



## ارزیابی فنی و اقتصادی نیروگاه تک فاز زمین گرمایی سیکل کالینا

صادق حاتمی پور<sup>۱</sup>، نویدبزرگان<sup>۲\*</sup>، نادیا جلالی فر<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اروندان خرمشهر، خرمشهر، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

۳. گروه مهندسی شیمی، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

نویسنده مسئول: [n.bozorgan@gmail.com](mailto:n.bozorgan@gmail.com)

### چکیده

در این پژوهش یک نیروگاه زمین گرمایی تک فاز که در آن از سیکل کالینا استفاده شده است مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار می‌گیرد. در این گونه سیستم‌های تولید توان که در آن سیال خارج شده از زمین دارای یک فاز می‌باشد، نیروگاه تک فاز گویند. سیکل تولید توان در این نیروگاه، سیکل کالینا می‌باشد. نرم افزار شبیه‌ساز هایسیس جهت کسب شرایط عملیاتی نیروگاه طراحی شده، مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور کسب اطلاعاتی نظیر میزان انحراف تجهیزات از حالت ایده‌آل، از تحلیل اکسرژی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مبدل‌های حرارتی در نیروگاه تک فاز، بیشترین انحراف را از حالت ایده‌آل دارند. مبحثی که می‌توان آن را تا حدودی نوآوری این پژوهش دانست، بدست آوردن هزینه محصول در نیروگاه با استفاده از ابزار اقتصادی به نام هزینه سالانه سیستم می‌باشد. این روش یکی از به روزترین تکنیک‌های اقتصادی در تحلیل سیستم‌های ترمودینامیکی می‌باشد. این تحلیل نشان می‌دهد که توربین‌ها به دلیل داشتن هزینه خرید بالا در مقایسه با دیگر تجهیزات در نیروگاه ذکر شده نقش بسزایی در هزینه سرمایه‌گذاری نیروگاه‌های زمین گرمایی بازی می‌کنند. به همین دلیل هست که باید در انتخاب آنها متناسب با سیستم طراحی شده دقت زیادی نمود. از دیگر نتایج بدست آمده از تحلیل اقتصادی نیروگاه می‌توان به این نکته اشاره کرد که تنها راه کاهش هزینه تولید محصول، افزایش تولید محصول می‌باشد.

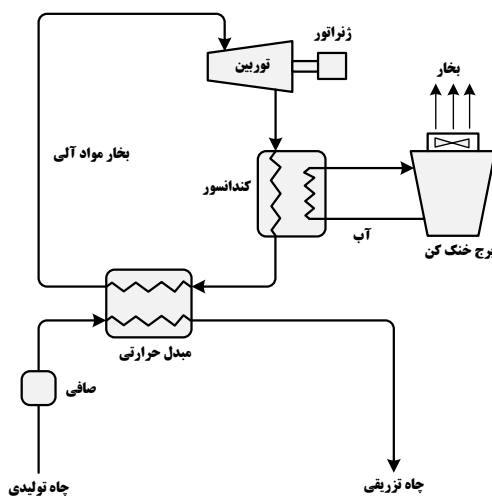
**کلمات کلیدی:** سیکل کالینا، تخریب اکسرژی، نیروگاه زمین گرمایی

### مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر دارای مزیت‌های بسیار بالاتری نسبت به سوخت‌های فسیلی هستند اما همچنان سوخت‌های فسیلی پرمصرف‌ترین منبع انرژی می‌باشند. با توجه به افزایش جمعیت و صنعتی شدن زندگی بشر به نحوی که انسان قادر به زندگی کردن بدون انرژی الکتریکی نمی‌باشد و از طرفی کاهش سوخت‌های فسیلی در آینده ای نه چندان دور و تخریب محیط زیست با برداشت بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، اکثر کشورها در تلاش هستند تا حداکثر برداشت انرژی از منابع تجدید پذیر را داشته باشند. جهت رفع این مشکلات پیشنهادات مختلفی از سمت کارشناسان در این زمینه مطرح شده است. بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر و یا بهبود سیستم‌های تولید توان که از انرژی فسیلی بهره می‌برند از جمله این پیشنهادات هستند. امروزه با توسعه دانش بشر، تحقیقات بسیار زیادی به منظور تغییر شکل انرژی انجام شده است و نتیجه آن تولید توان الکتریکی از انواع انرژی‌هاست. انرژی زمین گرمایی یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر است که می‌توان در جهت تولید توان الکتریکی از آن استفاده نمود. کارشناسان از دیرباز بر این موضوع واقف بوده‌اند که زمین انرژی از جنس حرارت را به محیط خود ساطع می‌کند. کارشناسان بر این باورند که این انرژی حرارتی حاصل جذب امواج الکترومغناطیسی صادر شده از سمت خورشید توسط زمین می‌باشد و درصد اندکی از آن مربوط به حرارت خود زمین می‌باشد [۱]. از آنجایی که کشور ایران دارای پتانسیل بسیار مناسبی در زمینه انرژی زمین گرمایی می‌باشد، بهره‌برداری از این منبع انرژی پاک کاملاً منطقی می‌باشد. انرژی زمین گرمایی را می‌توان این گونه تعریف کرد که در زیر پوسته زمین مقداری انرژی حرارتی حبس شده است که به این منبع حرارتی، انرژی زمین گرمایی می‌گویند. این منبع حرارتی از طرق مختلف از زمین استخراج می‌شوند که میتوان به فوران آتشفشان اشاره کرد. کارشناسان بر



این باورند که این منبع حرارتی نتیجه یک مجموعه آتشین است که پس از طی میلیاردها سال رو به انجماد است. لایه‌های نزدیک به هسته زمین بسیار گرمتر از لایه‌های نزدیک به پوسته زمین می‌باشند. طبق ارزیابی کارشناسان مربوطه، مرکز زمین دمایی حدود پنج هزار درجه سلسیوس می‌باشد [۲]. یکی دیگر از منابعی که باعث بوجود آمدن منابع زیرزمینی می‌شود، مواد مذاب می‌باشند. جریان‌های همرفتی و خاصیت رسانایی سبب می‌شوند تا حرارت حاصل شده از این مواد به راحتی به سطح زمین نزدیک شود. این میزان حرارت چیزی حدود ۳۰ میلیون مگاوات می‌باشد که از سمت زمین به اتمسفر ساطع می‌شود [۳]. طبق ارزیابی انجام شده توسط آژانس انرژی، موقعیت جغرافیایی این مخازن حرارتی نزدیک به مکان‌هایی از زمین می‌باشند که زمین دارای نازکترین پوسته می‌باشد. همانطور که در بالا نیز اشاره شد، حرارت این مخازن زیر زمینی توسط مواد مذاب و انتقال حرارت توسط آب‌های داغ موجود در لایه‌های زیر زمینی تامین می‌شود. طبق بررسی‌ها و مطالعات ژئوشیمیایی بر روی کره زمین، آب‌های موجود در زمین وظیفه انتقال حرارت از سنگ‌های مذاب در عمق بالا به لایه‌های بیرونی را برعهده دارند. نکته جالب اینجاست که این گردش حرارت به دلیل تفاوت در وزن سیال رخ می‌دهد [۳]. برای بهره بردن از این منبع انرژی خدادادی می‌بایست به ذخیری که دارای دمای بالاتری هستند دسترسی داشته باشیم. اینگونه ذخایر عمدتاً در عمق‌های بسیار بالا وجود دارند. لازمه استفاده از این منابع حرارتی، تکنولوژی‌های پیشرفته می‌باشد که از نظر اقتصادی شرایط را سخت خواهند کرد. بدین منظور تنها منابع زمین گرمایی که در عمق‌های حدود ۳ کیلومتری واقع شده‌اند مقرون به صرفه هستند. طبق آمار آژانس انرژی، در حال حاضر ۲۲ کشور از منابع انرژی زمین گرمایی بهره می‌برند. به منظور تولید توان الکتریسیته، روش‌های گوناگونی توسعه داده شده است که می‌توان از نیروگاه آبی تبخیر یک مرحله‌ای آب داغ به بخار، نیروگاه آبی دو مرحله‌ای آب داغ به بخار، نیروگاه بخار خشک، سیستم توربین تفکیکی دورانی، نیروگاه سیکل دو مداره و نیروگاه ترکیبی نام برد. مایا و دستیارانش یک سیستم که از انرژی زمین گرمایی به صورت همزمان توان سرمایش، گرمایش و برق تولید می‌کند را مورد بررسی قرار داده‌اند. اصطلاحاً به اینگونه سیستم‌ها سیستم‌های تولید چندگانه می‌گویند. در این تحقیق از سیکل ارگانیک جهت تولید برق، از سیکل جذبی توان سرمایش و از یک میدل حرارتی توان گرمایش یک ساختمان را فراهم می‌کنند [۴]. والا و دستیارانش در پژوهش خود پنج نیروگاه زمین گرمایی را از لحاظ اکسرژی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این نیروگاه‌ها به ترتیب یک جداساز دو فازی به سیستم‌ها اضافه می‌شود. با توجه به خروجی تحقیق، سیستمی که بیشترین جداساز دو فازی را دارد عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد [۵]. شوکتی و دستیارانش دو نیروگاه تولید برق را که از حرارت زمین گرمایی بهره می‌برد را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نیروگاه نخست دارای دو جداساز دو فازی است در حالیکه نیروگاه دوم از یک جداساز دو فازی و یک سیکل رانکین آبی بهره می‌برد. با توجه به خروجی تحقیق، سیستم دوم در مقایسه با سیستم اول به مراتب انهدام اکسرژی کمتری دارد [۶]. قائبی و دستیارانش یک سیستم تولید الکتریسیته با نیرو محرکه زمین گرمایی طراحی کرده‌اند که حاوی سیکل کالینا به صورت آبشاری می‌باشد. در این فرآیند طراحی شده از توان سرمایش گاز طبیعی مایع شده بهره برده‌اند. برای شبیه‌سازی سیستم طراحی شده از دیدگاه ترمودینامیکی، از نرم افزار محاسباتی EES بکار گرفته شده است [۷]. با توجه به پیشینه پژوهش که اکثر محققان بر روی بحث فنی (اکسرژی) نیروگاه زمین گرمایی پرداخته‌اند، در این پژوهش سعی شده علاوه بر تحلیل اکسرژی، به بررسی اقتصادی این نیروگاه‌ها پردازیم. همچنین در اکثر نیروگاه‌های زمین گرمایی از سیکل‌های رانکین ارگانیک استفاده شده است، در این پژوهش از سیکل کالینا که بازده حرارتی بیشتری نیز دارد، برای تولید توان استفاده شده است.



شکل ۱: شماتیک نیروگاه تبخیرآبی دومااره زمین گرمایی

### معرفی و بررسی نیروگاه مورد مطالعه

#### سیکل تولید توان کالینا

سیکل کالینا متشکل از یک مخلوط دو جزئی با دو نقطه جوش متفاوت استفاده شد. لذا این مخلوط دارای یک محدوده جوش می‌باشد و در نتیجه در حالتی که دما و انرژی منبع گرم متغیر باشد سیکل می‌تواند خود را برای بدست آوردن بهترین راندمان تطبیق دهد. مخلوط دوگانه به ما اجازه می‌دهد با دادن حرارت بصورت افزایشی، ازدیاد دمای افزایشی داشته باشیم درحالیکه در سیال یگانه این افزایش بصورت تغییر فاز (مثلا از فاز مایع به فاز بخار) خودنمایی می‌کند. این مخلوط را در سیکل‌هایی که از منبع حرارتی سوخت فسیلی، انرژی زمین گرمایی و یا حتی انرژی هسته‌ای استفاده می‌کند، می‌توان بکار برد. در این سیکل از مخلوط ۷۰ درصد آمونیاک و ۳۰ درصد آب به عنوان سیال استفاده می‌شود و به همین علت می‌توان از این سیکل برای بازیافت حرارت از گازهای ورودی در دماهای کم تا متوسط استفاده نمود. محاسبات سیکل ترکیبی کالینا نشان می‌دهد که راندمان حرارتی بجای حدود ۴۰ درصد در سیکل‌های بخار متعارف به حدود ۵۳ درصد می‌رسد ولی بدلیل اضافه شدن یکسری تجهیزات، هزینه این سیکل بیشتر از سیکل‌های متعارف بخار خواهد بود.

#### مدل‌سازی نیروگاه تک فاز زمین گرمایی

در این بخش به نحوه مدل‌سازی سیستم تولید توان با استفاده از انرژی زمین گرمایی خواهیم پرداخت. پایه و اساس بررسی ترمودینامیکی هر سامانه حرارتی، شبیه‌سازی آن توسط کدهای کامپیوتری می‌باشد. در واقع این کدهای کامپیوتری رفتار یک سیستم را از دید ترمودینامیکی مدل می‌کنند. دلیل اصلی مدل کردن این سیستم‌ها قبل از اجرای طرح این است که با هزینه‌ای بسیار کمتر می‌توان سیستم را مورد بررسی قرار داد. حال در این پژوهش جهت مدل کردن نیروگاه تک فاز زمین گرمایی از نرم‌افزار Aspen Hysys V11 بهره خواهیم برد. درگام بعد می‌بایست یک معادله حالت جهت سازگاری با جریان‌های موجود در سامانه (سیال‌های عامل) انتخاب نمود. انتخاب این معادله حالت یکی از مهمترین مراحل در مدل کردن یک سامانه می‌باشد. معادله حالت ابزاری قوی و موثر جهت مطالعه خواص ترمودینامیکی و رفتار فازی مواد مختلف می‌باشند. برای مدل کردن نیروگاه تک فاز، دو معادله‌ی حالت Peng-Robinson (PR) و PRSV توصیه شده‌اند [۸]. زیرا این دو معادله با دقت بسیار بالایی این سامانه‌ها را مدل می‌کنند.

در پژوهش حاضر از مدل ترمودینامیکی PR استفاده شده است. معادلات PR در زیر آمده است [۹].



$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (1)$$

$$a = \frac{0.457235R^2 T_c^2}{p_c} \quad (2)$$

$$b = \frac{0.077796R T_c}{p_c} \quad (3)$$

لحاظ کردن یک معیار عملکرد (نظیر بازده حرارتی یا بازده آدیاباتیک) برای سیستم مورد مطالعه، می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی میزان کارآمدی آن از نقطه نظر ترمودینامیکی باشد، از این گذشته شاید برای سایر سیستم‌ها معیار عملکرد وجود داشته باشد، اما ممکن است اطلاعاتی که معیار فوق از کارآمدی سیستم بدست می‌دهد، ناقص یا ناکافی باشد. به عنوان مثال، بازده دمایی یک مبدل حرارتی، تاثیر افت فشار بر عملکرد آن را نشان نمی‌دهد. روش تحلیل اکسرژی جایگزین مناسبی به شمار می‌رود و روش نسبتا جدیدی است که بر مبنای مفهوم اکسرژی بنا نهاده شده. اکسرژی با کمی سهل انگاری به عنوان قابلیت انجام کار، یا کیفیت انواع مختلف انرژی نسبت به یک محیط مشخص تعریف می‌شود. شایان ذکر است که اصولا انرژی‌های منظم، فاقد بی نظمی مولکولی بوده و لذا مفهوم آنتروپی در مورد آنها کاربرد ندارد. این نوع انرژی از نظر رتبه‌بندی کیفی در بالاترین سطح انواع انرژی قرار می‌گیرد. در نتیجه برای سنجیدن آن، به یک استاندارد جهانی کیفیت انرژی نیاز داریم که این استاندارد کیفیت انرژی، اکسرژی نامیده می‌شود [۱۰].

$$Ex_{destroyed} = T_0 S_{gen} \geq 0 \quad (4)$$

هر ماده‌ای که حاوی انرژی است می‌توان مقداری اکسرژی اختصاص داد. اکسرژی فیزیکی که کمیتی وابسته به شرایط محیطی می‌باشد با اکسرژی شیمیایی که وابسته به نوع جریان می‌باشد، که باهم جمع شده و اکسرژی کل را تشکیل می‌دهند. اکسرژی فیزیکی مربوط به یک جریان از معادله زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$e^{ph} = h - h_o - T_o (s - s_o) \quad (5)$$

اکسرژی شیمیایی نیز با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه می‌شود.

$$e^{ch} = \sum x_i e_i^o + G - \sum x_i G_i \quad (6)$$

اولین قدم در تحلیل اکسرژی یک سیستم، محاسبه اکسرژی تک تک جریان‌های آن سیستم می‌باشد. از این رو، محاسبه تمامی شاخص‌های اکسرژی از جمله بازده و تخریب اکسرژی در گروه محاسبه اکسرژی تک تک جریان‌ها می‌باشند [۱۱]. برای بدست آوردن میزان اکسرژی به همچنین موازنه اکسرژی تجهیزات بکار برده شده در نیروگاه تک فاز زمین گرمایی باید توسط معادلات ذیل که مرتبط به هر تجهیزات است مقدار آن محاسبه گردد. میزان تخریب اکسرژی و بازده اکسرژی در پمپ از معادله زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$I = Ex_i - Ex_o = \sum (\dot{m}.e)_i + w - \sum (\dot{m}.e)_o \quad (7)$$



$$\varepsilon = \frac{\sum (\dot{m}.e)_i - \sum (\dot{m}.e)_o}{W} \quad (8)$$

در عصر جدید که تاکید زیادی بر پایداری انرژی می‌شود، استفاده از مبدل‌های حرارتی یک گام بزرگ در این جهت بشمار می‌رود. محاسبه تخریب و بازده اکسرژی مبدل‌های حرارتی به کمک روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$I = Ex_i - Ex_o = \sum (\dot{m}.e)_i - \sum (\dot{m}.e)_o \quad (9)$$

$$\varepsilon = 1 - \left[ - \left( \frac{\sum_1^n (\dot{m}.\Delta e)}{\sum_1^n (\dot{m}.\Delta h)} \right)_h + \left( \frac{\sum_1^m (\dot{m}.\Delta e)}{\sum_1^m (\dot{m}.\Delta h)} \right)_c \right] \quad (10)$$

از آنجایی که توان بدست آمده در توربین به شکل توان خروجی هست، برای محاسبه تخریب و بازده اکسرژی توربین می‌توان از معادلات زیر استفاده نمود.

$$I = Ex_i - Ex_o = \sum (\dot{m}.e)_i - w - \sum (\dot{m}.e)_o \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{W}{\sum (\dot{m}.e)_i - \sum (\dot{m}.e)_o} \quad (12)$$

#### تحلیل اقتصادی

هرگاه یک سیستم ترمودینامیکی طراحی می‌شود یا بهبود داده می‌شود، علاوه بر مباحث ترمودینامیکی باید مسائل اقتصادی را در نظر گرفت. زیرا گاهی می‌توان عملکرد یک سیستم را با توجه به مباحث ترمودینامیکی بصورت قابل توجهی بهبود داد، اما از نظر اقتصادی شاید بصرفه نباشد. از این رو می‌بایست یک نقطه بهینه با در نظر گرفتن هر دو مبحث پیدا کرد. اکسرژی اطلاعات بسیار مفیدی از نقطه نظر ترمودینامیکی در اختیار طراحان قرار خواهد داد. در این پژوهش برای تحلیل اقتصادی نیروگاه تک فاز زمین گرمایی از ابزای که هزینه سالانه سیستم نام دارد استفاده کردیم. این ابزار اقتصادی، با کاهش هزینه‌های مربوط به سوخت ورودی و هزینه‌های مربوط به ناکارآمدی تجهیزات، هزینه محصول تولیدی را کاهش می‌دهد. این روش شامل چهار پارامتر می‌باشد که این پارامترها عبارتند از هزینه سرمایه‌گذاری سالانه ACC، هزینه جایگزینی (تعویض) سالانه ARC، هزینه تعمیرات سالانه AMC و هزینه بهره برداری (عملیات) سالانه AOC. بعد از بدست آوردن هر یک از بخش‌های نام برده شده، که از جنس هزینه نیز می‌باشند، مقدار هزینه سالانه ACS از جمع این پارامترها قابل محاسبه می‌باشد. این پارامترها به کمک معادلات زیر قابل محاسبه می‌باشند. مقدار هزینه سرمایه‌گذاری واقعی سالانه هر دستگاه (CC)، نرخ واقعی بهره (i)، طول عمر پروژه (Y<sub>proj</sub>) و ضریب بازیافت سرمایه CRF مورد محاسبه قرار خواهد گرفت.

$$ACC = CC \times CRF(i \cdot Y_{proj}) = CC \times \frac{i \cdot (1 + i)^{Y_{proj}}}{(1 + i)^{Y_{proj}} - 1} \quad (13)$$

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (14)$$

مقادیر (i') و (f) در هر کشوری مقدار خاصی دارد که در ایران این مقادیر به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۷ درصد هستند. بنابراین مقدار نرخ واقعی بهره (i) برای نیروگاه طراحی شده ۲/۵۶ درصد می‌باشد.



هزینه جایگزینی (تعویض تجهیزات) سالانه این پارامتر برابر با مقدار هزینه تعویض هر دستگاه در طول عمر نیروگاه می‌باشد. محاسبه این پارامتر مستلزم بدست آوردن هزینه هر دستگاه در آینده می‌باشد. از این رو، هزینه جایگزینی تجهیزات RC به دلار از جمع این هزینه‌ها در سال های متفاوت بدست می‌آید. سپس با استفاده از معادلات زیر مقدار ARC محاسبه می‌شود.

$$RC = CC(\text{In starting year}) \times (1 + i)^{Y_{\text{rep}}} \quad (15)$$

$$ARC = RC \times SFF(i, Y_{\text{rep}}) = RC \times \frac{i}{(1 + i)^{Y_{\text{rep}}} - 1} \quad (16)$$

هزینه تعمیرات سالانه AMC مقدار این پارامتر بستگی به عمر تجهیزات دارد و برابر با یک مقدار ثابت بر اساس سال می‌باشد. برای نیروگاه طراحی شده در این پژوهش این مقدار برابر با ۶/۶۶-۲/۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری هر دستگاه می‌باشد. هزینه نگهداری و عملیات سالانه AOC این پارامتر از جمع هزینه‌های مربوط به نیروی کار، سوخت و بیمه بدست می‌آید. در این پژوهش هزینه نیروی کار برای هر ماه چیزی حدود ۴۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه توان الکتریسیته به عنوان سوخت در این نیروگاه برابر با ۰/۱۵ دلار بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته شده و بیمه برابر با ۲ درصد هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد. در ادامه معادلاتی جهت بدست آوردن پارامتر AOC ذکر شده است.

$$AOC = (\text{labor Cost} + \text{Fuel Cost} + \text{Insurance Cost}) \quad (17)$$

$$\text{Total Labor} = 50. \text{ Labor Cost} = 400 \text{ US\$/month} \quad (18)$$

$$\text{Fuel Cost} = 0.15 \text{ US\$/month} \quad (19)$$

$$\text{Insurance Cost} = 0.02 \times \text{Capital Cost} \quad (20)$$

ارزش خالص فعلی NPV در روش ارزش خالص فعلی، ابتدا تمامی هزینه‌ها بسته به اینکه در چه زمانی به وقوع خواهند پیوست، بانرخ بهره مناسب طبق رابطه زیر تنزیل می‌شوند.

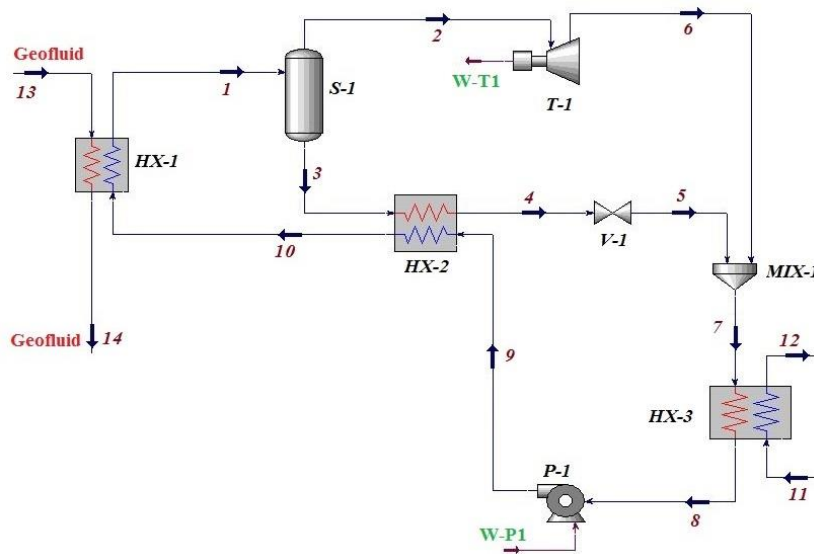
$$NPV = \frac{ACS}{CRF(i, Y_{\text{proj}})} = ACS \cdot \frac{(1 + i)^{Y_{\text{proj}}} - 1}{i \cdot (1 + i)^{Y_{\text{proj}}}} \quad (21)$$

در صورتی که این عدد مثبت باشد، طرح سودآور و قابل قبول بوده و اگر منفی باشد، طرح زیان ده و غیرقابل اجرا (از نظر اقتصادی) است. هزینه محصول سطح‌بندی شده LCOP هزینه محصول سطح‌بندی شده LCOP نشان دهنده هزینه متوسط بر واحد محصولات کل می‌باشد. این نسبت در معادله زیر نشان داده شده است.

$$LCOP = \frac{ACS}{\text{Yearly useful product produced by the system}} \quad (22)$$

### نتایج شبیه سازی

شکل ۲ نیروگاه طراحی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در این سیستم گرما از سیال خارج شده از زمین که در دمای نسبتاً پایینی قرار دارد به سمت یک سیال دیگر که در یک سیکل کالینا قرار دارد، حرکت می‌کند. معمولاً سیال عامل در سیکل کالینا دارای نقطه جوش پایین‌تری در مقایسه با آب دارد تا با تبخیر شدن منجر به تولید توان شود. کم هزینه‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین راه به منظور بدست آوردن شرایط عملیاتی این سیستم طراحی شده، مدل‌سازی آن توسط نرم‌افزارهای شبیه‌ساز می‌باشد. در تحقیق حاضر، شرایط عملیاتی مربوط به تجهیزات فرآیندی موجود در نیروگاه تک فاز مدل‌سازی شده و با جزئیات کامل در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است.



شکل ۲: نمودار جریان‌های زمین گرمایی تک فاز کالینا

جدول ۱: شرایط عملیاتی جریان‌های نیروگاه زمین گرمایی تک فاز

شماره جریان	دما (°C)	فشار (bar)	دبی (kg/s)	انتالپی (kJ/kg)	آنترופی (kJ/kg C)
۱	۱۶۰/۰۰	۴۹/۱۹	۲۱/۹۴	-۷۵۷۶	۶/۹۲
۲	۱۶۰/۰۰	۴۹/۱۹	۹/۳۶	-۳۵۶۴	۸/۸۶
۳	۱۶۰/۰۰	۴۹/۱۹	۱۲/۵۸	-۱۰۵۵۸	۵/۴۷
۴	۴۵/۹۲	۴۹/۱۹	۱۲/۵۸	-۱۱۱۱۰	۳/۹۹
۵	۴۶/۷۷	۸/۲۳	۱۲/۵۸	-۱۱۱۱۰	۴/۰۱
۶	۸۴/۰۳	۸/۲۳	۹/۳۶	-۳۸۱۰	۸/۹۹
۷	۶۷/۷۰	۸/۲۳	۲۱/۹۴	-۷۹۹۷	۶/۱۴
۸	۳۸/۹۵	۸/۲۳	۲۱/۹۴	-۸۶۰۵	۴/۲۷
۹	۳۹/۶۹	۴۹/۱۹	۲۱/۹۴	-۸۵۹۷	۴/۲۷
۱۰	۱۰۵/۲۵	۴۹/۱۹	۲۱/۹۴	-۸۲۸۰	۵/۱۹
۱۱	۲۰/۰۰	۱/۰۱	۲۰۵/۸۸	-۱۵۹۰۹	۲/۹۱
۱۲	۳۵/۰۰	۱/۰۱	۲۰۵/۸۸	-۱۵۸۴۵	۳/۱۲
۱۳	۱۷۵/۰۰	۷۰/۰۰	۸۳/۰۰	-۱۵۲۱۹	۴/۷۷
۱۴	۱۳۴/۲۱	۷۰/۰۰	۸۳/۰۰	-۱۵۴۰۵	۴/۳۴

جدول ۲: عملکرد مبدل باز یافت حرارت نیروگاه زمین گرمایی تک فاز

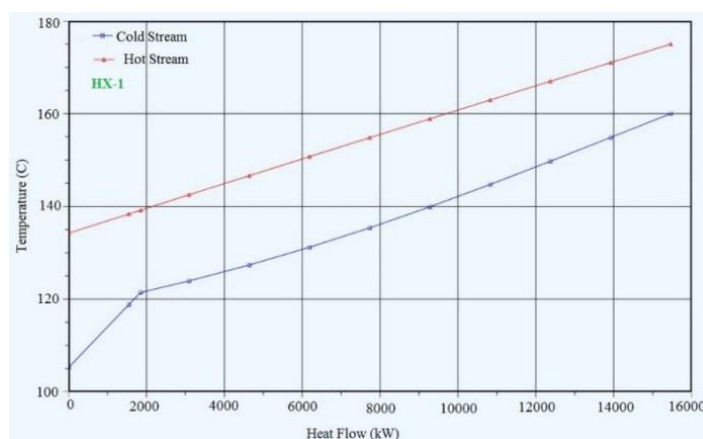
دستگاه	تعداد جریان ورودی	LMTD (°C)	دمای اپروچ <sup>۲</sup> (°C)	حرارت انتقالی (kW)
HX-1	۲	۱۸/۵۶	۱۵/۰۰	۱۵۴۶۰
HX-2	۲	۲۳/۰۷	۶/۲۳	۶۹۵۵
HX-3	۲	۲۳/۳۰	۱۸/۹۵	۱۳۳۲۰



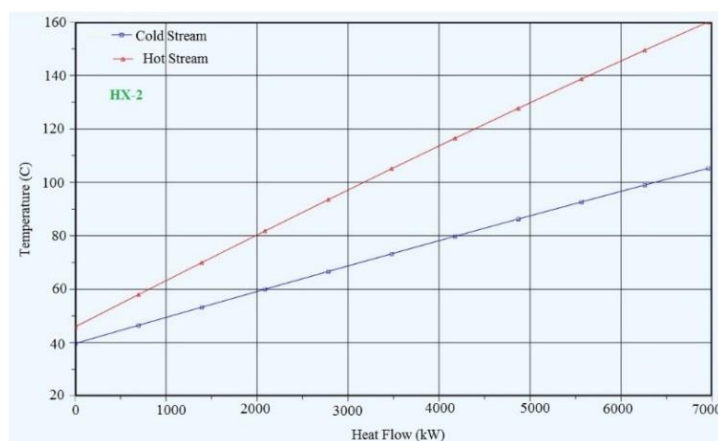
جدول ۳: عملکرد پمپ و توربین نیروگاه زمین گرمایی تک فاز

دستگاه	بازده آداباتیک (%)	نسبت فشار	دمای خروجی (°C)	توان مصرفی (kW)
P-1	۸۰	۵/۹۸	۳۹/۶۹	۱۵۸
T-1	۸۵	۰/۱۷	۸۴/۰۳	۲۳۰۱

نخستین مرحله به منظور ارزیابی عملکرد یک مبدل حرارتی، تعریف منابع گرم (جریان‌های گرم) و چاهک‌ها (جریان‌های سرد) و نوشتن موازنه جرم و انرژی است. در هر محدوده دمایی جریان‌ها با هم ترکیب می‌شوند و جریان گرم ترکیبی را تشکیل می‌دهند. هر چه نمودارهای ترکیبی گرم و سرد به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، حرارت انتقال یافته با کارایی بیشتری نیز می‌باشد. این بدین منظور می‌باشد که هر چه دمای اپروچ مبدل کمتر باشد، سطح بیشتری جهت انتقال حرارت نیاز می‌باشد و حجم کلی مبدل و نیز پیچیدگی طراحی آن زیاد خواهد شد. با بررسی نمودارهای ترکیبی مبدل‌های چند جریانی موجود در فرآیند به صورت همزمان بر روی نمودار دما بر حسب آنتالپی که با استفاده از نرم افزار هایسیس رسم شده‌اند (شکل‌های ۳ تا ۵)، قابل ملاحظه است که جریان‌های گرم به خوبی جریان‌های سرد را پوشش داده‌اند و شبیه‌سازی فرآیند به خوبی انجام شده است.

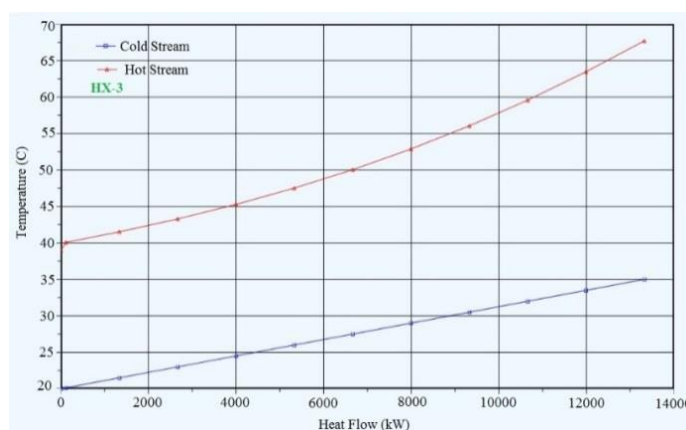


شکل ۳: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی HX-1



شکل ۴: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی HX-2





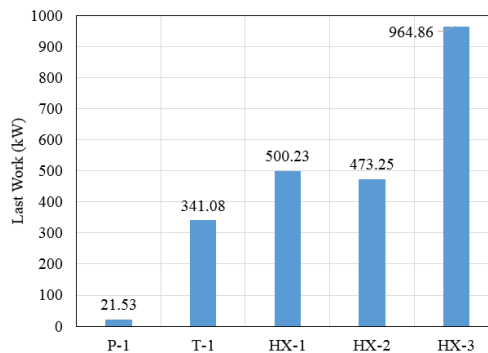
شکل ۵: نمودار ترکیبی مبدل حرارتی HX-3

پس از مدل کردن هر سیستم انرژی می‌بایست سیستم طراحی شده را از لحاظ نحوه مصرف انرژی مورد بررسی قرار داد. در گذشته تنها سیستم‌های انرژی را فقط از لحاظ کمی مورد بررسی قرار می‌دادند. چیزی که اخیراً بسیار مورد توجه کارشناسان و مسئولین قرار گرفته است، کیفیت انرژی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید مقادیر اکسرژی هر جریان انرژی در جدول ۴ آورده شده است.

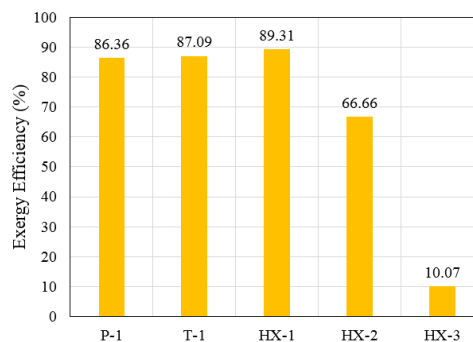
جدول ۴: مقادیر اکسرژی جریان‌های نیروگاه زمین گرمایی تک فاز

شماره جریان	$\dot{E}^{PH}$ (kW)	$\dot{E}^{CH}$ (kW)	$\dot{E}^{TOT}$ (kW)
۱	۷۰۱۷	۲۷۵۹۵۸	۲۸۲۹۷۴
۲	۵۳۰۳	۱۶۹۵۳۵	۱۷۴۸۳۸
۳	۱۷۱۴	۱۰۶۴۲۲	۱۰۸۱۳۶
۴	۲۹۴	۱۰۶۴۲۲	۱۰۶۷۱۶
۵	۲۲۷	۱۰۶۴۲۲	۱۰۶۶۴۹
۶	۲۶۶۱	۱۶۹۵۳۵	۱۷۲۱۹۶
۷	۲۸۲۶	۲۷۵۹۵۸	۲۷۸۷۸۴
۸	۱۷۵۳	۲۷۵۹۵۸	۲۷۷۷۱۱
۹	۱۸۹۰	۲۷۵۹۵۸	۲۷۷۸۴۷
۱۰	۲۸۳۶	۲۷۵۹۵۸	۲۷۸۷۹۴
۱۱	۳۸	۱۳۳۸۱۷	۱۳۳۸۵۵
۱۲	۱۴۶	۱۳۳۸۱۷	۱۳۳۹۶۳
۱۳	۱۱۲۳۵	۵۳۹۴۹	۶۵۱۸۴
۱۴	۶۵۵۴	۵۳۹۴۹	۶۰۵۰۳

پس از بدست آوردن مقادیر اکسرژی تمامی جریان‌های موجود در سیستم، گام بعدی بدست آوردن شاخص‌های تحلیل اکسرژی می‌باشد. شکل ۶ میزان بازگشت‌ناپذیری هر سیستم را نشان می‌دهد. هرچه میزان بازگشت‌ناپذیری یک تجهیز بیشتر باشد این تجهیز از لحاظ مصرف انرژی در شرایط نامناسبی می‌باشد. شکل ۷ بازده اکسرژی هر سیستم را نشان می‌دهد. در این نیروگاه تجهیزاتی که نامناسب‌ترین شرایط را از لحاظ انهدام اکسرژی داراست، مبدل حرارتی شماره سه می‌باشد. میزان انهدام اکسرژی این تجهیز ۹۶۴/۸۶ kW می‌باشد. این میزان چیزی حدود ۴۲ درصد از کل انهدام اکسرژی سیستم طراحی می‌باشد. همچنین مبدل حرارتی شماره یک بیشترین بازدهی اکسرژی را دارد.



شکل ۶: نمودار تخریب اکسرژی تجهیزات نیروگاه زمین گرمایی تک فاز



شکل ۷: نمودار بازده اکسرژی تجهیزات نیروگاه زمین گرمایی تک فاز

به منظور ارزیابی اقتصادی تجهیزات موجود در سیستم، گام نخست بدست آوردن هزینه خرید آنها می‌باشد. در تحقیق حاضر، برای بدست آوردن قیمت خرید هر تجهیز از معادلات آورده شده در جدول ۵ استفاده شده است. این معادلات با استفاده از شرایط عملیاتی هر تجهیز قابل محاسبه می‌باشد.

جدول ۵: معادله‌ی تخمین هزینه‌ی هر یک از تجهیزات [۱۲]

تجهیزات	معادلات تخمین هزینه
توربین	$PEC_T = 378(HP)^{0.81}$
پمپ	$PEC_P = 800(W_P/10)^{0.26}((1-\eta_P)/\eta_P)$
مبدل حرارتی	$PEC_{HX} = 8500 + 409(A)^{0.8}$
جداساز دو فازی	$PEC_S = 1218(42 + 163W)$

جدول ۶: نتایج تحلیل اقتصادی نیروگاه تک فاز

پارامتر	نیروگاه تک فاز	کمیت
هزینه سرمایه‌گذاری سالانه (ACC)	۶۳۸۹	kUS\$ /Year
هزینه جایگزینی (تعویض تجهیزات) سالانه (ARC)	۴۹۸۳۵	kUS\$ /Year
هزینه تعمیرات سالانه (AMC)	۴۵۰۰	kUS\$ /Year
هزینه نگهداری و عملیات سالانه (AOC)	۲۷۹۹	kUS\$ /Year
هزینه سالانه سیستم (ACS)	۶۳۵۲۲	kUS\$ /Year
ارزش خالص فعلی (NPV)	۹۸۴۲۹۲	kUS\$ /Year
هزینه محصول سطح‌بندی شده (LCOP)	۱/۰۵	US\$ /MJ



همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، هزینه سرمایه‌گذاری سالانه ACC و هزینه سالانه سیستم ACS به ترتیب برابر با  $6389 \text{ kUS\$ /Year}$  و  $63522 \text{ kUS\$ /Year}$  می‌باشد. بطور کلی هزینه تعمیرات سالانه یک پروژه هر سال مقداری مشخص و ثابت در نظر گرفته می‌شود که به عمر اقتصادی تجهیزات وابسته می‌باشد. در نیروگاه تک فاز طراحی شده مقدار هزینه تعمیرات سالانه چیزی حدود  $4500 \text{ kUS\$ /Year}$  می‌باشد. مقدار هزینه تعویض هر دستگاه در طول عمر اقتصادی نیروگاه را هزینه جایگزینی سالانه می‌گویند. محاسبه این پارامتر مستلزم بدست آوردن هزینه هر دستگاه در سال‌های آینده می‌باشد. مقدار این پارامتر در این پروژه برابر با  $49835 \text{ kUS\$ /Year}$  می‌باشد. ارزش خالص فعلی NPV برابر با مجموع تمامی هزینه‌ها (مانند نصب، سوخت، بیمه و ...) منهای تمامی درآمدها در طول عمر اقتصادی پروژه می‌باشد. این مقدار در پروژه حاضر برابر با  $984292 \text{ kUS\$ /Year}$  می‌باشد. یکی از مهمترین پارامترهای اقتصادی، پارامتر هزینه سطح بندی شده سالانه سیستم می‌باشد که به عنوان هزینه متوسط بر واحد محصول تولیدی سیستم تعریف می‌شود. هرچه مقدار این پارامتر کمتر باشد سیستم از لحاظ اقتصادی وضعیت بهتری دارد. مقدار این پارامتر در این پروژه برابر با  $1/05 \text{ US\$ /MJ}$  می‌باشد.

### نتیجه گیری

- باتوجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:
- از آنجایی که نتایج ترمودینامیکی نیروگاه طراحی شده با نتایج ثبت شده در ادبیات موضوع، اختلاف بسیار ناچیزی دارد، می‌توان گفت سیستم‌های تولید توان با استفاده از انرژی زمین گرمایی را می‌توان با دقت بسیار زیادی با استفاده از نرم افزار هایسیس و معادله حالت پنگ رابینسون مدل کرد.
  - با توجه به نمودار انهدام کسرژی، می‌توان نتیجه گرفت که در نیروگاه تک فاز بیشترین درصد تخریب اکسرژی متعلق به مبدل‌های حرارتی است.
  - از دیدگاه نتایج بازده اکسرژی در مورد این نیروگاه می‌توان که گفت توربین و پمپ بازده اکسرژی بالاتری نسبت مبدل‌های حرارتی از خود نشان داده‌اند.
  - از دیدگاه اقتصادی می‌توان دریافت که در نیروگاه‌های زمین گرمایی جدای از نوع آن‌ها، بیشترین سهم در سرمایه‌گذاری را توربین‌ها خواهند داشت. لذا انتخاب آنها باید با دقت بسیار بالایی انجام شود تا میزان هزینه سرمایه‌گذاری در این نوع پروژه‌ها به حداقل برسد.

### فهرست علائم

ACC	هزینه واحد $\text{KUS\$ /Year}$
LMTD	دمای لگاریتمی، $^{\circ}\text{C}$
LCOP	هزینه محصول $\text{US\$ /MJ}$
ex	اکسرژی در واحد جرم، $\text{kJ/kg}$
$\dot{E}^{\text{CH}}$	اکسرژی شیمیایی، $\text{kw}$
$\dot{E}^{\text{PH}}$	اکسرژی فیزیکی، $\text{kw}$
$\dot{E}^{\text{TOT}}$	اکسرژی کل، $\text{kw}$
h	آنتالی، $\text{kJ/kg}$
m	نرخ جریان، $\text{kg/s}$
p	فشار، $\text{bar}$
Q	حرارت، $\text{kw}$



S	آنتروپی، kj/kg.c
T	گرما، °C
w	توان یا کار، kJ
pump	پمپ، P-1
heat exchanger	مبدل حرارتی، HE-
turbine	توربین، T-1
separator	جداکننده، S-1

### مراجع

- [1] Li, Y., Liu, Y., Hu, B., & Dong, J., (2020), Numerical investigation of a novel approach to coupling compressed air energy storage in aquifers with geothermal energy, *Applied Energy* 279, pp 115-781.
- [2] Chen, S., Zhang, Q., Andrews-Speed, P., & McLellan, B., (2020), Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: A review, *Journal of Environmental Management* 276, pp 111-287.
- [3] Habibollahzade, A., Houshfar, E., Ashjaee, M., & Ekradi, K., (2020), Continuous Power Generation through a Novel Solar/Geothermal Chimney System: Technical/Cost Analyses and Multi-Objective Particle Swarm Optimization, *Journal of Cleaner Production*, pp 124666.
- [4] Rubio-Maya C., Martínez E., Romero C., Díaz V., Pacheco-Ibarra J., (2016), Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy, *Applied Thermal Engineering* 108, pp 84-92.
- [5] Ratlamwala T., Dincer I., (2013), Comparative efficiency assessment of a multi-flash integrated system based on three efficiency definitions, *International Journal of Low-Carbon Technologies* 8, pp 238-244.
- [6] Shokati N., Ranjbar F., Yari M., (2015), Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined cycles based on exergoeconomic criteria, *Applied Thermal Engineering* 91, pp 479-495.
- [7] Ghaebi H., Namin A., Rostamzadeh H., (2018), Exergoeconomic optimization of a novel cascade Kalina/Kalina cycle using geothermal heat source and LNG cold energy recovery, *Journal of Cleaner Production* 189, pp 279-296.
- [8] Smith, R. and Smith R., (1995), *Chemical process design*. New York McGraw-Hill, pp 8-13.
- [9] Cengel Y.A., Boles M.A., (2005), *Thermodynamics an engineering approach*: 5th ed. New York, McGraw-Hill Science.
- [10] Liora, Noam., Zhangb, N., *Energy* 0, (2007), exergy, and Second Law performance criteria, *Energy* 32, pp 281-296.
- [11] Timo B., Morosuk T., Tsatsaronis G., (2017), Exergy-based evaluation of methanol production from natural gas with CO<sub>2</sub> utilization, *Energy* 141, pp 2528-2539.
- [12] Ansarinasab H., Mehrpooya M., (2017), Evaluation of novel process configurations for coproduction of LNG and NGL using advanced exergoeconomic analysis, *Applied Thermal Engineering* 115, pp 885-898.