

# تحلیل انرژی، اگزرزی و اگزرزی - اقتصادی

## چرخه‌ی تولید توان بر پایه‌ی انرژی زمین گرمایی و خورشیدی مستقل

مهمنگی مکانیک شریف، پاییز ۱۴۰۱  
دوری ۳۷-۸۳، شماره ۱، ص. ۷۸-۹۶، پیاپی ۱۴۰  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

محمد وجدي \* (استادیار)

دانشکده فنی و هندسی، دانشگاه حقوق اردبیل

نیما قاسم‌زاده خیابوی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

وحید بهنود (کارشناس)

فرهاد صادق مختارلو (استادیار)

دانشکده فنی و هندسی، دانشگاه حقوق اردبیل

با توجه به اهمیت انرژی و کاهش منابع انرژی فسیلی، تولید انرژی الکتریکی توسط انرژی‌های نو در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش از انرژی زمین گرمایی و خورشیدی استفاده شده است. بررسی با دیدگاه‌های انرژی و اگزرزی برای چرخه انجام گرفته و بر اساس قوانین اول و دوم ترمودینامیک میزان کارایی کلی سیکل و هرکدام از اجزا تعیین شده است. تحلیل اقتصادی به عنوان ابزاری کارآمد برای بررسی هزینه‌ی توان تولیدی مورد استفاده قرار گرفته و هزینه‌ی تولید محصول تعیین شده است. نتایج نشان‌گر بیشترین تخریب اگزرزی به ترتیب در کلکتور خورشیدی، اوپراتور دمبالا و کندانسور چرخه است. بیشترین راندمان قانون دوم مربوط به توربین پرفشار است، در حالی که توربین کم فشار بیشترین مقدار درصد فاکتور اگزرزی اقتصادی را دارد. هزینه‌ی متوسط تولید برق بر اساس توان تولیدی دو توربین کم فشار و پرفشار برابر  $\frac{28/32}{GJ} \cdot \frac{\$}{kwh}$  به دست آمده است.

vajdi@uma.ac.ir  
nimaghazemzadeh1998@gmail.com  
vahidbehnam76@gmail.com  
f\_moghanlou@uma.ac.ir

وازگان کلیدی: انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، تحلیل اقتصادی، انرژی، اگزرزی.

### ۱. مقدمه

دادند که نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که هزینه‌ی خالص سیستم قدرت بهینه شده، ۴۷۶۰۰۰ دلار و هزینه‌ی تولید برق، ۰،۰۸۹ دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت است. جوشو و همکاران<sup>[۱]</sup> با تتفیق گرما از منبع خورشیدی با نیروگاه زمین گرمایی، خروجی توان را با هزینه‌ی کم افزایش دادند. در این تحقیق بازده تبدیل انرژی خورشیدی به برق  $24/3\%$  به دست آمد.

در سال ۲۰۱۸ بهزادی و همکاران<sup>[۲]</sup> یک چرخه‌ی یکپارچه با انرژی زمین گرمایی و خورشیدی را از منظر انرژی، اگزرزی و اگزرزی - اقتصادی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند؛ نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از بازیافت حرارت در منبع زمین گرمایی ضریب عملکرد سیستم را حدود ۱۵٪ افزایش می‌دهد. همچنین بازده کلی اگزرزی و هزینه‌ی واحد کل سیستم بهینه شده به ترتیب  $12/31\%$  و ۳۵ دلار بر گیگاواتل به دست آمد.

کالیسه و همکاران<sup>[۳]</sup> یک چرخه‌ی ترکیبی مشکل از منبع زمین گرمایی و خورشیدی را از منظر اگزرزی و اگزرزی - اقتصادی مورد ارزیابی قرار دادند؛ نتایج تحقیقات آنها نشان داد که بازده کل اگزرزی در بخش بازیافت حرارت بین ۴۰٪ تا

با توجه به خطرات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی و افزایش جمعیت و نیاز بیشتر به انرژی، بشر به ذکر استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر افتاده است. منابع زیست‌محیطی پاک و پایدار از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر به طور فرازینده‌ی مورد توجه قرار گرفته‌اند. منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی و زمین گرمایی هنوز در مرحله‌ی توسعه قرار دارند.<sup>[۴]</sup> چرخه‌ی رانکین آلی یک فناوری ابتداء شده و قابل اعتماد برای تبدیل انرژی، بهویژه بهره‌برداری از منابع دماپایین مانند زمین گرمایی و خورشیدی است.<sup>[۵]</sup> در سطح جهان، بسیاری از مناطق از منابع خورشیدی و زمین گرمایی زیادی برخوردارند که در این مناطق از این دو منبع می‌توان در ساخت نیروگاه استفاده کرد.<sup>[۶]</sup>

در سال ۲۰۱۷ خالد و همکاران<sup>[۷]</sup> تحلیل اقتصادی یک سیستم چندگانه‌ی خورشیدی و زمین گرمایی برای ساختمان را با استفاده از نرم افزار Homer انجام

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۰۳/۱۱، اصلاحیه ۱۲/۱۲، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

DOI:10.24200/J40.2022.56887.1569

هزینه‌ی تخریب اگرزری و ۱۲,۸۳ دلار بر ساعت هزینه‌ی تولید توان بود. آنیز و همکاران<sup>[۱۶]</sup> در سال ۲۰۲۱ عملکرد یک چرخه‌ی تولید توان و هیدروزن را می‌ساختند بر اثری زمین گرمایی دما متوسط و انرژی خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق متوسط تولید برق بین ساعت ۱۱ تا ۱۳ ۶۶,۰۲ کیلووات بود، همچنین کل تولید هیدروزن ۹۸۰ گرم در یک روز بود.

در تحقیق حاضر یک چرخه‌ی رانکین آلی با منابع انرژی زمین گرمایی و خورشیدی معرفی شده و از دیدگاه انرژی، اگرزری و اگرزری - اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. چرخه به گونه‌ی طراحی شده است که منبع زمین گرمایی و خورشیدی مستقل زمین بوده و در نبود هر یک، تولید توان توسط منبع دیگر ادامه می‌یابد. در مطالعه‌های پیشین انرژی زمین گرمایی و خورشیدی به طور یکپارچه و مستقل از هم تولید توان نمی‌پرداختند که در کار حاضر این دو منبع کاملاً مستقل از همدیگر بوده و عدم کارایی یک منبع روی تولید توان توسط منبع دیگر تأثیر نمی‌گذارد. همچنین تأثیر تغییر پارامترها مانند دمای اوپرаторها و اختلاف دمای پیچ اوپرаторها بر عملکرد چرخه نیز بررسی شده است. رای تحلیل چرخه از نرم افزار EES استفاده شده است.

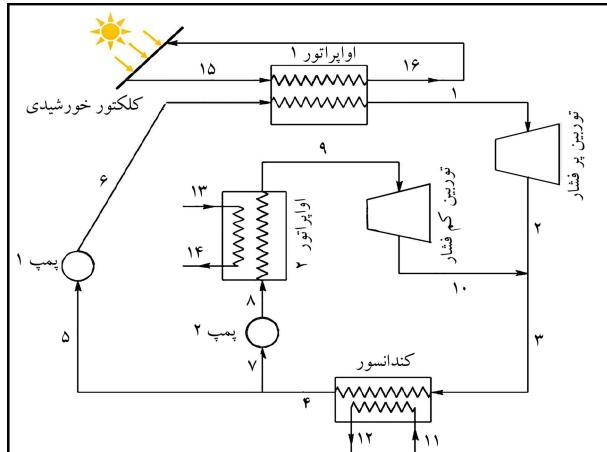
## ۲. شرح سیستم و فرضیات

شکل ۱ طرح کلی چرخه‌ی تولید توان از منابع زمین گرمایی و خورشیدی را نشان می‌دهد برای تولید توان از چرخه‌ی رانکین آنی با سیال عامل R123 استفاده شده است.

مطابق شکل ۱ آب در کلکتور خورشیدی تا دمای ۱۵۰ گرم می‌شود سپس در اپراتور ۱ (اوپراتور پرفشار) برای تولید بخار فوق گرم سیال آلی به کار می‌رود. بخار فوق گرم وارد روبرین پروفشار شده و توان تولید می‌کند. پس از دفع حرارت سیال آلی در کننداسور تبدیل به مایع اشباع شده و توسط پمپ ۱ به اوپراتور ۱ بر می‌گردد. از آب به عنوان سیال خنک کاری در کننداسور استفاده می‌شود.

در قسمت دیگر، اوپرатор ۲ (اوپرатор کم فشارها) با آب گرم حاصل از منبع زمین، رمایی با دمای ۹۰ درجه سلسیوس، بخار اشباع تولید نموده و باعث تولید توان در توربین کم فشار می‌شود. یک کندانسور مشترک برای هر دو توربین پرفشار و کم فشار در نظر گرفته شده که می‌تواند برای هر دو چرخه ایقای نقش کند. داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی چرخه در جدول ۱ آورده شده است.

این چرخه می‌تواند هم زمان با دو منبع و یا فقط با یکی از آن‌ها کار کرده و توان



شکل ۱. حیرخه‌ی تولید توان یا منابع زمین گرمایی و خورشیدی مستقل.

- در بخش سرمایش بین ۱۶٪ تا ۲۰٪ خواهد بود. همچنین نتایج اگررژی - قتصادی نشان می دهد که هزینه‌ی تولید الکتریسیته در بخش آب سرد بین ۵٪ تا ۱۴٪ بروز بازی از هر کیلووات ساعت است. عالی و همکاران،<sup>[۸]</sup> تحقیقات اگررژی و اگررژی - اقتصادی را با طراحی یک چرخه‌ی ترکیبی بر مبنای چرخه‌ی رانکین آلی و یک چرخه‌ی فلش بازیزی برای نیروگاه زمین گرمایی مشکلین شهر انجام دادند که نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان داد که اگر فقط از چرخه‌ی فلش بازیزی استفاده شود، بازده کلی اگررژی ۵۲٪/۵۶٪ و هزینه‌ی تولید الکتریسیته ۴٪/۹٪<sup>[۹]</sup> دلار بر گیگاژول به دست می آید، ولی اگر چرخه‌ی رانکین آلی با چرخه‌ی فلش بازیزی کوپل شود، بازده کلی اگررژی به مقدار ۵۴٪/۸٪ بهبود می آید و هزینه‌ی تولید الکتریسیته به مقدار ۵٪/۶٪ دلار بر گیگاژول خواهد رسید. بهنم و همکاران<sup>[۱۰]</sup> عملکرد یک سیستم تولید هم زمان توسط منابع زمین گرمایی در دمای پایین برای تولید آب شیرین، گرمایش (آب گرم) و برق را از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. سیستم پیشنهادی دارای ظرفیت تولید آب شیرین ۸/۶۲۲ kg/s<sup>[۱۱]</sup> توان ۱۶۱/۵ kW<sup>[۱۲]</sup> و با حرارتی ۲۰ ۱۶ kw<sup>[۱۳]</sup> بود. در سال ۲۰۲۶ دویقو و همکاران<sup>[۱۴]</sup> تحلیل ترمودینامیکی یک چرخه‌ی رانکین آلی با منبع زمین گرمایی و کلکتورهای خورشیدی سهمی را انجام دادند که نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که ترکیب این سیستم‌ها توان خروجی سیستم را افزایش، اما بازده الکتریکی و بازده اگررژی سیستم را کاهش می دهد. السافی<sup>[۱۵]</sup> تحلیل اگررژی و اگررژی - اقتصادی یک نیروگاه خورشیدی تولید بخار مستقیم را مورد ارزیابی قرار داد که نتایج حاصله نشان داد که با افزایش دما در روده‌ی توربین فشار پایین توسط گرمایش مجدد، موجب فراش کیفیت بخار در خروجی توربین شده که باعث افت ۱/۵ درصدی در بازده حرارتی و اگررژی و همکاران،<sup>[۱۶]</sup> تحلیل ترمودینامیکی و ترمoe-اقتصادی یک چرخه‌ی تولید فلزی زاده و همکاران،<sup>[۱۷]</sup> توان متشکل از توربین گازی و توربین بخار را بر مبنای سوخت بیوگاز مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج ارزیابی آنها نشان می دهد که چرخه‌ی طراحی شده قابلیت تولید توان به مقدار ۱۳۶۸ kW<sup>[۱۸]</sup> را دارد، همچنین در این ارزیابی مشخص شد که هزینه‌ی تولید نیروگاه خواهد بود. تمپستی و فیاسچی<sup>[۱۹]</sup> یک سیستم تولید هم زمان گرمایشی و خورشیدی را از نظر ترموماقتدادی مورد بررسی قرار دادند در این بررسی مشخص شد که اگر از مبرد R۲۵۴fa استفاده شود، هزینه‌ی تولید الکتریسیته به کمترین مقدار خود می رسد. شوکتی و همکاران<sup>[۲۰]</sup> توان چرخه‌های رانکین آلی (ORC)<sup>[۲۱]</sup> را بازده چرخه‌ی رانکین آلی با نشار دوگانه، چرخه‌ی رانکین آلی مایع دوگانه و کالیانا را برای نیروگاه زمین گرمایی از منظر اگررژی - اقتصادی مقایسه کردند. نتایج بهینه‌سازی نشان می دهد که بیشینه‌ی مقدار توان الکتریکی تولید شده مربوط به چرخه‌ی ORC فشار دوگانه است. همچنین چرخه‌ی کالیانا کمترین مقدار هزینه‌ی واحد انرژی تولید شده، را دارد.

مرت کوراگاوا و همکاران<sup>[۲۲]</sup> تحلیل انرژی، اگررژی و زیست محیطی یک سیستم نسل جدید خورشیدی را برای تولید نیروگاه زمین گرمایش، سرمایش، آب داغ و تولید هیدروژن در سال ۲۰۲۱ انجام دادند. سیستم پیشنهادی آنها شامل چرخه‌ی توربین گازی خورشیدی، چرخه‌ی کالیانا، چرخه‌ی رانکین آلی، چرخه‌ی تیرید جذبی تک اثره، الکترولایزر و دو هیتر آب داخلی بود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که سیستم پیشنهادی آنها دارای بازده انرژی ۵۷٪/۵۵٪ و بازده اگررژی ۴۵٪/۳۹٪ بود. مشاورتی و همکاران<sup>[۲۳]</sup> یک سیستم جدید انرژی گرمایی مبتنی بر چرخه‌ی کالیانا، نمک زدایی اسمز معکوس و الکترولیت تقویت شده با ترمولکتریک را از منظر انرژی، اگررژی و اگررژی اقتصادی مورد بررسی قرار دادند نتایج تحقیقات آنها نشان داد که سیستم پیشنهادی دارای ۳۲۸٪/۲ کیلووات تحریب اگررژی، ۱۸٪/۴ دلار بر ساعت

جدول ۲. معادلات بقای جرم و انرژی اجزای چرخه.

بقای انرژی	بقای جرم	جزء
$\dot{Q}_{evap1} = \dot{m}_1(h_1 - h_6)$	$\dot{m}_1 = \dot{m}_6$	اولپراتور ۱
$\dot{Q}_{evap1} = \dot{m}_{15}(h_{15} - h_{16})$	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$	
$\dot{Q}_{evap2} = \dot{m}_8(h_9 - h_8)$	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	اولپراتور ۲
$\dot{Q}_{evap2} = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14})$	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	
$\dot{W}_{HPT} = \dot{m}_1(h_1 - h_2)$	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	توربین پر فشار
$\dot{m}_2h_2 + \dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_3h_3$	$\dot{m}_2 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_3$	
$\dot{W}_{LPT} = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	توربین کم فشار
$\dot{W}_{pump1} = \dot{m}_5(h_6 - h_5)$	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	پمپ ۱
$\dot{W}_{pump2} = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	پمپ ۲
$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	کندانسور
$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{11}(h_{12} - h_{11})$	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$	
$\dot{Q}_{coll} = \dot{m}_{16}(h_{15} - h_{16})$	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{15}$	کلکتور خورشیدی

معادلات بقای جرم و بقای انرژی برای هر یک از اجزاء چرخه در جدول ۲ آورده شده است. بازده آیزنتروپیک تامامی توربین‌ها و پمپ‌ها  $85\%$  فرض شده است. بیشترین کار برگشت‌پذیر که می‌تواند هنگام رسیدن جریان به حالت مرده حاصل شود، اگررژی است.<sup>[۹]</sup> حالت مرده یعنی حالتی با کمینه‌ی انرژی ممکن و با دما و فشاری برابر با دما و فشار محیط و سرعت صفر و ارتفاع مرجع  $Z$ .<sup>[۱۰]</sup> اگررژی فیزیکی هر جریان از رابطه<sup>۳</sup>  $\psi = (h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty})$  دست می‌آید:

$$\psi = (h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) \quad (۳)$$

که زیرنویس  $^{\circ}$  مربوط به خواص ترمودینامیکی حالت مرده است. تعادل نرخ اگررژی برای یک جزء سیستم به عنوان یک حجم کنترل به صورت زیر نوشته می‌شود:<sup>[۱۱]</sup>

$$\sum \dot{E}_i + \sum \dot{Q}_{cv} \left( 1 - \frac{T_{\infty}}{T_k} \right) = \dot{W}_{cv} + \sum \dot{E}_e + \dot{E}_L + \dot{E}_D \quad (۴)$$

که در آن  $\sum \dot{E}_i$  و  $\sum \dot{E}_e$  به ترتیب مجموع نرخ اگررژی‌های ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن را نشان می‌دهد.  $\sum \dot{E}_D$  و  $\sum \dot{E}_L$  نیز بیان‌گر اتفاف اگررژی و تخریب اگررژی در طی فرایند هستند. علاوه بر این  $(1 - T_{\infty}/T_k)$  و  $\dot{Q}_{cv}$  به ترتیب اگررژی متناظر با انتقال حرارت و کار از مزر حجم کنترل است. همچنین  $\dot{E}_D$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{E}_D = \dot{m}\psi \quad (۵)$$

به منظور تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم و محاسبه‌ی بازده قانون دوم، شناخت سوخت و محصول برای هریک از اجزاء سیستم ضروری است. محصول، خروجی مفید یک جزء سیستم را نشان می‌دهد، در حالی که سوخت به معنای منبعی است که برای تولید محصول مورد نیاز است.<sup>[۱۲]</sup> اختلاف بین اگررژی سوخت و محصول بیان‌گر اگررژی تخریب شده در طول فرایند است و به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D \quad (۶)$$

که  $\dot{E}_F$  و  $\dot{E}_P$  به ترتیب جریان نرخ اگررژی محصول و سوخت هر جزء و  $\dot{E}_D$  تخریب اگررژی است. اگررژی سوخت و محصول اجزاء و تعادل اگررژی کلیه اجزای چرخه در جدول ۳ مشخص شده است.

جدول ۱. داده‌های ورودی به منظور شبیه‌سازی چرخه.

پارامتر	نماد	مقدار	مرجع
فشار محیط	$P_{\infty}$ (kPa)	۱۰۱	[۱۸]
دما محیط	$T_{\infty}$ ( $^{\circ}$ C)	۲۰	[۱۸]
دما اولپراتور ۱	$T_{evap1}$ ( $^{\circ}$ C)	۱۲۰	[۱۸]
دما اولپراتور ۲	$T_{evap2}$ ( $^{\circ}$ C)	۸۰	-
اختلاف دما پیشج اولپراتور ۱	$\Delta T_{pinch1}$ ( $^{\circ}$ C)	۵	[۲]
اختلاف دما پیشج اولپراتور ۲	$\Delta T_{pinch2}$ ( $^{\circ}$ C)	۵	[۲]
دما کندانسور	$T_2$ ( $^{\circ}$ C)	۳۰	-
دما سیال خورشیدی ورودی	$T_{15}$ ( $^{\circ}$ C)	۱۵۰	[۱۸]
فشار سیال خورشیدی ورودی	$P_{15}$ (kPa)	۴۷۵	[۱۸]
دما سیال زمین گرمایی ورودی	$T_{12}$ ( $^{\circ}$ C)	۹۰	[۱۸]
فشار سیال زمین گرمایی ورودی	$P_{12}$ (kPa)	۷۰	[۱۸]
دما آب ورودی به کندانسور	$T_{11}$ ( $^{\circ}$ C)	۲۰	-
دما آب خروجی از کندانسور	$T_{12}$ ( $^{\circ}$ C)	۲۵	-
توان تولیدی توربین پرفشار	$\dot{W}_{HPT}$ (kW)	۱۰۰	-
توان تولیدی توربین کم فشار	$\dot{W}_{LPT}$ (kW)	۵۰	-
دمای خورشید	$T_{sun}$ (K)	۴۵۰	[۱۸]

تولید کنند. همچنین زمانی که انرژی خورشیدی در دسترس نباشد تولید توان توسط منبع زمین گرمایی ادامه می‌یابد. برخی از فرضیات استفاده شده برای شبیه‌سازی چرخه به شرح زیر است:

- تمامی اجزاء چرخه در حالت پایا کار می‌کنند؛
- افت فشار در مسیر وجود ندارد؛
- از اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل چشم پوشنی می‌شود؛
- انتقال حرارت فقط در داخل اوپراتورها و کندانسور صورت می‌گیرد و انتقالات حرارتی مسیرهای انتقال سیال قابل صرف نظر است؛<sup>[۱۳]</sup>
- توربین‌ها و پمپ‌ها بازده آیزنتروپیک دارند؛<sup>[۱۴]</sup>
- تحلیل در شرایط پایا صورت گرفته است.<sup>[۱۵]</sup>

### ۳. روش تحلیل و معادلات حاکم

برای چرخه‌ی تولید توان مستقل، تحلیل انرژی، اگررژی و اگررژی - اقتصادی با استفاده از نرم افزار EES (حلگر معادلات مهندسی) انجام می‌شود. جزئیات تحلیل و معادلات حاکم به شرح زیر است:

#### ۱.۱. تحلیل ترمودینامیکی

برای تحلیل ترمودینامیکی چرخه‌ی پیشنهادی از قانون پیوستگی و قانون اول ترمودینامیک، با صرف نظر کردن از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن حجم کنترل به صورت حالت پایا - جریان پایا معادلات به صورت زیر است:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (۱)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (۲)$$

جدول ۳. اگررژی سوخت و محصول و تعادل اگررژی اجزای چرخه.

جزء	اگررژی سوخت	اگررژی محصول	تعادل اگررژی
اوپراتور ۱	$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16}$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16}$
اوپراتور ۲	$\dot{E}_{13} - \dot{E}_{14}$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$
توربین پرفشار	$\dot{W}_{HPT}$	$\dot{W}_{HPT}$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_2$
توربین کم فشار	$\dot{W}_{LPT}$	$\dot{W}_{LPT}$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_{10}$
پمپ ۱	$\dot{W}_{pump1}$	$\dot{E}_6 - \dot{E}_5$	$\dot{W}_{pump1}$
پمپ ۲	$\dot{W}_{pump2}$	$\dot{E}_8 - \dot{E}_7$	$\dot{W}_{pump2}$
کندانسور	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$	$\dot{E}_{12} - \dot{E}_{11}$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$
کلکتور خورشیدی	$\dot{Q}_{m,coll}(1 - \frac{T_0}{T_{sun}})$	$\dot{E}_{15} - \dot{E}_{16}$	$\dot{Q}_{in,coll}(1 - \frac{T_0}{T_{sun}})$

هر جزء در جدول ۴ نشان داده است. برای ارزیابی عملکرد سیستم از دیدگاه اگررژی - اقتصادی، برخی متغیرها از جمله هزینه‌ی واحد سوخت ( $CF$ )، هزینه‌ی واحد محصول ( $c_P$ )، نرخ هزینه‌ی تخریب اگررژی ( $\dot{C}_D$ ) و ضریب اگررژی - اقتصادی ( $f_k$ ) چنین تعریف می‌شوند: [۲۱، ۲۰]

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (14)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (15)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (16)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k}} \quad (17)$$

### ۳.۳. کلکتور خورشیدی

برای تحلیل کلکتور خورشیدی و محاسبه مساحت مورد نیاز برای کلکتور از رابطه‌ی ۱۸ استفاده می‌شود:

$$\eta_{coll} = A - B \frac{T_{avg} - T_0}{G_{tot}} - C \frac{(T_{avg} - T_0)^2}{G_{tot}} \quad (18)$$

که در آن  $\eta_{coll}$  بازده کلکتور،  $G_{tot}$  مجموع تابش مستقیم و پراکنده روی سطح شبیه دار کلکتور  $T_{avg}$  میانگین دمای ورودی و خروجی به کلکتور و  $A$ ,  $B$  و  $C$  ثوابت مربوط به تست کلکتور است. [۲۲]

$$A = ۰,۶۱۲ \quad (19)$$

$$B = ۰,۵۴ \quad (20)$$

$$C = ۰,۰۰۱۷ \quad (21)$$

گرمای ورودی به کلکتور از طریق تابش خورشید و بازده از روابط زیر به دست می‌آیند: [۱۸]

$$\dot{Q}_{in,coll} = G_{tot} A_{coll} \quad (22)$$

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}_{coll}}{\dot{Q}_{in,coll}} \quad (23)$$

بازده قانون دوم برای هر جزء سیستم از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} \quad (7)$$

بازده قانون اول و بازده قانون دوم برای چرخه نیز از روابط ۸ و ۹ به دست می‌آید:

$$\eta_{I,cycle} = \frac{(\dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT}) - (\dot{W}_{pump1} + \dot{W}_{pump2})}{\dot{Q}_{in,coll} + \dot{Q}_{evap1}} \quad (8)$$

$$\eta_{II,cycle} = \frac{\dot{W}_{HPT} + \dot{W}_{LPT}}{\dot{E}_{F,coll} + \dot{E}_{F,evap1}} \quad (9)$$

### ۲.۳. تحلیل اگررژی - اقتصادی

تحلیل اگررژی - اقتصادی ترکیبی از اگررژی و اصول اقتصادی است که برای ارزیابی بهتر سیستم انجام می‌شود. برای هر جزء نرخ هزینه‌ی ورود و خروج جریان اگررژی نرخ هزینه‌ی انتقال کار و گرما و همچنین هزینه‌ی اولیه و سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شود. [۲۳] معادله موازن هزینه برای اجرای سیستم به شکل زیر نوشته می‌شود: [۱۸]

$$\sum \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \sum \dot{C}_{i,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k \quad (10)$$

$$\dot{C} = c \dot{E} \quad (11)$$

که نرخ هزینه و هزینه‌ی واحد اگررژی است.  $\dot{Z}_k$  نرخ هزینه برای جزء است که از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \varphi}{N} \quad (12)$$

در رابطه‌ی ۱۲ هزینه‌ی اولیه برای خریداری جزء  $k$ ,  $\varphi$  ضریب نگهداری که در نظر گرفته شده،  $N$  ساعات کارکرد سالیانه که برابر ۷۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده [۱۸] و  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه است که از رابطه‌ی ۱۳ قابل محاسبه است: [۲۱]

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (13)$$

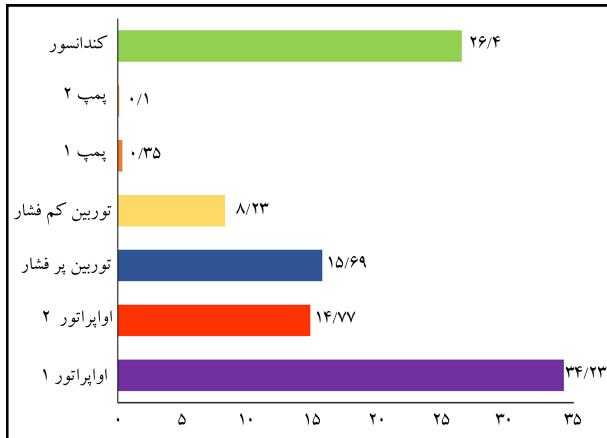
که در آن  $i$  و  $n$  به ترتیب نرخ سود برابر با ۱۲٪ و عمر مفید چرخه برابر ۲۰ سال است. [۱۸]

جدول ۴. معادلات موازنۀ هزینه و روابط کمکی و قیمت اولیه اجزای چرخه. [۱۸]

جزء	قیمت اولیه	موازنۀ هزینه	روابط کمکی
اوپراتور ۱	$Z_{evap1} = (7000) + (360)(A_{evap1})^{0.8}$	$\dot{C}_1 + \dot{C}_{16} = \dot{C}_6 + \dot{C}_{15} + \dot{Z}_{evap1}$	$c_{15} = c_{16}$
اوپراتور ۲	$Z_{evap2} = (7000) + (360)(A_{evap2})^{0.8}$	$\dot{C}_9 + \dot{C}_{14} = \dot{C}_8 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{evap2}$	$c_{13} = c_{14}$
توربین بر فشار	$Z_{HPT} = (6000)(\dot{W}_{HPT})^{0.7}$	$\dot{C}_2 + \dot{C}_{w,HPT} = \dot{C}_1 + \dot{Z}_{HPT}$	$c_1 = c_2$
توربین کم فشار	$Z_{LPT} = (6000)(\dot{W}_{LPT})^{0.7}$	$\dot{C}_{10} + \dot{C}_{w,LPT} = \dot{C}_9 + \dot{Z}_{LPT}$	$c_9 = c_{10}$
پمپ ۱	$Z_{pump1} = (3540)(\dot{W}_{pump1})^{0.71}$	$\dot{C}_6 = \dot{C}_{w,pump1} + \dot{C}_5 + \dot{Z}_{pump1}$	$\frac{\dot{C}_{w,pump1}}{\dot{W}_{pump1}} = \frac{\dot{C}_{w,pump2}}{\dot{W}_{pump2}}$
پمپ ۲	$Z_{pump2} = (3540)(\dot{W}_{pump2})^{0.71}$	$\dot{C}_8 = \dot{C}_{w,pump2} + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{pump2}$	$\frac{\dot{C}_{w,pump2}}{\dot{W}_{pump2}} = \left( \frac{\dot{C}_{w,hpt}}{\dot{W}_{hpt}} + \frac{\dot{C}_{w,lpt}}{\dot{W}_{lpt}} \right) / 2$
کندانسور	$Z_{cond} = (7000) + (360)(A_{cond})^{0.8}$	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{12} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{cond}$	$c_{11} = 0$
کلکتور خورشیدی	$Z_{coll} = (567)(A_{coll})$	$\dot{C}_{15} = \dot{C}_{16} + c_{sun}\dot{E}_{F,coll} + \dot{Z}_{coll}$	$c_{sun} = 0$

جدول ۵. اعتبارسنجی روش حل.

جزء	تخریب اگزرسی (kW)	بازده (%)	کار حاضر	مرجع [۱۸]
توربین	۰,۸۲۹	۰,۸۲۹۲	۰,۳	۰,۳
پمپ	۰,۸۷	۰,۸۷۰۳	۰,۲۵	۰,۲۵
اوپراتور	۰,۸۸۷	۰,۸۹۲۲	۱۲,۸	۱۲,۲۳
کندانسور	۰,۵۰۸	۰,۵۰۸۳	۲۶,۹	۲۶,۰۹
کلکتور خورشیدی	۰,۱۵۵	۰,۱۵۴۵	۶۲۰,۳	۶۲۰,۹
زمین گرمایی	۰,۸۸۸	۰,۸۸۸	۱,۳۲	۱,۳۲



شکل ۲. میزان تخریب اگزرسی برای اجزای چرخه‌ی رانکین آلوی.

که در آن  $\dot{Q}_{coll}$  نزدیکی انتقال گرما در کلکتور و  $A_{coll}$  مساحت مورد نیاز کلکتور خورشیدی است.

در مبدل‌های حرارتی (اوپراتورها و کندانسور) مساحت مورد نیاز برای انتقال حرارت از طریق رابطه‌ی ۲۴ محاسبه می‌شود:

$$A_k = \frac{\dot{Q}_k}{F U_k \Delta T_{LMTD,k}} \quad (24)$$

که در آن  $F$  ضریب تصحیح برابر ۰,۹,  $U$  ضریب کالی انتقال حرارت برابر با ۵۰۰ و  $\Delta T_{LMTD}$  اختلاف دمای لگاریتمی است.

#### ۴. اعتبارسنجی

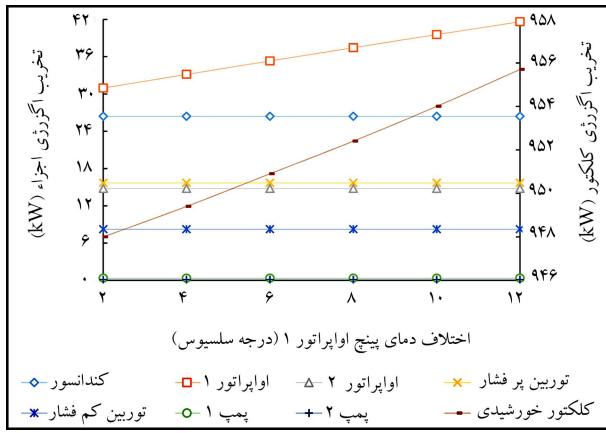
جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار EES از مرجع [۱۸] استفاده شده است. چرخه‌ی مورد استفاده در مرجع [۱۸] براساس معادلات فوق الذکر تحلیل شده و نتایج استخراج شده است. مقایسه‌ی نتایج با مرجع [۱۸] در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بین نتایج به دست آمده در کار حاضر و نتایج مرجع تطابق بسیار خوبی وجود دارد که بیان‌گر دقت قابل قبول روش تحلیل است.

#### ۵. نتایج و بحث

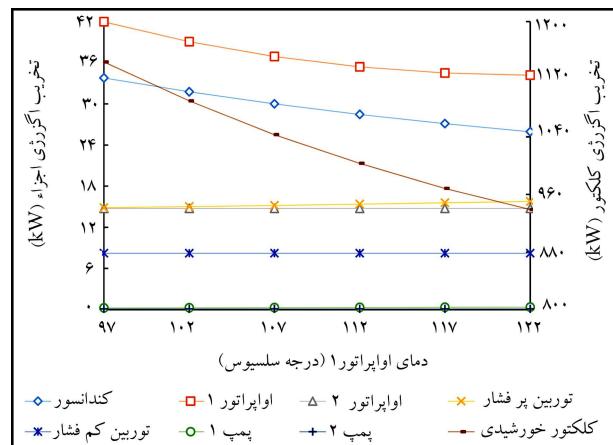
با استفاده از روابط مربوط به انرژی، اگزرسی و اگزرسی - اقتصادی و داده‌های ورودی، چرخه‌ی پیشنهادی شبیه‌سازی شده و نتایج تحلیل انرژی، اگزرسی و اگزرسی - اقتصادی اجزای چرخه در جدول ۶ آمده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی بیشترین مقدار تخریب اگزرسی در کل چرخه مربوط به کلکتور خورشیدی است. به دلیل اتفاق حرارتی زیاد در کلکتور خورشیدی، مقدار تخریب اگزرسی آن نیز زیاد است. همچنین نزدیکی اگزرسی کلکتور خورشیدی نسبت به سایر اجزاء بیشترین مقدار را دارد. شکل ۲ میزان تخریب اگزرسی در اجزای چرخه رانکین آلوی را نشان می‌دهد. اوپراتور ۱ و پمپ ۱ آن کندانسور بیشترین مقدار تخریب اگزرسی را دارند که به دلیل فرایندهای دما ثابت در این دو دستگاه است. کمترین مقدار تخریب اگزرسی نیز مربوط به پمپ‌ها است. بازده قانون اول و قانون دوم چرخه به ترتیب ۸,۸۲٪ و ۱۲,۴۵٪ به دست می‌آید. درین اجزای چرخه، کلکتور خورشیدی کمترین و توربین کم فشار بیشترین بازده قانون دوم را دارند. اوپراتور ۱ و کلکتور خورشیدی به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار ضریب اگزرسی - اقتصادی را دارند، زیرا کلکتور خورشیدی به دلیل راندمان انرژی پایین، اتفاق حرارتی بالایی دارد.

جدول ۶. نتایج انرژی، اگزرسی و آگزرسی - اقتصادی چرخه‌ی پیشنهادی.

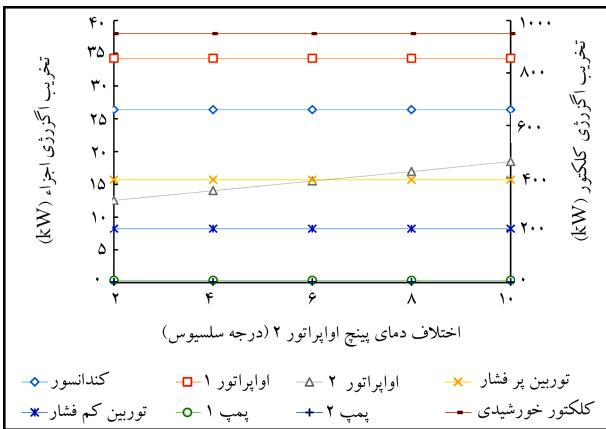
$f$	$\eta_{II}$	$c_p$	$c_F$	$\dot{C}_D$	$\dot{Z}$	$\dot{E}_D$	$\dot{Q} \text{ or } \dot{W}$	جزء
(%)	(%)	(\$/Gj)	(\$/Gj)	(\$/h)	(\$/h)	(kW)	(kW)	
۸/۳۶	۷۹,۶۵	۲۹,۰۳	۲۲,۷	۲,۷۹۸	۰,۲۵۵	۳۴,۲۳	۶۲۸,۸	اوپراتور ۱
۸۰,۳۵	۸۲,۹۸	۲,۶۵	۱,۳	۰,۰۶۹	۰,۲۸۳	۱۴,۷۷	۴۶۸,۵	اوپراتور ۲
۶۴,۸۴	۸۶,۴۴	۴۲,۴۲	۲۹,۳۳	۱,۶۵۷	۳,۰۵۵	۱۵,۶۹	۱۰۰	توربین پرفشار
۹۵,۱۵	۸۵,۸۷	۱۴,۲۲	۳,۲۴	۰,۰۹۶	۱,۸۸۱	۸,۲۳	۵۰	توربین کم فشار
۷۹,۰۸	۸۵,۶۵	۵۰,۹۹	۲۸,۳۲	۰,۰۳۶	۰,۱۳۶	۰,۳۵	۲,۴۶	پمپ ۱
۸۴,۳۹	۸۵,۶۸	۵۸,۶۳	۲۸,۳۲	۰,۰۱۰	۰,۰۵۷	۰,۱۰	۰,۷۲	پمپ ۲
۲۱,۶۲	۲۳,۳	۹۷,۲۹	۱۸,۷۱	۱,۷۷۸	۰,۴۹۰	۲۶,۴	۹۵۰,۵	کندانسور
۱۰۰	۱۵,۰۴	۲۲,۷	۰	۰	۱۳,۷۵	۹۵۰,۱	۶۲۸,۸	کلکتور خورشیدی



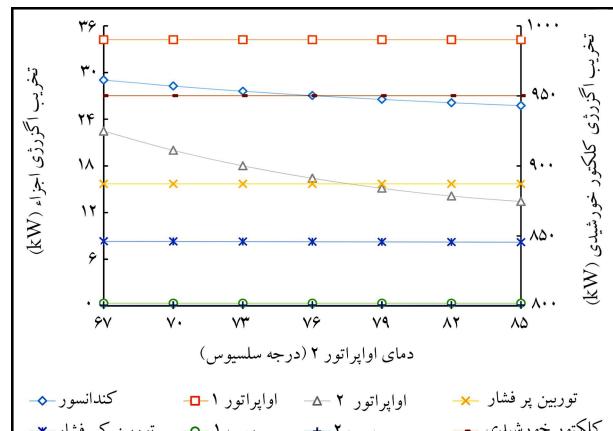
شکل ۵. نمودار تأثیر اختلاف دمای پینچ اوپراتور ۱ روی تحریب اگزرسی اجزای چرخه.



شکل ۳. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۱ روی تحریب اگزرسی اجزای چرخه.



شکل ۶. نمودار تأثیر اختلاف دمای پینچ اوپراتور ۲ روی تحریب اگزرسی اجزای چرخه.

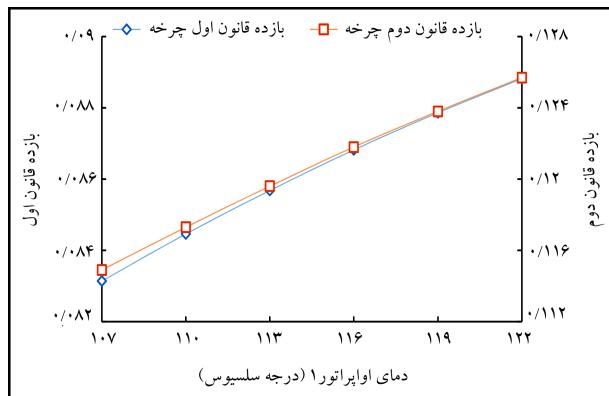


شکل ۴. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۲ روی تحریب اگزرسی اجزای چرخه.

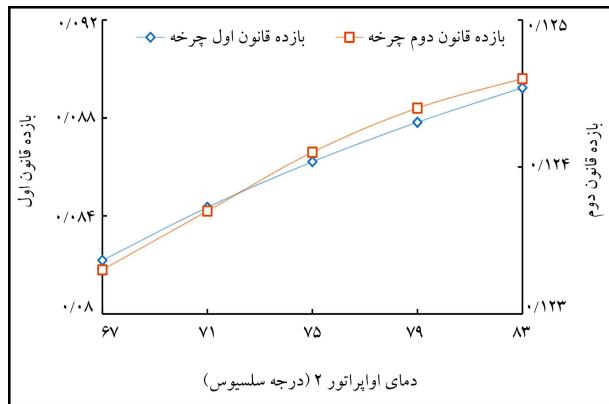
داده شده است. تحریب اگزرسی با افزایش دمای اوپراتور ۲، در اوپراتور ۲، کندانسور و توربین کم فشار، کاهش یافته و در پمپ ۲ افزایش یافته است.

در شکل های ۵ و ۶ میزان تغییرات تحریب اگزرسی برای اجزای چرخه بهاری تعییرات احتلاف دمای پینچ اوپراتور ۱ و اوپراتور ۲ نشان داده شده است. با افزایش

شکل ۳ نشان دهنده تغییرات تحریب اگزرسی اجرای چرخه بر حسب تغییرات دمای اوپراتور ۱ است. با افزایش دمای اوپراتور ۱، تحریب اگزرسی در کلکتور خورشیدی کاهش قابل ملاحظه بی می کند. همچنین تحریب اگزرسی در اوپراتور ۱ و کندانسور کاهش یافته و در توربین پرفشار و پمپ ۱ افزایش می یابد. در شکل ۴ نیز مانند شکل ۳، تأثیر دمای اوپراتور ۲ بر تحریب اگزرسی نشان

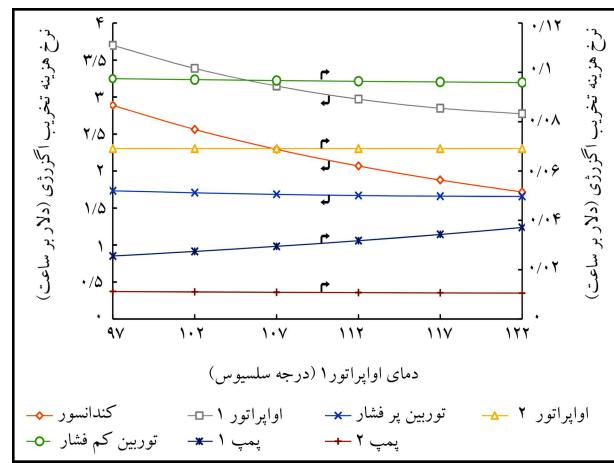


شکل ۹. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۱ بر روی بازده های قانون اول و دوم چرخه.

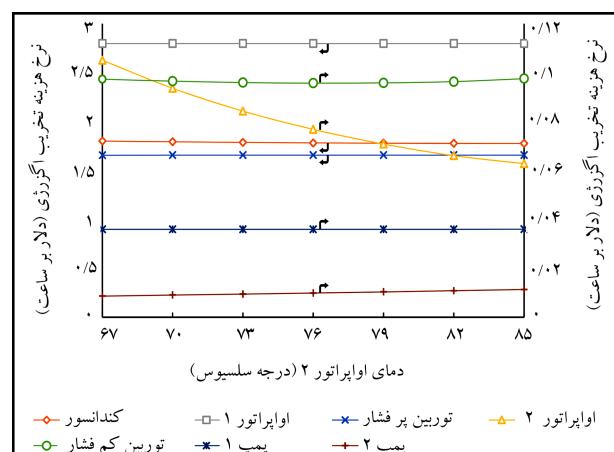


شکل ۱۰. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۲ بر روی بازده های قانون اول و دوم چرخه.

نیز از ۱۱٪/ به ۱۲٪/ افزایش می یابد. در شکل ۱۰ نیز مشابه شکل ۹ با افزایش دمای اوپراتور ۲ از ۶۷ تا ۸۳ درجه سلسیوس، بازده های قانون اول و دوم به ترتیب ۷۰٪/ و ۱۳٪/ افزایش می یابد. در نتیجه افزایش دمای اوپراتورها سبب افزایش بازده ها می شوند.



شکل ۷. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۱ روی نرخ هزینه تخریب اگزرسی اجزای چرخه.



شکل ۸. نمودار تأثیر دمای اوپراتور ۲ روی نرخ هزینه تخریب اگزرسی اجزای چرخه.

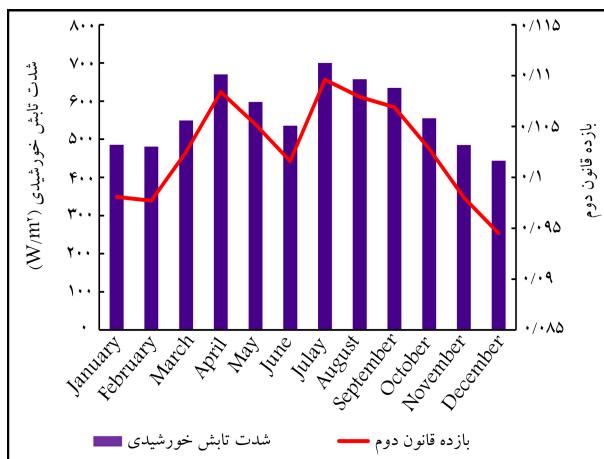
۶. تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر عملکرد چرخه  
شدت تابش خورشیدی در طول سال فصل به فصل، روزانه و حتی ساعتی تغییر می کند. برای در نظر گرفتن این تغییرات از داده های مطالعات موجود [۴۲] استفاده شده است. در این روش یک روز از هر ماه به عنوان نماینده آن ماه انتخاب می شود [۲۵] و متوسط شدت تابش خورشیدی آن روز در ساعات آفتابی محاسبه می شود. جدول ۷ روز نماینده هر ماه، ساعات آفتابی و متوسط شدت تابش خورشیدی روزانه را نشان می دهد. در شکل ۱۱ تأثیر شدت تابش خورشیدی بر سطح تبادل حرارت کلکتور نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۱ هرچه شدت تابش خورشیدی به دهانه کلکتور بیشتر می شود، سطح تبادل حرارت کلکتور (تعداد المان های کلکتور) برای تأمین دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس کاهش یافته و مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ که تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی در ماه های مختلف بر روی بازده قانون اول و دوم چرخه را نشان می دهد، سبب افزایش بازده قانون اول و دوم چرخه می شود. با افزایش شدت تابش خورشیدی از ۳۴٪/ تا ۷۰٪/ وات بر متر مربع، بازده قانون اول از ۷٪/ تا ۴۳٪/ به ۸٪/ تا ۳۶٪/ و بازده قانون دوم از ۹٪/ تا ۴۵٪/ به ۱۰٪/ می رسد. طبق شکل ۱۲ بینترین و کمترین بازده قانون اول و دوم چرخه

اختلاف دما بین سیال گرم و سرد، تخریب اگزرسی افزایش می یابد. در شکل ۵ با افزایش اختلاف دمای پینج اوپراتور ۱، تخریب اگزرسی در اوپراتور ۱ و کلکتور خورشیدی افزایش می یابد. در سایر اجزای چرخه، افزایش اختلاف دمای پینج اوپراتور ۱ تأثیری در تخریب اگزرسی اجزاء ندارد. در شکل ۶ نیز افزایش اختلاف دمای اپراتور ۲ فقط باعث افزایش تخریب اگزرسی در اوپراتور ۲ می شود. در شکل های ۷ و ۸ تغییرات نرخ هزینه تخریب اگزرسی اجزای چرخه بر حسب دمای اپراتور ۱ و ۲ نشان داده شده است. نرخ هزینه تخریب اگزرسی برای کلکتور خورشیدی با توجه به بدن هزینه بدن سوخت کلکتور، که انرژی خورشیدی است، معادل صفر است. با افزایش دمای اپراتور ۱ نرخ هزینه تخریب اگزرسی در کندانسور، اوپراتور ۱، تورین کم فشار، تورین پر فشار و پمپ ۲ کاهش یافته، اما در پمپ ۱ افزایش می یابد. در شکل ۸ نیز با افزایش دمای اپراتور ۲ نرخ هزینه تخریب اگزرسی در کندانسور و اوپراتور ۲ کاهش یافته، و در پمپ ۲ افزایش می یابد. «بازده» مهم ترین پارامتر در تحلیل انرژی و اگزرسی است. در شکل های ۹ و ۱۰ تأثیر تغییرات دمای اوپراتورهای ۱ و ۲ بر بازده های قانون اول و دوم نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در شکل ۹ با افزایش دمای اپراتور ۱ از ۱۰٪/ تا ۱۲٪/ درجه سلسیوس، بازده قانون اول از ۸٪/ تا ۸٪/ به ۸٪/ تا ۸٪/ و بازده قانون دوم

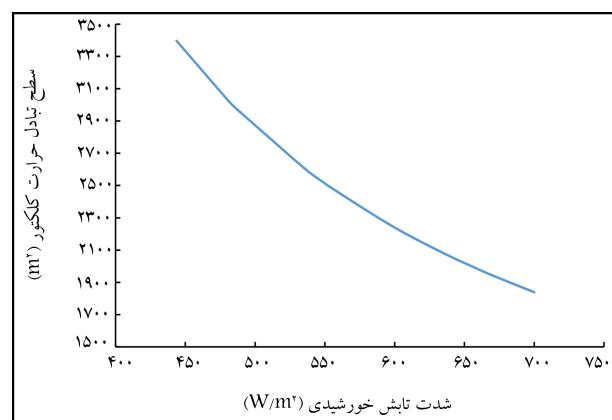
جدول ۷. تغییرات متوسط شدت تابش خورشیدی در ماههای مختلف.<sup>[۲۴]</sup>

ماه	روز در ماه	روز در سال	ساعت آفتابی	متوسط شدت تابش روزانه ( $w/m^2$ )
January	۱۷	۱۷	۶	۴۸۵,۴
February	۱۶	۴۷	۷,۱	۴۸۰,۶۷
March	۱۶	۷۵	۷,۵	۵۴۹,۰۸
April	۱۵	۱۰۵	۷,۸	۶۷۰,۰۲
May	۱۵	۱۳۵	۸,۵	۵۹۷,۷۲
June	۱۱	۱۶۲	۱۰,۴	۵۳۵,۲۹
Julay	۱۷	۱۹۸	۱۱,۱	۷۰۰
August	۱۶	۲۲۸	۱۰,۱	۶۵۷,۲۱
September	۱۵	۲۵۸	۸,۵	۶۳۴,۰۲
October	۱۵	۲۸۸	۷,۹	۵۵۴,۹۰
November	۱۴	۳۱۸	۶,۶	۴۸۴,۷۰
December	۱۰	۳۴۴	۵,۹	۴۴۳,۷

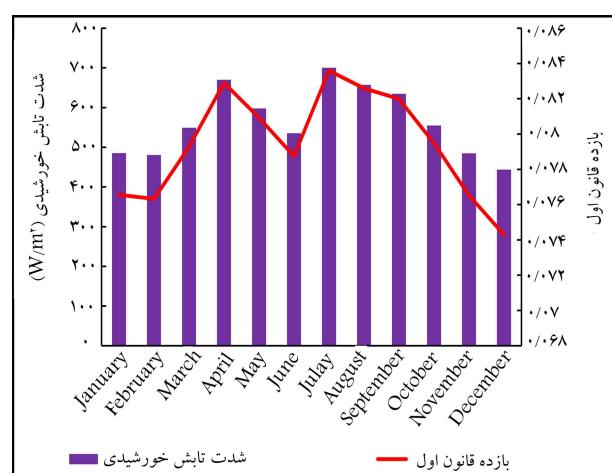


شکل ۱۳. نمودار تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی در ماههای مختلف بر روی بازده قانون دوم.

به ترتیب مربوط به ماه جولای و دسامبر است. لازم به ذکر است که در غیر ساعت آفتابی تولید توان توسط منبع زمین گرمایی که در هر زمان ثابت است، ادامه می‌یابد. در شکل ۱۴ تغییرات نرخ هزینه‌ی تخریب اگزرزی کل اجزای چرخه و تغییرات هزینه‌ی تولید متوسط برق بر حسب شدت تابش خورشیدی نشان داده شده است. با افزایش شدت تابش خورشیدی و بی‌هزینه بودن سوخت و روودی کلکتور بازده چرخه‌ی تولید توان افزایش یافته و این امر سبب کاهش نرخ هزینه‌ی ابتدایی و تعمیر و نگهداری اجرا و به دنبال آن باعث کاهش نرخ هزینه‌ی مرتبط با تولید توان و نرخ هزینه‌ی تخریب اگزرزی کل می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر سطح تبادل حرارت کلکتور.

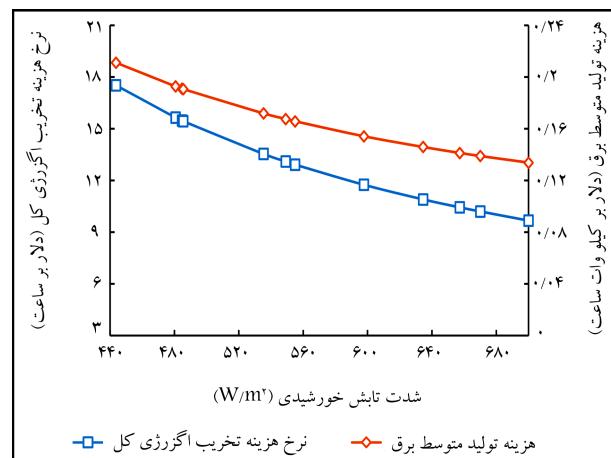


شکل ۱۲. نمودار تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی در ماههای مختلف بر روی بازده قانون اول.

رشد روزافزون نیاز به مصرف انرژی از یک طرف، و محدودیت‌های مرتبط

## فهرست علائم

- $T$ : دما ( $^{\circ}C$ )
- $P$ : فشار ( $kPa$ )
- $\eta_{I,cycle}$ : بازده قانون اول؛
- $\eta_{II,cycle}$ : بازده قانون دوم؛
- $m$ : دمی گرمی؛
- $Q$ : نرخ انتقال گرمای ( $kw$ )
- $\dot{W}$ : نرخ کار ( $kw$ )
- $h$ : آنتالپی ویژه ( $kJ/kg$ )
- $s$ : آنتروپی ویژه ( $kJ/kg$ )
- $\psi$ : اگزرسی فیزیکی ( $kJ/kg$ )
- $\dot{E}_F$ : نرخ اگزرسی سوخت ( $kw$ )
- $\dot{E}_P$ : نرخ اگزرسی محصول ( $kw$ )
- $\dot{E}_L$ : نرخ انلاف اگزرسی ( $kw$ )
- $\dot{E}_D$ : تخریب اگزرسی ( $kw$ )
- $\dot{Z}_k$ : هزینه اولیه برای خرید هر جزو ( $\$/m^3$ )
- $CRF$ : نرخ بارگشت سرمایه؛
- $\varphi$ : ضریب نگهداری؛
- $N$ : ضریب کارکرد سالیانه؛
- $i$ : نرخ سود؛
- $n$ : عمر مفید چرخه؛
- $c_{P,k}$ : هزینه متوسط واحد محصول ( $\$/GJ$ )
- $c_{F,k}$ : هزینه متوسط واحد سوخت ( $\$/GJ$ )
- $\dot{C}_{D,k}$ : هزینه تخریب اگزرسی ( $\$/h$ )
- $f_k$ : ضریب اگزرسی اقتصادی؛
- $\eta_{coll}$ : بازده کلکتور؛
- $G_{tot}$ : مجموع تابش مستقیم و پراکنده خورشید ( $w/m^2$ )



شکل ۱۴. نمودار تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر نرخ هزینه تخریب اگزرسی.

با کمبود منابع انرژی فسیلی و آلایندگی‌های مربوطه از سوی دیگر، نیاز به استفاده از منابع انرژی‌های نو از قبیل انرژی باد، خورشید و زمین گرمایی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. با توجه به اهمیت استفاده از انرژی‌های نو، در مطالعه‌ی حاضر از دو منبع انرژی خورشیدی و زمین گرمایی به منظور تولید الکتریسیته استفاده شده است. طراحی حاضر به گونه‌یی است که هم از ترکیب این دو منبع و هم از هرکدام از منابع به صورت جداگانه می‌توان به استحصال انرژی پرداخت. با استفاده از قانون اول و دوم ترمودینامیک، روابط بالاتر جرم و انرژی و اگزرسی هرکدام از اجزای چرخه‌ی پیشنهادی به دست آمد و سپس با استفاده از نرم افزار EES به حل آنها پرداخته شد. در ادامه به تحلیل اقتصادی چرخه‌ی پیشنهادی پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که بیشترین تخریب اگزرسی به ترتیب در کلکتور خورشیدی، اوپرатор دمبالا و کنداسور چرخه اتفاق افتاد. تحلیل اقتصادی نشان داد که هزینه‌ی تولید متوسط برق بر اساس توربین‌های کم‌فشار و پرفشار در حدود  $28/\text{MWh}$  ( $\$/\text{kwh}$ ) خواهد بود.

## پانوشت

1. organic rankine cycle (ORC)

## منابع (References)

1. Al-Ali, M. and Dincer, I. "Energetic and exergetic studies of a multigenerational solar-geothermal system", *Applied Thermal Engineering*, **71**(1), pp. 16-23 (2014).
2. Tempesti, D. and Fiaschi, D. "Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy", *Energy*, **58**, pp. 45-51 (2013).
3. Bonyadi, N., Johnson, E. and Baker, D. "Technoeconomic and exergy analysis of a solar geothermal hy-
- brid electric power plant using a novel combined cycle", *Energy Conversion and Management*, **156**, pp. 542-554 (2018).
4. Khalid, F., Dincer, I. and Rosen, M.A. "Techno-economic assessment of a solar-geothermal multigeneration system for buildings", *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**(33), pp. 21454-21462 (2017).
5. McTigue, J.D., Castro, J., Mungas, G. and et al. "Hybridizing a geothermal power plant with concentrating solar power and thermal storage to increase power generation and dispatchability", *Applied Energy*, **228**, pp. 1837-1852 (2018).
6. Behzadi, A., Gholamian, E., Ahmadi, P. and et al. "Energy, exergy and exergoeconomic (3E) analyses and multi-objective optimization of a solar and geothermal

- based integrated energy system”, *Applied Thermal Engineering*, **143**, pp. 1011-1022 (2018).
7. Calise, F., d'Accadia, M.D., Macaluso, A. and et al. “Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water”, *Energy Conversion and Management*, **115**, pp. 200-220, (2016).
  8. Aali, A., Pourmahmoud, N. and Zare, V. “Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel combined flash-binary cycle for sabalan geothermal power plant in Iran”, *Energy Conversion and Management*, **143**, pp. 377-390 (2017).
  9. Behnam, P., Arefi, A. and Shafii, M.B. “Exergetic and thermoeconomic analysis of a trigeneration system producing electricity, hot water, and fresh water driven by low-temperature geothermal sources”, *Energy Conversion and Management*, **157**, pp. 266-276 (2018).
  10. Cakici, D.M., Erdogan, A. and Colpan, C.O. “Thermodynamic performance assessment of an integrated geothermal powered supercritical regenerative organic rankine cycle and parabolic trough solar collectors”, *Energy*, **120**, pp. 306-319 (2017).
  11. Elsafi, A.M. “Exergy and exergoeconomic analysis of sustainable direct steam generation solar power plants”, *Energy Conversion and Management*, **103**, pp. 338-347 (2015).
  12. Gholizadeh, T., Vajdi, M. and Rostamzadeh, H. “Energy and exergy evaluation of a new bi-evaporator electricity/cooling cogeneration system fueled by biogas”, *Journal of Cleaner Production*, **233**, pp.1494-1509 (2019).DOI:10.1016/j.jclepro.2019.06.086.
  13. Shokati, N., Ranjbar, F. and Yari, M. “Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: a comparative study”, *Renewable Energy*, **83**, pp. 527-542 (2015).
  14. Colakoglu, M. and Durmazay, A. “Energy, exergy and environmental-based design and multiobjective optimization of a novel solar-driven multi-generation system”, *Energy Conversion and Management*, **227**, p. 113603 (2021).
  15. Farayi, M., Khanmohammadi, S.H. and Pakseresht, A. “Proposed a new geothermal based poly-generation energy system including kalina cycle, reverse osmosis desalination, elecroyzer amplified with thermoelectric: 3E analysis and optimization”, *Applied Thermal Engineering*, **187**, p. 116596 (2021).
  16. Atiz, A., Karakilcik, H., Erden, M. and et al. “Assessment of power and hydrogen production performance of an integrated system based on middle-grade geothermal source and solar energy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**(1), pp. 272-288, (2021).
  17. Ghasemi, H., Sheu, E., Tizzanini, A. and et al. “Hybrid solar-geothermal power generation: optimal retrofitting”, *Applied Energy*, **131**, pp. 158-170 (2014).
  18. Javaherdeh, K., Aminfard, M. and Zoghi, M. “Thermo-economic analysis of organic rankine cycle with cogeneration of heat and power operating with solar and geothermal energy in Ramsar”, *Modares Mechanical Engineering*, **16.13**, pp. 56-63 (In Persian) (2016).
  19. Sonntag, R.E., Borgnakke, C., Van Wylen, G.J. and et al. *Fundamentals of Thermodynamics*, New York, Wiley (1998).
  20. Nemati, A., Sadeghi, M. and Yari, M. “Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic rankine cycle using zeotropic working fluid”, *Desalination*, **422**, pp. 113-123, (2017).
  21. Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M.J., *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons (1996).
  22. Freeman, J., Hellgardt, K. and Markides, C.N. “An assessment of solar-powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications”, *Applied Energy*, **138**, pp. 605-620 (2015).
  23. Towler, G. and Sinnott, R., *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, Elsevier (2012).
  24. Khan, M.S., Abid, M. and Ratlamwala, T.A.H. “Energy, exergy and economic feasibility analyses of a 60 MW conventional steam power plant integrated with parabolic trough solar collectors using nanofluids”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, **43**(1), pp.193-209 (2019).
  25. Sabziparvar, A.A. “A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran”, *Renewable Energy*, **33**(5), pp. 1002-1010 (2008).