نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، ص: ۱- ۱۶

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 1, 2022: 1-16

DOR: xx.xxxx.x.xxxxxxxx.xxxx.x.x.x.x

آنالیز انرژی و اگزرژی سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، سیکل تولید توان رانکین آلی، سرمایش جذبی و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی

حسین اخوتی [۱]، سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب [۲و*] و ابراهیم جهانشاهی جواران [۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران، sohasamaneh@yahoo.com
*۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران، ganj110@uk.ac.ir
۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران، e.jahanshahi@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

چکیده

در پژوهش حاضر، آنالیز انرژی و اگزرژی یک سیستم ترکیبی شامل ماژول فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، سیکل رانکین آلی، سرمایش جذبی تک اثره آب/ لیتیم - بروماید و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی در حالت گذرا انجام می‌پذیرد. تحلیل‌های انرژی و اگزرژی سیستم ترکیبی توسط برنامه رایانه‌ای نوشته شده در نرم افزار EES صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که توان الکتریکی تولیدی سالانه ماژول‌های فتوولتائیک متمرکز کننده حرارتی و سیکل رانکین آلی به ترتیب ۸۱/۷۴ MWh و ۱۳/۸۴ MWh می‌باشند. علاوه بر این، توان سرمایش سیکل تبرید ۳۲/۹۱ MWh و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی با نرخ ۰/۳۰۲۵ $kg/s.m^2$ آب شیرین تولید می‌کند. میزان اگزرژی تخریب شده سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده و سیکل رانکین آلی به ترتیب ۳۵/۳۶ MWh و ۱۱/۴۳ MWh می‌باشد. مقدار بازده اگزرژی سیکل سرمایش جذبی ٪۱۷/۵۷ و همچنین، در آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی میزان اگزرژی تخریب‌شده کل ۶/۳۲ MWh می‌باشد. ضمناً، نتایج بدست آمده، راندمان حرارتی و راندمان اگزرژی برای سیستم ترکیبی را معادل ٪۷۵ و ٪۷۲/۹۳ پیش‌بینی می‌نماید.

* **عهده‌دار مکاتبات:** ganj110@uk.ac.ir

کلمات کلیدی: فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، رانکین آلی، تبرید جذبی، تقطیر غشایی، اگزرژی

۱- مقدمه

مصرف انرژی به سبب افزایش جمعیت، گسترش شهرها و بهبود کیفیت زندگی در حال افزایش است. از سوی دیگر، مصرف سریع انرژی، منجر به انتشار کنترل نشده دی‌اکسید کربن و گازهای گلخانه‌ای دیگر و همچنین گرم شدن کره‌ی زمین شده است. علاوه بر این، بحران آب در کنار بحران انرژی یکی از معضلات پیش روی بشر در قرن اخیر می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و بحران آب، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش پیدا کرده که در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین کاربردهای انرژی خورشیدی، تبدیل آن به انرژی الکتریکی با استفاده از سلولهای فتوولتائیک می‌باشد. در بین تکنولوژی‌های مختلف

نحوه استناد به این مقاله: حسین اخوتی، سیدعبدالرضا گنجعلیخان‌نسب و ابراهیم جهانشاهی جواران. آنالیز انرژی و اگزرژی سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، سیکل تولید توان رانکین آلی، سرمایش جذبی و آب شیرین‌کن تقطیر غشایی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۱) : ۱-۱۶.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

سلولهای فتوولتائیک، امروزه سلول‌های فتوولتائیک متمرکز کننده توجه بسیاری از شرکت‌های بزرگ در زمینه فتوولتائیک را به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سلول‌های فتوولتائیک معمولی معطوف خود کرده است.

افزایش دمای سیستم‌های فتوولتائیک کارایی عملکرد آنها را کاهش می‌دهد و از این‌رو دفع حرارت از سیستم‌های فتوولتائیک جهت افزایش راندمان آنها امری مطلوب است. با توجه به توان حرارتی بالای تولیدی در این سیستم‌ها به واسطه تمرکز تابش روی سلول‌های فتوولتاییک، استفاده از حرارت اتلافی ماژول‌های فتوولتائیک برای تولید آب گرم، تولید توان با استفاده از سیکل رانکین آلی، تولید آب شیرین با استفاده از آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی، تولید سرمایش با استفاده از سیستم تبرید جذبی و همچنین گرمایش مورد توجه قرار گرفته است. ترکیب سیستم‌های فتوولتائیک با سیکل رانکین آلی، ضمن کاهش دمای عملکرد سیستم فتوولتائیک، منجر به تولید برق اضافی نیز می‌شود. در این سیستم ترکیبی، یک درجه حرارت مطلوب وجود دارد که در آن کل برق تولید شده توسط سیستم ترکیبی حداکثر می‌باشد. در مطالعه‌ی انجام شده توسط ملتمس و روشندل[۱]، یک سیستم ترکیبی و اصلاح شده فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی/سیکل رانکین آلی شبیه‌سازی و دمای کارایی سیستم فتوولتائیک برای بازده‌های مختلف این سیستم تعیین شد. این تحقیق نشان داد که افزایش کارایی اسمی سیستم فتوولتائیک منجر به انتخاب دمای پایین تر برای دمای بهینه‌ی آن می‌شود.

رهبر و همکاران [۲]، از یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکز کننده حرارتی مبتنی بر نانوسیال همراه با سیکل ارگانیک رانکین آلی جهت بازیابی حرارت و همچنین از سیال عامل R1233z در سیکل ارگانیک رانکین آلی استفاده نمودند. در این مطالعه‌ی سیستم ترکیبی مذکور را با سیستم ترکیبی متمرکزکننده حرارتی مبتنی بر سیال عامل آب مقایسه نمودند و متوجه شدند که بازده الکتریکی، گرمایی و بازده کل به ترتیب ۱٫۸٪ و ۳٫۳٪ و ۵٫۱٪ می‌باشد که مقادیر این پارامترها نسبت به سیستم ترکیبی متمرکزکننده با سیال عامل آب افزایش داشته و در مجموع بازده کل نسبت به سیستم ترکیبی متمرکزکننده ۲٫۷۱٪ افزایش داشته است. پاپاداکیس و همکاران[۳]، با شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی همراه با سیکل ارگانیک رانکین[1]، نشان داد که می‌توان با اضافه کردن یک واحد خنک‌کننده در قسمت پشتی فتوولتائیک متمرکزکننده و یا بازیابی این حرارت توسط سیکل ارگانیک رانکین هم بازده سلول را افزایش داد و هم تولید توان مازاد به دست آورد که می‌توان از این توان اضافی تولید شده در ساختمان و یا حتی آب‌شیرین‌کن نیز استفاده کرد. ترکیب سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی، ضمن افزایش راندمان سیستم فتوولتائیک منجر به تولید آب شیرین نیز می‌شود. هوقز و همکاران [۴]، سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی/آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، داده‌های تابش خورشیدی در یک مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفت و دمای خروجی از سیستم انرژی خورشیدی محاسبه شد. در ادامه، ماژول آب‌شیرین‌کن برای یک دمای ورودی نوسانی مورد آزمایش قرار گرفت و حداکثر میزان تقطیر ۳/۴ لیتر بر مترمربع در ساعت گزارش شد. در مطالعه‌ی دیگری، یک سیستم نوین ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده/آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی به منظور تولید همزمان برق و آب شیرین توسط المینشاوی و همکاران [۵]، پیشنهاد شد. نتایج نشان دادند که سیستم ترکیبی قادر است ۸۳٪ از تابش خورشید را به خروجی مفید تبدیل کند و توان تولیدی ماژول فتوولتائیک متمرکزکننده را در مقایسه با با ماژول بدون سیستم خنک‌کاری تا ۲۶/۶٪ بهبود بخشد. در مطالعه‌ی انجام شده توسط هنگ و همکاران [۶]، یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی با ضریب تمرکز پایین/ تبرید جذبی آب-لیتیوم بروماید مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، آزمایش‌هایی برای بررسی تاثیر پارامترهای دمای آب گرم ورودی، دبی جرمی آب‌خنک‌کن و همچنین دبی جرمی آب مبرد روی ضریب عملکرد سیستم تبرید جذبی انجام گرفت و روابطی برای محاسبه‌ی ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش برحسب پارامترهای فوق ارائه شد. بونومانو و همکاران [۷]، یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی جدید از سیستم‌های گرمایش و سرمایش با فتوولتائیک متمرکزکننده و کلکتور صفحه تخت در

[1] Organic Rankine cycle (ORC)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

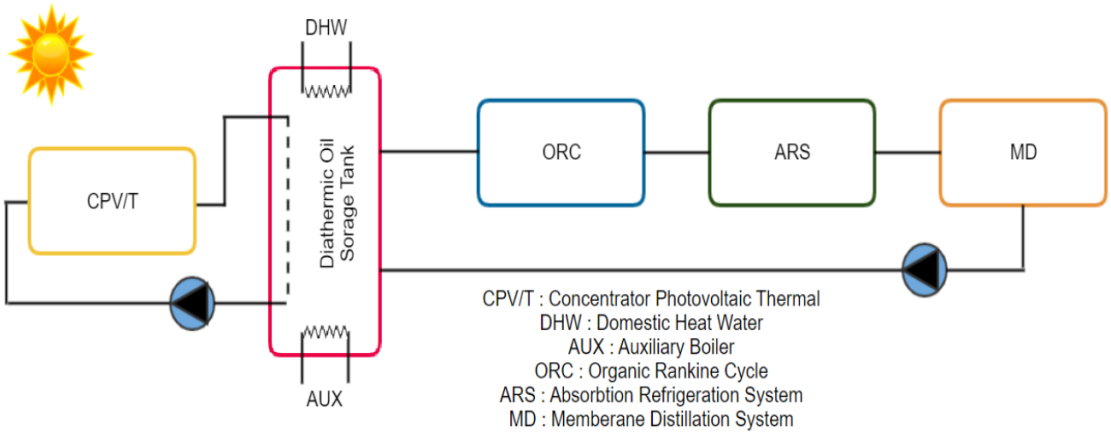
نرم‌افزار Matlab ارائه دادند. آن‌ها به بررسی انرژی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم براساس تکنولوژی‌های چیلرهای جذبی پرداختند. آنالیز مورد مطالعه ساختمان اداری و مسکونی در مناطق مختلف آب و هوایی اروپایی بود.

محمد ربیا و همکاران [۸]، آنالیز حرارتی یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی با ضریب تمرکز بالا/آب-شیرین‌کن تقطیر غشایی را برای تولید همزمان توان و آب شیرین در نواحی ساحلی انجام دادند. نتایج نشان دادند در تابش خورشید با نسبت تمرکز ۱۰۰۰، دبی آب خنک‌کن باید از ۱۵۰ گرم بر دقیقه بیشتر باشد تا دمای ماکزیمم سلول فتولتائیک از ۳۴۹ کلوین تجاوز نکند. در این شرایط، توان الکتریکی و حرارتی تولیدی به ترتیب ۱۷۷ و ۳۰۸ وات می‌باشند. معلمان و همکاران [۹]، به شبیه‌سازی عملکرد سیستم تولید همزمان گرمایش، سرمایش و توان بر پایه‌ی سیستم فتوولتائیک متمرکز-کننده حرارتی با کلکتور فرسنل خطی در نرم افزار ترنسیس پرداختند. در این سیستم تولید سه‌گانه از یک چیلر جذبی آب-لیتیوم برروماید با ظرفیت سرمایش ۵ کیلووات استفاده شد. آنها سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده را با یک سیستم فتولتاییک معمولی مقایسه کردند و این نتیجه حاصل شد که سیستم معمولی نمی‌تواند انرژی حرارتی مورد نیاز برای تولید سرمایش را تامین کند.

با توجه به توان حرارتی تولیدی بالای سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده و همچنین دمای بالای سیال خنک‌کن خروجی از این سیستم، می‌توان این سیستم را برای تولید همزمان توان، سرمایش و آب شیرین استفاده کرد. این موضوع نویسندگان را ترغیب نمود تا آنالیز سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، سیکل تولید توان رانکین آلی، سرمایش جذبی و آب شیرین‌کن تقطیر غشایی را از منظر انرژی و اگزرژی در حالت گذرا انجام داده، مطالعه‌ای که تا کنون صورت نپذیرفته است. در ادامه، سیستم ترکیبی توصیف و معادلات حاکم از دیدگاه انرژی و اگزرژی برای این سیستم ارائه شده است و در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سیستم ارائه می‌شود.

۲- توصیف سیستم

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است سیستم ترکیبی مورد نظر از ماژول فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، تانک ذخیره، سیکل رانکین آلی، سیکل سرمایش جذبی و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی تشکیل شده است. در ادامه به مدل‌سازی قسمت‌های مختلف سیستم ترکیبی پرداخته خواهد شد.



شکل ۱ - شماتیک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده‌ی حرارتی، سیکل رانکین آلی، سیستم تبرید جذبی و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

۳- معادلات حاکم

در این بخش معادلات انرژی و اگزرژی هر یک از قسمت‌های سیستم ترکیبی توصیف شده ارائه می‌شود.

۳-۱- ماژول فتوولتائیک متمرکز کننده/حرارتی

۳-۱-۱- معادلات انرژی

از آنجایی که در پنل‌های فتوولتائیک متمرکز کننده، از سلول‌های چنداتصالی استفاده می‌شود، عملکرد الکتریکی این نوع پنل‌ها تحت تأثیر فاکتوری به نام فاکتور حرارتی قرار دارد که برای محاسبه‌ی این فاکتور از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود که γ بیشینه ضریب دمایی توان در تمرکز کارکردی است که برابر با ۰/۰۰۱۲- است [۱۰]:

$$TF = 1 - \gamma \times (T_C - T_{STC}) \quad (۱)$$

برای محاسبه‌ی دمای سلول‌ها، T_C ، از رابطه‌ی (۲) استفاده می شود که در آن a ضریب ویژه حرارتی متمرکزکننده بوده و برابر با ۰/۰۶ است [۱۰]:

$$T_C = T_a + a * I_{bT} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\mathbf{I_{bT}}$ تابش مستقیم خورشیدی است.
انرژی الکتریکی ایده‌آل تولید شده از هر سلول خورشیدی چنداتصالی از رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است [۱۰]:

$$P_{id} = I_{bT} \times A_{Cell} \times X \times \eta_{Cell} \quad (۳)$$

در این رابطه، η_{Cell} بازدهی سلول در شرایط استاندارد است که توسط رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود و A_{Cell} مساحت هر سلول خورشیدی بر حسب مترمربع بوده و X غلظت موثر است که از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود[۱۱] :

$$\eta_{Cell} = 0.298 + 0.014 \times \mathrm{Ln}\, C + (-0.000715 + 0.0000697 \times \mathrm{Ln}\, C) \times (T_C - 25°C) \quad (۴)$$

$$X = \eta_{Opt} * C \quad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، C ضریب تمرکز هندسی سیستم متمرکز کننده است که از رابطه‌ی ۶ بدست می آید و η_{Opt} بازدهی نوری متمرکز کننده است که از کاتالوگ متمرکزکننده قابل استخراج است. مقدار این پارامتر برابر با ۰/۸۵ می باشد [۱۱] :

$$C = \frac{A_{aperture}}{A_{Cell}} \quad (۶)$$

در رابطه‌ی (۶)، $A_{aperture}$ مساحت دهانه‌ی متمرکز کننده است.
با ترکیب روابط (۱) تا (۶)، انرژی الکتریکی تولیدی از هر سلول به صورت زیر بدست می‌آید [۱۱] :

$$P = I_{bT} \times A_{Cell} \times \eta_{Cell} \times \eta_{Opt} \times C \times TF \times SF \quad (۷)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

برای محاسبه‌ی انرژی واقعی این سیستم می‌بایست توان پمپ، ردیاب و بازدهی اینورتر را نیز از این مقدار کم کرد که به این اتلافات، اتلافات پارازیتی گفته می‌شود و از رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود[۸]:

$$P_{par} = 0.023 \times A_{cell} \times C \times n_{cell} \times I_{bT} \quad (۸)$$

در نهایت، انرژی الکتریکی واقعی را می توان به صورت زیر بدست آورد :

$$P_{real} = P - P_{par} \quad (۹)$$

معادله (۱۰)، انرژی حرارتی ایده‌ال ماژول را برآورد می نماید[۱۱]:

$$Q_{th.id} = \left(1 - \eta_{pv}\right) \times \eta_{opt} \times C \times (I_{bT} \times f) \times A_{cell} \times n_{cell} \quad (۱۰)$$

در فرمول ۱۰ با توجه به سیستم ردیاب غیرایده‌آل، فاکتور f اعمال شده برابر با ۰/۹ است. بازدهی کلی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده (η_{pv}) و ضریب حرارتی توان k_t از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند[۱۱]:

$$\eta_{pv} = \eta_{cell} \times \eta_{mod} \times k_t \quad (۱۱)$$

$$k_t = 1 + \sigma_t \times (T_C - 25) \quad (۱۲)$$

علاوه براین، پرتوهای خورشیدی که به سلول‌های سه‌اتصالی می‌رسند دارای اتلافات حرارتی هستند که این اتلافات طبق رابطه‌ی ۱۳ قابل محاسبه می‌باشند[۱۱] :

$$Q_{th,loss} = [h_c \times (T_c - T_a) + \varepsilon\sigma(T_c^4 - T_a^4)] \times A_{cell} \times n_{cell} \quad (۱۳)$$

که در این رابطه h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشد. حال انرژی حرارتی تولیدی واقعی را می‌توان با رابطه‌ی ۱۴ محاسبه نمود :

$$Q_{th,real} = Q_{th.id} - Q_{th,loss} \quad (۱۴)$$

۳-۱-۲- معادلات اگزرژی

در معادله‌ی ۱۵ اگزرژی تابش خورشیدی آورده شده است[۱۲].

$$EX_{sol} = A_{coll} G \left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_O}{T_{Sun}}\right)^4 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_O}{T_{Sun}}\right)\right] \quad (۱۵)$$

رابطه‌ی (۱۶)، تفاضل اگزرژی جریان خروجی و ورودی کلکتور خورشیدی را نشان می‌دهد.

$$EX_{coll} = \dot{m}_{coll} C \left[(T_{out} - T_{in}) - T_o ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right)\right] \quad (۱۶)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

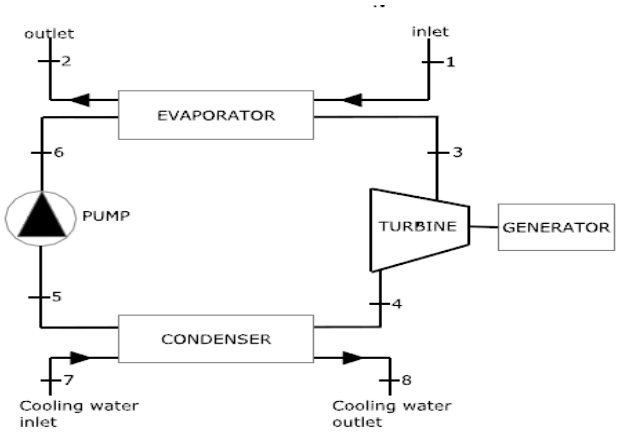
رابطه‌ی (۱۷)، بازده اگزرژی متمرکزکننده خورشیدی را نشان می‌دهد [۱۲].

$$\Psi = \frac{EX_{coll}}{EX_{sol}} \quad (۱۷)$$

۳-۲- سیکل رانکین آلی

۳-۲-۱- معادلات انرژی

شکل (۲) شماتیکی از یک سیکل رانکین آلی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک سیکل رانکین آلی

کار تولیدشده در توربین این سیکل از رابطه‌ی (۲۴) بدست می‌آید [۱۳].

$$\dot{w}_T = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (۱۸)$$

راندمان اگزرژی اواپراتور و کندانسور از تقسیم اگزرژی کسب شده توسط جریان سرد به اگزرژی عرضه شده توسط جریان گرم طبق روابط (۱۹) و (۲۰) قابل محاسبه هستند.

$$\eta_{ev} = \frac{\dot{m}_r(e_2 - e_6)}{\dot{m}_s(e_1 - e_2)} = 1 - \frac{\dot{I}_{ev}}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2} \quad (۱۹)$$

$$\eta_{con} = \frac{\dot{m}_w(e_8 - e_7)}{\dot{m}_r(e_4 - e_5)} = 1 - \frac{\dot{I}_{con}}{\dot{E}_4 - \dot{E}_5} \quad (۲۰)$$

راندمان اگزرژی چرخه از نسبت کار خالص خروجی به اگزرژی کل عرضه شده مطابق با رابطه‌ی (۲۱) محاسبه خواهد شد.

$$\eta_{ex,cyc} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{m}_s[h_1 - h_{2-}T_O(s_1 - s_2)]} \quad (۲۱)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

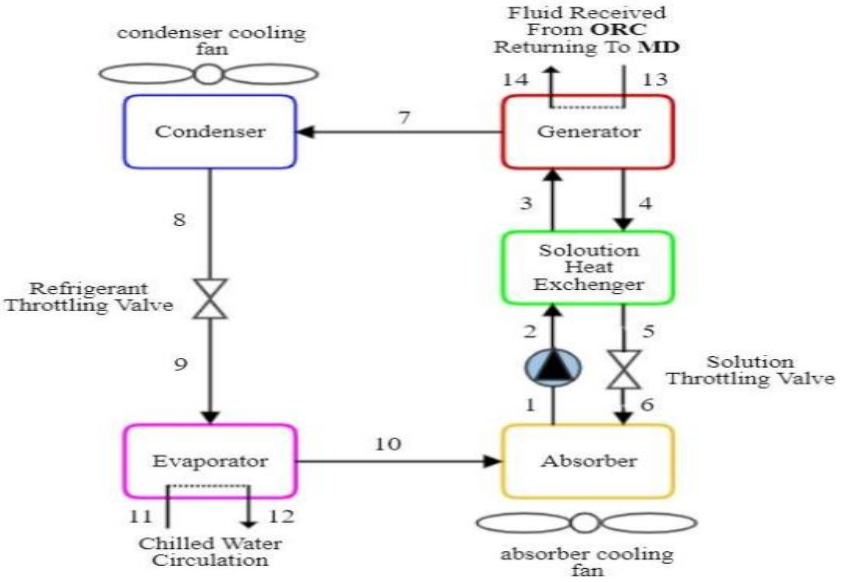
تخریب اگزرژی کل سیستم طبق رابطه‌ی (۲۲) قابل محاسبه بوده و در واقع مجموع تخریب اگزرژی تمام اجزای سیکل است [۱۳].

$$\dot{I}_{cyc} = \dot{I}_{ev} + \dot{I}_{turb} + \dot{I}_{con} + \dot{I}_{pump} \quad (۲۱)$$

۳-۳- سیکل سرمایش جذبی

۳-۳-۱- معادلات انرژی

شکل (۳)، شماتیکی از یک سیستم تبرید جذبی تک‌اثره را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شماتیک سیکل سرمایش جذبی تک اثره

با نوشتن معادله‌ی بقای جرم کل و معادله‌ی بقای جرم لیتیوم برومید در ابزوربر و استفاده از غلظت‌های به دست آمده برای محلول غلیظ و رقیق، دبی جرمی محلول رقیق ورودی و محلول غلیظ خروجی از ابزوربر به دست می‌آید.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad (۲۳)$$

$$\dot{m}_1 X_1 = \dot{m}_6 X_6 \quad (۲۴)$$

در معادله‌ی بالا X_6 نسبت جرمی لیتیوم برومید در محلول غلیظ (محلولی که میزان آب بیشتری دارد) و X_1 نسبت جرمی لیتیوم برومید در محلول رقیق (محلول با میزان آب کمتر) می‌باشد.
با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) دمای نقاط ۳ و۵ به دست می‌آیند.

$$T_3 = T_{abs} + E_L \frac{X_1 C_{p4}}{X_6 C_{p1}} (T_{gen} - T_{abs}) \quad (۲۵)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

$$T_5 = T_{gen} + E_L(T_{gen} - T_{abs}) \quad (۲۶)$$

پس از به دست آوردن آنتالپی مبرد در نقطه‌ی ۷، با استفاده از دما و فشار آن، میزان گرمای تولید شده در کندانسور از رابطه‌ی (۲۷) به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_7(h_7 - h_8) \quad (۲۷)$$

گرمای مورد نیاز ژنراتور نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \quad (۲۸)$$

همچنین، گرمای تولید شده در ابزوربر نیز از رابطه‌ی (۲۹)، به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_1 h_1) \quad (۲۹)$$

با به دست آوردن آنتالپی محلول در نقطه ی۲، توان مورد نیاز پمپ از رابطه‌ی (۳۰)، حاصل می‌شود.

$$W_{pump} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (۳۰)$$

در نهایت ضریب عملکرد چیلر جذبی از رابطه‌ی (۳۱)، محاسبه می‌شود[۱۴].

$$COP = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\dot{Q}_{gen} + W_{pump}} \quad (۳۱)$$

۲-۳-۳- معادلات اگزرژی

در جدول (۱)، معادلات بالانس اگزرژی برای هر یک از قسمت های چیلر جذبی آورده شده است[۱۴].

جدول ۱ - معادلات بالانس اگزرژی اجزاء سیکل سرمایش جذبی

اجزا	معادلات
ژنراتور	$EX_{d_{Ge}} = \dot{E}X_3 + \dot{E}X_{13} - \dot{E}X_4 - \dot{E}X_7 - \dot{E}X_{14}$
اواپراتور	$EX_{d_{\mathrm{Eva}}} = \dot{E}X_9 + \dot{E}X_{11} - \dot{E}X_{10} - \dot{E}X_{12}$
کندانسور	$EX_{d_{Con}} = \dot{E}X_7 - \dot{E}X_8 - Q_{con}(1 - \frac{T_O}{T_{amb}})$
ابزوربر	$EX_{d_{Abs}} = \dot{E}X_6 + \dot{E}X_{10} - \dot{E}X_1 - Q_{Abs}\left(1 - \frac{T_O}{T_{amb}}\right)$
مبدل حرارتی	$EX_{d_{Shx}} = \dot{E}X_4 + \dot{E}X_2 - \dot{E}X_5 - \dot{E}X_3$
پمپ	$EX_{d_P} = \dot{E}X_1 - \dot{E}X_2 + W_{Pump}$
شیر انبساط سیستم تبرید	$EX_{d_{rev.v}} = \dot{E}X_8 - \dot{E}X_9$
شیر فشار شکن	$EX_{d_{sev.v}} = \dot{E}X_5 - \dot{E}X_6$

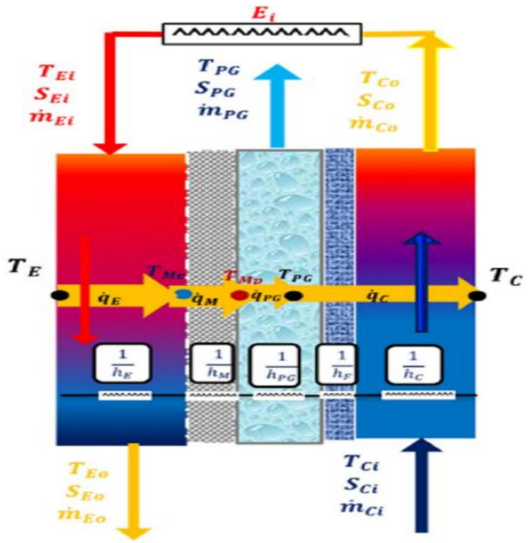
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

۳-۴- آب شیرین‌کن

۳-۴-۱- معادلات انرژی

در این بخش، معادلات آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی ارائه خواهند شد. شکل (۴)، نشان‌دهنده شماتیکی از یک سیستم آب شیرین‌کن تقطیر غشایی می‌باشد.



شکل ۴ - شماتیک سیستم آب شیرین کن تقطیر غشایی

حرارت‌های منتقل شده، مقاومت‌های حرارتی و پارامترهای ورودی و خروجی هر کانال در شکل(۴)، نشان داده شده است.
اولین مقاومت حرارتی، مقاومت حرارتی جابجایی در کانال اواپراتور است. رابطه (۳۲)، انتقال حرارت مربوطه را نشان می‌دهد.

$$\dot{q}_E = h_E\left(\frac{T_{Ei}+T_{Eo}}{2}-T_{Me}\right) \quad (۳۲)$$

که در این رابطه h_E ضریب انتقال حرارت در کانال اواپراتور و T_{Ei}، T_{Eo} و T_{Me} به ترتیب دماهای ورودی اواپراتور، خروجی اواپراتور و دمای سطح غشا در کانال اواپراتور هستند.
در عرض غشا حرارت ($\dot{q}_M$) به دو صورت هدایت و گرمای نهان منتقل می‌شود [۱۵].

$$\dot{q}_M = \frac{k_M}{\delta_M}\left(T_{Me}-T_{Mp}\right)+J_p h_{fg} \quad (۳۳)$$

در این رابطه، h_{fg} آنتالپی تبخیر آب، k_M و δ_M به ترتیب ضریب هدایت و ضخامت غشا هستند. J_p نرخ انتقال جرم آب نفوذی (آب شیرین عبوری از غشا) بر واحد سطح غشا است. همچنین، T_{Mp} دمای سطح غشا در فاصله جریان نفوذی است.
میزان انتقال حرارت در فاصله جریان نفوذی با استفاده از رابطه (۳۴) بدست می‌آید:

$$\dot{q}_{PG} = \frac{1}{\frac{\delta_{PG}}{2k_{PG}}}\left(T_{Mp}-T_{PG}\right) \quad (۳۴)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

در این معادله δ_{PG} ضخامت فاصله جریان نفوذی و k_{PG} ضریب هدایت فاصله جریان نفوذی هستند.
با حل معادلات فوق و محاسبه مقادیر $\dot{q}$، J_p ، T_{Me} ، T_{Mp}، T_{PG} ، T_{Co} و T_{Eo} می‌توان نوشت:

$$\dot{m}_{Eo} = \dot{m}_{Ei} - \dot{m}_{PG} = \dot{m}_{Ei} - J_p A_M \quad (۳۵)$$

$$S_{Eo} = \frac{\dot{m}_{Ei} S_{Ei}}{\dot{m}_{Eo}} \quad (۳۶)$$

در دو رابطه بالا $\dot{m}_{Eo}$ نرخ جرمی سیال در خروجی اواپراتور و $\dot{m}_{PG}$ نیز کل نرخ جرمی آب شیرین نفوذی در فاصله جریان نفوذی می‌باشد. همچنین، A_M مساحت غشا است. S_{Eo} و S_{Ei} نیز به ترتیب درجه شوری آب در ورودی و خروجی کانال اواپراتور هستند.

۳-۴-۲- معادلات اگزرژی

اگزرژی مخلوط آب شور از رابطه زیر بدست می‌آید[۱۶]:

$$EX = (h - h^*) - T_0(s - s^*) + mf_s(\mu^0 - \mu^*) + mf_w(\mu^0 - \mu^*) \quad (۳۷)$$

که در این رابطه mf_s و mf_w به ترتیب به کسر جرم نمک و آب اشاره دارند.
همچنین، میزان اگزرژی تخریب شده را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد[۱۶]:

$$EX_{dist} = \left(m_{in,k} EX_{in,k}\right) - \left(m_{out,k} EX_{out,k}\right) + \left(\left(Q_{loss}\right)\left(1 - \frac{T_0}{T_{e-c}}\right)\right) \quad (۳۸)$$

۴- نتایج و بحث

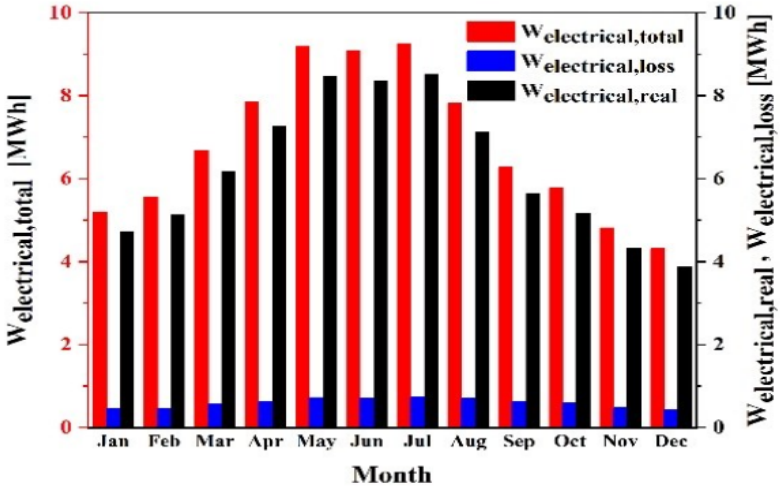
۴-۱- سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده

نتایج میزان الکتریسیته تولیدی، الکتریسیته مصرفی و میزان انرژی الکتریکی مفید به صورت ماهانه در شکل (۵) آورده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان الکتریسیته تولیدی ماهانه بین ۴/۳۱ تا ۹/۲۳ مگاوات ساعت تغییر می‌کند. همچنین، میزان انرژی الکتریکی مفید ماهانه بین ۳/۸۸ تا ۸/۵۱ مگاوات ساعت تغییر می‌کند.

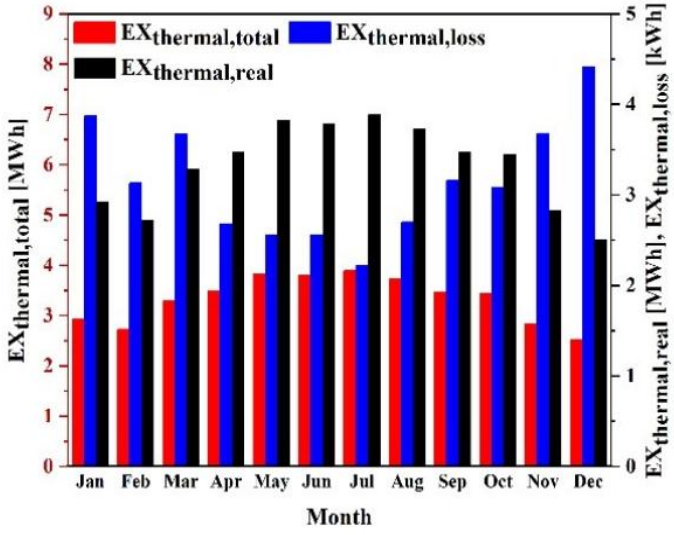
میزان اگزرژی گرمایی، اگزرژی گرمای ازدست رفته و میزان اگزرژی گرمای مفید به صورت ماهانه در شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان اگزرژی گرمایی ماهانه بین ۲/۵۱ تا ۳/۸۸ مگاوات ساعت و میزان اگزرژی گرمای مفید، ماهانه بین ۲/۵ تا ۳/۸۸ مگاوات ساعت تغییر می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]



شکل ۵- میزان الکتریسیته تولیدی، الکتریسیته مصرفی و میزان انرژی الکتریکی مفید ماهانه در شهر کرمان



شکل ۶ - میزان اگزرژی گرمایی، اگزرژی گرمای ازدست رفته و میزان اگزرژی گرمای مفید ماهانه در شهر کرمان

۴-۲- سیکل رانکین آلی

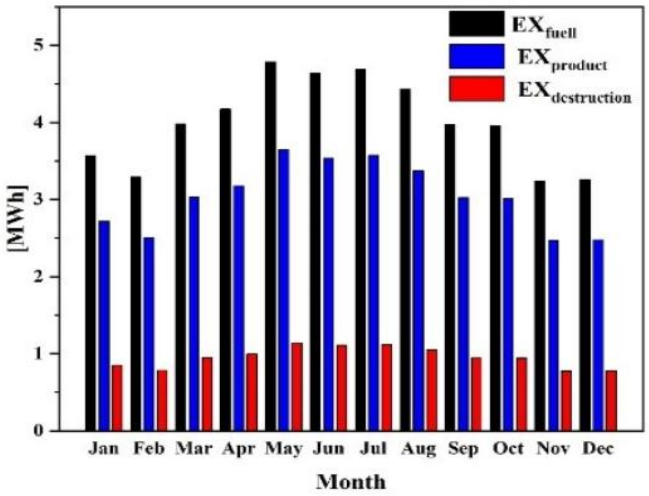
در شکل (۷)، میزان اگزرژی جریان ورودی، اگزرژی جریان خروجی و اگزرژی تخریب شده در ماه‌های سال نشان داده شده است. با توجه به شکل بیشترین میزان اگزرژی ماهانه‌ی جریان ورودی ۴/۷۸ مگاوات ساعت در ماه می و کمترین میزان اگزرژی ماهانه‌ی جریان ورودی در ماه فوریه ۳/۲۴ مگاوات ساعت است. همچنین، بیشترین میزان اگزرژی ماهانه‌ی تخریب شده ۳۷/۳۷ مگاوات ساعت در ماه می و کمترین میزان اگزرژی ماهانه‌ی تخریب شده ۱۷/۲۵ مگاوات ساعت است.

۴-۳- سیکل سرمایش جذبی

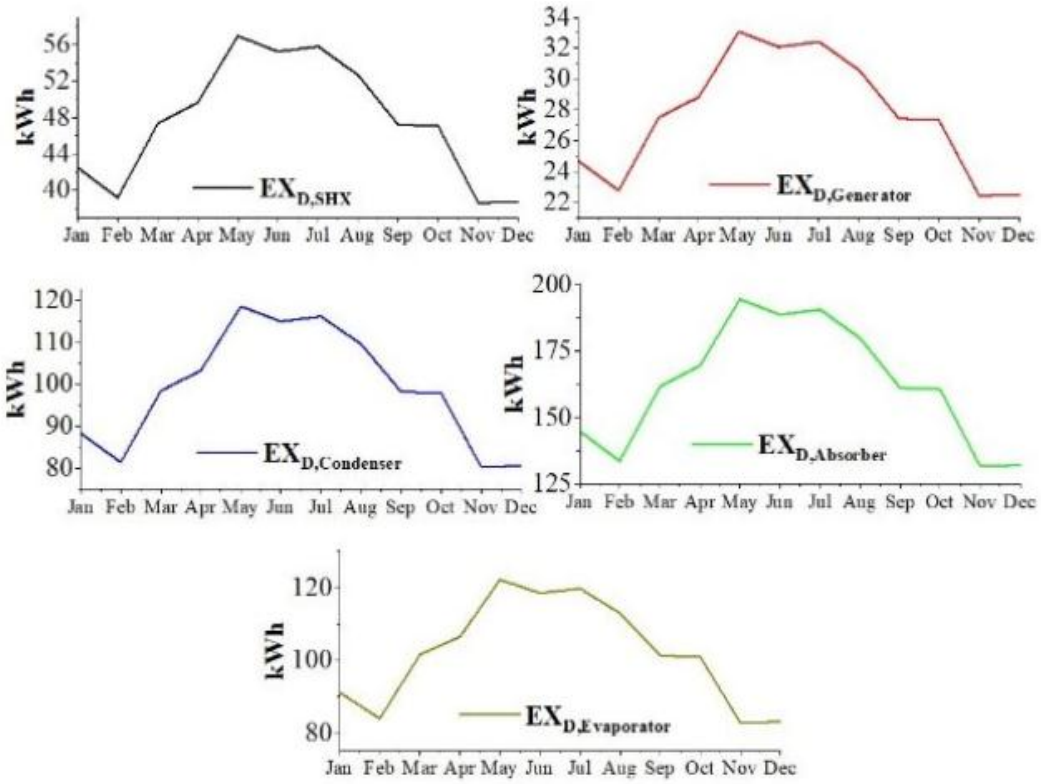
در شکل (۸)، میزان اگزرژی اجزای سیکل سرمایش جذبی تک اثره لیتیوم – بروماید در ماه‌های سال نشان داده شده است. با توجه به شکل میزان اگزرژی ماهانه‌ی مبدل حرارتی از ۳۸/۶ تا ۵۶/۹۶ کیلووات ساعت تغییر می‌کند که بیشترین آن در ماه می و کمترین آن در ماه نوامبر و دسامبر می‌باشد. همچنین، میانگین اگزرژی ماهانه‌ی ابزوربر و ژنراتور به ترتیب ۱۶۳/۱۳ و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

۲۷/۷۴ کیلووات ساعت می‌باشند. علاوه بر این، میزان اگزرژی ماهانه‌ی اواپراتور از ۸۲/۷۷ تا ۱۲۲/۱۵ کیلووات ساعت و میزان اگزرژی ماهانه‌ی کندانسور از ۸۰/۲۹ تا ۱۱۸/۵۰ کیلووات ساعت تغییر می‌کند.



شکل ۷- میزان اگزرژی جریان ورودی، اگزرژی جریان خروجی و اگزرژی تخریب شده در ماه‌های سال



شکل ۸- میزان اگزرژی اجزای سیکل سرمایش جذبی تک اثره لیتیوم – بروماید در ماه‌های سال

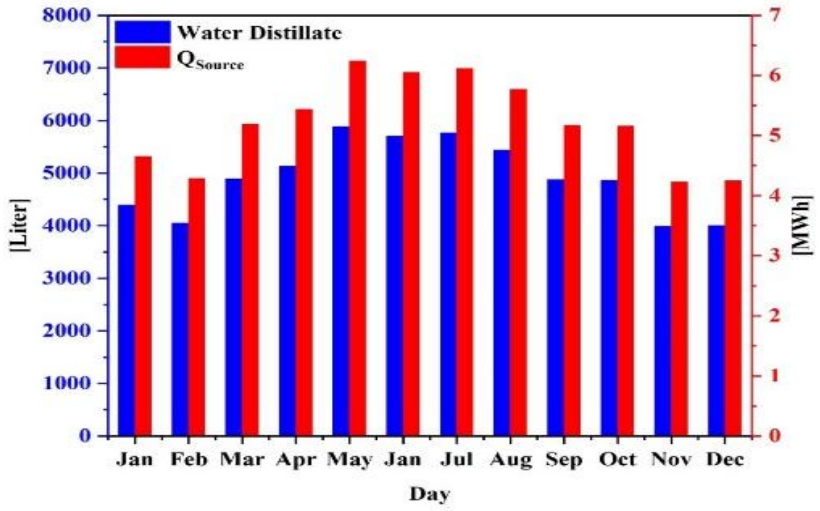
۴-۴- آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی

در شکل (۹)، میزان آب شیرین تولیدی و گرمای گرفته شده توسط آب‌شیرین‌کن در ماه‌های سال نشان داده شده

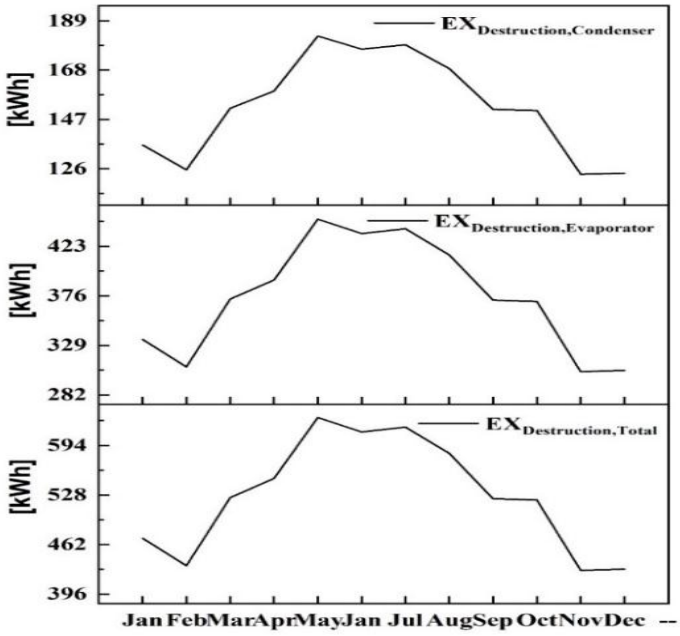
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

است. با توجه به شکل، میزان آب شیرین تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن ۵۸۷۹/۵۷ لیتر در ماه می و کمترین آن ۳۹۸۳/۸۹ لیتر در ماه فوریه می‌باشد.



شکل ۹- میزان آب شیرین تولیدی و گرمای گرفته شده توسط آب‌شیرین‌کن در ماه‌های سال



شکل ۱۰- میزان اگزرژی کل، اگزرژی اواپراتور و اگزرژی کندانسور در ماه‌های سال

در شکل (۱۰)، میزان اگزرژی کل، اگزرژی اواپراتور و اگزرژی کندانسور در ماه‌های سال نشان داده شده است. با توجه به شکل میزان اگزرژی ماهانه کندانسور از ۱۲۳/۶۵ تا ۱۸۲/۵۰ کیلووات ساعت تغییر می‌کند که بیشترین آن در ماه می و کمترین آن در ماه فوریه می‌باشد و میانگین ماهانه‌ی آن ۱۵۳/۰۸ کیلووات ساعت می‌باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، سیکل تولید توان رانکین آلی، سیستم سرمایش جذبی آب/لیتیوم بروماید و آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی بررسی شد. انرژی الکتریکی مفید سیستم ترکیبی فتوولتائیک متمرکز-کننده ۷۴/۷۶ مگاوات ساعت می‌باشد. همچنین، میزان اگزرژی گرمایی در سال ۳۹/۸۸ مگاوات ساعت در سال، ۰/۰۶۷ مگاوات ساعت اگزرژی گرمای ازدست‌رفته و ۳۹/۸۱ مگاوات ساعت اگزرژی گرمایی مفید می‌باشد. در سیکل تولید توان رانکین آلی میزان اگزرژی سالانه جریان ورودی ۴۷/۹۸ مگاوات ساعت، میزان اگزرژی سالانه‌ی تولیدی ۳۶/۵۴ مگاوات ساعت و میزان اگزرژی سالانه تخریب شده ۱۱/۴۳ مگاوات ساعت می‌باشد. همچنین، بازده انرژی سالانه سیکل ۱۰/۶۵٪ و بازده اگزرژی سالانه ۵۲/۹۵٪ می‌باشد. در سیکل تبرید جذبی، ضریب عملکرد سیکل ۰/۷۲ و میزان بازده اگزرژی آن ۱۷/۵۷٪ می‌باشد. میزان گرمای گرفته شده توسط آب‌شیرین‌کن در سال ۶۲/۵۲ مگاوات ساعت می‌باشد و همچنین میزان اگزرژی تخریب شده اواپراتور ۴/۴۹ مگاوات ساعت، کندانسور ۱/۸۳ مگاوات ساعت و همچنین میزان اگزرژی تخریب شده کل ۶/۳۲ مگاوات ساعت می‌باشد. میزان آب شیرین تولیدی در سال ۵۸۹۲۸/۹۹ لیتر و نسبت بهره‌ی خروجی ۳/۴۱ و نسبت بازیاب ۲/۵۷ می‌باشد. به طورکلی برای سیستم ترکیبی راندمان حرارتی و راندمان اگزرژی به ترتیب، ۷۵ ٪ و ۷۲/۹۳٪ بدست آمده است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

مساحت(m^2)	A	ضریب هدایت	K
ضریب ویژه حرارتی متمرکز کننده	a	ضریب حرارتی توان	k_t
ضریب عملکرد	COP	دبی جرمی(kg/s)	$\dot{m}$
ضریب تمرکز هندسی سیستم متمرکز کننده	C	نرخ کار(kW)	$\dot{W}$
ظرفیت گرمایی ویژه	c_p	انرژی الکتریکی تولیدی	P
نرخ اگزرژی(kW)	$E\dot{x}$	انرژی حرارتی تولیدی (kW)	Q
آنتالپی(kJ/kg)	h	درجه شوری	S
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h_c	دما(°C)	T
نرخ انتقال جرم	J		

علائم یونانی

بازده(٪)	η	بیشینه ضریب دمایی	γ
ضخامت غشا	δ	بازده اگزرژی	Ψ

زیرنویس

ابزوربر	Abs	متمرکز کننده	opt
کندانسور	Co	پارازیتی	par
چرخه	cyc	پمپ	pump
سلول	cell	فتوولتائیک	pv
اواپراتور	Eva	شیر انبساط سیستم تبرید	rev, v
ژنراتور	Ge	شیر فشارشکن	sev, v
ورودی	in	مبدل حرارتی زداینده	shx

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

خالص	net	توربین	turb
خروجی	out		

مراجع

1. Rahim Moltames and Ramin Roshandel, Techno-economic analysis of a modified concentrating photovoltaic/organic Rankine cycle system, International Journal of Ambient Energy, Published online: 17 Feb 2020.
2. Kiyarash Rahbar, Alireza Riasi, Hamed Khatam Bolouri Sangjoeei, Nima Razmjoo, Heat recovery of nano-fluid based concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) Collector with Organic Rankine Cycle, Energy Conversion and Management, 179 (2019) 373-396
3. G. Kosmadakis, D. Manolakos, G. Papadakis, Simulation and economic analysis of CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation, Solar Energy, 85 (2011) 308-324.
4. Hughes A, O'Donovan T, Mallick T, Experimental evaluation of a membrane distillation system for integration with concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T) energy, Energy Procedia, 54, (2014), 725-733.
5. Nabil A.S. Elminshawy, Mamdouh A. Gadalla , M. Bassyouni, Kamal El-Nahhas, Ahmed Elminshawy f, Y. Elhenawy, A novel concentrated photovoltaic-driven membrane distillation hybrid system for the simultaneous production of electricity and potable water, Renewable Energy 162 (2020) 802e817.
6. Zhang Heng, Chen Feipeng, Liu Yang, Chen Haiping, Liang Kai, Yang Boran, The performance analysis of a LCPV/T assisted absorption refrigeration system, Renewable Energy 143 (2019) 1852e1864.
7. Annamaria Buonomano, Francesco Calise, Adolfo Palombo, Solar heating and cooling systems by absorption and adsorption chillers driven by stationary and concentrating photovoltaic/thermal solar collectors: Modelling and simulation, Renewable and Sustainable Energy Reviews ,82 (2018) 1874-1908
8. Mohammed Rabiea, Abdallah Y.M.Alia, Essam M.Abo-Zahhad, Hesham I.Elqady, M.F.Elkady, Shinichi Ookawar, A.H.El-Shazly, Mohamed S.Salem, Ali Radwan, Thermal analysis of a hybrid high concentrator photovoltaic/membrane distillation system for isolated coastal regions, Solar Energy 2015 (2021), 220-239.
9. Amirreza Moaleman, Alibakhsh Kasaeianb, Mohamad Aramesh, Omid ahian, Lovedeep Sahota, Gopal Nath Tiwari, Simulation of the performance of a solar concentrating photovoltaic-thermal collector, applied in a combined cooling heating and power generation system, Energy Conversion and Management 160 (2018) 191–208.
10. P. Pérez-Higueras, E. F. Fernández, High concentrator photovoltaics: fundamentals, engineering and power plants: Springer, 2015.
11. C. Renno, F. Petito, Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application, Energy and buildings, 62 (2013) 392-402.
12. Torio, H., Angelotti, A., & Schmidt, D. Exery analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. Energy and Buildings, 41(2009) 248-271.
13. Kaşka, Ö. Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. Energy Conversion and Management, 77(2014) 108-117.
14. Mohammadi, SM Hojjat. "Theoretical investigation on performance improvement of a low-temperature transcritical carbon dioxide compression refrigeration system by means of an absorption chiller after-cooler." Applied Thermal Engineering 138 (2018) 264-279.
15. Mahmoudi, G. M. Goodarzi, S. Dehghani, and A. Akbarzadeh, "Experimental and theoretical study of a lab scale permeate gap membrane distillation setup for desalination," Desalination, 419(2017) 197–210.
16. Najib, A., Orfi, J., Ali, E., & Saleh, J. Thermodynamics analysis of a direct contact membrane distillation with/without heat recovery based on experimental data. Desalination, 466 (2019) 52-67.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]

چکیده انگلیسی

Energy and Exergy Analysis of Combined Concentrated Photovoltaic Thermal, Organic Rankine Power Generation Cycle, Absorption Cooling and Membrane Distillation Desalination Systems

Hossien Okhovati [1], Seyed Abdolreza Ganjalikhani Nasabe[2,*], Ebrahim Jahanshahi Javaran[2]

1- Ph.D. student of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Kerman Branch, Kerman, Iran
*2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

Received: August 2021 Accepted: November 2021

Abstract

In the present study, energy and exergy analysis of a hybrid system including concentrating photovoltaic thermal module, organic Rankine cycle, single-effect water / lithium-bromide adsorption cooling and membrane distillation desalination at transient conditions is performed. The combined energy and exergy analyzes of the system were performed by a computer program written in EES software. The results showed that the annual electrical power generated by concentrating photovoltaic thermal modules and organic Rankine cycle are 81.74 MWh and 13.84 MWh, respectively. In addition, the cooling capacity of the refrigeration cycle is 32.91 MWh and the membrane distillation desalination plant produces fresh water at a rate of 0.3025 kg/s.m^2. The degraded exergy of the concentrating photovoltaic system and organic Rankin cycle is 35.36 MWh and 11.43 MWh, respectively. The exergy efficiency of the absorption cooling cycle is 17.57%. Also, in membrane distillation desalination, the total degradation rate is 6.32 MWh. In addition, the obtained results prdedicts thermal efficiency and exergy efficiency of 75% and 72.93% for the combined system, respectively.

Key words: Concentrating photovoltaic thermal, organic Rankine, absorption cooling, membrane distillation, exergy.

*corresponding author: ganj110@uk.ac.ir

Cite this article as: Hossien Okhovati, Seyed Abdolreza Ganjalikhani Nasab and Ebrahim Jahanshahi Javaran. Energy and Exergy Analysis of Combined Concentrated Photovoltaic Thermal, Organic Rankine Power Generation Cycle, Absorption Cooling and Membrane Distillation Desalination Systems. Journal of Energy Conversion, 2022, 9(1), 1-16.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.1.1.2]