

شبیه‌سازی و بررسی پارامتری چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین برای تولید توان الکتریکی

علی پاکدل

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده انرژی و محیط زیست

محمدرضا جعفری نصر*⁺

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده: خورشید به‌عنوان یکی از منابع‌های پایان‌ناپذیر انرژی است که امکان تولید برق و گرما از آن به راحتی وجود دارد. چرخه آلی رانکین همانند چرخه شناخته شده بخار رانکین است با این تفاوت که در آن از یک سیال آلی به‌جای بخار استفاده می‌شود. این مطالعه به بررسی انتخاب سیال عامل مناسب برای چرخه آلی رانکین، راهکاری برای بهبود عملکرد و افزایش راندمان، شناسایی پارامترها و متغیرهای تأثیرگذار بر راندمان چرخه آلی رانکین، بهره‌گیری از مبدل گرمایی مناسب در چرخه تجمیعی کلکتورهای سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین پرداخته است. توان خروجی سامانه ۲۱۴۰ کیلو وات و منبع گرمایی سامانه، انرژی استحصال شده توسط کلکتورهای سهموی خورشیدی است. چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس که متوسط دمای کلکتورهای سهموی لوله‌ای است، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه تهران به‌عنوان شهر مورد نظر برای محاسبه‌های تابش خورشید و تغییرهای فصلی، انتخاب شده است. بررسی سیال‌های کاری متفاوت به منظور یافتن بیشترین راندمان خالص در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین صورت پذیرفت و نشان داده شد که سیال‌های R-123، R-141B، R-113 و R-245ca به ترتیب دارای راندمان خالص چرخه ۱۵/۱۷، ۱۵/۸۳، ۱۴/۲۱ و ۱۱/۸۷ درصد می‌باشند و از آن میان، سیال R-141B بیشترین راندمان خالص و سیال R-245ca بیشترین توان الکتریکی را دارا می‌باشد. تأثیر تغییرهای دمای محیط برای تابستان و زمستان، ارتفاع محل نصب و ... مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: سیال کاری، سیال خشک، کلکتور سهموی خورشیدی، چرخه آلی رانکین، راندمان خالص چرخه.

KEY WORDS: Working fluids, Dry fluid, Parabolic Through Collector (PTC), Organic Rankine Cycle (ORC), Net electrical efficiency.

مقدمه

یکی از منابع پایان ناپذیر، خورشید است که امکان تولید برق و گرما از آن به راحتی میسر می‌باشد. گرمای انرژی خورشیدی به وسیله کلکتورهای جذب شده و به وسیله مبدل گرمایی به چرخه ترمودینامیکی که توانایی تولید الکتریسیته را دارد، انتقال می‌یابد. فناوری که این انرژی بی‌پایان را برای تولید توان الکتریکی مهیا می‌سازد؛ چرخه‌ای ترمودینامیکی به نام چرخه آلی رانکین است. از زمانی که اولین نیروگاه گرمایی بر پایه چرخه رانکین ساخته شد تا به حال چندین اصلاح در پیکربندی و تغییر جنس مواد به کار رفته در تجهیزات به وجود آمده است، اما همواره سیال کاری آب انتخاب شده است. با وجود آن که آب ویژگی‌هایی دارد که آن را انتخابی بسیار خوب به عنوان سیال کاری کرده، انتخاب‌های بهتری نیز برای کاربردهای دما پایین نیز در دسترس است. ماده سیال آلی^(۱)، انتخاب رایجی برای برخی از کاربردها است. چرخه آلی رانکین^(۲) (ORC) نامی است برای اینکه در آن از سیال آلی، استفاده شده است. سیال آلی با جرم مولکولی بالا^(۳) و با تغییر فاز مایع-بخار که در دمای پایین‌تر از تغییر فاز آب-بخار اتفاق می‌افتد. ماده سیال کاری آلی باعث می‌شود که چرخه رانکین گرمای خود را از منابع دما پایین مانند گرمای خورشیدی، سوختن زیست‌توده، گرمای تلف‌شده صنعتی، گرمای زمین گرمایی و غیره کسب نماید. گرمای دما پایین به کار مفید تبدیل شده که می‌تواند به الکتریسیته تبدیل شود. *Chen* و همکاران (۲۰۱۱ میلادی) [۱] پژوهشی مقایسه‌ای بین چرخه آلی رانکین و چرخه رانکین فوق بحرانی با استفاده از ترکیب‌های ژئوتروپیک به عنوان سیالات کاری ارائه داده‌اند. پژوهش آنها نشان داد که چرخه فوق بحرانی می‌تواند به راندمان گرمایی ۱۰٫۸ تا ۱۳٫۴ درصد با دمای بالای منبع گرمایی ۱۲۰ تا ۲۰۰ سلسیوس دست یابد، در مقایسه با راندمان چرخه آلی رانکین ۹٫۷ تا ۱۰٫۱ درصد بوده است. آنها مدعی پیشرفت قابل توجه ۱۰ درصدی در راندمان چرخه آلی رانکین شدند [۱]. *Harada* [۲] بر اهمیت رفتار سیال عامل رتروگراد اشاره کرده است. وی از سیال عامل آلی برای برنامه‌های کاربردی در ظرفیت‌های پایین، مانند R-134A (منظم) و R-245fa (رتروگراد) استفاده کرده است. *Borsukiewicz Gozdur* و *Nowak* [۳] سیالات کاری پروپیلن، پروپان، R-227ea، R-236fa و RC318 را مورد مطالعه قرار دادند.

Schuster و همکاران [۴] سیکلوهاگزان، R-245fa، R-141b، R-365mfc را مورد مطالعه قرار دادند. *Lariola* [۵] R-11، R-113، R-114، تولوئن و فلورین‌ها^(۴) (CF₃CHOH) را مورد مطالعه قرار داد. *Saleh* و همکاران [۶] ۲۱ مبرد آلی و ۱۰ سیال آلی دیگر، که در میان آن‌ها N-هگزان بالاترین دمای بحرانی (234.67°C) و R-41 کمترین دمای بحرانی را (44.25°C) داشتند، مورد مطالعه قرار دادند.

Mago و همکاران [۷] بر روی راندمان گرمایی چرخه آلی رانکین با سیالات کاری R-113، R-123، R-245fa، R-245ca، R-134a و ایزوبوتان مطالعه کردند. این مطالعه اثبات کرد که سیال R-113 بیشترین راندمان گرمایی را در بین سیالات مورد مطالعه در چرخه آلی رانکین به خود اختصاص داده است.

Dai و همکاران [۸]، بر روی بهینه‌سازی چرخه آلی رانکین با استفاده از راندمان اکسرژی را مطالعه کردند. نتیجه‌های آنها نشان داد که چرخه ترکیبی با فشار و دمای ورودی توربین ۷٫۹ Bar و ۱۱۸٫۹°C و فشار بازگشتی توربین ۵، ۱؛ با بیشینه راندمان اکسرژی ۲۷٫۱ درصد فعالیت می‌کرد. نتیجه‌های تحلیل اکسرژی آنها نشان داد که مقدار زیادی اکسرژی در بویلر و اجکتور از دست رفته است.

Yamamoto و همکاران [۹] برای تحلیل ترمودینامیکی و مشخص کردن و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی چرخه آلی رانکین از نرم‌افزار شبیه‌ساز HYSYS استفاده کردند. این شبیه‌ساز برای تحلیل ترمودینامیکی در شرایط حالت پایدار بسیار مفید است.

در پژوهش حاضر، بررسی برای انتخاب سیال عامل برای چرخه آلی رانکین، راهکار بهبود عملکرد و افزایش راندمان، شناسایی پارامترها و متغیرهای تأثیرگذار بر راندمان چرخه آلی رانکین، بهره‌گیری از مبدل مناسب چرخه جمعیتی کلکتورهای سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین مورد توجه قرار گرفته است. بیست و پنج سیال آلی مورد بررسی قرار گرفته که عبارتند از: R-113، R-114، R-115، R-123، R-1234ze، R-124، R-134a، R-141B، R-142B، بوتان، بوتن، ایزوبوتان، ایزوپنتان، پنتان، ایزوپنتان، R-218، R-227ea، R-236fa، R-236ea، R-245fa، R-245ca، RC318، R-365mfc، R-404A و R-507A که انتخاب سیالات عامل با نرم افزاری به نام

(۱) Organic

(۲) Organic Rankin cycle

(۳) High Molecular Mass

(۴) Fluorinol

این گرما توسط یک مبدل صفحه‌ای، این قابلیت کاردهی را با استفاده از چرخه آلی رانکین به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. سطح کلکتور سهموی به صورت سهمی ساخته شده و باعث تمرکز تابش خورشید و باعث مناسب شدن این نوع کلکتور برای کاربردهای دما بالا خواهد شد که برای تولید الکتریسیته در یک نیروگاه به کار می‌رود.

انواع سیال‌های کاری

مقایسه عملکرد آب و سیال‌های آلی در کاربردهای دما پایین در ارزیابی چگونگی به کارگیری سیال‌های آلی سودمند است. آب به عنوان انتخابی از سیال کاری برای طیف وسیعی از ماشین‌ها و سامانه‌های تولید توان الکتریکی، چرخه رانکین با سوخت فسیلی است. آب با کاربرد دما بالا در این سامانه‌ها بسیار مناسب است، اما آب برای بهره‌برداری در دمای پایین محدودیت‌هایی خودش را دارد. هر چند سیال‌های آلی در بهره‌برداری دما پایین بهتر عمل می‌نمایند. مهم‌ترین تفاوت اصلی بین این دو سیال، نوع رفتار آن‌ها در زمان انبساط است، که از فاز اشباع یا بیش‌گرم در زمان عبور از توربین است. این رفتار بهترین مشاهده برای آزمایش انبساط توربین در این دامنه دمایی می‌باشد. از آنجایی که آب یک سیال تر است، اگر آب در فاز بیش‌گرم نباشد، انبساط آیزنتروپیک^(۴) آب منجر به کیفیت پایین (کمتر از ۸۰ درصد)، دو فازی می‌شود. جریان با کیفیت پایین درون توربین قابل قبول نیست، زیرا می‌تواند سبب بروز صدمه بارزی به پره‌های توربین و خسارت به تجهیزات شود. از سیال‌های آلی رفتار بسیار متفاوتی در مقایسه با آب دیده شد. از آنجایی که بیشتر سیال‌های آلی خشک یا آیزنتروپیک می‌باشند، انبساط آیزنتروپیک در حالت بخار اشباع یا بخار بیش‌گرم انجام می‌شود که ترکیب دو فازی کمتری در مقایسه با سیال آب دارند. سیال‌های خشک یا آیزنتروپیک، عملکرد را توربین در هنگامی که کیفیت جریان ورودی به توربین پایین است از بین برده و پیچیدگی‌های موجود در مورد طراحی چرخه را نیز منتفی می‌نمایند. یک سامانه با انعطاف‌پذیری بالا عملکرد بهتری دارد، که از دیگر برتری‌های استفاده از سیال آلی است.

بر طبق مطالعات Lee و همکاران [۱۰] سیال‌های از نوع خشک (سیال‌های دارای شیب مثبت) مشکل‌های فشرده‌سازی

رفرپراپ^(۱) ویرایش نهم صورت پذیرفته است. این نرم افزار برای به دست آوردن خواص سیالات و مبردها، که توسط شرکت NIST^(۲) ساخته شده مناسب است. ابراز به کار رفته دیگر برای رسیدن به هدف‌های پژوهش و شبیه‌سازی چرخه تجمیعی کلکتورهای سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین، نرم‌افزار ترموفلو^(۳) ۲۲ می‌باشد. نرم‌افزار ترموفلو ۲۲ افزون بر قابلیت انجام محاسبات در نقطه طراحی، می‌تواند به منظور شبیه‌سازی شرایط عملیاتی گوناگون مانند شرایط محیطی متفاوت یا بارگیری جزئی^(۴) مورد استفاده قرار گیرد. چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین در نسخه ترموفلکس^(۵) طراحی شده است؛ که در شکل ۲ این چرخه دیده می‌شود. توان خروجی سامانه ۲۱۴۰ کیلو وات و منبع گرمایی سامانه انرژی استحصال شده توسط کلکتورهای سهموی خورشیدی است. چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته که متوسط دمای کلکتورهای سهموی لوله‌ای می‌باشد. فشار ورودی به توربین با توجه به پیشینه سازی راندمان چرخه و خواص سیال انتخاب شده بهینه شده است.

در این مطالعه شهر مورد نظر برای محاسبات تابش خورشید و تغییرات فصلی، تهران فرض شده است. بررسی سیالات کاری متفاوت به منظور یافتن بیشترین راندمان خالص در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین صورت پذیرفت. راندمان خالص چرخه سیالات R-113 ، R-141B ، R-123 و R-245ca مورد ارزیابی و محاسبه قرار گرفت و از آن میان سیالی که دارای بیشترین راندمان خالص و توان الکتریکی بود تعیین شد. تغییرات دمای محیط برای تابستان و زمستان، بررسی ارتفاع محل نصب و ... مورد بررسی قرار گرفته است.

انواع کلکتورهای خورشیدی

کلکتور، نوع ویژه‌ای از مبادله کننده انرژی خورشیدی است که انرژی تابشی خورشیدی را به انرژی درونی یک وسیله انتقال‌دهنده منتقل می‌کند. کلکتور تابش خورشیدی را جذب کرده و آن را به گرما تبدیل کرده و گرما را به سیالی که از میان کلکتور جریان دارد منتقل می‌کند؛ انرژی جمع‌آوری شده از سیال کاری (گرفته‌شده از خورشید) دارای اکسرژی دمایی می‌باشد، که با انتقال

(۱) REFPROP V.9

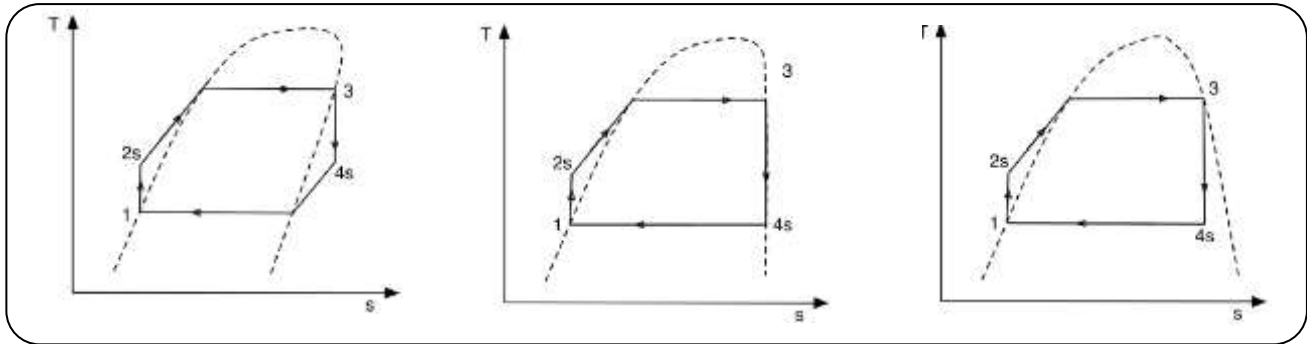
(۲) National Institute of Standards and Technology

(۳) Thermo Flow 22

(۴) Partial Load

(۵) Thermo flex

(۶) Isentropic



شکل ۱- نمودار T-S (الف) سیال خشک (ب) سیال ایزنتروپیک (ج) سیال تر.

سیال، محدودیت‌های ترمودینامیکی را ایجاد می‌نماید که چه مقدار انرژی می‌تواند از منبع گرمایی استخراج شود. همچنین مقدار این انرژی به دمای جریان اتلافی و دمای محیط چگالنده نیز بستگی دارد. بنابراین، سیال کاری می‌تواند بر اساس شیب خط بخار اشباع T-S به سه دسته طبقه‌بندی شود:

- سیالات مرطوب^(۱)
- سیالات خشک^(۲)
- سیالات ایزنتروپیک^(۳)

ξ در واقع شیب خط بخار اشباع نمودار T-S را نشان می‌دهد. در نتیجه:

- $\xi > 0$ نشان می‌دهد که سیال خشک است. مانند: R-113, R-114, R-218, R-227ea, ...

- $\xi < 0$ نشان می‌دهد که سیال تر است. مانند: آب، آمونیاک، R-11, R-12, R-134A, R-14, R-143A, ...

- $\xi = 0$ نشان می‌دهد که سیال ایزنتروپیک است. مانند: R-114b, R-123yf, R-116, ...

در شکل ۱ سه نمونه نمودار T-S از این سیال‌ها را نشان می‌دهد که این منحنی‌ها، پایه شکل‌گیری چرخه آلی رانکین است. سیال‌های کاری نوع خشک و ایزنتروپیک برای سامانه‌های چرخه آلی رانکین متداول‌تر و دلخواه‌تر هستند. از آنجایی که هر دوی آن‌ها بعد از انبساط ایزنتروپیک گرما داده می‌شوند. بدین ترتیب مسائل و مشکل‌های برخورد قطرات مایع با تیغه‌های توربین حذف می‌شود.

نقاط بحرانی در سیالات کاری

نقطه بحرانی، نقطه اوج خط اشباع در نمودار T-S می‌باشد و ناحیه دمای عملیاتی مناسب برای سیالات کاری را در فاز بخار - مایع مشخص می‌کند.

در فرایند انبساط توربین را ندارند. این امر تنها زمانی امکان‌پذیر است که بخار ورودی توربین، اشباع باشد. این ویژگی، به‌طور معمول در سیال‌های خشک یا ایزنتروپیک دیده می‌شود. بنابراین، این نوع از سیال‌ها به جای سیال‌های نوع تر پیشنهاد می‌شوند. آنها همچنین بر این نکته اشاره نمودند، که وزن مولکولی سیال، نقطه‌های جوش طبیعی و فشارهای بحرانی می‌توانند به عنوان ویژگی‌های کلیدی انتخاب، سیال‌های کاری باشند. سیال‌های با وزن مولکولی کمتر از ۹۰ گرم بر مول و نقطه جوش نرمال بین ۵۷۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس و فشار بحرانی بالاتر از ۳۵ بار به صورت بالقوه برای مهیا کردن توانایی فیزیکی - گرمایی خوب برای سامانه بازیافت انرژی چرخه آلی رانکین مناسب هستند. اثر سیال‌های کاری گوناگون بر راندمان دمایی و کارایی بازیافت گرمای کلی، توسط Liu و همکاران [۱۰] مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجایی که هدف چرخه آلی رانکین، بازیافت دمای درجه کم و تبدیل آن به گشتاور است، این عمل گرمایی شدن سیال تر، به گفته آنان دلخواه و مناسب نیست. بنابراین سیال‌های تر برای سامانه‌های چرخه آلی رانکین مناسب نمی‌باشند. با استفاده از قانون اول و دوم ترمودینامیک، کارایی چرخه آلی رانکین می‌تواند در شرایط کاری گوناگون برای یک سیال کاری اختصاصی به دست بیاید. زمانی که سیال کاری، بخار اشباع است، راندمان دمایی سامانه به‌طور معمول با توجه به افزایش فشار ورودی توربین، افزایش می‌یابد. این عامل سبب بازگشت ناپذیری کمتر می‌شود؛ زمانی که دمای منبع ثابت است.

برای سامانه‌هایی با سیال کاری بخار اشباع، با افزایش فشار ورودی توربین، راندمان گرمایی افزایش می‌یابد. زمانی که اختلاف دمای درون یک بویلر ثابت است، فشار ورودی توربین بالاتر سبب بازگشت ناپذیری بالاتر می‌شود. ویژگی‌های ترمودینامیکی

(۱) Wet

(۲) Dry

(۳) Isentropic

جدول ۱- طبقه بندی سیال‌های عامل بر اساس نقطه‌های بحرانی و شیب خط بخار اشباع با استفاده از نرم افزار رفیراپ ویرایش ۹.

سیال کاری	دمای بحرانی (°C)	فشار بحرانی (bar)	نوع سیال
۱	۲۱۴,۰۶	۳۳,۹۲۲	خشک
۲	۱۴۵,۶۸	۳۲,۵۷	خشک
۳	۷۹,۹۵	۳۱,۲۹	آیزتروپیک
۴	۱۸۳,۶۸	۳۶,۶۱۸	آیزتروپیک
۵	۱۰۹,۳۷	۳۶,۳۶۳	آیزتروپیک
۶	۱۲۲,۲۸	۳۶,۲۴۳	آیزتروپیک
۷	۱۰۱,۰۶	۴۰,۵۹۳	آیزتروپیک
۸	۲۰۴,۳۵	۴۲,۱۲	آیزتروپیک
۹	۱۳۷,۱۱	۴۰,۵۵	آیزتروپیک
۱۰	۱۵۱,۹۸	۳۷,۹۶	آیزتروپیک
۱۱	۱۴۶,۱۴	۴۰,۰۵۱	تر
۱۲	۱۳۴,۶۶	۳۶,۲۹	آیزتروپیک
۱۳	۱۴۴,۹۴	۴۰,۰۹۸	تر
۱۴	۱۹۶,۵۵	۳۳,۷	خشک
۱۵	۱۸۷,۲	۳۳,۷۸	خشک
۱۶	۷۱,۷۸	۲۶,۴	خشک
۱۷	۱۰۱,۷۵	۲۹,۲۵	آیزتروپیک
۱۸	۱۲۴,۹۲	۳۲	آیزتروپیک
۱۹	۱۳۹,۲۹	۳۵,۰۲	تر
۲۰	۱۵۴,۰۱	۳۶,۵۱	آیزتروپیک
۲۱	۱۷۴,۴۲	۳۹,۲۵	آیزتروپیک
۲۲	۱۱۵,۲۳	۲۷,۷۷۵	آیزتروپیک
۲۳	۱۸۶,۸۵	۳۲,۶۶	خشک
۲۴	۷۲,۱۲	۳۷,۳۴۸	تر
۲۵	۷۰,۶۱۵	۳۷,۰۴۹	تر
۲۶	۳۷۳,۹۵ ^(۱)	۲۲,۰۶۴	تر
۲۷	۱۳۲,۲۵ ^(۲)	۱۱۳,۳۳	تر

(1) Water , (2) Ammonia (NH3)

متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین که در نرم‌افزار ترموفلکس شبیه‌سازی شده و مراحل ۱ تا ۱۴ با توجه به واحدهای چرخه در شکل مشخص شده است. سیال کاری R-123 و فشار کاری سیال ۲۰ بار می‌باشد.

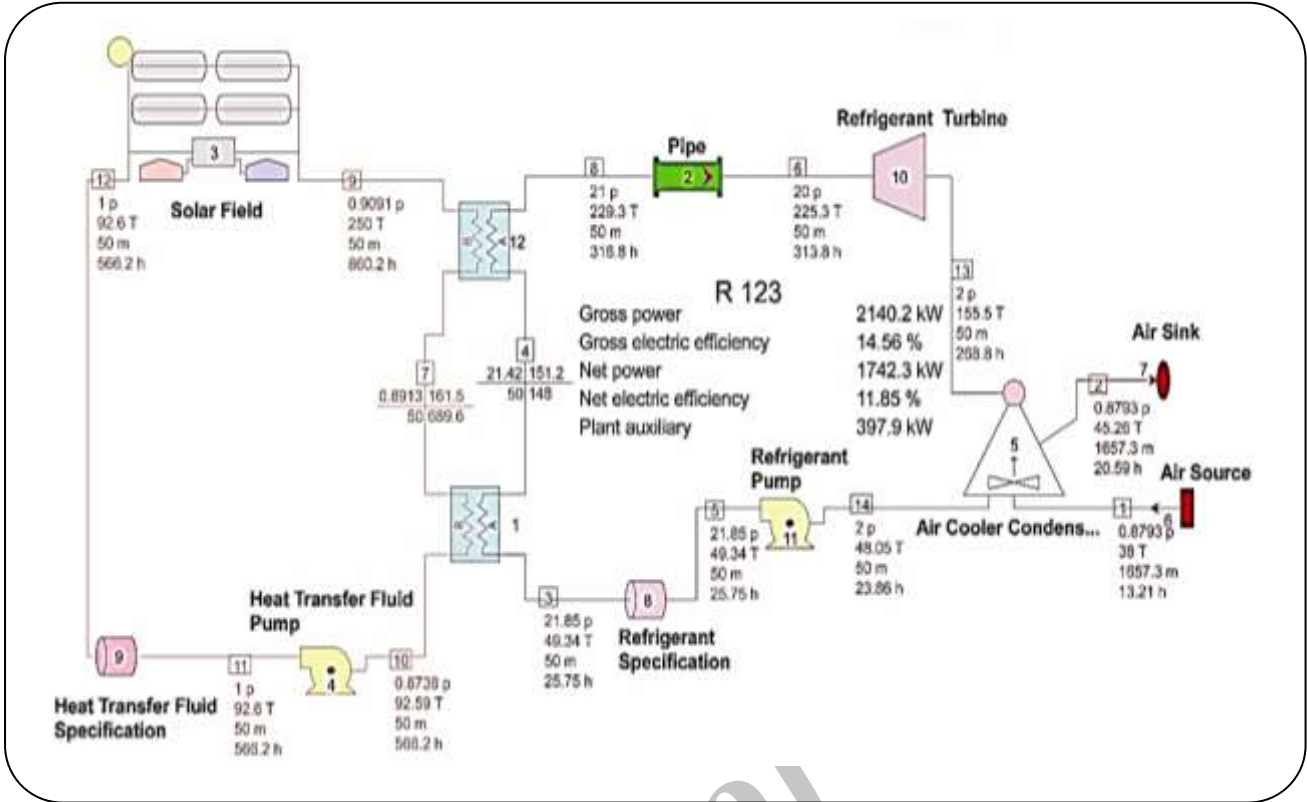
اجزای این سامانه از توربین، چگالنده هوا خنک^(۱)، مبدل گرمایی، پمپ، لوله، کلکتور سهموی لوله‌ای خورشیدی، هوای ورودی و خروجی تشکیل شده است. منبع گرما انرژی استحصال شده از تابش خورشید می‌باشد. شکل ۳ طرح واره کلکتور سهموی

نقطه‌های بحرانی سیالات از جمله اطلاعات تأثیرگذار در انتخاب سیال کاری چرخه آلی رانکین است. در جدول ۱ سیال‌های کاری را بر اساس شیب خط بخار اشباع و نقاط بحرانی طبقه بندی می‌کند.

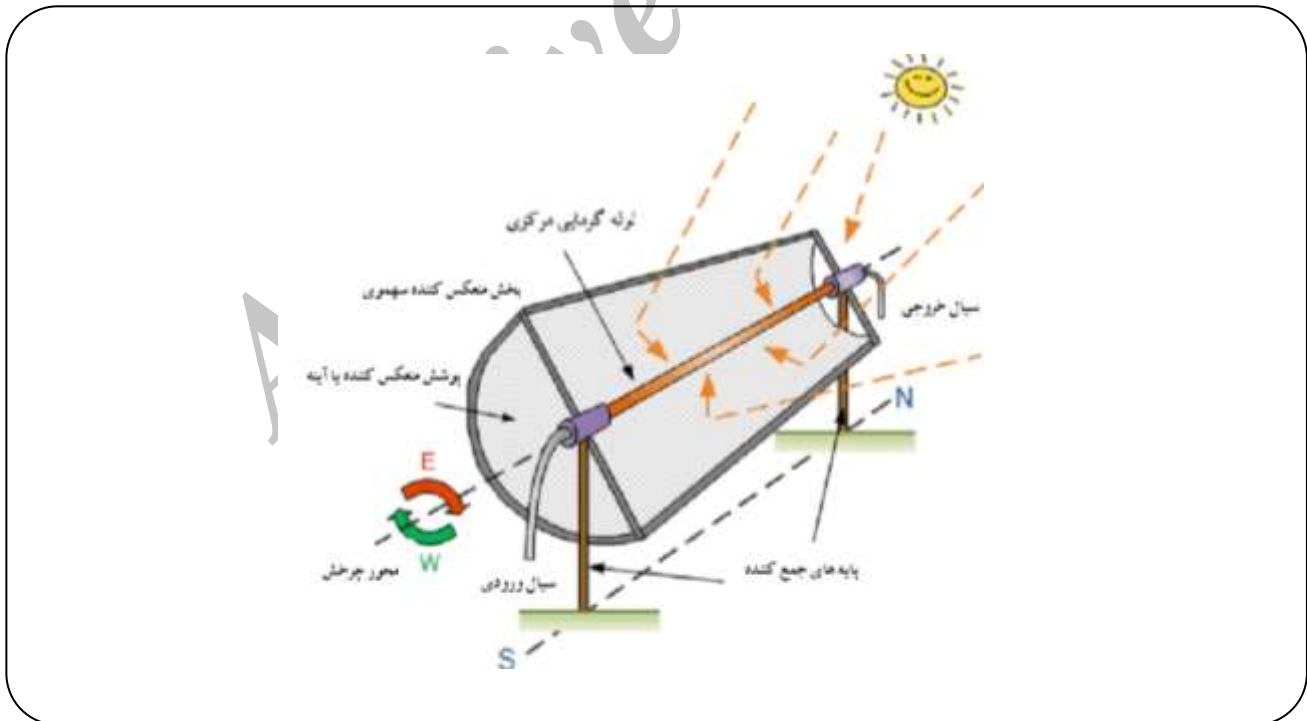
شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین

سامانه مورد بررسی با استفاده از ویرایش ۲۲ نرم افزار ترموفلو شبیه‌سازی شده است. شکل ۲ مدل چرخه تجمیعی

(1) Air Cooler Condansor



شکل ۲- چرخه تجمیعی کلکتورهای سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین.



شکل ۳- طرح واره کلکتور سهموی لوله‌ای خورشیدی با جاذب لوله‌ای [۱۱].

جدول ۲- اطلاعات ورودی چگالنده به نرم‌افزار ترموفلکس در حالت طراحی ترمودینامیکی.

۲ بار	فشار چگالنده
۰ °C	دمای زیر سرد ^(a)
۱۵ °C	میزان افزایش دمای هوا با عبور از چگالنده ^(b)
۱,۲۴۵ millibar	افت رانش هوا در نقطه طراحی ^(c)
۷۸,۳ %	راندمان فن

(a) Condensate subcooling

(b) Air temperature rise through condenser

(c) Design point air draft loss

جدول ۳- اطلاعات ورودی توربین به نرم‌افزار ترموفلکس.

۲۰ بار	نقطه فشار تنظیمی در نقطه طراحی ^(a)
۹۹٪	راندمان مکانیکی در نقطه طراحی ^(b)
۸۵٪	راندمان ایزنتروپیک در نقطه طراحی ^(c)

(a) Design point set point pressure

(b) Design point mechanical efficiency

(c) Design point isentropic efficienc

شدت جریان جرمی چرخه است که هم برای چرخه آلی رانکین و هم برای سمت خورشیدی شدت جریان ۵۰ kg/s انتخاب شد.

داده‌های ورودی مبدل

انتخاب مبدل حرارتی در حالت طراحی ترمودینامیکی در نرم‌افزار ترموفلکس امکان‌پذیر نیست. اما پارامترهای انتخابی هم‌چون نقطه پینچ پارامتری است که انتخاب ما در نوع مبدل با توجه به افزایش یا کاهش آن تغییر می‌دهد. با توجه به بررسی‌های انجام شده و براساس استاندارد TEMA، و فشار کاری چرخه که برابر ۲۰ بار در بررسی اولیه چرخه، در نظر گرفته شده است؛ مبدل گرمایی صفحه‌ای انتخاب شد. در چرخه مورد بحث دو مبدل به کار گرفته شده است. در جدول ۴ داده‌های ورودی به نرم‌افزار نشان داده شده است. سیال کاری آلی R-123 در مسیر A عبور می‌کند و سیال کاری مسیر B سیلیکون ترمال ۸۰۰ می‌باشد. جدول ۴ شامل کارایی گرمایی مبدل، افت فشار در دو سمت مبدل، حداقل دمای پینچ و اتلاف گرمایی مبدل می‌باشد.

(۱) Net electrical efficiency

(۲) Plant auxiliary

(۳) Net electrical efficiency

(۴) Gross power

لوله‌ای خورشیدی را نشان می‌دهد. در مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار با توجه به دمای مورد نیاز در سامانه، نسبت سطح انعکاسی کلکتور به سطح دریافت کننده تعریف شده است.

داده‌های ورودی به نرم‌افزار

ورودی چگالنده

چگالنده مورد انتخاب چگالنده هوا خنک می‌باشد. از برتری‌های آن نیاز نداشتن به آب برای خنک کردن سیال کاری و ورود سیال کاری چرخه به چگالنده هوا خنک است. جدول ۲ شامل فشار چگالنده، دمای ورودی هوا و راندمان فن می‌باشد.

داده‌های ورودی توربین

فشار ورودی توربین از پارامترهای تأثیرگذار است. جدول ۳ شامل فشار ورودی توربین، راندمان مکانیکی و ایزنتروپیک می‌باشد. فشار ورودی توربین در واقع فشار کاری چرخه می‌باشد و فشاری کاری چرخه بر روی پارامترهای زیر تأثیرگذار است.

۱. نوع مبدل انتخابی

۲. راندمان خالص چرخه^(۱)

۳. افزایش توان الکتریکی مصرف شده چرخه^(۲)

ورودی سیال کاری

سیال کاری مورد انتخاب در چرخه آلی رانکین پس از بررسی‌ها و قرار دادن تابع هدف‌هایی همچون پارامترهای زیر:

• راندمان خالص چرخه آلی رانکین^(۳)

• توان تولیدی چرخه^(۴)

• توان الکتریکی مصرف شده چرخه^(۵)

سیال کاری R-123 گزینه انتخابی مناسب برای چرخه با توجه دامنه دمای عملکرد است. ویژگی‌های این سیال که از نرم‌افزار رفرپراپ^(۶) ویرایش ۹ استخراج شده است. سیال کاری انتخاب شده برای چرخه خورشیدی روغن سیلیکون ترمال ۸۰۰^(۷) می‌باشد. این سیال در دامنه دمایی °C ۴۰- تا °C ۳۹۸٫۹ به عنوان یکی از بهترین سیال‌های معمول در متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی به کار رفته است. یکی دیگر از پارامترهای ورودی در بخش

(۵) Plant auxiliary

(۶) REFPROP V.9

(۷) SYLTHERM 800 LIQUID

جدول ۴- اطلاعات ورودی مبدل گرمایی به نرم افزار ترموفلکس در حالت طراحی ترمودینامیکی.

۹۰٪	کارایی گرمایی ^(a)
۳٪	مسیر الف افت فشار در طراحی ^(b)
۳٪	مسیر ب افت فشار در طراحی ^(c)
۲ °C	دمای پینچ کمینه در طراحی ^(d)
۱٪	گرمای اتلافی متعادل سازی شده ^(e)

(a) Thermal effectiveness, (b) A path pressure drop at design
(c) B path pressure drop at design, (d) Minimum pinch at design
(e) Normalized heat loss

جدول ۵- اطلاعات ورودی محیطی به نرم افزار ترموفلکس برای زمستان.

۱۱۸۰ m	ارتفاع محل ^(a)
-۴٫۴ °C	دمای محیط ^(b)
۷۴٪	رطوبت نسبی محیط ^(c)
-۵٫۶ °C	دمای مرطوبت محیط ^(d)
۰٫۸۷۹۳	فشار محیط ^(e)

(a) Site altitude, (b) Ambient temperature
(c) Ambient relative humidity, (d) Ambient wet bulb temperature
(e) Ambient pressure

جدول ۶- اطلاعات ورودی محیطی به نرم افزار ترموفلکس برای تابستان.

۱۱۸۰ m	ارتفاع محل
۳۸ °C	دمای محیط
۱۹٫۵۴٪	رطوبت نسبی محیط
۱۹٫۸۹ °C	دمای مرطوبت محیط
۰٫۸۷۹۳	فشار محیط

جدول ۷- اطلاعات ورودی کلکتور سهموی خورشیدی به نرم افزار ترموفلکس.

۲۵٫۰ °C	دمای خروجی تحویلی از مزرعه خورشیدی ^(a)
۱۰٪	افت فشار فرض شده برای سیال در مزرعه خورشیدی ^(b)

(a) Desired temperature at solar field exit
(b) Assumed fluid pressure drop in solar field

ورودی های محیطی

المان های محیطی مانند دمای محیط، ارتفاع از سطح دریا، رطوبت محیط از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر روی توان الکتریکی تولیدی چرخه، راندمان خالص چرخه و... هستند. داده های ورودی برای شبیه سازی در فصل تابستان و زمستان در جدول های ۵ و ۶ نشان داده شده است. شهر مورد مطالعه برای طراحی، تهران در نظر گرفته شده است.

جدول شامل ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط، رطوبت نسبی، دمای حباب خیس محیط و فشار محیط می باشد.

ورودی کلکتور خورشیدی

کلکتور خورشیدی مورد انتخاب سهموی است. در حالت طراحی ترمودینامیکی کلیه ضرایب خورشیدی را از اطلاعات محیطی نرم افزار به دست می آورد. جدول ۷ شامل دمای خروجی از کلکتور خورشیدی افت فشار کلکتورها می باشد.

ورودی لوله

المان لوله چرخه آلی رانکین برای نزدیک تر شدن چرخه به واقعیت است. با در نظر گرفتن افت فشار و اتلاف گرمایی در کل چرخه این موارد را لحاظ می کند. جدول ۸ شامل افت فشار لوله و اتلاف گرمایی می باشد.

بررسی پارامتر فشار چرخه آلی رانکین

برای بهبود راندمان چرخه آلی رانکین یکی از راهکارها افزایش فشار کاری چرخه است. زمانی که فشار کاری چرخه بیشتر از فشار بحرانی سیال شود، به این چرخه چرخه فوق بحرانی رانکین گویند. نقطه فشار بحرانی و دمای بحرانی در سیال های گوناگون، متفاوت است. فشار و دما بحرانی سیالات متفاوت را می توان از جداول ترمودینامیکی استخراج کرد؛ اما در این مقاله تمام خواص سیالات از نرم افزار رفیراپ ویرایش ۹ گرفته شده است. در جدول ۹ مقایسه دو فشار کاری سیال R-123 که در محیط نرم افزار ترموفلکس شبیه سازی شده، ارائه شده است.

بررسی فشار سیال کاری چرخه آلی رانکین

در این بخش بررسی اثر تغییر فشار سیال کاری چرخه آلی رانکین انجام می شود. این مقایسه به منظور یافتن تأثیر فشار کاری های متفاوت بر روی راندمان خالص چرخه، توان الکتریکی تولیدی و ...

جدول ۸ - اطلاعات ورودی لوله به نرم‌افزار ترموفلکس.

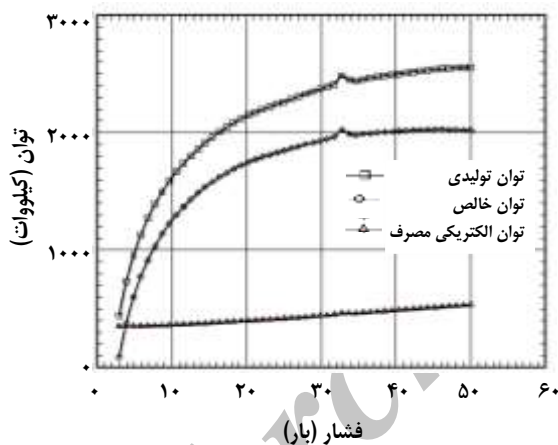
۵٪	افت فشار فرض شده برای حالت طراحی ترمودینامیکی ^(a)
۳ kJ/kg	گرمای اتلافی ^(b)

(a) Assumed pressure drop for TD (Thermodynamic Design) mode (as of exit pressure), (b) Heat loss

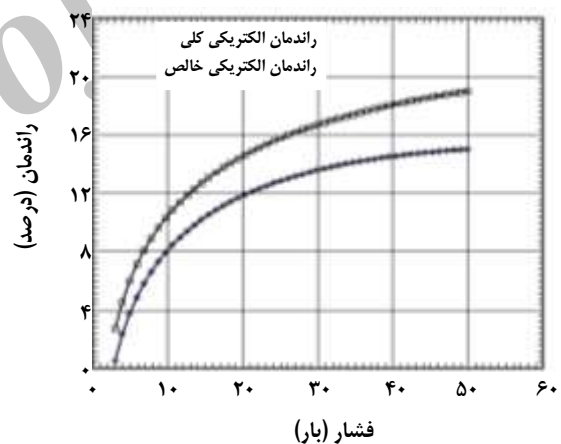
جدول ۹ - مقایسه دو فشار کاری سیال R-123.

عنوان	فشار	۱۵ بار	۴۸ بار
توان تولیدی چرخه ^(a) (kW)	فشار	۱۷۳۰٫۷	۲۳۷۰٫۵
راندمان کلی چرخه ^(b)	فشار	۱۱٫۸۲٪	۱۸٫۰۳٪
توان خالص تولیدی ^(c) (kW)	فشار	۱۴۹۸٫۱	۱۹۶۷
راندمان خالص چرخه ^(d) (%)	فشار	۱۰٫۲۳٪	۱۴٫۹۶٪
توان الکتریکی مصرف شده چرخه ^(e) (kW)	فشار	۲۳۲٫۶	۴۰۳٫۶
فشار چگالنده ^(f) (Bar)	فشار	۲٫۵	۲٫۵

(a) Gross power, (b) Gross electric efficiency, (c) Net power, (d) Net electrical efficiency, (e) Plant auxiliary, (f) Condenser pressure.



شکل ۵ - اثر تغییر فشار سیال کاری نرم‌افزار ترموفلکس.



شکل ۴ - اثر تغییر فشار سیال کاری نرم‌افزار ترموفلکس.

مقایسه سیال‌های کاری متفاوت

مقایسه سیال‌های آلی متفاوت به منظور یافتن مناسب‌ترین سیال آلی که با دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس و فشار کاری ۴۸ بار چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین مناسب باشد. این مقایسه با داده محیطی شرایط طرح تابستانی که در جدول ۶ ارائه شد، انجام گرفته است. نتیجه‌های مورد مقایسه در قالب نمودار نیز آورده شده است. در جدول ۱۳ نتیجه‌های شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی

انجام گرفته است. سیال کاری مورد بحث R-123 است. شکل‌های ۴ و ۵ حاصل خروجی شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین ارائه شده است. در این نمودارها ۵۰ مورد فشار سیال کاری از فشار ۳ تا ۵۰ بار چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از تغییر فشار، تغییر فشار سیال کاری چرخه آلی رانکین است که برای تغییر آن در نرم‌افزار ترموفلکس با تغییر فشار ورودی به توربین در نرم‌افزار می‌توان اثرات آن را بر روی سایر پارامترها دید.

جدول ۱۰- گزارش خروجی نرم افزار ترموفلکس از چرخه تجمیعی.

SYSTEM SUMMARY			
Ambient pressure = 0.8793 bar Temperature = -4.44 C RH = 74 %			
	Unit	LHV	HHV
Net fuel input	[kW]	15856	15856
Gross heat rate	[kJ/kWh]	28258	
Net heat rate	[kJ/kWh]	32655	32655
Gross electric efficiency	[%]	12.74	
Net electric efficiency	[%]	11.02	11.02
CHP efficiency	[%]	11.02	
PURPA efficiency	[%]	11.02	
Gross power	[kW]	2019.9	
Net power	[kW]	1748	
Total auxiliaries	[kW]	272	
Net process heat output	[kW]	0	
POWER DEVICE(S)			
Generator	Component	Shaft No.	Shaft [kW] Eff [%] Output [kW]
	Refrigerant Turbine[10]		2104.3
Generator[1]		1	2104.3 95.99 2019.9
Total Generator(s)			2019.9
AUXILIARY DEVICE(S)			
Component	Shaft [kW]	Shaft No.	Motor Eff [%] [kW]
Air-cooled Condenser(general)[5]: Fan			
Pump(PCE)[4]: Power			1.2
Pump(PCE)[11]: Power			122.3
Solar Field w/ Storage[3]: Aux			0
Total components auxiliaries			251.8
Total miscellaneous auxiliary			20.2
Total plant auxiliary			272
HEAT DEVICE(S)			
Component	[kW]		
Gas/Air Source[8]	0		Not Considered
Solar Field w/ Storage[3]	15855.6		Chargeable as Fuel(LHV)
Gas/Air Sink[7]	13533.8		Not Considered

به طور معمول تلفات بار الکتریکی وجود دارد. در بخش سوم توان الکتریکی مصرفی شده هر بخش از چرخه و در بخش چهارم مقدار گرمای تولیدی و داده شده به محیط نشان داده شده است. در جدول ۱۱ موازنه گرمایی چرخه برای اجزای گوناگون آورده شده است. عددهای منفی مصرف توان الکتریکی و مثبت تولید توان الکتریکی می باشد. همچنین در ادامه جدول ۱۱ موازنه جرمی نیز نشان داده شده است. این موازنه هوای ورودی به چگالنده هوا خنک که ۸۹۳،۱ کیلوگرم بر ثانیه است، را نشان می دهد. جدول ۱۲ توان الکتریکی مصرفی شده چرخه است که مقدار توان الکتریکی هر یک از تجهیزات بر حسب کیلووات اشاره شده است.

و چرخه آلی رانکین در نرم افزار ترموفلکس با سیالات کاری متفاوت است. در انتهای جدول مقدار بیشینه و کمینه هر ستون آورده شده است. جدول ۹ نتیجه های خروجی چرخه تجمیعی مورد بحث را نشان می دهد. در این جدول موردهایی همچون راندمان خالص چرخه آلی رانکین، توان تولیدی چرخه، توان الکتریکی مصرف شده چرخه و... ارائه شده است.

جدول ۱۰ گزارش خروجی نرم افزار ترموفلکس از چرخه تجمیعی می باشد. جدول شامل چهار بخش است که در بخش اول خلاصه های از مؤلفه های سامانه که توان تولیدی چرخه و راندمان کل و خالص و... ارائه شده و در بخش دوم کیلووات تولیدی کل چرخه که به ژنراتور منتقل می شود نشان داده شده است. در این انتقال

جدول ۱۱- گزارش موازنه حرارتی و جرمی چرخه تجمیعی نرم‌افزار ترموفلکس.

HEAT BALANCE			
Zero enthalpy @ 77F (25C) & vapor H2O.			
Component		[kW]	[kW]
Air-cooled Condenser(general)\5	Heat input	-1.16	
Gas/Air Sink\7	Heat removed/lost		-13026.00
Gas/Air Source\6	Heat input	-26559.00	
General HX\1	Heat removed/lost		80.11
General HX\12	Heat removed/lost		78.46
Pipe(PCE)\2	Heat removed/lost		150.00
Pump(PCE)\4	Pumping power	0.95	
Pump(PCE)\11	Pumping power	112.40	
Refrigerant Turbine\10	Expansion power		2125.60
Solar Field w/ Storage\3	Heat input	15856.00	
Total Energy Input		-10592.00	
Total Energy Output			-10591.00
Cycle Heat Balance Error			0.17
MASS BALANCE			
Component		[kg/s]	[kg/s]
Air-cooled Condenser(general)\5	Mass flow in	0.00	
Gas/Air Sink\7	Mass flow out		893.10
Gas/Air Source\6	Mass flow in	893.10	
Total Mass Flow In		893.10	
Total Mass Flow Out			893.10

رانکین برای افزایش بهره‌وری چرخه فشار چرخه آلی رانکین را به ۴۴ بار افزایش داده شده است. این تغییر فشار نه تنها منجر به افزایش در راندمان خالص چرخه شده بلکه به افزایش توان الکتریکی تولیدی نیز منجر شده است. در جدول ۱۵ برای چند سیال کاری متفاوت تأثیر به‌کارگیری مبدل تولید دوباره و فشار فوق بحرانی در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین برای افزایش بهره‌وری چرخه بررسی شده است.

مبدل گرمایی

عامل مهم دیگری که بر اجرای و بهره‌برداری از چرخه آلی رانکین تأثیر می‌گذارد؛ مبدل گرمایی به‌کار رفته در چرخه آلی رانکین می‌باشد. در واقع یک مبدل با کارایی مناسب در بالاتر بردن راندمان حرارتی تأثیر به‌سزایی دارد. زمانی نقش مبدل در چرخه پررنگ‌تر می‌شود که از منابع گرمایی مانند گرمای خورشیدی،

بررسی به‌کارگیری مبدل تولید دوباره

در جدول ۱۴ به بررسی به‌کارگیری مبدل تولید دوباره در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین انجام شده است. همان‌گونه که در جدول ۱۴ ارایه شده با به‌کارگیری این مبدل، راندمان خالص چرخه و توان تولیدی و... افزایش یافته است. بررسی نوع مبدل به‌کار رفته در ادامه انجام شده است. این بررسی بر روی سیال آلی R-113 انجام شده است. جدول شامل توان الکتریکی تولیدی، راندمان چرخه آلی رانکین، توان الکتریکی خالص، راندمان خالص چرخه، توان الکتریکی مصرف شده و فشار چگالنده می‌باشد.

بررسی به‌کارگیری مبدل تولید دوباره و فشار فوق بحرانی

در شکل ۷ افزون بر به‌کارگیری مبدل تولید دوباره در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی

جدول ۱۲- توان الکتریکی مصرف شده چرخه.

عنوان	%	توان مصرفی (kW)
پمپ (۴)	۰٫۴۳	۱٫۱۷۷
پمپ (۱۱)	۴۴٫۹۶	۱۲۲٫۳
کندانسور هوا خنک (۵)	۴۷٫۱۸	۱۲۸٫۳
کمکی	۷٫۴۳	۲۰٫۲

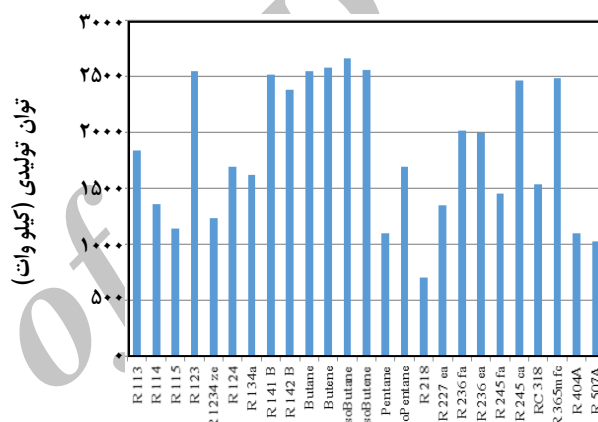
جدول ۱۳- نتیجه شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین در نرم‌افزار ترموفلکس با سیال‌های کاری متفاوت.

نوع سیالات	توان تولیدی چرخه kW	توان خالص تولیدی kW	راندمان کلی چرخه %	راندمان خالص چرخه %	توان الکتریکی مصرف شده چرخه kW
۱ R-113	۱۸۳۶٫۶	۱۴۷۱٫۳	۱۷٫۷۴	۱۴٫۲۱	۳۶۵٫۳
۲ R-114	۱۳۵۷	۷۹۶٫۳	۱۴٫۴۷	۸٫۴۹	۵۶۰٫۷
۳ R-115	۱۱۴۵٫۲	۵۲۸٫۷	۹٫۲۳۷	۴٫۲۶۴	۶۱۶٫۵
۴ R-123	۲۵۸۰٫۷	۲۰۵۱٫۹	۱۹٫۰۸	۱۵٫۱۷	۵۲۸٫۷
۵ R-1234ze	۱۲۳۴٫۵	۷۸۲٫۵	۱۲٫۵۴	۷٫۹۴۷	۴۵۲
۶ R-124	۱۶۹۴٫۷	۱۱۰۹٫۳	۱۴٫۳۲	۹٫۳۷۵	۵۸۵٫۴
۷ R-134a	۱۶۲۵٫۷	۹۹۴٫۵	۱۱٫۸۹	۷٫۲۷۵	۶۳۱٫۳
۸ R-141B	۲۷۱۳٫۷	۲۲۲۵٫۴	۱۹٫۳	۱۵٫۸۳	۴۸۸٫۳
۹ R-142B	۲۳۸۶٫۵	۱۵۷۵٫۶	۱۶٫۰۴	۱۰٫۵۹	۸۱۰٫۸
۱۰ بوتان	۲۵۴۸٫۷	۱۶۳۳٫۲	۱۴٫۴۷	۹٫۲۷۵	۹۱۵٫۴
۱۱ بوتن	۲۵۷۵٫۹	۱۶۸۸٫۶	۱۴٫۶۶	۹٫۶۱	۸۸۷٫۳
۱۲ ایزوبوتان	۲۶۶۳	۱۳۵۹	۱۴٫۷۶	۷٫۵۳۳	۱۳۰٫۴
۱۳ ایزوبوتن	۲۵۶۵	۱۶۴۷٫۸	۱۴٫۵۱	۹٫۳۳۳	۹۱۷٫۲
۱۴ پنتان	۱۱۰۲٫۷	۳۷۰٫۱	۹٫۸۳۱	۳٫۲	۷۳۲٫۵
۱۵ ایزوپنتان	۱۶۹۱٫۵	۹۱۵٫۹	۱۱٫۹۶	۶٫۴۷۳	۷۷۵٫۶
۱۶ R-218	۷۰۹	۲۷۰٫۷	۸٫۹۲۹	۳٫۴۰۹	۴۳۸٫۳
۱۷ R-227ea	۱۳۵۰٫۴	۶۸۳	۱۱٫۷۶	۵٫۹۵	۶۶۷٫۴
۱۸ R-236fa	۲۰۱۴٫۲	۱۱۸۸٫۱	۱۳٫۸۶	۸٫۱۷۴	۸۲۶٫۲
۱۹ R-236ea	۱۹۹۹٫۵	۱۵۵۶٫۳	۱۳٫۸۵	۱۰٫۷۸	۴۴۳٫۲
۲۰ R-245fa	۱۴۵۱٫۵	۸۷۲٫۶	۱۴٫۸	۸٫۸۹۶	۵۷۹
۲۱ R-245ca	۲۸۶۹٫۴	۱۹۴۲٫۲	۱۷٫۵۳	۱۱٫۸۷	۹۲۷٫۲
۲۲ RC318	۱۵۳۷٫۱	۹۸۱٫۲	۱۱٫۵۶	۷٫۳۷۹	۵۵۵٫۹
۲۳ R-365mfc	۲۴۸۳٫۷	۲۰۱۰٫۱	۱۶٫۲۴	۱۳٫۱۴	۴۷۳٫۶
۲۴ R-404A	۱۱۰۱٫۴	۵۹۷٫۴	۷٫۲۲۸	۳٫۹۲	۵۰۴
۲۵ R-507A	۱۰۲۶٫۷	۵۵۶٫۲	۶٫۸۷۲	۳٫۷۲۳	۴۷۰٫۵
۲۶ بیشینه	۲۸۶۹٫۴	۲۲۲۵٫۴	۱۹٫۳	۱۵٫۸۳	۱۳۰٫۴
۲۷ کمینه	۷۰۹	۲۷۰٫۷	۶٫۸۷۲	۳٫۲	۳۶۳

جدول ۱۴- بررسی به‌کارگیری مبدل تولید دوباره.

عنوان	چرخه پایه در فشار ۲۰ بار	چرخه با مبدل تولید مجدد در فشار ۲۰ بار
توان تولیدی چرخه (kW)	۲۱۴۰.۲	۱۷۲۸.۷
راندمان کلی چرخه	۱۴.۵۶٪	۱۷.۵۸٪
توان خالص تولیدی (kW)	۱۷۴۲.۳	۱۵۳۳
راندمان خالص چرخه	۱۱.۸۵٪	۱۵.۵۹٪
توان الکتریکی مصرف شده چرخه (kW)	۳۹۷.۹	۱۹۵.۷
فشار چگالنده (bar)	۲	۳

با بررسی‌های انجام شده و جدول ۱۲ استفاده از مبدل گرمایی پوسته - لوله راندمان بالاتر داشته و توان الکتریکی بیشتری تولید می‌کند. مقایسه برتری‌ها و عیب‌های این دو مبدل گرمایی در جدول ۱۶ انجام شده است. برای تولید دوباره به دلیل پایین بودن فشار می‌توان از مبدل گرمایی قاب و صفحه‌ای استفاده نمود. دلیل آن، پایین بودن این فشار بعد از توربین و بودن این مبدل قبل از پمپ می‌باشد.



بررسی تأثیر ارتفاع

در این بخش اثر تغییر ارتفاع که یک پارامتر محیطی است با بررسی ۳۰ مورد از ارتفاع ۰ متری تا ارتفاع ۲۵۰۰ متری مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه به منظور یافتن تأثیر ارتفاع‌های متفاوت بر روی راندمان خالص چرخه، توان الکتریکی تولیدی و ... انجام گرفته است. سیال کاری مورد بحث R-123 است.

شکل‌های ۸ و ۹ به دست آمده از خروجی شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین هستند. منظور از تغییر ارتفاع، تغییر ارتفاع از سطح دریا است که برای تغییر آن در نرم‌افزار ترموفلکس با تغییر ارتفاع محیط در نرم‌افزار می‌توان اثرات آن را بر روی سایر پارامترها دید افزایش ارتفاع محل نصب از ۰ متر از سطح دریا به ۲۵۰۰ متر سبب کاهش توان الکتریکی تولیدی خالص چرخه آلی رانکین از ۲۰۲۳ کیلووات به ۱۹۹۹.۵ کیلو وات شده است. همچنین افزایش ارتفاع محل نصب ۰ متر از سطح دریا به ۲۵۰۰ متر سبب کاهش راندمان چرخه از ۱۹.۱۷ به ۱۸.۹۵ شده است، همان‌گونه که در نمودار ۵ نشان داده با افزایش ارتفاع راندمان کل و خالص چرخه آلی رانکین کاهش یافته است.

شکل ۶- توان تولیدی کلی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین.

بازیافت گرمای اتلافی، گرمای به دست آمده از سوختن زیست‌توده، زمین گرمایی و ... برای تولید الکتریسیته در چرخه آلی رانکین به‌کار برده می‌شود. انتخاب مبدل‌های گرمایی در چرخه آلی رانکین به‌طور مستقیم به فشار چرخه بستگی دارد. بررسی‌های انجام شده برای انتخاب نوع مبدل گرمایی برای چرخه به این صورت می‌باشد، اگر فشار کاری چرخه در حدود ۲۰ بار باشد؛ می‌توان از مبدل فشرده قاب و صفحه‌ای جوشی استفاده نمود. از جمله برتری‌های این نوع مبدل حرارتی بازده بالای حرارتی در انتقال گرما، حجم کم، دمای پینچ پایین در حدود ۲ درجه سلسیوس که سبب افزایش بهره‌وری می‌شود؛ می‌توان نام برد. اما اگر فشار کاری چرخه چیزی در حدود ۴۰ بار باشد؛ استفاده از مبدل گرمایی پوسته و لوله توصیه می‌شود. همان‌گونه که در بررسی‌های گذشته گفته شد؛ فوق بحرانی کردن چرخه سبب افزایش بازدهی و توان الکتریکی چرخه می‌شود.

جدول ۱۵- نتیجه‌های شبیه‌سازی چرخه تجمیعی بهبود یافته با تولید دوباره متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین با سیال‌های کاری متفاوت.

توان الکتریکی مصرف شده چرخه، kW	راندمان خالص چرخه %	توان خالص تولیدی kW	راندمان کلی چرخه %	توان تولیدی چرخه kW	نوع سیال	
۳۴۵.۴	۱۷	۱۴۸۶.۶	۲۰.۹۵	۱۸۳۲	R-113	۱
۴۶۴.۲	۱۸.۰۴	۱۴۳۶.۱	۲۳.۸۷	۱۹۰۰.۴	R-114	۲
۴۷۰	۱۹.۶۴	۲۱۱۷.۶	۲۴	۲۵۸۷.۶	R-123	۳
۴۸۸.۶	۱۳.۷۹	۱۱۸۸.۳	۱۹.۴۶	۱۶۷۶.۹	R-124	۴
۴۷۹.۸	۱۶.۵۶	۲۲۲۳.۸	۲۰.۱۴	۲۷۰۳.۶	R-141 B	۵
۶۹۹.۸	۱۴.۰۱	۱۶۶۳.۷	۱۹.۹	۲۳۶۳.۵	R-142 B	۶
۹۱۵.۸	۹.۱۰۶	۱۶۰۳.۵	۱۴.۳۱	۲۵۱۹.۴	بوتان	۷
۸۸۷.۹	۹.۴۳۷	۱۶۵۸.۱	۱۴.۴۹	۲۵۴۶	بوتن	۸
۱۳۰۰.۱	۷.۵۰۶	۱۳۴۵.۵	۱۴.۷۶	۲۶۴۵.۵	ایزوبوتان	۹
۹۱۷.۹	۹.۱۵	۱۶۱۷.۲	۱۴.۳۴	۲۵۳۵	ایزوبوتن	۱۰
۷۷۵.۹	۶.۲۹۲	۸۹۰.۵	۱۱.۷۸	۱۶۶۶.۴	ایزوپنتان	۱۱
۵۹۱.۷	۱۵.۵۳	۱۴۰۵.۵	۲۲.۰۷	۱۹۹۷.۲	R-236 fa	۱۲
۳۷۳.۹	۱۷.۶۵	۱۶۰۸.۹	۲۱.۷۵	۱۹۸۲.۸	R-236 ea	۱۳
۵۷۹.۲	۸.۷۶	۸۵۹.۱	۱۴.۶۷	۱۴۳۸.۳	R-245fa	۱۴
۹۲۷.۲	۱۱.۸۷	۱۹۴۲.۲	۱۷.۵۳	۲۸۶۹.۴	R-245ca	۱۵
۳۷۸.۸	۱۸.۰۲	۱۱۵۹.۱	۲۳.۹۴	۱۵۳۰.۷	RC318	۱۶
۴۷۳.۶	۱۳.۱۴	۲۰۱۰.۱	۱۶.۲۴	۲۴۸۳.۷	R-365mfc	۱۷
۱۳۰۰.۱	۱۹.۶۴	۲۲۲۳.۸	۲۴	۲۸۶۹.۴	بیشینه	
۳۴۵.۴	۶.۲۹۲	۸۵۹.۱	۱۱.۷۸	۱۴۳۸.۳	کمینه	

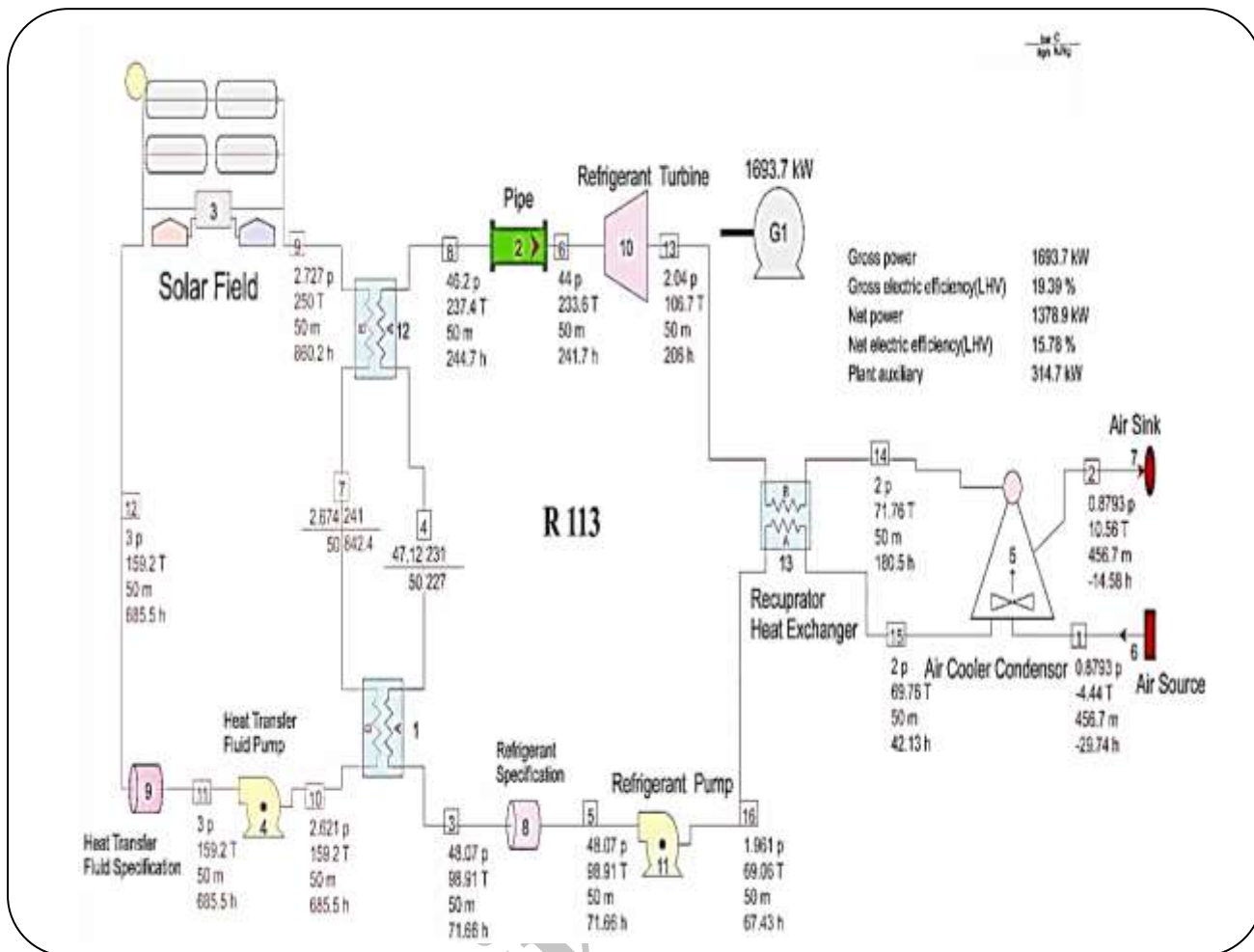
بررسی تأثیر دمای محیط

بررسی تأثیر دمای محیط به صورت فصلی و برای چند سیال کاری بررسی شده است؛ در جدول‌های ۱۷ و ۱۸ دمای محیط و رطوبت نسبی برای تابستان و زمستان مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تأثیر تغییرات دما و رطوبت را بر روی راندمان خالص، مصرف درونی توان الکتریکی، توان الکتریکی خالص و... چرخه آلی رانکین را نشان می‌دهد.

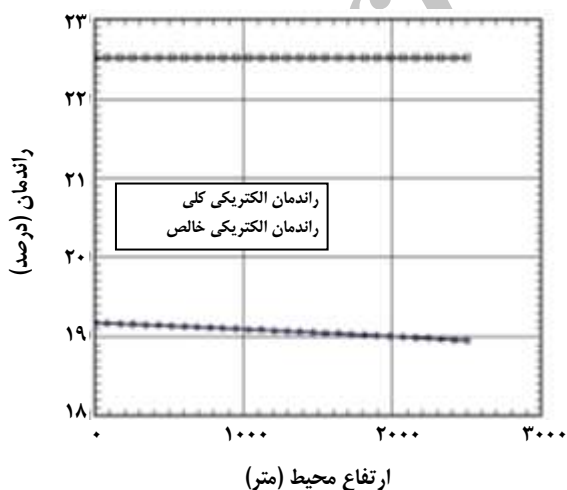
بررسی تأثیر دمای محیط در دو فصل زمستان و تابستان و برای پنج سیال کاری بررسی شده است؛ در جدول ۱۷ نتیجه‌های شبیه‌سازی چرخه متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین در نرم‌افزار ترموفلکس با تغییر سیال کاری

در این بخش اثر تغییر دمای محیط و رطوبت نسبی که دو پارامتر محیطی تأثیرگذار می‌باشند؛ با بررسی ۴۰ مورد از دمای ۴،۴- درجه سلسیوس تا دمای ۴۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۴ تا ۲۴ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. این مقایسه به منظور یافتن تأثیر دما و رطوبت محیط بر روی راندمان خالص چرخه، توان الکتریکی تولیدی و... انجام گرفته است. سیال کاری مورد بحث R-123 می‌باشد.

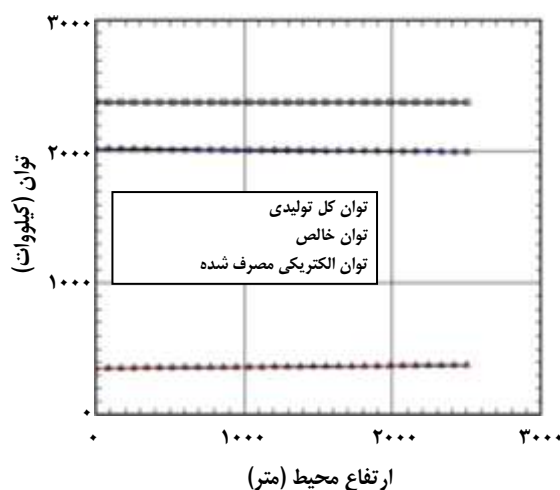
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتیجه خروجی شبیه‌سازی چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی لولای خورشیدی و چرخه آلی رانکین می‌باشد.



شکل ۷- چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین بهبود یافته با مبدل تولید دوباره.



شکل ۹- اثر تغییر ارتفاع محیط بر راندمان الکتریکی کل و خالص چرخه تجمیعی.

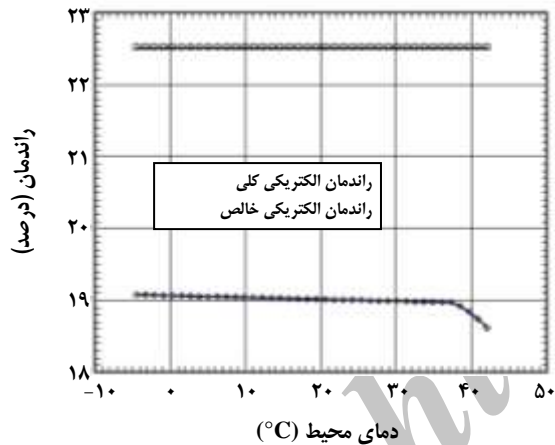


شکل ۸- اثر تغییر ارتفاع محیط بر توان الکتریکی کل تولیدی و خالص و توان الکتریکی مصرف شده چرخه تجمیعی

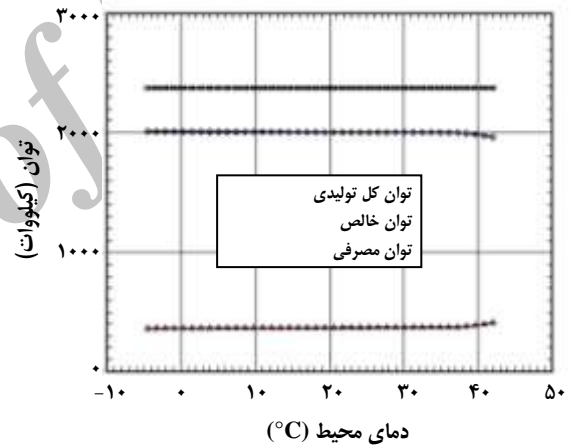
جدول ۱۶- مقایسه مبدل‌های صفحه‌ای با مبدل‌های پوسته و لوله‌ای.

مبدل‌های پوسته و لوله	مبدل‌های صفحه‌ای	مشخصه
غیرممکن	ممکن	انجام همزمان انتقال گرما برای چند جریان
در چندین جهت	در یک جهت (روی قاب)	اتصالات
۱	۵-۳	نسبت انتقال گرما
۱۰-۳	۱	نسبت وزن هنگام کار
زیاد	کم	حجم ماندگی سیال درگیر ^(۱)
۵-۲	۱	نسبت فضای مورد نیاز
دارد	ندارد	جوشکاری
حساس است	حساس نیست	حساسیت به ارتعاش
بر روی تمام اتصالات فلنجی	بر روی تمام صفحات	لاستیک برای آب بندی
غیرممکن	به راحتی با افزودن تعداد صفحات	تغییر ظرفیت

(1) Hold up



شکل ۱۱ - اثر تغییر دمای محیط بر راندمان الکتریکی کل و خالص و چرخه تجمیعی.



شکل ۱۰ - اثر تغییر دمای محیط بر توان الکتریکی کل تولیدی و خالص و مصرف توان الکتریکی داخلی چرخه تجمیعی.

بیشترین اختلاف توان الکتریکی خالص^(۳) از زمستان به تابستان برای سیالات R-245ca و R-123 به ترتیب ۴۹۳،۹ و ۱۳۸ کیلووات و کمترین اختلاف توان خالص تولیدی برای سیال R-113 به میزان ۱۲،۲ کیلووات است.

نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج شبیه‌سازی قابل دستیابی است:

در فصل زمستان و در جدول ۱۸ برای فصل تابستان مورد مقایسه قرار گرفته است. بر طبق جداول ۱۷ و ۱۸ راندمان خالص چرخه آلی رانکین^(۱) و توان الکتریکی خالص در تابستان کاهش یافته است، علت، افزایش توان الکتریکی مصرف شده^(۲) چرخه به دلیل افزایش دما در تابستان است. سیال R-245ca با افت راندمان خاص ۳،۰۲ درصدی بیشترین و سیال R-113 با ۰،۱۲ درصد کمترین، مقدار کاهش برای تغییر فصل از زمستان به تابستان را دارند.

(۱) Net electrical efficiency

(۳) Net power

(۲) Plant auxiliary

جدول ۱۷- نتیجه‌های شبیه‌سازی چرخه متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین با تغییر سیال کاری در فصل زمستان.

Combined ORC – PTC Winter condition - T_{DB} = -4.44°C-- RH%= 74

فشار چگالنده P (bar)	توان الکتریکی مصرفی چرخه kW	راندمان خالص چرخه %	راندمان کلی چرخه %	توان خالص تولیدی kW	توان تولیدی چرخه kW	نوع سیالات
۲	۳۵۱.۷	۱۴.۰۳	۱۷.۴۳	۱۴۵۲.۷	۱۸۰۴.۴	R-113 ۱
۲	۳۹۰.۱	۱۵.۹۷	۱۸.۸۶	۲۱۶۰.۲	۲۵۵۰.۳	R-123 ۲
۲.۵	۴۴۱.۵	۱۴.۹۵	۱۸.۲	۲۰۳۵.۹	۲۴۷۷.۴	R-141B ۳
۲	۴۲۹.۶	۱۴.۷۵	۱۷.۳۷	۲۴۱۳.۴	۲۸۴۳	R-245ca ۴
۲	۴۵۳.۹	۱۳.۱۱	۱۶.۰۸	۲۰۰۴.۹	۲۴۵۸.۸	R-365mfc ۵

جدول ۱۸- نتیجه‌های شبیه‌سازی چرخه متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین با تغییر سیال کاری در فصل تابستان.

Combined ORC – PTC -Summer condition - T_{DB} = 38°C-- RH%= 19.88

فشار چگالنده P (bar)	توان الکتریکی مصرفی چرخه kW	راندمان خالص چرخه %	راندمان کلی چرخه %	توان خالص تولیدی kW	توان تولیدی چرخه kW	نوع سیالات
۲	۳۶۳.۷	۱۳.۹۱	۱۷.۴۳	۱۴۴۰.۵	۱۸۰۴.۲	R-113 ۱
۲	۵۲۸.۱	۱۴.۹۵	۱۸.۸۶	۲۰۲۲.۲	۲۵۵۰.۳	R-123 ۲
۲.۵	۴۵۷.۲	۱۴.۸۴	۱۸.۲	۲۰۲۰.۳	۲۴۷۷.۶	R-141B ۳
۲	۹۲۳.۴	۱۱.۷۳	۱۷.۳۷	۱۹۱۹.۵	۲۸۴۲.۹	R-245ca ۴
۲	۴۷۲	۱۲.۹۹	۱۶.۰۸	۱۹۸۶.۷	۲۴۵۸.۷	R-365mfc ۵

که فشار کاری را به ۴۸ بار می‌رساند، راندمان خالص چرخه به ۱۸.۰۳ درصد یعنی چیزی در حدود ۷ درصد افزایش راندمان و ۴۶۸.۹ کیلو وات توان الکتریکی بیشتر تولید می‌کند.

ج - بررسی تغییر دمای محیط برای تابستان و زمستان نشان می‌دهد که با افزایش دما راندمان کاهش و در زمستان راندمان خالص چرخه افزایش می‌یابد.

د - بررسی ارتفاع محل نصب چرخه تجمیعی نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع راندمان خالص چرخه کاهش می‌یابد.

ه - آرایه راهکار استفاده از مبدل تولید دوباره در این چرخه تجمیعی سبب افزایش راندمان چرخه از ۱۱.۸۵ به ۱۵.۵۹ درصد یعنی حدود ۴ درصد و ۲۰۹ کیلو وات افزایش تولید توان الکتریکی برای سیال R-123 در فشار ۲۰ بار شده است. البته استفاده از این مبدل و افزایش فشار چرخه تا ۴۸ بار برای فوق بحرانی شدن چرخه راندمان خالص چرخه تجمیعی را به ۱۹.۶۴ درصد رسانده است.

با بررسی‌های انجام شده، استفاده از مبدل پوسته - لوله‌ای به عنوان جوش آور در این چرخه اگر فوق بحرانی (بالای ۲۵ تا ۳۰ بار) باشد؛

الف - سیال‌های R-123 ، R-141B ، R-113 ، R-245ca در زمهره‌ی سیال‌های خشک هستند و بهترین عملکرد را برای منبع گرمای خورشیدی با دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس داشتند.

ب - بررسی سیال‌های کاری متفاوت به منظور یافتن بیش‌ترین راندمان خالص از چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین در فشار کاری ۴۸ بار و دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس به این نتیجه رسید که سیال‌های R-123 ، R-141B ، R-113 ، R-245ca به ترتیب دارای راندمان خالص چرخه ۱۷، ۱۵، ۱۵، ۸۳، ۱۴، ۲۱، ۱۱، ۸۷ درصد می‌باشند؛ که سیال R-141B بیش‌ترین راندمان خالص و سیال R-245ca بیش‌ترین توان الکتریکی را داشتند. این بررسی از بین ۲۵ سیال کاری متفاوت انجام شده است.

بررسی دامنه‌های متفاوت فشار توربین که تغییرات این پارامتر منجر به تغییر فشار کاری چرخه می‌شود، نشان می‌دهد که با افزایش فشار کاری راندمان چرخه نیز افزایش می‌یابد. تغییر راندمان خالص چرخه چنان بود که برای سیال کاری R-123 فشار کاری ۱۵ بار، راندمان خالص چرخه ۱۱.۸۵ درصد و زمانی

در این شبیه‌سازی سیالات کاری R-113، R-123، R-141B، ۲ بار داشتند.

ز - بررسی تأثیر دمای محیط در دو فصل زمستان و تابستان و برای پنج سیال کاری بررسی شده است که راندمان خالص چرخه آلی رانکین^(۳) و توان الکتریکی خالص در تابستان کاهش یافته است، علت این امر افزایش توان الکتریکی مصرف شده^(۴) چرخه به دلیل افزایش دما در تابستان است. سیال R-245ca با افت راندمان خاص ۳،۰۲ درصدی بیشترین و سیال R-113 با ۰،۱۲ درصد کمترین، مقدار کاهش برای تغییر فصل از زمستان به تابستان را دارند.

سیال R-245ca با افت ۴۹۳،۹ کیلو وات بیشترین افت و سیال R-113 با ۱۲،۲ کیلو وات کمترین افت توان خالص الکتریکی برای تغییر فصل از زمستان به تابستان را دارند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۹

دلخواه است. اما اگر فشار کاری چرخه در حدود ۲۰ بار باشد مبدل فشرده قاب و صفحه‌ای به دلیل اختلاف دمای پینچ در حدود ۲ درجه سلسیوس و حجم کم مبدل مناسب است.

و - سیالاتی مانند ایزوبوتال، R-218، R-507A به ترتیب کمترین مقدار راندمان خالص را نشان می‌دهد، بنابراین آنها برای چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین مناسب نیستند. ولی سیالات کاری مانند R-141B، R-113، R-123 به ترتیب در شرایط محیطی و دما و فشار کاری یاد شده بهترین راندمان خالص^(۱) را دارند. پارامتر راندمان خالص هرچه بیشتر باشد سبب افزایش توان الکتریکی خالص می‌شود.

سیال کاری R-113 کمترین توان الکتریکی مصرف شده چرخه^(۲) و سیال ایزوبوتال بیشترین را دارد؛ پارامتر توان الکتریکی مصرف شده چرخه هر چه کمتر باشد مناسب و سبب افزایش راندمان خالص چرخه می‌شود.

فشار چگالنده پارامتر تأثیرگذار بر مصرف داخلی چرخه می‌باشد. فشار چگالنده در سیالات آلی به طور معمول از ۲ بار شروع می‌شود.

مراجع

- [1] Chen, H., Goswami, D., Rahman, M. M., and Stefanakos, E. K., A supercritical Rankine Cycle Using Zeotropic Mixture Working Fluids for the Conversion of Low-Grade Heat into Power, *Energy*, **36**(1): 549-555 (2011).
- [2] Harada K., "Development of a Small Scale Scroll Expander", Master of Science Thesis. Oregon State University (2007).
- [3] Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W., Comparative Analysis of Natural and Synthetic Refrigerants in Application to Low Temperature Clausius-Rankine Cycle, *Energy*, **32**:344-352 (2007).
- [4] Schuster A., Karellas S., Kakaras E., Spliethoff H., Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications, *Applied Thermal Engineering*, **29**:1809-1817 (2009).
- [5] Lariola J., Electricity from Industrial Waste Heat Using High Speed Organic Rankine Cycle (ORC), *International Journal of Production Economics*, **41**:227-235 (1995).
- [6] Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fischer J., Working Fluids for Low Temperature Organic Rankine Cycles, *Energy*, **32**:1210-1221 (2007).
- [7] Mago P.J., Chamra L.M., Somayaji C., Performance analysis of different working fluids for Use in Organic Rankine Cycles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy*, **221**:255-263 (2007).

(۱) Net electrical efficiency

(۳) Net electrical efficiency

(۲) Plant auxiliary

(۴) Plant auxiliary

- [8] Dai Y., Wang J., Gao L., Exergy Analysis, Parametric Analysis and Opti- Mization for a Novel Combined Power and Ejector Refrigeration Cycle, *Applied Thermal Engineering*, **29**(10): 1983-1990 (2009).
- [9] Yamamoto T., Design and Testing of the Organic Rankine Cycle, *Energy*, **26**:239-251 (2001).
- [10] Liu Bo-Tau., Chien Kuo-Hsiang., Wang Chi-Chuan., Effect of Working Fluids on Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery, *Energy*, **29**:1207-1217 (2004).
- [11] <http://www.alternative-energy-tutorials.com/>, Last Accessed Jan 18, (2014).

Archive of SID