J. Energy Conversion
Volume: 11, Issue: 1, 2024: 93-117

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار۱۴۰۳، ص: ۹۳-۱۱۷

آنالیز ترمودینامیکی یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن مایع، سرمایش، آب گرم و توان با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده با کاربرد سیال‌های کاری مختلف

بهروز رفیعی[۱]، علی ارشادی[۲،*]، احسان اله عصاره[۳]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، behrooz.r813@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، aliershadi110@gmail.com
*۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، assareh@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

چکیده

در این پژوهش به آنالیز ترمودینامیکی یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن مایع، سرمایش، آب گرم و توان با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده پرداخته شد. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و منبع ذخیره هیدروژن مایع است. سیالات ارگانیک مختلفی برای افزایش عملکرد سیستم بررسی شد که در نهایت سیال ارگانیک R123 انتخاب شد. تأثیر شش پارامتر طراحی شامل دبی جرمی ورودی به اواپراتور، دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارت، بازده توربین، دمای ورودی توربین، دمای پینچ پوینت اواپراتور و بازده پمپ بر روی عملکرد سیستم بررسی شد که نتایج نشان داد تاثیرگذارترین پارامترها نرخ دبی جرمی ورودی، دمای ورودی به مولد بخار بازیاب حرارتی و دمای ورودی به توربین است. در این پژوهش کشور ایران برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی بررسی شد و دوازده شهر شامل شهرهای اصفهان، دزفول، ایرانشهر، کرمان، بجنورد، بیرجند، بندرعباس، بوشهر، بابل، رشت، اردبیل و زنجان انتخاب شد. در نهایت شهر رشت با عملکرد مناسب در تولید توان و هزینه مناسب انتخاب شد که نتایج زیست‌محیطی نشان داد سیستم پیشنهادی در شهر رشت می‌تواند به گسترش ۵ هکتاری فضای سبز کمک کند.

***عهده‌دار مکاتبات :** ali.ershadi@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی، سیستم تولید چندگانه انرژی، سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده، هیدروژن مایع.

نحوه استناد به این مقاله: بهروز رفیعی، علی ارشادی، احسان اله عصاره. آنالیز ترمودینامیکی یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید هیدروژن مایع، سرمایش، آب گرم و توان با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده با کاربرد سیال‌های کاری مختلف. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۱) : ۹۳-۱۱۷.

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

۱- مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، باعث افزایش کارایی سیستم های انرژی، اعمال ملاحظات اقتصادی مناسب، حفاظت از منابع انرژی و جلوگیری از ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می شود [۱]. در سال‌های گذشته و با معرفی منابع تولید پراکنده و منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی، بسیاری از دولت‌ها به سمت استفاده از این منابع انرژی پیش رفته‌اند که از نتایج آن می‌توان به پیمان کیوتو و اجلاس سالانه تغییرات اقلیمی اشاره کرد که در سال ۲۰۱۶ حدود ۱۹۶ کشور از جمله کشور ایران در آن شرکت داشته و برنامه‌های خود را برای استفاده از انرژی‌های پاک و کاهش گازهای گلخانه‌ای ارائه داده است [۲].

فرهادی و عصاره در سال ۱۳۹۹، به بررسی یک سیستم تولید چند گانه انرژی بر مبنای انرژی زمین‌گرمایی برای تولید برق پاک و هیدروژن پرداختند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر بود. محصولات این سیستم شامل تولید برق و هیدروژن بود. نتایج نشان داد بیشترین تخریب اگزرژی سیستم مربوط به اواپراتور و کمترین تخریب اگزرژی سیستم مربوط به پمپ بوده است [۳]. سید احمدی و عصاره در سال ۱۴۰۱، بر روی یک سیستم زمین‌گرمایی و استفاده از ذخیره‌ساز انرژی با هوای فشرده برای تولید برق پاک کار کردند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین، چیلر جذبی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی با هوای فشرده بود. سیال مورد استفاده در سیکل ارگانیک رانکین شامل مبرد و سیال ارگانیک آمونیاک بود [۴]. گلشن‌زاده و عصاره در سال ۱۳۹۹، به بررسی یک سیستم تولید چندگانه خورشیدی بادی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که با توجه به افزایش شدت تابش خورشیدی و انرژی بادی بر روی میزان اگزرژی کل، کار خروجی، تولید آب شیرین سیستم موثر بوده و باعث افزایش خروجی‌های سیستم می‌گردد. نتایج تخریب اگزرژی نشان داد، سیستم خورشیدی با ۶۰ درصد و توربین بادی با ۱۷ درصد بیشترین میزان تخریب اگزرژی را در اجزا سیستم دارا می‌باشند [۵]. جعفری و عصاره در سال ۱۴۰۱، به بررسی یک سیستم تولید همزمان جدید بر اساس ترکیبی از آب شیرین کن چند اثره و ذخیره ساز انرژی هوای فشرده پرداختند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های هلیوستات، توربین گازی، آب شیرین کن چند اثره و سیستم ذخیره ساز انرژی با هوای فشرده است. آنالیز اگزرژی سیستم نشان داد که بیشترین تخریب اگزرژی به ترتیب مربوط به واحد منبع ذخیره هوای فشرده و واحد خورشیدی است [۶]. امیرشکاری‌زاده و عصاره در سال ۱۴۰۱، به بررسی یک سیستم تولید چندگانه انرژی با بررسی تأثیر ترموالکتریک برای تولید برق پاک، سرمایش، گرمایش و هیدروژن پرداختند. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم های پنل خورشیدی، سیکل ارگانیک رانکین، چیلر جذبی و الکترولایزر بود. 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 [۷]. دژدار و عصاره در سال ۱۳۹۹، به بررسی سیستم تولید چندگانه انرژی برای تولید برق بر مبنای انرژی خورشیدی، باد و انرژی حرارتی اقیانوسی در مناطق ساحلی پرداختند. این سیستم متشکل از زیرسیستم‌های سیکل ارگانیک رانکین، ترموالکتریک، مبدل حرارتی، توربین بادی و یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت بود. پس از بهینه‌سازی سیستم در نهایت بهینه‌ترین مقدار بازده اگزرژی ۳۳,۳۹ درصد و نرخ هزینه۹۸,۸۱ دلار بر ساعت گزارش شد [۸].

برومند و عصاره در سال ۱۳۹۹، در پژوهش خود بر روی ترکیب سیکل برایتون و یک سیستم کلکتور خورشیدی با دریافت کننده مرکزی برای تولید برق، آب شیرین و سرمایش برای شهر اهواز کار کردند. اجزا اصلی این سیستم متشکل از سیستم برج خورشیدی، منبع ذخیره کننده گرما، سیکل برایتون، سیکل رانکین بخار، آب شیرین کن و سیکل تبرید جذبی تک اثره تشکیل بود. نتایج نشان داد، پس از بهینه‌سازی توابع هدف با الگوریتم ژنتیک، بهینه‌ترین مقدار بازده اگزرژی ۲۹,۴۰ درصد و نرخ هزینه ۲۸۹,۴ دلار بر ساعت به‌دست آمد [۹]. محرمیان و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی چرخه ترکیبی صفحات فتوولتایک و بویلرهای بیومس و تولید هیدروژن پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت فشار کمپرسور نرخ تولیدی گاز دی اکسید کربن و تخریب اگزرژی سیستم افزایش می‌یابد و بازده اگزرژی، نرخ جریان گاز طبیعی، نرخ هزنیه تخریب اگزرژی و هزنیه واحد تولید سیستم کاهش می‌یابد [۱۰]. چن و همکاران در سال در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم جدید مبتنی بر انرژی باد و

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

ترکیب توربین بادی و سیستم ذخیره سازی انرژی کربن دی اکسید فشرده پرداختند. با توجه به ویژگی متناوب انرژی های تجدیدپذیر، ترکیب آنها با سیستم های ذخیره انرژی کارآمد و سودآور به نظر رسید. راندمان رفت و برگشت اگزرژی و هزینه واحد محصولات به صورت ۳۷,۰۲۷ درصد و ۳۰,۴۱ دلار بر گیگاژول در فرآیند بهینه سازی به دست آمد [۱۱]. زو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم انرژی مبتنی بر انرژی باد و ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن پرداختند. هنگامی که سیستم با ۰-۱۰ توربین بادی پیکربندی شد، با افزایش مقیاس توربین های بادی، اقتصاد، مصرف انرژی و انتشار کربن بهبود یافت. مصرف انرژی و بهره برداری از نیروی باد به ترتیب بالای ۶۶,۷۹ درصد و ۹۹,۷۳ درصد بود [۱۲]. سپریو در سال در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم مبتنی بر انرژی باد، آبی، خورشیدی و زیست توده برای تولید پایدار پرداخت. در این مقاله توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق در مجموعه انرژی کشور و به ترتیب میزان تامین نیاز انرژی در طول سال به منظور کاهش هرچه بیشتر میزان استفاده از سوخت های فسیلی ارائه شد [۱۳]. تیمز و دینسر در سال ۲۰۲۲، به طراحی و تجزیه‌وتحلیل یک سیستم انرژی مبتنی بر پنل فتوولتائیک و ذخیره‌سازی انرژی زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد سیستم پیشنهادی با یک نیروگاه فتوولتائیک ۱۲۰ مگاوات بر ثانیه و گزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی، برای پاسخگویی به تمام ۵۱ گیگاوات ساعت در سال انرژی الکتریکی، ۲۳,۸ گیگاوات ساعت در سال گرمایش و ۷,۷ گیگاوات ساعت در سال بارهای سرمایشی برای یک جامعه است [۱۴].

دژدار و عصاره در سال ۱۳۹۹، به تحلیل اگزرژی و اقتصادی و بهینه سازی یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی خورشیدی، باد و انرژی حرارتی اقیانوسی برای تولید برق پاک پرداختند. دو تابع هدف این بهینه -سازی اگزرژی و نرخ هزینه سیستم عنوان شد. در نهایت بهینه- ترین مقدار بازده اگزرژی ۱۴,۴۷ درصد و نرخ هزینه ۷۴,۹۷ دلار بر ساعت به دست آمد [۱۵].

عصاره و همکاران در سال ۱۳۹۸، به بهینه سازی چند هدفه و آنالیز اقتصادی و یک سیستم خورشیدی برای تولید هیدروژن توسط الگوریتم ازدحام ذرات پرداختند. در این پژوهش یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر پایه انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برای و ترکیب با دو سیکل رانکین و چیلر جذبی طراحی شد. از برق تولیدی توربین برای تامین برق واحد تولید هیدروژن استفاده شد [۱۶]. کیخواه و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بهینه‌سازی و تحلیل عملکرد یک سیستم تولید برق مبتنی بر زمین گرمایی بر اساس چرخه‌های رانکین آلی تبخیر باینری فلاش و دو فشاری با استفاده از مخلوط‌های زئوتروپیک پرداختند. نتایج نشان داد که توربین بخار دارای بیشترین تخریب اگزرژی و دارای مقدار ۹۹۶ کیلووات است و شیر انبساط با ۷۱۴ کیلووات تخریب اگزرژی شیر در مرحله بعدی است. همچنین، کندانسورها دارای تخریب قابل توجه اگزرژی هستند و حدود ۲۶,۹۸ درصد از کل تخریب اگزرژی مربوط به کندانسورها است [۱۷]. عصاره و همکاران در سال ۲۰۲۳، به شبیه سازی، بهینه سازی و تحلیل ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست محیطی چرخه برودتی، تنظیم نقطه شبنم در یک پالایشگاه موجود پرداختند. نتایج نشان داد در بخش محیط زیست، فرآیند بهینه منجر به کاهش ۳۹ درصدی ردپای دی اکسید کربن شد و از نظر اقتصادی، با صرفه جویی سالانه ۳۱۰۷۵۴۹,۴۵ دلار در هزینه های تامین انرژی، منجر به کاهش ۱۱,۵۴ تنی در هزینه های تولید ارزش NGL شد [۱۸].

سیستم های تولید چندگانه انرژی در سال های اخیر به عنوان یک راه حل قوی برای جلوگیری از اتلاف انرژی‌ها معرفی شده است. سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر نیز یک سیستم تولید چندگانه انرژی است که محصولات مختلفی را تولید می کند. هدف این پژوهش کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی و در عین حال افزایش عملکرد سیستم است. جهت مدل‌سازی سیستم و به دست آوردن نتایج از نرم افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی استفاده شده است. همچنین در این پژوهش عملکرد سیستم نسبت به شرایط آب و هوایی مناطق مختلف ایران بررسی می‌شود و بهترین و مناسب ترین موقعیت منطقه‌ای جهت احداث نیروگاه پیشنهادی تعیین می‌شود.

به طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

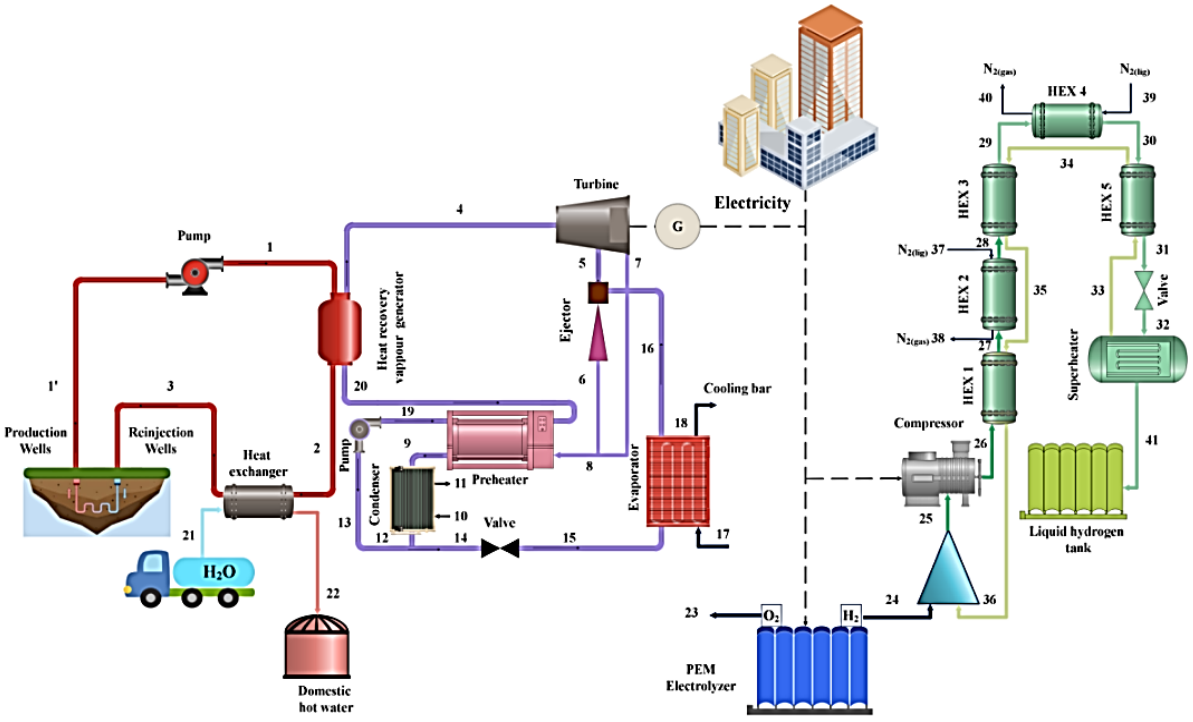
- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده با بکاگیری پیش گرم کن و اجکتور، الکترولایزر غشای تبادل، مبدل حرارتی برای تولید با هدف حداکثر تولید توان، هیدروژن، سرمایش و آب گرم.

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

- بررسی تأثیر سیالات کاری مختلف در سیکل ارگانیک رانکین.
- معرفی بهترین سیال کاری ارگانیک برای سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده.
- ارائه یک تحلیل حساسیت برای ارزیابی تأثیر متغیرهای طراحی بر عملکرد سیستم برای درک عمیق‌تر روش.
- بررسی عملکرد سیستم در شرایط آب و هوایی مختلف.
- انتخاب کشورایران برای امکان سنجی راه‌اندازی سیستم پیشنهادی.
- آنالیز زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی در شهرهای مطالعاتی.

۲-شرح سیستم

در شکل ۱، شماتیک سیستم تجدیدپذیر مورد بررسی در این پژوهش معرفی شده است. سیستم پیشنهادی شامل یک الکترولایزر برای الکترولیز آب، واحد زمین‌گرمایی (جهت تأمین انرژی اولیه سیستم برای فعالیت) و طرحی جدید از سیکل ارگانیک رانکین است. در این سیستم برای افزایش کارایی سیکل ارگانیک رانکین تولید توان یک اصلاحات بر روی سیکل انجام شد و در این سیکل علاوه بر توربین، اواپراتور، کندانسور و پمپ که تجهیزات اصلی این سیکل است، از تجهیزاتی دیگر شامل پری هیتر، اجکتور و مولد بخار بازیاب حرارتی استفاده شده است. محصولات این سیستم تولید برق پاک توسط سیکل ارگانیک رانکین، تولید گاز هیدروژن توسط الکترولایزر غشای تبادل پروتون و تولید و ذخیره هیدروژن مایع به همراه تولید سرمایش و گرمایش است. برق مورد نیاز الکترولایزر غشای تبادل پروتون توسط سیکل ارگانیک رانکین تأمین می‌شود. هیدروژن تولید شده در نقطه ۲۴ گازی است و از میکسر عبور می کند و در نقطه ۲۵ وارد کمپرسور می‌شود. پس از آن گاز با فشار بالا به دو جریان تقسیم می‌شود. در مبدل حرارتی ۱، گاز هیدروژن توسط بخار سردی که از جداکننده باز می گردد از قبل خنک می‌شود. باقیمانده هیدروژن توسط بخار نیتروژن در مبدل حرارتی ۲ خنک می‌شود. سپس جریان های هیدروژن مخلوط شده و وارد پیش خنک کننده می شوند که در حمام نیتروژن مایع غوطه ور می‌شود و هیدروژن از پیش خنک کننده خارج می‌شود و از مبدل حرارتی عبور می کند، جایی که بخار حاصل از جداکننده آن را خنک می کند. در نهایت، در جداکننده، مایع از بخار جدا می‌شود و در منبع ذخیره می‌شود.



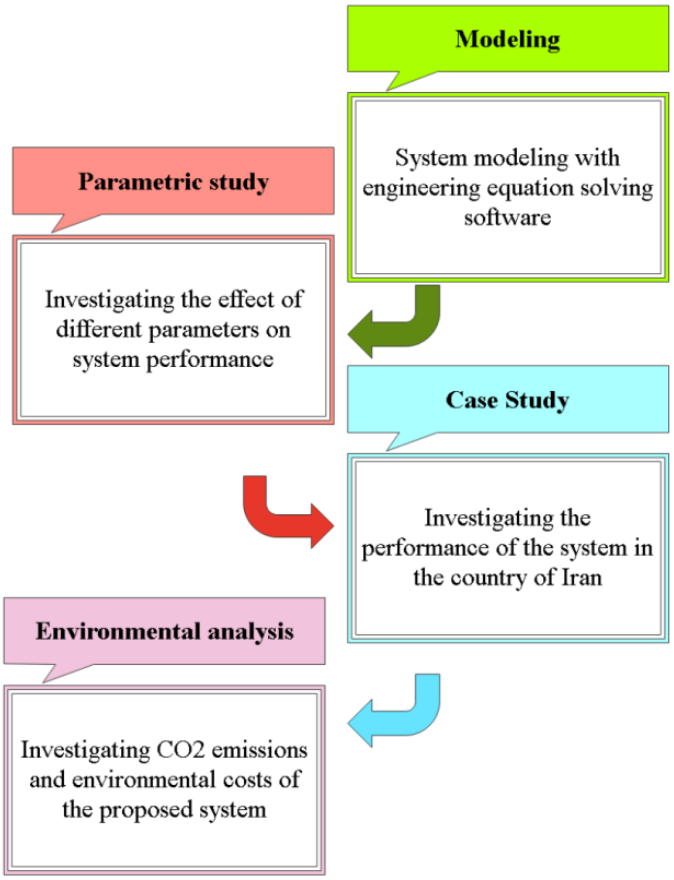
شکل ۱- شماتیک سیستم.

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

۳-روش‌شناسی

یک نمای کلی از فلوچارت روش‌شناسی حل پژوهش در شکل ۲ ارائه‌شده است که فرآیند حل این سناریو را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- مدل‌سازی سیستم با نرم‌افزار حل معادلات مهندسی انجام شده است.
- بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر روی عملکرد سیستم.
- براساس نرم‌افزار متانورم اطلاعات آب‌وهوایی شهر مطالعاتی به دست می‌آید.
- مطالعه موردی جهت بررسی عملکرد سیستم در شرایط آب‌وهوایی شهرهای مختلف ایران.
- انتخاب بهترین شهرهای مطالعاتی.
- آنالیز زیست‌محیطی عملکرد سیستم زمین‌گرمایی.



شکل ۲- روش‌شناسی.

۴-آنالیز سیستم

در جدول ۱ داده‌های ورودی جهت آنالیز زمین‌گرمایی سیستم آورده شده است[۱۹-۲۱].

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

جدول ۱- مقدار داده‌های ورودی.

داده	معرفی پارامتر	مقدار
T_0	دمای محیط	25°C
P_0	فشار محیط	101.3kPa
T_1	دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارت	210°C
η_{turbin}	راندمان توربین	0.85
η_{pump}	راندمان پمپ	0.9
T_4	دمای ورودی به توربین	140°C
T_{16}	دمای ورودی به اجکتور	8°C
$\dot{m}_1$	نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی	10kg/h
MMM	ضریب اجکتور	15 (-)
pp_{Eva}	پینچ پوینت اواپراتور	5°C
pp_{cond}	پینچ پوینت کندانسور	5°C

میزان کار الکترولایزر غشای تبادل پروتون طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۲-۲۴]:

$$\dot{W}_{PEM} = 0.2 \times \dot{W}_{net} \quad (۱)$$

برای محاسبه مقدار هیدروژن تولیدی سیستم از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{m}_{24} = \dot{M}_{H2Out} \quad (۲)$$

$$\dot{M}_{H2Out} = a_{H2} \times \dot{W}_{PEM}^{\,b_{H2}} + c_{H2} \quad (۳)$$

که در این رابطه:

$$a_{H2} = 3.382e\text{-}06 \quad (۴)$$

$$b_{H2} = 0.9727 \quad (۵)$$

$$c_{H2} = 5.928e\text{-}06 \quad (۶)$$

جهت بالانس انرژی سیستم مورد بررسی در پژوهش حاضر از روابط جدول ۲ استفاده می‌شود.

جدول ۲- روابط مربوط به معادلات انرژی سیستم.

اجزاء سیستم	رابطه
توربین سیکل ارگانیک رانکین	$\dot{W}_{tur} = (\dot{m}_4 \times ((h_4 - h_5) + (1 - MMM) * (h_4 - h_5)))$
پمپ سیکل ارگانیک رانکین	$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{13} \times (h_{19} - h_{13})$
اواپراتور	$Q_{eva} = \dot{m}_{17} \times (h_{17} - h_{18})$
مبدل حرارتی	$Q_{HEX} = \dot{m}_2 \times (h_2 - h_3)$
کندانسور	$Q_{cond} = \dot{m}_9 \times (h_9 - h_{12})$
پری هیتر	$Q_{PreH} = \dot{m}_8 \times (h_8 - h_9)$
مولد بخار بازیابی حرارت	$Q_{HRVG} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_2)$
جداکننده	$Q_{\mathrm{HRVG}} = \dot{m}_{32} \times (h_{32} - h_{33})$
پیش خنک کننده	$Q_{\mathrm{PreCooler}} = \dot{m}_{31} \times (h_{31} - h_{32})$

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

مقدار توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{orc} = \dot{W}_{\dot{W}_{tur}} - \dot{W}_{pump} \quad (۷)$$

مقدار توان خالص کل سیستم از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{ORC} - \dot{W}_{ELE} \quad (۸)$$

در جدول ۳ روابط مربوط به هزینه هر جزء و روابط کمکی مورد نظر آورده شده است.

جدول ۳- معادلت نرخ هزینه اجزا سیستم.

اجزاء سیستم	رابطه
مولد بخار بازیابی حرارت	$Z_{HRVG} = 4122 \times \left(A_{HRVG}^{0.6}\right) \times \dot{Z}$
پری هیتر	$Z_{PreH} = 4122 \times \left(A_{\mathrm{Pr}eH}^{0.6}\right) \times \dot{Z}$
اواپراتور	$Z_{eva} = 4122 \times \left(A_{eva}^{0.6}\right) \times \dot{Z}$
کندانسور	$Z_{Cond} = 1773 \times \dot{m}_9 \times \dot{Z}$
توربین	$Z_{Turbine} = 4750 \times \left(\dot{W}_{turbine}^{0.7}\right) \times \dot{Z}$
پمپ	$Z_{Pump} = 3540 \times (\dot{W}_{Pump}^{0.71}) \times \dot{Z}$
اجکتور	$Z_{Ejector} = (16.14 \times 989 \times \dot{m}_5 * ((\frac{T_{16}}{P_{16}})^{0.05}) \times P_6^{0.75}) \times \dot{Z}$
مبدل حرارتی	$Z_{HEX} = 4122 \times \left(A_{HEX}^{0.6}\right) \times \dot{Z}$
الکترولایزر	$Z_{EPEM} = 1000 \times W_{EPEM} \times \dot{Z}$
جداکننده	$Z_{Separator} = 12000 \times \left((\frac{A_{Separator}}{100})^{0.6} \right) \times \dot{Z}$
پیش خنک کننده	$Z_{PreCooler} = 12000 \times \left((\frac{A_{PreCooler}}{100})^{0.6} \right) \times \dot{Z}$

میزان هزینه کل سیستم از مجموع هزینه اجزا سیستم به‌دست آورده می‌شود و طبق رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$Z_{total} = Z_{HRVG} + Z_{PreH} + Z_{Ejector} + Z_{HEX} + Z_{Turbine} + Z_{Cond} + Z_{eva} + Z_{Pump} + Z_{EPEM} + Z_{REC1} + Z_{REC2} + Z_{Separator} + Z_{PreCooler} \quad (۹)$$

میزان بازده اگزرژی سیستم از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

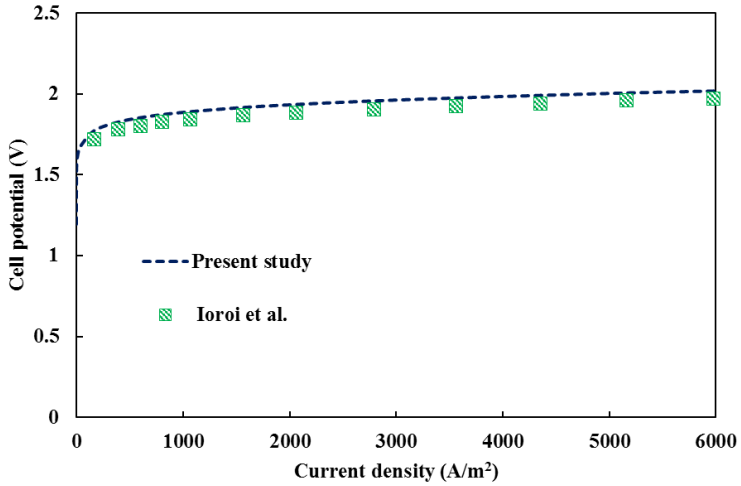
$$\eta_{ex} = \frac{(\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{35} + EX_{cooling})}{\dot{E}x_1} \times 100 \quad (۱۰)$$

۵-نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی

با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی با یک رویکرد جدید و با اصلاح سیکل ارگانیک رانکین طراحی شده است و یک سیستم جدید است برای اعتبارسنجی پژوهش حاضر زیر سیستم الکترولایزر غشای تبادل پروتون، انتخاب شد. به‌همین دلیل نتایج الکترولایزر غشای تبادل پروتون با پژوهش لوروی و همکاران [۲۵] اعتبارسنجی شد. در شکل ۳ نتیجه، اعتبارسنجی کار حاضر بررسی شده است.

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



شکل ۳- اعتبار سنجی الکترولایزر PEM پژوهش حاضر.

۵-۲-آنالیز سیالات ارگانیک

با استفاده از سیالات ارگانیک مختلف به بررسی عملکرد سیستم پرداخته می‌شود و بهترین سیال ارگانیک که باعث افزایش عملکرد سیستم می‌شود، انتخاب می‌شود. در این بررسی تأثیر سیالات ارگانیک بر روی میزان توان، هیدروژن، سرمایش، گرمایش، بازده اگزرژی و نرخ هزینه بررسی می‌شود. در جدول ۴ تأثیر سیالات ارگانیک بر روی عملکرد سیستم گزارش شده است.

جدول ۴- تأثیر سیالات ارگانیک بر روی عملکرد سیستم.

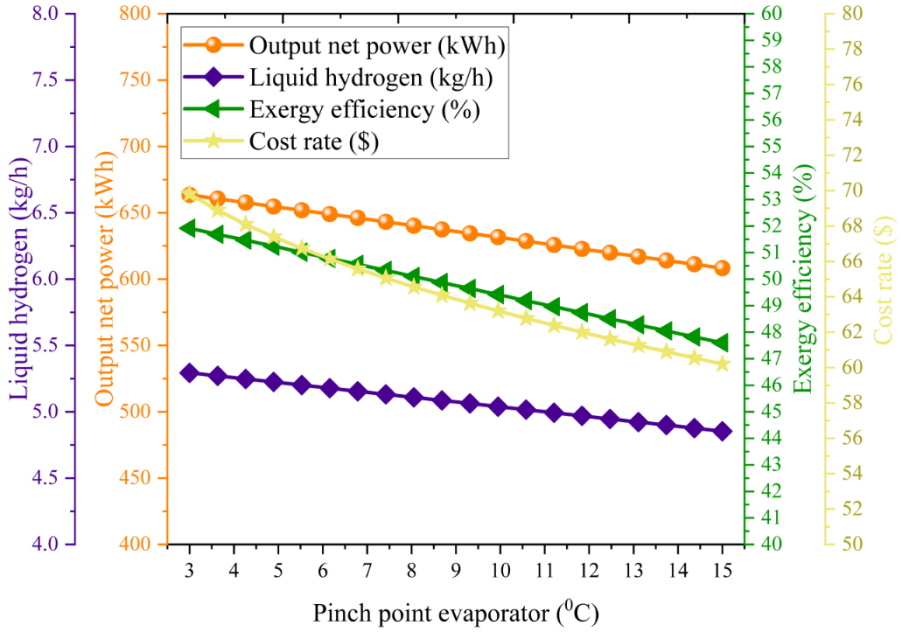
Scenario	Organic fluid	Exergy efficiency (%)	Cost rate ($/h)	Cooling (kWh)	Heating (kWh)	Power (kWh)	Liquid hydrogen (kg/h)
1	R113	49.44	64.92	1366	1385	634.9	5.066
2	R123	51.2	67.27	1511	912.3	654.3	5.221
3	R134a	50.04	66.65	1405	1197	636.4	5.162

نتایج نشان داد در هنگام استفاده از مبرد R123 عملکرد سیستم افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است. مبرد R123 در میان دیگر سیالات ارگانیک دارای بالاترین بازدهی و هزینه‌ی پایین‌تری است و آلودگی زیست‌محیطی ندارد.

۵-۳-مطالعه پارامتریک

در شکل ۴ به بررسی تأثیر دما پینچ پوینت اواپراتور، بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. باید گفت که با افزایش پینچ پوینت اواپراتور میزان انتقال حرارت در آن کاهش می‌یابد. با کاهش انتقال حرارت از اواپراتور به سیکل رانکین ارگانیک، میزان توان خروجی توربین سیکل نیز کاهش می‌یابد. پس نتیجه می‌شود که افزایش یا کاهش میزان انتقال حرارت با توان کل سیستم، رابطه مستقیم دارد. از دلایل کاهش توان کل، می‌توان به مواردی از قبیل عدم تولید در ساعات توقف دستگاه، استهلاک زیرسیستم‌ها به دلیل کار در شرایط نامناسب (دمای بالا و تنظیم نبودن فشار، آنتالپی و افزایش بی‌نظمی در زیرسیستم‌ها) اشاره کرد. با توجه به اینکه الکترولایزر برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، هیدروژن مایع تولیدی نیز با کاهش توان توربین کاهش می‌یابد. همچنین بازده اگزرژی و نرخ هزینه با توان تولیدی رابطه مستقیم دارند، پس با کاهش توان تولیدی میزان بازده اگزرژی و نرخ هزینه نیز کاهش می‌یابد.

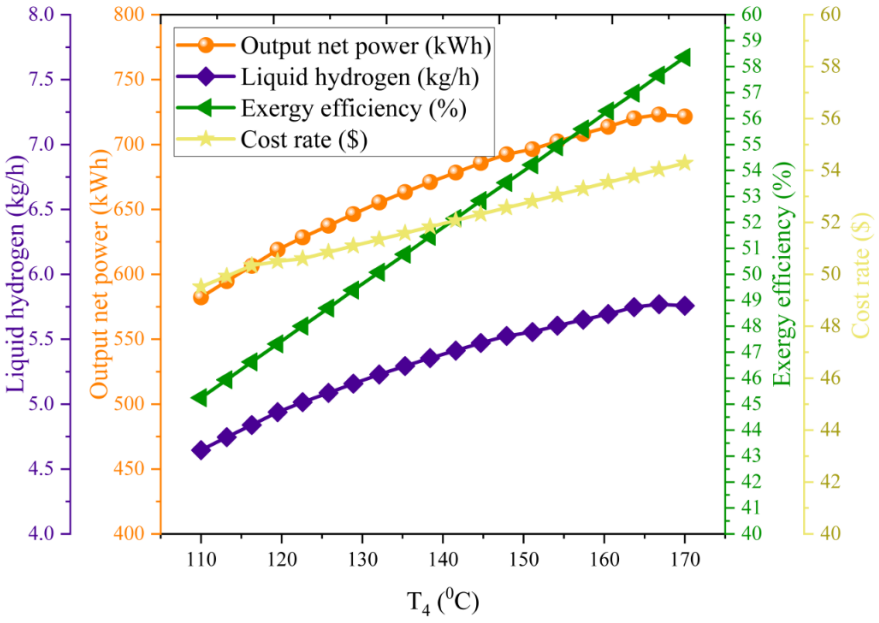
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۴- تأثیر تغییرات دمای پینچ پوینت اواپراتور بر روی عملکرد سیستم.

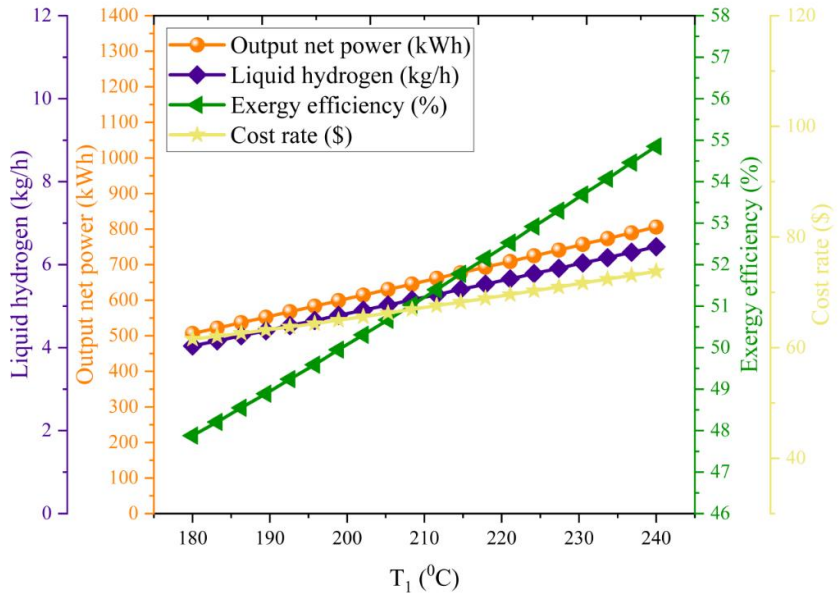
در شکل ۵ به بررسی تأثیر دما ورودی به توربین سیکل رانکین ارگانیک، بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. دمای ورودی توربین نقش مهم و اساسی در طول عمر و توان خروجی ایفاء می‌کند. با توجه به بالا رفتن دمای سیال ورودی به توربین سیکل رانکین ارگانیک آنتالپی سیال نیز در این نقطه بالا رفته و در نتیجه باعث افزایش کار کل توربین و سیکل رانکین ارگانیک می‌شود که این مقدار باعث افزایش کار کل برای این سیکل است. با توجه به رابطه اگزرژی کل و وجود عبارت کار کل خروجی در صورت آن، با افزایش دمای ورودی به توربین و کار کل، این عبارت افزایش یافته است. هزینه‌های سیستم نیز با افزایش کار کل و نیاز به تجهیزات بزرگ‌تر افزایش خواهد یافت. به علت افزایش دمای ورودی به توربین، اختلاف آنتالپی در توربین افزایش می‌یابد که اثر این افزایش اختلاف آنتالپی بیشتر از اثر کاهش دبی سیال است و در نهایت توان تولیدی توربین افزایش می‌یابد؛ و با توجه به اینکه الکترولایزر برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، هیدروژن مایع تولیدی نیز با افزایش توان توربین افزایش می‌یابد. با افزایش دمای ورودی توربین، با فرض ثابت بودن بقیه پارامترها، دمای خروجی توربین نیز افزایش می‌یابد. دمای خروجی توربین منجر به افزایش انرژی ورودی برای تولید توان سیستم می‌شود، بنابراین با افزایش دمای ورودی توربین، منجر به افزایش توان تولیدی سیستم خواهد شد. در نتیجه بازده اگزرژی سیستم نیز به علت افزایش توان خالص کل خروجی افزایش می‌یابد و بالطبع هزینه سیستم نیز با افزایش توان تولیدی افزایش می‌یابد.

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



شکل ۵- تأثیر تغییرات دمای ورودی به توربین بر روی عملکرد سیستم.

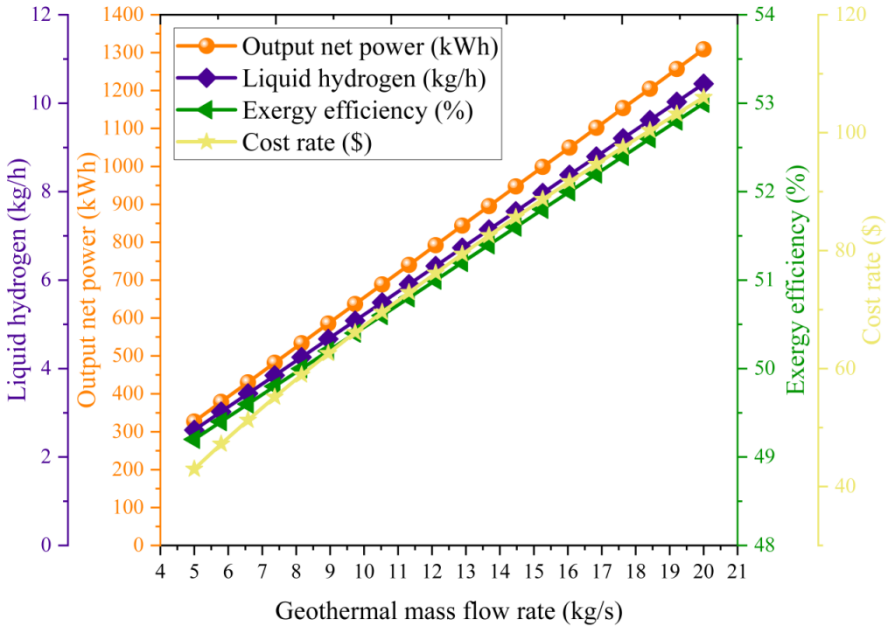
در شکل ۶ به بررسی تأثیر دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارتی، بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. با افزایش دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارتی میزان انتقال حرارت و انرژی حرارتی ورودی به سیکل ارگانیک رانکین افزایش می‌یابد. با افزایش انتقال حرارت از مولد بخار بازیابی حرارتی به سیکل رانکین ارگانیک، میزان توان خروجی توربین سیکل نیز افزایش می‌یابد. پس نتیجه می‌شود که افزایش دما ورودی به سیکل باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود و انتقال حرارت با توان کل سیستم، رابطه مستقیم دارد. با توجه به اینکه الکترولایزر برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، هیدروژن مایع تولیدی نیز با افزایش توان توربین افزایش می‌یابد. همچنین بازده اگزرژی و نرخ هزینه با توان تولیدی رابطه مستقیم دارند، پس با افزایش توان تولیدی میزان بازده اگزرژی و نرخ هزینه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۶- تأثیر تغییرات دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارتی بر روی عملکرد سیستم.

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

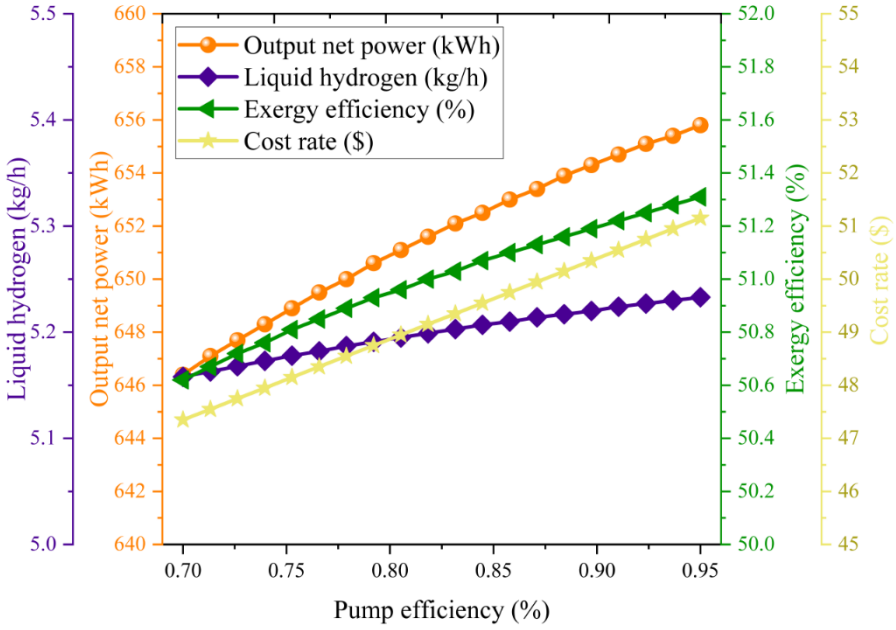
در شکل ۷ به بررسی تأثیر نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی، بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. با افزایش نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی ظرفیت سیستم افزایش می‌یابد و در نتیجه سیال بیشتری با دمای بیشتری وارد سیستم برای فعالیت می‌شود و در نتیجه راندمان سیکل ارگانیک رانکین برای تولید توان افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه رابطه بازده اگزرژی با تغییرات توان خروجی سیستم، انتقال حرارت حاصل از مولد بخار بازیابی حرارتی افزایش یافته است و باعث می‌شود میزان بازده اگزرژی سیستم برای تغییرات نرخ دبی جرمی ورودی به مولد بخار بازیابی حرارتی افزایش یابد. همچنین الکترولایزر غشای تبادل پروتون برق مورد نیاز خود را از توربین می‌گیرد، هیدروژن مایع تولیدی نیز با افزایش توان توربین افزایش می‌یابد. همچنین بازده اگزرژی و نرخ هزینه با توان تولیدی رابطه مستقیم دارند، پس با افزایش توان تولیدی میزان بازده اگزرژی و نرخ هزینه نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش توان تولیدی میزان هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تأثیر تغییرات نرخ دبی جرمی زمین‌گرمایی بر روی عملکرد سیستم.

در شکل ۸ به بررسی تأثیر تغییرات بازده پمپ، بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش بازده پمپ از ۰,۷ تا ۰,۹۵، توان خالص کل سیستم و هیدروژن مایع تولیدی سیستم افزایش یافته است. علت افزایش توان و هیدروژن تولیدی را می‌توان مربوط به تأثیر مثبت بازده پمپ در پمپاژ جریان سیکل و سرعت بخشیدن به فرآیند سیکل بر روی کار دانست، چرا که انرژی با سرعت بیشتری به توربین برای فعالیت داده می‌شود و ازآنجایی‌که الکترولایزر با برق تولیدی از توربین کار می‌کند، پس با افزایش توان تولیدی، الکترولایزر بهتر عمل کرده و در نتیجه هیدروژن مایع تولیدی سیستم افزایش پیدا می‌کند. علت افزایش میزان اگزرژی را می‌توان به این امر مربوط دانست که بازده اگزرژی و توان خروجی سیستم طبق با هم رابطه مستقیم دارند، یعنی با افزایش کار سیستم میزان اگزرژی سیستم نیز افزایش یافته است. لازم به ذکر است الکترولایزر بر اساس عبور جریان الکتریکی مستقیم از آب خالص و تجزیه آن به اجزای تشکیل دهنده یعنی هیدروژن و اکسیژن و همچنین استفاده از روش الکترولیز آب اقدام به تولید هیدروژن در سیستم‌های تجدیدپذیر می‌کند.

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

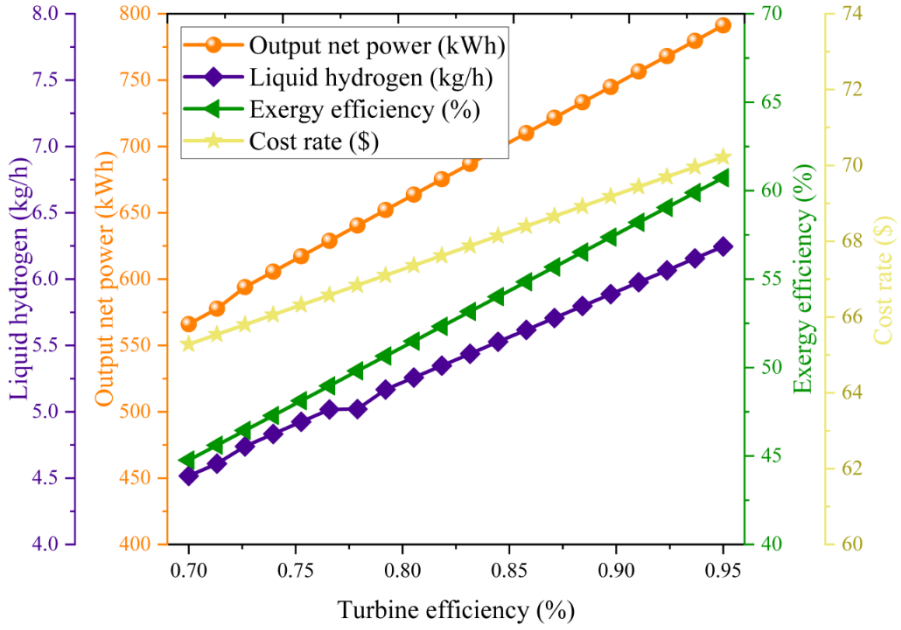


شکل ۸- تأثیر تغییرات بازده پمپ بر روی عملکرد سیستم.

در شکل ۹ به بررسی تأثیر تغییرات بازده توربین بر روی توان تولیدی سیستم، میزان هیدروژن مایع تولیدی، نرخ هزینه و بازده اگزرژی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش بازده توربین از ۰,۷ تا ۰,۹۵، توان خالص کل سیستم و هیدروژن مایع تولیدی سیستم افزایش یافته است. علت افزایش توان و هیدروژن تولیدی را می‌توان مربوط به تأثیر مثبت بازده توربین بر روی کار دانست، چرا که توربین در این سیستم‌ها سهم عمده‌ای در کار تولیدی که همان برق است، دارد و ازآنجایی‌که الکترولایزر با برق تولیدی از توربین کار می‌کند، پس با افزایش توان تولیدی، الکترولایزر بهتر عمل کرده و در نتیجه هیدروژن تولیدی سیستم افزایش پیدا می‌کند. افزایش بازده توربین باعث افزایش بازده اگزرژی سیستم و همچنین نرخ هزینه سیستم شده است. علت افزایش میزان اگزرژی در این نمودار را می‌توان به این امر مربوط دانست که بازده اگزرژی و توان خروجی سیستم با هم رابطه مستقیم دارند، یعنی با افزایش کار سیستم میزان اگزرژی سیستم نیز افزایش یافته است. علت افزایش نرخ هزینه را می‌توان به این امر مربوط دانست که هزینه‌های سیستم نیز با افزایش توانا کل سیستم و نیاز به تجهیزات کامل‌تر و بزرگ‌تر افزایش خواهد یافت. همچنین از دلایل دگیر افزایش نرخ هزینه می‌توان به افزایش هزینه تمام شده میزان تولیدات خروجی، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های ناشی از عدم تولید در ساعات توقف سیستم اشاره کرد. همچنین باید گفت که با توجه به این مسئله که برای زیر هر سیستم استفاده شده در سیستم اصلی، هزینه شده است، به ازای هزینه صرف شده، توان تولیدی به‌صرفه نبوده است و در نتیجه هزینه سیستم افزایش پیدا کرده است.

اگزرژی به معنای بیشترین کار خالص قابل استخراج از سیستم است یعنی به‌عبارتی اگزرژی همان کار مفید تولید شده در این سیستم توسط توربین است که با افزایش یا کاهش کار کل باید گفت بازده اگزرژی نیز افزایش یا کاهش می‌یابد.

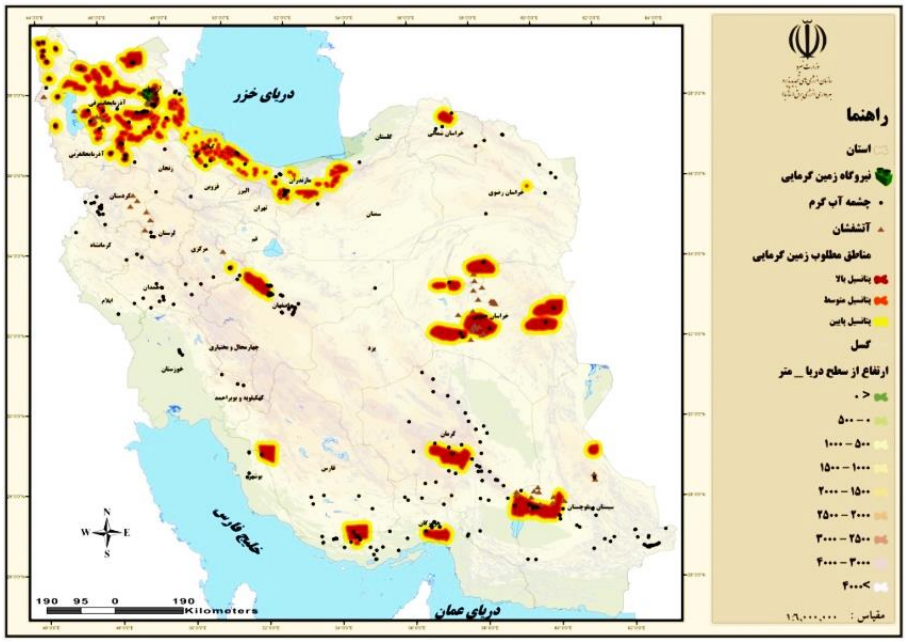
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۹- تأثیر تغییرات بازده توربین بر روی عملکرد سیستم.

۴-۵-مطالعه موردی

جهت امکان سنجی برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی کشور ایران در قاره آسیا انتخاب شد. ایران از مناطق پرپتانسیل زمین گرمایی محسوب می شوند و امکان بهره برداری از انرژی زمین گرمایی در این کشورها بالا است. در شکل ۱۰ نقشه زمین گرمایی ایران ارائه شده است. در این پژوهش ۱۲ شهر برای بررسی عملکرد سیستم انتخاب شدند. شهرهای مطالعاتی ایران شامل اصفهان، دزفول، ایرانشهر، کرمان، بجنورد، بیرجند، بندرعباس، بوشهر، بابل، رشت، اردبیل و زنجان است.



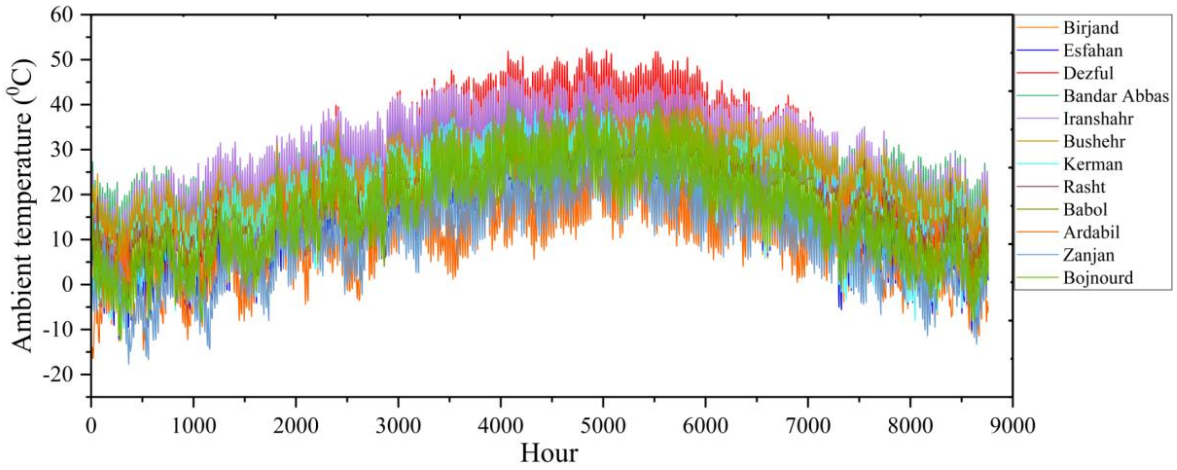
شکل ۱۰- نقشه زمین‌گرمایی کشور ایران.

شهرهای انتخابی در بهترین و پرپتانسیل ترین مناطق زمین گرمایی ایران قرار دارد و برای راه‌اندازی سیستم ها و نیروگاه های زمین گرمایی بسیار مناسب هستند چرا که از پتانسیل بالایی برخودار هستند. در این پژوهش تأثیر تغییرات دمای محیط

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

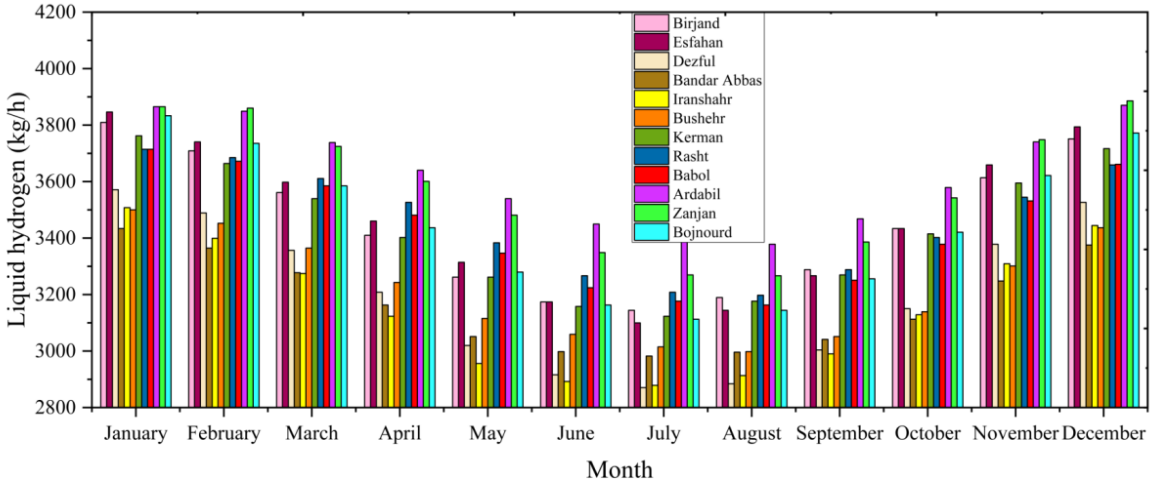
شهرهای مطالعاتی بر روی عملکرد سیستم پیشنهادی کار حاضر به‌صورت ساعتی بررسی شده است و نتایج به‌صورت ماهیانه ارائه شده است.

در شکل ۱۱ تغییرات میانگین دمای محیط در طول سال به‌صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) برای شهرهای مطالعاتی رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییرات میانگین دمای محیط شهرهای مطالعاتی بین دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد است و بیشترین دمای محیط مربوط به ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست است که این ماه‌ها در فصل تابستان است. جهت مقایسه دمای محیطی شهرهای مطالعاتی باید گفت که کمترین دمای محیط مربوط به شهر اردبیل و بیشترین دمای محیط مربوط به شهر دزفول و ایرانشهر است.



شکل ۱۱- تغییرات دمای محیط شهرهای مطالعاتی.

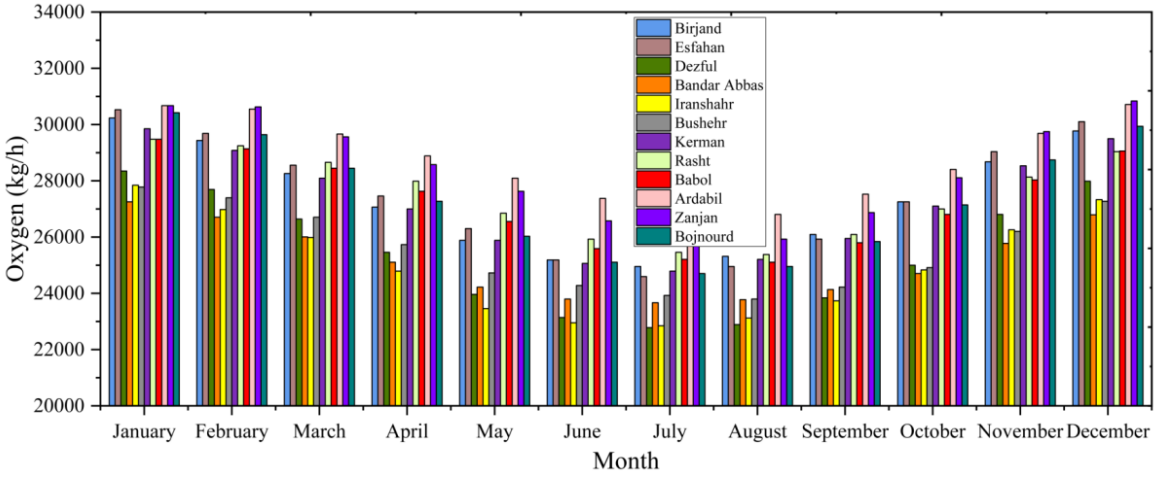
در شکل ۱۲ تغییرات هیدروژن مایع تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. همان نتایج نشان می‌دهد هیدروژن تولیدی سیستم با افزایش دمای محیط در ماه‌های گرم سال نسبت به ماه‌های سرد سال کاهش می‌یابد، چرا که با کاهش توان تولیدی سیستم و به دنبال آن کاهش گاز هیدروژن میزان ذخیره هیدروژن مایع نیز کم می شود. لازم به ذکر است در ابتدا توسط الکترولایزر غشای تبادل پروتون از جداسازی مولکول های آب گاز هیدروژن تولید می شود و سپس به صورت مایع ذخیره می شود. توربین سیکل ارگانیک رانکین وظیفه تولید توان را بر عهده دارند و الکترولایزر انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از توان تولیدی سیستم تأمین می‌کند. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای اردبیل، زنجان، بجنورد و رشت دارای عملکرد بهتری دارد و هرچه دمای محیط شهرها افزایش می یابد مثل شهر ایرانشهر و دزفول عملکرد سیستم کمتری می شود.



شکل ۱۲- تغییرات میزان هیدروژن مایع تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

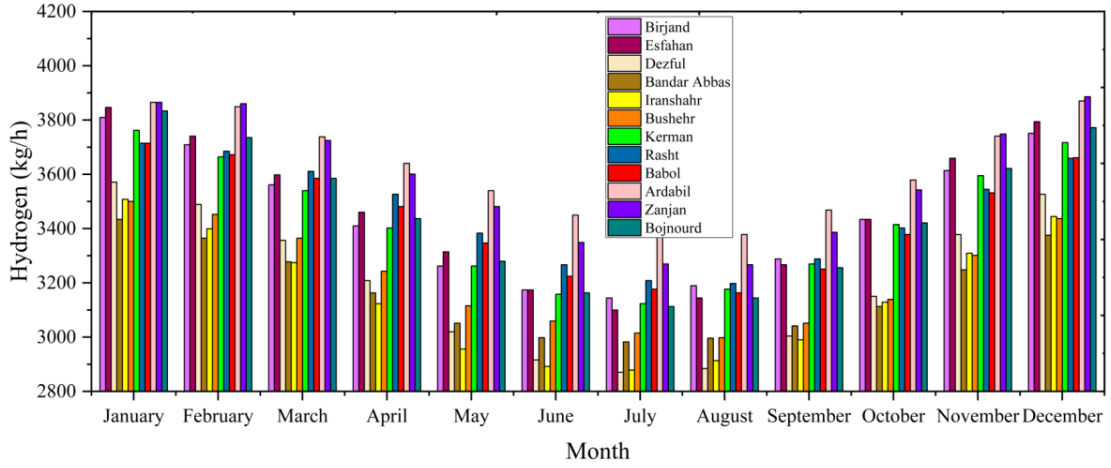
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

در شکل ۱۳ تغییرات اکسیژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. اکسیژن توسط فرآیند جداسازی مولکول های آب از یکدیگر تولید می شود. فرآیند جداسازی مولکول های آب از یکدیگر توسط الکترولایزر انجام می شود. الکترولایزر برق مورد نیاز خود را از توربین سیستم دریافت می کند. پس با افزایش یا کاهش توان تولیدی عملکرد تولید اکسیژن نیز روند مشابهی دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای اردبیل، زنجان، بجنورد و رشت دارای عملکرد بهتری دارد و هرچه دمای محیط شهرها افزایش می یابد مثل شهر ایرانشهر و دزفول عملکرد سیستم کمتری می شود.



شکل ۱۳- تغییرات میزان اکسیژن تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

در شکل ۱۴ تغییرات گاز هیدروژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. گاز هیدروژن توسط فرآیند جداسازی مولکول های آب از یکدیگر تولید می شود. فرآیند جداسازی مولکول های آب از یکدیگر توسط الکترولایزر انجام می شود. الکترولایزر برق مورد نیاز خود را از توربین سیستم دریافت می کند. پس با افزایش یا کاهش توان تولیدی عملکرد تولید گاز هیدروژن نیز روند مشابهی دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای اردبیل، زنجان، بجنورد و رشت دارای عملکرد بهتری دارد و هرچه دمای محیط شهرها افزایش می یابد مثل شهر ایرانشهر و دزفول عملکرد سیستم کمتری می شود.

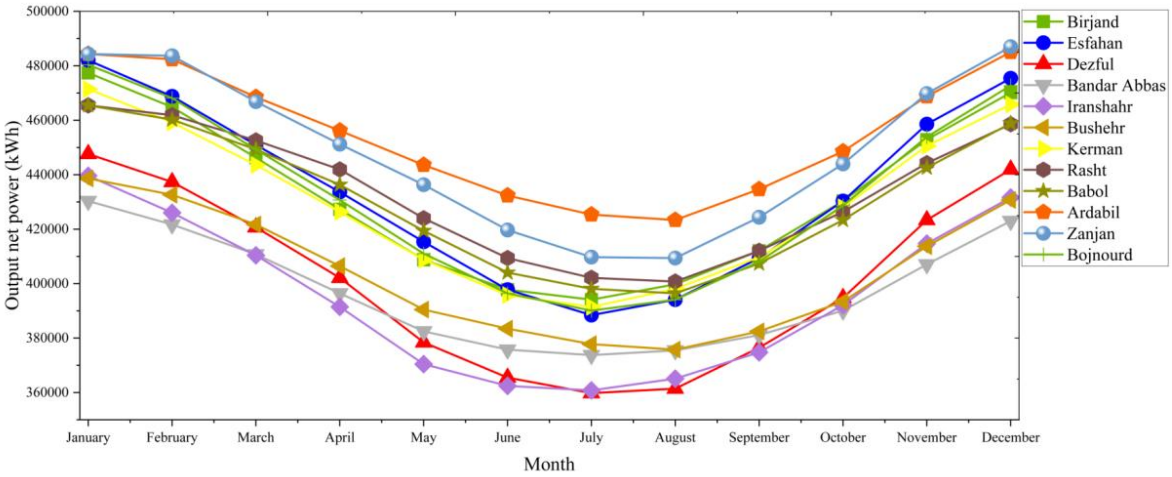


شکل ۱۴- تغییرات میزان گاز هیدروژن تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

در شکل ۱۵ تغییرات توان تولیدی ماهیانه سیستم 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

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

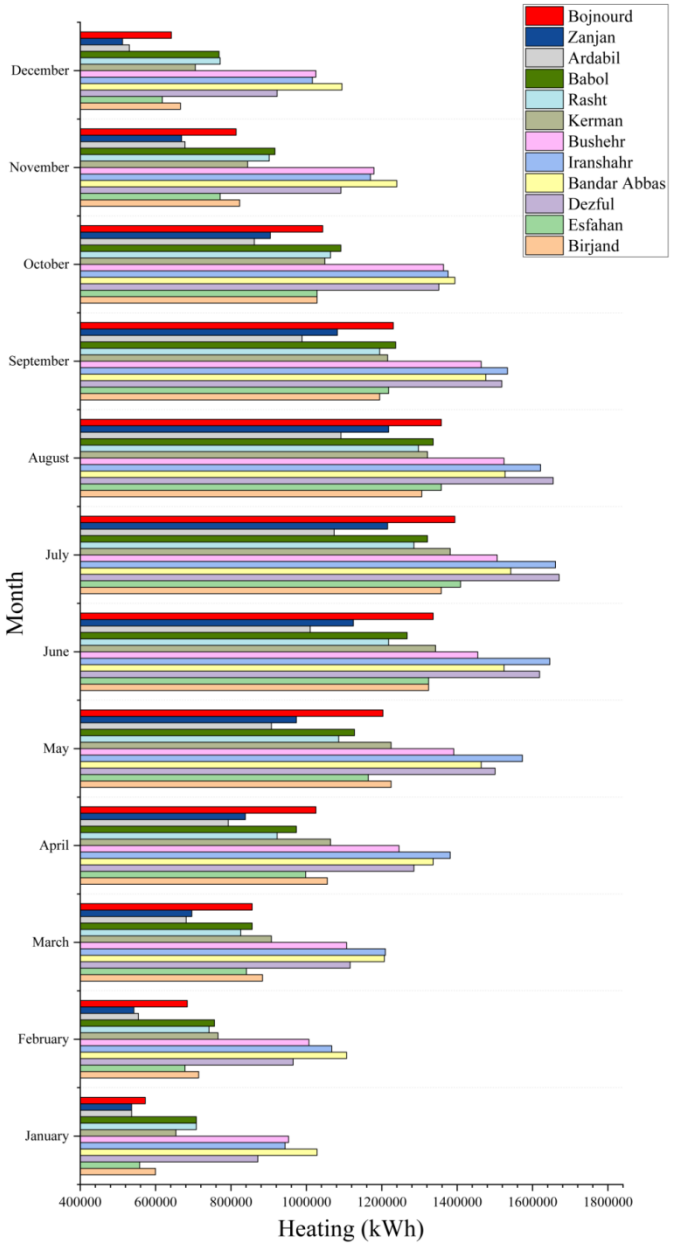
میزان نرخ تولید توان شود. با افزایش دمای محیط تجهیزات سیستم گرم می شود و باعث کاهش عملکرد سیستم می شود و از طرفی باعث تغییرات در اختلاف انتالپی و انتروپی سیستم نیز می شود، به همین دلیل افزایش دمای محیط تاثیر منفی بر روی عملکرد توربین دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به ترتیب در شهرهای اردبیل، زنجان، رشت، بابل، اصفهان، بجنورد، کرمان، بوشهر، بندرعباس، دزفول و ایرانشهر دارای عملکرد بهتری دارد. نتایج نشان داد که هرچه دمای محیط شهرها افزایش می یابد و جز مناطق گرم خیز محسوب شوند، عملکرد سیستم نیز کاهش می یابد. پس افزایش دمای محیط تاثیر منفی بر روی عملکرد سیستم دارد و بهترین منطقه جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی مناطق سردسیر است.



شکل ۱۵- تغییرات میزان توان تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

در شکل ۱۶ تغییرات گرمایش تولیدی ماهیانه سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. گرمایش سیستم توسط آب گرم خروجی از مبدل حرارتی تولید می شود. هرچه دمای محیط افزایش یابد و حرارت ورودی به سیستم افزایش یابد، پس در نتیجه میزان حرارت اتلافی از سیستم نیز افزایش می یابد، پس افزایش دمای محیط با میزان افزایش تولید گرمایش رابطه مستقیم دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای گرم خیز که دمای محیط بالاتری دارند، دارای میزان تولید گرمایش بهتری است. به همین دلیل نتایج نشان داد به ترتیب در شهرهای ایرانشهر، دزفول و بندرعباس و بوشهر بیشترین گرمایش تولید می شود و انتخاب مناطق سردسیر مثل اردبیل و زنجان باعث کاهش میزان گرمایش تولیدی سیستم می شود.

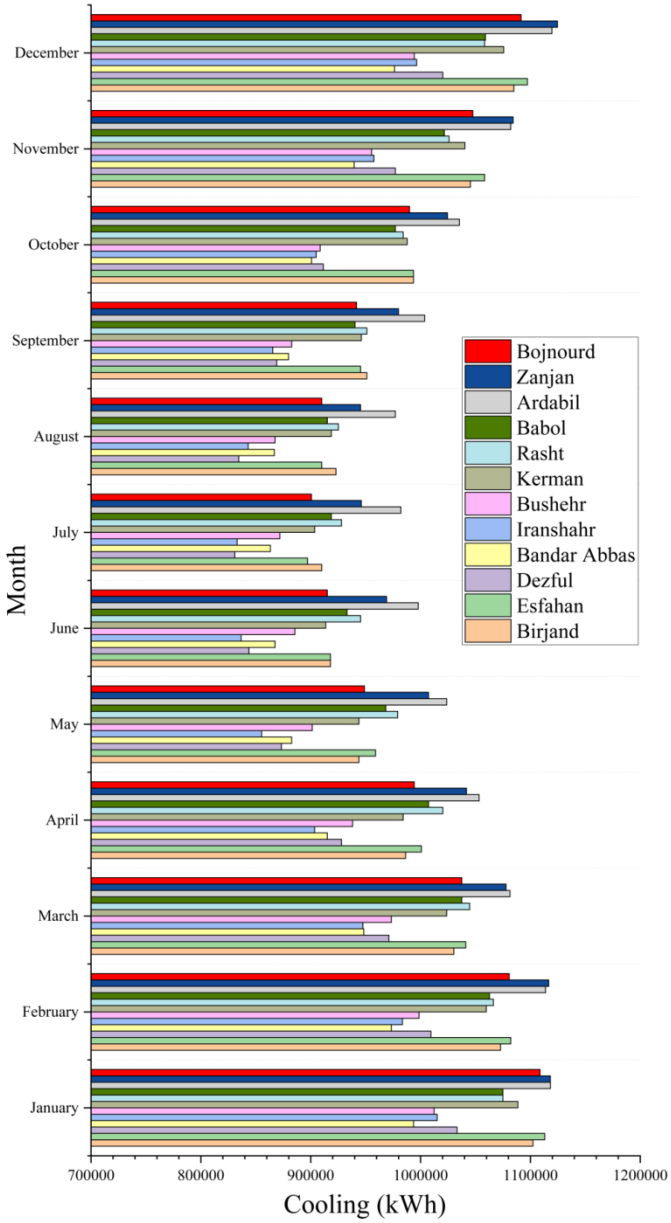
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۶- تغییرات میزان گرمایش تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

در شکل ۱۷ تغییرات سرمایش تولیدی ماهیانه سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. سرمایش سیستم توسط حرارت خروجی از اواپراتور تولید می شود. هرچه دمای محیط افزایش یابد و حرارت ورودی به سیستم افزایش یابد، میزان عملکرد سیستم کاهش می یابد و در نتیجه انرژی حرارتی کمتری وارد اواپراتور می شود و میزان انرژی خروجی از اواپراتور به محیط نیز کاهش می یابد، پس دمای محیط با تولید سرمایش رابطه عکس دارد. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای سردسیر که دمای محیط کمتری دارند، دارای میزان تولید سرمایش بهتری است. به همین دلیل نتایج نشان داد به ترتیب در شهرهای اردبیل، زنجان و بجنور بیشترین سرمایش تولید می شود و انتخاب مناطق گرم خیز مثل دزفول و ایرانشهر باعث کاهش میزان سرمایش تولیدی سیستم می شود.

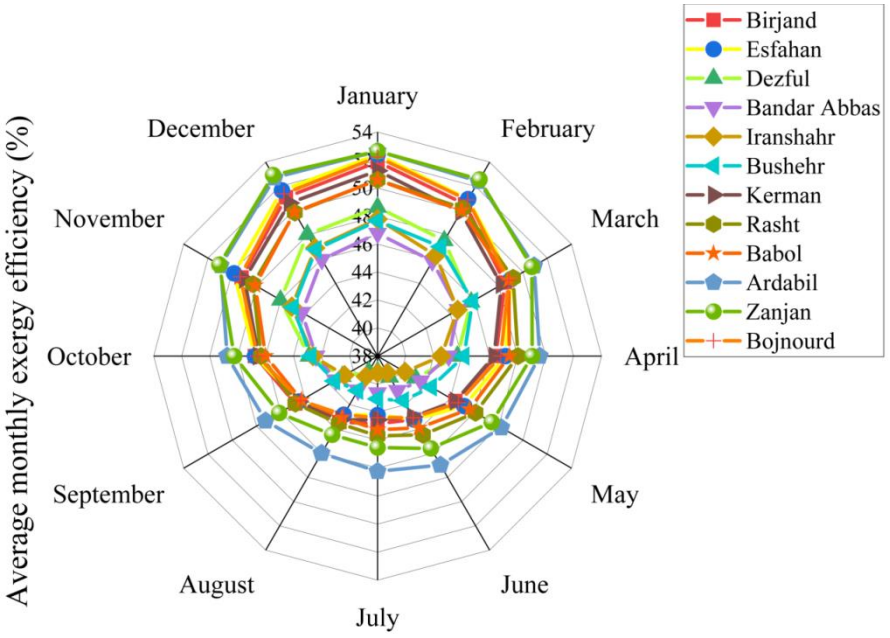
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۷- تغییرات میزان سرمایش تولیدی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

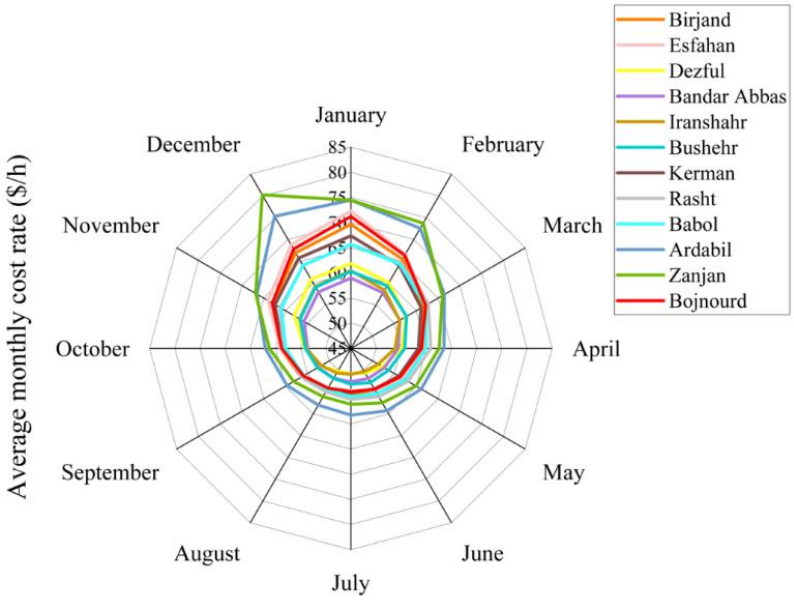
در شکل ۱۸ میانگین ماهیانه تغییرات بازده اگزرژی سیستم گزارش شده است. بازده اگزرژی و توان تولیدی و همچنین نرخ هزینه با هم رابطه مستقیم دارند. پس افزایش یا کاهش توان تولیدی باعث تغییراتی مشابه بر روی بازده اگزرژی سیستم می شود. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم به ترتیب در شهرهای اردبیل، زنجان، رشت، بابل، اصفهان، بجنورد، کرمان، بوشهر، بندرعباس، دزفول و ایرانشهر دارای عملکرد بهتری دارد. نتایج نشان داد که هرچه دمای محیط شهرها افزایش می یابد و جز مناطق گرم خیز محسوب شوند، عملکرد سیستم نیز کاهش می یابد. پس افزایش دمای محیط تاثیر منفی بر روی عملکرد سیستم دارد و بهترین منطقه جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی مناطق سردسیر است.

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



شکل ۱۸- تغییرات میانگین ساعتی بازده اگزرژی شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

در شکل ۱۹ میانگین ماهیانه تغییرات نرخ هزینه سیستم 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 می شود. چرا که با افزایش توان تولیدی میزان هزینه تعمیر و نگهداری سیستم افزایش می یابد و بالعکس. مقایسه عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان می‌دهد سیستم در شهرهای که بیشترین توان تولیدی و بازده اگزرژی را داشته است، دارای بیشترین نرخ هزینه نیز است. به همین دلیل به ترتیب در شهرهای اردبیل، زنجان، رشت، بابل، اصفهان، بجنورد، کرمان، بوشهر، بندرعباس، دزفول و ایرانشهر سیستم دارای بیشترین نرخ هزینه است. هدف از این پژوهش انتخاب منطقه ای است که علاوه بر اینکه سیستم دارای عملکرد بالایی است، از نرخ هزینه مناسبی نیز برخوردار باشد.

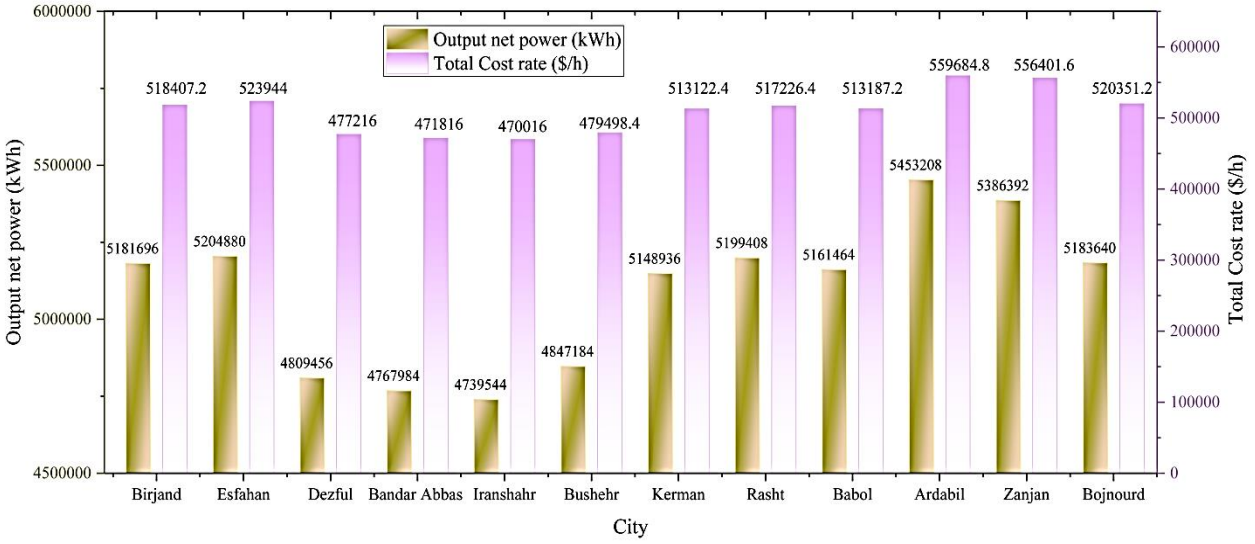


شکل ۱۹- تغییرات میانگین ساعتی نرخ هزینه شهرهای مطالعاتی به صورت ماهیانه.

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

۵-۵- مقایسه شهرها

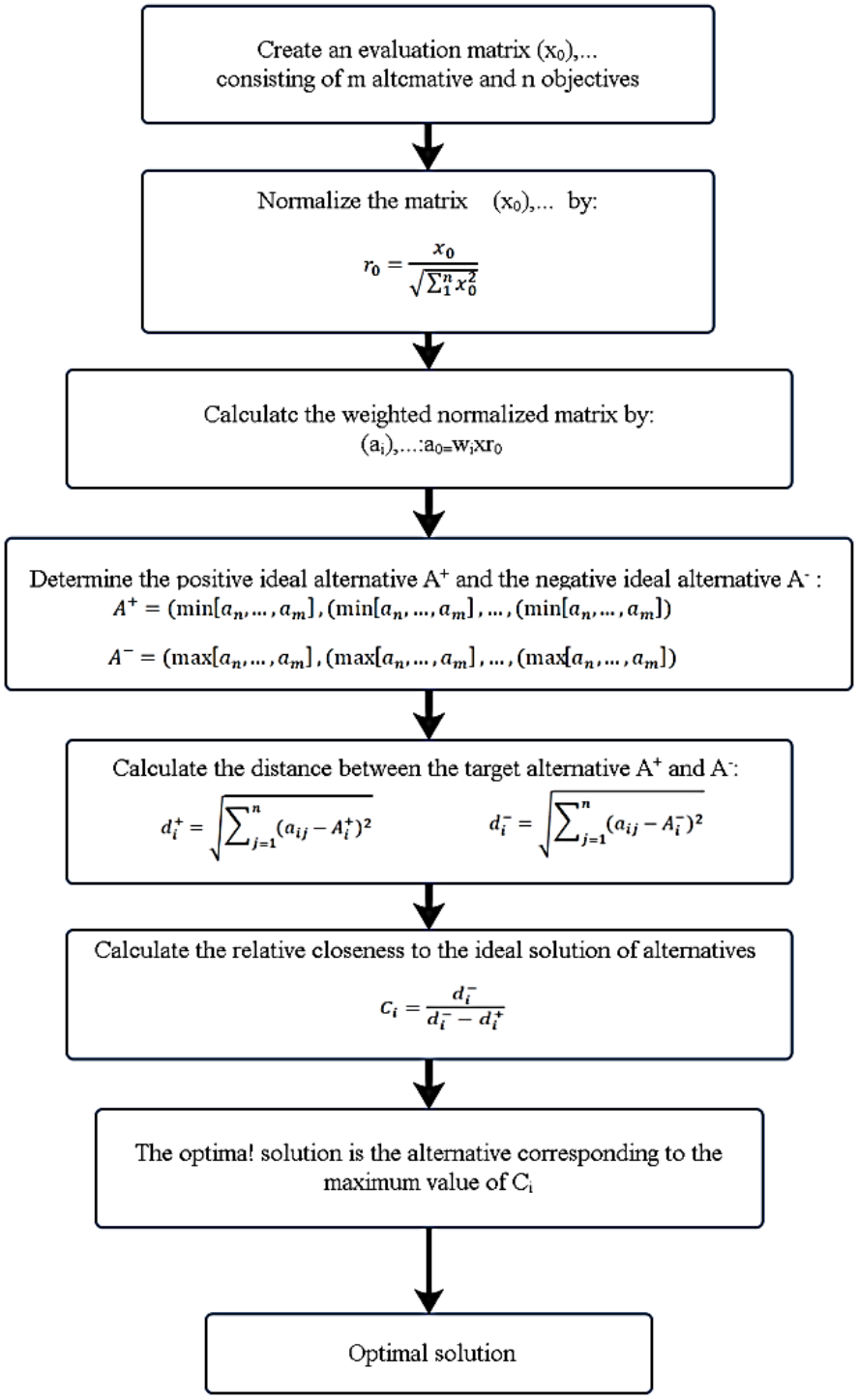
نتایج نشان می‌دهد بهترین شهر با بیشترین توان تولیدی شهر اردبیل است و شهر ایرانشهر از کمترین توان تولیدی برخودار است. ولی هدف پژوهش حاضر انتخاب شهری است که از نظر توان تولیدی و همچنین هزینه تولیدی دارای عملکرد مناسبی باشد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین نرخ هزینه مربوط به شهر اردبیل است که دارای بیشترین نرخ تولید توان است و شهر ایرانشهر از کمترین نرخ هزینه برخودار است که در این شهر توان تولیدی نیز از کمترین مقدار است.



شکل ۲۰- مقایسه شهرهای مطالعاتی.

برای انتخاب بهترین شهر مطالعاتی از روش تاپسیس استفاده شد و با فرض اهمیت برابری دو تابع هدف توان تولیدی و نرخ هزینه کل سال شهرهای مطالعاتی، انتخاب بهترین جواب برای راه‌اندازی سیستم انجام شد. در شکل ۲۱ فلوچارت رو تاپسیس ارائه شده است. تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها براساس معیارها با توجه به فاصله آن ها از ایده‌آل‌های مثبت و منفی است. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل ایده‌آل (مثبت) و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. راه حل ایده آل (مثبت) راه حلی است که معیار سود را افزایش و معیار هزینه را کاهش می‌دهد [۲۶ و ۲۷].

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



شکل ۲۱- فلوچارت روش تاپسیس

با استفاده از روش تاپسپس و درصد وزنی یکسان به دلیل اهمیت برابر دو تابع هدف توان و هزینه در انتخاب مکان راه‌اندازی سیستم پیشنهادی شهر رشت انتخاب شد که در جدول ۵ عملکرد سالیانه سیستم پیشنهادی در بهترین شهر مطالعاتی محاسبه شده است.

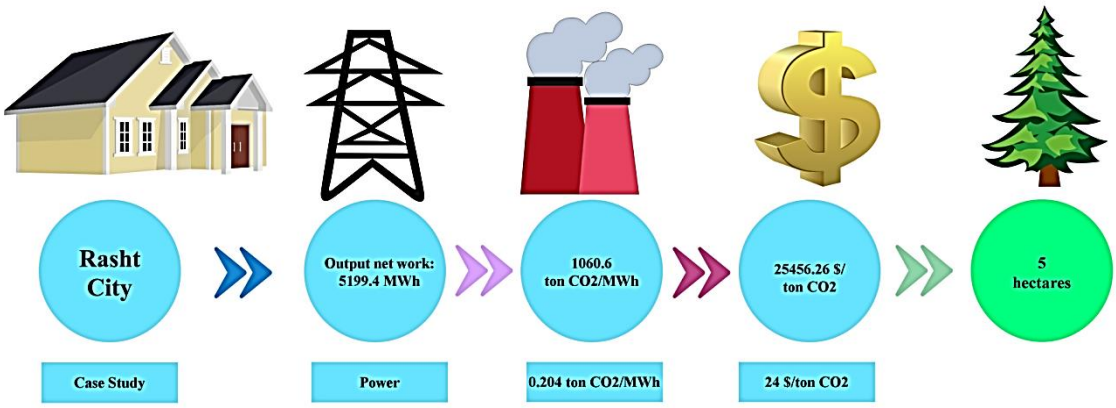
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

جدول ۵- مقایسه بهترین.

Output	Rasht
Cost rate ($/h)	59.86
Exergy efficiency (%)	47.08
Heating (kWh)	12015720
Cooling (kWh)	12003840
Liquid hydrogen (kg/h)	41486.4
Output net power (kWh)	5199408
Oxygen (kg/h)	329241.6

۵-۶-زیست‌محیطی

در شکل ۲۲ به آنالیز زیست‌محیطی سیستم طراحی شده برای شهر رشت پرداخته شده داست. به‌طور کلی ۰,۲۰۴ تن CO_2 در نیروگاه‌های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق آزاد می‌شود [۲۸]؛ پس برای محاسبه میزان انتشار آلودگی نیروگاه پیشنهادی در شهر رشت، با در نظر گرفتن مجموع تولید برق سالانه سیستم می‌توان میزان انتشار CO_2 را محاسبه کرد. علاوه بر این انتشار یک تن CO_2 باعث هزینه زیست‌محیطی ۲۴ دلار می‌شود. 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 شود که برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب ته‌نشینی در نظر گرفته شده است [۲۹-۳۰].



شکل ۲۲- عملکرد زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی در شهر رشت.

۶-نتیجه‌گیری

در این پژوهش به آنالیز ترمودینامیکی یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای ذخیره هیدروژن مایع، سرمایش، آب گرم و توان با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده با کاربرد سیال‌های کاری مختلف پرداخته شد. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین‌گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و منبع ذخیره هیدروژن مایع است. جهت مدل‌سازی سیستم مورد بررسی و همچنین به‌دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی استفاده شد. سیالات ارگانیک مختلفی شامل مبرد R113، R123 و R134a برای افزایش عملکرد سیستم بررسی شد. تأثیر شش متغییر تصمیم گیری شامل دبی جرمی ورودی به اواپراتور، دمای ورودی به مولد بخار بازیابی حرارت، بازده توربین، دمای ورودی توربین، دمای پینچ پوینت اواپراتور و بازده پمپ بر روی عملکرد سیستم بررسی شد. همچنین در این پژوهش کشور مطالعاتی ایران برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی بررسی شد و دوازده شهر از کشور ایران انتخاب شد. آنالیز سیالات ارگانیک نشان داد که بهترین سیال ارگانیک R123 است، چرا که به افزایش عملکرد سیستم کمک می کند. شهر رشت با عملکرد مناسب در تولید توان و هزینه مناسب به عنوان بهترین شهر مطالعاتی انتخاب

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

شدند. نتایج زیست‌محیطی نشان داد که با راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر رشت می‌تواند به گسترش ۵ هکتاری فضای سبز کمک کند.

۷-مراجع

[۱] تمری، اقلیم، سحابی، بهرام، صادقی، حسین، ۱۳۹۴، سبد استاندارد انرژی تجدیدپذیر (RPS) و دستیابی به ترکیب بهینه انرژی های تجدیدپذیر در ایران، فصل نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی، سال دهم، شماره‌ی ۴۵، تابستان، صفحات ۸۱-۵۱.

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

[۳] فرهادی، احسان.، عصاره، احسان‌اله، ۱۴۰۰، تحلیل و بررسی یک سیستم تولید چند گانه انرژی بر مبنای انرژی زمین‌گرمایی برای تولید برق پاک و هیدروژن، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۸ شماره ۲ صفحات ۳۳-۱۵.

[۴] سیداحمدی، سیداحسان، عصاره، احسان‌اله.، ۱۴۰۱، تجزیه و تحلیل پارامترهای طراحی بر روی یک سیستم زمین‌گرمایی و استفاده از ذخیره‌ساز انرژی با هوای فشرده برای تولید برق پاک، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۹ شماره ۱ صفحات ۳۴-۱۷.

[۵]گلشن‌زاده، مسعود، عصاره، احسان‌اله، ۱۳۹۹، تحلیل اگزرژی، انرژی، مدل‌سازی و بررسی پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید چند گانه بر مبنای انرژی خورشیدی و بادی برای تولید برق پاک و آب شیرین، مجله علمی-تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول. جلد ۷ شماره ۴.

[۶] جعفری، مجید، عصاره، احسان‌اله.، ۱۴۰۱، ارزیابی ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید همزمان جدید بر اساس ترکیبی از آب شیرین کن چند اثره و ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۹ شماره ۳.

[۷] امیرشکاری زاده، علیرضا، عصاره، احسان‌اله.، ۱۴۰۱، 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، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۹ شماره ۲.

[۸] دژدار، علی، عصاره، احسان‌اله، ۱۳۹۹، مدل‌سازی، بهینه‌سازی و بررسی اگزرژواکونومیک یک سیستم تولید چندگانه انرژی برای تولید برق بر مبنای انرژی خورشیدی، باد و انرژی حرارتی اقیانوسی در مناطق ساحلی، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

[۹] برومند، علی، عصاره، احسان‌اله، ۱۳۹۹، ترکیب سیکل برایتون و یک سیستم کلکتور خورشیدی با دریافت کننده مرکزی برای تولید برق، آب شیرین و سرمایش، مجله علمی- تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، جلد ۸ شماره ۳.

[10] Moharramian, A., Soltani, S., Rosen, M. A., Mahmoudi, S. M. S., Jafari, M., 2019, Conventional and enhanced thermodynamic and exergoeconomic analyses of a photovoltaic combined cycle with biomass post firing and hydrogen production, Applied Thermal Engineering 160, 113996.

[11] Chen, Y., et al. (2023). "Exergy-economic analysis and multi-objective optimization of a multi-generation system based on efficient waste heat recovery of combined wind turbine and compressed CO2 energy storage system." Sustainable Cities and Society 96: 104714.

[12] Zhao, X., et al. (2023). "Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station." International Journal of Hydrogen Energy 48(57): 21531-21543.

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

[13] Spiru, P. (2023). "Assessment of renewable energy generated by a hybrid system based on wind, hydro, solar, and biomass sources for decarbonizing the energy sector and achieving a sustainable energy transition." Energy Reports 9: 167-174.
[14] Temiz, M. and I. Dincer (2022). "Design and analysis of a floating photovoltaic based energy system with underground energy storage options for remote communities." Journal of Energy Storage 55: 105733.
[15] Dezhdar, A. and E. Assareh (2020). "Modeling, Optimization and exergoeconomic analysis a multiple energy production system based on solar Energy, Wind Energy and Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) in the onshore region." iaud-jeed 7(3): 81-94.
[16]Assareh, E., et al. (2019). "Exergoeconomic and multi-objective optimization of a solar system for Hydrogen production by the Particle Swarm Algorithm." Journal of Energy Conversion 6(1): 43-59.
[17] keykhah, A., et al. (2023). "Optimization and performance analysis of a geothermal-based power generation system based on flash-binary and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures." Advances in Engineering and Intelligence Systems 002(03.(
[18] Assareh, E., et al. (2023). "Simulation, optimization and thermodynamic, economic and environmental analysis of cryogenic cycle, dew point regulation in an existing refinery." Advances in Engineering and Intelligence Systems 002(02).
[19] Dezhdar, A., et al. (2023). "A transient model for clean electricity generation using Solar energy and ocean thermal energy conversion (OTEC) - case study: Karkheh dam - southwest Iran." Energy Nexus 9: 100176.
[20]Keykhah, S., E. Assareh, R. Moltames, A. Taghipour, and H. Barati, 2021, thermoeconomic analysis and multi-objective optimization of an integrated solar system for hydrogen production using particle swarm optimization algorithm, Journal of Thermal Engineering 7 (4): 746–760.
[21]Assareh, E., et al. (2023). "A transient simulation for a novel solar-geothermal cogeneration system with a selection of heat transfer fluids using thermodynamics analysis and ANN intelligent (AI) modeling." Applied Thermal Engineering 231: 120698.
[22]Kianfard, H., Khalilarya, S., Jafarmadar S., 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, Energy Convers. Manag, vol. 177, pp. 339–349.
[23]Boyaghchi F. A., Chavoshi M., Sabeti V., 2018, Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations, Energy, vol. 145, pp. 38–51.
[24]Dezhdar, A., et al. (2023). "Transient optimization of a new solar-wind multi-generation system for hydrogen production, desalination, clean electricity, heating, cooling, and energy storage using TRNSYS." Renewable Energy 208: 512-537.
[25]Ioroi, T., Yasuda, K., Siroma, Z., Fujiwara, N., Miyazaki, Y., 2002, Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells, J Power Sources; 112:583–7.
[26]Aryanezhad, M.B., Tarokh, M.J., Mokhtarian M.N. and Zaheri, F. (2011), "A Fuzzy TOPSIS Method Based on Left and Right Scores", International Journal of Industrial Engineering and Production Research, 22, 1, 51-62.
[27]Chen, C.T. (2000), "Extensions of TOPSIS for Group Decision–making under fuzzy environment", fuzzy sets and systems, 114, 1-9.
[28]Alirahmi, S. M., Razmi, A. R., Arabkoohsar, A., 2021, Comprehensive assessment and multi-objective optimization of a green concept based on a combination of hydrogen and compressed air energy storage (CAES) systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 142, 110850.
[29]Kroegera,T., Escobedob, F.J., Hernandezc, J. H., Varelab, S., Delphinb, S., Fishera, J. R. B., Waldrond, J., 2014, Reforestation as a novel abatement and compliance measure for ground-level ozone, 111 (40).
[30]Assareh, E., et al. (2022). "Transient thermodynamic modeling and economic assessment of cogeneration system based on compressed air energy storage and multi-effect desalination." Journal of Energy Storage 55: 105683.

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

چکیده انگلیسی:

Thermodynamic analysis of a multiple energy production system based on geothermal energy for the production of liquid hydrogen, cooling, hot water and power using a modified organic Rankine cycle using different working fluids

Behroz Rafiei, Ali Ershadi*, Ehsanolah Assaerh
*Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

Received: March 2024 Accepted: May 2024

Abstract
In this research, the thermodynamic analysis of a multiple energy production system based on geothermal energy for producing liquid hydrogen, cooling, hot water, and power using the modified organic Rankine cycle was discussed. The investigated system consists of geothermal subsystems, a modified organic Rankine cycle, a proton exchange membrane electrolyzer, and a liquid hydrogen storage source. Various organic fluids were investigated to increase the system's performance, and finally, the organic fluid R123 was selected. The effect of six design parameters, including the mass flow rate of the inlet to the evaporator, temperature of the inlet to the heat recovery steam generator, turbine efficiency, turbine inlet temperature, evaporator pinch point temperature, and pump efficiency were investigated on the system performance. The results showed that the most effective parameters are the input mass flow rate, the input temperature to the heat recovery steam generator, and the input temperature to the turbine. In this research, the country of Iran was investigated for the implementation of the proposed system, and twelve cities including Isfahan, Dezful, Iranshahr, Kerman, Bojnord, Birjand, Bandar Abbas, Bushehr, Babol, Rasht, Ardabil and Zanjan were selected. Finally, the city of Rasht was chosen because of its good performance in power generation and reasonable cost, and the environmental results showed that the proposed system in Rasht city can help to expand 5 hectares of green space.

Keywords: Geothermal energy, Multiple energy production system, Modified organic Rankine cycle, Liquid hydrogen.

*corresponding author: ali.ershadi@iau.ac.ir

Cite this article as: Behroz Rafiei, Ali Ershadi, Ehsanolah Assaerh. Thermodynamic analysis of a multiple energy production system based on geothermal energy for the production of liquid hydrogen, cooling, hot water and power using a modified organic Rankine cycle using different working fluids. Journal of Energy Conversion, 2024, 11(1), 93-117.

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