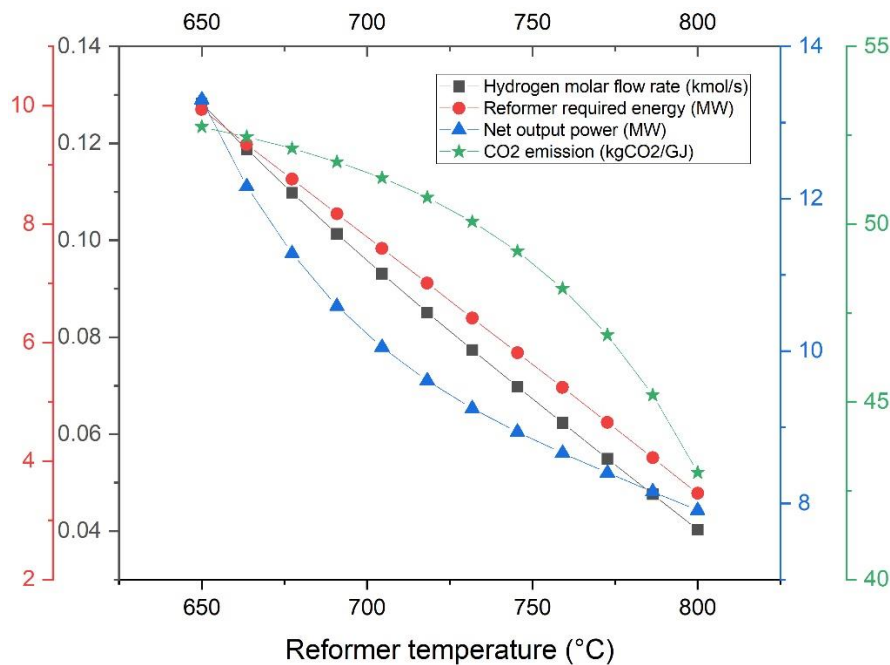
شکل ۱: بررسی تاثیر میزان تابش خورشیدی بر راندمان اگزرژی، انرژی، هزینه تراز شده و هزینه واحد کل محصولات

شکل ۲ رابطه میان شدت تابش مستقیم خورشیدی و دو شاخص اصلی عملکرد برج خورشیدی را نشان می‌دهد: مساحت مورد نیاز میدان آینه‌ها (هلیوستات) و بازده حرارتی کل سیستم (SPT). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت تابش از حدود ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع، روند دو متغیر کاملاً متضاد است؛ بازده حرارتی به طور پیوسته افزایش یافته در حالی که مساحت میدان آینه‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در شدت تابش‌های پایین، توان تابشی دریافتی توسط هر آینه کمتر است و برای جبران این کمبود، سطح بزرگ‌تری از هلیوستات‌ها لازم می‌شود، به‌طوری‌که در حدود ۴۰۰ W/m² مساحت مورد نیاز بیش از ۱۰۰ هزار مترمربع است. اما با افزایش تابش تا حدود ۱۲۰۰ W/m²، این مساحت به کمتر از ۳۵ هزار مترمربع می‌رسد که نشانگر افزایش شدید بهره‌وری فضایی برج خورشیدی است. بازده حرارتی نیز به دلیل رشد توان تابشی و کاهش تلفات پخش و همرفت در سطح گیرنده، از حدود ۷۱ درصد در شدت کم تا حدود ۸۶ درصد در شدت بالا افزایش می‌یابد.



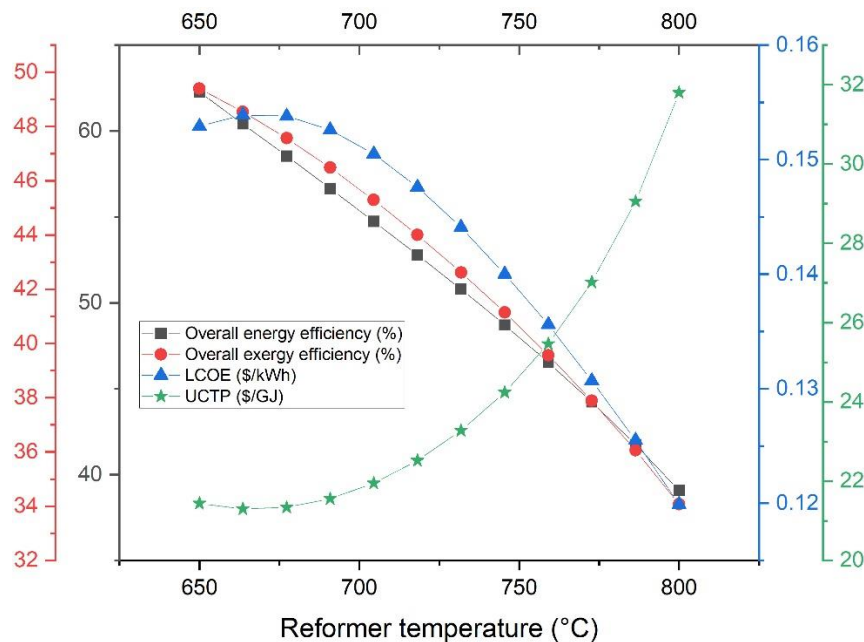
شکل ۲: بررسی تاثیر تابش خورشیدی بر راندمان و مساحت برج خورشیدی

شکل ۳ تأثیر تغییر دمای ریفورمر را بر چهار شاخص مهم عملکردی سیستم ترکیبی نشان می‌دهد: دبی مولی هیدروژن تولیدی، انرژی مورد نیاز ریفورمر، توان خالص خروجی، و میزان انتشار دی‌اکسیدکربن. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای ریفورمر از حدود ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس، تمامی پارامترها روندی نزولی دارند. دبی مولی هیدروژن از حدود ۰/۱۲ تا نزدیک ۰/۰۴ کیلومول بر ثانیه کاهش می‌یابد که علت آن کاهش غلظت نسبی متان واکنش‌نداده و افزایش برگشت‌پذیری واکنش اصلاح بخار در دماهای بالا است. توان خالص خروجی سیستم نیز از حدود ۱۴ به نزدیک ۸ مگاوات افت می‌کند، زیرا بخشی از انرژی حرارتی بیشتر در دماهای بالا صرف تأمین گرمای مورد نیاز واکنش شده و سهم انرژی مفید خروجی کاهش می‌یابد. به موازات آن، انرژی حرارتی لازم برای ریفورمر از حدود ۱۰ مگاوات در دمای پایین به حدود ۲ مگاوات در دمای بالاتر افت می‌کند که نشان می‌دهد فرآیند در دمای زیاد به حالت نزدیک‌تر به تعادل گرمایی رسیده و گرمایش اضافی مورد نیاز کمتر است. همچنین انتشار گاز CO₂ که در ابتدا حدود ۵۵ کیلوگرم بر گیگاژول بوده، در انتهای بازه دمایی به حدود ۴۰ کیلوگرم بر گیگاژول کاهش می‌یابد، زیرا با بهبود واکنش‌های گرماگیر اصلاح بخار، نسبت سوخت مصرفی کاهش یافته و احتراق کمتری رخ می‌دهد.



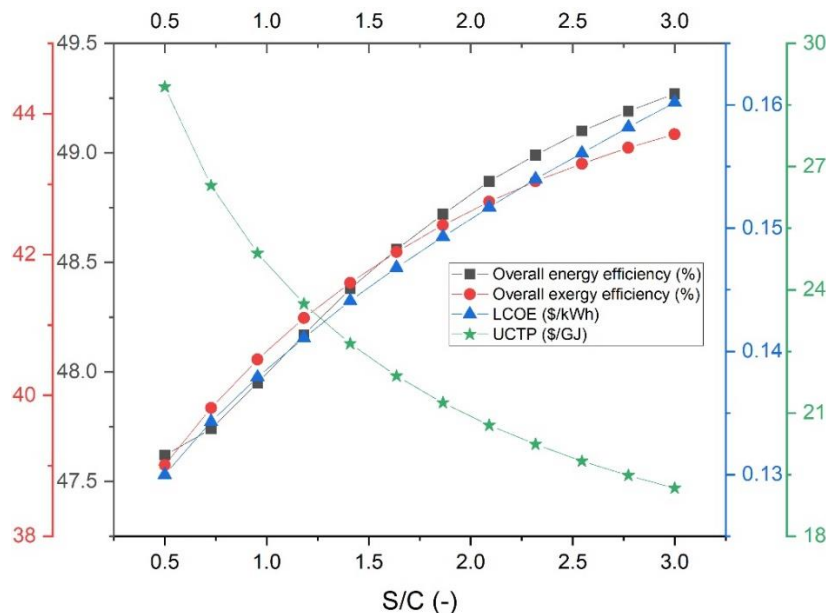
شکل ۳: بررسی تأثیر دما ریفورمر بر سیستم تولید چندگانه

این نمودار تأثیر تغییر دمای ریفورمر را بر چهار شاخص عملکردی کل سیستم نشان می‌دهد: بازده انرژی، بازده انرژی، هزینه تراز شده تولید برق (LCOE) و هزینه کل واحد محصولات (UTCP). نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای ریفورمر از حدود ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس، بازده انرژی و انرژی به صورت یکنواخت کاهش یافته‌اند؛ به طوری که بازده انرژی از حدود ۴۹ درصد در دمای پایین به نزدیک ۳۸ درصد در دمای بالا، و بازده انرژی از حدود ۴۸ درصد به حدود ۳۶ درصد افت کرده است. این کاهش ناشی از افزایش برگشت‌ناپذیری‌های حرارتی در واکنش‌های گرماگیر اصلاح بخار متان و افزایش تلفات حرارتی در مبدل‌ها است. از دید اقتصادی، با افزایش دما، هزینه تراز شده انرژی (LCOE) از حدود ۰/۱۲ تا نزدیک ۰/۱۵ دلار بر کیلووات‌ساعت افزایش می‌یابد، که ناشی از افت توان مفید و کارایی پایین‌تر در تبدیل انرژی حرارتی به برق است. در مقابل، هزینه کل واحد محصولات (UTCP) در بازه پایین‌تر دمایی روندی تقریباً ثابت داشته ولی از حدود ۷۵۰ درجه به بعد با شیبی تند تا حدود ۳۲ دلار بر گیگاژول افزایش پیدا می‌کند، زیرا کاهش بازده کلی موجب افزایش هزینه نسبی در هر واحد انرژی خروجی می‌شود. به طور کلی، افزایش بیش از حد دمای ریفورمر به دلیل افت بازده حرارتی و اقتصادی، منجر به عملکرد کمتر بهینه سیستم می‌گردد؛ بنابراین محدوده‌ی دمایی میانه، حدود ۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سلسیوس، بهترین نقطه تعادل بین کارایی ترمودینامیکی و صرفه اقتصادی برای سیستم محسوب می‌شود.



شکل ۴: بررسی تاثیر دما ریفورمر بر سیستم تولید چندگانه

این نمودار اثر نسبت بخار به کربن (S/C) را بر شاخص‌های عملکردی کل سیستم نشان می‌دهد؛ از جمله بازده انرژی، بازده انرژی، هزینه تراز شده انرژی ($LCOE$) و هزینه کل واحد محصولات ($UCTP$). با افزایش نسبت S/C از حدود ۰/۵ تا ۳، مشاهده می‌شود که بازده انرژی و انرژی هر دو روندی صعودی دارند. بازده انرژی از حدود ۴۷/۵ درصد به نزدیک ۴۹/۳ درصد و بازده انرژی از حدود ۴۷ درصد به حدود ۴۹ درصد افزایش یافته است. این بهبود ناشی از کامل‌تر شدن واکنش ریفورمینگ بخار متان در حضور بخار اضافی است؛ افزایش بخار باعث کاهش تشکیل کک، بهبود انتقال جرم و کاهش افت دما در مبدل‌ها می‌شود که در نتیجه تخریب انرژی کاهش می‌یابد و تبدیل حرارتی در سیستم بهینه‌تر صورت می‌گیرد. در مقابل، $LCOE$ (هزینه تراز شده انرژی) روندی افزایشی ملایم دارد، از حدود ۰/۱۲۵ به حدود ۰/۱۶ دلار بر کیلووات‌ساعت، زیرا نسبت بالاتر بخار منجر به افزایش نیاز حرارتی ریفورمر و در نتیجه افزایش هزینه عملیاتی سیستم می‌شود. در سوی دیگر، $UCTP$ (هزینه کل واحد محصولات) رفتاری کاهشی از حدود ۳۰ به نزدیکی ۱۸ دلار بر گیگاژول نشان می‌دهد، که ناشی از افزایش راندمان کلی و تولید مؤثرتر حامل‌های انرژی در نسبت‌های بالاتر S/C است. در جمع‌بندی، افزایش نسبت S/C تا حدود ۲ الی ۲/۵ موجب افزایش توأمان کارایی انرژی و انرژی و کاهش قابل ملاحظه هزینه کل محصولات می‌گردد، اما از آن نقطه به بعد به دلیل افزایش مصرف حرارتی و هزینه‌های بخار تزریقی، بهبود بازده‌ها کند و رشد هزینه‌ها محسوس می‌شود. بنابراین، نسبت بهینه S/C برای دستیابی به تعادل میان کارایی ترمودینامیکی و صرفه اقتصادی سیستم در محدوده‌ی ۲ تا ۲/۵ برآورد می‌شود.



شکل ۵: تاثیرات نسبت بخار کربن بر پارامترهای عملکردی سیستم

۴. نتیجه گیری کلی و پیشنهادات

در این پژوهش، یک سامانه ترکیبی انرژی مبتنی بر منبع حرارتی خورشیدی و فرآیند ریفرمینگ بخار متان به‌منظور تولید هم‌زمان توان الکتریکی و حامل‌های انرژی پاک (مانند هیدروژن) مورد تحلیل ترمودینامیکی و عملکردی قرار گرفت. چارچوب محاسباتی بر پایه مدل‌سازی حالت پایا و قوانین اول و دوم ترمودینامیک تدوین شد تا شاخص‌های بازده انرژی، بازده انرژی، هزینه تراز شده تولید برق (LCOE) و هزینه کل واحد محصولات (UTCP) در شرایط گوناگون تابشی و عملیاتی ارزیابی گردد. نتایج نشان دادند که افزایش شدت تابش خورشیدی از ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع موجب بالا رفتن دمای کاری برج خورشیدی و به تبع آن افزایش بازده‌های انرژی و انرژی در حدود ۵ تا ۶ درصد می‌شود، در حالی که هزینه تراز شده برق و هزینه واحد محصولات به ترتیب حدود ۲۸ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. این روند بیانگر آن است که سامانه در مناطق با تابش بالاتر نه تنها از نظر کارایی فنی بلکه از دیدگاه اقتصادی نیز عملکرد مطلوب‌تری دارد.

تحلیل اثر دمای ریفرمر نشان داد که افزایش دما از ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس باعث افت تدریجی بازده‌های انرژی و انرژی به دلیل افزایش برگشت‌ناپذیری‌های حرارتی و تخریب انرژی در راکتور ریفرمر می‌شود. هزینه تراز شده انرژی نیز در این حالت از ۰/۱۲ تا حدود ۰/۱۵ دلار بر کیلووات‌ساعت افزایش می‌یابد. از دید اقتصادی-عملکردی، بازه دمای ۷۰۰ تا ۷۵۰^oC بهترین نقطه تعادل بین کارایی حرارتی و هزینه‌های تولید را نشان داده است.

بررسی نسبت بخار به کربن (S/C) در ریفرمینگ بخار متان حاکی از آن است که افزایش این نسبت تا حدود ۲ تا ۲/۵ موجب رشد هم‌زمان بازده‌های انرژی و انرژی و کاهش قابل ملاحظه هزینه کل واحد محصولات می‌گردد، اما افزایش بیشتر از این مقدار به دلیل نیاز به حرارت بالاتر و هزینه بخار اضافی، تأثیر منفی بر عملکرد اقتصادی دارد. در نتیجه، نسبت بهینه S/C در محدوده ۲ تا ۲/۵ برای دستیابی به تعادل ترمودینامیکی-اقتصادی پیشنهاد می‌شود.

۵. پیشنهادات

۱. افزایش دقت مدل‌سازی با در نظر گرفتن رفتار گذرا و نوسانات تابش لحظه‌ای و بررسی اثر ذخیره‌سازی حرارت در سیکل عملکردی.
۲. تحلیل زیست‌محیطی و اقتصادی جامع (4E) شامل ارزیابی چرخه عمر، انتشار CO_2 ، و شاخص هزینه-آلاینده برای مقایسه با سایر فناوری‌های تجدیدپذیر.
۳. ترکیب ریفرمینگ با منابع زمین گرمایی یا زیست‌گاز به‌منظور ایجاد سامانه‌های چندمنظوره پایدار با قابلیت کارکرد مداوم در شرایط مختلف اقلیمی.
۴. بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس الگوریتم‌های فرامکاشفه‌ای (مانند ژنتیک یا ازدحام ذرات) با اهداف هم‌زمان بیشینه‌سازی بازده و کمینه‌سازی هزینه.
۵. مطالعه تجربی و اجرای پایلوت صنعتی برای سنجش تطابق نتایج عددی با رفتار واقعی، به‌ویژه در مقیاس توان‌های بالاتر از ۱۰ مگاوات.

۶. مراجع

1. Ariyanfar, L., M. Yari, and E. Abdi Aghdam, *Energy, exergy, economic, environmental (4E) analyses of a solar organic Rankine cycle to produce combined heat and power*. Modares Mechanical Engineering, 2017. **16**(10): p. 229-240.
- 2.7. Su, B., et al., *Performance optimization of a solar assisted CCHP based on biogas reforming*. Energy conversion and management, 2018. **171**: p. 604-617.
- 3.8. Kianfard, H., S. Khalilarya, and S. Jafarmadar, *Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC*. Energy conversion and management, 2018. **177**: p. 339-349.
- 4.9. Behzadi, A., et al., *Multi-objective design optimization of a solar based system for electricity, cooling, and hydrogen production*. Energy, 2019. **169**: p. 696-709.
- 5.10. Niasar, M.S., et al., *Developing a hybrid integrated structure of natural gas conversion to liquid fuels, absorption refrigeration cycle and multi effect desalination (exergy and economic analysis)*. Energy, 2019. **189**: p. 116162.
- 6.11. Abdolalipouradl, M., et al., *Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy*. Energy Conversion and Management, 2020. **226**: p. 113544.
- 7.12. Ghenai, C., et al., *Performance analysis and optimization of hybrid multi-effect distillation adsorption desalination system powered with solar thermal energy for high salinity sea water*. Energy, 2021. **215**: p. 119212.
- 8.13. Askari, I.B. and M. Ameri, *A techno-economic review of multi effect desalination systems integrated with different solar thermal sources*. Applied Thermal Engineering, 2021. **185**: p. 116323.