



Semnan University



Type of Article (e.g. Research Article)

Thermodynamic Analysis of a Novel Trigeration System Utilizing Solar Energy

Hadi Ghaebi ^{a,*}, Ghader Abbaspour ^b

^a Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

^b PhD student in mechanical engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

Keywords:

Copper-Chlorine (Cu-Cl)

Hydrogen Production;

Solar Tower Technology;

Clean energy;

Cogeneration System;

ABSTRACT

This study explores the integration of solar tower technology and thermal energy storage (TES) within the framework of a supercritical carbon dioxide (Sc-CO₂) Brayton cycle, a copper-chlorine (Cu-Cl) hydrogen production cycle, and a heat recovery steam generator (HRSG) for the generation of superheated steam. The combination of these subsystems enhances overall energy efficiency, ensures uninterrupted operation, and minimizes exergy loss. Comprehensive energy and exergy analyses were conducted to evaluate the performance and requirements of each subsystem, highlighting the thermodynamic advantages of this integrated approach. The Engineering Equation Solver (EES) software was used to model the system and calculate thermodynamic properties from the EES library. The results show that, in the basic design configuration, exergy destruction amounts to 9930 kW in the solar tower, 7111 kW in the Sc-CO₂ Brayton cycle, and 9735 kW in the Cu-Cl cycle. The system is capable of producing 4226 kW of power, 2697 kW of heat, and 0.04971 kg/s of hydrogen. The overall energy and exergy efficiencies of the plant are 17.48% and 18.72%, respectively. These findings demonstrate that this integrated system effectively addresses existing gaps in the literature by presenting a novel combination of solar-powered Cu-Cl hydrogen production and superheated steam generation. The proposed system contributes to the advancement of renewable, efficient, and continuous energy production.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: hghebi@uma.ac.ir

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

تحلیل ترمودینامیکی یک سیستم تولید سه گانه نوین با به کارگیری انرژی خورشیدی

هادی غائبی^{۱*}، قادر عباسپور^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	این مطالعه به بررسی ترکیب فناوری برج خورشیدی و ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES ^۱) با یک چرخه برایتون دی‌اکسید کربن فوق بحرانی (Sc-CO ₂ ^۲)، چرخه تولید هیدروژن مس-کلر (Cu-Cl ^۳) و یک مولد بخار بازیابی حرارت (HRSG ^۴) برای تولید بخار فوق گرم می‌پردازد. ترکیب این زیرسیستم‌ها بهره‌وری کلی انرژی را افزایش داده، عملیات بدون وقفه را تضمین کرده و اتلاف انرژی را به حداقل می‌رساند. تحلیل‌های جامع انرژی و انرژی برای ارزیابی عملکرد و نیازهای هر زیرسیستم انجام شد که مزایای ترمودینامیکی این سیستم ترکیبی را برجسته می‌سازد. برای مدل‌سازی سیستم و محاسبه خواص ترمودینامیکی از نرم‌افزار EES ^۵ استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در مدل‌سازی طراحی پایه، اتلاف انرژی در برج خورشیدی به میزان ۹۹۳۰ کیلووات، در چرخه برایتون Sc-CO ₂ به میزان ۷۱۱۱ کیلووات و در چرخه Cu-Cl به میزان ۹۷۳۵ کیلووات است. این سیستم قادر است ۴۲۲۶ کیلووات توان، ۲۶۹۷ کیلووات گرما و ۰/۰۴۹۷۱ کیلوگرم بر ثانیه هیدروژن تولید کند. بازدهی کلی انرژی و انرژی نیروگاه به ترتیب ۱۷/۴۸٪ و ۱۸/۷۲٪ است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که این سیستم یکپارچه به‌طور مؤثری شکاف‌های موجود در پژوهش‌ها را با ارائه یک ترکیب نوآورانه از تولید هیدروژن با انرژی خورشیدی و تولید بخار فوق گرم پوشش می‌دهد و همچنین سیستم پیشنهادی به پیشرفت تولید انرژی تجدیدپذیر، کارآمد و پیوسته کمک می‌کند.
بازنگری مقاله:	
پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی:	
تولید هیدروژن مس-کلر، فناوری برج خورشیدی، انرژی پاک، سیستم تولید همزمان،	

DOI: DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. .(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

زیرساختی کمتر ظاهر شده‌اند. پژوهش‌ها اکنون بر ادغام فناوری‌های برج خورشیدی متمرکز شده‌اند [۱،۲]. در سیستم‌های حرارتی خورشیدی متمرکز و گیرنده‌ها نقش حیاتی ایفا می‌کنند. گیرنده‌های ذرات جامد که قادر به

۱-مقدمه

با افزایش تقاضای انرژی و نگرانی‌های مربوط به آلودگی، انرژی خورشیدی، به‌ویژه سیستم‌های هلیوستات، به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده به دلیل کارایی بالا و نیازهای

¹ Thermal Energy Storage

² Supercritical Carbon Dioxide

³ Copper-Chlorine

⁴ Heat Recovery Steam Generator

⁵ Engineering Equation Solving Software

منفی بر تولید آب شیرین و کارایی انرژی داشت. یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. میلاد و همکاران [۱۰] از TES برای تثبیت یک مبدل ترموالکتریکی فلز قلیایی (AMTEC⁵) در طول نوسانات خورشیدی در بندرعباس ایران استفاده کردند. مدل‌سازی TRNSYS نشان داد که با مساحت هلیوستات ۱۴۵۰۰ متر مربع و با TES به ظرفیت ۲۸/۱۳ متر مکعب به کارایی ۱۸٪ دست یافت و بهترین عملکرد در ماه‌های ژوئن و ژوئیه بود. وانگ و همکاران [۱۱] یک برج خورشیدی با نمک مذاب را که با چرخه برایتون Sc-CO₂ یکپارچه شده بود، مطالعه کردند. مدل آن‌ها که شامل یک میدان هلیواستات، جمع‌کننده خورشیدی نمک مذاب، TES و چرخه برایتون Sc-CO₂ با گرمایش مجدد بود، به دمای نمک داغ ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد دست یافت. محمد امین و همکاران [۱۲] یک نیروگاه سیکل ترکیبی را در آبادان ایران با سه پیکربندی یکپارچه خورشیدی ارزیابی کردند. اولین پیکربندی به کارایی انرژی ۴۲/۵۶٪ و کارایی انرژی ۳۹/۴۲٪ با کمترین هزینه دست یافت. دومین پیکربندی به بالاترین کارایی انرژی ۵۱/۳۸٪ و کارایی انرژی ۴۱/۷۵٪ دست یافت. سومین پیکربندی به کارایی انرژی ۴۷/۸٪ و کارایی انرژی ۴۰/۹۷٪ رسید و بیشترین مقدار برق را تولید کرد. ال-سلیمان [۱۳] به بررسی ابعاد دیگ کمکی در یک سیستم چرخه برایتون Sc-CO₂ خورشیدی با سیستم تراکم مجدد پرداخت. این مطالعه بر تعیین ابعاد مورد نیاز برای دیگ با طول ثابت هلیواستات متمرکز بود و تأثیر دمای ورودی توربین را بر کار خالص خروجی، کارایی انرژی و انرژی تجزیه و تحلیل کرد. پژوهش نشان داد که سهم حرارتی دیگ کمکی در طول روز به ترتیب حدود ۰/۲۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۴ است. ژودونگ و همکاران [۱۴] چارچوبی برای ارزیابی جنبه‌های تجدیدپذیر و بی‌کربن انرژی خورشیدی ارائه دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که هزینه انرژی غیرتجدیدپذیر ۱/۶ برابر بیشتر از برق تولید شده توسط خورشید است و با این حال انرژی خورشیدی همچنان با انتشار قابل توجه کربن همراه است. با وجود این

تحمل دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند، جایگزینی مؤثر برای افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها ارائه می‌دهند، در حالی که نمک مذاب در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شود [۳]. شعیب و همکاران یک سیستم خورشیدی را که ترکیبی از واحد تولید برق ترموالکتریکی (TEG¹) و واحد آب‌شیرین‌کن بود، تحلیل کردند که در مقایسه با سیستم هلیوم-برایتون، کارایی انرژی و انرژی بهتری داشت [۴]. الزهرانی و همکاران، یک برج خورشیدی را با سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (TES) و الکترولیز بخار اکسید جامد (SOSE²) برای تولید هیدروژن ادغام کرده و زیرسیستم‌ها را برای افزایش کارایی بهینه‌سازی کردند. این سیستم در هنگام شارژ TES به کارایی ۱۲/۷٪ و در هنگام تخلیه به کارایی ۳۹/۵٪ دست یافت [۵]. بنمار و همکاران [۶] یک مدل ریاضی برای نیروگاه‌های برج خورشیدی بدون ذخیره‌سازی انرژی توسعه دادند و میدان‌های هلیوستات، گیرنده‌ها، تولید بخار و چرخه‌های قدرت را با یکدیگر ادغام کردند. آن‌ها نحوه تأثیر دمای سطح گیرنده، مساحت و شار حرارتی را بر بازدهی تحلیل کردند. تولگا و همکاران یک سیستم خورشیدی را با استفاده از چرخه منیزیم-کلر برای تولید هیدروژن ارزیابی کردند که به کارایی انرژی ۱۸/۱۸٪ و کارایی انرژی ۱۹/۱۵٪ دست یافتند و بیش از ۵۰٪ کارایی در چرخه منیزیم-کلر را نشان دادند [۷]. فارسی و دنسر [۸] یک سیستم هیبریدی را با ذرات جامد برای انتقال حرارت اصلاح کردند و به کارایی انرژی ۵۰٪ و کارایی انرژی ۵۳/۸٪ برای نیروگاه و ۸۸٪ کارایی انرژی و ۴۴/۲٪ کارایی انرژی برای ذخیره‌سازی مبتنی بر ذرات دست یافتند. بیشترین تخریب انرژی در احتراق بستر سیال تحت فشار (PFBC³) به دلیل واکنش‌های شیمیایی رخ داد. شعیب و همکاران [۹] یک واحد آب‌شیرین‌کن خورشیدی (HDH⁴) را برای تولید آب گرم و سرد، آب شیرین و هیدروژن شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند. سیستم هلیوستات بیشترین تخریب انرژی را داشت و کارایی انرژی برای هلیواستات ۶۵/۳۹٪ و برای پمپ ۵۲/۰۹٪ بود. تنظیمات فشار کمپرسور تأثیر

⁴ Humidification-Dehumidification

⁵ Alkaline metal thermoelectric converter

¹ Thermoelectric Generator

² Solid Oxide Steam Electrolysis

³ Pressurized fluid bed combustion

چرخه برای تون $Sc-CO_2$ ، چرخه ORC با سیلوپنتان و چرخه رانکین بخار را با برج خورشیدی مرکزی و میدان هلیوستات ادغام کرده شده بود مورد بررسی قرار دادند. گرمای خورشیدی دمای هوا در چرخه توربین گاز را افزایش داده و چرخه رانکین را گرم کرد. در این مطالعه تحلیل‌های مختلفی انجام شد و نشان داد که با استفاده از فناوری خورشیدی، مصرف سوخت توربین گاز ۹٪ (۱/۵۳ کیلوگرم در ثانیه) کاهش یافت. همچنین، ادغام انرژی خورشیدی و چرخه رانکین توان خروجی را از ۴۳ مگاوات به ۶۶ مگاوات افزایش داد.

اوزساری و اوست [۲۰] یک تحلیل جامع از سیستم‌های نیروگاه‌های اکسی‌سوزی ارائه دادند و آن‌ها را با سیستم‌های توربین گاز معمولی مقایسه کردند. این مطالعه جنبه‌های انرژی، محیط‌زیست و اقتصادی را ارزیابی کرد و بر عواملی مانند نسبت فشار، کارایی سیستم، مصرف سوخت و هزینه‌ها تمرکز داشت. نتایج کلیدی شامل نسبت فشار بهینه برای حداکثر توان خالص و سود در چرخه‌های اکسی‌سوزی بود که با نسبت‌های اکسیژن تغییر می‌کرد. این مطالعه نتیجه گرفت که کاهش نسبت فشار، هزینه‌های کل را به حداقل می‌رساند و مقادیر بهینه خاص برای سطوح مختلف اکسیژن ارائه شد.

سورگولو و دینسر [۲۱] یک سیستم برج خورشیدی را با TES برای تولید برق و آب شیرین مطالعه کردند. با ذخیره‌سازی حرارتی تا ۱۲ ساعت در دمای ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد، این سیستم ۲۴/۴۶ مگاوات در شرایط آفتابی و ۲۰/۱۷ مگاوات در شرایط ابری و شب تولید کرد و نیازهای آب شیرین و برق خانگی را تأمین نمود. ابرعی و همکاران [۲۲] کارایی یک سیستم ترکیبی خورشیدی جدید را که تحت شرایط متنوع کار می‌کرد، ارزیابی کردند. این سیستم شامل TEG ، TES ، یک واحد تولید آب شیرین و یک مخزن آب گرم بود. یافته‌ها نشان داد که انرژی خورشیدی با تابش ۹۶۰ مگاژول در روز منجر به تولید ۸۹۶ کیلوژول توان، ۱۷۷ کیلوگرم آب شیرین و ۲۹،۰۰۰ کیلوگرم آب گرم در روز شد.

دمیر و دینسر [۲۳] یک سیستم ترکیبی را که هم‌زمان آب شیرین و برق تولید می‌کرد، بررسی کردند. این سیستم شامل فناوری برج خورشیدی، یک TES، یک چرخه ORC

چالش‌ها، انرژی خورشیدی به‌عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای انرژی مبتنی بر زغال سنگ باقی می‌ماند و دیدگاه‌های ارزشمندی در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه می‌کند.

شعیب و همکاران [۱۵] فناوری برج خورشیدی را با چرخه برای تون $Sc-CO_2$ ، سیستم جذب آب آمونیاک-آب، تولید هیدروژن، تولید بخار و یک TEG در ترکیه، ایران و قطر ارزیابی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که دوحه به دلیل شرایط مطلوب خود بالاترین کارایی را داشت. چرخه‌های پیشنهادی عملکرد را به ترتیب در دوحه ۳۲/۲۹٪، در اسپارتا ۳۲/۲۸٪ و در تهران ۳۲/۲۹٪ در مقایسه با یک چرخه ساده بهبود دادند. یانگ و همکاران [۱۶] یک سیستم یکپارچه شامل چرخه بازبازی برای تون $Sc-CO_2$ ، برج انرژی خورشیدی و TES را ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که در طول انقلاب تابستانی، این سیستم ۱۰۰٪ از انرژی خورشیدی را به توان تبدیل کرده و به کارایی متوسط روزانه ۱۷/۸٪ دست یافته است. در زمستان، این سیستم برای ۱۷ ساعت کار کرده و ۷۲/۶٪ از برق تولید شده توسط خورشید را با کارایی ۱۷/۱٪ تأمین می‌کند.

زارع و همکاران [۱۷] یک سیستم هیبریدی نوآورانه برای تبدیل انرژی حرارتی به برق با استفاده از برج خورشیدی ارائه دادند. یافته‌ها نشان داد که کارایی انرژی نیروگاه از ۳۰٪ بیشتر است. علاوه بر این، در مقایسه با سایر سیستم‌های مورد بررسی که تحت شرایط مشابه با چرخه‌های رانکین و برای تون $Sc-CO_2$ کار می‌کردند، سیستم پیشنهادی عملکرد بهتری از خود نشان داد.

صدیقی و همکاران [۱۸] یک سیستم هم‌زمان ترکیبی را که انرژی خورشیدی را با بیومس ادغام می‌کرد، پیشنهاد دادند. این سیستم، گازی‌سازی بیومس را با فناوری برج خورشیدی، چرخه ROC^1 برای نمک‌زدایی و تولید آب شیرین، و یک TEG برای تولید برق از تلفات حرارتی ترکیب می‌کرد. برج خورشیدی به‌تنهایی به راندمان انرژی ۱۴/۷٪ و راندمان انرژی ۱۵/۶٪ دست یافت، در حالی که کارایی کلی انرژی و انرژی سیستم به ترتیب ۲۰/۱٪ و ۲۱/۱٪ بود. همچنین، سیستم به میزان ۲۰ گرم در ثانیه هیدروژن و ۷۹ گرم در ثانیه آمونیاک تولید کرد.

عباسی و همکاران [۱۹] سیستمی را که در آن توربین گاز،

¹ Organic Rankine Cycle

چرخه‌های برایتون، رانکین و ORC را با انرژی خورشیدی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد که این سیستم ۳۳۱.۵۹ کیلووات بر کیلوگرم هوای ورودی تولید می‌کند و کارایی انرژی آن تحت شرایط عملیاتی هند و در نسبت فشار ۲۴، ۳۳/۱۵٪ است. کارایی‌های انرژی برای توربین گاز ۹۷/۰۷٪، کمپرسور ۹۶/۰۵٪، توربین ORC ۸۱/۳۳٪، توربین بخار فشار پایین ۸۰/۳۱٪ و توربین بخار فشار بالا ۷۹/۵٪ بود.

غلامیان و همکاران [۲۹] سه چرخه رانکین مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی را که هر کدام با یک TEG و یک الکترولیز غشای تبادل پروتون ترکیب شده بودند، مورد بررسی قرار دادند. نتایج بهینه‌سازی برای اهداف چندگانه نشان داد که کارایی انرژی سیستم ترموالکتریک به ۲۱/۹٪ رسید، در حالی که الکترولیز غشای تبادل پروتون به کارایی ۱۲/۷٪ بیشتر در مقایسه با سیستم قبلی در سطح عملکردی اوج خود دست یافت.

جف و همکاران [۳۰] سیستمی را برای تولید هیدروژن بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از چرخه گوگرد-ید که با انرژی حرارتی خورشیدی تأمین می‌شد، بررسی کردند. این سیستم به کارایی حرارتی ۳۸٪ برای تولید هیدروژن دست یافت.

چنان لی و همکاران [۳۱] یک سیستم آب‌شیرین‌کن آب دریا را که با چرخه^۱ SORC-RO طراحی شده بود، پیشنهاد دادند. این سیستم از دو منبع حرارتی با دمای پایین استفاده می‌کرد و در دمای حداکثر ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کار می‌کرد.

نماتی و همکاران [۳۳] یک سیستم ترکیبی با استفاده از چرخه ORC دو مرحله‌ای با یک سیال مختلط زئوتروپیک و یک واحد RO توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فشار تبخیر ۲ تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد و طراحی نهایی به کارایی ۳۷/۰۴٪ و هزینه ۵۹/۱۰۶ دلار در هر گیگاژول دست یافت.

تحقیقات کنونی به‌طور کامل ادغام چرخه برایتون Sc-O₂ برای تولید برق، چرخه Cu-Cl برای تولید هیدروژن و استفاده از HRSG برای تولید بخار فوق‌گرم در سیستم‌های برج خورشیدی را مورد بررسی قرار نداده است. این مطالعه قصد دارد به این خلاءها بپردازد و با بررسی کاربرد ترکیبی

برای تولید برق، و یک سیستم آب‌شیرین‌کن برای تولید آب شیرین بود. یافته‌ها نشان داد که با تأمین ۵۰٪ انرژی از خورشید و ۵۰٪ از گاز طبیعی، راندمان انرژی به ۴۴/۵٪ و کارایی انرژی به ۵۴/۹٪ رسید.

ادموند و آموس [۲۴] به بررسی پیشرفت‌های فناوری سیستم‌های چرخه ترکیبی خورشیدی پرداختند. اگرچه تحقیقات زیادی بر فناوری سیستم‌های خورشیدی متمرکز شده و چندین نیروگاه خورشیدی تجاری در سراسر جهان فعالیت دارند، اما پتانسیل زیادی برای ادغام با سیستم‌های چرخه ترکیبی خورشیدی از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی وجود دارد.

محمد و همکاران [۲۵] یک فناوری خورشیدی چندمنظوره را که برج خورشیدی با هلیوستات‌ها، چرخه ترکیبی برایتون-رانکین، یک چیلر جذب آب-لیتیوم برماید، یک پمپ حرارتی، یک سیستم TES مبتنی بر آب و یک الکترولیزر را ادغام می‌کرد، بررسی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که کارایی انرژی سیستم‌های منفرد حدود ۲۰/۹۳٪ بود، در حالی که سیستم یکپارچه به کارایی ۵۱/۶۲٪ دست یافت. کارایی‌های انرژی برای سیستم‌های منفرد ۲۲/۵۱٪ و برای سیستم یکپارچه ۵۳/۴۵٪ بود.

ایدها و همکاران [۲۶] یک سیستم سه‌گانه برای سرمایه‌ش، تولید توان و گرمایش در برج‌های خورشیدی با استفاده از مخلوط آمونیاک-آب بررسی کردند. این سیستم به کارایی تبدیل انرژی ۴۶/۰۳٪ و کارایی انرژی ۸/۳۴٪ دست یافت و گیرنده مرکزی ۵۶/۸۹٪ از تخریب انرژی را به خود اختصاص داد. افزایش تابش نرمال خورشیدی باعث کاهش استفاده از انرژی و انرژی شد اما تولید برق و سرمایه‌ش انرژی را افزایش داد.

اوزساری [۲۷] روندهای تحقیقاتی را تجزیه و تحلیل کرده و یک مرور جامع از انرژی در طی ۳۰ سال گذشته ارائه داد. این مطالعه به بررسی نوع انتشارات، حوزه‌های تحقیقاتی و کلمات کلیدی پرداخت و به سهم کشورها، نویسندگان، مجلات و موسسات در این زمینه اشاره کرد. یافته‌های کلیدی نشان داد که چین، ایران و ترکیه تأثیرگذارترین کشورها در این حوزه هستند و دکتر ابراهیم دینسر به‌عنوان تأثیرگذارترین نویسنده شناخته شده است. ساجدوا و سینگ [۲۸] یک چرخه سه‌گانه ترکیبی شامل

¹ Supercritical organic Rankine cycle

تولید بخار آب فوق گرم از طریق HRSNG استفاده می شود. مرحله ۱: سیال HTF در نقطه ۱ وارد گیرنده برج خورشیدی می شود. گرمای جذب شده توسط گیرنده به HTF منتقل شده و از نقطه ۲ خارج می شود. انرژی حرارتی اضافی که برای تولید محصولات در طول روز نیاز است، در TES ذخیره می شود تا در طول شب و ساعت ابری استفاده شود. سیال HTF در نقطه ۳ وارد مبدل حرارتی شده و پس از انتقال گرما به گاز CO₂ که از نقطه ۶ وارد می شود، از نقطه ۴ خارج می گردد. مرحله ۲: گاز CO₂ از نقطه ۷ مبدل حرارتی را ترک کرده و وارد توربین می شود. پس از انبساط در توربین در نقطه ۸، گاز CO₂ وارد HRSNG1 می شود. مرحله ۳: سپس گاز CO₂ آب ورودی از نقطه ۱۴ را گرم می کند. گاز CO₂ از نقطه ۹ خارج می شود. مرحله ۴: سپس گاز CO₂ وارد HRSNG2 می شود و حرارت خود را به آب بازگشتی چرخه تولید هیدروژن Cu-Cl، که از نقطه ۱۱ وارد می شود، انتقال می دهد. سپس گاز CO₂ توسط خنک کننده سرد شده تا به دمای ورودی کمپرسور برسد. آب ورودی به HRSNG1 از نقطه ۱۴ به صورت بخار فوق گرم در نقطه ۱۵ خارج شده و برای گرمایش استفاده می شود. آب بازگشتی چرخه Cu-Cl در نقطه ۱۱ وارد HRSNG2 شده و به صورت بخار فوق گرم از نقطه ۱۲ خارج می شود تا گرمای لازم برای چرخه Cu-Cl را تأمین کند.

برخی از فرضیات معقول به شرح زیر است:

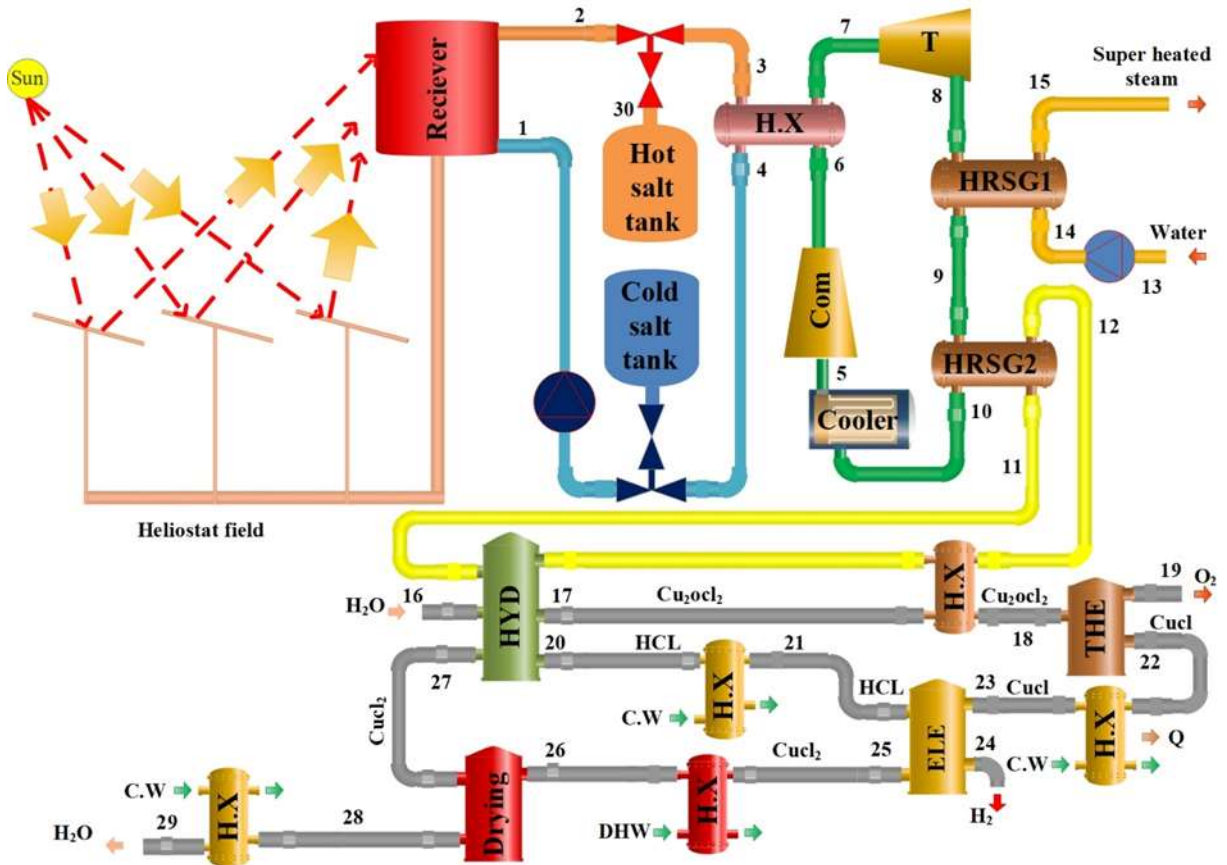
- سیستم در طول شبیه سازی در حالت پایدار عمل می کند.
- انرژی های جنبشی و پتانسیل در تحلیل انرژی نادیده گرفته می شود.
- افت فشار در تمامی بخش ها و خطوط اتصال ناچیز است.

این فناوری ها، بهبود راندمان انرژی، کاهش اتلاف حرارت و دستیابی به تولید مؤثر هیدروژن، تولید برق و تولید بخار فوق گرم را فراهم کند. تحقیق بر ارزیابی نقاط قوت و محدودیت های ادغام این فناوری های پیشرفته در یک سیستم یکپارچه متمرکز است. به ویژه، ترکیب نوآورانه چرخه Cu-Cl برای تولید هیدروژن، استفاده از HRSNG برای تولید بخار فوق گرم و چرخه برایتون S-CO₂ برای تولید توان در یک سیستم برج خورشیدی بررسی می شود. استفاده از یک HRSNG برای تأمین گرمای مورد نیاز چرخه Cu-Cl و دیگری برای تولید بخار فوق گرم، رویکردی نوآورانه برای بهینه سازی استفاده از انرژی را نشان می دهد. نوآوری این مطالعه در روش منحصر به فرد ادغام این چرخه ها و ارزیابی عملکرد آنها در یک سیستم عملی برج خورشیدی نهفته است که به طور جامع در تحقیقات موجود مورد بررسی قرار نگرفته است. این رویکرد بینش های جدیدی در زمینه بهینه سازی سیستم های انرژی تجدید پذیر، پیشرفت تولید هیدروژن و بهبود سیستم های تولید بخار ارائه می دهد.

۲- توضیح سیستم

شکل ۱ سیستم تحت بررسی را نشان می دهد که شامل زیرسیستم های TES، چرخه Sc-CO₂ برایتون، چرخه Cu-Cl و HRSNG است و با هدف تولید برق، بخار فوق داغ، و هیدروژن با استفاده از برج خورشیدی طراحی شده است. انرژی خورشیدی توسط سیستم هلیوستات و برج خورشیدی جمع آوری شده و توسط HTF¹ به سایر زیرسیستم ها منتقل می شود. این انرژی حرارتی برای تولید توان از طریق چرخه Sc-CO₂ برایتون، تولید هیدروژن از طریق چرخه چهار مرحله ای تولید هیدروژن Cu-Cl، و

¹ Heat Transfer Fluid



شکل ۱- شماتیک طرح کلی سیستم تحت بررسی

۱-۲- زیر سیستم برج خورشیدی

سیستم‌های هلیوستات و برج خورشیدی شامل آینه‌هایی هستند که به صورت دایره‌ای در یک میدان هلیوستات چیده شده‌اند و تابش خورشید را به سمت گیرنده مرکزی در بالای برج خورشیدی هدایت می‌کنند. برج خورشیدی با موقعیت استراتژیک خود تابش‌های منعکس شده توسط آینه‌های هلیوستات را دریافت می‌کند. جریان HTF از طریق گیرنده جریان می‌یابد، گرمای خورشید را جذب کرده و آن را به

TES یا به‌طور مستقیم برای تولید محصول منتقل می‌کند. دمای گیرنده تقریباً ۲۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای خروجی HTF است. تکنولوژی برج‌های خورشیدی می‌تواند به دماهای بالای ۲۲۰۰ کلوین دست یابد [۳۴، ۳۵]. این تکنولوژی برج‌های خورشیدی را به دلیل عملکرد بهینه آن‌ها در دماهای مختلف به گزینه‌ای مناسب برای سیستم‌های تولید همزمان انرژی، تبدیل می‌کند. پارامترهای پایه‌ای که برای مدل‌سازی برج خورشیدی سیستم پیشنهادی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- پارامترهای پایه‌ای استفاده شده برای مدل‌سازی برج خورشیدی

پارامتر	علائم	مقدار	مرجع
بازده بازتابندگی هلیوستات‌ها	η_{ref}	۰/۸۸	[۳۶]
ضریب پخش سطح گیرنده	ϵ_{rec}	۰/۸۵	[۱۳]
ضریب جذب سطح گیرنده	α_{rec}	۰/۹۵	[۱۳]
تعداد هلیوستات‌ها	n_{hel}	۶۲۴	[۳۶]
سطح بازتابنده هر هلیوستات‌ها	$A_{hel} (m^2)$	$9/45 \times 12/84$	[۳۶]
مساحت گیرنده	$A_{rec} (m^2)$	۶۸/۱	[۳۷]
دمای خورشید	$T_{sun} (K)$	۴۵۰۰	
بازده اثر کسینوس	η_{cos}	۰/۸۲۶۷	[۳۶]
بازده برخورد	η_{int}	۰/۹۷۱۰	[۳۶]

[۳۶]	۰/۹۳۸۳	η_{att}	بازده تضعیف جوی
[۳۶]	۰/۹۶۹۸	$\eta_{s\&b}$	بازده سایه‌زنی و مسدود کردن
[۱۳]	۱۳۰	$H_{Tower}(m^2)$	ارتفاع برج
[۳۸]	۸۵۰	$DNI(\frac{W}{M^2})$	تابش نرمال خورشید

۲-۲- زیر سیستم مخزن ذخیره حرارت (TES)

زیرسیستم TES شامل مخازن TES گرم و سرد است که با زیرسیستم برج خورشیدی، چرخه برایتون Sc-CO₂ و چرخه Cu-Cl یکپارچه شده‌اند. بنابراین، زیرسیستم TES به‌عنوان یک واسطه عمل می‌کند و تغییرات تابش خورشیدی ناشی از ابرها یا تغییرات آب‌وهوا را مدیریت می‌کند. HTF انرژی حرارتی جذب‌شده توسط گیرنده را جذب کرده و آن را به زیرسیستم‌های تولید محصول منتقل می‌کند و بخشی از آن در مخزن TES گرم ذخیره می‌شود. وقتی انرژی حرارتی در میدان هلیوستات کاهش می‌یابد، مخزن TES گرم شروع به تخلیه می‌کند تا نیازهای انرژی را تأمین کرده و عملکرد پایدار سیستم را تضمین کند. در ساعات غیر آفتابی، HTF از مخزن گرم برداشت شده و در زیرسیستم‌ها استفاده می‌شود و سپس در مخزن سرد ذخیره می‌شود. سیستم پیشنهادی از نمک فلوراید (LiF-NaF-KF) هم به‌عنوان HTF و هم به‌عنوان واسطه ذخیره حرارت محسوس استفاده می‌کند. به این ترتیب، نمک فلوراید از گیرنده مرکزی عبور کرده و گرمای دریافت‌شده را به گاز CO₂ در مبدل حرارتی برای تولید محصول منتقل می‌کند، در حالی که هرگونه گرمای اضافی در TES ذخیره می‌شود. نمک خورشیدی، که به‌عنوان نوعی از نمک مذاب طبقه‌بندی می‌شود، شامل ۶۰٪ وزنی نیترات سدیم (NaNO₃) و ۴۰٪ نیترات پتاسیم (KNO₃) است. استفاده موفقیت‌آمیز از آن در چندین نیروگاه به‌عنوان HTF انجام شده است. برای مثال، در نیروگاه خورشیدی حرارتی Gemasolar در آندلس، اسپانیا، از یک توربین با ظرفیت ۱۹/۹ مگاوات استفاده می‌شود [۳۹]. در این نیروگاه دو مخزن ذخیره مستقیم با ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۵ ساعت نصب شده است. با این حال، این نیروگاه‌ها با محدودیت‌های دمای عملیاتی مواجه هستند که به دلیل آستانه دمای حداکثر تحمل‌شده توسط نیترات‌های نمکی قبل از تجزیه،

زیر ۸۵۳ کلوین محدود می‌شود. این محدودیت به‌طور قابل توجهی بر راندمان تبدیل این نیروگاه‌ها تأثیر می‌گذارد. برای غلبه بر این محدودیت و افزایش کارایی چرخه قدرت در حالی که تلفات به حداقل می‌رسد، نمک مذاب فلوراید که قادر به کار در دماهای بالای ۹۷۳ کلوین است، انتخاب شده است. فرسبرگ و همکارانش پیشنهاد کردند از نمک‌های مذاب فلوراید به‌عنوان HTF بین برج خورشیدی و چرخه برایتون استفاده شود، که می‌تواند راندمان را حدود ۵۰٪ افزایش دهد [۴۰]. ترکیب شیمیایی و خصوصیات انتقال حرارت نمک مذاب فلوراید اوتکتیک^۱ انتخاب‌شده در جدول ۲ شرح داده شده است. ویژگی‌های این نمک، از جمله فشار بخار کم و ویژگی‌های عالی انتقال حرارت، آن را بسیار سازگار با سیستم موجود می‌سازد. علاوه بر این، در پژوهش‌های [۳۴، ۴۱، ۴۲] اطلاعات جامع‌تری در مورد ویژگی‌های نمک فلوراید، آزمایش‌های خوردگی و مقایسه کارایی یا اثربخشی آن در مقایسه با سایر نمک‌های مذاب ارائه شده است.

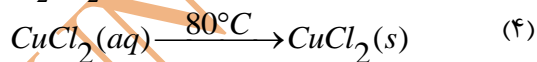
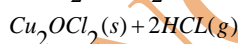
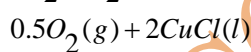
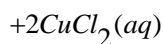
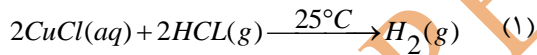
جدول ۲- ترکیب و ویژگی‌های انتقال حرارت نمک مذاب با دمای بالا انتخاب‌شده (LiF-NaF-KF) در دمای ۹۷۳ کلوین [۳۴].

پارامتر	مقدار
ترکیب نمک (درصد مولی)	۴۶/۵-۱۱/۵-۴۲
وزن مولکولی (kg/kmol)	۴۱/۳
نقطه ذوب (K)	۷۲۷
نقطه جوش (K) (تقریبی از طریق برون‌یابی)	۱۸۴۳
فشار بخار (mmHg) در دمای ۱۱۷۳ K	~ ۰/۷
چگالی (g/cm ³)	۲/۰۲
ظرفیت حرارتی حجمی (Cal/cm ³ K)	۰/۹۱
ویسکوزیته (cP)	۲/۹
ضریب هدایت حرارتی (W/m K)	۰/۹۲

۲-۳- زیر سیستم برایتون Sc-CO₂

¹ Eutectic

این نیاز ولتاژ می‌تواند به ۰/۵ ولت کاهش یابد [۴۳]. راندمان کلی چرخه Cu-Cl بیش از ۴۳٪ برآورد می‌گردد [۴۴]. فرآیند چرخه چهارمرحله‌ای تولید هیدروژن Cu-Cl ترکیبی از تکنولوژی‌های ترموشیمی و الکترولیز است. شماتیک چرخه چهارمرحله‌ای Cu-Cl در شکل ۱ نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها در فشاری معادل ۱۰/۳ کیلوپاسکال (۱ بار) انجام شدند. این چرخه Cu-Cl شامل مراحل الکترولیز، خشک‌کردن، هیدرولیز و ترمولیز است. معادلات ۱ تا ۴ مراحل هر واکنش شیمیایی، واکنش‌های مربوطه و دماهای عملیاتی آن‌ها را مشخص می‌کنند [۴۵]. مرحله الکترولیز شامل واکنش کلرید مس با گاز هیدروژن کلرید در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است که منجر به تولید گاز هیدروژن و محلول آبی کلرید مس می‌شود. سپس، در مرحله خشک‌کردن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، کلرید مس آبی از آب جدا می‌شود. در مرحله هیدرولیز، کلرید مس با آب واکنش داده و گاز هیدروژن کلرید و گاز مس‌اکسی کلرید در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌کند. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، مس‌اکسی کلرید تجزیه شده و گاز اکسیژن و کلرید مس تولید می‌شود. در مرحله هیدرولیز، تنها ورودی آب است، در حالی که خروجی‌های سیستم هیدروژن و اکسیژن هستند. اجزای باقی‌مانده در این چرخه بازیابی می‌شوند [۴۵].



۳- معادلات حاکم

۳-۱- مدل‌سازی انرژی

در بخش پیش‌رو، معادلات حاکم بر سیستم پیشنهادی را ارائه خواهیم کرد. با در نظر گرفتن هر عنصر به‌عنوان یک حجم کنترل، معادله انرژی به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} + \quad (5)$$

$$\sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} = 0$$

چرخه تولید توان برای تون Sc-CO₂ به دلیل مزایای متعدد آن نسبت به چرخه تولید توان بخار انتخاب شده است. این مزایا شامل راندمان بالا، به‌ویژه در دماهای عملیاتی بالاتر، و فضای مورد نیاز کوچک‌تر است. این زیرسیستم قدرت، شامل یک مبدل حرارتی، توربین، خنک‌کننده و کمپرسور است و دی‌اکسید کربن به‌عنوان سیال کاری در یک حلقه بسته عمل می‌کند. در این چرخه، گاز دی‌اکسید کربن در مبدل حرارتی تا دماهای بالا گرم شده و سپس در توربین منبسط می‌گردد و به دلیل جریان سریع دی‌اکسید کربن، پره‌های توربین به حرکت درمی‌آیند. این فرآیند منجر به خروج دی‌اکسید کربن در فشار پایین و دمای نسبتاً بالا می‌شود. برای کاهش بیشتر دما و بازیابی انرژی قبل از انتقال به خنک‌کننده، دی‌اکسید کربن از HRSGها عبور کرده و گرمای خود را به سایر زیرسیستم‌ها منتقل می‌کند. سپس، در دمای نسبتاً پایین وارد خنک‌کننده می‌شود. خنک‌کننده دمای گاز دی‌اکسید کربن را کاهش داده و به این ترتیب توان مورد نیاز کمپرسور برای فشرده‌سازی دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. شکل ۲ نمودار دما-آنترپی (T-s) چرخه تولید توان برای تون Sc-CO₂ را نشان می‌دهد. جدول ۷ پارامترهای اصلی استفاده‌شده برای شبیه‌سازی و تحلیل پایه‌ای چرخه تولید توان برای تون Sc-CO₂ به همراه منابع مرتبط را ارائه می‌دهد. با توجه به نیاز فزاینده به بخار فوق‌گرم برای گرمایش و اهداف صنعتی در سیستم پیشنهادی تولید همزمان، انرژی حرارتی گاز دی‌اکسید کربن پس از انبساط در توربین به وسیله HRSG به آب منتقل می‌شود تا بخار فوق‌داغ تولید کند. این بخار سپس وارد HRSG بعدی می‌شود.

۲-۴- زیر سیستم چرخه Cu-Cl

به دلیل مزایای فراوان چرخه تولید هیدروژن Cu-Cl، این چرخه به‌عنوان بخشی از سیستم ترکیبی برای تولید هیدروژن پیشنهاد شده است. چرخه Cu-Cl چندین مزیت ارائه می‌دهد، از جمله دماهای عملیاتی پایین‌تر، استفاده از تلفات حرارتی دما پایین برای بهبود کارایی سیستم، و کاهش هزینه‌های تولید. در مقایسه با سایر چرخه‌های ترموشیمیایی، فرآیند Cu-Cl به دماهای نسبتاً پایین‌تری نیاز دارد و تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد (۹۹۰ درجه فارنهایت) می‌رسد. یکی دیگر از مزایای قابل توجه این چرخه، ولتاژ نسبتاً پایین مورد نیاز برای مرحله الکتروشمیایی است که بین ۰/۶ تا ۰/۷ ولت است. در چگالی‌های جریان پایین‌تر،

با استفاده از رابطه ذکر شده، معادلات انرژی برای هر یک از اجزای سیستم در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- روابط موازنه انرژی سیستم پیشنهادی

معادلات انرژی	اجزاء
گیرنده	
$\dot{Q}_{rec,in} = \dot{Q}_{rec,net} + \dot{Q}_{rec,loss}$	انرژی خورشیدی دریافتی گیرنده [۱۷]
$\dot{Q}_{rec,loss} = \dot{Q}_{em,loss} + \dot{Q}_{conv,loss} + \dot{Q}_{ref,loss} + \dot{Q}_{cond,loss}$	تلفات حرارتی گیرنده
$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{HTF} C_{P,HTF} (T_2 - T_1)$	انرژی حرارتی جذب شده توسط سیال انتقال حرارت
مخزن داغ ذخیره سازی انرژی حرارتی	
$Q_{ch} = Q_{ch_f} - Q_{ch_0} = M_{st} C_{p30} (T_{30} - T_0)$	مقدار انرژی ذخیره شده در طول کل دوره شارژ
$M_{st} = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{30} dt$	جرم ذخیره شده
$Q_{st} = Q_{ch_f} - Q_{st_f} = M_{st} C_{p30} (T_{30} - T_{st_f})$	کل تلفات انرژی در طول زمان ذخیره سازی
$Q_{dis} = Q_{st_f} - Q_{dis_f} = M_{st} C_{pa} (T_{st_f} - T_0)$	انرژی تخلیه شده
$\eta_{en, TES} = \frac{Q_{dis}}{Q_{ch}}$	بازده انرژی زیرسیستم مخزن داغ ذخیره سازی انرژی حرارتی
چرخه Sc-CO₂	
$\dot{Q}_{E.X} = \dot{m}_7 (h_7 - h_6) = \dot{m}_7 C_p (T_7 - T_6)$	نرخ حرارت مبدل حرارتی
$\dot{W}_T = \dot{m}_7 (h_7 - h_8)$	نرخ کار توربین
$\eta_T = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8s}}$	بازده ایزنتروپیک توربین
$\dot{W}_{com} = \dot{m}_5 (h_6 - h_5)$	کار مورد نیاز کمپرسور
$\eta_{com} = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5}$	بازده ایزنتروپیک کمپرسور
$\eta_{en,T} = \frac{\dot{W}_{net,T}}{\dot{m}_7 (h_7 - h_8)}$	بازده ایزنتروپیک چرخه S-CO ₂
HRSG2 و HRSG1	
$\dot{m}_8 (h_8 - h_9) = \dot{m}_{14} (h_{15} - h_{14})$	موازنه انرژی HRSG1
$\dot{Q}_{Heating} = \dot{m}_{14} (h_{15} - h_{14})$	حرارت تولید شده برای گرمایش
$\dot{W}_{pu, Heating} = \dot{m}_{13} (p_{r14} - p_{r13})$	کار مورد نیاز پمپ گرمایش
$\eta_{p, Heating} = \frac{h_{14s} - h_{13}}{h_{14} - h_{13}}$	راندمان ایزنتروپیک پمپ گرمایش
$\dot{m}_9 (h_9 - h_{10}) = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11})$	موازنه انرژی HRSG2
$\dot{Q}_{cooler} = \dot{m}_{10} (h_{10} - h_5)$	حرارت دفع شده در Cooler
چرخه Cu-Cl	

$\dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{21}h_{21} + \dot{W}_{in} = \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{25}h_{25}$	موازنه انرژی الکترولیز
$\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{W}_{in} = \dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{28}h_{28}$	موازنه انرژی خشک کردن
$\dot{m}_{16}h_{16} + \dot{m}_{27}h_{27} + \dot{Q}_{in} = \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{20}h_{20}$	موازنه انرژی هیدرولیز
$\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{Q}_{in} = \dot{m}_{19}h_{19} + \dot{m}_{22}h_{22}$	موازنه انرژی ترمولیز
$\eta_{en,CuCl} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}}$	بازده انرژی سیستم Cu-Cl

معادله انرژی برای حالت پایا به صورت زیر قابل نمایش است:

$$\dot{E}x_W = \sum_{i=1}^N (\dot{E}x_Q)_i + \sum_{in} \dot{m}_i \times ex_i - \sum_{out} \dot{m}_e \times ex_e - \dot{E}_D \quad (13)$$

در معادله مذکور، زیر نویس‌ها W ، Q و D به ترتیب نشان‌دهنده کار، حرارت و تخریب هستند. علاوه بر این، انرژی به ازای واحد جرم در ورودی و خروجی یک حجم کنترل به ترتیب با ex_i و ex_e نمایش داده می‌شود. نرخ تخریب انرژی (در یک حالت غیرقابل برگشت) متناسب با تولید آنتروپی است و می‌تواند طبق معادله گوی تعریف شود:

$$\dot{E}x_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (14)$$

با صرف نظر از تأثیرات کشش سطحی، الکتروسیسته، مغناطیس و انرژی‌های هسته‌ای، انرژی کلی سیستم به صورت مجموع چهار جزء اصلی قابل توصیف است:

$$ex = ex^{PH} + ex^{KN} + ex^{PT} + ex^{CH} \quad (15)$$

انرژی‌های فیزیکی، پتانسیل، شیمیایی و جنبشی به ازای واحد جرم به ترتیب با ex^{PH} ، ex^{PT} ، ex^{CH} و ex^{KN} نمایش داده می‌شوند. این انرژی‌ها که با محیط مرتبط هستند و نسبت به آن اندازه‌گیری می‌شوند، می‌توانند با استفاده از روابط زیر استخراج شوند:

$$ex^{PH} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (16)$$

$$ex^{KN} = \frac{1}{2} V^2 \quad (17)$$

$$ex^{PT} = gz \quad (18)$$

انرژی شیمیایی به حداکثر کاری اشاره دارد که یک سیستم در حالت تعادل مرده محدود شده می‌تواند به دست

انرژی خورشیدی به سمت میدان هلیوستات هدایت می‌شود که تمام سطح A_{hel} را شامل می‌شود. سپس این انرژی به سمت برج گیرنده که دارای سطح A_{rec} است، بازتاب می‌شود. محاسبه انرژی جذب شده توسط برج گیرنده به شرح زیر است [۱۷]:

$$\dot{Q}_{rec,in} = \eta_{field} \dot{Q}_{hel} \quad (6)$$

پارامترهای مختلف معادله مذکور را می‌توان به روش زیر محاسبه کرد:

$$\dot{Q}_{hel} = DNI \cdot A_{hel} \eta_{hel} \quad (7)$$

$$\eta_{field} = \eta_{cos} \eta_{s\&b} \eta_{int} \eta_{att} \eta_{ref} \quad (8)$$

بازده انرژی برج گیرنده طبق معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\eta_{en,rec} = \frac{\dot{Q}_{rec,net}}{\dot{Q}_{rec,in}} \quad (9)$$

بهره‌وری انرژی زیر سیستم برج خورشیدی با استفاده از این معادله محاسبه می‌شود:

$$\eta_{e,ns} = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\dot{Q}_{sun}} \quad (10)$$

۳-۲- آنالیز انرژی

جریان انرژی نشان‌دهنده بیشترین کار ممکن در یک فرآیند کاملاً برگشت پذیر است که از حالت اولیه به تعادل کامل با محیط (در دما و فشار محیط) انتقال می‌یابد:

$$ex = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (11)$$

$$s - s_0 = C_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (12)$$

در حالی که h به آنتالپی و s به آنتروپی واحد جریان اشاره دارد، h_0 و s_0 همان پارامترها در حالت مرجع هستند و T_0 و P_0 به ترتیب دما و فشار در حالت مرجع می‌باشند.

$\dot{m}_{26}^{ex} + \dot{W}_{in} = \dot{m}_{27}^{ex} + \dot{m}_{28}^{ex} + \dot{E}_d$	موازنه انرژی خشک کردن
$\dot{m}_{16}^{s} + \dot{m}_{27}^{s} + \dot{S}_{gen} + \frac{\dot{Q}_{in}}{T_0} = \dot{m}_{17}^{s} + \dot{m}_{20}^{s}$	موازنه آنتروپی هیدرولیز
$\dot{m}_{16}^{ex} + \dot{m}_{27}^{ex} + \dot{E}_{\dot{Q}_{in}} = \dot{m}_{17}^{ex} + \dot{m}_{20}^{ex} + \dot{E}_d$	موازنه انرژی هیدرولیز
$\dot{m}_{18}^{s} + \dot{S}_{gen} + \frac{\dot{Q}_{in}}{T_0} = \dot{m}_{19}^{s} + \dot{m}_{22}^{s}$	موازنه آنتروپی ترمولیز
$\dot{m}_{18}^{ex} + \dot{E}_{\dot{Q}_{in}} = \dot{m}_{19}^{ex} + \dot{m}_{22}^{ex} + \dot{E}_d$	موازنه انرژی ترمولیز
$\psi_{ex,Cu-Cl} = \frac{\dot{m}_{H_2}^{ex} H_2}{\dot{E}_{\dot{Q}_{in}} + \dot{W}_{in}}$	بازده انرژی چرخه Cu-Cl

جدول ۵ - اعتبارسنجی بازده انرژی و انرژی سیستم برج

خورشیدی در تحقیق حاضر در مقایسه با مرجع [۱۷]

پارامتر	مرجع [۱۷]	کار حاضر
بازده انرژی	۷۵	۷۴/۱۶
بازده انرژی	۵۲/۹۴	۵۰/۷۸

۴-۲- زیر سیستم TES

بر اساس مفهوم چرخه کارنو، بررسی اولیه سیستم ترکیبی نشان می‌دهد که عملکرد سیستم به دمای خروجی توان خورشیدی وابسته است. بنابراین، با افزایش دمای عملکرد، عملکرد کلی سیستم ترکیبی بهبود می‌یابد. استفاده از نمک فلوراید مذاب به عنوان HTF امکان تحویل و حفظ دماهای بالاتر را فراهم می‌کند، که به طور قابل توجهی توان خروجی چرخه برای تون $Sc-CO_2$ و تولید هیدروژن توسط چرخه Cu-Cl را افزایش می‌دهد.

از آنجا که تحقیق حاضر بر عملکرد تأکید دارد، ضرورت مطالعات جامع‌تری که جنبه‌های اقتصادی را در تعیین اندازه نیروگاه در نظر می‌گیرند، پیشنهاد می‌کند. بر اساس روابط بازده انرژی و انرژی، بازده انرژی و انرژی سیستم TES به تلفات انرژی کلی در طول چرخه، که شامل سه حالت عملکردی شارژ، ذخیره‌سازی و تخلیه است، بستگی دارد. از این رو، ارزیابی دقیق تلفات حرارتی TES یکی از اجزای مهم در ارزیابی عملکرد آن است. مطالعات متعددی به بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت TES پرداخته‌اند و اهمیت آن را در ارزیابی عملکرد تأیید کرده‌اند. به عنوان مثال، منابع [۴۶-۴۸] به طور جمعی نشان می‌دهند که دمای TES در طول مدت زمان ذخیره‌سازی به صورت خطی کاهش می‌یابد و این کاهش با جرم نمک مذاب، دمای

۴-۱- اعتبارسنجی

سیستم یکپارچه پیشنهادی بر پایه چهار زیرسیستم طراحی شده است که هر کدام به طور مستقل مدل‌سازی و اعتبارسنجی شده‌اند قبل از ادغام در مدل سیستم یکپارچه، نرم‌افزار EES برای حل مدل سیستم ترکیبی و ارزیابی خواص ترمودینامیکی استخراج شده از کتابخانه EES به کار گرفته شده است. بخش‌های بعدی نتایج زیرسیستم‌ها و عملکرد کلی سیستم را تشریح خواهند کرد. با این حال، تغییرات در پارامترهای عملیاتی برج خورشیدی به طور مستقیم بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد.

۴-۱-۱- زیر سیستم برج خورشیدی

در طراحی سیستم پیشنهادی، تابش مستقیم خورشیدی برابر با ۸۵۰ وات بر متر مربع است و تعداد هلیوستات‌ها ۶۲۴ عدد است که هر یک دارای ابعاد $۹/۴۵ \times ۱۲/۸۴$ متر مربع بوده و مساحت کلی $۷۵/۷۱۵$ متر مربع را تشکیل می‌دهند. توان خالص خروجی $۴/۲۲۶$ کیلووات است و باید حرارت مورد نیاز برای هر دو چرخه تولید هیدروژن-Cu-Cl و تولید بخار فوق‌گرم حفظ شود. بازده انرژی حاصل ضرب بازده میدان هلیوستات و گیرنده است. اعتبارسنجی بازده انرژی و انرژی سیستم برج خورشیدی در این مطالعه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با مرجع [۱۷]، در جدول ۵ ارائه شده است.

راندمان مبدل حرارتی	٪۹۰
دمای ورودی کمپرسور (°C)	۳۲
دمای محیط (°C)	۲۵
فشار محیط (KPa)	۱۰۱/۳

۴-۳- زیر سیستم چرخه Cu-Cl

نتایج اعتبارسنجی بازده انرژی و انرژی و اگزرژی چرخه تولید هیدروژن Cu-Cl، در مقایسه با منابع [۵۰] و [۵۱]، در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- اعتبارسنجی راندمان انرژی و اگزرژی چرخه

تولید هیدروژن Cu-Cl با استفاده از مراجع [۵۰] و [۵۱]

پارامتر	کار حاضر	مراجع [۵۰]	مراجع [۵۱]
بازده انرژی (%)	۴۱/۳۷	۴۰/۱	۴۳
بازده اگزرژی (%)	۶۱/۳۲	۶۰/۲	۷۰

۵- نتایج آنالیز انرژی و اگزرژی

در این بخش، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل انرژی و اگزرژی در حالت طراحی پایه ارائه شده است. با توجه به اینکه در حالت طراحی پایه، کل انرژی حرارتی دریافتی از سیستم برج خورشیدی مستقیماً برای تولید محصول استفاده می شود و در TES ذخیره نمی شود، نتایج آنالیز انرژی و اگزرژی TES در این قسمت ارائه نشده است. با تغییر پارامترها، امکان ذخیره انرژی حرارتی در TES وجود دارد. جدول ۹ تخریب انرژی اجزای سیستم پیشنهادی را نشان می دهد. بازده انرژی و اگزرژی نیروگاه و زیرسیستم های آن در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۹- اتلاف انرژی اگزرژی در اجزای سیستم پیشنهادی

تخریب انرژی اگزرژی (kW)	اجزاء	
۷۱۱۱	برایتون S-CO ₂	
۹۹۳۰	برج خورشیدی	
۹۰۳/۱	مبدل حرارتی	
۶۸۴۰	HRS1	
۲۸۲۹	HRS2	
۱۶۲/۶	خنک کننده (Cooler)	
۳/۳۰۱	پمپ گرمایش	
۳۶۴۶	الکترولیز	Cu-Cl
۱۰۵۴	ترمولیز	
۳۴۱۱	هیدرولیز	
۱۶۲۳	خشک کننده	

اولیه آن و پارامترهای طراحی و عملیاتی سیستم مرتبط است. در این مطالعه، کاهش دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در مدت ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است؛ این فرضیه در مقایسه با کاهش ۱۸ درجه سانتیگراد در مرجع [۵] موجه به نظر می رسد. اعتبارسنجی بازده انرژی و اگزرژی TES در پایان دوره تخلیه، در مقایسه با مرجع [۵]، در جدول ۶ نشان داده شده است.

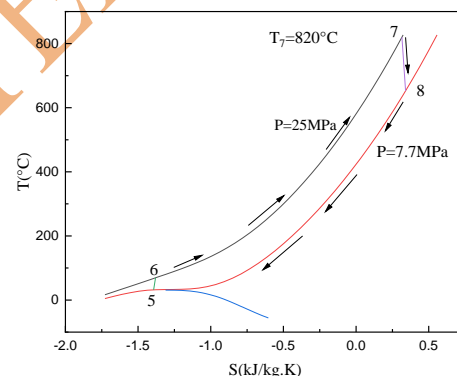
جدول ۶- اعتبارسنجی بازده انرژی و اگزرژی سیستم TES با

مرجع [۵]

پارامتر	کار حاضر	مرجع [۱۷]
بازده انرژی (%)	۹۶/۸۶	۹۷
بازده اگزرژی (%)	۹۶/۱۲	۹۶/۵

۴-۳- زیر سیستم چرخه Sc-CO₂

شکل ۲ نمودار T-s را برای چرخه برایتون Sc-CO₂ نشان می دهد. جدول ۷ پارامترهای اولیه مورد استفاده در مدل سازی پایه و تحلیل چرخه توان برایتون Sc-CO₂ و منابع مربوطه را نشان می دهد.



شکل ۲- نمودار T-s برای چرخه برایتون Sc-CO₂ که با شماره گذاری سیستم مشخص شده در شکل ۱ مطابقت دارد.

جدول ۷- فهرست پارامترهای مورد استفاده برای

مدلسازی چرخه برایتون Sc-CO₂

پارامتر	مقدار
دمای ورودی توربین (°C)	۸۲۰
فشار ورودی توربین (KPa)	۲۵۰۰۰ [۴۹]
راندمان ایزونتروپیک توربین	٪۹۰ [۴۹]
راندمان ایزونتروپیک کمپرسور	٪۸۵ [۴۹]

جدول ۱۰- بازده انرژی و انرژی نیروگاه و زیر سیستمها

پارامتر	نیروگاه	برج خورشیدی	سیکل برایتون S-CO ₂	چرخه Cu-Cl
بازده انرژی (%)	۱۷/۴۸	۷۴/۱۶	۸۵/۷۲	۴۱/۳۷
بازده انرژی (%)	۱۸/۷۲	۵۰/۷۸	۸۲/۷۳	۶۱/۳۲

۵- مطالعه پارامتریک

در این بخش، داده‌های ترمودینامیکی نقاط مختلف سیستم پیشنهادی در حالت طراحی پایه در جدول ۱۱ ارائه شده است. همچنین، تأثیر تغییرات چندین پارامتر (مانند مساحت هلیوستات، تابش نرمال خورشید، دمای خروجی

HTF در گیرنده، نسبت فشار کمپرسور، دمای ورودی توربین و دما در نقاط مختلف چرخه Cu-Cl) بر عملکرد سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است.

جدول ۱۱- اطلاعات ترمودینامیکی نقاط سیستم پیشنهادی

نقاط	دبی جرمی [kg/s]	جریان انرژی [kJ]	درجه حرارت [°C]	انترپی [kJ/k]	آنتالپی [kJ]
۱	۷۶/۳۷	۱۵۲۸۴	۵۶۰	۶/۰۴۸	-۷۵۳۹
۲	۷۶/۳۷	۳۵۹۸۹	۹۸۰	۶/۴۱۸	-۷۱۵۷
۳	۷۶/۳۷	۳۵۹۸۹	۹۸۰	۶/۴۱۸	-۷۱۵۷
۴	۷۶/۳۷	۱۵۲۸۴	۵۶۰	۶/۰۴۸	-۷۵۳۹
۵	۲۵/۲۲	۵۴۲۱	۳۲	-۱/۳۹۳	-۲۰۰/۵
۶	۲۵/۲۲	۶۰۶۷	۶۹/۳۶	-۱/۳۸	-۱۷۱/۱
۷	۲۵/۲۲	۱۹۵۵۱	۸۲۰	۰/۳۱۵۴	۸۶۹/۱
۸	۲۵/۲۲	۱۴۱۶۰	۶۵۲/۳	۰/۳۴۰۵	۶۶۲/۸
۹	۲۵/۲۲	۱۲۰۹۰	۵۵۰	۰/۱۹۷۸	۵۳۸/۲
۱۰	۲۵/۲۲	۵۵۹۳	۶۰	-۰/۸۹۲	-۴۴/۴۵
۱۱	۳/۹۰۵	۵/۹۶	۴۰	۰/۵۷۲۴	۱۶۷/۶
۱۲	۳/۹۰۵	۳۵۱۷	۵۳۰	۸/۹۱۲	۳۵۵۳
۱۳	۰/۷۷۴۴	۰	۲۵	۰/۳۶۷۲	۱۰۴/۹
۱۴	۰/۷۷۴۴	۱/۴۷۴	۲۵/۰۹	۰/۳۶۷۹	۱۰۷
۱۵	۰/۷۷۴۴	۱۱۱۸	۶۳۰	۷/۷۸	۳۷۵۸
۱۶	۰/۹۳۶۷	۰	۲۵	۱۰/۴۷	-۱۳۴۲۲
۱۷	۵/۵۷	۲۱۷۳	۴۰۰	۵/۹۲۵	-۱۷۹۰
۱۸	۵/۵۷	-۵۹۶۷	۵۰۰	۵/۹۲۳	-۱۷۹۲
۱۹	۰/۴۱۶۴	۷۷/۵۷	۵۰۰	۷/۳۷۵	۴۶۷/۶
۲۰	۲/۳۶۶	-۱۸۵۴	۴۰۰	۶/۳۲۶	-۱۱۴۱
۲۱	۲/۳۶۶	۲/۵۹۸	۲۵	-۱/۲۲	-۵۱۴۱
۲۲	۵/۱۵۴	۲۵۶۵	۵۰۰	۲/۷۴۸	-۱۰۹۶
۲۳	۵/۱۵۴	۲۴۸۸	۴۳۰	۲/۷۱۲	۱۰۷۰
۲۴	۰/۰۵۲۴۷	۰	۲۵	۶۴/۷۶	۰
۲۵	۷/۴۶۷	۰/۴۳۳۳	۲۵	۲/۳۷۹	-۷۰۸/۷
۲۶	۷/۴۶۷	۳۵۵۰	۸۰	۳/۳۱۷	-۵۸۳/۹
۲۷	۶/۹۹۹	۲۴۶۹	۸۰	۵/۲۰۶	۳۵۸/۳
۲۸	۰/۴۶۷۸	۳/۹۷۲	۸۰	۱۰/۷۹	-۱۳۳۱۹
۲۹	۰/۴۶۷۸	۰	۲۵	۱۰/۴۷	-۱۳۴۲۲

عملکرد سیستم پیشنهادی

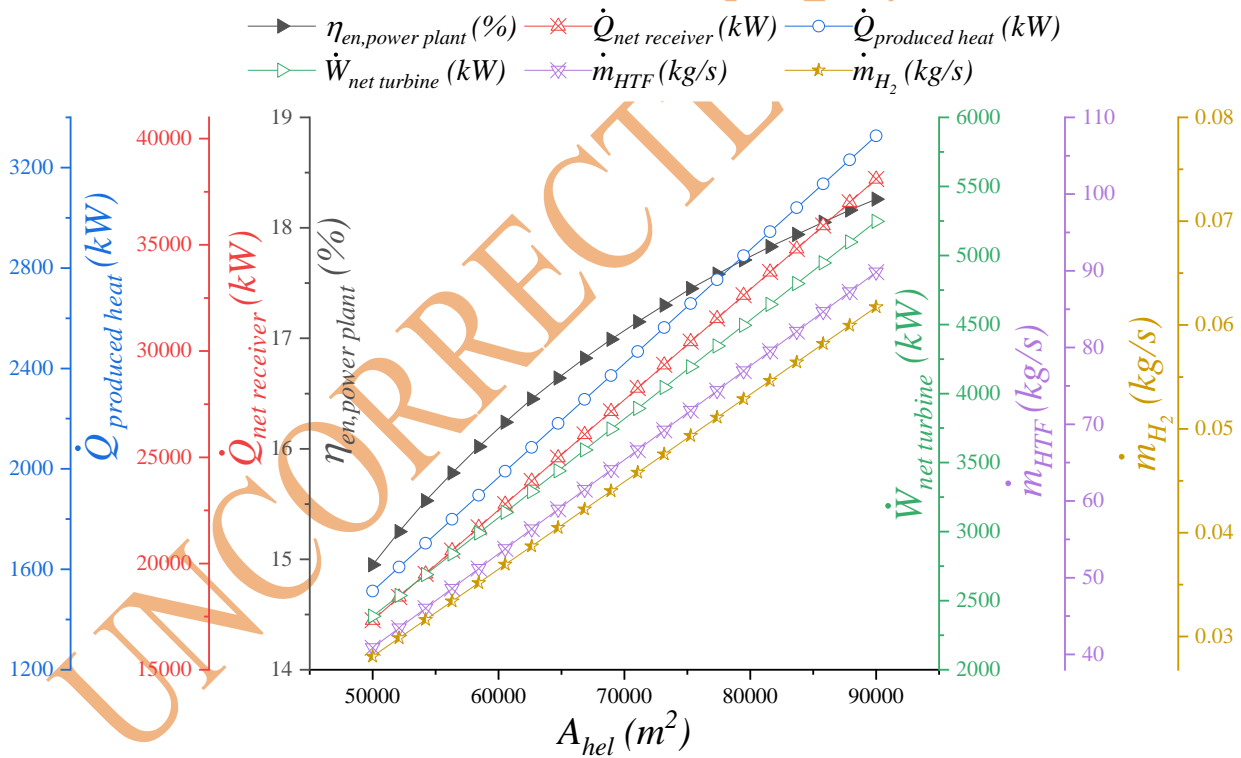
۶-۱- تأثیر تغییرات در مساحت میدان هلیوستات بر

و اگزرژی ذخیره شده در TES تا قبل از مساحت طراحی پایه میدان هلیوستات صفر باقی می ماند. پس از آن، این مقادیر با افزایش مساحت میدان هلیوستات از ۵۰,۰۰۰ متر مربع به ۹۰,۰۰۰ متر مربع، به صورت متناسب افزایش می یابند که در شکل ۵ نشان داده شده است.

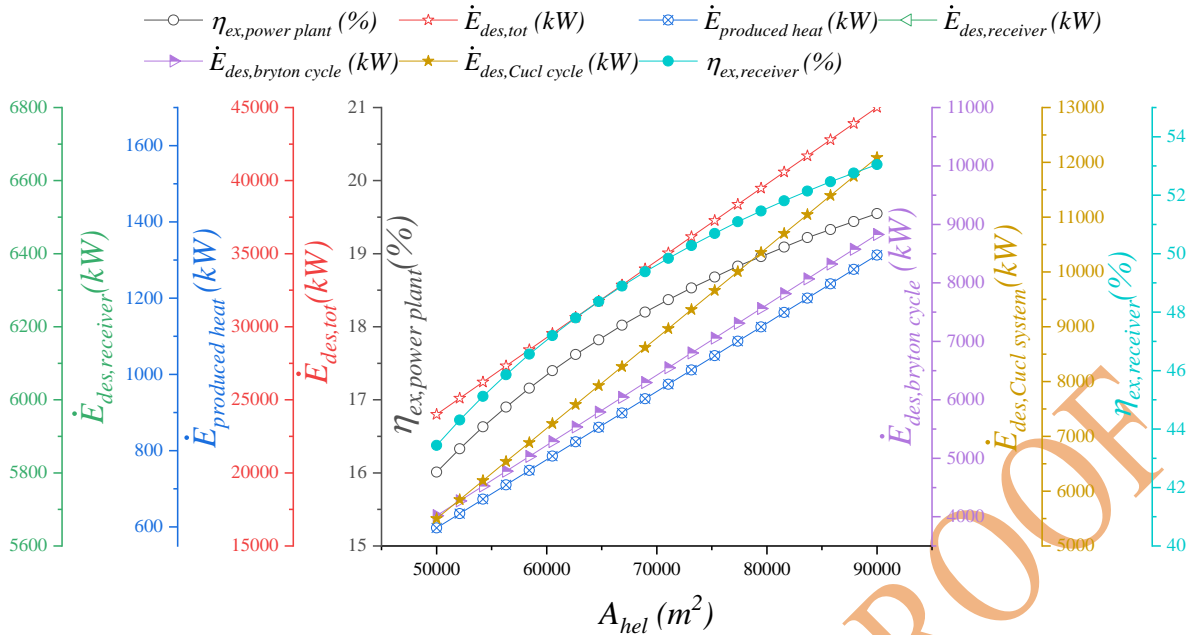
نتایج ما با یافته های مرجع [۱۷] همخوانی دارد، که نشان می دهد افزایش مساحت میدان هلیوستات به طور قابل توجهی عملکرد سیستم را بهبود می بخشد. پژوهش آن ها نشان می دهد که میدان های هلیوستات بزرگ تر انرژی خورشیدی بیشتری را جذب کرده و در نتیجه، بازده انرژی سیستم افزایش می یابد. این موضوع از تحقیق ما پشتیبانی می کند که افزایش مساحت میدان هلیوستات از ۵۰,۰۰۰ متر مربع به ۹۰,۰۰۰ متر مربع منجر به بهبود چشمگیر در بازده انرژی و اگزرژی به دلیل ورودی حرارتی بیشتر به گیرنده می شود.

شکل های ۳ و ۴ تأثیر تغییرات در مساحت میدان هلیوستات بر عملکرد سیستم پیشنهادی را نشان می دهند. با افزایش مساحت میدان هلیوستات از ۵۰,۰۰۰ متر مربع به ۹۰,۰۰۰ متر مربع، انرژی حرارتی بیشتری به گیرنده منتقل شده و نرخ جریان حرارت و جرم HTF افزایش می یابد. این امر منجر به انتقال انرژی حرارتی بیشتر به گاز دی اکسید کربن از طریق مبدل حرارتی شده و در نتیجه، نرخ تولید برق، هیدروژن و حرارت به طور قابل توجهی افزایش می یابد. افزایش تولید برق، هیدروژن و حرارت منجر به افزایش تخریب اگزرژی در چرخه های Sc-CO₂ و Cu-Cl شده و همچنین باعث افزایش تخریب اگزرژی کل و افزایش اگزرژی حرارت تولیدی می شود.

با توجه به این که اکثر تلفات حرارتی در گیرنده از طریق تابش اتفاق می افتد و با توجه به دمای ثابت گیرنده، افزایش قابل توجهی در اتلافات تابشی رخ نمی دهد، انتظار می رود که بازده انرژی و اگزرژی نیروگاه بهبود یابد. در ابتدا، انرژی



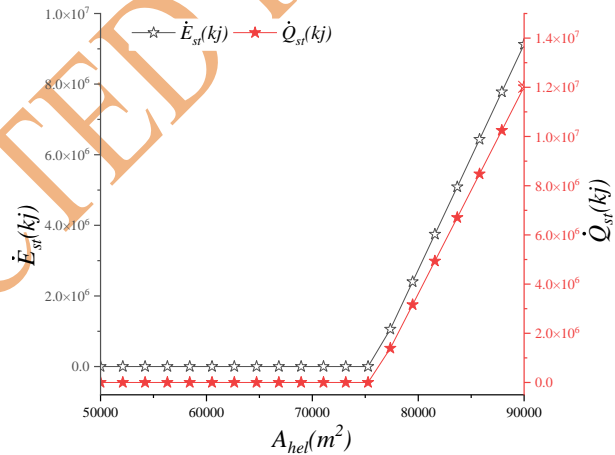
شکل ۳- تأثیر تغییرات در مساحت میدان هلیوستات بر نرخ تولید محصولات و حرارت خالص قابل انتقال از گیرنده، نرخ جریان جرمی HTF و بازده انرژی نیروگاه



شکل ۴- تأثیر تغییرات در مساحت میدان هلیوستات بر تخریب انرژی اجزای سیستم و بازده انرژی نیروگاه.

سیستم، به ویژه در چرخه برایتون Sc-CO₂ و چرخه تولید هیدروژن Cu-Cl، را افزایش می‌دهد. این افزایش به دلیل ورودی انرژی بیشتر از میدان خورشیدی است که باعث افزایش متناسب تخریب انرژی می‌شود. شکل ۷ این روند را نشان می‌دهد، که در آن تخریب انرژی با افزایش تابش خورشید به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، انرژی حرارت تولید شده نیز افزایش محسوسی را تجربه می‌کند. از دیدگاه فیزیکی، با افزایش تابش خورشید، بازده انرژی گیرنده و نیروگاه به دلیل افزایش انتقال انرژی خورشیدی به حرارت قابل استفاده بهبود می‌یابد. با این حال، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، بازده انرژی به دلیل تخریب اضافی انرژی ناشی از نرخ‌های بالاتر جریان انرژی، به طور تدریجی تری افزایش می‌یابد. به طور قابل توجهی مشاهده شد که انرژی و انرژی ذخیره شده در زیرسیستم TES تا زمانی که تابش خورشیدی حادث به یک مقدار پایه خاص نرسد، شروع به افزایش نمی‌کنند. شکل ۸ نشان می‌دهد که پس از عبور از این آستانه، انرژی و انرژی ذخیره شده در TES با افزایش تابش خورشید به صورت متناسب رشد می‌کنند، که نشان‌دهنده توانایی سیستم در جبران نوسانات انرژی خورشیدی و تضمین عملیات پایدار است.

در مقایسه با مطالعات مشابه، نتایج تخریب انرژی به خوبی با نتایج مطالعه سیستم‌های هیبریدی احتراق اکسی



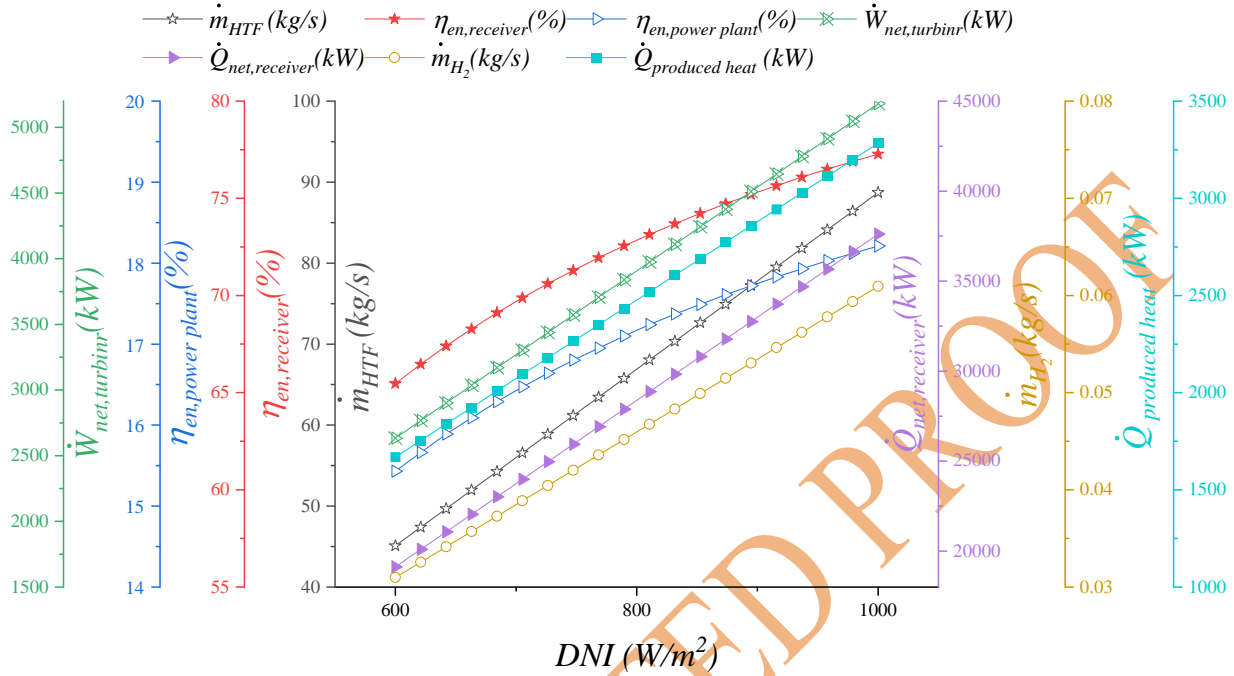
شکل ۵- تأثیر تغییرات در مساحت میدان هلیوستات بر انرژی و انرژی ذخیره‌شده در زیر سیستم TES.

۲-۶- تأثیر تغییرات در تابش خورشیدی نرمال بر عملکرد سیستم پیشنهادی

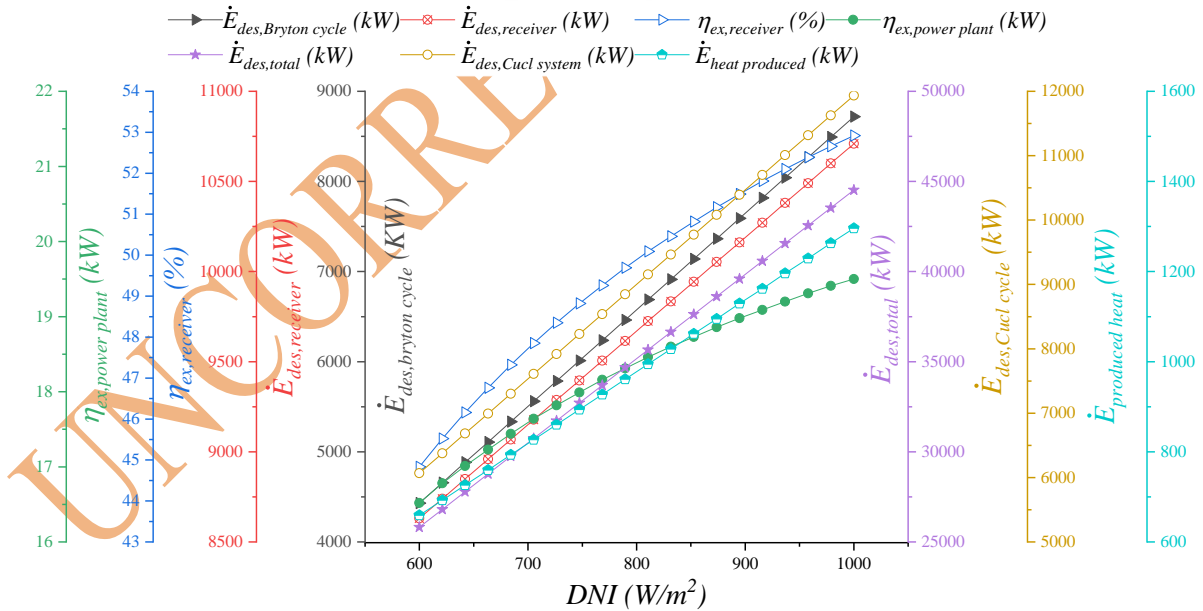
با افزایش تابش نرمال خورشید، میدان هلیوستات انرژی حرارتی بیشتری را به سمت گیرنده هدایت می‌کند که در نتیجه آن، مقدار بیشتری از حرارت به HTF منتقل می‌شود. این پدیده که در شکل ۶ نشان داده شده است، باعث افزایش نرخ جریان جرمی کلی HTF می‌شود و در نتیجه انتقال انرژی بیشتری به سیال عامل در مبدل حرارتی صورت می‌گیرد. انتقال انرژی بهبود یافته منجر به افزایش تولید برق، هیدروژن و بخار فوق‌داغ می‌شود. افزایش تابش خورشید به طور قابل توجهی تخریب انرژی در اجزای

خورشیدی بالا، برجسته می‌سازد. نتایج نشان می‌دهند که این سیستم می‌تواند به‌طور مؤثر در کاربردهای صنعتی که به فرآیندهای دما بالا، مانند تولید هیدروژن، نیاز دارند، استفاده شود.

مشابهت دارد، که روندهای مشابهی از دست دادن انرژی تحت ورودی انرژی بالا را گزارش کرده‌اند [۴۹]. این مقایسه رفتار سیستم را تأیید می‌کند و پتانسیل آن را برای کاربردهای دنیای واقعی، به‌ویژه در مناطق با تابش

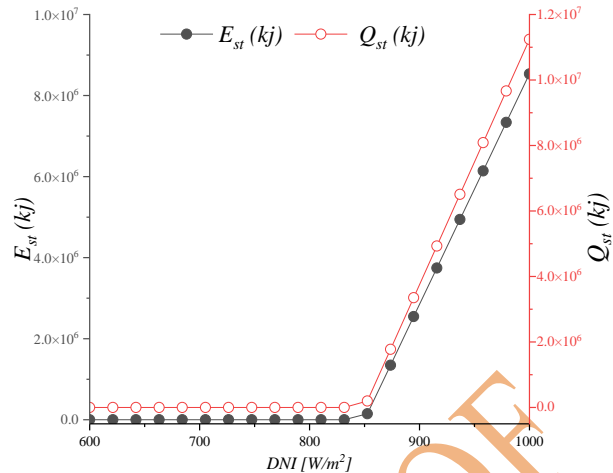


شکل ۶- تأثیر تغییرات در تابش نرمال بر محصولات تولیدی و گرمای محاصل قابل انتقال گیرنده، نرخ جریان جرمی HTF و بازده انرژی نیروگاه.



شکل ۷- تأثیر تغییرات در تابش نرمال بر تخریب انرژی اجزای سیستم و بازده انرژی نیروگاه.

دمای سطح گیرنده نیز افزایش می‌یابد. این مشاهدات مهم است زیرا دمای سطح گیرنده یکی از عوامل اصلی در تعیین تلفات حرارتی تابشی است. در دماهای بالاتر گیرنده، تلفات تابشی افزایش می‌یابد که به نوبه خود، مقدار انرژی حرارتی خالص منتقل شده به HTF را کاهش می‌دهد. این پدیده منجر به کاهش نرخ‌های تولید برق، هیدروژن، و بخار فوق‌داغ می‌شود، زیرا انرژی حرارتی کمتری برای تبدیل در سیستم در دسترس است. علاوه بر این، افزایش تخریب انرژی و انرژی بالاتر گیرنده منجر به کاهش کارایی‌های انرژی و انرژی سیستم می‌شود. نکته کلیدی این است که با افزایش تلفات تابشی، فرآیند تبدیل انرژی کمتر مؤثر می‌شود و به دنبال آن، راندمان گیرنده و راندمان کلی نیروگاه کاهش می‌یابد. این یافته‌ها با مطالعاتی مانند [۱،۲] هم‌راستا است که نشان می‌دهد تلفات حرارتی تابشی منبع مهمی از ناکارآمدی در سیستم‌های خورشیدی با دماهای بالا است. به‌ویژه، [۱] روندهای مشابهی را ثبت کرده است که در آن تلفات تابشی در دماهای بالا باعث کاهش کارایی در نیروگاه‌های خورشیدی برج خورشیدی شده است. از نظر عملی، این نتایج اهمیت حفظ دمای بهینه خروجی HTF را برای اطمینان از حداکثر کارایی سیستم نشان می‌دهند. در کاربردهای واقعی، تنظیم مساحت میدان هلیوستات یا پیاده‌سازی سیستم‌های TES می‌تواند اثرات منفی تلفات تابشی را کاهش دهد. به عنوان مثال، ادغام سیستم‌های کنترل تطبیقی که دماهای HTF را مانیتور کرده و پارامترهای عملیاتی را تنظیم می‌کنند، می‌تواند کارایی سیستم را در محیط‌های عملی بهبود بخشد. در نتیجه، تأثیر دمای خروجی HTF بر عملکرد سیستم برای درک نظری و کاربردهای عملی بسیار حائز اهمیت است. با حفظ دمای بهینه HTF، طراحان سیستم می‌توانند تلفات انرژی را به حداقل رسانده و تولید برق، هیدروژن، و بخار فوق‌داغ را حداکثر کنند، و به این ترتیب کارایی کلی و عملی بودن سیستم‌های برج خورشیدی را بهبود بخشند.

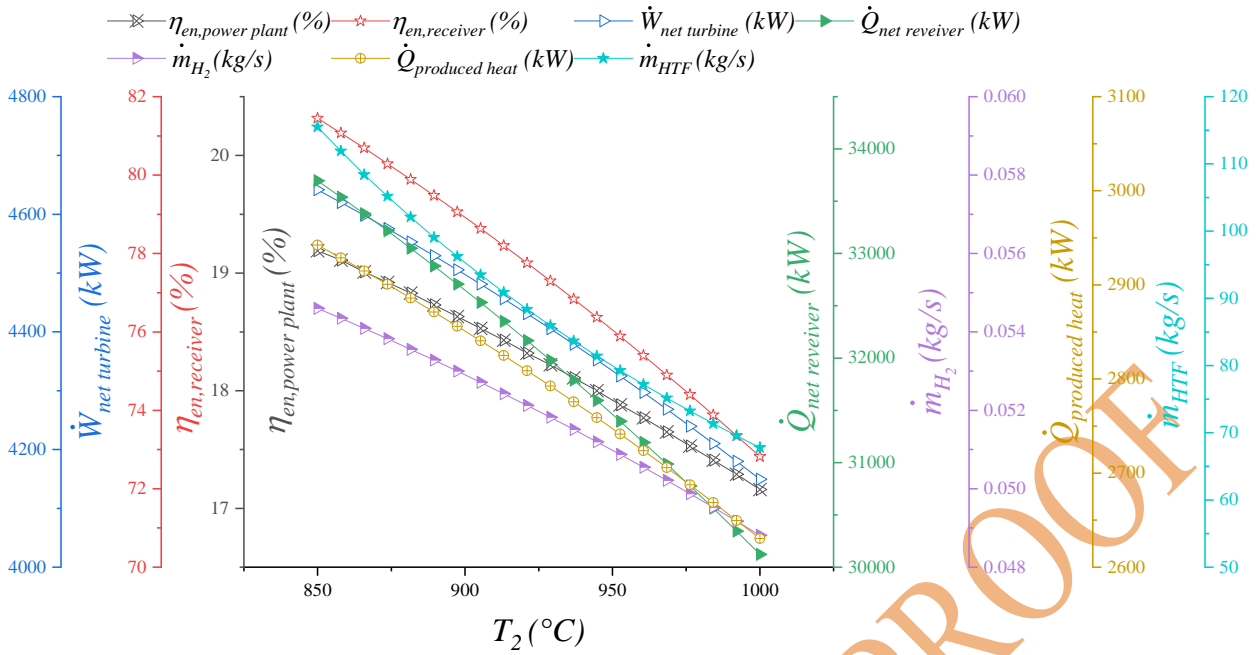


شکل ۸- تأثیر تغییرات در تابش عادی بر انرژی و انرژی

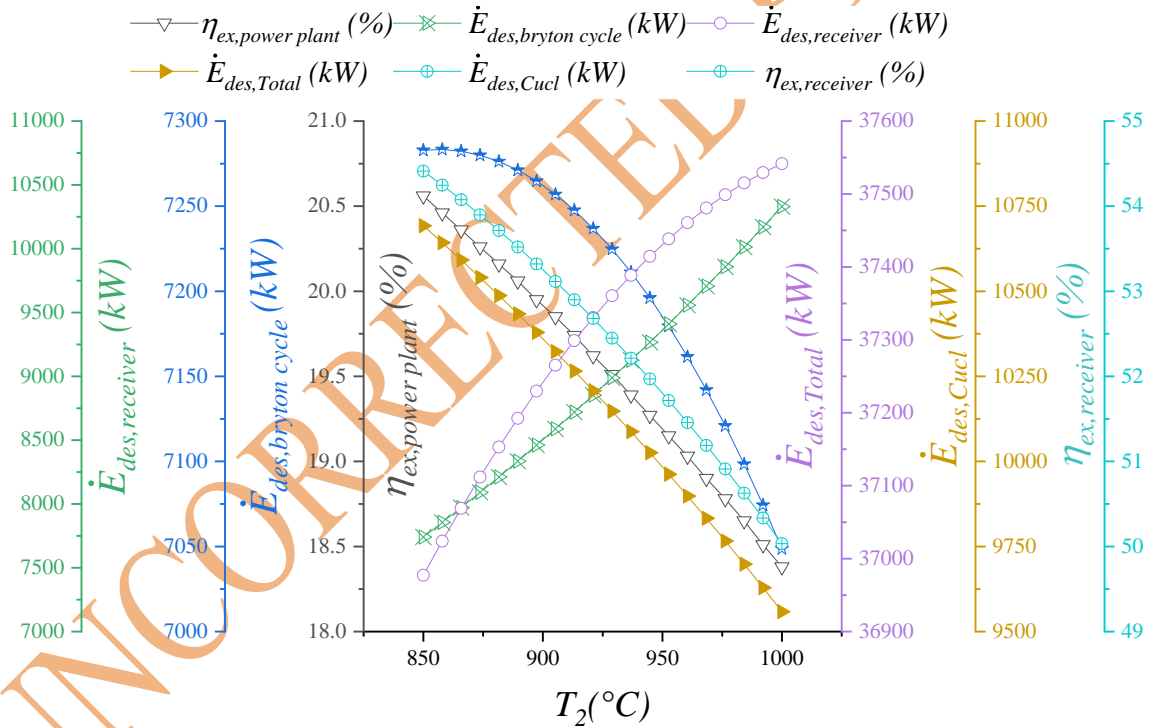
ذخیره‌شده در زیر سیستم TES.

۶-۳- تأثیر تغییرات دمای HTF در خروجی گیرنده بر عملکرد سیستم پیشنهادی

همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، افزایش دمای خروجی HTF تأثیرات زیادی بر عملکرد سیستم دارد. با افزایش دمای خروجی HTF، انرژی حرارتی ذخیره‌شده در HTF افزایش می‌یابد و به علت ثابت بودن تابش و افزایش تلفات تابشی در دمای بالاتر باعث کاهش انتقال به HTF می‌شود. این روند به‌طور مستقیم با تراز انرژی سیستم مرتبط است؛ افزایش انرژی حرارتی ابتدا باعث بهبود کارایی می‌شود، اما با کاهش نرخ جریان جرمی، عملکرد شروع به افت می‌کند. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، انرژی ذخیره‌شده در زیرسیستم TES نیز تأثیر قابل توجهی را نشان می‌دهد. دماهای بالاتر خروجی HTF باعث افزایش ورودی انرژی حرارتی به سیستم TES می‌شود، اما این امر منجر به افزایش تلفات حرارتی درون TES نیز می‌شود. در نتیجه، مقدار انرژی و انرژی ذخیره‌شده در TES کاهش می‌یابد. این تلفات انرژی مؤثر را برای استفاده‌های بعدی کاهش می‌دهد و به تبع آن، کارایی کلی سیستم تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد. با افزایش دمای خروجی HTF از گیرنده،

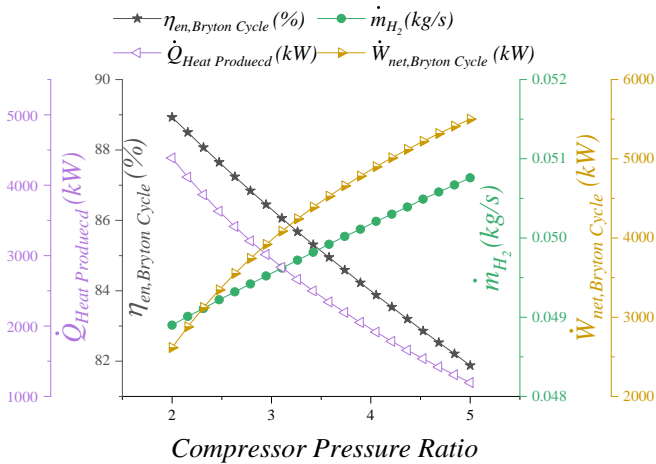


شکل ۹- تأثیر تغییرات دمای HTF در خروجی گیرنده بر محصولات تولیدی، بازده انرژی نیروگاه و نرخ جریان جرمی HTF

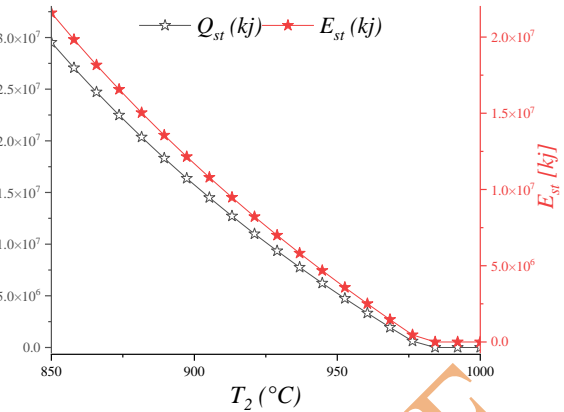


شکل ۱۰- تأثیر تغییرات دمای HTF در خروجی گیرنده بر تخریب انرژی اجزای سیستم و بازده انرژی نیروگاه.

آن‌ها از سیستم‌های نیروگاه احتراق اکسی تأکید شده است. در خلاصه، در حالی که افزایش نسبت فشار کارایی حرارتی و تولید توان چرخه برایتون Sc-CO₂ را بهبود می‌بخشد، همچنین کار کمپرسور و تخریب انرژی بیشتری را معرفی می‌کند. بنابراین، مدیریت دقیق نسبت فشار برای بهینه‌سازی عملکرد و کارایی کلی سیستم و کاهش اثرات منفی مرتبط با افزایش کار کمپرسور و تخریب انرژی بسیار حیاتی است.



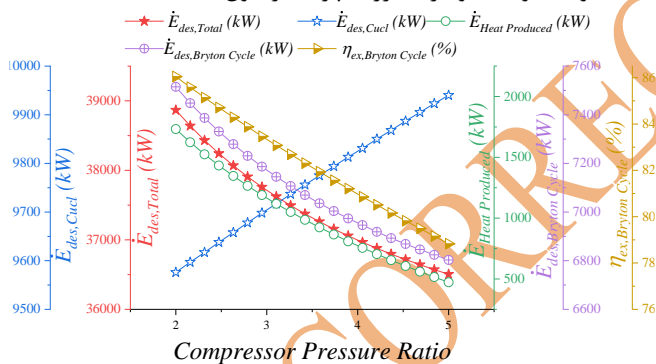
شکل ۱۱- تأثیر تغییرات دمای HTF در خروجی گیرنده بر ذخیره‌سازی انرژی و انرژی در سیستم TES.



شکل ۱۲- تأثیر نسبت فشار چرخه برایتون Sc-CO₂ بر محصولات تولیدی و بازده انرژی چرخه برایتون Sc-CO₂

۴-۶- تأثیر تغییرات نسبت فشار چرخه برایتون Sc-CO₂ بر عملکرد سیستم پیشنهادی

طبق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، افزایش نسبت فشار منجر به افزایش آنتالپی ورودی مبدل حرارتی و آنتالپی ورودی توربین می‌شود. این افزایش در آنتالپی موجب افزایش نرخ جریان جرمی گاز دی‌اکسید کربن می‌شود که به نوبه خود، تولید توان را افزایش می‌دهد. تولید برق بیشتر تغییرات آنتالپی بین ورودی و خروجی HRSG1 را کاهش می‌دهد. این کاهش، به همراه نرخ جریان جرمی بالاتر CO₂، منجر به کاهش مقدار حرارت تولید شده و انرژی مربوط به آن می‌شود. به دلیل دمای ثابت ورودی HRSG2 و افزایش نرخ جریان جرمی CO₂، حرارت بیشتری توسط HRSG2 به چرخه منتقل می‌شود. در نتیجه، این امر منجر به افزایش تولید هیدروژن و تخریب انرژی بیشتر در چرخه Cu-Cl می‌شود.

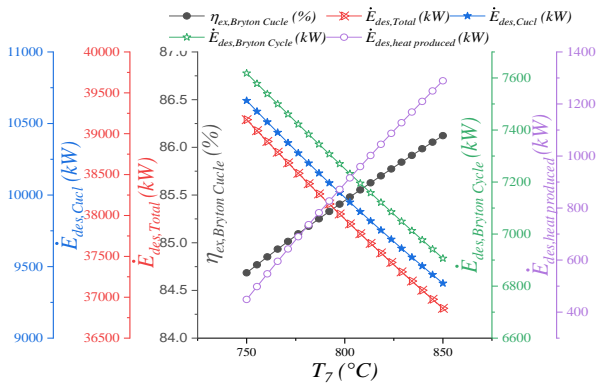


شکل ۱۳- تأثیر نسبت فشار چرخه برایتون Sc-CO₂ بر تخریب انرژی اجزای سیستم و بازده انرژی چرخه برایتون Sc-CO₂

۵-۶- تأثیر تغییرات دمای ورودی چرخه برایتون Sc-CO₂ بر عملکرد سیستم پیشنهادی

همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، افزایش دمای ورودی چرخه برایتون Sc-CO₂ تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم دارد. با افزایش دمای ورودی، آنتالپی دی‌اکسید کربن ورودی به توربین گازی به دلیل تعادل انرژی در مبدل حرارتی افزایش می‌یابد. در نتیجه، نرخ جریان جرمی دی‌اکسید کربن عبوری از مبدل حرارتی (و وارد شونده به توربین) کاهش می‌یابد. این کاهش

علاوه بر این، افزایش آنتالپی در خروجی کمپرسور و افزایش نرخ جریان جرمی CO₂ نیاز به کار کمپرسور را افزایش می‌دهد. این کار اضافی باعث کاهش کارایی انرژی و انرژی چرخه برایتون Sc-CO₂ می‌شود. این نتایج با یافته‌های مطالعه [۲۰] که نشان می‌دهد افزایش نسبت فشار می‌تواند بهبود کارایی حرارتی و تولید توان را به همراه داشته باشد، اما همچنین منجر به افزایش کار کمپرسور و تخریب انرژی بیشتر می‌شود، هم‌راستا است. تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که در حالی که نسبت‌های فشار بالاتر تولید توان را بهبود می‌بخشد، همچنین منجر به افزایش کار کمپرسور و کاهش کارایی می‌شوند. این موضوع نیاز به یک رویکرد متعادل در مدیریت نسبت فشار برای بهینه‌سازی عملکرد کلی سیستم را تأیید می‌کند، همان‌طور که در تحلیل جامع

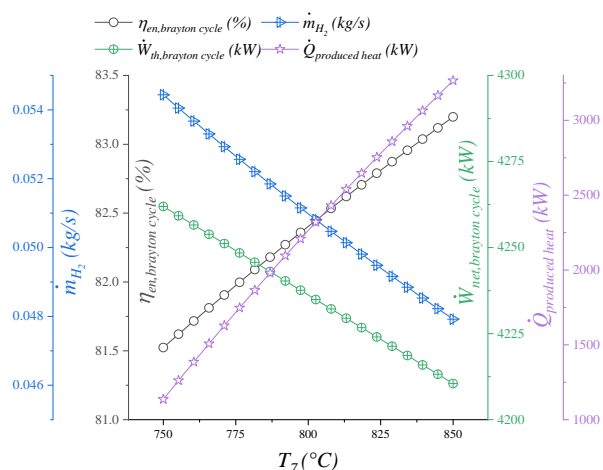


شکل ۱۵- تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین بر تخریب
اگرزری اجزای سیستم و بازده اگرزری چرخه برایتون Sc-
CO₂

۶-۶- تأثیر تغییرات دما در نقاط مختلف چرخه Cu- Cl بر عملکرد آن

چرخه Cu-Cl به شدت به تغییرات دما در نقاط مختلف حساس است و تأثیر قابل توجهی بر نرخ‌های تولید هیدروژن و بازده انرژی و اگرزری سیستم دارد. شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ نشان می‌دهند که این تغییرات دما چگونه بر عملکرد چرخه Cu-Cl در مراحل مختلف، از جمله هیدرولیز، ترمولیز، الکترولیز و خشک کردن، تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با افزایش دمای خروجی هیدرولیز، آنتالپی افزایش می‌یابد که منجر به افزایش قابل توجه تولید هیدروژن می‌شود. این افزایش همچنین منجر به افزایش تخریب اگرزری می‌شود، اما بازده انرژی و اگرزری بهبود می‌یابد. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی ترمولیز، طبق موازنه معادله انرژی، نرخ تولید هیدروژن را کاهش داده و عملکرد سیستم را کاهش می‌دهد. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی الکترولیز منجر به افزایش مصرف انرژی در الکترولیز و در نتیجه همزمان با تخریب اگرزری در فرآیند الکترولیز بازده انرژی و اگرزری کاهش می‌یابد. در نهایت، شکل ۱۹ تأثیر دمای ورودی خشک کردن را نشان می‌دهد، جایی که دمای بالاتر نرخ‌های تولید هیدروژن را افزایش می‌دهد. با این حال، این بهبود منجر به افزایش مصرف کار و تخریب اگرزری تمام می‌شود. به این ترتیب، در حالی که تولید بهبود می‌یابد، کارایی کلی سیستم کاهش می‌یابد و تعادل دقیق بین ورودی انرژی و خروجی هیدروژن را برجسته می‌کند. این موضوع اهمیت حفظ دماهای بهینه در چرخه Cu-Cl برای کاهش تلفات اگرزری را تأکید می‌کند.

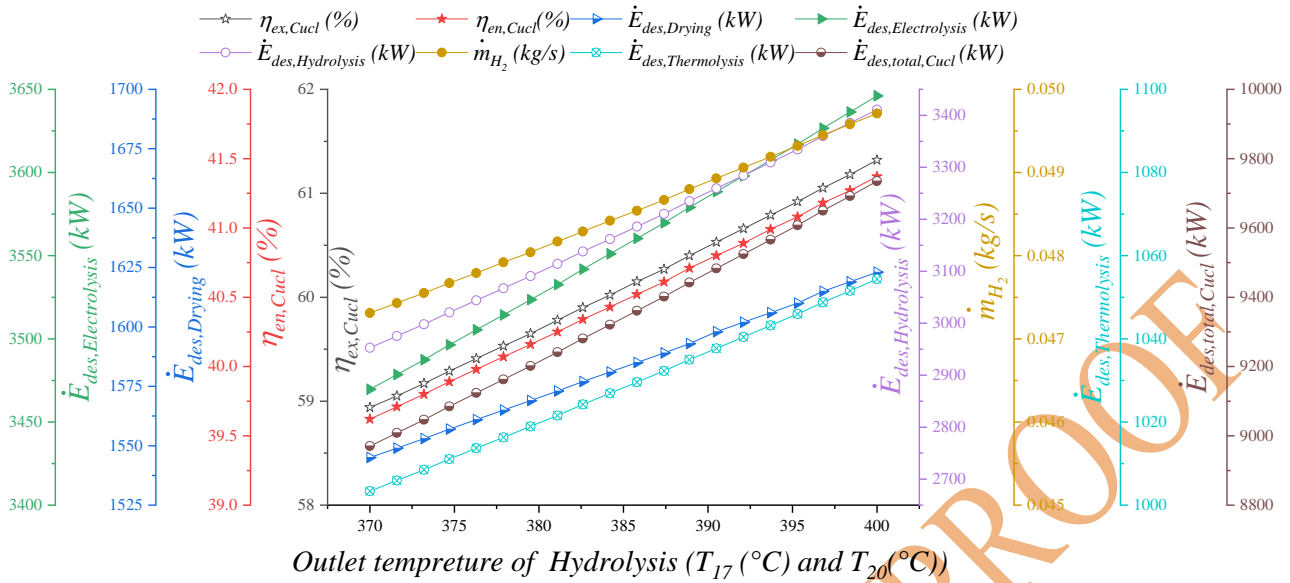
در نرخ جریان جرمی همراه با افزایش آنتالپی منجر به کاهش تولید توان و تخریب اگرزری در داخل چرخه می‌شود. با این حال، این بهبود در بازده انرژی و اگرزری با افزایش دمای خروجی توربین و تولید حرارت و همچنین افزایش اگرزری حرارت تولید شده همراه است. دماهای ثابت HRSGها در نقاط نهم و دهم به همراه کاهش نرخ جریان جرمی دی‌اکسید کربن، انتقال حرارت موجود برای چرخه Cu-Cl را کاهش می‌دهند. در نتیجه، این کاهش منجر به کاهش نرخ تولید هیدروژن و تخریب اگرزری در داخل چرخه Cu-Cl شده و در نهایت منجر به کاهش کلی تخریب اگرزری در سیستم‌های تولید می‌شود. علی‌رغم بهبود بازده، دماهای ورودی بالاتر نیز معایبی دارند. دماهای بالا می‌تواند تنش‌های حرارتی را بر اجزای سیستم افزایش دهد که ممکن است بر دوام و قابلیت اطمینان آن‌ها در طول زمان تأثیر بگذارد. علاوه بر این، اگرچه بازدهی بهبود می‌یابد، اما این امر می‌تواند منجر به تخریب اگرزری بیشتر به دلیل افزایش برگشت‌ناپذیری‌ها در داخل چرخه شود. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مانند [۴] که نیاز به تعادل بین مزایای افزایش بازده و چالش‌های ناشی از تنش‌های حرارتی بالاتر را برجسته کرده‌اند، همخوانی دارد. به‌طور خلاصه، افزایش دمای ورودی چرخه برایتون Sc-CO₂ تولید برق و بازده را بهبود می‌بخشد، اما تنش‌های حرارتی بیشتر و افزایش تخریب اگرزری را معرفی می‌کند. بنابراین، مدیریت مؤثر دمای ورودی برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم و اطمینان از قابلیت اطمینان اجزا بسیار مهم است.



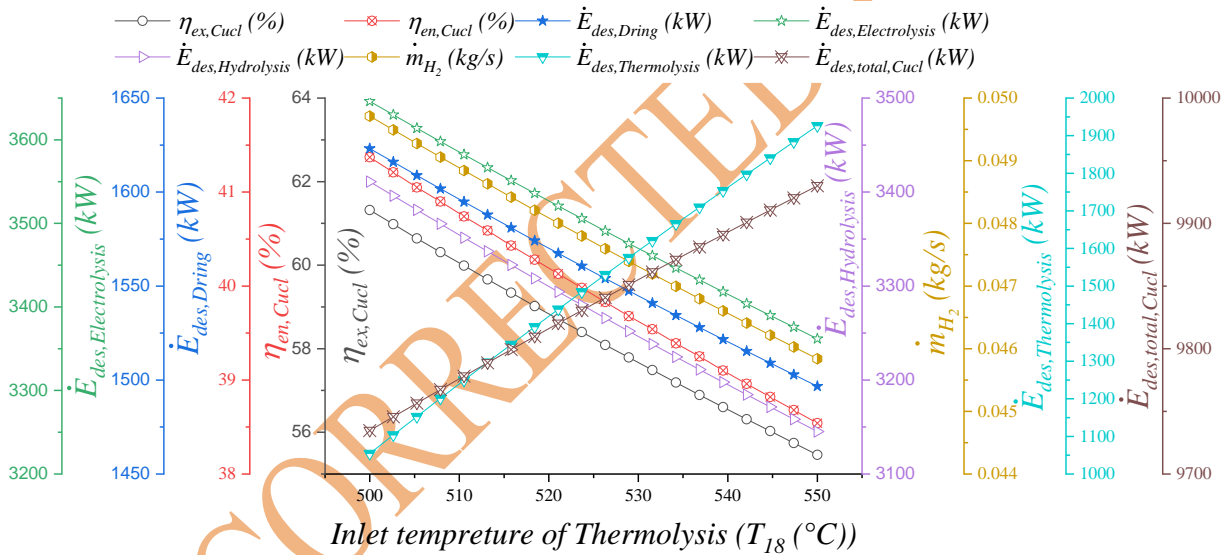
شکل ۱۴- تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین بر محصولات
تولیدی و بازده انرژی چرخه برایتون Sc-CO₂.

مطالعه‌ای که توسط اسحاق و همکاران [۴۵] انجام شده است، این مشاهده را تأیید می‌کند و بر اهمیت مدیریت حرارتی دقیق برای به حداکثر رساندن کارایی در سیستم‌های تولید هیدروژن الکتروشیمیایی تأکید می‌کند.

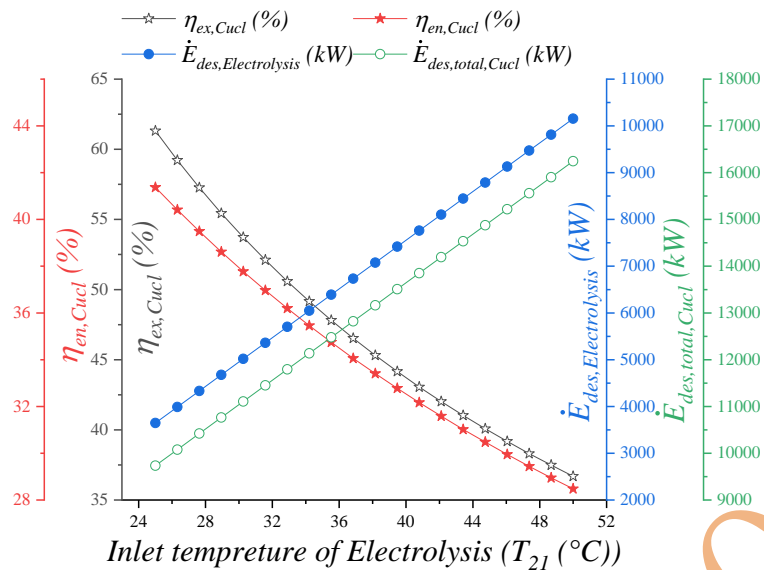
سیستم‌های تولید هیدروژن الکتروشیمیایی تأکید می‌کند.



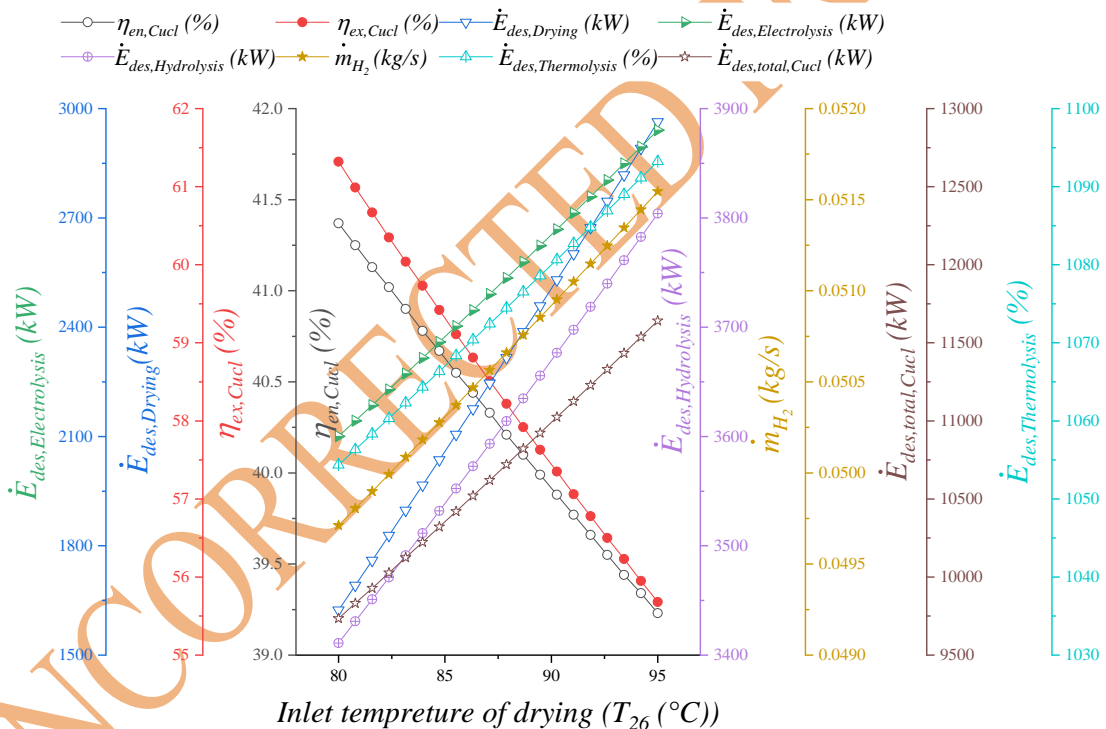
شکل ۱۶- تأثیر تغییرات دمای خروجی هیدرولیز بر عملکرد چرخه Cu-Cl



شکل ۱۷- تأثیر تغییرات دمای ورودی ترمولیز بر عملکرد چرخه Cu-Cl



شکل ۱۸- تأثیر تغییرات دمای ورودی الکترولیز بر عملکرد چرخه Cu-Cl



شکل ۱۹- تأثیر تغییرات دمای ورودی خشک‌سازی بر عملکرد چرخه Cu-Cl

۷- نتیجه‌گیری

TES، چرخه برایتون Sc-CO₂ و چرخه تولید هیدروژن Cu-Cl ترکیب می‌کند. این ترکیب نوآورانه با یکپارچه‌سازی انرژی خورشیدی دما بالا با چرخه‌های ترمودینامیکی پیشرفته برای تولید هیدروژن، به چالش استفاده کارآمد از انرژی و انرژی پاسخ می‌دهد.

- زیرسیستم برج خورشیدی به بازده انرژی ۷۴/۱۶٪ و بازده انرژی ۵۰/۷۸٪ دست یافت که

سیستم تولید همزمان پیشنهادی برای بهره‌برداری از منابع حرارتی دما بالا در برج‌های خورشیدی به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است تا عملکرد آن از نظر انرژی و انرژی ارزیابی شود. یافته‌ها و نوآوری‌های کلیدی این مطالعه عبارتند از:

- این مطالعه یک سیستم یکپارچه نوین را معرفی می‌کند که یک برج خورشیدی را با زیرسیستم

پایداری نشان می‌دهد.

۸- نمادها

علائم اصلی	
A	سطح (m ²)
Com	کمپرسور
Cu-Cl	چرخه مس-کلر
DHW	آب گرم
DNI	تابش نرمال (W/m ²)
\dot{E}_x	انرژی (kW)
ex	جریان انرژی بر واحد (kJ.Kg ⁻¹ .s ⁻¹)
ELE	الکترولیز
F	سوخت
h	آنتالپی ویژه (kJ/kg)
HYD	هیدرولیز
H.X	مبدل حرارتی
\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
pr	فشار (kpa)
N	شماره
\dot{Q}	حرارت (kW)
$\dot{Q}_{em.loss}$	تلفات حرارتی بخش (kW)
$\dot{Q}_{ref.loss}$	تلفات حرارتی بازتابی (kW)
$\dot{Q}_{cond.loss}$	تلفات حرارتی هدایتی (kW)
$\dot{Q}_{conv.loss}$	تلفات حرارتی جابجایی (kW)
s	خورشید؛ حالت آیزنوتروپیک
\dot{S}	نرخ آنتروپی (kJ/K)
T	دما (°C, K)
t	زمان
THE	ترمولیز
V	سرعت (m/s)
\dot{W}	نرخ کار (kW)
R	ثابت جهانی گازها (J. kg ⁻¹ .K ⁻¹)
زیرنویس‌ها	
abs	جذب شده
com	کمپرسور
ch	شارژ
dis	تخلیه
D	تخریب
en	نرخ انرژی بر واحد (kJ.Kg ⁻¹ .s ⁻¹)
ex	نرخ انرژی بر واحد (kJ.Kg ⁻¹ .s ⁻¹)
F	سوخت
f	نهایی
field	میدان هلیوستات
H.X	مبدل حرارتی
hel	هلیوستات‌ها
in	ورودی
LHV	ارزش حرارتی پایین‌تر (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)

عملکرد بالای آن را در جذب و تبدیل انرژی خورشیدی به فرم‌های قابل استفاده نشان می‌دهد. چرخه Sc-CO₂ برایتون به بازده انرژی ۸۵/۷۲٪ و بازده انرژی ۸۲/۷۳٪ دست یافت که اثربخشی آن را در تبدیل انرژی حرارتی به برق نشان می‌دهد. چرخه Cu-Cl به بازده انرژی ۴۱/۳۷٪ و بازده انرژی ۶۱/۳۲٪ دست یافت که پتانسیل آن را برای تولید هیدروژن برجسته می‌سازد.

• نرخ‌های تولید توان، حرارت و هیدروژن سیستم به ترتیب ۴۲۲۶ کیلووات، ۲۶۹۷ کیلووات و ۰/۰۴۹۷ کیلوگرم در ثانیه بودند. این نتایج نشان‌دهنده توانایی سیستم در تولید مقادیر قابل توجهی توان، حرارت و هیدروژن است که به پیشرفت فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر کمک می‌کند.

• این پژوهش یک تحلیل جامع از سیستم هیبریدی خورشیدی یکپارچه ارائه می‌دهد و دیدگاه‌های ارزشمندی درباره عملکرد و بازده هر زیرسیستم فراهم می‌آورد. رویکرد و یافته‌های این مطالعه به درک کاربردهای انرژی خورشیدی دما بالا و پتانسیل آن برای تولید هیدروژن پایدار کمک می‌کند. تحلیل عملکرد دقیق و اعتبارسنجی آن در برابر مطالعات موجود، اعتبار کاربردپذیری سیستم پیشنهادی را افزایش می‌دهد.

• تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی هر زیرسیستم برای بهبود بازده کلی سیستم و کاهش اتلاف انرژی تمرکز کند. مطالعات امکان‌سنجی اقتصادی نیز برای ارزیابی اجرای عملی و مقیاس‌پذیری سیستم پیشنهادی ضروری است. تحقیقات بیشتر در زمینه مواد و فناوری‌های پیشرفته برای هر زیرسیستم می‌تواند بهبودهای چشمگیری در عملکرد و هزینه‌ها ایجاد کند.

در نتیجه، سیستم پیشنهادی پیشرفتی قابل توجه در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تولید برق و هیدروژن ارائه می‌دهد. یکپارچه‌سازی زیرسیستم‌های مختلف با بازده‌های بالا و تحلیل عملکرد دقیق، پتانسیل این رویکرد نوآورانه را در پاسخگویی به چالش‌های کنونی انرژی و

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی	TES	کار خالص	net
کل	tot	خروجی	out
	علائم یونانی	پمپ	pu
ضریب جذب	α	محصول	P
ضریب پخش	ε	بازتابندگی	ref
بازده (%)	η	گیرنده	rec
حجم مخصوص (m^3/kg)	ν	برگشت‌پذیر	r
		خورشید	sun
		ذخیره‌سازی	st
		برج	Tower
		توربین	T

مراجع

- [1] Xu, Chao, Zhifeng Wang, Xin Li, and Feihu Sun. "Energy and Exergy Analysis of Solar Power Tower Plants." *Applied thermal engineering* 31, no. 17-18 (2011): 3904-13.
- [2] Fang, Lijun, Yang Li, Xue Yang, and Zeliang Yang. "Analyses of Thermal Performance of Solar Power Tower Station Based on a Supercritical Co2 Brayton Cycle." *Journal of Energy Resources Technology* 142, no. 3 (2020): 031301.
- [3] Jiang, Kaijun, Xiaoze Du, Yanqiang Kong, Chao Xu, and Xing Ju. "A Comprehensive Review on Solid Particle Receivers of Concentrated Solar Power." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116 (2019): 109463.
- [4] Khanmohammadi, Shoaib, Hooman Abdi Chaghakaboodi, and Farayi Musharavati. "A new design of solar tower system amplified with a thermoelectric unit to produce distilled water and power." *Applied Thermal Engineering* 197 (2021): 117406.
- [5] AlZahrani, Abdullah A., and Ibrahim Dincer. "Design and analysis of a solar tower based integrated system using high temperature electrolyzer for hydrogen production." *international journal of hydrogen energy* 41, no. 19 (2016): 8042-8056.
- [6] Benammar, S., A. Khellaf, and K. Mohammedi. "Contribution to the modeling and simulation of solar power tower plants using energy analysis." *Energy conversion and management* 78 (2014): 923-930.
- [7] Balta, M. Tolga, Ibrahim Dincer, and Arif Hepbasli. "Performance assessment of solar-driven integrated Mg-Cl cycle for hydrogen production." *International journal of hydrogen energy* 39, no. 35 (2014): 20652-20661.
- [8] Farsi, Aida, and Ibrahim Dincer. "Thermodynamic assessment of a hybrid particle-based concentrated solar power plant using fluidized bed heat exchanger." *Solar Energy* 179 (2019): 236-248.
- [9] Khanmohammadi, Shoaib, Shabnam Razi, Mostafa Delpisheh, and Hitesh Panchal. "Thermodynamic modeling and multi-objective optimization of a solar-driven multi-generation system producing power and water." *Desalination* 545 (2023): 116158.
- [10] Irani, Milad, Ata Chitsaz, Morteza Khalilian, Mahsa Mehrara, and Kiyam Parham. "Dynamic simulation and performance evaluation of a novel solar heliostat-based alkali metal thermoelectric converter system." *Solar Energy* 228 (2021): 263-273.
- [11] Wang, Kun, and Ya-Ling He. "Thermodynamic analysis and optimization of a molten salt solar power tower integrated with a recompression supercritical CO2 Brayton cycle based on integrated modeling." *Energy conversion and management* 135 (2017): 336-350.
- [12] Javadi, MohammadAmin, Niloofar Jafari Najafi, Mani Khalili Abhari, Roohollah Jabery, and Hamidreza Pourtaba. "4E analysis of three different configurations of a combined cycle power plant integrated with a solar power tower system." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 48 (2021): 101599.
- [13] Al-Sulaiman, F. A. "On the auxiliary boiler sizing assessment for solar driven supercritical CO2 double recompression Brayton cycles." *Applied Energy* 183 (2016): 408-418.
- [14] Wu, Xudong, Chaohui Li, Ling Shao, Jing Meng, Lixiao Zhang, and Guoqian Chen. "Is solar power renewable and carbon-neutral: Evidence from a pilot solar tower plant in China under a systems view." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138 (2021): 110655.

- [15] Khanmohammadi, Shoaib, Onder Kizilkan, and Farayi Musharavati. "Comparative analyses of a novel solar tower assisted multi-generation system with re-compression CO₂ power cycle, thermoelectric generator, and hydrogen production unit." *International Journal of Hydrogen Energy* 47, no. 62 (2022): 25984-25999.
- [16] Yang, Jingze, Zhen Yang, and Yuanyuan Duan. "Off-design performance of a supercritical CO₂ Brayton cycle integrated with a solar power tower system." *Energy* 201 (2020): 117676.
- [17] Zare, V., and M. J. E. C. Hasanzadeh. "Energy and exergy analysis of a closed Brayton cycle-based combined cycle for solar power tower plants." *Energy conversion and management* 128 (2016): 227-237.
- [18] Siddiqui, O., I. Dincer, and B. S. Yilbas. "Development of a novel renewable energy system integrated with biomass gasification combined cycle for cleaner production purposes." *Journal of Cleaner Production* 241 (2019): 118345.
- [19] Abbasi, Narges, Mohammad Hasan Khoshgoftar Manesh, and Mohsen Yazdi. "Dynamic analysis of a novel quadruple combined cycle based on integrated solar tower-gas turbine-supercritical CO₂ and organic Rankine cycles." *Journal of Energy Resources Technology* 144, no. 5 (2022): 051401.
- [20] Ozsarı, Ibrahim, and Yasin Ust. "Energy, economic and environmental analysis and comparison of the novel Oxy-combustion power systems." *Journal of Thermal Engineering* 8, no. 6 (2022): 719-733.
- [21] Sorgulu, Fatih, and Ibrahim Dincer. "Design and analysis of a solar tower power plant integrated with thermal energy storage system for cogeneration." *International Journal of Energy Research* 43, no. 12 (2019): 6151-6160.
- [22] Aberuee, Mohammad Javad, Ehsan Baniasadi, and Masoud Ziaei-Rad. "Performance analysis of an integrated solar based thermo-electric and desalination system." *Applied Thermal Engineering* 110 (2017): 399-411.
- [23] Demir, Murat Emre, and Ibrahim Dincer. "Development of an integrated hybrid solar thermal power system with thermoelectric generator for desalination and power production." *Desalination* 404 (2017): 59-71.
- [24] Okoroigwe, Edmund, and Amos Madhlopa. "An integrated combined cycle system driven by a solar tower: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016): 337-350.
- [25] Khan, Muhammad Sajid, Ishrat Mubeen, Wang Jingyi, Yan Zhang, Gaojun Zhu, and Mi Yan. "Development and performance assessment of a novel solar-assisted multigenerational system using high temperature phase change material." *International Journal of Hydrogen Energy* 47, no. 62 (2022): 26178-26197.
- [26] Almatrafi, Eydhah, Abdul Khaliq, Rajesh Kumar, Ahmad Bamasag, and Muhammad Ehtisham Siddiqui. "Proposal and investigation of a new tower solar collector-based trigeneration energy system." *Sustainability* 15, no. 9 (2023): 7474.
- [27] Ozsari, Ibrahim. "Historical research trends and overview about exergy: a comprehensive analysis." *International Journal of Exergy* 40, no. 1 (2023): 59-73.
- [28] Sachdeva, Jatin, and Onkar Singh. "Thermodynamic analysis of solar powered triple combined Brayton, Rankine and organic Rankine cycle for carbon free power." *Renewable Energy* 139 (2019): 765-780.
- [29] Gholamian, Ehsan, Ali Habibollahzade, and Vahid Zare. "Development and multi-objective optimization of geothermal-based organic Rankine cycle integrated with thermoelectric generator and proton exchange membrane electrolyzer for power and hydrogen production." *Energy Conversion and Management* 174 (2018): 112-125.
- [30] Cumpston, Jeff, Robert Herding, Fabian Lechtenberg, Christoph Offermanns, Alexander Thebelt, and Kosan Roh. "Design of 24/7 continuous hydrogen production system employing the solar-powered thermochemical S-I cycle." *International Journal of Hydrogen Energy* 45, no. 46 (2020): 24383-24396.
- [31] Li, Chennan, Saeb Besarati, Yogi Goswami, Elias Stefanakos, and Huijuan Chen. "Reverse osmosis desalination driven by low temperature supercritical organic rankine cycle." *Applied energy* 102 (2013): 1071-1080.
- [32] Peñate, Baltasar, and Lourdes García-Rodríguez. "Seawater reverse osmosis desalination driven by a solar Organic Rankine Cycle: Design and technology assessment for medium capacity range." *Desalination* 284 (2012): 86-91.
- [33] Nemati, Arash, Mohsen Sadeghi, and Mortaza Yari. "Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic working fluid." *Desalination* 422 (2017): 113-123.
- [34] Williams, D. F. *Assessment of candidate molten salt coolants for the NNGP/NHI heat-transfer loop*. No. ORNL/TM-2006/69. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2006.

- [35] Kalogirou, Soteris A. "Solar thermal collectors and applications." *Progress in energy and combustion science* 30, no. 3 (2004): 231-295.
- [36] Besarati, Saeb M., and D. Yogi Goswami. "A computationally efficient method for the design of the heliostat field for solar power tower plant." *Renewable Energy* 69 (2014): 226-232.
- [37] Behar, Omar, Abdallah Khellaf, and Kamal Mohammadi. "A review of studies on central receiver solar thermal power plants." *Renewable and sustainable energy reviews* 23 (2013): 12-39.
- [38] Zhu, Yong, Rongrong Zhai, Hao Peng, and Yongping Yang. "Exergy destruction analysis of solar tower aided coal-fired power generation system using exergy and advanced exergetic methods." *Applied Thermal Engineering* 108 (2016): 339-346.
- [39] NERL. Concentrating solar power projects. 2011.
- [40] Forsberg, Charles W., Per F. Peterson, and Haihua Zhao. "High-temperature liquid-fluoride-salt closed-Brayton-cycle solar power towers." (2007): 141-146.
- [41] Li, Xiao-li, Shang-ming He, Xing-tai Zhou, Ping Huai, Zhi-jun Li, Ai-guo Li, and Xiao-han Yu. "High-temperature corrosion behavior of Ni-16Mo-7Cr-4Fe superalloy containing yttrium in molten LiF-NaF-KF salt." *Journal of Nuclear Materials* 464 (2015): 342-345.
- [42] Olson, Luke C., James W. Ambrosek, Kumar Sridharan, Mark H. Anderson, and Todd R. Allen. "Materials corrosion in molten LiF-NaF-KF salt." *Journal of Fluorine Chemistry* 130, no. 1 (2009): 67-73.
- [43] Dokiya, M., and Y. Kotera. "Hybrid cycle with electrolysis using Cu-Cl system." *International Journal of Hydrogen Energy* 1, no. 2 (1976): 117-121.
- [44] Chukwu, C. C., G. F. Naterer, and M. A. Rosen. "Process simulation of nuclear-based thermochemical hydrogen production with a copperchlorine cycle." In *Proceedings of 32nd Canadian Nuclear Society Conference*, pp. 1-4. 2008.
- [45] Ishaq, H., and I. Dincer. "A comparative evaluation of three CuCl cycles for hydrogen production." *International Journal of Hydrogen Energy* 44, no. 16 (2019): 7958-7968.
- [46] Gabbrielli, Roberto, and C. Zamparelli. "Optimal design of a molten salt thermal storage tank for parabolic trough solar power plants." (2009): 041001.
- [47] Suárez, Christian, Alfredo Iranzo, F. J. Pino, and J. Guerra. "Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to standby heat loss." *Applied Energy* 142 (2015): 56-65.
- [48] Schulte-Fischedick, Jan, Rainer Tamme, and Ulf Herrmann. "CFD analysis of the cool down behaviour of molten salt thermal storage systems." In *Energy Sustainability*, vol. 43208, pp. 515-524. 2008.
- [49] Chacartegui, R., JM Muñoz De Escalona, D. Sánchez, B. Monje, and T. Sánchez. "Alternative cycles based on carbon dioxide for central receiver solar power plants." *Applied Thermal Engineering* 31, no. 5 (2011): 872-879.
- [50] Al-Zareer, Maan, Ibrahim Dincer, and Marc A. Rosen. "Development and assessment of a novel integrated nuclear plant for electricity and hydrogen production." *Energy Conversion and Management* 134 (2017): 221-234.
- [51] Orhan, Mehmet Fatih. "Conceptual design, analysis and optimization of nuclear-based hydrogen production via copper-chlorine thermochemical cycles." PhD diss., UOIT, 2011.