J. Energy Conversion

Volume :11, Issue 4، 2025، 11-31

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص: ۳۱-۱۱

آنالیز یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با به‌کارگیری هم‌زمان دو سیکل ارگانیک رانکین، منبع ذخیره هوای فشرده و چیلر جذبی در مناطق مختلف

ابوالفضل کرمی[۱]، رضا پولتنگری[۲]، احسان اله عصاره[۳و*]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، abolfazl.karami@gmail.com

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، reza.poultangari@iau.ir

*۳- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، assareh@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۹ ، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

چکیده

در این پژوهش به مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم تولید چندگانه بر مبنای انرژیزمین‌گرمایی با هدف به حداکثر رساندن عملکرد سیستم انجام شد. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین۱ و ۲، منبع ذخیره انرژی هوای فشرده و چیلر جذبی است. مدل‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی EES انجام شده است. برای بهینه‌سازی توابع هدف سیستم پیشنهادی از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شد. دو تابع هدف ERTE و نرخ هزینه جهت افزایش عملکرد فنی و کاهش هزینه‌های اقتصادی سیستم تعیین شد. متغیرهای طراحی جهت بهینه‌سازی مسئله شامل دمای ورودی به توربین ۱، دمای ورودی به توربین ۲، دمای ورودی به پمپ ۱، دمای ورودی به اواپراتور، نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی، بازده توربین، بازده پمپ، بازده کمپرسور، بازده توربین گازی، فشار ورودی به مخزن CAES و دمای پینچ پوینت اواپراتور است. برای افزایش عملکرد سیکل رانکین سیالات ارگانیک مختلفی بررسی شد که نتایج نشان داد مبرد R123 و آمونیاک باعث افزایش عملکرد سیستم می شود. بهینه‌ترین ارزش بازده اگزرژی ۷۷/۹۸ درصد و نرخ هزینه ۵/۴۸ دلار بر ساعت به‌دست آمد. جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در کشور ایران ۱۰ شهر مطالعاتی انتخاب شد. آنالیز عملکردی سیستم در کشور ایران با در نظر داشتن بهترین موقعیت از نظر فنی و اقتصادی نشان داد که شهر بندرانزلی بهترین منطقه برای راه‌اندازی سیستم است؛ نتایج زیست‌محیطی نشان داد با راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی ایران می‌توان به گسترش ۱۱ هکتاری فضای سبز کمک کرد.

***عهده‌دار مکاتبات:** assareh@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی، سیستم تولید چندگانه انرژی، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، بهینه‌سازی چندهدفه.

نحوه استناد به این مقاله ابوالفضل کرمی، رضا پولتنگری، احسان اله عصاره. آنالیز یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با به‌کارگیری هم‌زمان دو سیکل ارگانیک رانکین، منبع ذخیره هوای فشرده و چیلر جذبی در مناطق مختلف. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۴) : ۳۱-۱۱.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

۱-مقدمه

امروزه مصرف عمده انرژی بخش خانگی، صنعت و نیروگاه‌های تولیدی را انرژی فسیلی تشکیل می‌دهد. در بخش صنعت، انرژی به‌عنوان یک عامل تولید، مورد تقاضای زیادی قرار می‌گیرد و صنعت با مصرف انرژی به دنبال تولید محصولات مختلف می‌باشند. استفاده بهینه از انواع انرژی نیز از اهدافاقتصادی هر صنایع و نیروگاه‌های تولیدی محسوب می‌شود[۱]. بررسی عوامل جانبی استفاده از منابع سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، نیاز آینده به استفاده هر چه بیش‌تر از انرژی‌های تجدیدپذیر را بیش‌تر آشکار می‌کند. بررسی کارهای انجام شده نشان می‌دهد که کشورهای پیشرفته دنیا افق‌های کوتاه‌مدت و بلندمدتی برای ساخت نیروگاه‌های انرژی تجدیدپذیر در دستور کار خود دارند و کشورهای جهان سوم نیز باید تمام تلاش خود را به کار گرفته تا از این رقابت برای کاهش آلودگی‌ها و تولید انرژی با استفاده از منابع موجود در طبیعت باز نمانند[۲]. انرژی تجدیدپذیر به انواعی از انرژی گفته می‌شود که برخلاف انرژی‌های تجدیدناپذیر, قابلیت بازگشت مجدد به طبیعت را دارند. انرژی‌های بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی و ...از جمله این انرژی‌ها به شمار می‌روند. پتانسیل منابع انرژی تجدیدپذیر برای برآورده کردن تقاضای انرژی در جهان بسیار زیاد است. این انرژی‌ها به‌جز اثرات پاک‌تر نسبت به سوخت‌های فسیلی،گزینه‌های جذابی برای رشد اقتصادی، ایجاد اشتغال و ایجاد صنایع تولیدی و خدماتی هستند که به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه می‌توانند جذابیت زیادی به همراه داشته باشند[۳].

جعفری و عصاره [۴] در سال ۱۴۰۱، به بررسی یک سیستم تولید هم‌زمان جدید بر اساس ترکیبی از آب شیرین‌کن چند اثره و ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده پرداختند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های هلیوستات، توربین گازی، آب‌شیرین‌کن چند اثره و سیستم ذخیره‌ساز انرژی با هوای فشرده است. در این مطالعه به بررسی ۸ رویکرد مختلف، با در نظر گرفتن زمان شارژ، زمان دشارژ، تعداد ساعات آفتابی و تعداد افکت‌های آب شیرین‌کن مختلف، پرداخته شد و در نهایت بهترین رویکرد برای مطالعه انتخاب شد. طبق بررسی‌های به عمل آمده از پارامترهای تأثیرگذار بر روی خروجی‌های سیستم می‌توان از تعداد هلیوستات، بازده توربین و بازده کمپرسور نام برد. هم‌چنین آنالیز اگزرژی سیستم نشان داد که بیش‌ترین تخریب اگزرژی به‌ترتیب مربوط به واحد منبع ذخیره هوای فشرده و واحد خورشیدی است.

سیدحسینی و همکاران[۵] به بررسی یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی پرداختند. در این مطالعه، یک سیستم جدید متشکل از یک سیکل فلاش منفرد، یک سیکل تبرید جذبی منشعب و یک الکترولیز ارائه شد و از یک بهینه‌سازی چند هدفه برای بهینه‌سازی دو تابع هدف هزینه کل واحد محصول و بهره‌وری انرژی، برای یافتن شرایط عملیاتی بهینه استفاده شد. بررسی متغیرها نشان می‌دهد که با تغییر مقدار گاززدایی و دمای ژنراتور، کندانسور و اواپراتور، نرخ هیدروژن تولید شده در ۵/۶۵۵ کیلوگرم در ساعت بدون تغییر باقی می‌ماند. با افزایش فشار تانک فلاش از ۵/۲ بار به ۷ بار، بارهای سرمایش و گرمایش حدود ۱۰۸/۴ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که برق خالص از ۳۹۷۷ کیلووات به ۳۵۰۶ کیلووات کاهش می‌یابد.

پن و همکاران [۶]، به بررسی سیستم‌های مختلف یکپارچه برای تولید برق با استفاده از انرژی سرد LNG و انرژی زمین‌گرمایی پرداختند. در این مطالعه چهار سیستم تولید برق یک‌پارچه با استفاده از انرژی سرد گاز طبیعی مایع و انرژی زمین‌گرمایی بررسی شد. این سیستم‌ها شامل یک چرخه فلاش تک زمین‌گرمایی، فرآیند انبساط LNG و چرخه رانکین آلی بودند. تأثیرات پارامترهای کاری کلیدی بر بازده انرژی، بازده اگزرژی و هزینه سطح سازی شده انرژی آنالیز شد. نتایج نشان داد که افزایش فشار جداکننده، توربین LNG و فشار ورودی توربین رانکین می‌تواند بازده انرژی و اگزرژی را افزایش دهد. هم‌چنین، فشار خروجی توربین LNG بالاتر منجر به LCOE بالاتری می‌شود.

امیرشکاری‌زاده و عصاره [۷] به تحلیل اگزرژی، انرژی و مدل‌سازی، بهینه‌سازی و بررسی پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید چندگانه انرژی با بررسی تأثیر ترموالکتریک برای تولید برق پاک، سرمایش، گرمایش و هیدروژن پرداختند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های پنل خورشیدی، سیکل ارگانیک رانکین، چیلر جذبی و الکترولایزر بود. جهت مدل‌سازی سیستم مورد بررسی و هم‌چنین به دست‌آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

استفاده شد. در این پژوهش مقایسه‌ای بین دو سیستم با حضور ترموالکتریک و سیستم بدون حضور ترموالکتریک و استفاده از کندانسور در سیکل ارگانیک رانکین انجام شد و طبق نتایج سیستم با حضور ترموالکتریک دارای عملکرد بهتری است.

عصاره و همکاران [۸] به بررسی یک سیستم تولید برق با استفاده از انرژی خورشیدی، بادی و اقیانوسی برای تولید برق و یک مطالعه موردی برای شهر بندرعباس- ایران پرداختند. این سیستم از زیرسیستم‌های کلکتور خورشیدی، سیکل ارگانیک رانکین و توربین بادی تشکیل شده بود. این سیستم می‌تواند در بهترین و بهینه‌ترین حالت خود ۴۴۸ کیلووات توان تولید کند. هم‌چنین بازده اگزرژی سیستم۱۳/۸۸درصد است.

عصاره و همکاران [۹] بر روی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم تولیدچندگانه انرژی بر مبنای انرژی خورشیدی و استفاده از الکترولایزرغشای تبادل پروتون و سلول سوختی کار کردند. این سیستم در مقایسه با سیستم‌های متداول تولید برق، سیستم‌های تولیدهم‌زمان از بازده انرژی بالاتر، تولید آلایندهزیست‌محیطی کم‌تر و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار هستند. از ترکیب الکترولایزر و سلول سوختیبه‌منظورتأمین گرما و برق پایدار استفاده شد.

علی‌بابا و همکاران [۱۰]در سال ۲۰۲۰، به تحلیل یک نیروگاه هیبریدی زمین‌گرمایی-خورشیدی و ترکیبی با سیکل ارگانیک رانکین پرداختند. نیروگاه زمین‌گرماییبه‌عنوان مکملی برای انرژی خورشیدی متمرکز (CSP) مورد استفاده قرار گرفت و سپس آنالیز ترکیبی اگزرژی، انرژی، اقتصادی و محیطی انجام شد. یک سیکل زمین‌گرمایی مستقل (حالت اول)، و هم‌چنین سیستم هیبریدی زمین‌گرمایی-خورشیدی (حالت دوم) برای تولید قدرت گرمایشی/سرمایشی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از عملکرد بهتر سیستم ترکیبی از دو انرژی تجدید پذیر بود.

پراوین و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۲، بر روی افزایش عملکرد نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی با استفاده از واحد کلکتور خورشیدی سهموی با قابلیت ذخیره انرژی حرارتی کار کردند و یک بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای افزایش عملکرد نیروگاه پیشنهادی انجام دادند و تأثیر پارامترهای تصمیم‌گیری را بر روی توابع هدف تأثیرگذار بر روی سیستم بررسی کردند و به ارائه یک سیستم کارآمد کمک کردند.

رستمی و همکاران [۱۲] بر روی تولید و ذخیره انرژی از یک سیستم تجدید پذیر تولید چندگانه انرژی پرداختند که سیستم پیشنهادی آن‌ها ترکیبی از انرژی خورشیدی با سلول سوختی غشای تبادل پروتون، سیکل ارگانیک رانکین، ژنراتور ترموالکتریک و الکترولیز قلیایی برای ابداع یک نیروگاه کاربردی بود. در این سیستم از انرژی تابشی جذب شده از خورشید توسط کلکتور خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی جهت تأمین نیاز سیستم به انرژی حرارتی استفاده می‌شود و این انرژی وظیفه تأمین حرارت لازم برای اواپراتور سیکل ارگانیک رانکین را جهت تولید برق بر عهده دارد. سپس، الکتریسیته تولید شده توسط سیکل ارگانیک رانکین برای تأمین برق الکترولایزر استفاده می‌شود.

عصاره و همکاران [۱۳] به تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم‌های ترکیبی سرمایش، گرمایش و نیرو با استفاده از دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و زمین‌گرمایی و ترکیبی با سیستم تولید هیدروژن کار کردند. سیستم پیشنهادی شامل دو توربین بخار، کلکتورهای فتوولتائیک، یک مدار پیل سوختی، یک پمپ حرارتی، باتری ذخیره کننده انرژی و یک ظرف ذخیره‌سازی هیدروژن بود. جهت تحلیل و مدل‌سازی این به عملکرد سیستم از نرم‌افزار مدل‌سازی ترنسیس استفاده شد. تعدادی از رویکردهای شبیه‌سازی با استفاده از روش طراحی پاسخ‌ها در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت بررسی شد و نتایج آن‌ها با استفاده از سطح پاسخ، تجزیه‌وتحلیل شد. تعداد پنل های فتولتائیک، ظرفیت توربین بخار، توان پیل سوختی، ظرفیت گرمایش پمپ حرارتی و ظرفیت سرمایش چیلر جذبی به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که سیستم بهینه به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌های چرخه عمر سالانه، امتیاز آسایش حرارتی، کل مصرف برق و استفاده از گاز طبیعی دیگ کمکی را کاهش می‌دهد.

نگرانی‌های اخیر زیست‌محیطی جهانی خواستار تلاش‌هایی برای ترویج انتقال منابع انرژی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که رشد اقتصادی بالایی دارند، شده است و در عصر معاصر، بازیابی محیط‌زیست هدف اصلی اقتصادهای

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

نوظهور و صنعتی است، جایی‌که محققان پیشنهاد می‌کنند منابع انرژی سازگار با محیط‌زیست مانند انرژی‌های تجدیدپذیر را اتخاذ کنند. ادبیات انتقال انرژی فرض می‌کند که منابع انرژی تجدیدپذیر علی‌الخصوص انرژی زمین‌گرمایی نسبت به سوخت‌های فسیلی به‌طور مساوی در سطح جهانی توزیع شده‌اند. این فرض نشان می‌دهد که تغییر از سوخت‌های فسیلی به انرژی‌های تجدیدپذیر، کشورهای بیش‌تری را قادر می‌سازد تا به دنبال خودکفایی انرژی و پایان دادن به وابستگی خود به انرژی وارداتی باشند. انرژی‌های تجدیدپذیر انواع مختلف دارند که شاید بتوان گفت یکی از بهترین و در دسترس‌ترین این نوع انرژی‌ها، انرژی زمین‌گرمایی است که مستلزم توجهات بیش‌تری است.

طبق بررسی‌های انجام شده، تحقیقاتی زیادی بر روی به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی انجام شده است ولی استفاده از سیستم‌های زمین‌گرمایی که انرژی اولیه سیستم توسط انرژی زمین‌گرمایی تأمین می‌شود، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین در این پژوهش با استفاده از انرژی تجدیدپذیر زمین‌گرمایی در یک سیستم تجدیدپذیر جدید با شرایط اقلیمی و نزدیک به مناطقی با پتانسیل بالا برای این سیستم و دارای شرایط مناسب، اقدام به تولید انرژی برق پاک، گرمایش و سرمایش شده است. در پژوهش حاضر با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به تولید محصولاتی هم‌چون انرژی برق پاک که لازمه زندگی بشر است و هم‌چنین سرمایش و گرمایش که به‌عنوان یک سوخت پاک و عاری از کربن شناخته می‌شود، پرداخته شده است. هدف از این پژوهش کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و تولید محصولاتی است که بدون دخالت از انرژی فسیلی تولید می‌شود و انرژی‌های حیاتی زندگی جوامع هستند. هم‌چنین در این پژوهش عملکرد سیستم نسبت به شرایط آب و هوایی مناطق مختلف در کشور ایران بررسی می‌شود و بهترین و مناسب‌ترین موقعیت منطقه‌ای جهت احداث نیروگاه پیشنهادی تعیین می‌شود.

به‌طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

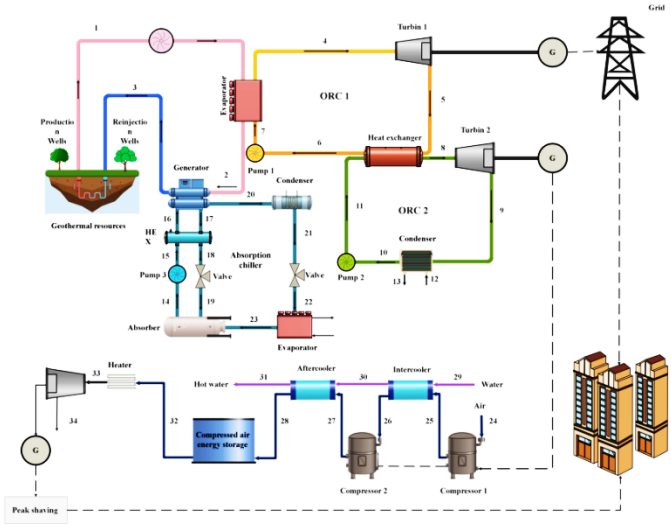
- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای چاه زمین‌گرمایی، استفاده هم‌زمان از دو سیکل ارگانیک رانکین، یک چیلر جذبی تک اثر با هدف حداکثر تولید توان، سرمایش و گرمایش سیستم بدون هیچ‌گونه اثرات مخرب بر محیط‌زیست.
- تحلیل‌های انرژی، اگزرژی و اقتصادی برای ارائه دیدی جامع از عملکرد سیستم و قابلیت‌های آن.
- آنالیز اقتصادی سیستم پیشنهادی و تعیین هزینه واحدها و اجزاء سیستم.
- بررسی امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان سیستم بر اساس داده‌های شرایط آب و هوایی مناطق مختلف کشور ایران.
- معرفی بهترین موقعیت برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی.
- آنالیز زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی.

۲- شرح سیستم

در شکل (۱) شماتیک پیشنهادی نشان داده شده است. این سیستم بر پایه انرژی زمین‌گرمایی است و متشکل از زیرسیستم‌های چاه زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین ۱ و ۲ که سیال ارگانیک این دو سیکل مبرد و آمونیاک است، چیلر جذبی و یک سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده است. محصول این سیستم تولید برق پاک، سرمایش و گرمایش است. در این سیستم با استفاده از یک منبع حرارت با دمای پایین، توربین را به گردش در می‌آورد. منبع حرارت در این سیستم انرژی زمین‌گرمایی است که از مخزن زمین گرما استخراج شده و وارد اواپراتور شده و از این طریق حرارت را به سیکل می‌دهد و در مرحله آخر دوباره به زمین تزریق می‌شود. سیال به‌وسیله یک پمپ که قبل از نقطه‌ی ۱ قرار دارد, وارد اواپراتور می‌شود و به این دلیل که فشار سیال ورودی و خروجی آن ثابت است نیاز به تغییر فاز سیال وجود ندارد و هم‌چنین میزان برق مصرفی پایینی دارد که در محاسبات قابل‌چشم‌پوشی است. با پمپ شدن سیال از مخزن زمین, گرما وارد یک سیکل ارگانیک رانکین می‌شود. عموماً در این سیکل‌های ارگانیک رانکین از دو نوع سیال، با نقطه جوش پایین و سیال با نقطه‌جوش بالا استفاده می‌شود، که درسیکل رانکین ارگانیک کار حاضر، از سیال با نقطه‌جوش بالا استفاده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]



شکل ۱: شماتیک سیستم.

۳-آنالیز سیستم

۳-۱- بررسی ترمودینامیکی

در جدول (۱) داده‌های ورودی جهت آنالیز زمین‌گرمایی سیستم آورده شده است.

جدول ۱: مقدار داده‌های ورودی

داده	معرفی پارامتر	مقدار
T_0	دمای محیط	25°C
P_0	فشار محیط	101.3[kpa]
$\dot{m}_1$	دبی جرمی ورودی به اواپراتور	1.5 [kg/s]
T_1	دمای ورودی به اواپراتور	210°C
T_4	دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین ۱	150°C
T_6	دمای ورودی به پمپ سیکل ارگانیک رانکین ۱	70°C
η_{turbin}	بازده توربین	0.85
η_{pump}	بازده پمپ	0.8
pp_{Eva}	پینچ پوینتاواپراتور	5°C
T_8	دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین ۲	60°C

مفروضات زیر جهت ساده‌سازی حل مسئله می‌شود:

- شرایط حالت پایدار
- توربین‌ها ایزنتروپ هستند.
- پمپ‌ها ایزنتروپ هستند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

- افت فشار در خطوط لوله ناچیز است.
- خروجی کندانسور مایع اشباع شده است.
- خروجی اواپراتور بخار اشباع شده است.
- تغییرات در انرژی پتانسیل ناچیز است.
- تغییرات در انرژی جنبشی ناچیز است.

میزان انرژی حرارتی زمین‌گرمایی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_{gen}=\dot{m}_2\times C_{p2}\times(T_2-T_3) \quad (۱)$$

در جدول (۲) داده‌های ورودی جهت آنالیز و طراحی سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده (CAES) آورده شده است.

جدول ۲: مقدار داده‌های ورودی سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده

داده	معرفی پارامتر	مقدار
$\eta_{compressor}$	بازده کمپرسور	0.86
$\eta_{turbin,Gas}$	بازده توربین گاز	0.86
$\eta_{Intercooler}$	بازده اینترکولر	0.85
$\eta_{Aftercooler}$	بازده افترکولر	0.85
P_{28}	فشار ورودی به سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده	5000 [kpa]
$T_{discharge}$	زمان تخلیه	4 "Hours"
T_{charge}	زمان شارژ	8 "Hours"

سرعت ذخیره‌سازی طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$V_{storage}=T_{charge}\times 3600\times \dot{m}_{28}(\rho_{28}-\rho_{32}) \quad (۲)$$

جهت بالانس انرژی سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر از روابط جدول (۳) استفاده می‌شود.

جدول ۳: بالانس انرژی سیستم

اجزاء سیستم	رابطه
توربین سیکل ارگانیک رانکین ۱	$\dot{W}_{turbine\ 1}=\dot{m}_4\times(h_4-h_5)$
توربین سیکل ارگانیک رانکین ۲	$\dot{W}_{turbine\ 2}=\dot{m}_8\times(h_8-h_9)$
پمپ سیکل ارگانیک رانکین ۱	$\dot{W}_{pump1}=\dot{m}_6\times(h_7-h_6)$
پمپ سیکل ارگانیک رانکین ۲	$\dot{W}_{pump2}=\dot{m}_{10}\times(h_{11}-h_{10})$
اواپراتور	$Q_{Evaporator}=\dot{m}_1\times(h_1-h_2)$
کندانسور	$Q_{condenser}=\dot{m}_9\times(h_9-h_{10})$
مبدل حرارتی	$Q_{HEX}=\dot{m}_5\times(h_5-h_6)$
اینترکولر	$Q_{Intercooler}=\dot{m}_{25}\times(h_{25}-h_{26})$
افترکولر	$Q_{Aftercooler}=\dot{m}_{27}\times(h_{27}-h_{28})$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

محاسبه توان سیکل ارگانیک رانکین ۱ از رابطه (۳):

$$\dot{W}_{net,\ ORC\ 1}=\dot{W}_{turbin1}+\dot{W}_{pump1} \quad (۳)$$

محاسبه توان سیکل ارگانیک رانکین ۲ از رابطه (۴):

$$\dot{W}_{net,\ ORC\ 2}=\dot{W}_{turbin2}+\dot{W}_{pump2} \quad (۴)$$

محاسبه توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین دوگانه از رابطه (۵):

$$\dot{W}_{net}=\dot{W}_{turnet,\ ORC\ 1}+\dot{W}_{turnet,\ ORC\ 2} \quad (۵)$$

جهت بالانس انرژی سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده از روابط جدول (۴) استفاده می‌شود.

جدول ۴: بالانس انرژی سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده

اجزاء سیستم	رابطه
کمپرسور ۱	$\dot{W}_{Comp\ 1}=\dot{m}_{24}\times(h_{25}-h_{24})$
کمپرسور ۲	$\dot{W}_{Comp\ 2}=\dot{m}_{26}\times(h_{27}-h_{26})$
سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده	$\dot{W}_{CAES}=\dot{W}_{Comp\ 1}+\dot{W}_{Comp\ 2}$
توربین گازی	$\dot{W}_{GT}=\dot{m}_{33}\times(h_{33}-h_{34})$
هیتر[1]	$Q_{heater}=\dot{m}_{32}\times(h_{33}-h_{32})$

مقدار توان تولیدی کل سیستم در زمان پیک از رابطه (۶)به‌دست می‌آید:

$$\dot{W}_{net\ peak\ shaving}=\dot{W}_{net}+\dot{W}_{GT}-\dot{W}_{CAES} \quad (۶)$$

۲-۳- بررسی اقتصادی

در جدول (۵) روابط مربوط به هزینه هر جزء از سیستم آورده شده است.میزان نرخ هزینه کل سیستم از مجموع هزینه اجزا سیستم به دست آورده می‌شود، و طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$Z_{total}=Z_{Turbine1}+Z_{Turbine2}+Z_{cond}+Z_{evap}+Z_{Pump1}+Z_{Pump2}+Z_{Chiller}+Z_{HEX}+Z_{Comp\ 1}+Z_{Comp\ 2}+Z_{CAES_tank}+Z_{Aftercooler}+Z_{Intercooler}+Z_{Turbin\ Gas} \quad (۷)$$

[1] heater

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

جدول ۵: بالانس هزینه

اجزاء سیستم	رابطه
توربین ۱	$Z_{\text{Turbine 1}} = 4750 \times ((\dot{W}_{\text{turbine}}^{0.75}) + 60 \times (\dot{W}_{\text{turbine}}^{0.95}))$
توربین ۲	$Z_{\text{Turbine 2}} = 4750 \times ((\dot{W}_{\text{turbine}}^{0.75}) + 60 \times (\dot{W}_{\text{turbine}}^{0.95}))$
پمپ شماره ۱	$Z_{\text{Pump1}} = 3500 \times (\dot{W}_{\text{Pump1}}^{0.41})$
پمپ شماره ۲	$Z_{\text{Pump2}} = 3500 \times (\dot{W}_{\text{Pump2}}^{0.41})$
کندانسور	$Z_{Cond} = 1773 \times \dot{m}_9$
اواپراتور	$Z_{\text{Evap}} = 276 \times (A_{\text{Evap 1}}^{0.88})$
مبدل حرارتی	$Z_{HEX} = 12000 \times (A_{\text{HX}} / 100)^{0.88}$
اینترکولر	$Z_{\text{Intc}} = 12000 \times (A_{\text{Intc}} / 100)^{0.6}$
افترکولر	$Z_{\text{Aftc}} = 12000 \times (A_{\text{Aftc}} / 100)^{0.6}$
کمپرسور ۱	$Z_{Comp1} = ((71.1 \times \dot{m}_{24}) / (0.9 - \eta_{\text{Compressor}}) \times ((P_{25} / P_{24}) \times \ln(P_{25} / P_{24})))$
کمپرسور ۲	$Z_{Comp2} = ((71.1 \times \dot{m}_{26}) / (0.9 - \eta_{\text{Compressor}}) \times ((P_{27} / P_{26}) \times \ln(P_{27} / P_{26})))$
توربین گازی	$Z_{Gas,Turbin} = ((1536 \times \dot{m}_{32}) / (0.92 - \eta_{Gas,Turbin}) \times \ln(P_{33} / P_{34}) \times (1 + \exp(0.036 \times T_{33} - 54.4))$
سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده	$Z_{\text{CAES_tank}} = ((1.218 \times \exp(2.3631 + 1.3673 \times (\ln(V_{\text{Storage}})) - 0.06309 \times (\ln(V_{\text{Storage}}))^2))$
چیلر جذبی	$Z_{Chiller} = 1144.3 \times (Q_{COOLING}^{0.67})$

۳-۳- راندمان سیستم

بازده اگزرژی رفت و برگشتی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$ERTE=(\dot{W}_{net} \times 24 + Q_{cooling} \times 24 + \dot{W}_{GT} \times T_{discharge}) \times 100 / (Ex_1 \times 24 + \dot{W}_{Input\text{-}CAES} \times T_{charge} + Q_{heater} \times T_{discharge}) \quad (۸)$$

۳-۴- روش سطح پاسخ

سطح پاسخ یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ است که متأثر از چندین متغیر مستقل است. در طراحی آزمایش‌ها، هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای مؤثر بر خروجی‌ها با کم‌ترین تعداد آزمایش است. روش‌شناسی روشی ریاضیاتی آماری برای بهینه‌سازی خروجی‌های آزمایش‌ها است. این روش با کشف میزان سطح پاسخ بهینه هر یک از متغیرهای طراحی به بهترین سطح پاسخ دست می‌یابد. در طراحی آزمایش‌ها، هدف، شناسایی و تحلیل متغیرهای مؤثر بر خروجی‌ها با کم‌ترین تعداد آزمایش است. به‌صورت خلاصه این روش روشی ریاضیاتی آماری برای بهینه‌سازی خروجی‌های آزمایش‌ها است. این روش با کشف میزان سطح پاسخ بهینه هر یک از متغیرهای طراحی به بهترین سطح پاسخ دست می‌یابد[۱۴ و ۱۵]. در شکل (۲) فلوچارت حل روش RSM آورده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]



شکل ۲: فلوچارت حل روش سطح پاسخ

۳-۵- روش تاپسیس

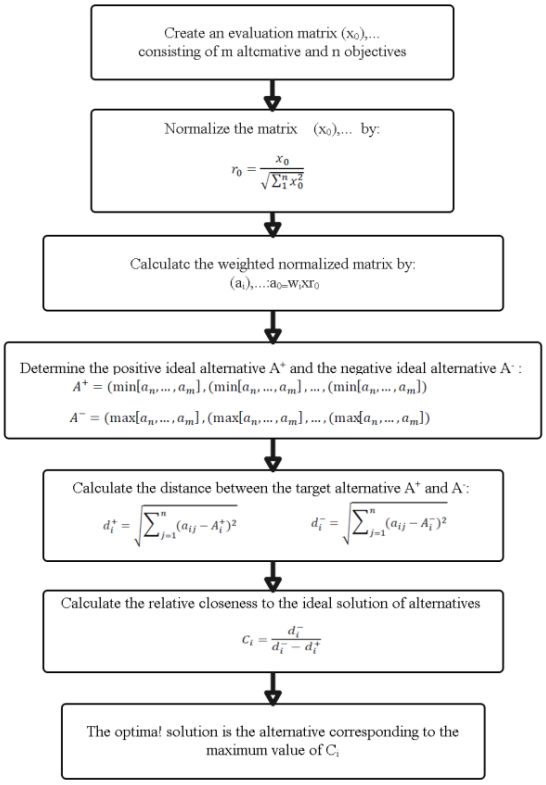
تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها براساس معیارها با توجه به فاصله آن‌ها از ایده‌آل‌های مثبت و منفی است. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل مثبت و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. راه‌حل مثبت راه‌حلی است که معیار سود را افزایش و معیار هزینه را کاهش می‌دهد. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کم‌ترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی دارد. در رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش تاپسیس گزینه‌هایی که بیش‌ترین تشابه را با راه‌حل ایده آل داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند. در شکل (۳) روش حل تاپسیس به‌صورت فلوچارت نشان داده شده است.

۳-۶- روش تحقیق

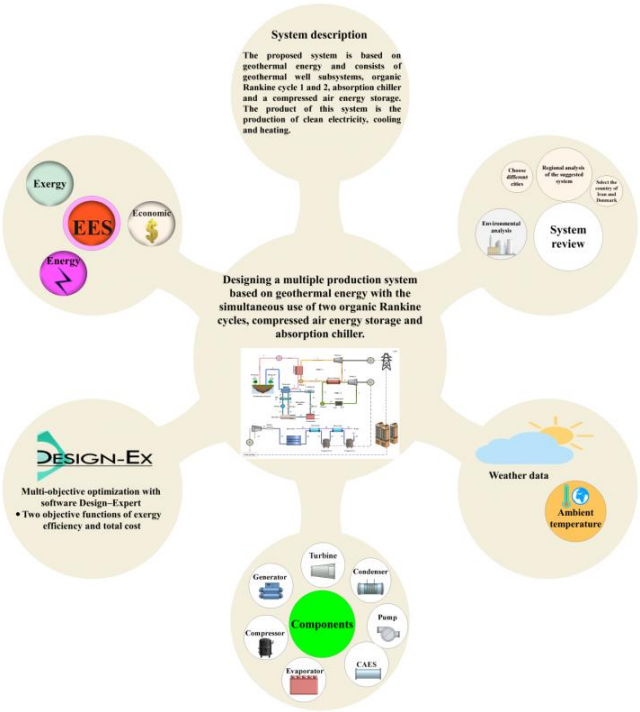
یک نمای کلی از فلوچارت روش‌شناسی پژوهش حاضر در شکل (۴) ارائه شده است که فرآیند حل را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- مدل‌سازی سیستم با نرم‌افزار حل معادلات مهندسی انجام می‌شود.
- برای پیدا کردن بهترین شرایط کاری فنی و اقتصادی سیستم یک بهینه‌سازی چندهدفه انجام می‌شود.
- بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و روش سطح پاسخ با تعیین دو تابع هدف بازده اگزرژی و نرخ هزینه انجام می‌شود.
- یک تحلیل اقتصادی نیز برای تعیین واحدها و اجزا سیستم پرداخته می‌شود.
- ۱۰ شهر از کشور ایران به‌عنوان اقلیم‌های متفاوت و با شرایط آب و هوایی مختلف جهت بررسی عملکرد سیستم انتخاب شد.
- اطلاعات آب و هوایی شهرهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار متانورم استخراج می‌شود.
- بهترین منطقه در کشور ایران انتخاب می‌شود.
- یک آنالیز زیست‌محیطی برای بهترین شهرها انجام می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]



شکل ۳: روش تاپسیس



شکل ۴: فلوچارت روش تحقیق

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

۴- نتایج

۴-۱- اعتبارسنجی

به‌منظوراعتبارسنجی نتایج، نتایج کار حاضر با نتایج کار رمزی و همکاران [۱۶] مقایسه شد. با توجه به این‌که سیستم معرفی شده یک سیستم جدید و تازه طراحی شده است، در نتیجه برای اعتبارسنجی این پژوهش به بررسی واحد ذخیره‌ساز انرژی با هوای فشرده (CASE)، جهت اعتبارسنجی انتخاب شد. در جدول (۶) نتایج اعتبارسنجی پژوهش حاضر ارائه شده است. همان‌گونه از نتایج مشخص است، این پژوهش از اعتبار خوبی برخوردار است.

جدول ۶: نتایج اعتبارسنجی پژوهش حاضر

پارامتر	پژوهش حاضر	رمزی و همکاران[۱۶]	خطا
Maximum pressure of CAES (bar)	20	20	0
Minimum pressure of CAES (bar)	6.667	6.667	0
Inlet temperature of air turbine (K)	1300	1300	0
Power consumption of second compressor (kW)	279.8	281.4	0.56
Power consumption of third compressor (kW)	280.1	281.8	0.60
Output power of air turbine (kW)	2279.3	2280	0.03

۴-۲- آنالیز سیالات ارگانیک

در ابتدا برای بررسی سیالات ارگانیک بر روی عملکرد اقتصادی و فنی سیستم ۱۰ رویکرد مختلف بررسی شد و هدف معرفی بهترین سیالات ارگانیک برای افزایش عملکرد فنی و کاهش هزینه‌های سیستم است.در جدول (۷) نتایج آنالیز ۱۰ رویکرد مورد بررسی سیالات ارگانیک متفاوت و کاربردی برای سیکل ارگانیک رانکین ۱ و ۲ نشان داده شده است و اثر این سیال بر روی توان تولیدی کل سیستم، نرخ هزینه و ERTE بررسی شده است و بهترین رویکرد جهت ادامه روند مطالعه انتخاب می‌شود.

جدول ۷:آنالیز سیالات ارگانیک

Scenario	Organic fluid ORC1	Organic fluid ORC2	ERTE (%)	Cost rate ($/h)	Power (kWh)
1	R123	R134a	71.81	5.72	542.5
2	R113	Ammonia	68.13	5.138	493.5
3	R123	R115	70.91	5.832	530.4
4	R113	R1234yf	67.13	5.222	480.7
5	R123	Ammonia	72.57	5.645	552.8
6	R123	R1234yf	71.51	5.739	538.5
7	R113	R152a	67.71	5.173	488
8	R123	R152a	72.12	5.685	546.7
9	R113	R410A	66.42	5.295	471.7
10	R123	R113	72.46	5.666	551.2

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

با توجه به این‌که هدف اصلی این پژوهش افزایش عملکرد سیستم است برای انتخاب بهترین رویکرد از روش تاپسیس استفاده شد و نتیجه تاپسیس انتخاب رویکرد ۵ به‌عنوان بهترین رویکرد بود. به‌همین دلیل ادامه پژوهش با انتخاب دو سیال ارگانیک R123 و آمونیاک برای دو سیکل ارگانیک رانکین انجام می‌شود.

۳-۴-بهینه‌سازی چندهدفه

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل تعیین می‌کند. هدف در طراحی‌های سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که تحت تأثیر چندین متغیر مستقل (متغیر ورودی) قرار می‌گیرد. در این بهینه‌سازی یازده متغیر ورودی و دو خروجی به‌عنوان تابع هدف بهینه‌سازی انتخاب شدند. توابع هدف شامل بازده اگزرژی رفت و برگشت و نرخ هزینه هستند که جهت افزایش عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌های اقتصادی سیستم انتخاب شدند. بهینه‌سازی چندهدفه با روش سطح پاسخ (RSM) انجام می‌شود که در نهایت به معرفی بهینه‌ترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی می‌پردازد. در جدول (۸) متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده آن‌ها معرفی شده است.

جدول ۸: متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده آن‌ها

Factor	Name	Low Level	High Level
A	Geothermal mass flow rate (kg/s)	1	10
B	T1 (^{0}C)	190	220
C	T4 (^{0}C)	140	160
D	T6 (^{0}C)	60	90
E	T8 (^{0}C)	50	70
F	Pinch point evaporator (^{0}C)	5	9
G	ORC turbine efficiency (%)	0.7	0.95
H	Pump efficiency (%)	0.7	0.95
I	Compressor efficiency (%)	0.7	0.95
J	Gas turbine efficiency (%)	0.7	0.95
K	P_{28} (kPa)	4500	5500

به منظور بهینه‌سازی توابع هدف توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، تعداد ۱۶۰ بار تکرار حل، نسبت به مقدار متغیرهای بهینه‌سازی و تعیین مقدار نهایی آن‌ها، انجام شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی به‌دست‌آمده، روش بهینه‌سازی به کار رفته، سطح پاسخ ترکیب بهینه عوامل انتخاب‌شده را پیدا می‌کند. بر این اساس پس از انجام حل، یکصد نقطه بهینه گزارش می‌شود که به‌ترتیب نشان‌دهنده بهینه‌ترین و بهترین راه‌حل هستند که سیستم می‌تواند به آن‌ها برسد. در جدول (۹) نتیجه بهینه‌ترین راه‌حل به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ با مطلوبیت (۰/۹۵۵) ارائه شده است. لازم به‌ذکر است هرچه مطلوبیت به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، جواب قابل‌قبول‌تر است.

جدول ۹: نتایج بهینه توابع هدف و متغیرهایبهینه‌سازی

Parameter	Optimum point
Pump efficiency (%)	0.803
Compressor efficiency (%)	0.888
Gas turbine efficiency (%)	0.894
ORC turbine efficiency (%)	0.89
Pinch point evaporator (^{0}C)	5.984
T8 (^{0}C)	65.49
T6 (^{0}C)	66.771
T4 (^{0}C)	152.999

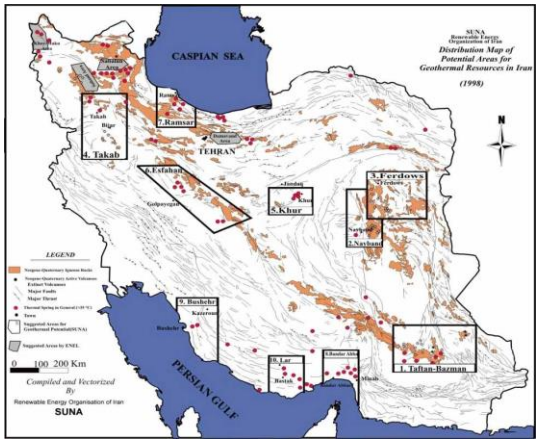
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

T1 (^{0}C)	206.689
Geothermal mass flow rate (kg/s)	3.029
P28 (kPa)	4779.956
ERTE (%)	77.981
Cost rate ($/h)	5.489

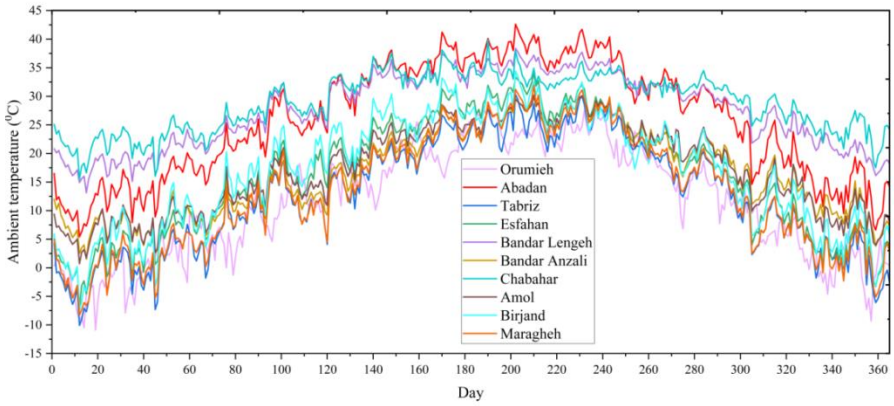
۴-۴- مطالعه موردی

یک امکان‌سنجی جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در کشور ایران انجام شد. به‌همین دلیل از هر کشور ۱۰ اقلیم مختلف با شرایط آب و هوایی مختلف انتخاب شد. شهرهای انتخابی در بهترین و پُر پتانسیل‌ترین مناطق زمین‌گرمایی کشور ایران محسوب می‌شوند. در شکل (۵) نقشه زمین‌گرمایی کشور ایران ارائه شده است. شهرهای مطالعاتی کشور ایران شامل بندر چابهار، بندرلنگه، بندر انزلی، ارومیه، مراغه، تبریز، اصفهان، آبادان، آمل و بیرجند است.



شکل ۵: نقشه زمین‌گرمایی کشور ایران

در شکل (۶) تغییرات میانگین دمای محیط در طول سال به‌صورت روزانه (۳۶۵ روز) برای شهرهای مطالعاتی رسم شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تغییرات میانگین دمای محیط شهرهای مطالعاتی بین دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد است. بیش‌ترین دمای محیط مربوط به ماه‌های ژوئن، جولای و اوت است که این ماه‌ها در فصل تابستان است. جهت مقایسه دمای محیطی شهرهای مطالعاتی باید گفت که کم‌ترین دمای محیط مربوط به شهر ارومیه و بیش‌ترین دمای محیط مربوط به شهر آبادان و چابهار است.



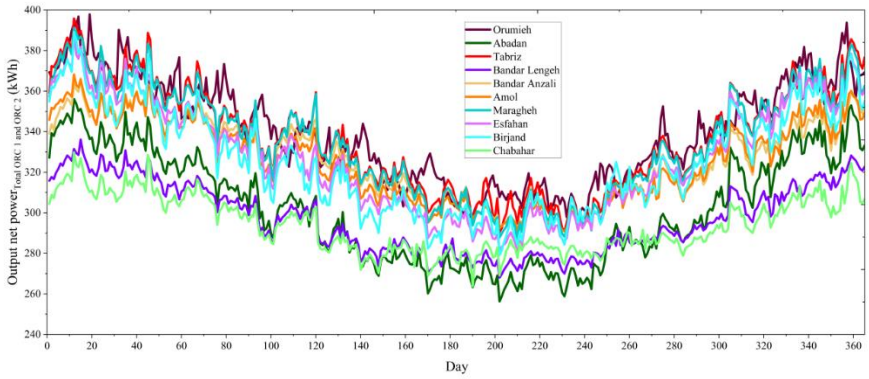
شکل ۶: تغییرات میانگین دمای محیط شهرهای مطالعاتی ایران در طول سال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

در شکل (۷) تغییرات توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین دوگانه به‌صورت روزانه نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. توربین سیکل ارگانیک رانکین وظیفه تولید توان را دارد. پس تغییرات محیطی بر روی عملکرد سیستم می‌تواند باعث کاهش یا افزایش میزان نرخ تولید توان شود. با افزایش دمای محیط تجهیزات سیستم گرم می‌شود و باعث کاهش عملکرد سیستم می‌شود و از طرفی باعث تغییرات در اختلاف آنتالپی و آنتروپی سیستم نیز می‌شود، به‌همین دلیل افزایش دمای محیط تأثیر منفی بر روی عملکرد توربین دارد.

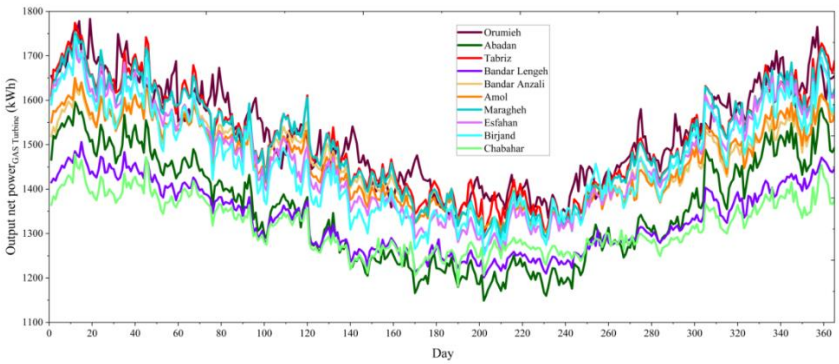
مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به‌ترتیب در شهرهای ارومیه، بندر انزلی، بیرجند و آمل دارای عملکرد بهتری دارد. نتایج نشان داد که هرچه دمای محیط شهرها افزایش می‌یابد و جز مناطق گرم‌سیر محسوب شوند، عملکرد سیکل‌های ارگانیک رانکین دوگانه نیز کاهش می‌یابد. پس افزایش دمای محیط تأثیر منفی بر روی عملکرد سیکل‌های ارگانیک رانکین دوگانه دارد و بهترین منطقه جهت راه‌اندازی سیستم با سیکل‌های ارگانیک رانکین دوگانه مناطق سردسیر است.



شکل ۷: تغییرات میزان توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین دوگانه شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

در شکل (۸) تغییرات توان تولیدی توربین گازی به‌صورت روزانه نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. نحوه کارکرد توربین‌های گازی بدین ترتیب است که کمپرسور در حال گردش با دور زیاد، هوای محیط را مکیده و فشار آن را به چندین برابر فشار محیط (حدود ۱۰ برابر) می‌رساند. ضمن این‌که نسبتاً درجه حرارت آن نیز افزایش می‌یابد.

هوای فشرده شده از کمپرسور خارج و به درون محفظه یا محفظه‌های احتراق هدایت می‌شوند. لازم به‌ذکر است افزایش دمای محیط تأثیر منفی بر روی عملکرد توربین گازی دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به‌ترتیب در شهرهای ارومیه، تبریز و مراغه که سردترین مناطق هستند دارای عملکرد بهتری است و هرچه دمای محیط منطقه افزایش می‌یابد عملکرد تولید توربین گازی کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل کم‌ترین توان تولیدی توربین گازی مربوط به شهرهای بندرلنگه و آبادان است.

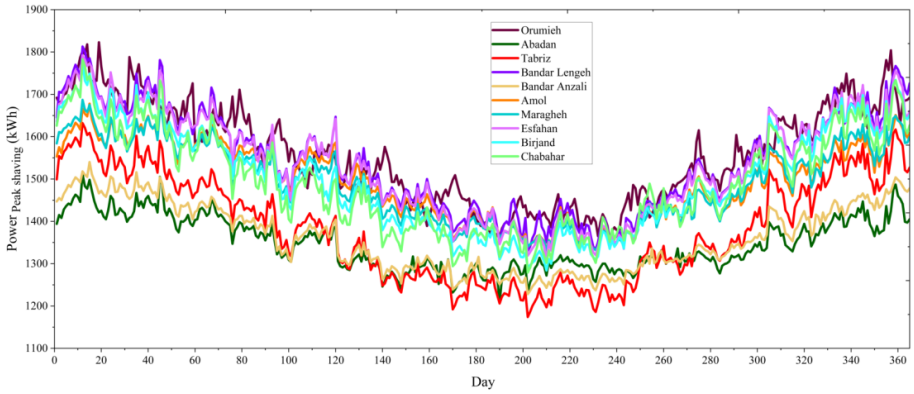


شکل ۸: تغییرات میزان توان تولیدی توربین گازی شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

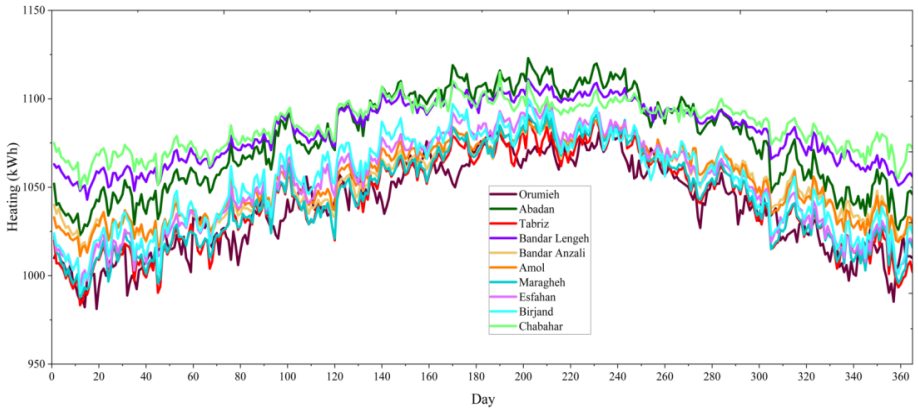
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

در شکل (۹) تغییرات توان تولیدی کل سیستم شامل مجموع توان تولیدی توربین‌های سیکل رانکین و توربین گازی منهای توان مصرفی کمپرسورهای واحد CAES، به‌صورت روزانه نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی شهرهای مطالعاتی نشان داده شده است. به‌همین دلیل مناطق سردسیر برای راه‌اندازی سیستم بهتر است چون تأثیرپذیری این توربین از دمای محیط زیاد است. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به‌ترتیب در شهرهای ارومیه، بندرانزلی دارای عملکرد بهتری است و هرچه دمای محیط منطقه افزایش می‌یابد عملکرد سیستم کاهش می‌یابد به‌همین دلیل کم‌ترین توان تولیدی توربین گازی مربوط به شهرهای آبادان و بندرلنگه است.



شکل ۹: تغییرات میزان توان تولیدی کل سیستم در زمان پیک شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

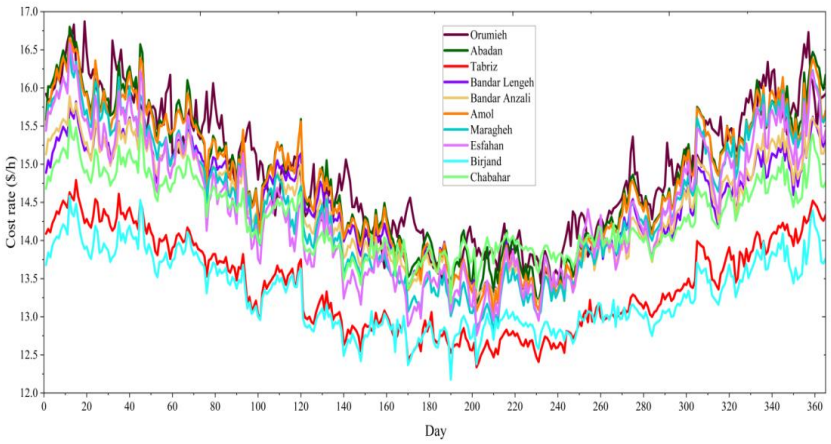
در شکل (۱۰) تغییرات گرمایش تولیدی روزانه سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی شهرهای نشان داده شده است. گرمایش سیستم توسط حرارت خروجی از کندانسور سیکل ارگانیک رانکین تولید می‌شود.هرچه دمای محیط افزایش یابد و حرارت ورودی به سیستم افزایش یابد، پس در نتیجه میزان حرارت اتلافی از سیستم نیز افزایش می‌یابد، پس افزایش دمای محیط با میزان افزایش تولید گرمایش رابطه مستقیم دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای گرم‌سیر که دمای محیط بالاتری دارند، دارای میزان تولید گرمایش بهتری است. به‌همین دلیل نتایج نشان داد به‌ترتیب در شهرهای آبادان و بندرلنگه به دلیل دمای محیط بالا, بیش‌ترین گرمایش تولید می‌شود و انتخاب مناطق سردسیر مانند شهر ارومیه، تبریز و مراغه باعث کاهش میزان گرمایش تولیدی سیستم می‌شود. پس در جایی که هدف تولید گرمایش باشد باید مناطق گرم‌سیر برای راه‌اندازی سیستم پیشنهاد شود.



شکل ۱۰: تغییرات میزان گرمایش تولیدی سیستم در شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

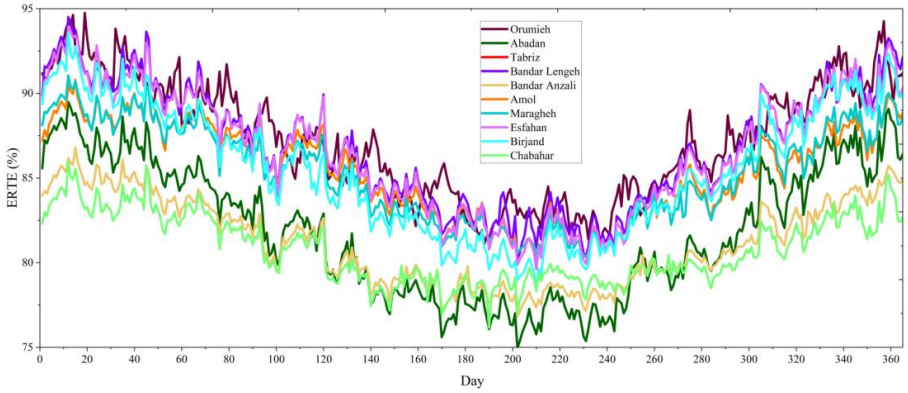
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

در شکل (۱۱) میانگین روزانه تغییرات بازده اگزرژی رفت‌وبرگشتی سیستم در شهرهای مطالعاتی ایران گزارش شده است. بازده اگزرژی و توان تولیدی و هم‌چنین نرخ هزینه با هم رابطه مستقیم دارند. پس افزایش یا کاهش توان تولیدی باعث تغییراتی مشابه بر روی ERTEسیستم می‌شود. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به ترتیب در شهرهای ارومیه، بندرانزلی و تبریزبه دلیل عملکرد بالای تولید توان دارای بازده بهتری است. نتایج نشان داد که هرچه دمای محیط شهرها افزایش می‌یابد و جز مناطق گرم‌سیر محسوب شوند، عملکرد سیستم نیز کاهش می‌یابد. پس افزایش دمای محیط تأثیر منفی بر روی عملکرد سیستم دارد و بهترین منطقه جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی مناطق سردسیر است.



شکل ۱۱: تغییرات میانگین ساعتی بازده اگزرژی شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

در شکل (۱۲) میانگین روزانه تغییرات نرخ هزینه سیستم در شهرهای ایران گزارش شده است. نرخ هزینه و توان تولیدی با هم رابطه مستقیم دارند. پس افزایش یا کاهش توان تولیدی باعث تغییراتی مشابه بر روی نرخ هزینه سیستم می‌شود. چرا که با افزایش توان تولیدی میزان هزینه تعمیر و نگه‌داری سیستم افزایش می‌یابد و بالعکس. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای که بیش‌ترین توان تولیدی و بازده اگزرژی رفت‌وبرگشتی را دارد، دارای بیش‌ترین نرخ هزینه نیز است. به‌همین دلیل به‌ترتیب در شهرهای ارومیه، بندرانزلی و تبریز دارای بیش‌ترین نرخ هزینه است. هدف از این پژوهش انتخاب منطقه‌ای است که علاوه بر این‌که سیستم دارای عملکرد بالایی است، از نرخ هزینه مناسبی نیز برخوردار باشد.



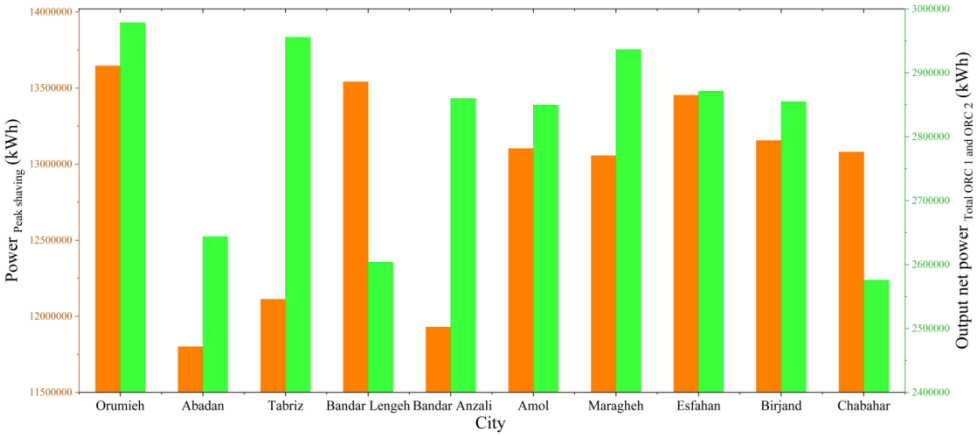
شکل ۱۲: تغییرات میانگین ساعتی نرخ هزینه شهرهای مطالعاتی کشور ایران به‌صورت روزانه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

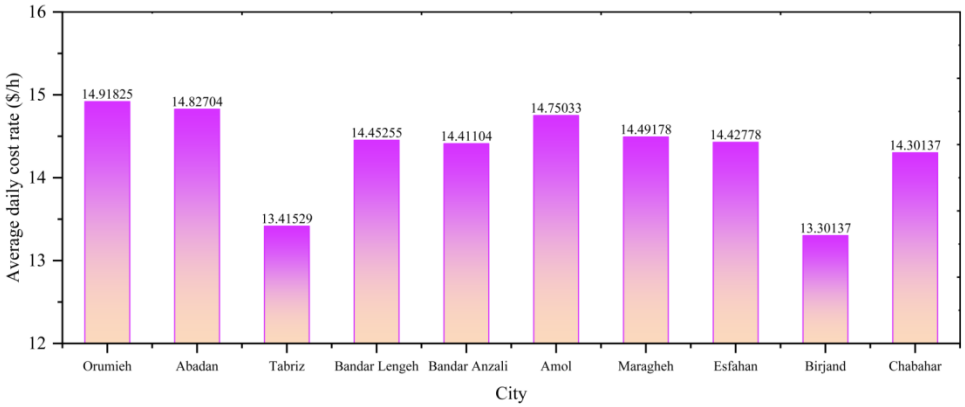
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

۴-۵- بهترین منطقه

در شکل (۱۳) به مقایسه مجموع توان تولیدی سالیانه ۱۰ شهر مطالعاتیایران در دو حالت با پیک مصرف و بدون پیک مصرف پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد بهترین شهر با بیش‌ترین توان تولیدی شهر ارومیه است و شهر آبادان از کم‌ترین توان تولیدی برخوردار است. در شکل (۱۴) بیش‌ترین نرخ هزینه مربوط به شهر ارومیه است که دارای بیش‌ترین نرخ تولید توان است و شهر بیرجند از کم‌ترین نرخ هزینه برخوردار است که در این شهر توان تولیدی نیز از کم‌ترین مقدار است. هدف پژوهش حاضر انتخاب شهری است که از نظر توان تولیدی و هم‌چنین هزینه تولیدی دارای عملکرد مناسبی باشد.



شکل ۱۳: مجموع توان تولیدیکل سالیانه شهرهای مطالعاتی ایران



شکل ۱۴: میانگین سالیانه نرخ هزینه شهرهای مطالعاتی ایران

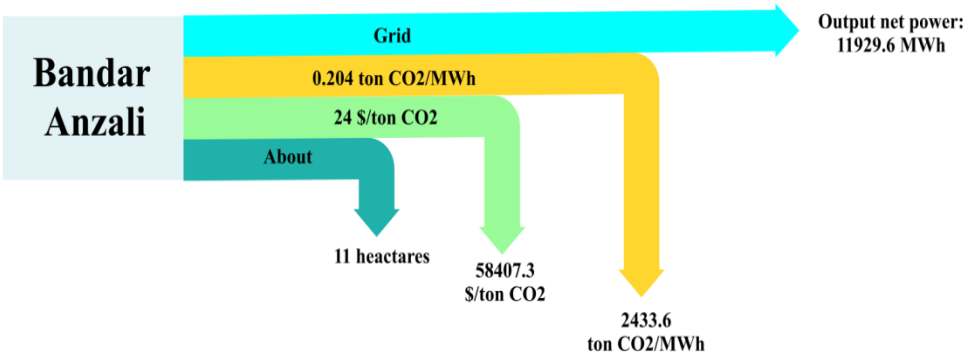
با استفاده از روش تاپسیس و درصد وزنی یکسان به دلیل اهمیت برابر دو تابع هدف توان و هزینه در انتخاب مکان راه‌اندازی سیستم پیشنهادی بهترین شهر مطالعاتی که از نظر فنی دارای عملکرد بالایی است و هم‌چنین از نظر اقتصادی نیز مناسب است شهر بندرانزلی انتخاب شد. لازم به‌ذکر است بندر انزلی دارای پتانسیل بالای زمین‌گرمایی است.

۴-۶- آنالیز زیست‌محیطی

در شکل ۱۵مزیت‌های زیست‌محیطی سیستم طراحی‌شده در شهر بندرانزلی ایران به‌عنوان بهترین شهر مطالعاتی توضیح داده می‌شود. به‌طورکلی ۰/۲۰۴ تن CO_2 در نیروگاه‌های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق آزاد می‌شود. بنابراین، با در نظر گرفتن مجموع تولید برق سالانه سیستم در شهرهای مختلف، می‌تواند باعث انتشار CO_2 شود. انتشار یک‌تن CO_2 باعث هزینه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

زیست‌محیطی ۲۴ دلار شد. در نتیجه با نصب سیستم پیشنهادی می‌توان از هزینه‌های زیست‌محیطی در سال نیز جلوگیری می‌کند و باعث گسترش فضای سبز و گیاهان شد. در ضمن باید گفت که برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب ته‌نشینی در نظر گرفته شد [۱۷و ۱۸].



شکل ۱۵: عملکرد زیست‌محیطی سیستم در شهر بندرانزلی

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مدل‌سازی وبهینه‌سازی سیستم تولید چندگانه بر مبنای انرژی زمین‌گرمایی به همراه امکان‌سنجی راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در کشور ایران با هدف به حداکثر رساندن عملکرد سیستم انجام شده است. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین ۱ و ۲، منبع ذخیره انرژی هوای فشرده و چیلر جذبی است. سیال مورد استفاده در سیکل ارگانیک رانکین شامل مبرد R123 و آمونیاک است. مدل‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی EES انجام شده است. برای بهینه‌سازی توابع هدف سیستم طراحی شده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شده است. دو تابع هدف بازده اگزرژی رفت‌وبرگشتی (ERTE) و نرخ هزینه جهت افزایش عملکرد فنی و کاهش هزینه‌های اقتصادی سیستم تعیین شد. متغیرهای طراحی جهت بهینه‌سازی مسئله شامل دمای ورودی به توربین ۱، دمای ورودی به توربین ۲، دمای ورودی به پمپ ۱، دمای ورودی به اواپراتور، نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی، بازده توربین، بازده پمپ، بازده کمپرسور، بازده توربین گازی، فشار ورودی به مخزن CAES و دمای پینچ پوینت اواپراتور است. بهینه‌ترین ارزش بازده اگزرژی۷۷/۹۸ درصد و نرخ هزینه ۵/۴۸دلار بر ساعت به‌دست آمد. جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در کشور ایران و از ۱۰ شهر مطالعاتی انتخاب شد. آنالیز اقتصادی سیستم نشان داد که بیش‌ترین نرخ هزینه مربوط به واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، سیکل ارگانیک رانکین ۱ و سیکل ارگانیک رانکین ۲ است. آنالیز عملکردی سیستم در کشور ایران با در نظر داشتن بهترین موقعیت از نظر فنی و اقتصادی نشان داد که شهر بندرانزلی بهترین منطقه برای راه‌اندازی سیستم است که نتایج زیست‌محیطی نشان داد با راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی ایران می‌توان به گسترش ۱۱ هکتاری فضای سبز کمک کرد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

فهرست علائم

T	Temperature [℃]	HEX	heat exchanger
P	Pressure [kPa]	Comp	Compressor
$\dot{Q}$	Heat transfer rate [kW]	ch	Chemical
C_P	Specific heat of air and water at constant pressure [kJ/kg.K]	ph	physical
$\dot{E}x$	Exergy [kW]	cv	control volume
$\dot{m}$	Mass flow rate [kg/s]	DOE	design of experiments
s	Specific entropy [kJ/kg.K]	RSM	response surface methodology
t	Time [h]	ERTE	Exergy round trip efficiency [%]
U	Overall heat transfer coefficient [kW/m2K]	EES	Engineering Equations Solver
h	Specific enthalpy [kj/kg]	i	in
		e	out
x	Salinity [ppm]	0	Dead state
W	Power [kW]	n	Number
EX_D	Exergy destruction [kW]	**Greek symbol**	
m	Mass flow [kg/s]	η	efficiency
E	Energy	φ	Maintenance factor
g	Gravitational acceleration		
Z	Height		
Subscripts			
cond	Condenser		
eva	Evaporator		
tur	Turbin		
ORC	Organic Rankine Cycle		

مراجع

[۱] مولایی، محمد؛ انتظار، ابوریحان(۱۳۹۸)، عوامل مؤثر بر تقاضای انرژی فسیلی در بخش صنعت ایران، فصلنامه علمی مطالعات اقتصادیِ کاربردی ایران، سال هشتم، شماره ۳۰،صفحات ۱۷۷-۱۹۳.

[۲] دارابی، حمید (۱۳۹۵)، بررسی منابع انرژی پاک به‌عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی در جهت عبور از بحران‌های زیستمحیطی (با محوریت اقتصاد مقاومتی)، فصلنامه علمی تخصصی معاونت مهندسی ناجا، سال نهم، شماره سی و دوم، صفحه ۳۷ تا ۶۳.

[3]Pfeiffer, B., Mulder, P., Explaining the diffusion of renewable energy technology in developing countries, Energy Economics, 40(0) (2013) 285-296.

[۴] جعفری، مجید؛ عصاره، احسان اله (۱۴۰۱)، ارزیابی ترمودینامیکی و اقتصادییک سیستم تولیدهم‌زمان جدید بر اساس ترکیبی از آب‌شیرین‌کن چند اثره و ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۹شماره ۳.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

[5] Seiiedhoseiny, M., et al.Exergoeconomic analysis and optimization of a high-efficient multi-generation system powered by Sabalan (Savalan) geothermal power plant including branched GAX cycle and electrolyzer unit, Energy Conversion and Management 268 (2022) 115996.
[6] Pan, J., et al. Energy, exergy and economic analysis of different integrated systems for power generation using LNG cold energy and geothermal energy, Renewable Energy 202 (2023) 1054-1070.
[۷] امیرشکاری زاده,علیرضا، عصاره، احسان اله (۱۴۰۱)، تحلیل اگزرژی، انرژی و مدل‌سازی، بهینه‌سازی و بررسی پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطییک سیستم تولید چندگانه انرژی با بررسیتأثیر ترموالکتریک برای تولید برق پاک، سرمایش، گرمایش و هیدروژن، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۹ شماره ۲.
[8] Assareh, E., Mohammadi Bouri, F., Azizimehr, B., Moltames, Simulation and Optimization of a Solar Based Trigeneration System Incorporating PEM Electrolyzer and Fuel Cell, R., Journal of Solar Energy Research Volume 6 (2021) 664-677.
[9] Assareh, E., Assareh, M., Alirahmi, S. M., Jalilinasrabady, S., Dejdar, A., Izadi, M., An extensive thermo-economic evaluation and optimization of an integrated system empowered by solar-wind-ocean energy converter for electricity generation–Case study: Bandar Abas, Iran, Thermal Science and Engineering Progress, Volume 25 (2021) 100965.
[10] Alibaba, M., et al. Thermodynamic, exergo-economic and exergo-environmental analysis of hybrid geothermal-solar power plant based on ORC cycle using emergy concept, Heliyon 6(4) (2020) e03758.
[11] Praveen, R. P. and Chandra Mouli, K. V. V., Performance enhancement of parabolic trough collector solar thermal power plants with thermal energy storage capability, Ain Shams Engineering Journal 13(5) (2022) 101716.
[12] Rostami, M., et al. Energy production and storage from a polygeneration system based on parabolic trough solar collector, proton exchange membrane fuel cell, organic Rankine cycle, and alkaline electrolyzer, Journal of Energy Storage 47 (2022) 103635.
[13] Assareh, E., et al. Performance analysis of solar-assisted-geothermal combined cooling, heating, and power (CCHP) systems incorporated with a hydrogen generation subsystem,Journal of Building Engineering (2022) 105727.
[14] Allaix, D. L. and V. I. Carbone, An improvement of the response surface method, Structural Safety 33(2) (2011) 165-172.
[15] Li., D.-Q., et al. Response surface methods for slope reliability analysis: Review and comparison, Engineering Geology 203(2016)3-14.
[16] Razmi, A. R., Soltani, M., Torabi, M., Investigation of an efficient and environmentally-friendly CCHP system based on CAES, ORC and compression-absorption refrigeration cycle: Energy and exergy analysis, Energy Conversion and Management, Volume 195 (2019)1199-1211.
[17] Kroeger,T., Escobedo, F.J., Hernandez, J. H., Varela, S., Delphin, S., Fisher, J. R. B., Waldron, J., Reforestation as a novel abatement and compliance measure for ground-level ozone, 111 (40)(2014).
[18] Alirahmi, S. M., Bashiri Mousavi, S., Razmi, A. R., Ahmadi, P., A comprehensive techno-economic analysis and multi-criteria optimization of a compressed air energy storage (CAES) hybridized with solar and desalination units, Energy Conversion and Management, 236 (2021) 114053.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]

Analysis of a multiple generation system based on geothermal energy by simultaneously using two organic Rankine cycles, a compressed air storage source, and an absorption chiller in different regions

Abolfazl Karami[1], Reza Poultangari[1], Ehsanollah Assareh[1*]

[1] Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

Received: November 2024 Accepted: February 2025

Abstract

In this study, the modeling and optimization of a multiple generation system based on geothermal energy was carried out with the aim of maximizing the system performance. The system under study consists of geothermal subsystems, organic Rankine cycles 1 and 2, compressed air energy storage source, and absorption chiller. The system modeling was performed using the EES software for solving engineering equations. The response surface methodology and Design Expert software were used to optimize the objective functions of the proposed system. Two objective functions ERTE and cost rate were determined to increase the technical performance and reduce the economic costs of the system. The design variables for optimizing the problem includeinlet temperatures of turbines 1 and 2, pump 1, CAES tank and evaporator, geothermal mass flow rate, turbine efficiency, pump efficiency, compressor efficiency, gas turbine efficiency, and evaporator pinch point temperature. To increase the performance of the Rankine cycle, various organic fluids were investigated, and the results showed that R123 refrigerant and ammonia increased the system performance. The most optimal exergy efficiency value was 98.77% and the cost rate was 48.5 USD/hour. 10 study cities were selected to launch the proposed system in Iran. The performance analysis of the system in Iran, considering the best location in terms of technology and economy, showed that Bandar Anzali city is the best area to launch the system; environmental results showed that by launching the proposed system in Bandar Anzali city of Iran, it can help expand 11 hectares of green space.

Keywords: Geothermal energy, multiple energy generation system, compressed air energy storage, multi-objective optimization.

*corresponding author: assareh@iaud.ac.ir

Cite this article as: Abolfazl Karami, Reza Poultangari, Ehsanollah Assareh. Analysis of a multiple generation system based on geothermal energy by simultaneously using two organic Rankine cycles, a compressed air storage source, and an absorption chiller in different regions Journal of Energy Conversion, 2025, 11(4), 11-31.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.w.484]