

استفاده از یک چرخه ترکیبی تبخیر آنی یک و سه مرحله‌ای با رانکین آلی برای تولید توان از چاه‌های زمین گرمایی سبلان

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۲۳، جلد ۵، شماره ۳، پاییز ۹۹، صفحه ۱۵۴-۱۶۴ - پژوهشی - DOI: 10.22034/jmeut.2020.8552

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مهران عبدالعلی پورعدل

شهرام خلیل آریا*

صمد جعفرمدار

چکیده

استفاده از چرخه‌های ترمودینامیکی با کارابی بالا برای تولید توان از منابع گرمایی موجود یک راهبرد موثر برای توسعه انرژی پایدار است. در این مقاله یک چرخه ترکیبی تولید توان جدید (چرخه ترکیبی تبخیر آنی یک و سه مرحله‌ای با چرخه رانکین آلی) با توجه به دو چاه با دما و فشار متفاوت برای منابع زمین گرمایی سبلان پیشنهاد شده و مورد تحلیل انرژی و اگزرسی قرار گرفته است. در انتها برای چرخه رانکین آلی چهار سیال عامل مناسب، با توجه به فشار جداسازها (یا فشار شیر ابساط ۱، ۲ و ۳)، دمای تبخیر کن و اختلاف دمای نقطه تنفس تبخیر کن بهینه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیال ایزوپتان برای چرخه رانکین مناسب‌تر بوده و برای این سیال در حالت بهینه توان خالص، بازده حرارتی و اگزرسی به ترتیب ۲۳۰/۷۳، ۷۵/۶۷٪ و ۱۹/۷۳٪، محسوبه شده است، در این حالت و در مقایسه با مطالعات قبلی با شرایط یکسان سرچاه‌ها برای نیروگاه سبلان، چرخه پیشنهادی عملکرد بهتری را از دیدگاه انرژی و اگزرسی نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ترمودینامیکی، چرخه تبخیر آنی تک مرحله‌ای، چرخه تبخیر آنی سه مرحله‌ای، چرخه رانکین آلی، نیروگاه زمین گرمایی سبلان.

Use of Integrated Single and Triple flashes with Organic Rankine cycle to Generate Power from Sabalan Geothermal Wells

M. Abdolalipouradl

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Sh. Khalilarya

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

S. Jafarmadar

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

Using high-performance thermodynamic cycles to generate power from existing heat sources is an effective strategy for sustainable energy development. In this study, a new integrated cycle (triple flash and single flash combined cycle with Organic Rankine cycle) based on different real temperatures and pressures in Sabalan geothermal power plant is proposed and analyzed from thermodynamic and exergy viewpoint. A comprehensive parametric study is performed by EES software and then, the proposed cycle is optimized for four considered working fluids relative to the flash chambers' pressure (or valve 1, 2 and 3 pressures), the evaporator temperature, and the pinch point temperature difference of evaporator. The results show that isobutane is the most suitable fluid for the Rankine cycle. The power generation, thermal and exergy efficiency, in this case for optimum condition, was calculated to be 23073 kW, 19/73%, and 75.67%, respectively. In optimum condition and compared to other studies which has similar wellhead for Sabalan geothermal power plant, the proposed cycle had better performance from energy and exergy viewpoints.

Keywords: Thermodynamic analysis, Single flash, Triple flash, Organic Rankine cycle, Sabalan geothermal power plant.

گرمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. برای تولید توان در نیروگاه‌های زمین گرمایی برای دماهای بالای ۱۸۰ درجه سلسیوس بخار ابساط آبی تک و دو مرحله‌ای و برای دماهای کمتر از این مقدار چرخه رانکین آلی^۱ پیشنهاد شده است [۴]. همچنین برای چرخه‌های رانکین آلی سیال‌های مختلفی با توجه به دما، فشار و کاربرد منبع گرم پیشنهاد شده است [۵,۶]. بررسی‌های بسیاری برای آرایش‌های مختلف زمین گرمایی از دیدگاه انرژی، اگزرسی و اگزرسی‌اکونومیکی انجام گرفته است، از جمله در یک بررسی زارع [۷] سه چرخه رانکین ساده، چرخه رانکین با میادله کن گرمایی داخلی و چرخه رانکین بازیاب را تحلیل ترمودینامیکی و اگزرسی‌اکونومیکی انجام داد و طبق نتایج مشاهده کرد که برای چرخه رانکین با میادله کن گرمایی داخلی بیشترین بازده

- مقدمه

با توجه به افزایش نیاز به انرژی در کشورهای در حال توسعه و نیز مسئله آلایندگی در اثر مصرف بی روحی سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های بسیار زیاد، استفاده از سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر با حداقل آلایندگی زیست محیطی و بازده بالا، اهمیت چشم‌گیری یافته است. امروزه انرژی زمین گرمایی، به علت کارابی بیشتر، قابلیت اطمینان و ظرفیت بالا بیشتر مورد توجه بوده به طوریکه تولید توان در بسیاری از کشورها، توسط انرژی زمین گرمایی افزایش پیدا کرده است [۸,۹]. بر اساس دمای منبع زمین گرم، کاربردهای مختلفی برای آن وجود دارد؛ عموماً از دمای منبع زمین گرمایی بالاتر از ۱۵۰ درجه سلسیوس برای نیروگاه‌های تولید توان استفاده می‌شود، در حالیکه از دماهای متوسط زمین گرمایی (۹۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس) و دمای پایین (کمتر از ۹۰ درجه سلسیوس) بیشتر در کاربری مستقیم در واحدهای صنعتی و یا

¹ Organic Rankine Cycle (ORC)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sh.khalilarya@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۹

حرارتی بدست آمده، در حالیکه از لحاظ اقتصادی چرخه رانکین ساده مناسبترین گزینه نسبت به سایر چرخه‌ها است. همچنین یک چرخه تبخر آنی آلی با استفاده از یک مادله کن گرمایی داخلی برای بهبود انتقال گرما از سیال زمین گرمایی توسط مصفا و زارعی [۸] پیشنهاد شد. مقایسه‌ی عملکرد دو چرخه توان زمین گرمایی تبخر تک مرحله‌ای-رانکین و تبخر دو مرحله‌ای برای چهار سیال عامل R141b، R113، بخار آب و n-heptane طبق نتایج، چرخه تبخر تک مرحله‌ای-رانکین دارای بیشترین مقدار قانون اول و دوم بود ولی چرخه تبخر دو مرحله‌ای از لحاظ اقتصادی مناسب‌تر ارزیابی شد. همچنین در تحقیقی دیگر به تحلیل اگرزوکنومیکی و مقایسه‌ی عملکرد چرخه رانکین آلی با مادله کن گرمایی داخلی، رانکین آلی دوغانه، کالینا و چرخه رانکین با فشار دوغانه پرداختند، طبق این بررسی چرخه رانکین آلی فشار دوغانه دارای بیشترین توان تولیدی و چرخه کالینا اقتصادی‌ترین چرخه مورد بررسی می‌باشد [۱۰]. یاری و همکاران [۱۱] در یک مطالعه به تحلیل اقتصادی و مقایسه چرخه رانکین آلی، چرخه کالینا و چرخه رانکین سه وجهی^۱ برای منابع حرارتی دما پایین پرداختند. مطالعاتی نیز به ازای افزایش مراحل تبخر آنی انجام شده است، از جمله راتلامولا و دینسر [۱۲] کارایی سیستم‌های زمین گرمایی چرخه تبخر چندگانه جدید را برای تولید توان و هیدروژن بررسی کردند و مشاهده کردند که افزایش بازده اگرزوی کل سیستم با افزایش تعداد مراحل تبخر از یک مرحله تبخر به پنج مرحله از ۴۷/۲۹٪ به ۶/۵۲٪ افزایش یافته است. فلاخ و همکاران [۱۳] یک چرخه زمین گرمایی را برای چهار حالت بخار خشک، چرخه تبخر تک مرحله‌ای، چرخه تبخر دو سه مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که ظرفیت تولید توان در چرخه تبخر دو مرحله‌ای ۲۷/۷٪ درصد بالاتر از چرخه تبخر تک مرحله‌ای است و همچنین چرخه تبخر سه مرحله‌ای باعث افزایش ۱۰٪ توان تولیدی نسبت به چرخه تبخر دو مرحله‌ای می‌شود.

با توجه پتانسیل بسیار زیاد منطقه سیلان در ایران استفاده از انرژی زمین گرمایی برای تولید توان پیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. جلیلی نصر آبادی [۱۴] برای دو آرایش چرخه تبخر آنی یک و دو مرحله‌ای را برای شرایط نیروگاه زمین گرمایی سیلان برای داده‌های فرضی و یک دسته چاه بررسی و مشاهده کرد که برای چرخه تبخر آنی یک مرحله‌ای در فشار مخزن فلش ۵/۵ بار، توان خالص خروجی ۳۱ مگاوات بدست می‌آید، هچنین نشان داد که اگر برای چرخه تبخر آنی دو مرحله‌ای فشار در مخازن فلش فشار بالا و پایین به ترتیب ۵/۷ و ۱/۱ بار باشند، توان خالص می‌تواند به مقدار ۴۹/۷ مگاوات برسد. در مطالعه دیگری بینا و همکاران [۱۵] برای همان مشخصات و چهار حالت مختلف چرخه رانکین آلی را به ازای سیالات خشک آلی، مورد بررسی قرار دادند و نشان داده شد که چرخه رانکین آلی با مادله کن گرمایی داخلی با بازده انرژی ۲۰/۵۷٪ و بازده اگرزوی ۶۳/۷۲٪ در میان آرایش‌های مورد بررسی، بهترین عملکرد را داشته است. برای نیروگاه زمین گرمایی سیلان در یک مطالعه دیگر مشاهده شد که آرایش چرخه تبخر دو مرحله‌ای نسبت به تبخر آنی یک

مرحله‌ای توان بیشتری را تولید می‌کند [۱۶]. با در نظر گرفتن شرایط واقعی و دو دسته چاه با دما و فشار متفاوت، یک آرایش جدید ترکیبی تبخر آنی دو مرحله‌ای با رانکین آلی توسط عالی و همکارانش [۱۷] پیشنهاد شد. برای سیال R141b حداکثر توان خالص و راندمان حرارتی ۱۷/۱۱ مگاوات و ۱۴/۳۵٪ محاسبه شد، همچنین این چرخه پیشنهادی را مورد تحلیل اگرزوکنومیکی و بهینه‌سازی اقتصادی قرار دادند [۱۸]. همچنین برای شرایط واقعی چاههای سیلان، عبدالعلی پور و همکاران [۱۸] یک چرخه ترکیبی تولید توان جدید (شامل یک چرخه ترکیبی از دو چرخه تبخر تک مرحله‌ای که از چرخه دی‌اکسید کربن گذر بحرانی و رانکین آلی به عنوان چرخه تحتانی استفاده شده است) پیشنهاد دادند. برای چرخه تبخر تک مرحله‌ای درحالت بهینه توان خالص ۱۹۹۳۴ کیلووات، بازده انرژی ۱۷/۰۵٪ و بازده اگرزوی ۶۵/۳۸٪ بدست آمد [۱۹].

در این مطالعه با توجه ثابت بودن دمای منبع زمین گرمایی سیلان، یک آرایش جدید برای افزایش تولید توان پیشنهاد شده است. تاکنون هیچ مطالعه‌ای برای چرخه تبخر سه مرحله‌ای در سیلان برای چاههای مختلف انجام نشده است. چرخه پیشنهادی جدید از ترکیب چرخه تبخر سه مرحله‌ای برای چاههای فشار بالا، چرخه تبخر یک مرحله‌ای برای چاههای فشار پایین و یک چرخه رانکین آلی تشکیل شده است. ابتدا یک بررسی جامع پارامتری برای چرخه ترکیبی پیشنهادی از دیدگاه انرژی و اگرزوی انجام شده و در نهایت به ازای چهار سیال آلی با توجه به پارامترهای مؤثر نسبت به توان تولیدی بهینه‌سازی انجام شده است.

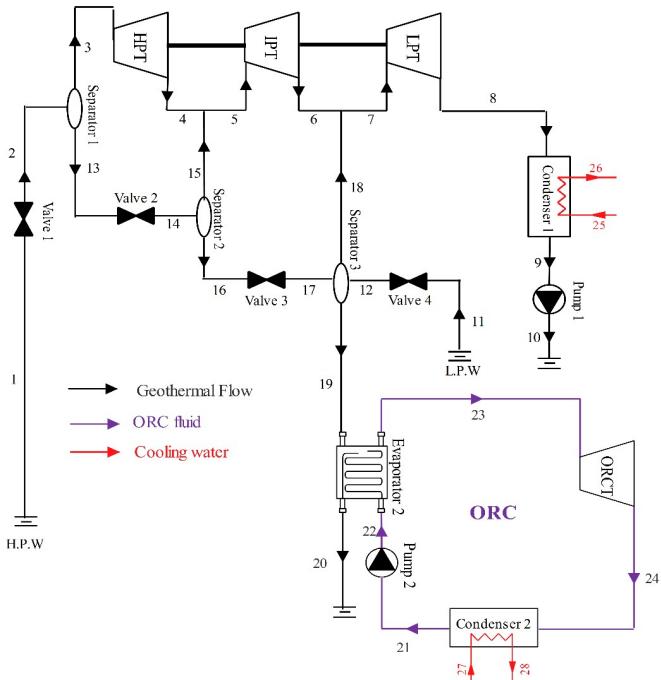
۲- توصیف چرخه جدید پیشنهادی و فرضیات

دو دسته چاه با مشخصات دمایی و فشاری مختلف در نیروگاه زمین گرمایی سیلان به بهره‌برداری رسیده که با توجه شرایط این چاهها، آرایش جدید برای تولید توان پیشتر در شکل ۱ به نمایش درآمده است. آب زمین گرمایی از چاههای فشار بالا^۲ منبسط شده و پس از جداشدن بخار، وارد توربین فشار بالا شده تا کار انجام شود. مایع خارج شده از جداساز ۱ وارد شیر انبساط دوم شده تا فشار کاهش یابد، ضمن کاهش فشار و طی یک فرایند آنتالیی ثابت، بخار ایجاد می‌شود، بخار اشباع در این مرحله در جداساز دوم از مایع اشباع جدا شده و ضمن مخلوط شدن با سیال خارج شده از توربین فشار بالا، وارد توربین فشار پایین می‌شود تا کار انجام شود. از سوی دیگر آب زمین گرمایی خارج شده از چاههای فشار پایین^۳، بعد از منبسط شدن در شیر انبساط ۴ و رسیدن به فشار جداساز سوم، با سیال زمین گرمایی خارج شده از توربین فشار میانی مخلوط شده و سپس این جریان وارد توربین فشار پایین می‌شود تا کار تولید شود. سیال زمین گرمایی خارج شده از توربین فشار پایین وارد چگالنده شده تا تبدیل به مایع شده و توسط

²High Pressure Well (HPW)

³Low Pressure Well (LPW)

^۱Trilateral Rankine Cycle



شکل ۱- چرخه پیشنهادی ترکیبی برای تولید توان از چاههای زمین گرمایی سبلان

توبین‌ها و پمپ‌ها دارای راندمان آیزنتروپیک ۸۵٪ و ۹۰٪ می‌باشد.

برای خواص ترمودینامیکی سر چاههای نیروگاه سبلان از جدول ۱ که به صورت واقعی از نیروگاه زمین گرمایی بدست آمده، استفاده شده است.

جدول ۱ - خواص واقعی چاههای زمین گرمایی سبلان [۱۷، ۱۸]

چاه دوم	چاه اول	چاهها
۷۰۰	۱۰۷۲	(kPa) فشار
۱۶۵	۱۸۳	(°C) دما
۵۳	۵۷	(kg/s) دی جرمی
۱۱۰۰	۱۱۵۰	(kJ/kg) آنتالپی

۳- تحلیل ترمودینامیکی

۱-۳ تحلیل انرژی

موازنہ جرم و انرژی برای ہر جز با در نظر گرفتن حجم کنترل برای ہر یک از اجزای سیستم به صورت زیر نوشته می شود [۱۷-۱۹]:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (1)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_o h_o \quad (7)$$

برای بازده آیزنتروپیک توربین‌ها و توان تولیدی هریک از آن‌ها به نتیجه خواهیم داشت:

$$\eta_{Tur} = \frac{h_i - h_o}{h_i - h_{o,s}} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m} (h_i - h_o) \quad (\text{F})$$

برای بازده آیزنتروپیک پمپها و توان مصرفی هریک از آن‌ها به

نرتیب خواهیم داشت [۱۷-۱۹]:

- پمپ به چاه تزریق شود. از سوی دیگر به علت اینکه مایع اشباع خارج شده از جداساز ۳ دارای دمای بالایی می‌باشد، از چرخه رانکین آلی به عنوان چرخه تحتانی استفاده شده تا از اتلاف انرژی جلوگیری شود. سیال آلی در چرخه تحتانی با گرفتن انرژی در تبیخیر کن وارد توربین شده تا توان تولید کرده و با عبور از چگالنده وارد پمپ شده تا فشار بالای چرخه برسد.

به منظور ساده‌سازی در شبیه‌سازی، فرض‌های زیر به کار گرفته شده است [۱۷-۱۹]:

- سیستم ترکیبی در حالت پایا کار می کند.
 - افت فشار و تلفات حرارتی در لوله ها و مبادله کن های گرمایی ناچیز بوده و از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است.

برای تبخیر کردن سیال چرخه رانکین آلی در تبخیرکن، حداقل اختلاف دمایی^۱ ۳۰ تا ۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

- سیال عامل آلی R141b در حالت بررسی پارامتری و جدول مشخصات انتخاب شده است.
 - دمای محیط ۱۵ درجه سلسیوس و فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال برای این بررسی در نظر گرفته شده است.
 - دمای چالندها ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

¹ Pinch Point Temperature Difference (PPTD)

متغیر ذکر شده که محدوده آن‌ها طبق روابط (۱۸-۲۲) است، خواهیم داشت:

$$\text{Maximize } \dot{W}_{\text{net}}(P_2, P_{12}, P_{14}, \Delta T_{\text{pp, ev}}, T_{\text{ev}}) \quad (17)$$

$$P_{14} \leq P_2 \text{ (kPa)} \leq 1072 \quad (18)$$

$$P_{12} \leq P_{14} \text{ (kPa)} \leq P_2 \quad (19)$$

$$100 \leq P_{12} \text{ (kPa)} \leq 700, P_{12} \leq P_{14} \quad (20)$$

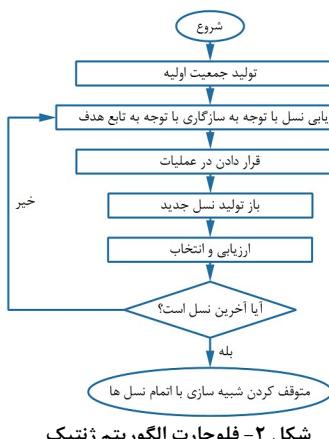
$$10 \leq \Delta T_{\text{pp, ev}} \left({}^{\circ}\text{C} \right) \leq 30 \quad (21)$$

$$60 \leq T_{\text{ev}} \left({}^{\circ}\text{C} \right) \leq 140 \quad (22)$$

در رابطه (۱۸) فشار جداساز اول تا فشار چاه اول قابل افزایش بوده و از فشار نقطه‌ی ۱۴ بالاتر بوده تا توربین فشار بالا قابلیت تولید توان داشته باشد. در واقع برای فشار جداساز دوم برای کارکرد توربین میانی باید بین فشار نقاط ۲ و ۱۲ باشد و برای فشار جداساز سوم علاوه بر کمتر بودن از فشار چاه دوم یعنی ۷۰۰ کیلوپاسکال، برای عملکرد توربین میانی باید بالاتر از فشار ۱۴ بوده و از سوی دیگر برای عملکرد بالای فشار جو باید بیشتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شود. در واقع محدوده فشار برای جداسازها طبق روابط (۱۸) تا (۲۰) باشند. با توجه به روابط (۱۶-۱۴) بهینه‌سازی تک هدفه توان خالص منجر به بهینه‌سازی بازده انرژی و اگررژی نیز خواهد شد. بهینه‌سازی تک هدفه توان خالص چرخه براساس پارامترهای ذکر شده و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک همانند شکل ۲ در نرم افزار E.E.S [۲۱] انجام می‌شود.

۵-۳- انتخاب سیال عامل

برای چرخه ترکیبی و قسمت چرخه رانکین آبی، چهار سیال عامل آبی ایزوپوتان، R141b، R142b و R600 برای بررسی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی انتخاب شده است. بازده بیشتر، عدم تخریب لایه‌ی اوزن، کم اسیدی بودن، کم بودن دمای جوش نرمال (NBT)، عملکرد مناسب آن‌ها در تبخیرکن رانکین، از ویژگی‌های مناسب این سیال‌ها برای انتخاب در قسمت رانکین آبی است که در جدول ۳ آمده است [۶-۱۶].



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم ژنتیک

جدول ۳- مشخصات سیال‌های عامل انتخابی

سیال	T _{cr} (°C)	NBT (°C)	ODP	اسیدی
ایزوپوتان	۱۳۴/۷	-۱۱/۶۸	.	کم

$$\eta_P = \frac{v_i (P_o - P_i)}{h_o - h_i} \quad (5)$$

$$\dot{W}_P = \dot{m}_i (h_o - h_i) \quad (6)$$

با در نظر گرفتن اختلاف نقطه تنگش برای تبخیرکن خواهیم داشت:

$$T_{PP, ev} = T_{ev} + \Delta T_{pp, ev} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{19} (h_{19} - h_{PP}) = \dot{m}_{23} (h_{23} - h(T_{ev}, x = 0)) \quad (8)$$

۲-۳- تحلیل اگررژی

تحلیل اگررژی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای تعیین نوع و میزان دقیق اگررژی هدر رفته در هر جز از سیستم‌های انرژی باشد، با صرف نظر از اگررژی جنبشی، پتانسیل و شیمیایی مقدار اگررژی کل برای هر جریان که برای اگررژی فیزیکی خواهد بود طبق رابطه (۹) بدست خواهد آمد [۱۹-۲۰]:

$$\dot{E}_x_{tot} = \dot{E}_x_{ph} = \dot{m} (h - h_0 - T_0 (s - s_0)) \quad (9)$$

برای محاسبه تخریب اگررژی هر عضو با در نظر گرفتن حجم کنترل می‌توان از روابط (۱۰) یا (۱۱) استفاده کرد [۱۱-۲۰]:

$$\dot{E}_x_{heat} + \sum \dot{E}_x_{in} = \sum \dot{E}_x_{out} + \dot{W} + \dot{E}_x_D \quad (10)$$

$$\dot{E}_x_D = \dot{E}_x_F - \dot{E}_x_P \quad (11)$$

$\dot{E}_x_F, \dot{E}_x_P, \dot{E}_x_{in}, \dot{E}_x_{out}, \dot{E}_x_{heat}$ به ترتیب به عنوان نرخ اگررژی گرمایی، نرخ اگررژی خروجی، اگررژی ورودی، اگررژی سوخت و محصول بیان می‌گردد. همچنین نسبت تخریب اگررژی و بازده اگررژیکی هر عضو برای مقایسه بهتر تخریب اگررژی اجزا به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹-۲۰]:

$$y_k = \frac{\dot{E}_x_{D,k}}{\dot{E}_x_{F,tot}} \quad (12)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_x_{P,k}}{\dot{E}_x_{F,k}} \quad (13)$$

روابط انرژی و اگررژی استفاده شده برای چرخه پیشنهادی در جدول ۲ آمده است.

۳-۳- عملکرد کلی چرخه

برای محاسبه بازده انرژی و اگررژی از روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده می‌شود که در این معادلات کار خالص مطابق رابطه (۱۶) برای کل چرخه بدست می‌آید [۱۹]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{m}_1 (h_1 - h_0) + \dot{m}_{11} (h_{11} - h_0)} \quad (14)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{E}_x_1 + \dot{E}_x_{11}} \quad (15)$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{HPT}} + \dot{W}_{\text{IPT}} + \dot{W}_{\text{LPT}} + \dot{W}_{\text{ORCT}} - (\dot{W}_{P1} + \dot{W}_{P2}) \quad (16)$$

۴-۳- بهینه سازی

توان خالص، بازده انرژی و اگررژی چرخه ترکیبی به فشار جداساز اول، فشار جداساز دوم، فشار جداساز سوم، اختلاف دمای نقطه تنگش تبخیرکن و دمای تبخیرکن وابسته است. در واقع برای بهینه‌سازی توان چرخه طبق رابطه (۱۷)، پنج متغیر وابسته و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است، برای بهینه‌سازی توان خالص نسبت به پنج

۱-۴- بررسی پارامتری

با توجه به مقادیر موجود در جدول ۵، یک بررسی جامع برای تمام پارامترهای تاثیرگذار روی عملکرد چرخه پیشنهادی، انجام شده

کم	۰/۰۸۶	۳۲/۰۶	۲۰۴/۲	R141b
کم	۰/۰۴۳	-۹/۰۳	۱۳۷/۱	R142b
کم	۰	-۰/۰۵۳	۱۵۲	R600

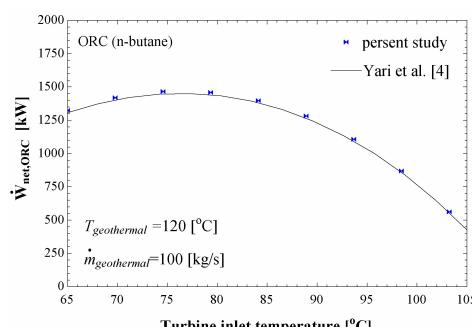
جدول ۲ - روابط انرژی، اگزرزی سوخت و محصول برای اجزای چرخه ترکیبی

اجزایی محصول	اجزایی سوخت	روابط انرژی	جزء
$\dot{E}x_2$	$\dot{E}x_1$	$h_2 = h_1$	شیر انسپاسط ۱
$\dot{E}x_3 + \dot{E}x_{13}$	$\dot{E}x_2$	$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{13} h_{13}$	جداساز ۱
\dot{W}_{HPT}	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_4$	$\eta_{HPT} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4S}} \cdot \dot{W}_{HPT} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$	توربین فشار بالا
$\dot{E}x_{14}$	$\dot{E}x_{13}$	$h_{13} = h_{14}$	شیر انسپاسط ۲
$\dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{16}$	$\dot{E}x_{14}$	$\dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{16} h_{16}$	جداساز ۲
$\dot{E}x_5$	$\dot{E}x_{15} + \dot{E}x_4$	$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_4 h_4$	اختلاط ۱
\dot{W}_{IPT}	$\dot{E}x_5 - \dot{E}x_6$	$\eta_{IPT} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6S}} \cdot \dot{W}_{IPT} = \dot{m}_5 (h_5 - h_6)$	توربین فشار میانی
$\dot{E}x_{17}$	$\dot{E}x_{16}$	$h_{16} = h_{17}$	شیر انسپاسط ۳
$\dot{E}x_{12}$	$\dot{E}x_{11}$	$h_{12} = h_{11}$	شیر انسپاسط ۴
$\dot{E}x_{18} + \dot{E}x_{19}$	$\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{17}$	$\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{m}_{17} h_{17} = \dot{m}_{18} h_{18} + \dot{m}_{19} h_{19}$	جداساز ۳
$\dot{E}x_7$	$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_{18}$	$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{18} h_{18}$	اختلاط ۲
\dot{W}_{LPT}	$\dot{E}x_7 - \dot{E}x_8$	$\eta_{LPT} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8S}} \cdot \dot{W}_{LPT} = \dot{m}_7 (h_7 - h_8)$	توربین فشار پایین
$\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{25}$	$\dot{E}x_8 - \dot{E}x_9$	$\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{25} h_{25} = \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{26} h_{26}$	چگالنده ۱
$\dot{E}x_{10} - \dot{E}x_9$	\dot{W}_{P1}	$\eta_{P1} = \frac{v_9 (P_{10} - P_9)}{h_{10} - h_9} \cdot \dot{W}_{P1} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9)$	پمپ ۱
$\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{22}$	$\dot{E}x_{19} - \dot{E}x_{20}$	$\dot{m}_{19} h_{19} + \dot{m}_{22} h_{22} = \dot{m}_{20} h_{20} + \dot{m}_{23} h_{23}$	تبخیر کن
\dot{W}_{ORCT}	$\dot{E}x_{23} - \dot{E}x_{24}$	$\eta_{ORCT} = \frac{h_{23} - h_{24}}{h_{23} - h_{24S}} \cdot \dot{W}_{ORCT} = \dot{m}_{23} (h_{23} - h_{24})$	توربین رانکین آلی
$\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{27}$	$\dot{E}x_{24} - \dot{E}x_{21}$	$\dot{m}_{24} h_{24} + \dot{m}_{27} h_{27} = \dot{m}_{21} h_{21} + \dot{m}_{28} h_{28}$	چگالنده ۲
$\dot{E}x_{22} - \dot{E}x_{21}$	\dot{W}_{P2}	$\eta_{P2} = \frac{v_{21} (P_{22} - P_{21})}{h_{22} - h_{21}} \cdot \dot{W}_{P2} = \dot{m}_{21} (h_{22} - h_{21})$	پمپ ۲

است. در شکل ۴ توان خالص چرخه، بازده حرارتی و اگزرزی بر حسب

۶-۳- اعتبار سنجی

برای اعتبار سنجی کار حاضر، در دو بخش، چرخه تبخیر سه مرحله‌ای و چرخه رانکین آلی با نتایج مطالعات گذشته مقایسه شده است. نتایج جدول ۴ و شکل ۳ حاکی از مطابقت قابل قبول نتایج کار حاضر با نتایج تحقیقات پیشین می‌باشد.



شکل ۳- نتایج مدل‌سازی قسمت رانکین آلی چرخه و نتایج پژوهش یاری [۴]

جدول ۴- نتایج مدل‌سازی چرخه تبخیر سه مرحله‌ای

مطالعه فلاح [۱۳]	کار حاضر	چاهها
۱۰۶/۸	۱۰۹	(kW)
۱۴/۵۱	۱۴/۶	(%)

مشخصات ترمودینامیکی مانند دما، فشار، آنتالیی، آتروبی، دی‌جرمی برای چرخه ترکیبی جدید با سیال R141b با در نظر گرفتن شرایط ترمودینامیکی، فشار جداسازهای اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۰۰۰، ۷۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، دمای تبخیر کن ۸۵ درجه سلسیوس و اختلاف نقطه تنگش ۱۰ درجه سلسیوس برای تبخیر کن در جدول ۵ آمده است. برای این حالت توان خالص تولیدی ۱۹/۹۶ مگاوات، بازده حرارتی ۱۷/۰۷٪، بازده اگزرزی ۶۵/۴۵٪ و تخریب ۸۱۷۱ کیلووات، بدست می‌آیند.

۴- نتایج و بحث

۲/۱۴۱	۷۶۲/۹	۴۶/۰۵	۷۵۰	۱۶۷/۸	زمین گرمایی	۱۴
۶/۶۸۴	۲۷۶۶	۱/۱۹۳	۷۵۰	۱۶۷/۸	زمین گرمایی	۱۵
۲/۰۲	۷۰/۹/۶	۴۴/۸۶	۷۵۰	۱۶۷/۸	زمین گرمایی	۱۶
۲/۰۴۴	۷۰/۹/۶	۴۴/۸۶	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۱۷
۶/۸۲۱	۲۷۴۹	۱۳/۰۳	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۱۸
۱/۸۶۱	۶۴۰/۴	۸۴/۸۳	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۱۹
۰/۹۹۰۷	۳۰۵/۸	۸۴/۸۳	۵۰۰	۷۲/۹۷	زمین گرمایی	۲۰
۰/۲۵۴۱	۶۷/۵۱	۱۰۶/۳	۷۸/۴۷	۲۵	R14Ib	۲۱
۰/۲۵۴۲	۶۷/۸۷	۱۰۶/۳	۴۷۷/۶	۲۵/۰۳	R14Ib	۲۲
۱/۰۱۹	۳۳۴/۹	۱۰۶/۳	۴۷۷/۶	۸۵	R14Ib	۲۳
۱/۰۳۸	۳۰۱/۴	۱۰۶/۳	۷۸/۴۷	۳۴/۱۷	R14Ib	۲۴
۰/۲۲۴۴	۶۳/۰۱	۲۲۵۲	۱۰۱/۱	۱۵	آب	۲۵
۰/۳۰۱۳	۸۵/۴۲	۲۲۵۲	۱۰۱/۱	۲۰/۳۶	آب	۲۶
۰/۲۲۴۲	۶۳/۰۱	۱۲۰۰	۱۰۱/۱	۱۵	آب	۲۷
۰/۲۴۱۲	۶۷/۹۲	۱۲۰۰	۱۰۱/۱	۱۶/۱۷	آب	۲۸

مقدار توان توربین فشار میانی کاهش پیدا می‌کند. درنتیجه این روندها باعث ایجاد نقطه بیشینه برای توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگررژی برای فشار جداساز سوم (تقریباً ۵۱۰ کیلوپاسکال) می‌شود. تغییرات توان خالص چرخه، بازده‌های حرارتی و اگررژی بر حسب دمای تبخیرکن در شکل ۷ ترسیم شده است، با افزایش دمای تبخیرکن دبی جرمی چرخه رانکین آلی کاهش پیدا کرده، در حالیکه دما و آنتالپی تبخیرکن یا همان ورودی توربین چرخه رانکین افزایش پیدا می‌کند که این دو حالت متناقض باعث می‌شود به ازای یک دمای خاص تبخیرکن، توان توربین چرخه رانکین آلی و کل چرخه ترکیبی، بازده‌های حرارتی و اگررژی به بیشینه خود برسند. توان چرخه‌ی ترکیبی، بازده انرژی و اگررژی به ترتیب تقریباً دارای مقادیر بیشینه ۱۹۹۰۰ کیلووات، ۶۵/۵٪ و ۱۷٪ در دمای تبخیرکن ۹۰ درجه سلسیوس می‌باشند.

افزایش دمای اختلاف تنگش تبخیرکن چرخه رانکین، باعث کاهش مقدار توان تولیدی توربین چرخه رانکین می‌شود. در واقع افزایش حداقل اختلاف دمایی، باعث افزایش برگشت ناپذیری در تبخیرکن و نهایتاً کاهش گرمای منتقل شده به سیال چرخه رانکین آلی می‌شود. این روند کاهشی باعث کاهش توان توربین چرخه رانکین آلی و درنتیجه کل چرخه ترکیبی می‌شود که در شکل ۸ مشاهده می‌شود. روند کاهش بازده حرارتی و بازده اگررژی به ازای افزایش دمای اختلاف تنگش تبخیرکن همانند روند کاهشی توان خالص چرخه خواهد بود. به ازای حداقل اختلاف نقطه تنگش ۱۰ درجه و دمای تبخیرکن ۸۵ درجه کلوین برای توان چرخه ترکیبی، راندمان انرژی و اگررژی به ترتیب مقدار ۱۹۹۰۰ کیلووات، ۶۵/۵٪ و ۱۷٪ می‌باشند.

توان خالص چرخه بر حسب دمای تبخیرکن برای چهار چهار سیال آلی ایزوبوتان، R141b، R142b و R600 در شکل ۹ نمایش داده شده است، ایزوبوتان دارای بیشترین مقدار توان خالص در حالت دمای

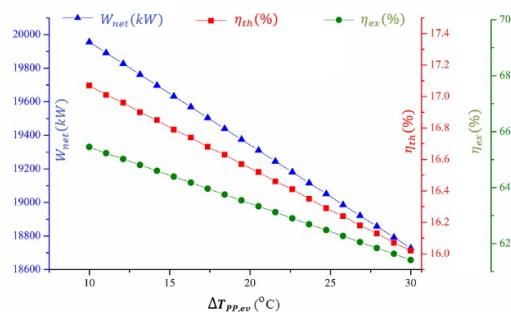
فشار جداساز اول نشان داده شده است. طبق شکل ۴، چرخه ترکیبی در حالتی که دارای بیشترین مقدار فشار جداساز اول یا به عبارتی شیر انبساط باز باشد، دارای بیشترین مقدار توان خالص، بازده حرارتی و اگررژی می‌باشد. با افزایش فشار جداساز، مقدار دبی جرمی عبوری از توربین فشار بالا کاهش پیدا کرده و لی از سوی دیگر فشار آنتالپی ورودی توربین فشار بالا افزایش پیدا می‌کند. با افزایش فشار جداساز اول، افزایش آنتالپی بر کاهش دبی جرمی عبوری غلبه کرده و باعث افزایش توان خروجی توربین فشار بالا و درنتیجه کار خالص چرخه می‌شود. افزایش توان خروجی توربین فشار بالا و درنتیجه کار خالص چرخه به روابط (۱۶-۱۴) باعث افزایش بازده حرارتی و بازده اگررژی می‌شود.

تأثیر افزایش فشار جداساز دوم روی توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگررژی در شکل ۵ نمایش داده شده است، با افزایش فشار جداساز دوم کار خالص چرخه ابتدا افزایش پیدا کرده و بعد از نقطه بیشینه، دوباره کاهش پیدا می‌کند. با افزایش فشار جداساز دوم، فشار نقطه ۱۵ یا ۴ افزایش (به عبارت دیگر آنتالپی نقطه ۴ افزایش می‌یابد) پیدا می‌کند و باعث کاهش توان توربین فشار بالا می‌شود، از سوی دیگر افزایش فشار جداساز دوم، باعث افزایش توان توربین فشار میانی می‌شود، تا نقطه بیشینه برای فشار جداساز دوم، افزایش توان توربین فشار میانی بر کاهش توان توربین فشار بالا غلبه کرده و باعث ایجاد نقطه بیشینه می‌شود، بعد از نقطه بیشینه این روند برای دو توربین بر عکس می‌شود. همانطور که گفته شد روند بازده حرارتی و بازده اگررژی شبیه روند توان خالص چرخه در شکل ۵ می‌باشد. با افزایش فشار جداساز دوم مقدار بازده حرارتی و بازده اگررژی تا ۱۷/۰۶٪ و ۶۵/۴۱٪ افزایش می‌یابد.

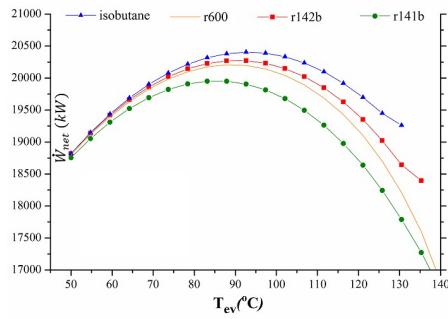
تأثیر افزایش فشار جداساز سوم روی توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگررژی چرخه ترکیبی در شکل ۶ نمایش بر حسب فشار جداساز سوم نشان داده شده است، با افزایش فشار جداساز سوم ابتدا توان خالص با روند بیشتری افزایش یافته و بعد از نقطه بیشینه با روند ملایمی کاهش می‌یابد. با افزایش فشار جداساز سوم توان تولیدی توربین فشار پایین و توربین چرخه رانکین آلی افزایش پیدا کرده ولی

جدول ۵- نتایج تحلیل ترمودینامیکی چرخه پیشنهادی

S (kJ/kgK)	h (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (°C)	سیال	نقطه
-	-	-	۱۰۱/۱	۱۵	میانا	*
۲/۹۸۸	۱۱۵۰	۵۷	۱۰۷۲	۱۸۳	زمین گرمایی	۱
۲/۹۹۳	۱۱۵۰	۵۷	۱۰۰۰	۱۷۹/۹	زمین گرمایی	۲
۶/۵۸۶	۲۷۷۸	۱/۰۹۵	۱۰۰۰	۱۷۹/۹	زمین گرمایی	۳
۶/۶۰۵	۲۷۳۱	۱/۰۹۵	۷۵۰	۱۶۷/۸	زمین گرمایی	۴
۶/۶۱۲	۲۷۳۴	۱۲/۱۴	۷۵۰	۱۶۷/۸	زمین گرمایی	۵
۶/۶۳۹	۲۶۷۱	۱۲/۱۴	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۶
۶/۷۳۳	۲۷۱۱	۲۵/۱۷	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۷
۷/۰۹	۲۱۰۹	۲۵/۱۷	۳/۱۶۹	۲۵	زمین گرمایی	۸
۰/۳۶۷	۱۰۴/۸	۲۵/۱۷	۳/۱۶۹	۲۵	زمین گرمایی	۹
۰/۳۶۷	۱۰۴/۹	۲۵/۱۷	۱۱۰	۲۵	زمین گرمایی	۱۰
۲/۹۱۲	۱۱۰۰	۵۳	۷۰۰	۱۶۵	زمین گرمایی	۱۱
۲/۹۴۲	۱۱۰۰	۵۳	۵۰۰	۱۵۱/۹	زمین گرمایی	۱۲
۲/۱۳۹	۷۶۲/۹	۴۶/۰۵	۱۰۰۰	۱۷۹/۹	زمین گرمایی	۱۳

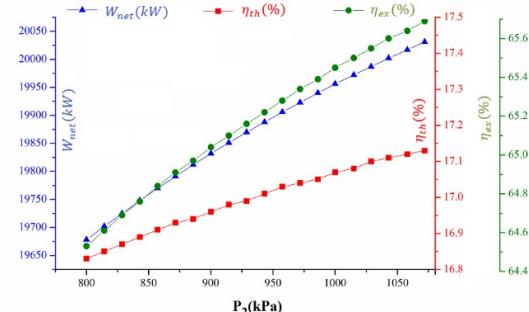


شکل ۸- توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگزرسی بر حسب اختلاف دمای نقطه تنگش تبخیرکن

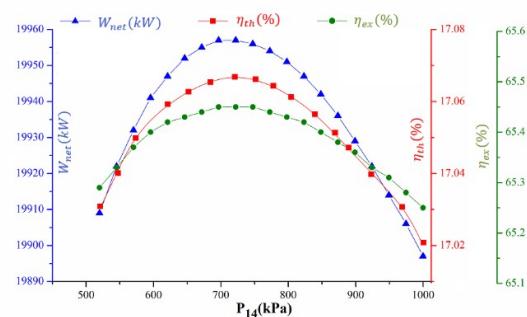


شکل ۹- توان خالص چرخه نسبت به دمای تبخیرکن به ازای سیال‌های آلی مورد بررسی

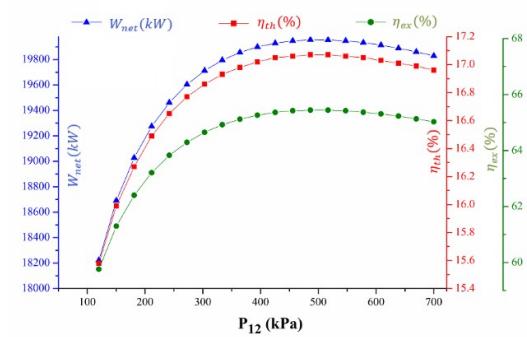
تبخیرکن بهینه می‌باشد. شرایط تطابق دمایی با مشخصات آب زمین گرمایی برای ایزوپوتان باعث بیشتر بودن انتقال گرما در تبخیرکن و افزایش توان توربین رانکین و کل چرخه ترکیبی می‌شود. با توجه به اینکه فشار جداساز دوم و سوم روی هم تاثیر می‌گذارند، برای بررسی اثرات این دو فشار روی توان، نتایج به صورت سه بعدی در شکل ۱۰ ترسیم شده است. مطابق شکل ۱۰ واضح است که با ازای هر دو مقدار فشار جداسازها در یک نقطه توان چرخه به بیشنه مقدار خود می‌رسد که این بیشینه مقدار فشار جداسازها با شکل ۵ و ۶ مشابه است. دارند. به همین ترتیب توان خالص چرخه نسبت به دمای تبخیرکن و اختلاف نقطه تنگش تبخیرکن در شکل ۱۱ به نمایش درآمده است.



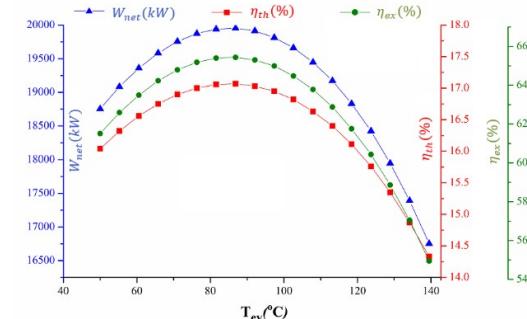
شکل ۴- توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگزرسی بر حسب فشار جداساز اول



شکل ۵- توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگزرسی بر حسب فشار جداساز دوم



شکل ۶- توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگزرسی بر حسب فشار شیر انبساط سوم



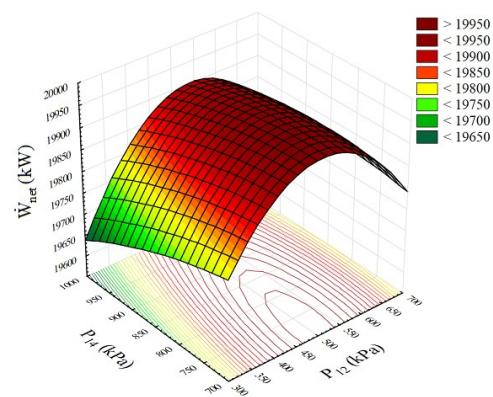
شکل ۷- توان خالص چرخه، بازده حرارتی و بازده اگزرسی بر حسب دمای تبخیرکن

جدول ۶- عملکرد بهینه چرخه پیشنهادی به ازای سیال‌های عامل آلی برای چرخه رانکین

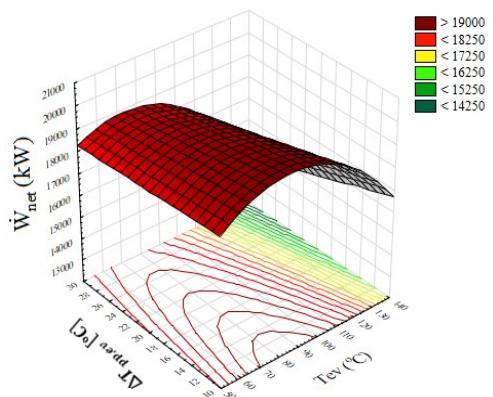
R600	R14lb	ایزوبوتان	R142b	پارامترها/ مقادیر بهینه
۱۰۶۷	۱۰۷۲	۱۰۷۲	۱۰۷۲	فشار شیر انبساط اول (kPa)
۷۰۰	۷۴۷	۹۱۰/۶	۸۴۹/۶	فشار شیر انبساط دوم (kPa)
۵۰۲/۴	۵۰۵/۴	۶۵۵/۳	۷۰۰	فشار شیر انبساط سوم (kPa) یا چهارم
۹۸/۸۳	۸۵/۸۶	۱۳۳/۸	۱۰۱/۸	دما تبخیرکن (°C)
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	اختلاف دمای نقطه تنفس تبخیرکن (°C)
۲۰۳۹۳	۲۰۰۳۱	۲۲۰۷۳	۲۰۵۴۱	توان تولیدی (kW) خالص
۱۷/۴۴	۱۷/۱۳	۱۹/۷۳	۱۷/۵۷	بازده حرارتی (%)
۸۰۷۰	۸۰۷۱	۶۸۶۹	۸۰۶۴	تخریب اگررژی کل (kW)
۶۶/۸۸	۶۵/۶۹	۷۵/۶۷	۶۷/۳۶	بازده اگررژی (%)

برای سیال آلی ایزوبوتان برای فشار جdasاز اول ۱۰۷۲ کیلوپاسکال، فشار جdasاز دوم ۹۱۰/۶ کیلوپاسکال، فشار جdasاز سوم ۶۵۵/۳ کیلوپاسکال، اختلاف دمای تنفس تبخیرکن ۱۰ درجه سلسیوس و دمای تبخیرکن ۱۳۳/۸ درجه سلسیوس مقدار توان خالص تولیدی ۲۳۰/۷ مگاوات، بازده حرارتی ۱۹۷/۷۳ درصد و بازده اگررژی ۷۵/۶۷ درصد بدست آمده‌اند. طبق نتایج مشاهده شده به ازای افزایش بازده اگررژی، تخریب اگررژی کاهش پیدا کرده و همچنین چرخه به ازای دمای تبخیرکن بهینه بالاتر به ازای هر سیال عامل، مقدار توان و بازده بیشتری را دارد که شکل ۹ نشان دهنده این حالت می‌باشد. طبق نتایج مشاهده شده در جدول ۶ مشخص است که در حالتی که در شیر انبساط اول باز باشد، برای تمامی سیال‌های آلی بیشترین مقدار توان، بازده انرژی و اگررژی بدست می‌آید. همچنین در حالت بهینه حرارتی بازده ۱۹/۷۳ درصد بدست آمده است که نشان می‌دهد ۸۰/۷۲ درصد از انرژی حرارتی توسط چاهها اتفاق شده است.

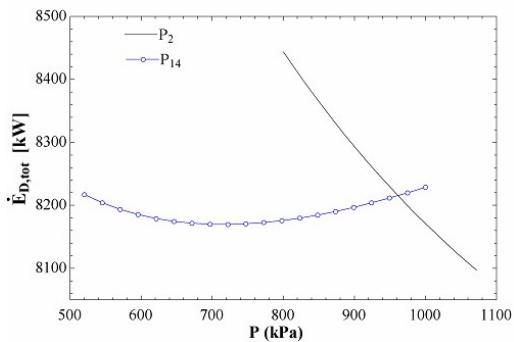
برای سیال عامل ایزوبوتان و در حالت بهینه نرخ تخریب اگررژی اجزای چرخه پیشنهادی جدید در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. مقدار تخریب اگررژی کل در حالت بهینه ۶۸۶۹ بدست آمده است، توربین فشار پایین، توربین چرخه رانکین آلی، چگالنده ۲ و ۱ به ترتیب بیشترین مقدار تخریب اگررژی را دارند. در حالت بهینه که کمترین مقدار تخریب اگررژی کل بدست آمده، بیشترین مقدار بازده اگررژی بدست می‌آید و در این حالت در واقع ۲۴/۳۳ درصد اگررژی از چاههای زمین گرمایی اتفاق می‌شود. در حالت بهینه چرخه ترکیبی، شیرهای انبساط و جdasازها و اختلاط کننده‌ها تخریب اگررژی ندارند. در شکل ۱۴ بازده اگررژی اجزای چرخه ترکیبی به ازای سیال عامل ایزوبوتان در حالت بهینه آورده شده است. شیرهای انبساط و جdasازها و اختلاط کننده‌ها که تخریب اگررژی نداشتند، باعث می‌شوند بازده اگررژی آن عضوها ۱۰۰ درصد بدست آینند. تبخیرکن نیز دارای بازده اگررژی بالایی است که نشان از تطابق دمایی دو سیال زمین گرمایی و سیال آلی در تبخیرکن را دارد. جدول ۷ میزان بهبود عملکرد چرخه



شکل ۱۰- توان خالص چرخه نسبت به فشار جdasاز دوم و سوم



شکل ۱۱- توان خالص چرخه نسبت به دمای تبخیرکن و اختلاف نقطه تنفس تبخیرکن



شکل ۱۲- تاثیر فشار جdasاز اول و دوم روی تخریب اگررژی کل

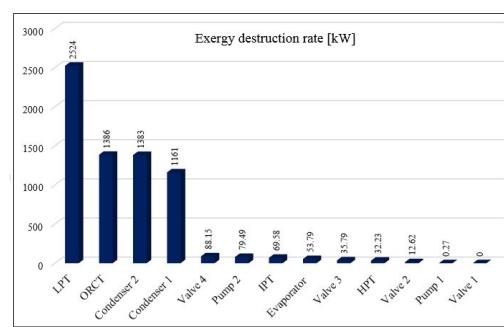
نتایج بهینه‌سازی برای سیال عامل‌های انتخابی نسبت به فشار جdasازها، دمای تبخیرکن و اختلاف دمای تنفس تبخیرکن در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج بهینه‌سازی در جدول ۶ سیال ایزوبوتان نتایج بهتری از لحاظ توان خالص تولیدی، بازده انرژی و اگررژی نشان داده است، همچنین نتایج بهینه نشان داده شده در جدول ۶ برای سیال‌های مختلف برای توان با روند بیشینه شکل ۹ شبیه به همدیگر می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

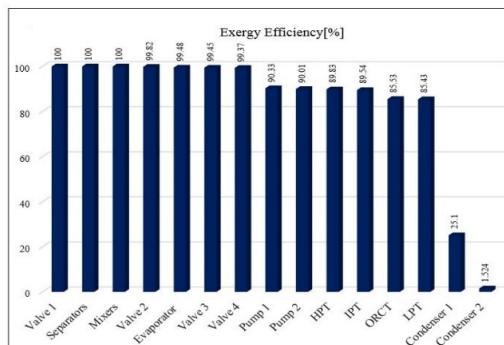
در این مطالعه، یک آرایش جدید برای چاههای زمین گرمایی سیلان با هدف تولید توان بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. چرخه ترکیبی جدید از انرژی زمین گرمایی دو دسته چاه با دما و فشار متفاوت استفاده می‌کند. یک چرخه تبخیر آنی سه مرحله‌ای که از چاههای فشار بالا استفاده کرده و در جداساز سوم با سیال زمین گرمایی تبخیر آنی تک مرحله‌ای که از چاههای فشار پایین خارج شده استفاده می‌کند. همچنین این چرخه ترکیبی از چرخه رانکین آنی برای جلوگیری از هدر رفت انرژی بهره می‌برد. چرخه ترکیبی جدید ابتدا تحلیل پارامتری شده و در نهایت نسبت به سیال‌های عامل آنی مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. نتایج زیر برای چرخه ترکیبی بدست آمده است:

- توان و بازده چرخه ترکیبی با افزایش فشار جداساز اول همیشه افزایش می‌یابد در حالیکه برای جداسازهای دوم و سوم دارای مقدار بهینه‌ای می‌باشد.
- استفاده از تبخیر آنی تک مرحله‌ای و ترکیب آن با تبخیر سه مرحله‌ای باعث افزایش دبی جرمی و آنتالپی توربین فشار پایین شده، که باعث افزایش توان و بازده چرخه ترکیبی کل می‌شود.
- به ازای حداقل مقدار اختلاف نقطه تنگش بیشترین مقدار توان، بازده حرارتی و اگزرژی حاصل می‌شود.
- تحلیل اگزرژی روی چرخه ترکیبی نشان داد که بیشترین مقدار تخریب اگزرژی برای توربین فشار پایین، توربین چرخه رانکین آنی و چگالنده‌ها بدست می‌آید.
- در میان سیال‌های آنی مورد بررسی برای چرخه ترکیبی سیال عامل ایزو بوتان دارای بهترین عملکرد بود که برای آن در حالت بهینه، توان تولیدی ۲۳۰/۰۷ مگاوات، بازده انرژی ۱۹/۷۳ درصد و بازده اگزرژی ۷۵/۶۷ درصد بدست آمدند.
- در شرایط یکسان چرخه پیشنهادی جدید نسبت به مطالعات قبلی که از تبخیرکن دو مرحله‌ای و رانکین آنی استفاده کرده‌اند دارای بازده انرژی و اگزرژی مطلوب‌تری است.

پیشنهادی را نسبت به مطالعه عبدالعالی پور و همکاران [۱۹] برای یک چرخه ترکیبی (چرخه ترکیبی دو چرخه تبخیر آنی تک مرحله‌ای با چرخه‌های تحتانی دیاکسیدکربن گذر بحرانی و رانکین آنی) نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی بیشتر چرخه پیشنهادی با چرخه ترکیبی تبخیر آنی دو مرحله‌ای با رانکین آنی مقایسه شد که در این مقایسه دمای چگالنده‌ها ۴۰ درجه سلسیوس و دمای نقطه تنگی ۵ درجه سلسیوس مطابق مطالعه [۱۷-۱۸] در نظر گرفته شد، طبق نتایج موجود در جدول ۸، چرخه پیشنهادی در حالت بهینه عملکرد بهتری را نسبت به چرخه ترکیبی تبخیر آنی دو مرحله‌ای با رانکین آنی در حالت بهینه از خود نشان داد.



شکل ۱۳- نرخ تخریب اگزرژی اجزای چرخه ترکیبی پیشنهادی



شکل ۱۴- بازده اگزرژی اجزای چرخه ترکیبی پیشنهادی

جدول ۷- عملکرد چرخه پیشنهادی و چرخه ترکیبی تبخیر آنی
تک مرحله‌ای با گذر بحرانی و رانکین آنی

بازده اگزرژی (%)	بازده حرارتی (%)	توان خالص (kW)	چرخه
۶۵/۷۴	۱۷/۱۵	۲۰۰۴۶	پژوهش پیشین [۱۹]
۷۵/۶۷	۱۹/۷۳	۲۳۰۷۳	کار حاضر

جدول ۸- عملکرد چرخه پیشنهادی و چرخه ترکیبی چرخه
تبخیر آنی دو مرحله‌ای با رانکین آنی

بازده اگزرژی (%)	بازده حرارتی (%)	توان خالص (kW)	چرخه
۵۳/۳۸	۱۴/۳۵	۱۷۱۱۲	پژوهش‌های پیشین [۱۸-۱۷]
۶۳/۹۳	۱۶/۶۷	۱۹۴۹۳	کار حاضر

	نامادها
(kW)	نرخ تحریب اگزرزی (Ex)
(kJ/kg)	آنتالپی مخصوص (h)
(kg/s)	دبی جرمی عبوری از جزء (\dot{m}_k)
(kPa)	فشار (P)
(kJ/kgK)	آنتروپی مخصوص (s)
(°C)	دما (T)
(m^3/kg)	حجم مخصوص (v)
(kW)	توان خالص چرخه (\dot{W}_{net})
(-)	کیفیت (-) (x)
	مخلف و زیرنویس‌ها
	بحارانی (cr)
	تحریب اگزرزی (D)
	تبخیرکن (ev)
	مایع اشیاع، اگزرزی سوخت (f)
	بخار اشیاع (g)
	توربین فشار بالا (HPT)
	چاه فشار بالا (HPW)
	توربین فشار میانی (IPT)
	توربین فشار پایینی (LPT)
	چاه فشار پایینی (LPW)
	پمپ، اگزرزی محصول (P)
	اگزرزی فیزیکی (ph)
	نقشه تنگش (pp)
	توربین (Tur)
	علایم یونانی
(%)	بازده اگررزی (η_{ex})
(%)	بازده حرارتی (η_{th})
(%)	راندمان آینترپوپیک پمپ (η_p)
(%)	راندمان آینترپوپیک توربین (η_{Tur})

٧ - مراجع

- plant in Iran. *Energy conversion and management*, Vol. 143, pp. 377-390, 2017.

[19] Abdolalipouradl M., Khalilarya SH., Jafarmadar S., Exergy analysis of a new proposal combined cycle from Sabalan geothermal source. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 0-0, 2018.

[20] Cengel Y., Boles M., Thermodynamics: An engineering approach. *McGraw-Hill*, New York, 2007.

[21] Klein S.A., Alvarda S.F., Engineering Equation Solver (EES), F-chart software, *WJ*, 2007.

[1] Aneke M., Agnew B., Underwood C., Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 32, pp. 1825–32, 2011.

[2] Hung, T.C., Shai, T.Y. and Wang, S.K., A Review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the Recovery of Low-Grade Waste Heat, *Energy*, Vol. 22, pp. 661–667, 1997.

[3] Kanoglu, M. and Bolatturk, A., Performance and parametric investigation of a binary geothermal power