



تحلیل انرژی، اگزرژی و عملکرد حرارتی سیستم تولید سه‌گانه توان، سرمایش و آب شیرین مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با استفاده از نانوذرات آلومینیوم اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید

یاسر شکری^{۱*}، لیلی گروسی فرشی^۲، مرتضی یاری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

چکیده

در این مقاله، عملکرد ترمودینامیکی و حرارتی یک سیستم نوآورانه تولید سه‌گانه توان، سرمایش و آب شیرین مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با استفاده از نانوذرات آلومینیوم اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید بررسی شده است. هدف، یکپارچه‌سازی سه زیرسیستم با هدف بهبود انتقال حرارت از طریق نانوسیال در جریان سیال واسط می‌باشد. نتایج تحلیل‌های پارامتریک نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات و دمای منبع زمین‌گرمایی، منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل‌ها، ضریب انتقال حرارت جابجایی و توان خالص تولیدی می‌گردد؛ که در این میان، نانوذرات آلومینیوم اکسید عملکرد بهتری نسبت به تیتانیوم دی‌اکسید داشتند. علاوه بر این، با استفاده از نانوذرات، میزان انرژی قابل استحصال از منبع زمین‌گرمایی افزایش یافت که به‌طور مشخص، انتقال حرارت در ژنراتور فشار بالا ۳/۲۴ کیلووات و در اواپراتور ۴/۱ کیلووات افزایش نشان داد که بیانگر تقویت اثر تبرید است. در نهایت، با کسر حجمی ۰/۰۵ از نانوذرات آلومینیوم اکسید، سیستم موفق به تولید ۳۴/۰۶ کیلووات توان خالص، ۱۱۳/۸ کیلووات سرمایش و ۲۰/۴۲ کیلوگرم بر ثانیه آب شیرین شد که منجر به بهره‌وری انرژی ۱/۳۷۵ و بازده اگزرژی ۴۷/۴۱ درصد گردید. این مطالعه پتانسیل بالای ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری نانو را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: جریان واسط؛ نانوذرات؛ تحلیل ترمودینامیکی؛ عملکرد حرارتی؛ بهره‌وری انرژی.

Energy, exergy, and thermal performance analysis of a geothermal-based tri-generation system for power, cooling, and fresh water using aluminum oxide (Al_2O_3) and titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles

Yaser Shokri^{1*}, Leili Garousi Farshi², Mortaza Yari³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² Assoc. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³ Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

In this paper, the thermodynamic and thermal performance of an innovative geothermal-based tri-generation system for power, cooling, and fresh water is investigated using Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles. The objective is to integrate three sub-systems to improve heat transfer by utilizing nanofluids within the intermediate fluid stream. Parametric analysis results indicate that increasing the nanoparticle volume fraction and the geothermal source temperature leads to higher heat transfer rates in heat exchangers, higher convective heat transfer coefficient, and increased net power output; among which, Al_2O_3 nanoparticles demonstrated superior performance compared to TiO_2 . Furthermore, the use of nanofluids enhanced the energy extractable from the geothermal source, specifically increasing heat transfer in the high-pressure generator by 3.24 kW and in the evaporator by 4.1 kW, which indicates an intensification of the cooling effect. Finally, at a volume fraction of 0.05 for Al_2O_3 nanoparticles, the system achieved a net power output of 34.06 kW, 113.8 kW of cooling, and 0.2042 kg/s of fresh water, resulting in a gain output energy of 1.375 and an exergy efficiency of 47.41%. This study confirms the significant potential of combining renewable energy sources with nanotechnology.

Keywords: Intermediate Fluid Stream; Nanoparticles; Thermodynamic Analysis; Thermal Performance; Gain Output Energy.

۱- مقدمه

به منظور دستیابی به اهداف انرژی پاک و پاسخگویی به چالش‌های زیست‌محیطی، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های انرژی پایدار مبتنی بر منابع تجدیدپذیر امری ضروری و حیاتی است [۱]. انتشار گاز دی‌اکسید کربن و اتلاف انرژی، از جمله جدی‌ترین مسائل پیش روی جهان محسوب می‌شوند؛ از این رو، بسیاری از کشورها و مناطق، در راستای تلاش‌های جهانی برای مقابله با تغییرات اقلیمی، اهداف مشخصی را برای کاهش میزان انتشار کربن تعیین نموده‌اند [۲]. انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله انرژی خورشیدی، بومس، زمین گرمایی و بادی، به طور طبیعی پس از استفاده تجدید می‌شوند. در میان این منابع، انرژی زمین گرمایی به عنوان یک منبع قابل اعتماد و پایدار شناخته می‌شود که می‌توان از آن برای تولید برق، سرمایش، گرمایش، آب شیرین و سایر کاربردهای انرژی استفاده کرد [۳]. این انرژی به دلیل پیوستگی، در دسترس بودن و عدم وابستگی به شرایط آب و هوایی، مزیتی نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر دارد. از آنجا که بخش تولید برق بالاترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای به خود اختصاص داده است، نقش انرژی‌های پاک در این حوزه حیاتی به نظر می‌رسد. این بخش همچنین پتانسیل بالایی برای تجزیه کربن و دستیابی به کاهش سریع انتشار در مقایسه با سایر بخش‌های صنعتی دارد [۴]. با وجود اهمیت تولید برق، استفاده از انرژی زمین گرمایی تنها به این حوزه محدود نمی‌شود. یکی از کاربردهای مهم و کارآمد آن، تأمین سرمایش از طریق سیستم‌های تبرید جذبی است. این سیستم‌ها به عنوان جایگزینی مؤثر و سازگار با محیط زیست برای سامانه‌های تبرید تراکمی مطرح می‌شوند، زیرا وابستگی به برق ورودی را کاهش داده و از مشکلات ناشی از مبردهای مخرب جلوگیری می‌کنند. مزیت اصلی این سیستم، هزینه عملیاتی پایین‌تر ناشی از حذف کمپرسور مکانیکی و جایگزینی آن با منبع حرارتی است. افزون بر این، استفاده از مبردهای غیرمخرب تأثیر زیست محیطی کمتری بر لایه اوزون دارد [۵]. در چنین سامانه‌هایی، انرژی گرمایی لازم برای عملکرد ژنراتور می‌تواند از منابع تجدیدپذیر مانند خورشیدی، زمین گرمایی و گرمای اتلافی صنعتی تأمین گردد [۶]. علاوه بر نیاز انرژی، کمبود منابع آب شیرین نیز یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر محسوب می‌شود. میلیاردها نفر، به‌ویژه در مناطق خشک و

نیمه‌خشک، از دسترسی به آب آشامیدنی سالم محروم هستند. در حال حاضر، کشاورزی با مصرف تقریباً ۷۰ درصد از منابع آب جهان، بزرگ‌ترین مصرف کننده آب به شمار می‌رود، در حالی که سهم صنعت و مصارف خانگی به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد است. در این شرایط بحرانی، توسعه و استفاده از فناوری‌های نوین نمک زدایی ضروری است. در این میان، نمک زدایی از آب دریا به عنوان یکی از راهکارهای نوید بخش شناخته شده و پتانسیل جبران شکاف فزاینده میان عرضه و تقاضای آب را دارد. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به سیستم‌های نمک زدایی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر شده است و پیشرفت‌های فناوریانه قابل توجهی در طراحی و بهره‌وری این سیستم‌ها حاصل گردیده است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، بیش از دو میلیارد نفر در کشورهای زندگی می‌کنند که با تنش آبی شدید مواجه هستند و پیش‌بینی می‌شود با کاهش مستمر منابع آب شیرین، این رقم افزایش یابد. تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و نیازهای صنعتی، ضرورت به کارگیری روش‌های پایدار و مقرون به صرفه برای شیرین‌سازی آب را دو چندان کرده است [۷ و ۸]. از دیدگاه پژوهشی، ادغام و ترکیب سیستم‌های انرژی مختلف راهکاری مؤثر برای افزایش کارایی و قابلیت اطمینان سامانه‌ها ارائه می‌دهد. در این راستا، انرژی زمین گرمایی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر مقرون به صرفه بودن، پایداری بلندمدت، و سازگاری زیست محیطی به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل جهت ترکیب با سایر فناوری‌ها معرفی می‌شود [۹]. چنین ترکیباتی پایه گذار توسعه سیستم‌های تولید همزمان و تولید سه‌گانه هستند که می‌توانند برق، سرمایش و آب شیرین را به صورت همزمان تولید کنند. این رویکردها منجر به افزایش بازده انرژی و انرژی و گرمای حاصل می‌شوند و در نتیجه به کاهش تلفات و بهبود پایداری یاری می‌رسانند [۷]. از سوی دیگر، به‌کارگیری نانو سیالات در سیستم‌های حرارتی می‌تواند نقش بسزایی در بهبود عملکرد انتقال حرارت ایفا کند. افزودن نانوذرات به سیالات کاری منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی و بهبود نرخ انتقال حرارت در مبدل‌ها می‌شود. چنین قابلیت‌هایی در فرآیندهای سرمایشی و گرمایشی اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. با این حال، ظهور فناوری نانو افق‌های نوینی را در این حوزه گشوده است؛ به گونه‌ای که نانوذراتی نظیر اکسید روی، اکسید آلومینیوم،

دی اکسید تیتانیوم، نانولوله‌های کربنی چند جداره و اکسید منیزیم به عنوان عوامل تحول آفرین معرفی شده‌اند [۱۳].

با توجه به ضرورت ارتقای بهره‌وری انرژی، سیستم‌های تولید همزمان به عنوان راهکاری کارآمد برای تأمین توامان محصولات مانند، توان، سرمایش و آب شیرین و غیره... مطرح شده‌اند. در این راستا، مطالعات متعددی بر روی کاربرد انرژی زمین گرمایی و نحوه‌ی ترکیب آن با فناوری‌های نوین صورت گرفته است. به عنوان مثال، شی و شانگ [۱۴] یک سیستم هیبریدی خورشیدی-زمین گرمایی برای تولید همزمان توان، هیدروژن، سرمایش و آب شیرین معرفی کردند. طبق تحلیل‌های انرژی-اقتصادی، بازده انرژی این سیستم ۴۹/۸ درصد و هزینه واحد محصولات ۳۲/۳۸ دلار بر گیگاژول با دوره بازپرداخت ۶ ساله تعیین شد. سامی و همکاران [۱۵] یک سیستم تولید چند گانه را بررسی کردند. که می‌تواند تحت شرایط آب و هوایی متنوع در چهار شهر ایران (مشهد، تبریز، بندرعباس و یزد) کار کند. در شهر تبریز، بیشترین توان خالص ۲۸/۷۲ کیلووات با دوره بازگشت سرمایه ۵/۸ سال حاصل شد. بندرعباس بیشترین بازده انرژی با مقدار ۲۶/۳ درصد و کمترین هزینه را داشت. یوکسل و همکاران [۱۶] نیز یک سامانه تولید چند گانه را توسعه دادند که قادر به تولید آب شیرین، برق، هیدروژن، آب گرم و آمونیاک بود. ارزیابی عملکرد این سامانه نشان داد که راندمان انرژی و انرژی آن به ترتیب ۷۵/۰۷ درصد و ۷۲/۲۶ درصد است. تحلیل پارامتری انجام شده مشخص کرد که دبی جرمی سیال خروجی از منبع زمین گرمایی، بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های انرژی و انرژی دارد. افزون بر این، دمای منبع زمین گرمایی به عنوان یکی از عوامل کلیدی، تغییرات قابل توجهی در عملکرد سامانه ایجاد می‌کند. انصاری و همکاران [۱۷] یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی را بررسی کردند که قادر به تولید همزمان گرمایش و سرمایش فضا، آب شیرین، برق، آب گرم مصرفی و هیدروژن بود. ارزیابی نتایج این پژوهش نشان داد که توان خروجی خالص سیستم حدود ۲۲/۱ مگاوات و بازده انرژی و انرژی به ترتیب برابر با ۴۹/۱ درصد و ۶۷/۹ درصد بوده است. عسگری و همکاران [۱۸] یک سیستم تولید محصولات چندگانه توان، سرمایش و آب شیرین که از منبع انرژی زمین گرمایی بهره می‌برد را معرفی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که این سیستم پیشنهادی می‌تواند توان، سرمایش و آب

شیرین را به ترتیب با مقادیر ۳۴۲/۳ کیلووات، ۳۰۱/۷ کیلووات و ۰/۲۳۳ کیلوگرم بر ثانیه تولید کند و همچنین بازده انرژی ۳۱/۵۲ درصد و دوره بازگشت سرمایه ۵/۸۵ سال به دست آمد. سامانه‌های تبرید، به عنوان یکی از بخش‌های کلیدی در سیستم‌های تولید چندگانه، می‌توانند با بهره‌گیری از منابع زمین گرمایی عملکردی پایدار ارائه دهند. در این راستا، ترکیب عملکردی سامانه‌های جذبی و تراکمی برای تشکیل سیستم‌های تبرید آبشاری مورد توجه قرار گرفته است. این ساختارها با بهره‌گیری همزمان از مزیت‌های هر دو فناوری، بازده ترمودینامیکی کل را افزایش داده و مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می‌دهند. به همین دلیل، استفاده از چرخه‌های جذبی-تراکمی دواثره آبشاری به عنوان رویکردی نوین مطرح شده است؛ در ادامه به بررسی برخی از مطالعاتی که بر روی این سیستم‌ها صورت گرفته است می‌پردازیم.

جیانو و همکاران [۱۹] عملکرد چرخه تبرید تراکمی-جذبی را تحت استراتژی‌های مختلف عملیاتی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که سامانه ترکیبی پیشنهادی ضریب عملکرد بالاتری در مقایسه با سیستم تبرید تراکمی مستقل دارد. گمری [۲۰] یک بررسی مقایسه‌ای بین سیستم تبرید جذبی تک اثره و دو اثره را انجام داد. نتایج نشان داد که حداکثر مقادیر COP سیستم‌های تبرید جذبی تک اثره در محدوده ۰/۷۳-۰/۷۹ و برای سیستم‌های تبرید جذبی دو اثره در محدوده ۱/۲۲-۱/۴۲ قرار دارد. همچنین حداکثر بازده انرژی سیستم‌های تبرید جذبی تک اثره در محدوده ۱۲/۵-۲۳/۲ درصد و برای سیستم‌های تبرید جذبی دو اثره در محدوده ۱۴/۳-۲۵/۱ درصد قرار دارد. عبید اوستاوغلو [۲۱] مقایسه سیال‌های عامل مختلف بر روی یک سیستم تبرید تراکمی-جذبی تک اثره آبشاری را مورد بررسی قرار داد، نتایج تحلیل انرژی نیز نشان داد که بیشترین تخریب انرژی در ژنراتور رخ می‌دهد و ۵۳/۸ درصد از کل تخریب انرژی سیستم را شامل می‌شود. تحلیل پارامتریک انرژی نیز نشان داد که با دارا بودن شرایط بهینه در سیستم (دمای چگالنده زیر ۴۰ درجه سلسیوس و دمای ژنراتور بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس)، می‌توان انرژی را تا حد قابل توجهی به حداقل رساند.

با توجه به نقش مؤثر نانوذرات در بهبود انتقال حرارت و افزایش کارایی حرارتی، استفاده از نانوسیالات در حوزه‌های

مختلف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. این مواد عمدتاً در سامانه‌های تبرید به عنوان افزودنی در سیال عامل یا در کلکتورهای خورشیدی به کار رفته‌اند. با این حال، کاربرد آن‌ها در فرآیندهای سرمایش و به صورت محدود در سیستم‌های تولید دوگانه توان و آب شیرین کن گزارش شده است، در حالی که در سامانه‌های تولید سه گانه و چندگانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی تاکنون بررسی جامعی صورت نگرفته است. بر همین اساس، تحلیل عملکرد چنین ساختاری می‌تواند رویکردی نوین برای افزایش عملکرد کل سامانه‌های یکپارچه ارائه دهد. در ادامه به مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه به کارگیری نانوسیالات در این سامانه‌ها پرداخته می‌شود.

احمدی و همکاران [۲۲] سامانه‌ای برای تولید همزمان برق، گرما و سرما با بهره‌گیری ترکیبی از انرژی‌های خورشیدی و زمین گرمایی طراحی و بهینه‌سازی کردند. این سامانه بر پایه‌ی چرخه رانکین آلی همراه با چرخه تبرید اجکتوری بوده و از نانوسیال آب-اکسید مس به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده می‌کند. در فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه، چهار سیال کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که سیال R134a از نظر بازده انرژی و انرژی، و سیال R1234yf از نظر شاخص‌های اقتصادی و زیست محیطی بهترین عملکرد را دارد. بایرام و همکاران [۶] عملکرد یک سامانه تبرید جذبی خورشیدی با استفاده از نانوسیال آلومینیوم اکسید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود ضریب عملکرد سامانه می‌شود. بیشترین مقدار COP برابر با ۰/۸۶ در دمای مولد ۸۵ درجه سلسیوس و غلظت ۰/۱ درصد نانوذرات به دست آمد. همچنین، با افزایش دما و غلظت نانوذرات، بازده سامانه بهبود یافت، اما افزایش ویسکوزیته باعث افزایش افت فشار و توان مصرفی پمپ شد. بابایی و همکاران [۲۳] نشان دادند که افزودن نانوذرات به ویژه Fe (آهن) با ۵ درصد حجمی به چرخه تبرید جذبی، راندمان انرژی را ۷/۶ درصد و ضریب عملکرد را ۱۴/۶ درصد افزایش داد. تلپادا و همکاران [۵] یک سیستم تبرید جذبی را مورد مطالعه قرار دادند، آنها دریافتند که افزودن نانوذرات با کسر حجمی ۰/۲ درصد به سیال لیتیم بروماید-آب، ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی افزایش

می‌یابد و نیاز حرارتی ژنراتور را کاهش می‌دهد. مودی و همکاران [۲۴] تأثیر نانوسیال اکسید مس-آب را در یک سیستم تبرید جذبی با سیال عامل‌های آمونیاک-لیتیوم نیترات و آمونیاک-سدیم تیوسیانات بررسی کردند. افزودن نانوذرات، ضریب انتقال حرارت و راندمان را بهبود بخشید و حداکثر بهبود ۱۲۱/۷ درصد در ضریب انتقال حرارت با غلظت ۲ درصد از نانوذره مشاهده شد. عباداللهی و همکاران [۷] یک سیستم هیبریدی خورشیدی با نانوسیال مس را برای تولید همزمان آب شیرین با مقدار ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه و برق ۱/۷۸ کیلووات با راندمان انرژی ۱/۳۸۴ درصد و انرژی ۱/۵۸۱ درصد معرفی کردند و بیشترین تخریب انرژی مربوط به کلکتور خورشیدی بود.

در این مقاله، طراحی، تحلیل و ارزیابی ترمودینامیکی و عملکرد حرارتی یک سیستم تولید سه گانه، شامل توان، سرمایش و آب شیرین مبتنی بر انرژی زمین گرمایی، با بهره‌گیری از نانوذرات آلومینیوم اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید در داخل یک جریان واسطه مورد مطالعه قرار گرفته است. نوآوری‌های اصلی این پژوهش در ادغام سامانه‌های تولید توان، سرمایش و آب شیرین با در نظر گرفتن یک جریان واسطه در ورودی سامانه تبرید آبشاری، به منظور افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوذرات نهفته است. افزون بر این، تحلیل‌های جامع ترمودینامیکی و عملکرد حرارتی پیش‌تر در سامانه‌های ترمودینامیکی مختلف، همچون ترکیب تولید آب شیرین و توان یا سامانه‌های تبرید مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در سامانه‌های تولید سه گانه مبتنی بر انرژی زمین گرمایی، به ویژه در حضور نانوذرات در داخل جریان واسطه، انجام نشده است.

۲- توصیف سیستم

در پژوهش حاضر، سیستم مورد بررسی از چهار بخش اصلی تشکیل شده است و در شکل ۱ ارائه می‌گردد. طرح پیشنهادی در این پژوهش، با هدف پاسخگویی به نیازهای انرژی سه گانه در واحدهای سردخانه‌ای صنعتی طراحی و توسعه یافته است. این سیستم با بهره‌گیری از منابع انرژی زمین گرمایی، به طور همزمان وظیفه تأمین توان الکتریکی، بار سرمایشی مورد نیاز سردخانه و تولید آب شیرین را بر عهده دارد که این امر منجر به بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری کلی در این

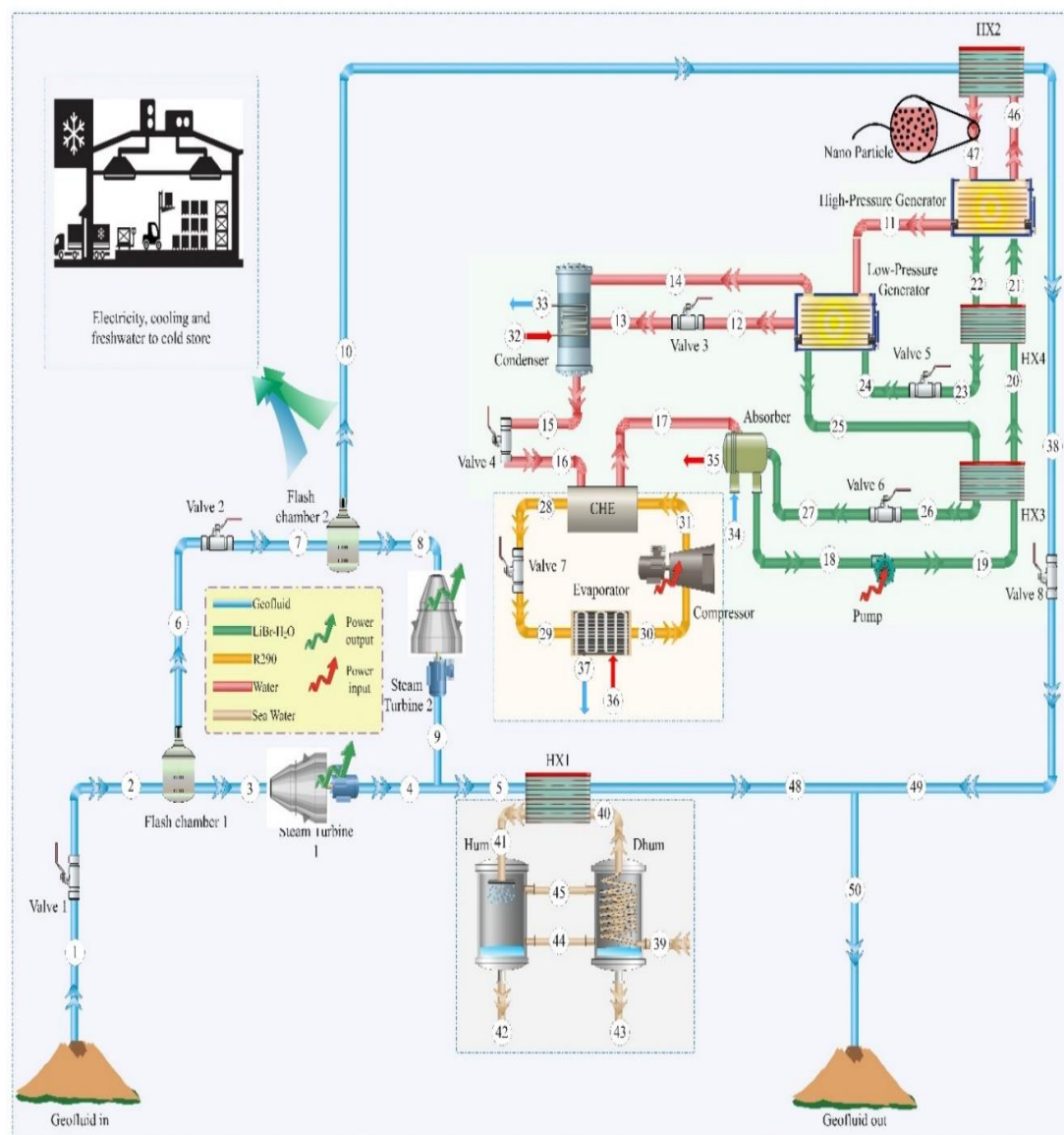
در سیستم تبرید تراکمی، سیال عامل (R290)، در حالت ۳۰، پس از عبور از کمپرسور به بخار پرفشار در حالت ۳۱ تبدیل می‌شود. سپس با دفع گرما در مبدل حرارتی آبشاری به مایع اشباع در حالت ۲۸ تبدیل می‌شود، که پس از انبساط و کاهش فشار در حالت ۲۹، وارد اواپراتور شده و با جذب گرما، سرمایش لازم را تأمین می‌نماید. همزمان، واحد شیرین‌سازی آب شور با چرخه‌ی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی عمل می‌کند که آب ورودی در حالت ۳۹ پس از پیش‌گرمایش در رطوبت‌زدا با حرارت هوای مرطوب در حالت ۴۵، وارد رطوبت‌زن در حالت ۴۱ شده و با هوای خشک در حالت ۴۴ تبخیر می‌شود. همچنین، هوای مرطوب حاصل شده در رطوبت‌زدا متراکم شده، آب شیرین در حالت ۴۳ تولید می‌شود. و آب شور غلیظ در حالت ۴۲ دفع می‌گردد. در نهایت هوای خشک در حالت ۴۴ نیز بازچرخانی می‌شود و تولید آب شیرین ادامه می‌یابد.

۳- روابط و معادلات حاکم

۳-۱- فرضیات پژوهش

- آنالیز سیستم در حالت پایا انجام گرفته است.
- دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس و فشار محیط ۱۰۰ کیلوپاسکال فرض شده است.
- از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شده است.
- توربین‌ها، پمپ و کمپرسور دارای بازده آیزوتروپیک می‌باشند.
- سیال در خروجی چگالنده و تبخیرکن به ترتیب به شکل مایع اشباع و بخار اشباع در نظر گرفته شده است.
- دما و دبی جرمی خروجی از منبع زمین گرمایی ثابت فرض شده است.
- افت فشار در خطوط لوله و مبدل‌های حرارتی ناچیز است.
- سیالات کاری (سیال پایه و نانوسیال) به عنوان سیالات تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند.
- توزیع نانوذرات در سیال پایه یکنواخت بوده و اثرات تجمع یا ته‌نشینی ذرات ناچیز فرض شده است.
- خواص ترموفیزیکی سیال پایه در بازه‌ی دمایی مورد بررسی ثابت فرض شده‌اند.

نوع کاربردها می‌گردد. در ادامه، عملکرد سیستم تشریح می‌شود. سیستم پیشنهادی شامل سیستم زمین‌گرمایی دو مرحله‌ای، سیستم تبرید جذبی دواثره، سیستم تبرید تراکمی و آب شیرین‌کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی است. در ورودی سیستم تبرید بین مبدل حرارتی ۲ و ژنراتور فشار بالا از یک جریان واسط استفاده شده است، که در داخل جریان واسط، برای بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی سیستم، از نانوذرات مختلف استفاده شده است. انرژی لازم برای راه‌اندازی این سیستم از منبع انرژی زمین‌گرمایی تأمین می‌شود. سیال زمین‌گرمایی (در حالت ۱) وارد شیر فشارشکن ۱ شده و به حالت دوفازی می‌رسد. در محفظه فلش ۱، بخار اشباع (حالت ۳) به توربین بخار ۱ و مایع اشباع (حالت ۶) به شیر فشارشکن ۲ هدایت می‌شود. به دلیل استفاده از سیستم زمین‌گرمایی دو مرحله‌ای، جداسازی مایع و بخار در دو مرحله صورت می‌گیرد. بنابراین، سیال عامل پس از گذر از محفظه فلش ۲، بخار اشباع (حالت ۸) به توربین بخار ۲ و مایع اشباع (حالت ۱۰) به مبدل حرارتی ۲ می‌رود. خروجی توربین‌های بخار (در حالت ۵) با هم ترکیب شده و به مبدل حرارتی ۱ جریان می‌یابد. انرژی مورد نیاز برای آب شیرین‌کن از مبدل حرارتی ۱ و برای سیستم تبرید آبشاری از مبدل حرارتی ۲ تأمین می‌شود. در نهایت، انرژی پسماند پس از خروج از این مبدل‌ها دفع می‌گردد. سیستم تبرید جذبی دو اثره، با استفاده از گرمای زمین‌گرمایی، بار سرمایش را برای سیستم تبرید تراکمی بخار فراهم می‌کند. در این سیستم، مبرد آب و جاذب لیتیوم بروماید است. محلول غنی با دریافت گرما از منبع زمین گرمایی گرم می‌شود و بخار مبرد در حالت ۱۱ تولید می‌شود. بخار حاصل از مولد فشار بالا، بخار ثانویه‌ای را در مولد فشار پایین در حالت ۱۴ تولید می‌کند. در ادامه مبرد وارد کندانسور شده و بصورت مایع اشباع در حالت ۱۵ از آن خارج می‌شود. مبرد پس از عبور از شیر خفانش ۴، وارد مبدل حرارتی آبشاری شده و گرمای تبخیر سیستم تبرید تراکمی را دریافت کرده و در حالت ۱۷ داخل محلول رقیقی که از مولد فشار پایین خارج شده با حالت ۲۷ حل می‌شود و گرمای سیستم از تجهیز جاذب دفع می‌شود. محلول غنی حاصل شده، پس از عبور از مبدل‌های حرارتی ۳ و ۴، به سمت مولد فشار بالا پمپاژ می‌گردد.



شکل ۱ - شماتیک سیستم پیشنهادی تولید سه گانه با استفاده از نانوذرات مختلف

نشان داد که غلظت ۰/۰۵ منجر به بیشترین بهبود در ویژگی‌های حرارتی سیال عامل می‌شود. این مقدار به عنوان حد بالای بازه مطالعاتی انتخاب گردید تا ضمن بهره‌مندی از اثرات مثبت نانوذرات بر عملکرد حرارتی سیستم، از خروج روابط همبستگی به کار رفته در مدل عددی از دامنه‌ی اعتبار تجربی آن‌ها اجتناب گردد.

- خواص ترموفیزیکی نانوسیال (از جمله چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، هدایت حرارتی و ویسکوزیته) بر اساس غلظت نانوذرات و با استفاده از روابط ارائه شده در معادلات (۱۱) تا (۱۴) محاسبه شده‌اند [۲۴]. جهت تعیین غلظت نانوذرات، یک مطالعه پارامتری در محدوده کسر حجمی از ۰ تا ۰/۰۵ انجام شد. بررسی نتایج

$\Delta \Upsilon \Upsilon$	$\dot{m}_{39} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$
$\Upsilon/\epsilon \cdot \epsilon$	$m_r(-)$
$\cdot/\Delta$	ϵ_{HX1}
$\cdot/\Upsilon$	ϵ_{HX3}
$\cdot/\Upsilon$	ϵ_{HX4}
$\cdot/\lambda$	ϵ_{DH}
$\cdot/\lambda$	ϵ_{H}

۳-۲- تحلیل انرژی و انرژی

روابط عمومی برای انرژی، غلظت و جرم در حالت پایه بر اساس قوانین ترمودینامیک به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۷، ۲۶، ۲۵]:

$$\sum (\dot{m}h)_{in} - \sum (\dot{m}h)_{out} + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (1)$$

$$\sum (\dot{m}X)_{in} - \sum (\dot{m}X)_{out} = 0 \quad (2)$$

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (3)$$

در معادلات بالا، m دبی جرمی سیال، X غلظت لیتیم بروماید، $\dot{Q}$ گرمای ورودی و $\dot{W}$ کار خروجی حجم کنترل می‌باشند. همچنین، h آنتالپی و $\dot{m}_{in}$ و $\dot{m}_{out}$ نشان‌دهندهٔ ورودی و خروجی است.

روابط مربوط به تحلیل انرژی برای هر جزء سیستم تولید سه گانه پیشنهادی در پیوست الف در جدول الف-۱ ارائه شده است.

با در نظر گرفتن قوانین اول و دوم ترمودینامیک، معادله تعادل، اگرچه، به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۶]:

$$\dot{E}_Q + \sum_{in} \dot{m}_{in} \dot{E}_{x_{in}} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \dot{E}_{x_{out}} + \dot{W} + \dot{E}_D \quad (4)$$

در بالانس اگزردی $\dot{E}x_Q$ و $\dot{E}x_D$ به ترتیب نرخ اگزردی حرارتی و نرخ تخریب اگزردی می‌باشند. همچنین نرخ اگزردی نیز از ترکیب اگزردی فیزیکی و شیمیایی طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{ph} + \dot{E}x_{ch} \quad (5)$$

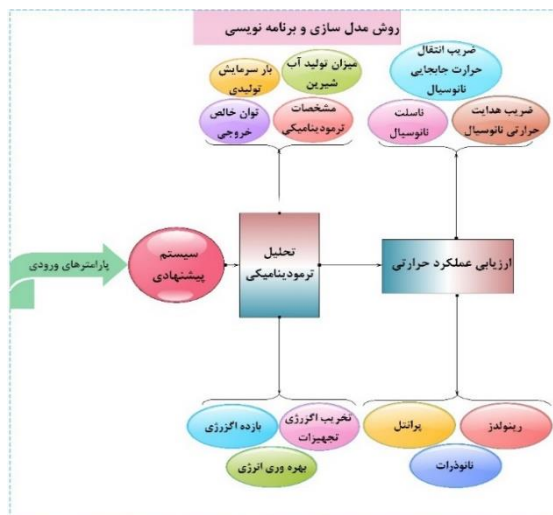
اگر رژی فیزیکی با بیشینه کار قابل دسترس برای سیال برابر است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۶ و ۲۸]:

$$\dot{E}_{x_{ph}} = \sum \dot{m}_i ((h - h_0) - T_0(S - S_0)) \quad (9)$$

در رابطه‌ی فوق، T نشانگر دمای مطلق و Z برونند 0 نشان دهنده‌ی حالت مرجع است. h و S به ترتیب آنتالپی و آنتروپی ویژه جریان سیال در هر نقطه می‌باشند، در حالی که h_0 و S_0

روش شبیه‌سازی پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده

است.



شکل ۲- روش تحلیل و متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی

مقادیر پارامترهای ورودی در حالت پایه جهت تحلیل ترمودینامیکی برای سیستم پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱-مقادیر پارامترهای ورودی برای سیستم پیشنهادی [۲۵و۲۱و۲۰]

پارامتر	مقدار
P_0 (kPa)	۱۰۰
P_2 (kPa)	۱۰۰۰
P_7 (kPa)	۶۰۰
P_9 (kPa)	۱۰۰
T_0 (K)	۲۹۸/۱۵
T_{11} (K)	۳۹۳
T_{12} (K)	۳۴۵
T_{15} (K)	۳۰۸
T_{17} (K)	۲۸۳
T_{18} (K)	۳۱۳
T_{45} (K)	۳۳۵
$\eta_{ST1,2}$	۰/۷
η_{Pump}	۰/۸۵
η_{Comp}	۰/۸۵

۳-۳- روابط مربوط به نانوذرات

مقدار انتقال حرارت با حضور نانوذرات در جریان واسط، از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۸)$$

در رابطه‌ی فوق C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای خروجی و ورودی در جریان واسط و $\dot{m}$ دبی جرمی می‌باشد.

عدد ناسلت مربوط به نانوسیال (Nu_{nf}) که برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی استفاده می‌شود، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۳۱]:

$$Nu_{nf} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \quad (۹)$$

در رابطه‌ی فوق Re نشان دهنده‌ی عدد رینولدز و Pr نمایانگر عدد پرانتل است. ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به نانوسیال (h_{nf}) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$h_{nf} = \frac{Nu_{nf} \cdot k_{nf}}{D_i} \quad (۱۰)$$

مشخصات ترموفیزیکی مانند، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال نیز از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۴]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} \cdot (1 - \varphi) + \rho_{np} \cdot \varphi$$

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf} \cdot (1 - \varphi) C_{p,bf} + \rho_{np} \cdot \varphi \cdot C_{p,np}}{\rho_{nf}}$$

$$k_{nf} = k_{bf} \cdot \frac{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} - 2 \cdot \varphi \cdot (k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + 2 \cdot k_{bf} + \varphi \cdot (k_{bf} - k_{np})}$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot (1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2)$$

که در روابط فوق φ کسر حجمی و زیروندهای nf و bf و np بیانگر نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات هستند.

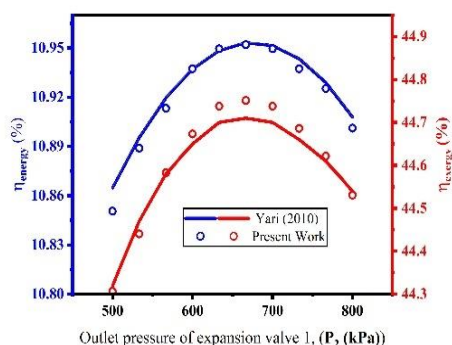
به ترتیب آنتالپی و آنتروپی در حالت مرجع (T_0, P_0)، هستند. اگزرژی شیمیایی مقدار کار قابل دستیابی از یک ماده است که آن ماده در شرایط محیط می‌تواند تولید کند. به طوری که ماده با اجزای تشکیل دهنده محیط واکنش شیمیایی انجام داده و محصولات واکنش نهایتاً به حالت مرده برسند [۲۹]. از آنجایی که محلول $LiBr/H_2O$ ایده‌آل نیست، از عبارت زیر برای محاسبه اگزرژی شیمیایی استفاده می‌شود [۳۰]:

$$\dot{E}x_{ch} = \frac{1}{\dot{M}_{sol}} \sum_{i=1}^n y_i e_i^0 + \bar{R} T_0 \sum_{i=1}^n y_i \ln a_i \quad (۷)$$

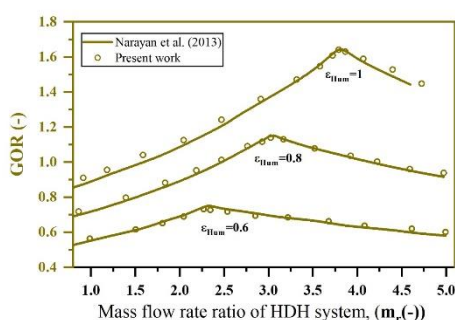
در روابط فوق $\dot{M}_{sol}$ جرم مولی محلول و e_i^0 ، y_i و a_i به ترتیب اگزرژی شیمیایی استاندارد، کسر مولی و فعالیت هر جزء می‌باشند، و همچنین، $\bar{R}$ ثابت جهانی گازها و T_0 دمای مرجع می‌باشد. روابط اگزرژی سوخت و اگزرژی محصول برای هر یک از تجهیزات سیستم تولید سه گانه پیشنهادی در جدول ۲ جمع بندی شده‌اند.

جدول ۲- معادلات اگزرژی اجزاء سیستم پیشنهادی

تجهیزات	معادلات اگزرژی	
	سوخت	محصول
EV1	$\dot{E}x_1$	$\dot{E}x_2$
EV2	$\dot{E}x_6$	$\dot{E}x_7$
FCH1	$\dot{E}x_2$	$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_6$
FCH2	$\dot{E}x_7$	$\dot{E}x_8 + \dot{E}x_{10}$
ST1	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4$	$\dot{W}_{ST1}$
ST2	$\dot{E}x_8 - \dot{E}x_9$	$\dot{W}_{ST2}$
HX1	$\dot{E}x_5 - \dot{E}x_{48}$	$\dot{E}x_{41} - \dot{E}x_{40}$
DHUM	$\dot{E}x_{45} - \dot{E}x_{44}$	$\dot{E}x_{40} - \dot{E}x_{39}$
HUM	$\dot{E}x_{41} - \dot{E}x_{42}$	$\dot{E}x_{45} - \dot{E}x_{44}$
HX2	$\dot{E}x_{10} - \dot{E}x_{38}$	$\dot{E}x_{47} - \dot{E}x_{46}$
HPG	$\dot{E}x_{47} - \dot{E}x_{46}$	$\dot{E}x_{11} + \dot{E}x_{22}$
LPG	$\dot{E}x_{11} - \dot{E}x_{12}$	$\dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{25}$
COND	$\dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{15}$	$\dot{E}x_{33} - \dot{E}x_{32}$
ABS	$\dot{E}x_{17} + \dot{E}x_{27} - \dot{E}x_{18}$	$\dot{E}x_{35} - \dot{E}x_{34}$
PUMP	$\dot{W}_{pump}$	$\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{18}$
HX3	$\dot{E}x_{25} - \dot{E}x_{26}$	$\dot{E}x_{20} - \dot{E}x_{19}$
HX4	$\dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{23}$	$\dot{E}x_{21} - \dot{E}x_{20}$
MIX1	$\dot{E}x_4 + \dot{E}x_9$	$\dot{E}x_5$
MIX2	$\dot{E}x_{48} + \dot{E}x_{49}$	$\dot{E}x_{50}$
CHE	$\dot{E}x_{16} - \dot{E}x_{17}$	$\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{31}$
EVA	$\dot{E}x_{29} - \dot{E}x_{30}$	$\dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{36}$
COMP	$\dot{W}_{comp}$	$\dot{E}x_{31} - \dot{E}x_{30}$
EV3	$\dot{E}x_{12}$	$\dot{E}x_{13}$
EV4	$\dot{E}x_{15}$	$\dot{E}x_{16}$
EV5	$\dot{E}x_{23}$	$\dot{E}x_{24}$
EV6	$\dot{E}x_{26}$	$\dot{E}x_{27}$
EV7	$\dot{E}x_{28}$	$\dot{E}x_{29}$
EV8	$\dot{E}x_{38}$	$\dot{E}x_{49}$



شکل ۳- نمودار اعتبار سنجی سیستم زمین گرمایی دو مرحله‌ای



شکل ۴- اعتبار سنجی سیستم آب شیرین کن

جدول ۳- اعتبار سنجی سیستم تبرید جذبی دو اثره

پارامتر	کار حاضر	مرجع	درصد خطا (%)
$\dot{Q}_{HPG}$ (kW)	۲۵۰/۷۰۳	۲۵۲/۴۰۷	۰/۶۸
$\dot{Q}_{Cond}$ (kW)	۱۶۵/۹۲	۱۶۷/۲۰۵	۰/۷۷
$\dot{Q}_{Eva}$ (kW)	۲۹۸/۹۴۳	۳۰۰	۰/۳۵
$\dot{Q}_{Abs}$ (kW)	۳۵۸/۸۰۵	۳۸۵/۲۳۶	۰/۱۵
COP (-)	۱/۱۸۶	۱/۱۸۹	۰/۲۵

۴-۲- تحلیل پارامتری

برای ارزیابی تأثیر افزودن نانوذرات بر عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی و متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی، تغییرات هدایت حرارتی نانوسیال در محدوده‌ی کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۰/۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ برای تجهیزات ژنراتورهای فشار بالا و پایین، و در شکل ۶ برای تجهیزات ابزوربر و اواپراتور مشاهده می‌شود، با

۴-۳- متغیرهای خروجی

توان خالص خروجی ($\dot{W}_{net}$)، بهره‌وری انرژی (GOE)، بازده انرژی (η_{exergy})، نسبت خروجی به دست آمده (GOR) و ضریب عملکرد (COP) برای سیستم پیشنهادی بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{ST1} + \dot{W}_{ST2} - \dot{W}_{pump} - \dot{W}_{comp} \quad (15)$$

$$GOE = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{Eva} + (\dot{m}_{freshwater} h_{fg})}{\dot{m}_1 (h_1 - h_{50})} \quad (16)$$

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{W}_{net} + (\dot{E}x_{37} - \dot{E}x_{36}) + (\dot{m}_{43} (h_{fg} - T_0 s_{fg}))}{\dot{E}x_1 - \dot{E}x_{50}} * 100 \quad (17)$$

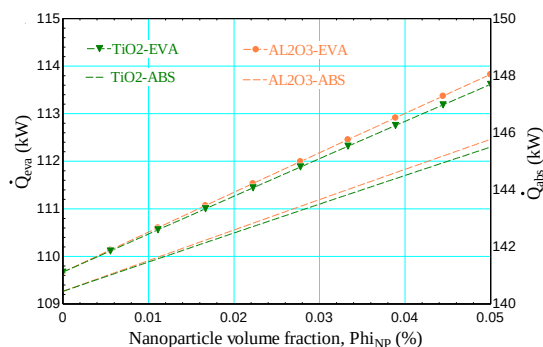
$$GOR = \frac{\dot{m}_{freshwater} h_{fg}}{\dot{Q}_{HX1}} \quad (18)$$

$$COP = \dot{Q}_{Eva} / (\dot{Q}_{HPG} + \dot{W}_{comp} + \dot{W}_{pump}) \quad (19)$$

۴- بحث و بررسی نتایج

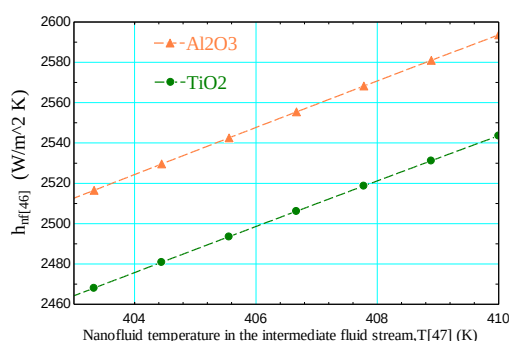
۴-۱- اعتبار سنجی

اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی ترمودینامیکی با مراجع کلیدی، انطباق قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۳ مقایسه نتایج سیستم زمین گرمایی دو مرحله‌ای با مرجع [۳۲] را ترسیم می‌کند. شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی سیستم آب شیرین کن تحت شرایط مختلف نسبت دبی جرمی، مطابق با مرجع [۳۳] را نشان می‌دهد، و جدول ۳ نیز عملکرد سیستم تبرید جذبی دو اثره را با مرجع [۳۴] مقایسه می‌نماید. به طور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تمامی زیرسیستم‌های مورد بررسی، انطباق بسیار خوبی با نتایج گزارش شده در مراجع [۳۲-۳۴] نشان می‌دهند که این امر گویای صحت کد نویسی و مدل‌سازی ریاضی است. اختلاف‌های جزئی مشاهده شده در برخی نقاط بسیار ناچیز بوده و می‌توان آن‌ها را ناشی از تفاوت‌های اندک در شرایط مرزی یا تفاوت در مدل‌سازی برخی پارامترهای فیزیکی نسبت به مقالات مرجع دانست. با این حال، روند تغییرات پارامترها در تمام نمودارها کاملاً با مراجع مطابقت دارد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی رفتار سیستم است.



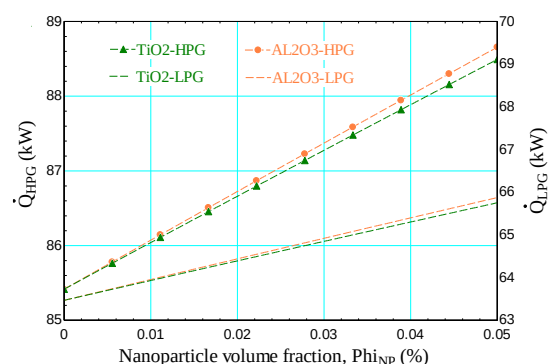
شکل ۶- تاثیر تغییر کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت در اواپراتور و ابزوربر

علاوه بر بهبود هدایت حرارتی مؤثر سیال، بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال (h_{nf}) در جریان واسط نیز ضروری است. شکل‌های ۷ و ۸ وابستگی مستقیم ضریب جابجایی به دمای عملیاتی را نشان می‌دهند. با افزایش دما، کاهش ویسکوزیته و بهبود خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت جابجایی تقویت می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده آن است که سامانه در دماهای بالاتر منبع زمین گرمایی، حساسیت بیشتری به حضور نانوذرات نشان داده و بهره‌وری حرارتی سیستم به مراتب بهبود می‌یابد؛ نکته‌ای که در طراحی سامانه‌های ترکیبی زمین گرمایی، حائز اهمیت است. این روند برای هر دو نوع نانوذرات مشاهده شده و تأییدی بر پتانسیل بالای سیستم در انتقال حرارت زمین گرمایی در دماهای بالاتر است.

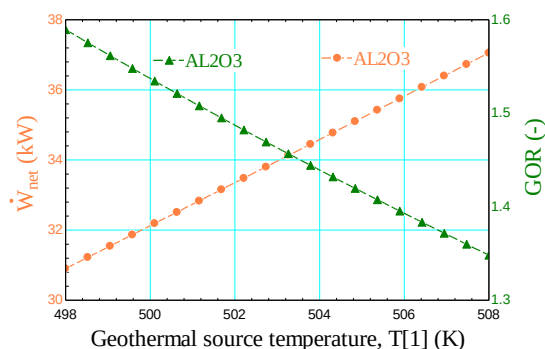


شکل ۷- تاثیر تغییر دمای عملیاتی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات

افزایش میزان کسر حجمی نانوذرات آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) و تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) در سیال پایه، مقدار انتقال حرارت افزایش یافته است. علت این رفتار آن است که افزودن نانوذرات موجب افزایش رسانایی حرارتی مؤثر سیال پایه می‌شود، زیرا نانوذرات دارای رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به سیال پایه هستند. روند تغییرات در نمودارها به صورت تقریباً خطی مشاهده می‌شود؛ یعنی با افزایش تدریجی کسر حجمی نانوذرات، مقدار انتقال حرارت نیز با نرخ نسبتاً ثابتی افزایش پیدا می‌کند. مقایسه‌ی عملکرد دو نانوسیال نشان می‌دهد که نانوسیال حاوی آلومینیوم اکسید در تمامی نمودارها، هدایت حرارتی و انتقال حرارت بیشتری و در نهایت عملکرد حرارتی بهتری را نسبت به تیتانیوم دی‌اکسید دارد. این تفاوت را می‌توان به خواص ذاتی آلومینیوم اکسید از جمله رسانایی حرارتی بالاتر، پایداری بیشتر در محیط سیال پایه، و توزیع یکنواخت‌تر ذرات نسبت داد. در واقع، افزودن نانوذرات باعث بهبود توانایی سیال در دریافت و انتقال انرژی حرارتی حاصل از منبع زمین گرمایی می‌گردد. در نتیجه، می‌توان بیان کرد که افزایش تدریجی کسر حجمی نانوذرات تا حدود ۰/۰۵ نه تنها موجب بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی می‌شود و در نهایت باعث افزایش اثر تبرید در سیستم پیشنهادی می‌شود.

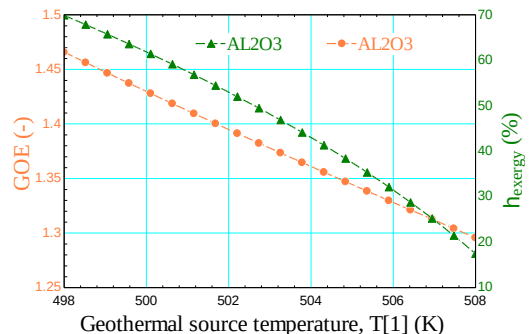


شکل ۵- تاثیر تغییر کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت در ژنراتورهای فشار بالا و پایین



شکل ۹- تاثیر تغییر دمای منبع زمین گرمایی بر متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی

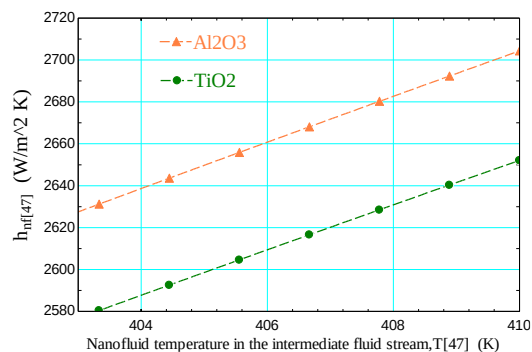
علاوه بر این، شکل ۱۰ نیز تاثیر تغییر دمای منبع انرژی زمین گرمایی بر روی متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. با توجه به کاهش تولید آب شیرین و ثابت ماندن بار سرمایش تولیدی و همچنین افزایش توان خالص خروجی، تغییر دمای منبع انرژی زمین گرمایی منجر به کاهش GOR سیستم می‌شود و همچنین روند بازده انرژی سیستم نیز نزولی می‌شود.



شکل ۱۰- تاثیر تغییر دمای منبع زمین گرمایی بر متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی

در نتیجه، ارتقای عملکرد حرارتی از طریق نانوسیال یا افزایش دمای منبع انرژی زمین گرمایی، لزوماً به بهبود هم‌زمان تمامی خروجی‌ها منجر نمی‌شود.

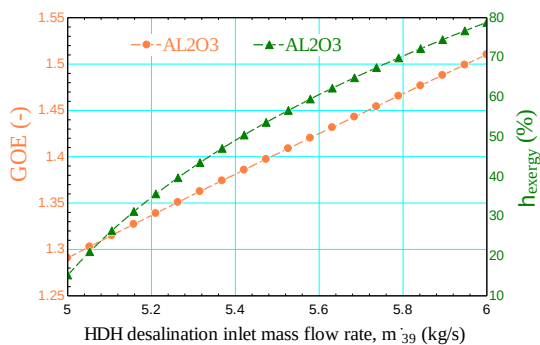
شکل ۱۱ تاثیر تغییر دمای خروجی مبدل حرارتی آبشاری بر روی متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. افزایش دمای خروجی مبدل حرارتی آبشاری، باعث تغییرات در آنتالپی ورودی و خروجی در این تجهیز می‌شود،



شکل ۸- تاثیر تغییر دمای عملیاتی بر ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که آلومینیوم اکسید نسبت به تیتانیوم دی اکسید عملکرد بهتری را نشان داده است.

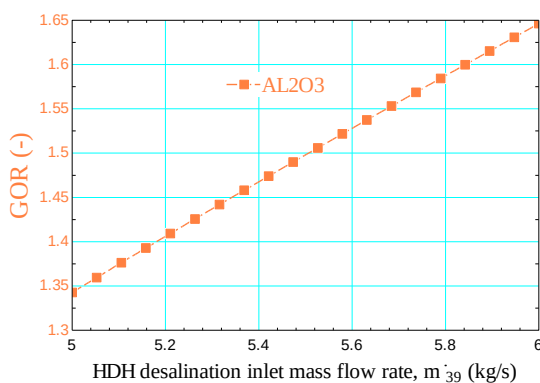
شکل ۹ تاثیر تغییر دمای منبع انرژی زمین گرمایی را بر روی متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، افزایش دمای منبع زمین گرمایی منجر به رشد توان خالص تولیدی می‌شود، از طرفی نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی ۱ بهبود می‌یابد. با افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل حرارتی ۱ و با ثابت فرض کردن دبی ورودی به سیستم آب شیرین کن، آنتالپی حالت ۴۱ افزایش می‌یابد. با این حال، افزایش دمای منبع زمین گرمایی، باعث کاهش تولید آب شیرین (به دلیل افزایش آنتالپی حالت ۴۱) می‌شود و در نتیجه، نمودار GOR برای سیستم آب شیرین کن همواره روند نزولی دارد.



شکل ۱۲- تاثیر تغییر دبی جرمی ورودی آب شیرین کن بر متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی

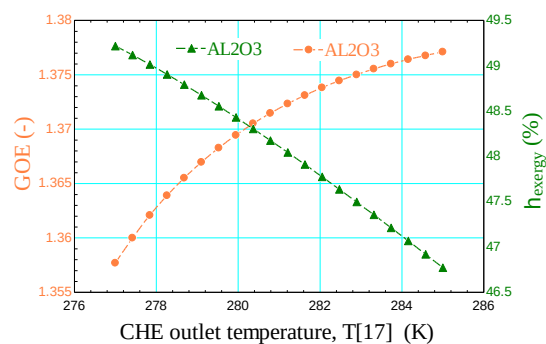
همچنین، بطور مشابه شکل ۱۳ تغییرات دبی جرمی ورودی به بخش آب شیرین کن رطوبت زنی - رطوبت زدایی را نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده برای نمودار شکل ۱۲، افزایش دبی جرمی ورودی به سیستم آب شیرین کن، باعث افزایش GOR سیستم آب شیرین کن رطوبت زنی - رطوبت زدایی می‌شود.

تحلیل این روند نشان می‌دهد که بهبود GOR در دبی‌های جرمی بالاتر، ریشه در ارتقای نرخ بازیافت انرژی و استفاده مؤثرتر از انرژی حرارتی در دسترس در ورودی بخش رطوبت زنی دارد. در واقع، همسویی افزایش GOR با بهبود بازده اگزرژی، تأییدکننده این نکته است که افزایش دبی جرمی، یک راهکار عملیاتی برای ارتقای هم‌زمان بهره‌وری حرارتی و کیفیت عملکردی سیستم آب شیرین کن است.



شکل ۱۳- تاثیر تغییر دبی جرمی ورودی آب شیرین کن بر متغیر خروجی سیستم پیشنهادی

و در نهایت مقدار بار حرارتی آن افزایش می‌یابد. این به این معنی است که کمپرسور سیستم تبرید تراکمی به توان بیشتری نیاز دارد. افزایش توان کمپرسور، باعث کاهش توان خالص خروجی می‌شود، و در واقع بار سرمایشی افزایش می‌یابد. بنابراین، GOE به دلیل افزایش بار سرمایشی به طور تدریجی افزایش می‌یابد. بازده اگزرژی نیز با افزایش دما روند نزولی آن آغاز می‌شود.



شکل ۱۱- تاثیر تغییر دمای خروجی مبدل حرارتی آبشاری بر متغیرهای خروجی سیستم پیشنهادی

در ادامه، شکل ۱۲ تغییرات دبی جرمی ورودی به بخش آب شیرین کن رطوبت زنی - رطوبت زدایی را نشان می‌دهد. با فرض ثابت ماندن ظرفیت حرارتی مبدل حرارتی ۱، افزایش دبی جرمی ورودی، منجر به کاهش آنتالپی در نقطه ۴۱ می‌گردد. این کاهش آنتالپی، با توجه به روابط موجود در سیستم آب شیرین کن، منجر به کاهش دبی جرمی آب شور و افزایش دبی جرمی آب شیرین تولیدی می‌شود. در نتیجه، افزایش دبی جرمی ورودی به سیستم آب شیرین کن، منجر به افزایش تدریجی GOE و بازده اگزرژی سیستم پیشنهادی می‌شود. این یافته‌ها حاکی از آن است که سیستم آب شیرین کن در این پیکربندی، نسبت به تغییرات دبی جرمی، حساسیت بالایی داشته و می‌توان با مدیریت دبی جرمی، میزان تولید آب شیرین را کنترل کرد.

$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_6$	
$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{10} h_{10}$	FCH2
$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_{10}$	
$\dot{W}_{ST1} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$	ST1
$\dot{W}_{ST2} = \dot{m}_8 (h_8 - h_9)$	ST2
$\dot{Q}_{HX1} = \dot{m}_5 (h_5 - h_{48})$	HX1
$\dot{Q}_{HX1} = \dot{m}_{40} (h_{41} - h_{40})$	
$\dot{Q}_{DH} = \dot{m}_{40} (h_{40} - h_{39})$	DHUM
$\dot{Q}_{DH} = \dot{m}_{45} h_{45} - \dot{m}_{44} h_{44} - \dot{m}_{43} h_{43}$	
$\dot{m}_{43} = \dot{m}_{da} (\omega_{45} - \omega_{44})$	
$\dot{Q}_H = \dot{m}_{41} (h_{41} - h_{42})$	HUM
$\dot{m}_{41} h_{41} + \dot{m}_{44} h_{44} = \dot{m}_{42} h_{42} + \dot{m}_{45} h_{45}$	
$\dot{m}_{42} = \dot{m}_{41} - \dot{m}_{da} (\omega_{45} - \omega_{44})$	
$\dot{Q}_{HX2} = \dot{m}_{10} (h_{10} - h_{38})$	HX2
$\dot{Q}_{HX2} = \dot{m}_{46} (h_{47} - h_{46})$	
$\dot{Q}_{HPG} = \dot{m}_{47} (h_{47} - h_{46})$	HPG
$\dot{Q}_{HPG} = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{22} h_{22} - \dot{m}_{21} h_{21}$	
$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{22}$	
$\dot{m}_{21} x_{21} = \dot{m}_{22} x_{22}$	
$\dot{Q}_{LPG} = \dot{m}_{11} (h_{11} - h_{12})$	LPG
$\dot{Q}_{LPG} = \dot{m}_{25} h_{25} + \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_{24} h_{24}$	
$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{14} + \dot{m}_{25}$	
$\dot{m}_{24} x_{24} = \dot{m}_{25} x_{25}$	
$\dot{Q}_{Con} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_{15} h_{15}$	COND
$\dot{Q}_{Con} = \dot{m}_{33} (h_{33} - h_{32})$	
$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{14}$	
$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{17} h_{17} + \dot{m}_{27} h_{27} - \dot{m}_{18} h_{18}$	ABS
$\dot{Q}_{Abs} = \dot{m}_{35} (h_{35} - h_{34})$	
$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{17} + \dot{m}_{27}$	
$\dot{m}_{27} x_{27} = \dot{m}_{18} x_{18}$	
$\dot{W}_{Pump} = \dot{m}_{19} (h_{19} - h_{18})$	PUMP
$\dot{Q}_{HX3} = \dot{m}_{19} (h_{20} - h_{19})$	HX3
$\dot{Q}_{HX3} = \dot{m}_{26} (h_{25} - h_{26})$	
$\dot{Q}_{HX4} = \dot{m}_{20} (h_{21} - h_{20})$	HX4
$\dot{Q}_{HX4} = \dot{m}_{23} (h_{22} - h_{23})$	
$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_9 h_9$	MIX1
$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 + \dot{m}_9$	
$\dot{m}_{50} h_{50} = \dot{m}_{48} h_{48} + \dot{m}_{49} h_{49}$	MIX2
$\dot{m}_{50} = \dot{m}_{48} + \dot{m}_{49}$	
$\dot{Q}_{CHE} = \dot{m}_{17} (h_{17} - h_{16})$	CHE
$\dot{Q}_{CHE} = \dot{m}_{28} (h_{31} - h_{28})$	
$\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_{29} (h_{30} - h_{29})$	EVA
$\dot{Q}_{Eva} = \dot{m}_{36} (h_{36} - h_{37})$	
$\dot{W}_{Comp} = \dot{m}_{31} (h_{31} - h_{30})$	COMP
$h_{12} = h_{13}$	EV3
$h_{15} = h_{16}$	EV4
$h_{23} = h_{24}$	EV5
$h_{26} = h_{27}$	EV6
$h_{28} = h_{29}$	EV7
$h_{38} = h_{49}$	EV8

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد حرارتی و ترمودینامیکی یک سامانه نوآورانه تولید سه‌گانه توان، سرمایش و آب شیرین مبتنی بر انرژی زمین گرمایی با استفاده از نانوذرات آلومینیوم اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید مورد بررسی قرار گرفت. سیستم مورد بررسی ترکیبی از چرخه‌های زمین گرمایی دو مرحله‌ای، تبرید تراکمی-جذبی دو اثره‌ای آبشاری و آب شیرین‌کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی بود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد، نانوذرات به طور مؤثری کارایی جذب حرارت را ارتقا داده و امکان بهره‌برداری حداکثری از پتانسیل انرژی حرارتی ورودی را فراهم می‌آورد. تحلیل‌های جامع نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات، موجب افزایش بار حرارتی مبدل‌های حرارتی می‌شود و نانوذرات آلومینیوم اکسید با غلظت ۰/۵٪، بهترین پاسخ را از نظر بهبود پارامترهای عملکردی سیستم از خود نشان داد. در این شرایط، ارزیابی‌های انرژی‌ای، نواحی اصلی تخریب انرژی را در اجزای مبدل‌های حرارتی و رطوبت زدا مشخص ساخت. این پیکربندی، با بهره‌گیری از مزایای حرارتی نانوسیالات انتخابی، پتانسیل قابل توجهی برای تولید همزمان محصولات سه‌گانه با ارزش افزوده دارد. شایان ذکر است، با وجود بهبود عملکرد سامانه در حضور نانوسیال، کاربرد عملی آن ممکن است با محدودیت‌هایی همچون پایداری بلند مدت سوسپانسیون، احتمال تجمع یا ته نشینی نانوذرات و برخی ملاحظات بهره‌برداری و اقتصادی همراه باشد. بنابراین، استفاده از نانوسیالات در سامانه‌های واقعی مستلزم توجه به شرایط عملیاتی و الزامات طراحی است.

۶- پیوست الف

جدول الف-۱ - معادلات انرژی اجزاء سیستم پیشنهادی

معادلات انرژی	تجهیزات
$h_1 = h_2$	EV1
$h_6 = h_7$	EV2
$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_6 h_6$	FCH1

۷- فهرست علائم

$\dot{E}_x$	نرخ انرژی، (kW)
h	آنتالپی، (kJ/kg)

نسبت خروجی بدست آمده	GOR	ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال،	h_{nf}
بهره وری انرژی	GOE	(W/m ² .K)	
رطوبت زنی - رطوبت زدایی	HDH	ضریب هدایت حرارتی نانوسیال،	k_{nf}
رطوبت زن	HUM	(W/m.K)	
مبدل حرارتی	HX	دبی جرمی، (kg/s)	$\dot{m}$
ژنراتور فشار بالا	HPG	نسبت دبی جرمی	m_r
ژنراتور فشار پایین	LPG	عدد ناسلت نانوسیال	Nu_{nf}
میکس	MIX	عدد پرانتل	Pr
پمپ	PUMP	فشار، (kPa)	P
توربین بخار	ST	نرخ انتقال حرارت، (kW)	$\dot{Q}$
تیتانیوم دی اکسید	TiO ₂	عدد رینولدز	Re
		آنتروپی، (kJ/kg.K)	S
		دما، (K °C or)	T
		نرخ کار، (kW)	$\dot{W}$
		غلظت لیتیوم بروماید، (%)	X

۸- مراجع

- [1] S. Balafkandeh, SM. Mahmoudi, V. Zare, M. Yari, S. Sadrizadeh. Smart integration of a sustainable multigeneration system for near-zero energy and emission buildings: Renewable energy and methanation for cost-effective and low-emission performance. Energy., 2025 Oct 16:138929.
- [2] L. Wang, X. Wang, Y. Jin, Research on supply chain carbon emission reduction decisions based on fairness concerns and revenue sharing contracts. Energy Rep., 14, 2025. 5756–5773.
- [3] M. Abdolalipouradl, F. Mohammadkhani, S. Khalilarya, and M. Yari, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two novel tri-generation cycles for power, hydrogen and freshwater production from geothermal energy. Energy Convers. Manag., vol. 226, p. 113544, Dec. 15, 2020.
- [4] M. A. Javadi, M. K. Abhari, R. Ghasemiasl, and H. Ghomashi, Energy, exergy and exergy-economic analysis of a new multigeneration system based on double-flash geothermal power plant and solar power tower. Sustain. Energy Technol. Assess., vol. 47, p. 101536, Oct. 2021.
- [5] J. S. Talpada and P. V. Ramana, The Theoretical Analysis of H₂O-LiBr Absorption Refrigeration System Using Al₂O₃ Nanoparticles. Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev., 9, pp. 303–322, 2019.
- [6] B. Kilic and O. Ipek, Thermodynamic Analysis of Absorption Cooling System with LiBr-Al₂O₃/Water Nanofluid Using Solar Energy. Therm. Sci., 26, pp. 135–146, 2022.
- [7] M. Ebadollahi, B. Shahbazi, and H. Ghaebi, Efficiency and Flexibility Enhancement of Nanofluid-Based Hybrid Solar Desalination System

حروف یونانی

ضریب تاثیر مبدل حرارتی	ε
بازده انرژی	η_{ex}
ویسکوزیته دینامیکی	μ
چگالی	ρ
نسبت رطوبت	ω

اختصارات

ابزوربر	ABS
آلومینیوم اکسید	Al ₂ O ₃
ضریب عملکرد	COP
کندانسور	COND
مبدل حرارتی آبشاری	CHE
کمپرسور	COMP
رطوبت زدا	DHUM
شیر انبساط	EV
اوپراتور	EVA
محفظه فلش	FCH

- Fresh Water: Thermoeconomic Assessment and Optimization. *Energy*, 301, pp. 131667, 2024.
- [19] J. Li, K. Li, X. He, C. Zhao, F. Cai, and X. Kong, A Novel Absorption–Compression Combined Refrigeration Cycle Activated by Engine Waste Heat. *Energy Convers. Manag.*, 205, pp. 112420, 2020.
- [20] R. Gomri, Second Law Comparison of Single Effect and Double Effect Vapour Absorption Refrigeration Systems. *Energy Convers. Manag.*, 50, pp. 1279–1287, 2009.
- [21] A. Ustaoglu, Parametric Study of Absorption Refrigeration with Vapor Compression Refrigeration Cycle Using Wet, Isentropic and Azeotropic Working Fluids: Conventional and Advanced Exergy Approach. *Energy*, 201, pp. 117491, 2020.
- [22] F. A. Boyaghchi, M. Chavoshi, and V. Sabeti, Optimization of a Novel Combined Cooling, Heating and Power Cycle Driven by Geothermal and Solar Energies Using the Water/CuO (Copper Oxide) Nanofluid. *Energy*, 91, pp. 685–699, 2015. dx.
- [23] S. M. Babaei, A. R. Razmi, M. Soltani, and J. Nathwani, Quantifying the Effect of Nanoparticles Addition to a Hybrid Absorption/Recompression Refrigeration Cycle. *J. Clean. Prod.*, 260, pp. 121084, 2020.
- [24] N. Modi, B. Pandya, and J. Patel, Comparative Analysis of a Solar-Driven Novel Salt-Based Absorption Chiller with the Implementation of Nanoparticles. *Int. J. Energy Res.*, 43, pp. 1563–1577, 2019.
- [25] J. Xu, Z. Su, J. Meng, Y. Yao, M. S. Vafadaran, and A. K. Salavat, A Thermodynamic, Exergoeconomic, and Exergoenvironmental Investigation and Optimization on a Novel Geothermal Trigenation System to Sustain a Sport Arena. *Process Saf. Environ. Prot.*, 190, 177, pp. 278–298, 2023.
- [26] H. Ghaebi, A. S. Namin, and H. Rostamzadeh, Performance Assessment and Optimization of a Novel Multi-Generation System from Thermodynamic and Thermoeconomic Viewpoints. *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, pp. 419–439, 2018.
- [27] M. Aghabalazadeh, LG. Frashi, AH. Mosaffa. Proposal and 3E analysis of two novel Claude liquefaction systems. *Results Eng.*, 2025 Jul 22:106426.
- [28] M. Aghabalazadeh, LG. Frashi, AH. Mosaffa. Design and performance analysis of an improved Claude-cycle-based hydrogen liquefaction system. *Energy Convers. Manag.*, 2026 Mar 15:352:121060.
- [29] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons; 1995 Dec 12.
- Equipped with Thermoelectric Generator for Eco-Friendly Freshwater and Power Cogeneration. *Process Saf. Environ. Prot.*, 190, pp. 108–122, 2024.
- [8] SK. Suraparaju, M. Samykano, RR. Nandavarapu, SK. Natarajan, G. Muthuvairavan, A. Yadav, G. Vasudevan. Innovative double-finned absorber and nanoparticle-enhanced energy storage for enhanced thermo-economic performance of solar stills. *Sep. Purif. Technol.*, 2025 Jul 19;361:131360.
- [9] F. Musharavati, S. Khanmohammadi, and A. Pakseresht, A Novel Multi-Generation Energy System Based on Geothermal Energy Source: Thermo-Economic Evaluation and Optimization. *Energy Convers. Manag.*, 230, pp. 113829, 2021.
- [10] A. H. Pordanjani, S. Aghakhani, M. Afrand, B. Mahmoudi, O. Mahian, and S. Wongwises, An Updated Review on Application of Nanofluids in Heat Exchangers for Saving Energy. *Energy Convers. Manag.*, 198, pp. 111886, 2019.
- [11] M. Soltani, F. M. Kashkooli, M. A. Fini, D. Gharapetian, J. Nathwani, and M. B. Dussault, A Review of Nanotechnology Fluid Applications in Geothermal Energy Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 167, pp. 112729, 2022.
- [12] MR. Kumar, RS. Meher, AS. Kumari, Energy-efficient refrigeration: The role of TiO₂ nanoparticles in R600a/R290 refrigerant blends. *J. Therm. Eng.*, 2026 Jan 1;12(1):323.
- [13] E. Murugesan, R. Dhairiyasamy, S. Dixit, S. Singh. The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions. *Case Stud. Therm. Eng.*, 2025 May 1;69:106070.
- [14] P. Shi and R. Shang, Performance evaluation and optimization of a multigeneration hybrid system for power, hydrogen, cooling, and freshwater production from renewable sources. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 246, p. 122866, 2024.
- [15] S. Sami, M. Gholizadeh, and M. Deymi-Dashtebayaz, An Applicable Multi-Generation System for Different Climates from Energy, Exergy, Exergoeconomic, Economic, and Environmental (5E) Perspectives. *Sustain. Cities Soc.*, 100, pp. 105057, 2024.
- [16] Y. E. Yuksel, M. Ozturk, and I. Dincer, Development and Assessment of a Novel Geothermal Power-Based Multigenerational System with Hydrogen and Ammonia Production Options. *Energy Convers. Manag.*, 243, pp. 114365, 2021.
- [17] S. A. Ansari, M. Kazim, M. A. Khaliq, and T. A. Ratlamwala, Thermal Analysis of Multigeneration System Using Geothermal Energy as Its Main Power Source. *Int. J. Hydrogen Energy*, 46, pp. 4724–4738, 2021.
- [18] A. Asgari, H. Tajaddod, R. Zirak, and R. Mahmoodi, Proposal of a Geothermal-Driven Multigeneration System for Power, Cooling, and

- [32] M. Yari, Exergetic Analysis of Various Types of Geothermal Power Plants. *Renew. Energy.*, vol. 35, pp. 112–121, 2010.
- [33] G. P. Narayan, M. G. John, and S. M. Zubair, Thermal Design of the Humidification Dehumidification Desalination System: An Experimental Investigation. *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 58, pp. 740–748, 2013.
- [34] R. Gomri and R. Hakimi, Second Law Analysis of Double Effect Vapour Absorption Cooler System. *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, pp. 3343–3348, 2008.
- [30] R. Palacios-Bereche, R. Gonzales, and S. A. Nebra, Exergy Calculation of Lithium Bromide–Water Solution and Its Application in the Exergetic Evaluation of Absorption Refrigeration Systems LiBr-H₂O. *Int. J. Energy Res.*, vol. 36, pp. 166–181, 2012.
- [31] M. Mehrpooya, M. Dehqani, S. A. Mousavi, and S. A. Moosavian, Heat Transfer and Economic Analyses of Using Various Nanofluids in Shell and Tube Heat Exchangers for the Cogeneration and Solar-Driven Organic Rankine Cycle Systems. *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 17, pp. 11–22, 2022.