



## بهینه‌سازی چندهدفه چرخه رانکین آلی تولید همزمان توان، آب‌شیرین و حرارت: تعیین سیال سه‌جزئی مناسب

مهدی رحمدل، امین بهزادمهر\*، حامد فرزانه، فرامرز سرحدی

دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

### کلمات کلیدی:

مخلوط سه‌جزئی  
سیال آلی  
چرخه تولید همزمان  
سیکل رانکین آلی  
بهینه‌سازی چندهدفه

**خلاصه:** بهبود عملکرد چرخه رانکین آلی برای تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با استفاده از انرژی خورشیدی برای پاسخگویی به نیاز در مناطق دور از مرکز از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از عوامل مؤثر در عملکرد این چرخه، رفتار ترمودینامیکی سیال آلی آن می‌باشد. تعیین گزینه مطلوب سیال عامل که هم در چرخه توان، هم تولید آب شیرین و همچنین حرارت از رفتار مناسبی برخوردار باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش درصدد است تا با تحلیل، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک چرخه رانکین تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با استفاده از کلکتورهای سهموی خورشیدی به تعیین گزینه مطلوب بپردازد. لذا این چرخه با مخلوطی از سیالات آلی R1۲۳۴yf و R۱۵۲a، R۶۰۰a که به ترتیب از خانواده سیالات تر، خشک و آیزنتروپیک هستند شبیه‌سازی می‌گردد. لذا ابتدا یک مطالعه‌ی پارامتری و در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف توان، آب شیرین و حرارت به ازای کسر جرمی‌های مختلف از سیالات انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد مخلوط سه‌جزئی برای دستیابی همزمان به سه هدف مناسب‌تر است در حالیکه که اگر یکی از اهداف مد نظر باشد بهتر است فقط از یکی از این سیالات با توجه به هدف مورد نظر بهره‌جست.

### ۱- مقدمه

امروزه در توسعه پایدار جوامع، موضوع انرژی و آب شرب به‌عنوان عواملی مهم و کلیدی مد نظر قرار دارند. این در حالی است که تأمین این دو مهم بیشتر از طریق انرژی‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی و یا واحدهای شیرین‌سازی آب به روش‌های حرارتی و یا اسمز معکوس<sup>۱</sup> انجام می‌گیرد. علیرغم مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی هنوز هم این سوخت‌ها بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در این میان قابل توجه نیست.

در سال‌های اخیر تولید توان با استفاده از چرخه‌های رانکین آلی<sup>۲</sup> مورد توجه قرار گرفته است. این چرخه‌ها امکان بکارگیری منابع گرمایی با درجه حرارت نسبتاً پایین‌تری نظیر انرژی خورشیدی، انرژی زمین‌گرمایی و یا انرژی‌های تلف‌شونده را برای تولید توان فراهم می‌سازند. در این چرخه‌ها به‌جای آب از مبردها یا هیدروکربن‌ها به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌شود.

- 1 Reverse Osmosis (RO)
- 2 Organic Rankine Cycle (ORC)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amin.behzadmehr@eng.usb.ac.ir

این مبردها جرم مولکولی بالاتر، نقطه جوش و دمای بحرانی کمتری نسبت به آب دارند که باعث می‌شود تغییر فاز مایع - بخار در دماهای پایین‌تر از دمای تغییر فاز آب رخ دهد. همچنین این مبردها انرژی کمتری نسبت به آب لازم دارند تا در آن تغییر فاز مایع - بخار صورت گیرد. لذا مشخصات و رفتار ترمودینامیکی آنها تأثیر بسزایی در عملکرد این چرخه‌ها دارد. این مبردها (سیالات آلی) به سه دسته کلی خشک، تر و آیزنتروپیک تقسیم می‌شوند که هر کدام از آن‌ها مزایا و معایبی دارند و باید در انتخاب سیال عامل مناسب برای چرخه مورد توجه قرار گیرد. از جمله مشخصات سیال عامل مناسب می‌توان به گرمای نهان و چگالی بالا، حجم مخصوص و گرمای مخصوص پایین، ظرفیت پایین تخریب لایه ازون<sup>۳</sup>، ظرفیت پایین گرمایش جهانی<sup>۴</sup>، غیر سمی بودن و غیر قابل اشتعال بودن آن اشاره کرد [۱]. با توجه به مشخصات سیالات آلی موجود، هیچ‌کدام از سیالات آلی به تنهایی، تمام مشخصات سیال عامل را که برای انواع این چرخه‌ها مناسب باشد را ندارند و در نتیجه باید سیال عامل مناسب را با توجه به چرخه مورد نظر و میزان تقاضا برای

- 3 Ozone Depletion Potential (ODP)
- 4 Global Warming Potential (GWP)

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



هر کدام از توابع هدف انتخاب کرد.

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی سیالات آلی مختلف از جمله سیالات آلی R<sub>152a</sub>، R<sub>600a</sub> و R<sub>1234yf</sub> انجام شده است ولی تحقیقات محدودی روی استفاده از مخلوط‌های دوجزئی و بخصوص مخلوط‌های سه‌جزئی این سیالات انجام گرفته است.

تجانج و همکاران [۲]، سیالات آلی مختلف را از نظر بازده انرژی و اگزرژی، دبی جرمی، نسبت فشار، اشتعال‌پذیری، سمی‌بودن، قابلیت گرمایش زمین و میزان آسیب‌رسانی به لایه‌ی اوزون، در چرخه رانکین آلی با منبع دما پایین خورشیدی (۹۰ درجه سانتی‌گراد)، مقایسه کردند و مشاهده نمودند سیالات R<sub>134a</sub> و R<sub>600a</sub> بهترین عملکرد را دارند. یک چرخه تولید همزمان که از چرخه رانکین آلی برای حرارت و توان، از روش آب‌شیرین‌کن تقطیر چند مرحله‌ای<sup>۱</sup> برای تولید آب شیرین و برای سرمایش از چیلر جذبی<sup>۲</sup> استفاده می‌کند را با سیالات مختلف (از جمله سیال R<sub>152a</sub> و R<sub>600a</sub>) توسط ماراور و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفت آن‌ها نشان دادند که سیالات فلوروپنزن<sup>۳</sup> و اکتامیل تری سیلوکسان<sup>۴</sup> مناسب‌ترین هستند. شو و همکاران [۴]، یک چرخه رانکین آلی دو حلقه‌ای با شش سیال آلی را بررسی و سیالات R<sub>1234yf</sub>، R<sub>600a</sub>، R<sub>600a</sub>، R<sub>245fa</sub>، R<sub>134a</sub>، R<sub>124</sub> را به ترتیب برای چرخه دما پایین پیشنهاد کردند. همچنین مشاهده کردند هنگامی که توان خروجی موتور (به عنوان منبع حرارتی) در حداکثر مقدار خود باشد، سیال R<sub>1234yf</sub> بهترین عملکرد را دارد. یانگ و یه [۵] یک بررسی ترمودینامیکی روی شش سیال با پتانسیل گرمایش جهانی پایین و تخریب لایه اوزون صفر در چرخه رانکین آلی انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که سیال R<sub>600a</sub> و به دنبال آن R<sub>1234ze</sub> و R<sub>1234yf</sub> بهترین عملکرد را در دمای اواپراتور ۵۸ تا ۶۸ درجه سانتی‌گراد و دمای کندانسور ۳۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد خواهند داشت. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۱۵ [۶]، یک بهینه‌سازی ترمو - اقتصادی روی چرخه رانکین آلی با سیالات R<sub>245fa</sub>، R<sub>600a</sub>، R<sub>152a</sub>، R<sub>1234ze</sub> و R<sub>1234yf</sub> انجام دادند و مشاهده کردند که به ترتیب سیالات R<sub>1234yf</sub>، R<sub>1234ze</sub>، R<sub>152a</sub>، R<sub>600a</sub> و R<sub>600a</sub> بهترین عملکرد ترمو - اقتصادی را دارند. کانگ و همکاران [۷]، عملکرد ۱۰ گروه مخلوط سیال آلی (از جمله مخلوط R<sub>1234yf</sub>/R<sub>600a</sub>) را روی چرخه رانکین که از منبع دما پایین زمین گرمایی استفاده می‌کنند را بررسی کردند.

- 1 Multiple Effect Distillation (MED)
- 2 Absorption chiller
- 3 fluorobenzene
- 4 octamethyl trisiloxane

بررسی‌ها نشان داد بیشینه توان خالص تولیدی در چرخه رانکین آلی در نسبتی از کسر جرمی مخلوط اتفاق می‌افتد که بیشترین اختلاف دمای بخار اشباع و مایع اشباع در فشار ثابت را داشته باشد. همچنین براساس معیارهای اشتعال‌پذیری، توان خالص خروجی، هزینه و ملاحظات زیست‌محیطی، مخلوط (۰/۱، ۰/۹) R<sub>245fa</sub>/R<sub>600a</sub> بهترین عملکرد را دارد. ژو و همکاران [۸] یک چرخه رانکین دو حلقه‌ای که برای حلقه دما بالا از آب و برای حلقه دما پایین از مخلوط‌های R<sub>1234yf</sub>/R<sub>152a</sub>، R<sub>1234yf</sub>/R<sub>245fa</sub> و R<sub>1234yf</sub> و بوتان<sup>۵</sup> استفاده می‌کند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مخلوط R<sub>1234yf</sub>/R<sub>152a</sub> حدود ۱۷/۳ درصد از حرارت آب سردکننده موتور را بازیابی می‌کند. همچنین مشاهده کردند که مخلوط R<sub>1234yf</sub> و بوتان بهترین راندمان حرارتی را در مقایسه با مخلوط‌های دیگر و سیالات خالص بوتان، R<sub>1234yf</sub>، R<sub>152a</sub>، R<sub>245fa</sub> دارد. ساتانفول و همکاران [۹]، انواع سیالات آلی و مخلوط آن‌ها را در یک چرخه آلی رانکین با هدف بیشینه‌کردن توان خالص تولیدی بهینه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند در بین سیالات خالص و مخلوط به ترتیب سیال R<sub>22vea</sub> و مخلوط R<sub>218</sub>/R<sub>22vea</sub>/R<sub>245fa</sub> با ترکیب (۰/۳۸۸، ۰/۱۳۴، ۰/۳۲۱) بهترین عملکرد را خواهند داشت، در صورتی که اگر از مخلوط سیالات با پتانسیل گرمایش جهانی پایین استفاده شود، مخلوط R<sub>290</sub>/R<sub>152a</sub>/R<sub>600a</sub>/R<sub>600a</sub> با ترکیب (۰/۰۴۴، ۰/۲۲۴، ۰/۳۸۱، ۰/۳۵۱) بهترین عملکرد را خواهد داشت. یک سیستم هیبریدی تولید چندگانه شامل توان، سرمایش و آب شیرین که از سیال مخلوط ایزوبوتان و پنتان استفاده می‌کند توسط صادقی و همکاران [۱۰] مطالعه گردید. نتایج نشان داد که بیشترین توان خالص خروجی و کمترین ظرفیت سرمایشی در کسر مولی ۰/۵ سیال ایزوبوتان در مخلوط، بدست می‌آید درحالی‌که بیشترین تولید آب شیرین وقتی است که فقط از سیال پنتان استفاده شود. وانگ و همکاران [۱۱] یک بهینه‌سازی چند هدفه با توابع هدف نسبت هزینه به انرژی و راندمان اگزرژی برای چرخه رانکین با شش سیال آلی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که سیال R<sub>717</sub> بهترین نسبت هزینه به انرژی با مقدار ۰/۳۴ و راندمان اگزرژی ۲۸/۱۷ درصد را خواهد داشت. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۲] چرخه رانکین آلی را که از منبع زمین گرمایی استفاده می‌کند را در حالت‌های زیر بحرانی، مافوق گرم و مافوق بحرانی را با سیالات مختلف بررسی کردند. مشاهده شد سیالات مرطوب، توان خالص تولیدی بالاتری در چرخه فوق بحرانی دارند. همچنین نشان داده شد که از جمله سیالات مناسب

5 butane

R1۲۳۴yf در نظر گرفته شده و سپس تأثیر کسر جرمی هر یک از این سیالات در مخلوط سه‌جزئی بر تولید توان، آب شیرین و حرارت در چرخه تولید همزمان، بررسی شده است. در چرخه مورد بررسی سیالات طوری انتخاب شده‌اند که در دماهای پایین بتوانند عملکرد خوبی داشته باشند. همچنین این سیالات دارای پتانسیل تخریب لایه اوزون و پتانسیل گرمایش جهانی پایینی می‌باشند. لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده در زاویه بهینه کلکتور خورشیدی سهموی در دو روز ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و ۴ دی (۲۵ دسامبر) در شهر زاهدان انجام شده است.

## ۲- شرح سیستم

شکل ۱، طرح کلی چرخه تولید همزمان را نشان می‌دهد. این چرخه از کلکتورهای خورشیدی سهموی، چرخه رانکین آلی و یک آب‌شیرین‌کن یک مرحله‌ای تبخیر آبی<sup>۱</sup> تشکیل شده است. در این چرخه، ۵ عدد کلکتور خورشیدی مدل LS۲ [۱۷] که به صورت سری به هم متصل شده‌اند، جهت جذب انرژی خورشید، انتخاب شده است. سیال عامل در کلکتور خورشیدی، روغن ۸۰۰ SYL THERM می‌باشد. روغن داغ شده در کلکتور خورشیدی، حرارت خود را توسط یک مبدل حرارتی به سیال آلی فشار بالا در چرخه رانکین می‌دهد و سیال آلی را مافوق گرم می‌کند. سیال مافوق گرم فشار بالا در توربین در فشار واحد گرمایش فرآیند، زیرکش شده و توان تولید می‌کند و با سیالی که قبل از ورود به توربین از شیر انبساط (در فرآیند انتالپی ثابت)، در همان فشار خارج می‌شود مخلوط شده و برای تولید آب شیرین استفاده می‌شود. مابقی سیال مافوق گرم فشار بالا تا فشار کندانسور منبسط شده و توان تولید می‌کند. سیال خارج شده از توربین که به صورت بخار می‌باشد، وارد کندانسور شده و در آنجا چگالیده خواهد شد. سیال خروجی از کندانسور تا فشار بویلر پمپ می‌شود، همچنین سیالی که در واحد گرمایش فرآیند، جهت تولید آب شیرین استفاده شده و در نهایت به صورت مایع می‌باشد، نیز تا فشار بویلر پمپ می‌شود و سپس این دو سیال با هم مخلوط شده و به بویلر منتقل می‌شود.

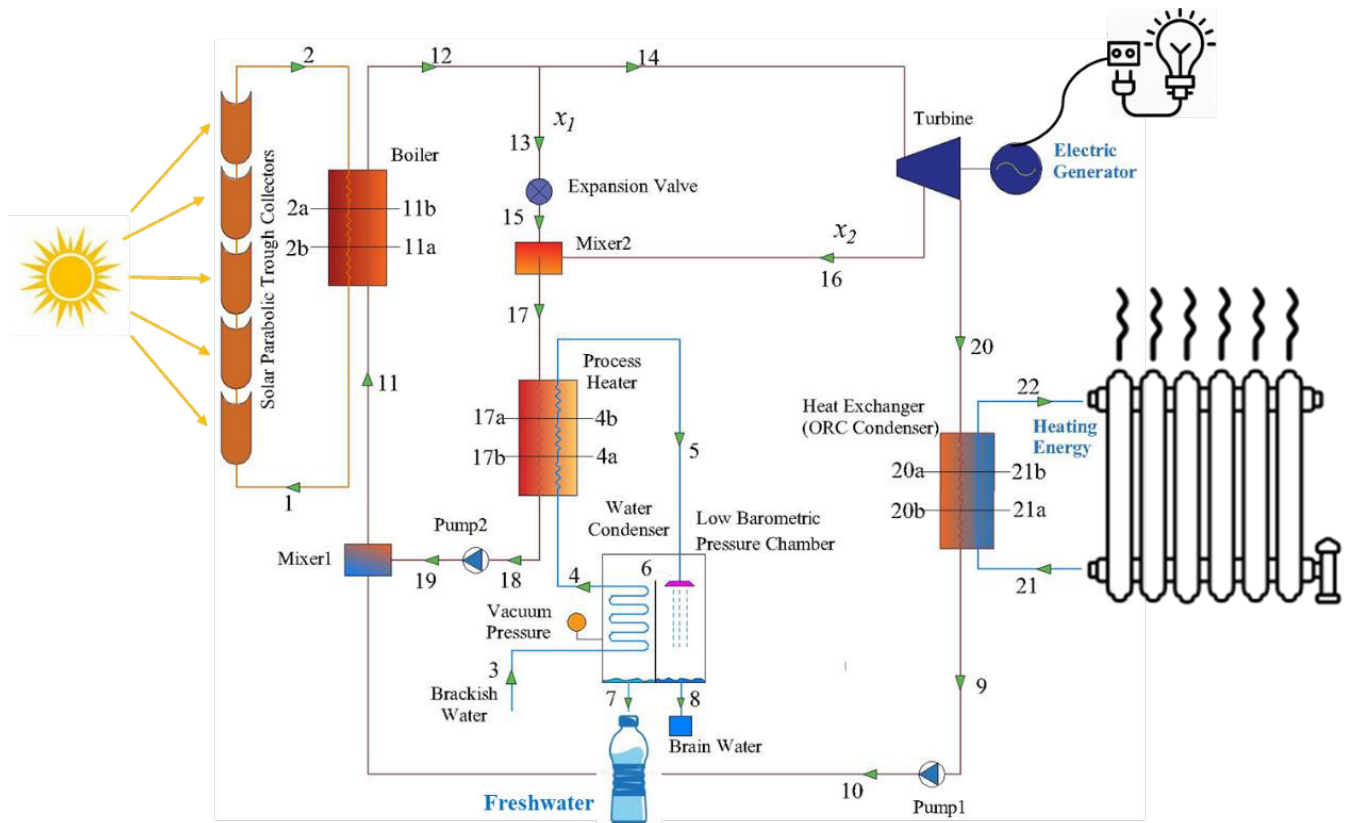
در چرخه آب‌شیرین‌کن، ابتدا آب خام ورودی توسط مبدل داخلی آب‌شیرین‌کن پیش گرم شده و سپس وارد مبدل حرارتی در واحد گرمایش فرآیند می‌شود و در آنجا گرمای سیال آلی را جذب کرده و دمای آب بالا می‌رود. آب گرم شده در محفظه‌ای که فشار آن پایین‌تر از فشار اتمسفر و متناظر فشار اشباع در دمای آب می‌باشد پاشیده می‌شود. سپس بخار آب

برای چرخه زیر بحرانی، R۲۳۶ea، R۶۰۰a برای چرخه مافوق‌گرم، R۶۰۰a، R۱۵۲a و برای چرخه فوق‌بحرانی R۱۳۴a، R۳۲ و R۶۰۰a می‌باشند. یانگ در سال ۲۰۱۹ [۱۳] به بررسی اقتصادی روی نسبت کسرهای جرمی مخلوط چند جزئی سیالات R۲۳۶fa، R۲۴۵fa و R۱۳۳۶mzz(Z) در چرخه رانکین آلی پرداخت. نتایج وی نشان داد در بین سیالات خالص، سیال R۲۴۵fa و در بین مخلوط‌های دوجزئی با کسرهای جرمی ۰/۵ و ۰/۵، مخلوط R۲۳۶fa/R۱۳۳۶mzz(Z) بهترین هزینه نسبت به انرژی را دارد. همچنین مشاهده شد که در بین سیالات خالص و نیز مخلوط‌های دوجزئی با کسرهای جرمی ۰/۵ و ۰/۵، همچنین مخلوط سه‌جزئی با کسرهای جرمی ۰/۳۳۳، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۳۳ بهترین نسبت هزینه به انرژی را دارند. وانگ و همکاران [۱۴]، ۱۴ سیال آلی از جمله R۶۰۰a، R۱۲۳۴yf، R۱۵۲a را به لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی برای رنج دمایی ۹۰ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بر روی یک چرخه رانکین آلی بررسی کردند. نتایج نشان داد که سیالات R۶۰۰a، R۶۰۰a، R۱۵۲a و R۲۴۵fa به ترتیب بیشترین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در دمای منبع ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد خواهند داشت. جنورگوزوپلاس و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۵]، یک بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی روی چرخه رانکین با سیالات آلی خالص و مخلوط را در سناریوهای مختلف انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تقریباً در هر سه سناریو بهترین عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی برای مخلوط R۶۰۰a و R۱۲۳۴yf با کسرهای جرمی به ترتیب ۰/۴ و ۰/۶ اتفاق می‌افتد. فخری و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۶] یک بهینه‌سازی تک‌هدفه و چند هدفه روی یک چرخه رانکین آلی با بیست مخلوط از سیالات آلی را انجام دادند. نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان داد که مخلوط‌های R۶۰۱/Cis-۲-Butene و R۶۰۱a/Cis-۲-Butene بهترین راندمان انرژی را دارند، در صورتی که مخلوط R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a از راندمان انرژی پایینی برخوردار است. نتایج بهینه‌سازی دوهدفه نشان داد که مخلوط‌های هگزان و R۶۰۱a و R۶۰۱a/C-۲-Butene بهترین عملکرد را دارند.

همانطور که در بخش قبلی مشاهده شد در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در چرخه‌های رانکین و تولید همزمان، از مخلوط‌های دوجزئی از جمله مخلوط‌های R۱۲۳۴yf/R۶۰۰a و R۱۵۲a/R۱۲۳۴yf استفاده شده است، اما تاکنون از مخلوط‌های سه‌جزئی سیالات آلی در چرخه‌های رانکین و بخصوص چرخه‌های تولید همزمان خیلی کم استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا سه سیال تر R۱۵۲a، خشک R۶۰۰a و آیزنتروپیک

1 Single-stage flash water desalination

2 Process heating unit



شکل ۱. طرح شماتیکی از چرخه تولید همزمان

Fig. 1. The schematic of the tri-generation cycle.

مشخصات آن‌ها در جدول ۲، آمده است [۲۰]. لازم به ذکر است، سیالات مورد بررسی طوری انتخاب شده‌اند که پتانسیل گرمایش جهانی و پتانسیل تخریب لایه اوزون پایینی دارند.

همانطور که در جدول ۲، مشاهده می‌شود، هر کدام از سیالات انتخابی، خواص ترمودینامیکی متفاوتی با یکدیگر دارند، لذا جهت بهره‌مندی از خواص ترمودینامیکی هر سه این سیالات، از مخلوط سه‌جزئی  $R152a/R1234yf/R600a$  با کسرهای جرمی مختلف استفاده شده است.

#### ۲-۲- مدل‌سازی مشخصات ترمودینامیکی مخلوط

برای اینکه رفتار سیالات انتخابی و مخلوط سه‌جزئی آن‌ها بهتر نشان داده شود، نمودار دما - آنترופی و فشار - انتالپی این سیالات مطابق شکل ۲، رسم شده است. برای مخلوط سه‌جزئی از کسرهای جرمی  $0/333$ ،  $0/333$  و  $0/334$  به ترتیب برای سیالات  $R152a$ ،  $R1234yf$  و  $R600a$  استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مخلوط سه‌جزئی در نظر گرفته شده، تقریباً رفتار سیال آیزنتروپیک را از خود نشان می‌دهد. لذا رفتارهای متنوعی

تولید شده در میدل داخلی آب شیرین‌کن، چگالیده شده و به مخزن آب شیرین هدایت می‌شود. مقدار آبی که تبخیر نمی‌شود نیز به سمت مجرای پساب هدایت می‌شود.

برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی چرخه تولید همزمان، پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده در اجزای چرخه در جدول ۱، آورده شده است.

#### ۲-۱- سیال عامل

سیالات آلی به سه دسته کلی‌تر، خشک و آیزنتروپیک تقسیم می‌شوند. در نمودار دما - آنترופی سیال، شیب خط بخار اشباع برای سیالات تر منفی، برای سیالات خشک مثبت و برای سیالات آیزنتروپیک بی‌نهایت می‌باشد. سیالات خشک به دلیل شیب منفی خط بخار اشباع در نمودار دما - آنترופی نیاز به سوپرهیت ندارند، در صورتی که سیالات تر به دلیل تشکیل قطرات مایع در توربین، نیاز به سوپرهیت دارند. به منظور بررسی تأثیر نوع سیال بر تولید توان، آب شیرین و حرارت، از یک سیال تر  $R152a$ ، یک سیال خشک  $R600a$  و یک سیال آیزنتروپیک  $R1234yf$  استفاده شده است که

جدول ۱. مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده در اجزای چرخه

Table 1. The values of the cycle components

مقدار	پارامتر
<b>کلکتور خورشیدی سهموی [۱۷]</b>	
۵×۷/۸ متر	طول $L$
۵ متر	عرض $W$
۱/۷۱ متر	فاصله کانونی $F$
۵×۳۹ متر مربع	مساحت $A_a$
۲۲/۷۴	نسبت تمرکز $C$
۰/۰۶۶ متر	قطر داخلی لوله جاذب $D_{ri}$
۰/۰۷ متر	قطر خارجی لوله جاذب $D_{ro}$
۰/۱۰۹ متر	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای $D_{ci}$
۰/۱۱۵ متر	قطر خارجی پوشش شیشه‌ای $D_{co}$
۰/۹	ضریب نشر پوشش $\varepsilon_c$
۰/۹۵	ضریب عبور پوشش $\tau$
۰/۹۶	ضریب جذب جاذب $\alpha$
۰/۸۳	ضریب انعکاس $\rho_c$
۰/۹۹	ضریب دریافت کلکتور $\gamma$
۰/۷۵	ماکزیمم راندمان نوری $\eta_{opt}$
۱	ضریب اصلاح زاویه برخورد $K(\theta)$
<b>چرخه رانکین آلی [۱۸]</b>	
۰/۷۵	راندمان آیزنتروپیک پمپ $\eta_{pump\ \gamma, is} = \eta_{pump\ \gamma, is}$
۰/۹۶	راندمان مکانیکی پمپ $\eta_{pump\ \gamma, mec} = \eta_{pump\ \gamma, mec}$
۰/۸	راندمان آیزنتروپیک توربین $\eta_{Tur, is}$
۰/۹۶	راندمان مکانیکی توربین $\eta_{Tur, mec}$
۰/۹۵	راندمان الکتریکی ژنراتور $\eta_{Tur, gen}$
<b>واحد آب‌شیرین‌کن [۱۹]</b>	
۰/۹	ضریب تأثیر آب‌شیرین‌کن $\varepsilon_D$
۲۹۸/۱۵ کلوین	دمای آب ورودی $T_3$

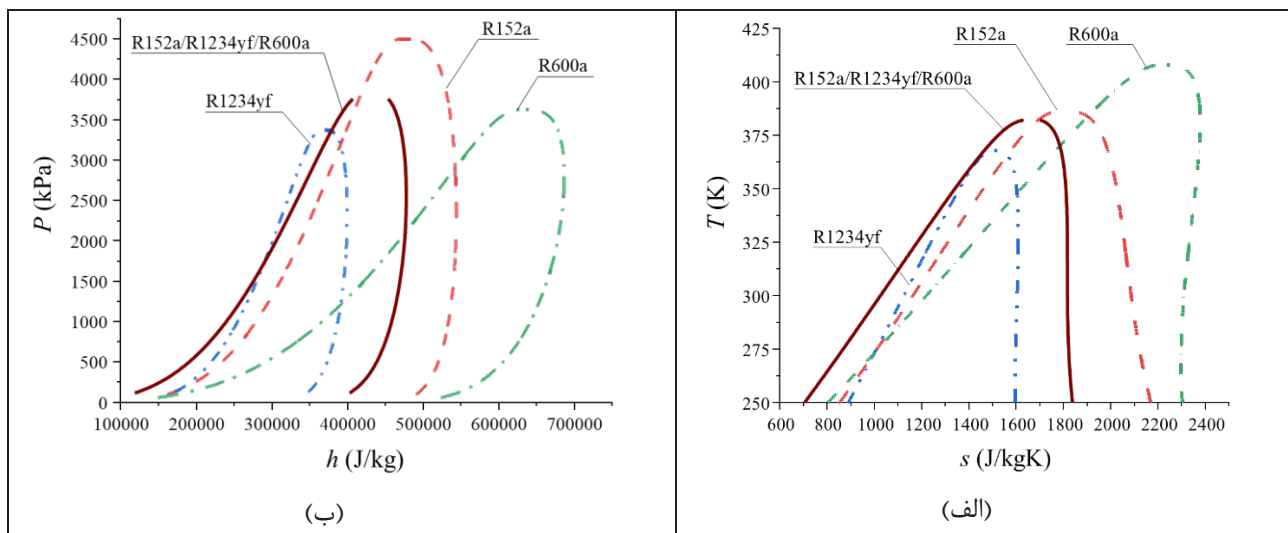
جدول ۲. مشخصات سیالات آلی انتخاب شده در چرخه تولید همزمان [۲۰]

R600a	1234yf	R152a	سیال
۵۸	۱۱۴	۶۶	وزن مولکولی (kg/kmol)
۴۰۸/۱۵	۳۶۸/۱۵	۳۸۵/۱۵	دمای بحرانی (K)
۳۶۴۰	۳۳۸۲	۴۴۵۰	فشار بحرانی (kPa)
۲۶۱/۱۵	۲۴۴/۱۵	۲۴۹/۱۵	دمای نقطه جوش (K)
~۲۰	<۴/۴	۱۲۴	پتانسیل گرمایش جهانی* (دوره ۱۰۰ ساله)
.	.	.	تخریب لایه اوزون**
A3	A2	A1	سطح ایمنی***
خشک	آیزنتروپیک	مرطوب	نوع سیال

\*پتانسیل گرمایش جهانی نسبت به دی اکسید کربن!

\*\*تخریب لایه اوزون نسبت به R۱۱.

\*\*\*استاندارد اشرفی ۲۳۴/A: سمیت کم/B: سمیت زیاد / ۱: غیر اشتعال پذیر / ۲: اشتعال پذیری کم / ۳: اشتعال پذیری بالا



شکل ۲. نمودار دما - آنتروپی (الف) و فشار - انتالپی (ب) برای سیالات انتخابی و مخلوط سه جزئی آن‌ها (نسبت‌های جرمی ۰/۳۳۳، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۳۴)

Fig. 2. Temperature-entropy diagram (a) and pressure-enthalpy diagram (b) for selected fluids and their three-component mixtures (mass ratios 0.333, 0.333 and 0.334)

۱۰. اختلاف دمای بخار اشباع در کندانسور  $T_{r,a}$  با دمای آب پیش گرم شده پس از ورود به کندانسور  $T_{r,b}$ ، ۵ درجه می باشد.

### ۲-۳-۱- کلکتورهای خورشیدی سهموی

تابش مستقیم خورشید روی کلکتور  $\dot{Q}_S$  و انرژی خورشیدی جذب شده توسط کلکتور  $\dot{Q}_{abs}$  به ترتیب از روابط (۱) و (۲) به دست می آیند [۱۷].

$$\dot{Q}_S = \dot{G}_{b,\beta} A_a \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_S \eta_{opt} \quad (2)$$

راندمان نوری کلکتور  $\eta_{opt}$  از معادله (۳) محاسبه می شود.

$$\eta_{opt} = \rho \alpha \tau \gamma K(\theta) \quad (3)$$

بخشی از انرژی خورشیدی جذب شده توسط روغن در کلکتور خورشیدی به انرژی حرارتی مفید  $\dot{Q}_u$  و مابقی آن  $\dot{Q}_{loss}$  به محیط دفع می گردد.

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_{loss} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{oil} c_{p,oil} (T_2 - T_1) \quad (5)$$

از طرفی، مقادیر انرژی حرارتی جذب شده، حرارت اتلافی به محیط و دمای روغن خروجی از کلکتور توسط روابط (۶) تا (۸) محاسبه می شوند:

$$\dot{Q}_u = \left[ K_4 \dot{Q}_S - K_5 (T_1^4 - T_{amb}^4) \right] \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{loss} = (\eta_{opt} - K_4) \dot{Q}_S + K_5 (T_1^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{K_4}{\dot{m}_{oil} c_{p,oil}} \dot{Q}_S - \frac{K_5}{\dot{m}_{oil} c_{p,oil}} (T_1^4 - T_{amb}^4) \quad (8)$$

از ترکیب با کسرهای جرمی مختلف می توان انتظار داشت. برای تعیین خصوصیات ترمودینامیکی سیالات آلی انتخابی و مخلوط آن ها از داده های رفرپراپ<sup>۱</sup> استفاده شده است [۲۱].

### ۲-۳-۲- مدل سازی چرخه

جهت تحلیل چرخه تولید همزمان و هر یک از اجزای آن، ابتدا یک مدل ریاضی ارائه و سپس جهت ساده سازی این مدل، فرضیاتی در نظر گرفته شده که در زیر به آن اشاره می شود.

۱. سیستم در شرایط پایا کار می کند.

۲. به جزء کلکتور خورشیدی، سایر اجزا افت حرارتی به محیط ندارند.

۳. پرتوهای تابیده شده از خورشید به صورت موازی هستند.

۴. از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم پوشی شده است.

۵. افت های فشار در بویلر، کندانسور، مبدل های حرارتی و لوله ها در نظر گرفته نشده است.

۶. از گازهای غیر قابل چگالش در آب ورودی به آب شیرین کن چشم پوشی شده است.

۷. ترکیب مخلوط سه جزئی در طول چرخه ثابت است.

با توجه به اینکه مخلوط سه جزئی استفاده شده در چرخه مورد نظر در این پژوهش، خاصیت زئوتروپیک دارد و بیشترین اختلاف دمای ناحیه بخار و مایع در فشار ثابت برای ناحیه دو فاز<sup>۲</sup> برای کندانسور  $\Delta T_{g,Cond}$ ،  $7/4$  درجه، برای واحد گرمایش فرآیند  $\Delta T_{g,PH}$ ،  $6/3$  درجه و برای بویلر  $\Delta T_{g,Boil}$ ،  $5/6$  درجه می باشد. از آنجایی که  $\Delta T_g$  برای هر سه مبدل کندانسور، واحد گرمایش فرآیند و بویلر کمتر از  $15$  درجه می باشد لذا شرط ارائه شده در مراجع [۲۲-۲۳] برقرار بوده و تغییری در ترکیب اجزا پدید نمی آید. از طرف دیگر با توجه به کم بودن اختلاف دمای نقطه جوش سیالات R۶۰۰a، R۱۲۳۴yf، R۱۵۲a که به ترتیب  $244/15$ ،  $249/15$  و  $261/15$  کلوین می باشد (حداکثر  $17$  درجه اختلاف) و خیلی کمتر از  $45$  کلوین می باشد [۲۴] لذا می توان از تغییر ترکیب اجزاء مخلوط چشم پوشی کرد و در نتیجه فرض ۷ صحیح می باشد.

۸. اختلاف دمای مادون سرد در فشار کندانسور  $T_a$  با دمای آب ورودی کندانسور  $T_{r1}$ ،  $10$  درجه می باشد.

۹. اختلاف دمای مادون سرد در فشار واحد گرمایش فرآیند  $T_{18}$  با دمای

آب پیش گرم شده در کندانسور آب شیرین کن  $T_f$ ،  $10$  درجه می باشد.

- 1 Refprop
- 2 temperature glide

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$h_{out} = 4V_{wind}^{0.58} D_{co}^{-0.42} \quad (17)$$

که  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  و  $\varepsilon_r^*$  از روابط (۹) تا (۱۴) بدست می‌آیند:

$$K_1 = 4A_{co} \varepsilon_c \sigma T_{amb}^3 + A_{co} h_{out} \quad (9)$$

$$K_2 = A_{ro} \varepsilon_r^* \sigma \left[ 1 + \frac{4\varepsilon_r^* \sigma A_{ro} T_{amb}^3}{K_1} \right]^{-1} \quad (10)$$

$$K_3 = \left[ \frac{1}{A_{ri} h_{oil}} + \frac{1}{2\dot{m}_{oil} c_{p,oil}} \right]^{-1} \quad (11)$$

$$K_4 = \eta_{opt} \left[ 1 + \frac{4T_1^3 K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$K_5 = K_2 \left[ 1 + \frac{4T_1^3 K_2}{K_3} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\varepsilon_r^* = \left[ \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{A_{ro}}{A_{ci}} \right]^{-1} \quad (14)$$

۲-۳-۲- چرخه رانکین آلی  
موازنه جرمی برای چرخه رانکین آلی (با توجه به شکل ۱)، توسط معادلات (۱۸) تا (۲۳) محاسبه می‌شوند.

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{OWF} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{15} = x_1 \dot{m}_{OWF} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{14} = (1 - x_1) \dot{m}_{OWF} \quad (20)$$

$$\dot{m}_{16} = x_2 (1 - x_1) \dot{m}_{OWF} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} = (x_1 + x_2 - x_1 x_2) \dot{m}_{OWF} \quad (22)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{20} = (1 - x_1 - x_2 + x_1 x_2) \dot{m}_{OWF} \quad (23)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی داخل لوله از رابطه (۱۵) حساب می‌شود.

$$h_{oil} = \frac{Nu_{oil} k_{oil}}{D_{ri}} \quad (15)$$

عدد نوسلت برای جریان درهم درون لوله دایره‌ای، از رابطه دیتوس - بولتر بدست می‌آید.

$$Nu_{oil} = 0.023 Re_{oil}^{0.8} Pr_{oil}^{0.4} \quad (16)$$

نسبت‌های جرمی جریان  $x_1$  و  $x_2$  از روابط زیر حساب می‌شود.

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{13}}{\dot{m}_{12}} \quad (24)$$

$$x_2 = \frac{\dot{m}_{16}}{\dot{m}_{14}} \quad (25)$$

روابط ترمودینامیکی برای اجزای چرخه رانکین آلی در جدول ۳، آورده شده است.



جدول ۳. روابط ترمودینامیکی اجزای چرخه رانکین آلی

Table 3. Thermodynamic relationships of the organic Rankine cycle components

معادلات	اجزا
$\dot{W}_{pump1} = \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_9h_9$ $\eta_{pump1,is} = \frac{h_{10,is} - h_9}{h_{10} - h_9}$	پمپ ۱
$\dot{W}_{pump2} = \dot{m}_{19}h_{19} - \dot{m}_{18}h_{18}$ $\eta_{pump1,is} = \frac{h_{10,is} - h_9}{h_{10} - h_9}$	پمپ ۲
$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{16}h_{16} - \dot{m}_{20}h_{20}$ $\eta_{Tur,is} = \frac{h_{14} - h_{16}}{h_{14} - h_{16,is}}$ $\eta_{Tur} = \frac{h_{14} - h_{20}}{h_{14} - h_{20,is}}$	توربین
$h_{13} = h_{15}$	شیر انبساط
$\dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{19}h_{19} = \dot{m}_{11}h_{11}$	مخلوط کننده ۱
$\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{16}h_{16} = \dot{m}_{17}h_{17}$	مخلوط کننده ۲
$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{Boil} = \dot{m}_{12}h_{12} - \dot{m}_{11}h_{11}$	بویلر
$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20}h_{20} - \dot{m}_9h_9$	کندانسور
$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{18}h_{18}$	واحد گرمایش فرآیند

توان خالص تولیدی در چرخه تولید همزمان از رابطه (۲۶) بدست می‌آید.

$$\dot{Q}_{Cond,W} = \dot{m}_3 c_{p,W} (T_4 - T_3) \quad (28)$$

ضریب تأثیر مبدل حرارتی کندانسور  $\varepsilon_D$  از رابطه (۲۹) بدست می‌آید.

$$\varepsilon_D = \frac{T_4 - T_3}{T_{Sat} - T_3} \quad (29)$$

از ترکیب معادلات (۲۸) و (۲۹)، معادله (۳۰) بدست خواهد آمد.

$$\dot{Q}_{Cond,W} = \dot{m}_3 \varepsilon_D c_{p,W} (T_{Sat} - T_3) \quad (30)$$

$$\dot{W}_{Net} = (\eta_{Tur,mec} \eta_{Tur,gen} \dot{W}_{Tur}) - \left( \frac{\dot{W}_{pump1}}{\eta_{pump1,mec}} \right) - \left( \frac{\dot{W}_{pump2}}{\eta_{pump2,mec}} \right) \quad (26)$$

۲-۳-۳- آب شیرین کن تبخیر آبی تک مرحله‌ای

معادلات بالانس جرمی و انرژی برای آب شیرین کن تبخیر آبی

تک مرحله‌ای از روابط زیر به دست می‌آید [۱۹].

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 \quad (27)$$

از طرفی، با در نظر گرفتن یک حجم کنترل روی محفظه فشار پایین

معادله (۳۱) بدست می‌آید.

در محفظه فشار پایین، آب تبخیر شده در مبدل داخلی آب شیرین کن،

چگالیده شده و آب خام ورودی را پیش گرم می‌کند. بنابراین:

جدول ۴. مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۲۵] برای کلکتور خورشیدی سهموی

Table 4. Comparison between the present work and results of [25] for parabolic solar collectors

$\eta_{th} (\%)$		$T_{out} (K)$		$\dot{m}_{out} (kg/s)$	$T_m (K)$	$T_{amb} (K)$	$\dot{G}_{\beta\gamma} (W/m^2)$	حالت
پژوهش حاضر	مرجع [۲۵]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۵]					
۷۳/۱۰	۷۲/۵۱	۳۹۷/۵۳	۳۹۷/۱۵	۰/۶۸۶۴	۳۷۵/۳۵	۲۹۴/۳۵	۹۳۳/۷	۱
۶۲/۶۴	۶۲/۳۴	۶۷۱/۲۴	۶۷۱/۱۵	۰/۴۵۸۱	۶۵۲/۶۵	۳۰۴/۲۵	۹۲۰/۹	۲

راندمان انرژی کلی چرخه تولید همزمان مطابق رابطه (۳۶) تعریف می‌گردد.

$$\eta_{Overall} = \frac{\dot{W}_{Net} + \dot{Q}_{Cond} + \dot{m}_{dis} h_{fg@Sat}}{\dot{Q}_S} \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{Cond,Sat} = \dot{m}_7 c_{p,W} T_7 + \dot{m}_8 c_{p,W} T_8 - \dot{m}_5 c_{p,W} T_5 \quad (31)$$

با فرض  $T_\rho = T_v = T_\lambda = T_{Sat}$  رابطه (۳۲) بدست می‌آید.

$$\dot{Q}_{Cond,Sat} = \dot{m}_5 c_{p,W} (T_{Sat} - T_5) \quad (32)$$

### ۳- اعتبارسنجی مدل

برای حل معادلات شبیه‌سازی شده، کد عددی نوشته شده است. برای اینکه نشان داده شود مدل ریاضی این پژوهش با مدل‌های مشابه از دقت خوبی برخوردار است از پژوهش‌های مشابه در این زمینه استفاده شده است. از آنجایی که مدلی مشابه با مدل این پژوهش وجود ندارد، سه سیستم به صورت مجزا اعتبارسنجی خواهند شد. ابتدا کلکتور خورشیدی سهموی، سپس چرخه رانکین آلی و در نهایت آب‌شیرین‌کن تبخیر آبی یک‌مرحله‌ای اعتبارسنجی می‌شوند. برای شرایط مشابه جداول ۴ تا ۶ مقایسه نتایج مدل ریاضی این پژوهش را با نتایج در دسترس نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توافق خوبی بین نتایج این مدل و پژوهش‌های مشابه وجود دارد و لذا این مدل از دقت خوبی برای شبیه‌سازی این چرخه برخوردار است.

با مساوی قرار دادن  $\dot{Q}_{Cond,W} = -\dot{Q}_{Cond,Sat}$ ، دمای اشباع محاسبه می‌شود.

$$T_{Sat} = \frac{T_5 + \varepsilon_D T_3}{1 + \varepsilon_D} \quad (33)$$

آب پیش‌گرم‌شده (حالت ۴) با عبور از واحد گرمایش فرآیند و جذب حرارت از آن، دمای خود را تا دمای  $T_5$  بالا می‌برد.

$$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_5 c_{p,W} (T_5 - T_4) \quad (34)$$

با توجه به این که حرارت منتقل شده در کندانسور آب‌شیرین‌کن، معادل با حرارت نهان آب شیرین‌چگالیده‌شده در شرایط اشباع می‌باشد، نرخ جرمی آب شیرین تولید شده توسط رابطه (۳۵) بدست خواهد آمد.

$$\dot{m}_{dis} = \dot{m}_7 = \frac{\dot{m}_5 c_{p,W} (T_5 - T_{Sat})}{h_{fg@Sat}} \quad (35)$$

### ۴- پارامترهای محیطی

برای بررسی عملکرد چرخه تولید همزمان، به‌طور نمونه دو روز کاملاً صاف و آفتابی در فصل گرم ۴ تیر یا (۲۵ ژوئن) و فصل سرد ۴ دی یا (۲۵ دسامبر) با توجه به شرایط محیطی شهر زاهدان (طول و عرض جغرافیایی ۶۰/۸۶ درجه شرقی و ۲۹/۵ درجه شمالی) در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. مقایسه نتایج کار حاضر و مراجع [۹] و [۲۶-۲۸] برای چرخه رانکین آلی در حالت  $x_1 = x_2 = 0$

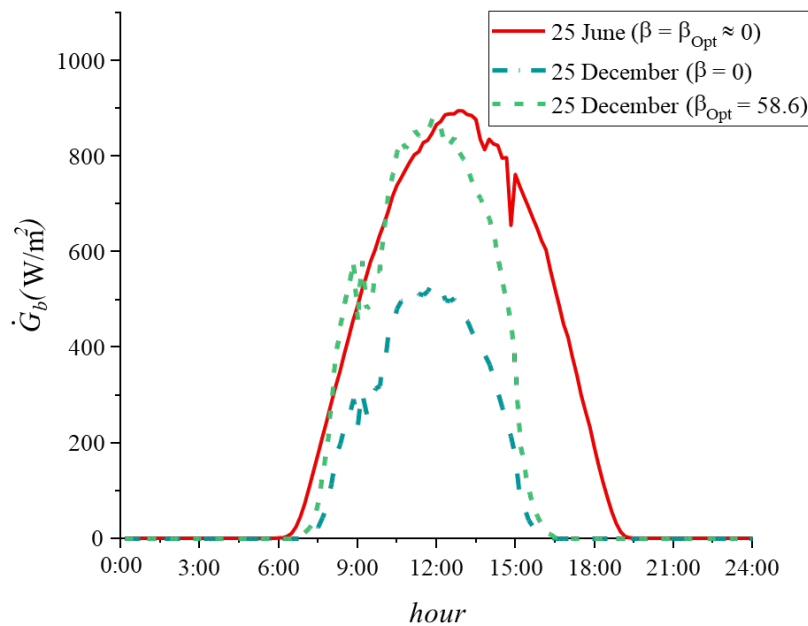
**Table 5. Comparison between the present work and results of [9] and [26-28] for the organic Rankine cycle at  $x_1=x_2=0$**

R152a/R600a/R601a	R600a/R601a	R600a	R1234yf	R152a	سیال
(۰/۴۷۱، ۰/۴۶۶، ۰/۰۶۳)	(۰/۱، ۰/۹)	۱	۱	۱	کسر جرمی
مرجع [۹]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۸]	پژوهش حاضر	مرجع [۲۷]	پژوهش حاضر
۸۲۰	۱۵۰	۴۸۰	۷۷۹/۴۱	۷۷۹/۴۱	$P_9$ (kPa)
۲۶۷۰	۵۵۰	۱۴۴۰	۵۰۷۳/۳	۵۰۷۳/۳	$P_{12}$ (kPa)
۳۱۰/۴۹	۳۰۴/۰۵	۳۰۹/۳۴	۳۰۲/۹۶	۳۰۲/۹۶	$T_9$ (K)
۳۱۱/۹۷	۳۰۴/۳۹	۳۱۰/۳۷	۳۰۶/۸۴	۳۰۶/۸۴	$T_{11}$ (K)
۳۷۲/۰۷	۳۶۴/۵۸	۳۶۴/۰۴	۳۹۵/۴۲	۳۹۵/۴۲	$T_{12}$ (K)
۳۱۹/۷۶	۳۳۸/۳۹	۳۳۱/۶۳	۳۰۸/۲۳	۳۰۸/۲۳	$T_{20}$ (K)
۲۸۲۳۶۰	۳۴۰۰۰	۲۸۶۶۶۰	۷۶۸۲۰	۷۶۸۲۰	$h_9$ (J/kg)
۲۸۵۷۶۰	۳۵۱۰۰	۲۸۹۶۴۰	۸۲۰۹۰	۸۲۰۹۰	$h_{11}$ (J/kg)
۵۹۵۸۰۰	۴۷۱۲۴۰	۶۷۹۳۳۰	۲۴۸۳۳۰	۲۴۸۳۳۰	$h_{12}$ (J/kg)
۵۶۲۶۹۰	۴۳۴۴۰۰	۶۴۵۳۷۰	۲۲۳۹۱۰	۲۲۳۹۱۰	$h_{20}$ (J/kg)
۱۲/۷۷۶	۰/۱۶۱	۰/۱۶۷	۴/۱۴۵	۴/۱۴۴۹	$\dot{m}_{ORF}$ (kg/s)
۳۷۹۵۴۰	۲۱۸۰۱/۴	۲۰۷۸۷/۶	۷۹۳۷۶/۷	۷۹۳۴۰	$\dot{W}_{Net}$ (W)

جدول ۶. مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۱۹] برای آب شیرین کن تبخیر آبی یک مرحله‌ای

**Table 6. Comparison between the present work and results of [19] for single-stage flash desalination**

$\dot{m}_{dis}$ (kg/s)	$\dot{m}_w$ (kg/s)	$T_3$ (K)	$T_4$ (K)	$\varepsilon_D$	$T_5$ (K)	$P_6$ (kPa)	$T_6$ (K)	$\dot{Q}_{PH}$ (W)	
۰/۰۰۱۹۴	۰/۰۵	۳۴۸/۷۹	۳۲۵/۰۱	۰/۹۷	۳۰۲/۸۹	۱۴/۰۲	۳۲۵/۷	۵۰۰۰	مرجع [۱۹]
۰/۰۰۲	۰/۰۵۲۳	۳۴۷/۸۹	۳۲۵/۰۴						پژوهش حاضر



شکل ۳. شدت تابش مستقیم تابیده شده خورشید در حالت افقی و زاویه بهینه کلکتور در روزهای ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و ۴ دی (۲۵ دسامبر) در زاهدان [۲۹]

Fig. 3. The solar radiation on the horizontal plane and optimal collector angle on 25 June and 25 December in Zahedan city [29]

هنگام استفاده از سیالات مخلوط، در ناحیه دوفاز وقتی فشار ثابت است، دما ثابت نمی ماند و دما به اندازه  $\Delta T_g$  (اختلاف دما در ناحیه مایع اشباع و ناحیه بخار اشباع) متفاوت است (شیب نمودار دما - فشار در ناحیه دوفاز صفر نخواهد شد). در این پژوهش فشار کندانسور در ۱۰۰۰ کیلوپاسکال، فشار واحد فرآیند در ۲۰۰۰ کیلوپاسکال، فشار بویلر در ۲۵۰۰ کیلوپاسکال، دمای سوپرهایت در ۱۰ کلوین و فشار محفظه فشار پایین آب شیرین کن در ۱۰ کیلوپاسکال ثابت نگه داشته شده و تنها کسرهای جرمی سیالات R1۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a تغییر می کند. توجه شود که در محاسبات انجام شده در چرخه تولید همزمان، فرض شده که شیر شماره ۱، به اندازه ۱۰ درصد و شیر شماره ۲، به اندازه ۵۰ درصد باز باشد.

#### ۵-۱- مطالعه پارامتری

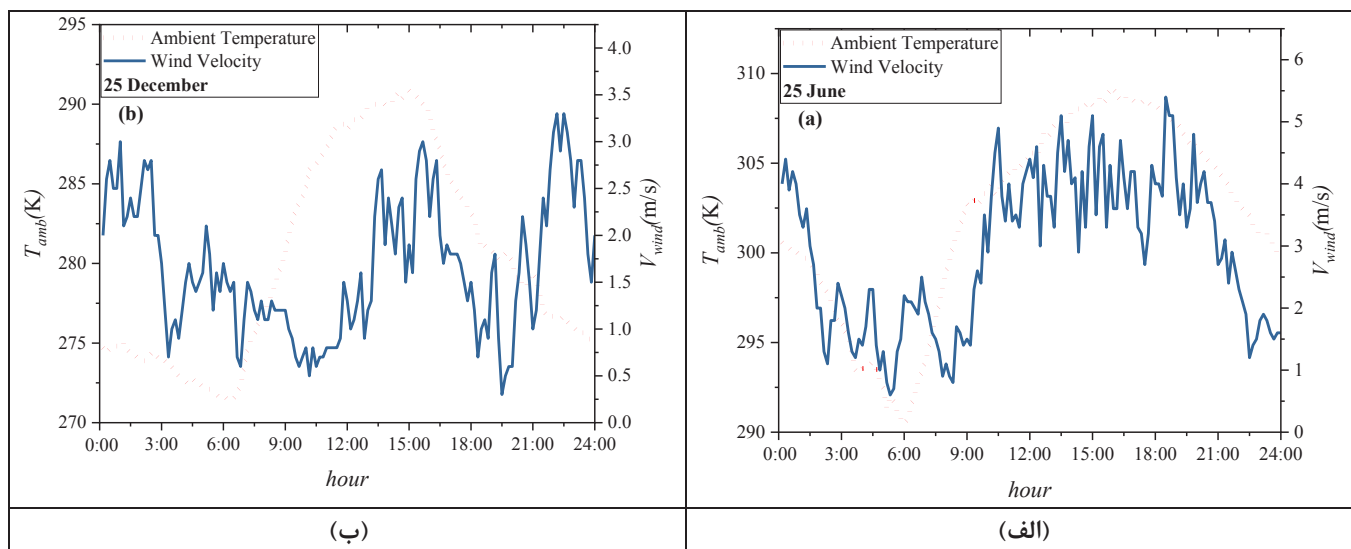
میزان تأثیر کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی روی توان، آب شیرین و حرارت تولیدی در شکل های ۵، ۶ و ۷ آورده شده است. در این شکل های رسم شده، محور افقی، کسر جرمی سیال R1۵۲a و محور عمودی، کسر جرمی سیال R۱۲۳۴yf را نشان داده و برای کسر جرمی سیال R۶۰۰a

محاسبات انجام شده، برای شدت تابش مستقیم تابیده شده خورشید، سرعت باد و دمای محیط برای دو روز انتخابی، از داده های هواشناسی شهر زاهدان استفاده شده است [۲۹]. شکل ۳، شدت تابش مستقیم اندازه گیری شده، وقتی کلکتور در حالت افقی قرار گرفته ( $\beta = 0$ ) و نیز وقتی کلکتور در حالت زاویه بهینه خود قرار دارد ( $\beta_{opt}$ ) را نشان می دهد [۳۰]. سرعت باد و دمای محیط در دو روز انتخابی در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۷، مقدار متوسط روزانه دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش مستقیم خورشید در حالت زاویه بهینه کلکتور را نشان می دهد. توجه شود که در این پژوهش از متوسط روزانه این مقادیر استفاده می شود.

#### ۵- بحث و بررسی نتایج

با توجه به مشخصات فیزیکی و ترمودینامیکی متفاوت هر یک از سیالات R1۵۲a، R۱۲۳۴yf و R۶۰۰a، رفتار این سیالات در کسرهای جرمی مختلف نیز با یکدیگر تفاوت دارد. عملکرد هر یک از سیالات به تنهایی به گونه ای است که در ناحیه دوفاز وقتی فشار ثابت است، دما نیز ثابت می ماند (شیب نمودار دما - فشار در ناحیه دوفاز صفر خواهد بود). اما در



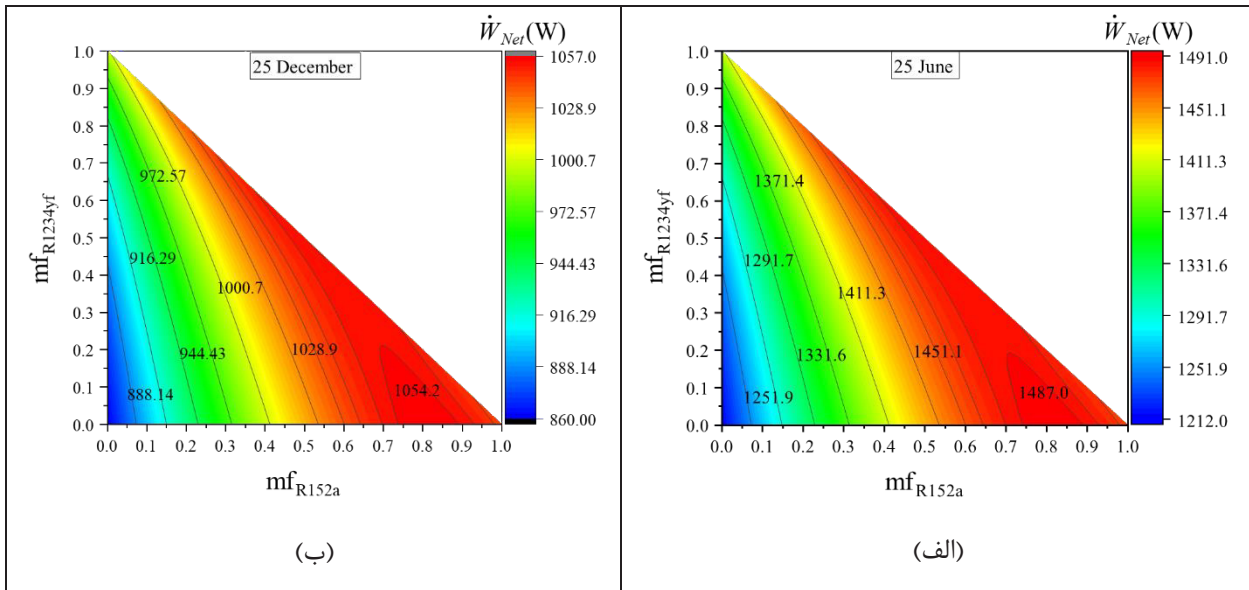
شکل ۴. دمای محیط و سرعت باد در زاهدان در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر) [۲۶]

Fig. 4. Ambient temperature and wind velocity in Zahedan city at (a) 25 June (b) 25 December

جدول ۷. شرایط محیطی دو روز انتخابی [۲۹]

Table 7. Environmental conditions in the two selected days [29]

روز	۴ تیر (25 June)	۴ دی (25 December)
$T_{amb}(K)$	۳۰٫۲/۱	۲۸٫۰/۳
$V_{wind}(m/s)$	۲/۹۱	۱/۶۶
$\dot{G}_{b\beta}(W/m^2)$	۲۸۵/۹	۲۰۷/۲



شکل ۵. توان تولیدی در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 5. Power production for different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December

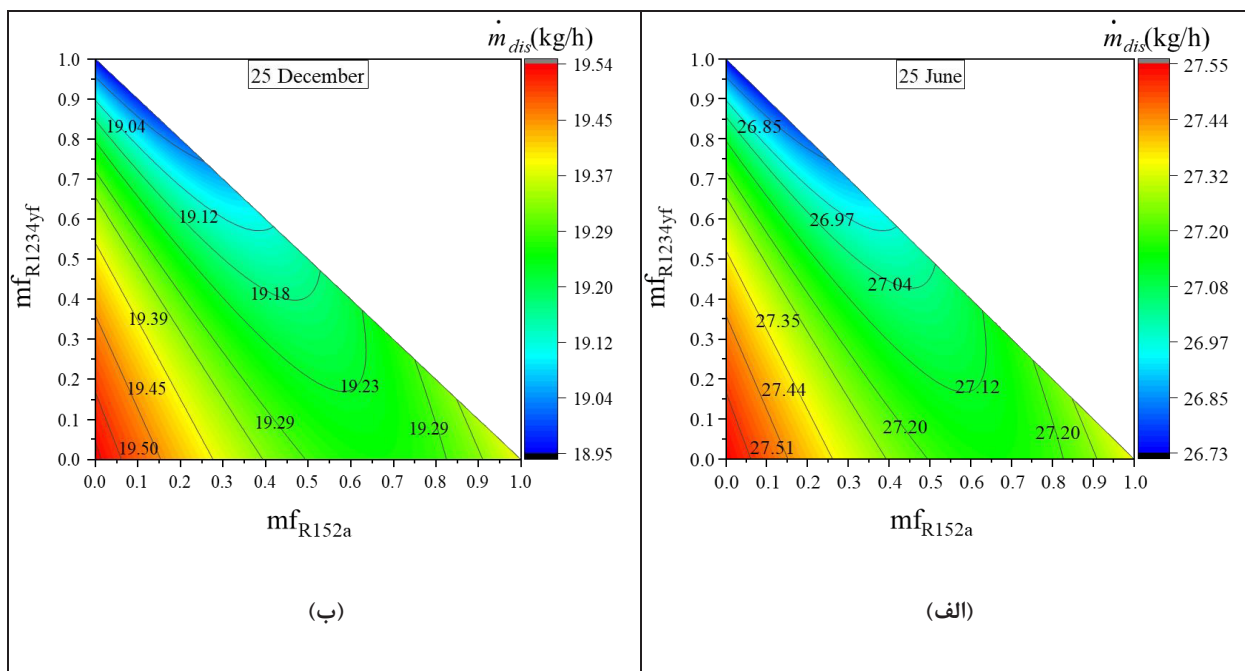
شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۲۱ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۷۷۲۴/۶ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۲۹ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۲۵۶۷/۱ وات می‌باشد. از مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر حرارت کندانسور بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر آب شیرین بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد. لازم به ذکر است که اگر صرفاً توان تولیدی مورد نظر باشد، باید از کسرهای جرمی ۰/۸۱۵ و ۰/۱۸۵ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a برای هر دو روز انتخابی استفاده کرد (سیال R1234yf تأثیری نخواهد داشت). بیشترین توان تولیدی در این مخلوط در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب ۱۴۹۱ و ۱۰۵۷ وات خواهد.

شکل ۶ مقدار دبی آب شیرین تولیدی در دو روز انتخابی برای کسرهای مختلف جرمی سیالات R152a، R1234yf و R600a را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، می‌توان برای یک مقدار مشخص از آب شیرین تولیدی، از کسرهای جرمی مختلفی در مخلوط سه‌جزئی استفاده کرد، اما توان و حرارت متفاوتی تولید می‌شود. به‌طور نمونه برای اینکه آب شیرین تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب در مقادیر ۲۷/۲ و ۱۹/۲۹

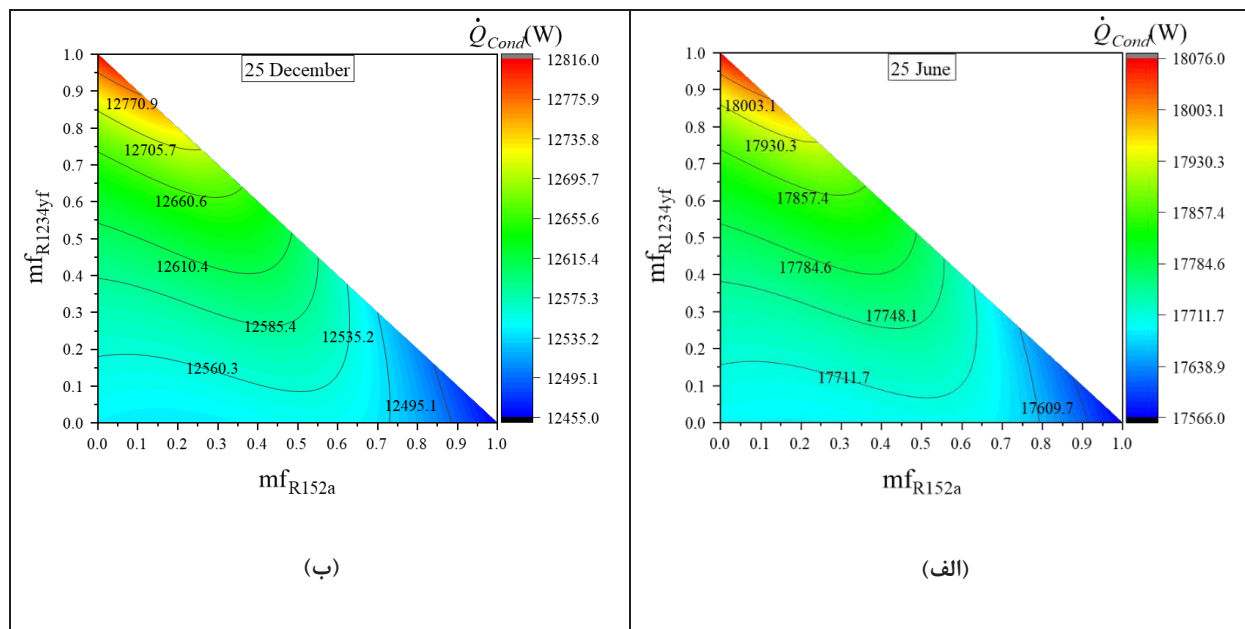
رابطه  $mf_{R600a} = 1 - mf_{R152a} - mf_{R1234yf}$  به‌کار خواهد رفت. شکل ۵، مقدار توان تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی در کسرهای مختلف جرمی سیالات R152a، R1234yf و R600a برای چرخه تولید همزمان را نشان می‌دهد.

همانطور که کانتورهای رسم‌شده نشان می‌دهد، می‌توان برای یک مقدار مشخص از توان، الگوهای مختلفی از کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی را انتخاب کرد. توجه شود که انتخاب هر یک از این الگوها اگرچه توان یکسانی ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که آب شیرین و حرارت متفاوتی تولید کند. به‌عنوان نمونه برای اینکه توان در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب در مقادیر ۱۴۱۱/۳ و ۱۰۰۰/۷ وات ثابت باشد می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۰۷ و ۰/۸۸ و ۰/۰۵ و به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a و نیز کسرهای جرمی ۰/۳۶، ۰/۱۶۵ و ۰/۴۷۵ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a برای استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۰۷ و ۰/۸۸ و ۰/۰۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۶/۸۵ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۷۹۸۱/۷ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۰۴ کیلوگرم بر ساعت و حرارت کندانسور ۱۲۷۴۹/۴ وات خواهد بود. در صورتی که اگر از ترکیب ۰/۳۶، ۰/۱۶۵ و ۰/۴۷۵ استفاده



شکل ۶. دبی آب شیرین تولیدی در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 6. Fresh water production on different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December



شکل ۷. حرارت تولیدی در کندانسور در کسرهای جرمی مختلف سیالات آلی انتخابی در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 7. Heating power production on different mass fractions of selected organic fluids at (a) 25 June and (b) 25 December

این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر آب شیرین بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر توان بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد.

لازم به ذکر است اگر تنها حرارت تولیدی در کندانسور، مورد نظر باشد، باید از سیال R1234yf استفاده کرد که در این حالت، بیشترین حرارت تولیدی در کندانسور در روزهای ۴ تیر و ۴ دی، به ترتیب ۱۸۰۷۵/۲ و ۱۲۸۱۵/۷ وات خواهد بود.

#### ۵-۲- بهینه‌سازی چند هدفه

برای بهینه‌سازی چندهدفه از روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب چند هدفه<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. برای این منظور تعداد جمعیت ۲۰۰، بیشترین تکرار ۵۰۰، نرخ تقاطع<sup>۲</sup> ۰/۷، درصد جهش<sup>۳</sup> ۰/۰۳، روش رقابتی<sup>۴</sup> به‌عنوان پارامترهای کنترلی الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. کسرهای جرمی سیالات R152a، R1234yf و R600a بعنوان متغیرها انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است که مجموع کسر جرمی سه سیال مورد نظر همواره برابر یک می‌باشد. همچنین با توجه به دمای مناسب آب گرم برای مصارف حرارتی قید نشان داده شده در معادله (۳۷) نیز در نظر گرفته شده است.

$$323.15 \leq T_{22} (K) \leq 333.15 \quad (37)$$

لازم به ذکر است که توابع هدف در این پژوهش، توان خالص، دبی آب شیرین و حرارت تولیدی در کندانسور می‌باشد. پس از بهینه‌سازی چندهدفه چرخه تولید همزمان، نمودارهای جبهه پرتو آن‌ها به صورت جداگانه برای روزهای انتخابی در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) رسم شده است. نقاط مشخص شده با رنگ قرمز در نمودار جبهه پرتو (شکل ۸) در هر دو روز انتخابی، بهترین نقاط انتخاب شده برای توابع هدف می‌باشند.

شکل ۹، توزیع کسرهای جرمی (متغیرهای بهینه‌سازی) بهینه‌شده پس از بهینه‌سازی چندهدفه را برای سه سیال R152a، R1234yf و R600a نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹، مشاهده می‌شود، برای سیال R152a، کسرهای جرمی مورد قبول بین ۰ تا ۰/۳۵۵ می‌باشد، در صورتی که برای سیال R1234yf، باید از کسرهای جرمی ۰ تا ۰/۷۴

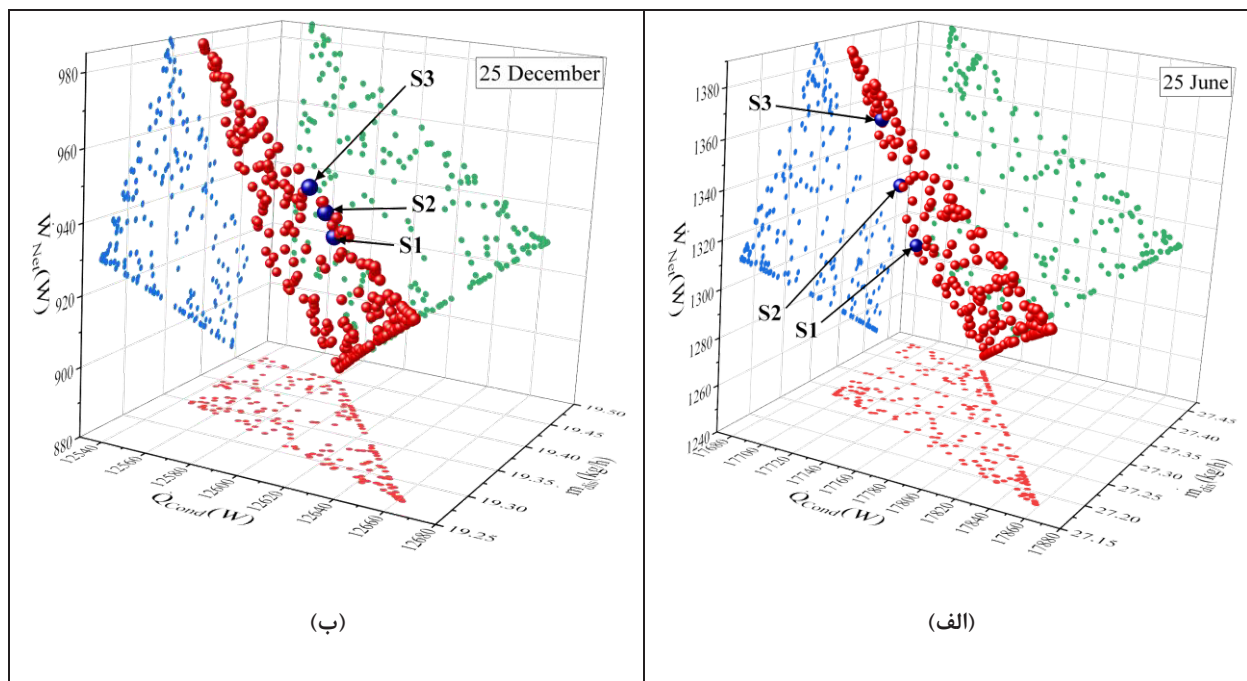
کیلوگرم بر ساعت ثابت بماند، می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۸۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱۲ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a و نیز کسرهای جرمی ۰/۲۵۵، ۰/۳۳ و ۰/۴۱۵ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۸۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱۲ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار توان تولیدی، ۱۴۸۸/۱ وات و حرارت کندانسور ۱۷۶۵۰/۲ وات و در روز ۴ دی، مقدار توان تولیدی ۱۰۵۵/۱ وات و حرارت کندانسور ۱۲۵۱۴/۴ وات خواهد بود. در صورتی که اگر از ترکیب ۰/۲۵۵، ۰/۳۳ و ۰/۴۱۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار توان تولیدی، ۱۳۸۸/۳ وات و حرارت کندانسور ۱۷۷۵۴/۶ وات و در روز ۴ دی، مقدار توان تولیدی ۹۸۴/۳ وات و حرارت کندانسور ۱۲۵۸۸/۴ وات خواهد بود. از مقایسه این دو حالت مشاهده می‌شود که اگر توان تولیدی بیشتر مدنظر باشد، از ترکیب اول و اگر حرارت تولیدی در کندانسور بیشتر موردنظر باشد، از ترکیب دوم می‌توان استفاده کرد.

اگر هدف تنها تولید آب شیرین باشد، باید از سیال R600a استفاده کرد که در این حالت بیشترین آب شیرین تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب ۲۷/۵۵ و ۱۹/۵۴ کیلوگرم بر ساعت خواهد بود.

شکل ۷، میزان حرارت تولیدی در کندانسور در دو روز انتخابی برای کسرهای مختلف جرمی سیالات R152a، R1234yf و R600a را نشان می‌دهد. شکل ۸، نشان می‌دهد که می‌توان برای یک مقدار مشخص از حرارت تولیدی در کندانسور، الگوهای مختلفی از مخلوط سه جزئی را انتخاب کرد. توجه شود که انتخاب هر یک از این الگوها اگرچه حرارت تولیدی یکسانی ایجاد می‌کند ولی باعث می‌شود که توان و آب شیرین متفاوتی ایجاد کند. به‌عنوان نمونه برای اینکه حرارت تولیدی در روزهای ۴ تیر و ۴ دی به ترتیب در مقادیر ۱۷۷۴۸/۱ و ۱۲۵۸۵/۴ وات ثابت باشد می‌توان از کسرهای جرمی ۰/۰۴۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵۸ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a و نیز کسرهای جرمی ۰/۴۹۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۳۵ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a برای استفاده کرد. ملاحظه می‌شود که اگر از ترکیب ۰/۰۴۵، ۰/۳۷۵ و ۰/۵۸ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۳۸ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۲۷۵/۴ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۴۱ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۹۰۴/۳ وات خواهد بود. در صورتی که اگر از ترکیب ۰/۴۹۵، ۰/۲۷ و ۰/۲۳۵ استفاده شود، در روز ۴ تیر، مقدار آب شیرین ۲۷/۰۹ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۴۶۶/۷ وات و در روز ۴ دی، مقدار آب شیرین ۱۹/۲۱ کیلوگرم بر ساعت و توان تولیدی ۱۰۳۹/۹ وات می‌باشد. از مقایسه

- 1 Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)
- 2 Crossover
- 3 Mutation
- 4 Tournament





شکل ۸. نمودار جبهه پرتو چرخه تولید همزمان، برای توان، آب شیرین و حرارت در روزهای (الف) ۴ تیر (۲۵ ژوئن) و (ب) ۴ دی (۲۵ دسامبر)

Fig. 8. Pareto front diagram of the tri-generation cycle, for power, fresh water and heat at (a) 25 June and (b) 25 December

گرمایشی برای هر کدام از سیالات  $R_{152a}$ ،  $R_{1234yf}$  و  $R_{600a}$  و مخلوط سه‌جزئی انتخاب‌شده در جدول ۹، برای دو روز ۴ تیر و ۴ دی نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود برای هر دو روز انتخابی، سیال  $R_{152a}$  بیشترین توان خالص، سیال  $R_{1234yf}$  بیشترین حرارت کندانسور و سیال  $R_{600a}$  بیشترین آب شیرین تولیدی را خواهند داشت.

سیال  $R_{152a}$ ، نسبت به مخلوط سه‌جزئی توان بیشتری تولید می‌کند ولی به دلیل اینکه هم آب شیرین و حرارت کمتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی خواهد داشت و هم دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی پایینی دارد (کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، لذا استفاده از این سیال به تنهایی برای شرایط ذکر شده مناسب نخواهد بود.

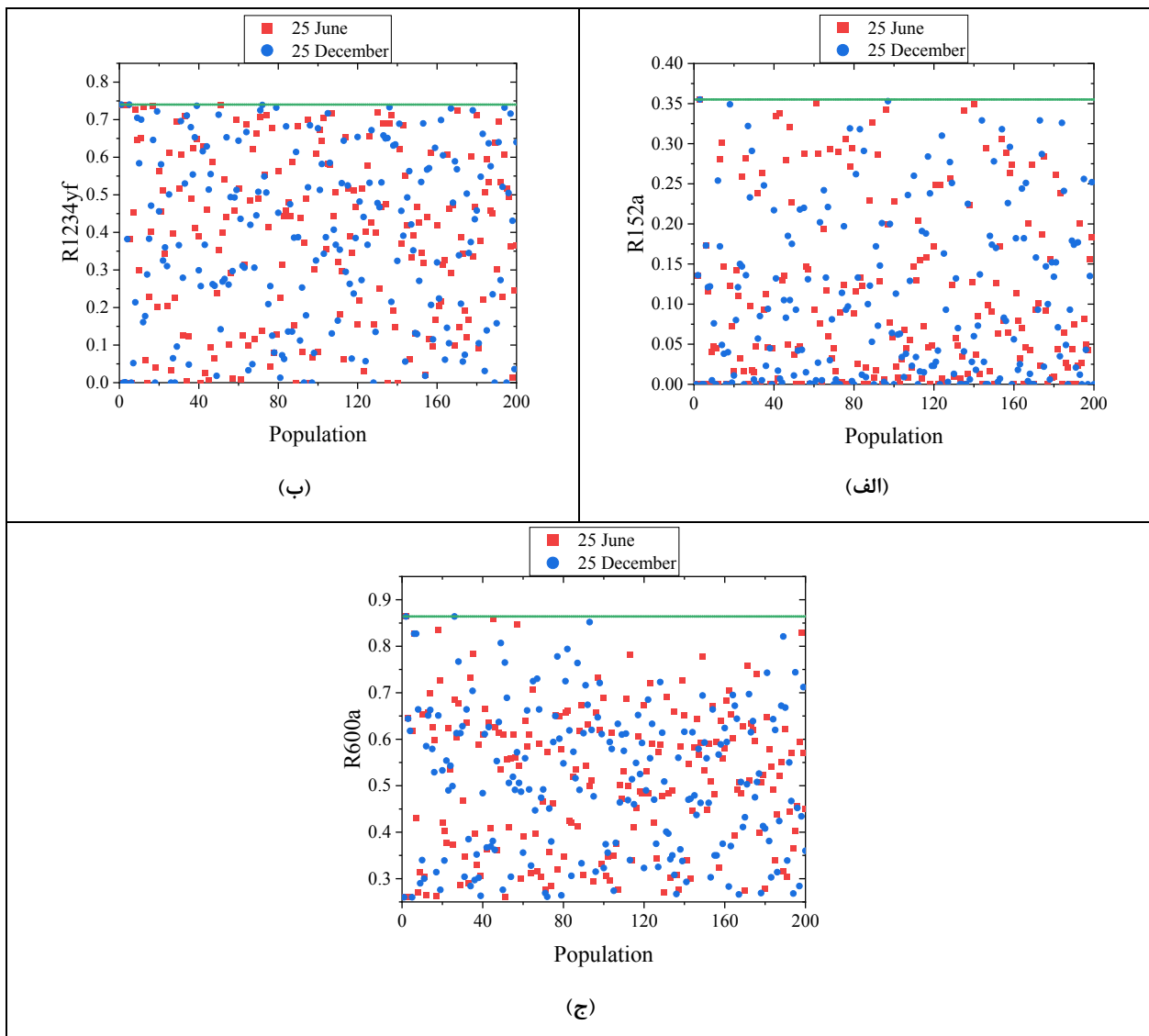
سیال  $R_{1234yf}$  نیز اگرچه توان و حرارت بیشتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی تولید می‌کند ولی چون هم آب شیرین کمتری نسبت به مخلوط سه‌جزئی داشته و هم نمی‌تواند دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی را تأمین کند (دمای آن کمتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد)، نباید از این سیال به تنهایی برای تأمین شرایط مورد نظر استفاده کرد. سیال  $R_{600a}$ ، آب شیرین

استفاده شود، همچنین کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال  $R_{600a}$ ، بین ۰/۲۵ تا ۰/۸۶۵ خواهد بود.

انتخاب نقاط از نمودار جبهه پرتو (شکل‌های ۸-الف و ۸-ب)، سناریوهای ( $S_1$  و  $S_2$ ،  $S_3$ ) بر این اساس بوده که در تابستان، تولید توان و آب شیرین مهم‌تر از حرارت تولیدی کندانسور می‌باشد، در حالی که برای زمستان توان و حرارت تولیدی در کندانسور اهمیت بیشتری نسبت به آب شیرین دارد. سه سناریو ( $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$ ) در دو روز ۴ تیر و ۴ دی (۲۵ ژوئن و ۲۵ دسامبر) مطابق جدول ۸، در نظر گرفته شده است.

به‌عنوان نمونه سناریوی  $S_2$  در نظر گرفته شده و نمودار دما - آنترپی در شکل ۱۰، برای آن‌ها رسم شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برای روز ۴ تیر، مخلوط سه‌جزئی تقریباً رفتار سیال آیزتروپیک، در صورتی که برای روز ۴ دی، مخلوط سه‌جزئی تقریباً رفتار سیال خشک را خواهد داشت. در شکل ۱۰، نشان داده شده است که برای بهره‌برداری بیشتر از چرخه، دمای مادون سرد در فشار کندانسور تا دمای نقطه ۹ و در فشار واحد گرمایش فرآیند تا نقطه ۱۸ پایین می‌آید.

میزان توابع هدف، راندمان کلی و دمای آب ورودی به سیستم



شکل ۹. توزیع کسرهای جرمی بهینه برای سیال R152a (الف)، سیال R1234yf (ب)، سیال R600a (ج) در مخلوط سه‌جزئی در دو روز انتخابی

Fig. 9. Distribution of optimal mass fractions for R152a (a), R1234yf (b), R600a (c) in a three-component mixture in two selected days

سه‌جزئی استفاده کرد. به‌عنوان نمونه از مخلوط سه‌جزئی ارائه‌شده در جدول ۱۰، برای دو روز ۴ تیر و ۴ دی می‌توان استفاده کرد. نتایج نشان داد که در روز ۴ تیر، مقدار تولید توان، آب شیرین، حرارت و راندمان کلی چرخه به ترتیب  $۱۳۲۵/۳$  وات،  $۲۷/۳۷$  کیلوگرم بر ساعت،  $۱۷۶۹۸$  وات و  $۶۶/۷۵$  درصد بوده که در این حالت، کسرهای جرمی در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R152a، R1234yf و R600a، به ترتیب  $۰/۲$ ،  $۰/۰۶۸$  و  $۰/۷۳۲$  می‌باشد. در روز ۴ دی، برای کسرهای جرمی  $۰/۱۰۵$ ،  $۰/۵۱۴$  و  $۰/۳۸۱$  در مخلوط سه‌جزئی برای سیالات R152a، R1234yf و R600a، مقدار

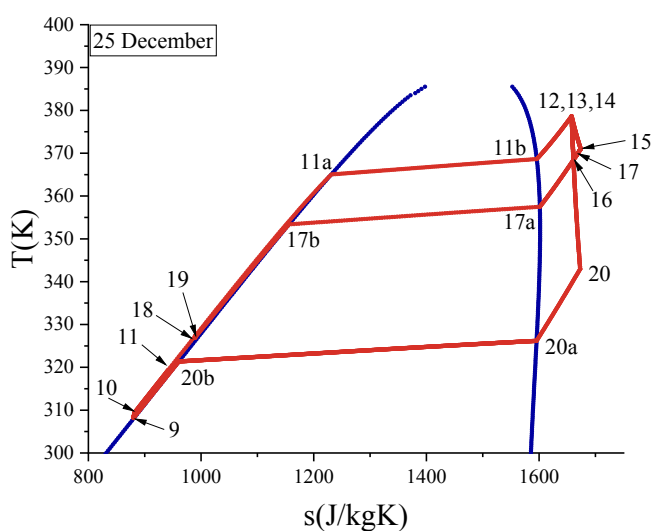
تولیدی بالاتری در مقایسه با مخلوط سه‌جزئی دارد، اما به این دلیل که هم کمترین توان را در مقایسه با سیالات دیگر و مخلوط سه‌جزئی داشته و هم دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی، (حدود  $۶۶$  درجه) بیشتر از حد طراحی بوده (می‌توان از حرارت دما بالای آن، توان تولید کرد)، لذا استفاده از این سیال به تنهایی توصیه نمی‌شود.

همانطور که مشاهده شد استفاده از هیچ‌کدام از سیالات انتخابی به تنهایی نتوانست شرایط مناسب برای چرخه مورد نظر را تأمین کند. لذا برای دستیابی به هر سه هدف توان، آب شیرین و حرارت بهتر است از مخلوط

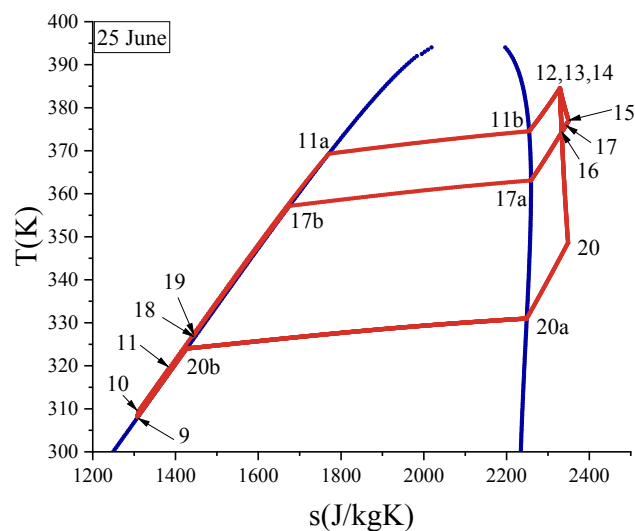
جدول ۸. نقاط بهینه برای سه سناریوی در نظر گرفته شده دو روز انتخابی

Table 8. Optimal points for the three scenarios considered for the two selected days

قید	توابع هدف			متغیرهای تصمیم‌گیری			سناریو	روز
	$T_{22}$ (K)	$\dot{Q}_{Cond}$ (W)	$\dot{m}_{dis}$ (kg/h)	$\dot{W}_{Net}$ (W)	$mf_{R600a}$	$mf_{R1234yf}$		
	۳۳۲/۷	۱۷۶۸۹/۹	۲۷/۴۴	۱۲۸۹/۹	۰/۸۴۷	۰/۰۱	۰/۱۴۳	S1
	۳۲۹	۱۷۶۹۸/۴	۲۷/۳۸	۱۳۲۵/۳	۰/۷۳۲	۰/۰۶۸	۰/۲	S2
	۳۲۵/۵	۱۷۷۰۵/۲	۲۷/۳۱	۱۳۶۰/۱	۰/۶۴	۰/۰۹۶	۰/۲۶۴	S3
	۳۲۳/۷	۱۲۶۱۴/۹	۱۹/۳۲	۹۴۰/۱	۰/۳۸۵	۰/۵۳	۰/۰۸۵	S1
	۳۲۳/۴	۱۲۶۱۳/۳	۱۹/۳۱	۹۴۷/۲	۰/۳۸۱	۰/۵۱۴	۰/۱۰۵	S2
	۳۲۳/۵	۱۲۶۰۵/۶	۱۹/۳۱	۹۵۳	۰/۴۰۱	۰/۴۶۷	۰/۱۳۲	S3



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. نمودار دما-انتروپی نقاط مختلف چرخه و مخلوط سه جزئی برای سناریوی دوم برای دو روز انتخابی

Fig. 10. Temperature-entropy diagram of different points of the cycle and three-component mixture for the second scenario for two selected days

جدول ۹. مقایسه مقدار توابع هدف، راندمان کلی و دمای آب ورودی به سیستم گرمایشی برای سیالات خالص و مخلوط سه جزئی بهینه شده در دو روز ۴ تیر و ۴ دی

**Table 9. Comparison between the desired outputs, overall energy efficiency and temperature of water heating system for pure fluids and the optimized three-component mixture at 25 June and 25 December**

$T_{22}$ (K)	$\eta_{Overall}$ (%)	$\dot{Q}_{Cond}$ (W)	$\dot{m}_{dis}$ (kg/h)	$\dot{W}_{Net}$ (W)	سیال	روز
۳۱۲/۱	۶۶/۷۴	۱۷۵۶۸	۲۷/۳۴	۱۴۷۱/۲	R152a	۴ تیر (25 June)
۳۰۸/۶	۶۶/۸	۱۸۰۷۶	۲۶/۷۳	۱۴۰۷/۲	R1234yf	
۳۳۹/۱	۶۶/۷۵	۱۷۶۹۳	۲۷/۵۵	۱۲۱۳	R600a	
۳۲۹/۰۵	۶۶/۷۵	۱۷۶۹۸	۲۷/۳۷	۱۳۲۵/۳	R152a/R1234yf/R600a (0.2/0.068/0.732)	
۳۱۲/۱	۶۵/۲۹	۱۲۴۵۶	۱۹/۳۹	۱۰۴۳/۱	R152a	۴ دی (25 December)
۳۰۸/۶	۶۵/۳۶	۱۲۸۱۶	۱۸/۹۵	۹۹۷/۷	R1234yf	
۳۳۹/۱	۶۵/۳	۱۲۵۴۵	۱۹/۵۴	۸۶۰	R600a	
۳۲۳/۷۵	۶۵/۳۲	۱۲۶۱۳	۱۹/۳۱	۹۴۷/۲	R152a/R1234yf/R600a (0.105/0.514/0.381)	

هدفه و توابع هدف توان، آب شیرین و حرارت و با لحاظ کسر جرمی سیالات R152a، R1234yf و R600a بین ۰ و ۱ بعنوان متغیرها انجام شده است. و نتایج حاصله بصورت تیتروار به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- برای یک مقدار ثابت از توابع هدف (مثلاً توان)، می‌توان الگوهای مختلفی از کسرهای جرمی در مخلوط سه جزئی را انتخاب کرد. انتخاب هر یک از این الگوها باعث می‌شود که سایر توابع هدف (آب شیرین و حرارت) تولید متفاوتی داشته باشند و براساس میزان تقاضا باید تصمیم‌گیری شود که کدام مخلوط انتخاب شود.

- اگر هدف تنها تولید آب شیرین باشد، بهتر است از سیال R600a استفاده کرد در صورتی که اگر فقط حرارت تولیدی مد نظر باشد، بهتر است سیال R1234yf مورد استفاده قرار گیرد. همچنین اگر صرفاً توان تولیدی مد نظر باشد، مناسب است از کسرهای جرمی ۰/۸۱۵، ۰ و ۰/۱۸۵ به ترتیب برای سیالات R152a، R1234yf و R600a برای هر دو روز انتخابی استفاده کرد. (سیال R1234yf تأثیری نخواهد داشت).

- با توجه به اینکه استفاده از سیالات R152a و R1234yf و R600a به تنهایی نمی‌توانند شرایط مطلوب را برای هر سه توان، آب شیرین و حرارت (طوری که دمای ورودی به سیستم گرمایشی بین ۳۳۳/۱۵ تا ۳۳۳/۱۵ کلونین باشد) را تأمین کنند، لذا استفاده از این سیالات به تنهایی

تولید توان، آب شیرین، حرارت و راندمان کلی چرخه به ترتیب ۹۴۷/۲ وات، ۱۹/۳۱ کیلوگرم بر ساعت، ۱۲۶۱۳ وات و ۶۵/۳۲ درصد می‌باشد. نتایج این جدول همچنین نشان می‌دهد که برای هر دو روز انتخابی، راندمان کلی چرخه برای سیالات R152a، R1234yf و R600a و نیز مخلوط سه جزئی، تفاوت چندانی ندارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

چرخه رنگین آلی برای تولید همزمان توان، آب شیرین و حرارت با بهره‌گیری از کلکتورهای خورشیدی سهموی شبیه‌سازی عددی شده است. با توجه به اهمیت رفتار ترمودینامیکی سیال عامل در عملکرد این چرخه، سه سیال تر R152a، خشک R600a و آیزنتروپیک R1234yf که پتانسیل تخریب لایه اوزون و گرمایش جهانی پایینی دارند در نظر گرفته شده است. با توجه به رفتار عملکردی متفاوت هر یک از خروجی‌های مورد نظر این چرخه همزمان، لذا جهت بهره‌مندی از خواص ترمودینامیکی هر سه این سیالات، مخلوط سه جزئی R152a/R1234yf/R600a با کسرهای جرمی مختلف در عملکرد این چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به ترکیب مناسب ابتدا یک مطالعه‌ی پارامتری و سپس برای رسیدن به شرایط مطلوب، یک بهینه‌سازی چندهدفه با روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب چند

وزن مولکولی (kg/kmol)	$M$	برای چرخه مناسب نخواهند بود و بهتر است از مخلوط سه جزئی استفاده شود.
نرخ جریان جرمی (kg/s)	$\dot{m}$	
کسر جرمی	$mf$	
عدد ناسلت متوسط	$Nu$	• نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد برای برآورده کردن شرایط مطلوب و قید مورد نظر (دمای $T_{rr}$ بین $323/15$ تا $333/15$ کلوین)، کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال R152a، بین ۰ تا ۰/۳۵۵ بوده، در صورتی که برای سیال R1234yf، باید از کسرهای جرمی ۰ تا ۰/۷۴ استفاده شود، همچنین کسرهای جرمی مورد قبول برای سیال R600a، نیز بین ۰/۲۵ تا ۰/۸۶۵ خواهد بود.
فشار (kPa)	$P$	
عدد پرانتل	$Pr$	
نرخ انتقال حرارت (W)	$\dot{Q}$	• مشاهده شد که برای اینکه چرخه از توان، آب شیرین و حرارت مناسبی برخوردار باشد، باید از مخلوط‌های سه جزئی استفاده کرد، که کسرهای جرمی مورد قبول برای این مخلوط‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.
عدد رینولدز	$Re$	
دما (K)	$T$	
سرعت باد (m/s)	$V$	
عرض کلکتور (m)	$W$	
نرخ توان (W)	$\dot{W}$	
نسبت جریان جرمی	$x$	

#### علائم یونانی

جذب کنندگی	$\alpha$	• با توجه به نیاز کاربر سناریوهای بهینه مشخص می‌گردد. بعنوان نمونه در سناریوی انتخابی در این تحقیق، در روز ۴ تیر، برای کسرهای جرمی ۰/۲، ۰/۰۶۸ و ۰/۷۳۲ در مخلوط سه جزئی برای سیالات R152a، R1234yf و R600a، مقدار توان خالص تولیدی، دبی آب شیرین تولیدی، حرارت تولیدی در کندانسور و راندمان کلی چرخه به ترتیب ۱۳۲۵/۳ وات، ۲۷/۳۷ کیلوگرم بر ساعت، ۱۷۶۹۸ وات و ۶۶/۷۵ درصد می‌باشد. در صورتی که در روز ۴ دی، این مقادیر به ترتیب ۹۴۷/۲ وات، ۱۹/۳۱ کیلوگرم بر ساعت، ۱۲۶۱۳ وات و ۶۵/۳۲ درصد بوده که در این حالت کسرهای جرمی در مخلوط سه جزئی برای سیالات R152a، R1234yf و R600a، به ترتیب ۰/۱۰۵، ۰/۵۱۴ و ۰/۳۸۱ می‌باشد.
زاویه شیب	$\beta$	
زاویه شیب بهینه	$\beta_{opt}$	
ضریب دریافت کلکتور	$\gamma$	
ضریب تأثیر	$\epsilon$	
ضریب انتشار پوشش	$\epsilon_c$	
ضریب انتشار جاذب	$\epsilon_r$	
راندمان	$\eta$	
ضریب انعکاس	$\rho_c$	
ثابت استفان-بولتزمان ( $5/67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )	$\sigma$	
ضریب عبور پوشش	$\tau$	

#### زیرنویس

دهانه	$a$
جذب شده	$abs$
محیط	$amb$
دیگ	$Boil$
پوشش داخلی	$ci$
پوشش خارجی	$co$
بحرانی	$crit$
چگالنده	$Cond$
نمک‌زدایی	$D$
تقطیر شده	$dis$
توربین	$Tur$
ژنراتور	$gen$
آیزنتروپیک	$is$
اتلافات	$loss$
مکانیکی	$mec$
خالص	$Net$
روغن حرارتی	$oil$
نوری، بهینه	$opt$

#### ۷- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

$A$	مساحت، $m^2$
$C$	نسبت تمرکز
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
$D$	قطر (m)
$F$	فاصله کانونی کلکتور (m)
$\dot{G}_{b\beta}$	تابش خورشیدی ( $\beta_{opt}$ ) ( $W/m^2$ )
$h$	انتالپی (J/kg)
$h_{fg}$	انتالپی تبخیر (J/kg)
$h_{oil}$	ضریب انتقال حرارت بین روغن و کلکتور ( $W/m^2K$ )
$h_{out}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش و محیط ( $W/m^2K$ )
$k$	هدایت حرارتی (W/mK)
$K(\theta)$	اصلاح زاویه برخورد
$L$	طول کلکتور (m)

- organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery, *Energy*. 82 (2015) 256–268.
- [7] Z. Kang, J. Zhu, X. Lu, T. Li, X. Wu, Parametric optimization and performance analysis of zeotropic mixtures for an organic Rankine cycle driven by low-medium temperature geothermal fluids, *Applied Thermal Engineering*. 89 (2015) 323–331.
- [8] Y. Zhou, Y. Wu, F. Li, L. Yu, Performance analysis of zeotropic mixtures for the dual-loop system combined with internal combustion engine, *Energy Conversion and Management*. 118 (2016) 406–414.
- [9] K. Satanphol, W. Pridasawas, B. Suphanit, A study on optimal composition of zeotropic working fluid in an Organic Rankine Cycle (ORC) for low grade heat recovery, *Energy*. 123 (2017) 326–339.
- [10] M. Sadeghi, M. Yari, S.M.S. Mahmoudi, M. Jafari, Thermodynamic analysis and optimization of a novel combined power and ejector refrigeration cycle – Desalination system, *Applied Energy*. 208 (2017) 239–251.
- [11] M. Wang, R. Jing, H. Zhang, C. Meng, N. Li, Y. Zhao, An innovative Organic Rankine Cycle (ORC) based Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system with performance simulation and multi-objective optimization, *Applied Thermal Engineering*. 145 (2018) 743–754.
- [12] X. Wang, E.K. Levy, C. Pan, C.E. Romero, A. Banerjee, C. Rubio-maya, L. Pan, Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO<sub>2</sub> from a geothermal reservoir, *Applied Thermal Engineering*. 149 (2019) 1287–1304.
- [13] M. Yang, Optimum composition ratios of multicomponent mixtures of organic Rankine cycle for engine waste heat recovery, *International Journal of Energy Research*. 44 (2020) 1012–1030.
- [14] S. Wang, C. Liu, Q. Li, L. Liu, E. Huo, C. Zhang, Selection principle of working fluid for organic Rankine cycle based on environmental benefits and economic

کلی	<i>Overall</i>
سیال کاری آلی	<i>OWF</i>
واحد گرمایش فرآیند	<i>PH</i>
پمپ ۱	<i>pump<sub>1</sub></i>
پمپ ۲	<i>pump<sub>2</sub></i>
قسمت داخلی جاذب	<i>ri</i>
قسمت خارجی جاذب	<i>ro</i>
خورشید	<i>S</i>
اشباع	<i>Sat</i>
مفید	<i>u</i>
آب	<i>W</i>
باد	<i>wind</i>
حالت سیستم	۱, ۲, ۳, ...

## منابع

- [1] A.I. Papadopoulos, M. Stijepovic, P. Linke, On the systematic design and selection of optimal working fluids for Organic Rankine Cycles, *Applied Thermal Engineering*. 30 (2010) 760–769.
- [2] B.F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*. 29 (2009) 2468–2476.
- [3] D. Maraver, J. Uche, J. Royo, Assessment of high temperature organic Rankine cycle engine for polygeneration with MED desalination : A preliminary approach, *Energy Conversion and Management*. 53 (2012) 108–117.
- [4] G. Shu, L. Liu, H. Tian, H. Wei, G. Yu, Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery, *Applied Energy*. 113 (2014) 1188–1198.
- [5] M. Yang, R. Yeh, Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system, *Energy Conversion and Management*. 88 (2014) 999–1010.
- [6] M. Yang, R. Yeh, Thermo-economic optimization of an

- [22] G. Bamorovat Abadi, K.C. Kim, Investigation of organic Rankine cycles with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 73 (2017) 1000–1013.
- [23] F. Heberle, M. Preißinger, D. Brüggemann, Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources, *Renewable Energy*. 37 (2012) 364–370.
- [24] M. Chys, M. van den Broek, B. Vanslambrouck, M. De Paepe, Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles, *Energy*. 44 (2012) 623–632.
- [25] E. Dudley, J. Kolb, A. Mahoney, T. Mancini, S. M. D. Kearney, Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector, Sandia National Laboratory., New Mexico, US, 1994. Report: SAND94- 1884.
- [26] Y. Ding, C. Liu, C. Zhang, X. Xu, Q. Li, L. Mao, Exergoenvironmental model of Organic Rankine Cycle system including the manufacture and leakage of working fluid, *Energy*. 145 (2018) 52–64.
- [27] C. Zhang, C. Liu, X. Xu, Q. Li, S. Wang, Energetic, exergetic, economic and environmental (4E) analysis and multi-factor evaluation method of low GWP fluids in trans-critical organic Rankine cycles, *Energy*. 168 (2019) 332–345.
- [28] W. Su, Y. Hwang, S. Deng, L. Zhao, D. Zhao, Thermodynamic performance comparison of Organic Rankine Cycle between zeotropic mixtures and pure fluids under open heat source, *Energy Conversion and Management*. 165 (2018) 720–737.
- [29] <https://data.irimo.ir>.
- [30] H. Moghadam, F.F. Tabrizi, A.Z. Sharak, Optimization of solar flat collector inclination, *Desalination*. 265 (2011) 107–111.
- performance, *Applied Thermal Engineering*. 178 (2020) 115598.
- [15] S. Georgousopoulos, K. Braimakis, D. Grimekis, S. Karellas, Thermodynamic and techno-economic assessment of pure and zeotropic fluid ORCs for waste heat recovery in a biomass IGCC plant, *Applied Thermal Engineering Journal*. 183 (2021) 116202.
- [16] I. Fakhari, A. Behzadi, E. Gholamian, P. Ahmadi, A. Arabkoohsar, Comparative double and integer optimization of low-grade heat recovery from PEM fuel cells employing an organic Rankine cycle with zeotropic mixtures, *Energy Conversion and Management*. 228 (2021) 113695.
- [17] E. Bellos, C. Tzivanidis, Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance, *Designs*. 2 (2018) 9.
- [18] A.M. Pantaleo, S.M. Camporeale, A. Sorrentino, A. Miliozzi, N. Shah, C.N. Markides, Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas, *Renewable Energy*. 147 (2020) 2913–2931.
- [19] I.W. Eames, G.G. Maidment, A.K. Lalzad, A theoretical and experimental investigation of a small-scale solar-powered barometric desalination system, *Applied Thermal Engineering*. 27 (2007) 1951–1959.
- [20] H.E. Bekiloğlu, H. Bedir, G. Anlaş, Multi-objective optimization of ORC parameters and selection of working fluid using preliminary radial inflow turbine design, *Energy Conversion and Management*. 183 (2019) 833–847.
- [21] E.W. Lemmon, M.L. Huber, M.O. McLinden, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP, NIST Standard Reference Database 23 NIST. V9.1 (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Rahmdel, A. Behzadmehr, H. Farzaneh, F. Sarhaddi, Multiobjective Optimization of a Tri-Generation Organic Rankine Cycle for Power, Freshwater and Heat: Suitable Mixture of Three Fluid, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1125-1148.*

**DOI:** [10.22060/mej.2022.20369.7217](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20369.7217)

