J. Energy Conversion

Volume: 11, Issue: 3, 2024: 41-58

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۳، پاییز۱۴۰۳، ص: ۵۸-۴۱

تحلیل انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید انرژی بر اساس ترکیبی از ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، منبع ذخیره گرم و سرد، الکترولایزر و سیکل ارگانیک رانکین

اردشیر قلاوند[۱]، علی ارشادی[۲*]، احسان اله عصاره[۳]

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، ardeshirghalavand21@gmail.com

*۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، ali.ershadi@iau.ac.ir

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

دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۳۰

چکیده

در این پژوهش به تحلیل انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم جدید تولید هم‌زمان هیدروژن و برق پرداخته شد. با استفاده از ترکیب واحدهای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و الکترولایزر غشای تبادل پروتون و هم‌چنین استفاده از ترکیب سوخت متان و هیدروژن برای تأمین انرژی موردی نیاز سیکل برایتون اصلاح‌شده یک سیستم جدید طراحی شد. جهت مدل‌سازی سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی استفاده شد. از سیال ارگانیک R123 در سیکل رانکین استفاده شد. مطالعه پارامتریک نشان داد که دمای ورودی به توربین گازی و فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده از تأثیرگذارترین پارامترها بر روی عملکرد سیستم است. عملکرد سیستم در سه شهر دزفول، تهران و تبریز بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات دمای محیط بر روی عملکرد سیستم تأثیر دارد و سیستم در شهرهایی با آب‌وهوای سرد نسبت به شهرهای گرم بهتر عمل می‌کند. آنالیز بار مصرفی مورد نیاز یک نفر در طول سال در شهر تبریز نشان داد که سیستم می‌توان برق مورد نیاز ۸۸۹ نفر را در طول سال تأمین کند.

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

کلمات کلیدی: سیستم تولید چندگانه انرژی، ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، الکترولایزر غشای تبادل پروتون

نحوه استناد به این مقاله اردشیر قلاوند, علی ارشادی, احسان اله عصاره. تحلیل انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی یک سیستم تولید انرژی بر اساس ترکیبی از ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، منبع ذخیره گرم و سرد، الکترولایزر و سیکل ارگانیک رانکین. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۳) : ۴۱-۵۸.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

۱- مقدمه

نیاز به انرژی و استفاده از آن در کاربردهای صنعتی و خانگی از معیارهایی برای تعیین سطح پیشرفت و کیفیت زندگی در یک کشور است. گستردگی نیاز به منابع انرژی همواره از مسائل اساسی مهم در زندگی بشر بوده و تلاش برای دست‌یابی به یک منبع تمام‌نشدنی انرژی از آرزوهای دیرینه انسان بوده است. امروزه جوامع و کشورهای جهان بیش‌تر از سال‌های گذشته به انرژی وابسته شده است. به این دلیل باید به دنبال راه‌کارهایی جهت افزایش عملکرد سیستم و به‌صورت هم‌زمان کاهش هزینه‌های سیستم و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت سیستم و سوختن منابع فسیلی به‌عنوان عامل اصلی این انتشار CO_2 بود [۱و۲].

بشر چنان به انرژی وابسته شده است که به‌ندرت در مورد نقش و تأثیر آن حتی زحمت فکر کردن به‌خود می‌دهد، به‌همین دلیل توجه محققان به سمت بهبود عملکرد سیستم‌های تولید انرژی با تلاش برای افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های سیستم‌ها جلب شده است [۳و۴].

دادپور و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۲، به بررسی پیشنهاد یک روش جدید برای بازیابی حرارت هدر رفته از موتور احتراق داخلی برای چیلر جذبی دو اثر مستقیم پرداختند. آن‌ها بیان کردند که استفاده از گرمای هدر رفته در سیکل‌های تبرید جذبی همواره یکی از روش‌های مؤثر بازیابی حرارت است که منجر به بهبود راندمان، مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود. در این مطالعه، روش جدیدی برای استفاده از گرمای تلف‌شده از گاز خروجی موتور احتراق داخلی برای یک سیکل چیلر جذبی، به‌صورت عددی و تجربی پیشنهاد شد. عصاره و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۲، مدل‌سازی ترمودینامیکی گذرا و ارزیابی اقتصادی یک سیستم تولید هم‌زمان بر اساس ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و نمک‌زدایی چند اثره را بررسی کردند. این مطالعه به بررسی طراحی یک سیستم تجدیدپذیر برای تولید برق و آب شیرین براساس چرخه خورشیدی و استفاده از ذخیره‌سازی حرارتی در شهرهای مختلف می‌پردازد. این سیستم شامل زیرسیستم‌های هلیوستات، توربین گاز، نمک‌زدایی چند اثره و ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بود. آنالیز اقتصادی سیستم نشان داد واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، واحد خورشیدی و توربین گاز، بالاترین هزینه را در بین هزینه‌های اجزای سیستم داشتند. پنج شهر اصفهان، دبی، لندن، پاریس و سانفرانسیسکو از نظر زمان پیک مصرف در سال مقایسه شدند. در نهایت نشان داد که سیستم در شرایط اقلیمی اصفهان در زمان پیک مصرف بهترین عملکرد را داشته است. عصاره و همکاران[۷] در سال ۲۰۲۲، بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی یک سیستم ترکیبی شامل یک نیروگاه خورشیدی متمرکز، بخار رانکین، برایتون، سیکل ارگانیک رانکین، واحد اسمز معکوس و یک ژنراتور ترموالکتریک مبتنی بر انرژی خورشیدی برای تولید برق و آب شیرین را ارزیابی کردند. نتایج ترمودینامیکی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم نشان داد که تابش عادی مستقیم، تعداد هلیوستات، راندمان توربین و دمای ورودی، نسبت فشار کمپرسور و دمای ورودی پمپ سیکل رانکین بخار بیش‌ترین تأثیر را دارند. رجب و همکاران[۸] در سال ۲۰۲۲، به بررسی یک سیستم نوآورانه یک‌پارچه چند تولید انرژی خورشیدی برای تولید هیدروژن، اکسیژن، برق و گرما سبز پرداختند. سیستم طراحی شده شامل کلکتورهای حرارتی فتوولتائیک خورشیدی با چرخه رانکین آلی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و گاز طبیعی مایع است. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی راندمان اگزرژی ۱۶/۲۴ درصد، نرخ هزینه ۴/۴۸ دلار در ساعت و توان الکتریکی خالص ۳۳/۳۲ کیلووات تحت شرایط بهینه به‌دست می‌آید. رستمی و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۲ به بررسی تولید و ذخیره انرژی بر اساس یک سیستم خورشیدی متشکل از یک کلکتور سهموی، سلول سوختی غشای تبادل پروتون، سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر قلیایی برای طراحی و راه‌اندازی یک نیروگاه پرداختند. در این سیستم انرژی خورشید توسط کلکتور خورشیدی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. این انرژی حرارتی وظیفه حرارتی لازم را برای اواپراتور چرخه رانکین آلی آماده کند. سپس الکتریسیته توسط توربین سیکل ارگانیک رانکین تولید شد. لیو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۲، به استفاده از انرژی زیست‌توده و ترکیب با یک سیستم جدید مبتنی بر سیکل برایتون اصلاح‌شده برای تولید برق و آب شیرین پرداختند. در این پژوهش از یک سیکل برایتون که جریان خروجی آن توسط بیوگاز تأمین می‌شود و از حرارت خروجی توربین گازی برای تأمین انرژی موردنیاز واحد نمک‌زدایی چند اثره و واحد گرمایش استفاده می‌شود. ندائی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۲، به بررسی یک سیستم تولید چندگانه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

مبتنی بر جذب انرژی خورشیدی و استفاده از سیکل برایتون اصلاح‌شده و واحدهای تولید سرمایش، هیدروژن و آب شیرین تشکیل شد. سیستم قادر به تولید ۸/۳۲ مگاوات، ۳/۱۶ کیلوگرم بر ثانیه آب شیرین، ۸/۳۷ مگاوات سرمایش و ۰/۲۲ کیلوگرم در ساعت هیدروژن در شرایط بهینه است. دژدار و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم تجدیدپذیر زمین گرمایی باینری فلش با استفاده از سیال کاری زئوتروپیک پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش ۲۲ درصدی قیمت برق با همان قیمت ژئوسیال، دوره بازگشت سرمایه را تا ۲۳ درصد کاهش می‌دهد. کیخواه و همکاران[۱۳] در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم تجدیدپذیر زمین گرمایی با استفاده از سیکل ارگانیک رانکین تبخیر باینری فلاش و دو فشاری پرداختند. نتایج نشان داد که توربین بخار با مقدار ۹۹۶ کیلووات دارای بیش‌ترین نرخ تخریب اگزرژی در بین تجهیزات سیستم است. کاراپلوچی و جوردانو [۱۴] در سال ۲۰۲۱، به بررسی توربین‌های گازی و تزریق بخار برای تأمین مجدد نیروگاه‌های سیکل ترکیبی پرداختند. راه‌حل پیشنهادی متکی بر ادغام یک واحد تولید هم‌زمان بر اساس توربین گاز احیاکننده، فراهم کردن ظرفیت برق اضافی و بخار بیش از حد گرم شده به توربین‌های گازی سیکل ترکیبی موجود است. در مقایسه با تکنیک‌های سنتی تغذیه مجدد، گزینه پیشنهادی در این مطالعه قادر به افزایش تولید برق بدون کاهش بازده توربین‌های گازی سیکل ترکیبی موجود است. سلطانی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۳، به بررسی سیستم تبدیل به گاز زیست‌توده با چرخه CO_2 فوق بحرانی برای سوخت هیدروژن و تولید برق پرداختند. استفاده از زباله‌های جامد شهری، چوب و کاغذ به‌عنوان سوخت سیستم در نظر گرفته شد. در سیستم در نظر گرفته شده، گاز تولید شده در گازیفایر انرژی موردنیاز برای راه‌اندازی یک ماژول توربین گازی را تأمین می‌کند. دژدار و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی مبتنی بر استفاده هم‌زمان از دو انرژی خورشیدی-بادی برای تولید محصولات پاک شامل هیدروژن، آب شیرین، برق، گرمایش و سرمایش پرداختند. سیستم پیشنهادی دارای هزینه چرخه عمر ۶۷۴۲۷۸,۴ دلار در ساعت و ظرفیت تولید ۲۲۵۶۹۴,۸ کیلووات ساعت برق است. رزمی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۱، به بررسی سیستم ذخیره انرژی با هوای فشرده دو نیروگاه بادی در کشور ایران با قدرت اسمی کل ۱۶۲/۵ مگاوات پرداختند. نتایج نشان داد که سرعت باد در ماه جولای در هر دو سایت ابهر و کهک بیش‌تر از ماه‌های دیگر است؛ بنابراین حدود ۹۳، ۷۴ و ۶۰ مگاوات توان ذخیره شده در تأسیسات CAES طی ۵ ساعت اوج تقاضا در ماه‌های جولای، اوت و سپتامبر با بازده رفت و برگشت ۵۲، ۴۷ و ۴۳ درصد به شبکه اضافه شده است.

علی‌رحمی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۱، به بررسی سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده ترکیبی با واحدهای خورشیدی و نمک‌زدایی پرداختند. این سیستم نه‌تنها برق را با هزینه کم تولید می‌کند، بلکه با بازیابی گرمای اضافی از سیستم اقدام به تولید آب شیرین نیز می‌کند. بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای افزایش دمای ورودی توربین هوا به‌جای استفاده از محفظه‌های احتراق، این سیستم را سازگار با محیط‌زیست می‌کند. بازده اگزرژی و نرخ هزینه سیستم به ترتیب ۴۸/۷ درصد و ۳۰۵۶ دلار بر ساعت محاسبه شد. کیم و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۰، بر روی یک مطالعه پارامتریک و بهینه‌سازی یک سیکل بسته برایتون با درنظر گرفتن شارژ سیال کاری انجام داد. نتایج نشان داد می‌توان مقدار شارژ را به‌عنوان یک پارامتر طراحی و کنترل CBC در نظر گرفت. ژانگ و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۲۰، به بررسی سیستم جدید تولید برق با استفاده از یک سیکل توربین گاز پرداختند. این مطالعه با هدف ارائه یک سیستم جدید برای بازیابی حرارت و انرژی هدررفت سیکل توربین گاز انجام شد. بر اساس نتایج بهینه‌سازی، بازده حرارتی و اگزرژی سیستم به میزان ۴۶/۱۱ درصد و ۴۷/۲۴ گزارش شد. رزمی و جانباز [۲۱] در سال ۲۰۲۰، به بررسی یک سیستم تولید هم‌زمان و استفاده از سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده (CAES) پرداختند. این سیستم متشکل از زیرسیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده، سیکل ارگانیک رانکین و سیکل تبرید جذبی بود. نتایج نشان داد که هزینه برق و آب سرد در دوره اوج مصرف به ترتیب ۰/۰۷۸۳ و ۰,۱۷۸۹ دلار بر کیلووات ساعت است که با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۸/۳۶ درصد و ۸/۳۲ درصد افزایش یافته است. رزمی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۲۲، مفهوم ذخیره انرژی هیدروژن سبز بر اساس جمع‌آورنده سهموی و غشای مبادله پروتون الکترولایزر/پیل سوختی را گزارش دادند. هدف اصلی این تحقیق معرفی یک پیکربندی جدید از تولید هیدروژن سبز برای تولید برق در دوره‌های اوج تقاضا است. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی می‌تواند به ترتیب ۹، ۱۴/۹ و ۲۰/۱ مگاوات برق در

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

زمان‌های خاموش، اواسط و اوج بار تولید کند. هم‌چنین نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی با بازده اگزرژی ٪۱۷/۶ و نرخ هزینه ۴۹۲/۴ دلار در ساعت تحت شرایط بهینه عمل می‌کند.

در این مطالعه به بررسی انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید توان و هیدروژن با ترکیب واحدهای سیکل برایتون اصلاح‌شده، سیکل ارگانیک رانکین، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده برای تولید برق پاک پرداخته شد. عملکرد سیستم نسبت به شرایط آب‌وهوایی سه شهر مختلف با دمای مختلف (سرد و گرم) در کشور ایران مطالعه شد و تأثیر تغییرات دمای محیط این منطقه در بهینه‌ترین و بهترین حالت سیستم به‌صورت ماهیانه بررسی شد.

به‌طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

- معرفی یک سیستم جدیدی مبتنی بر استفاده از سوخت متان-هیدروژن، سیال ارگانیک و روغن
- طراحی یک سیستم از ترکیب واحدهای سیکل برایتون اصلاح‌شده، سیکل ارگانیک رانکین اصلاح‌شده، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و واحد CAES.
- آنالیز انرژی، اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم
- بررسی امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان سیستم بر اساس داده‌های دمای محیط به‌دست‌آمده (منجر به تولید برق متغیر) در روزهای سال برای سه شهر ایران.

شهرهای انتخابی جهت مطالعه و یافتن بهترین منطقه جهت راه‌اندازی سیستم، دارای آب و هوای مختلفی هستند و جز شهرهای خیلی گرم، متعادل و سرد هستند. هدف اصلی یافتن شرایط آب‌وهوایی مناسب برای راه‌اندازی سیستم است. دمای محیط از تأثیرگذارترین پارامترهای آب و هوایی بر روی عملکرد سیستم است و برای راه‌اندازی سیستم یک پارامتر مکانی محسوب می‌شود که باید قبل از راه‌اندازی سیستم در مناطق مختلف، تأثیر دمای محیط سیستم بررسی شود.

۲- مواد و روش

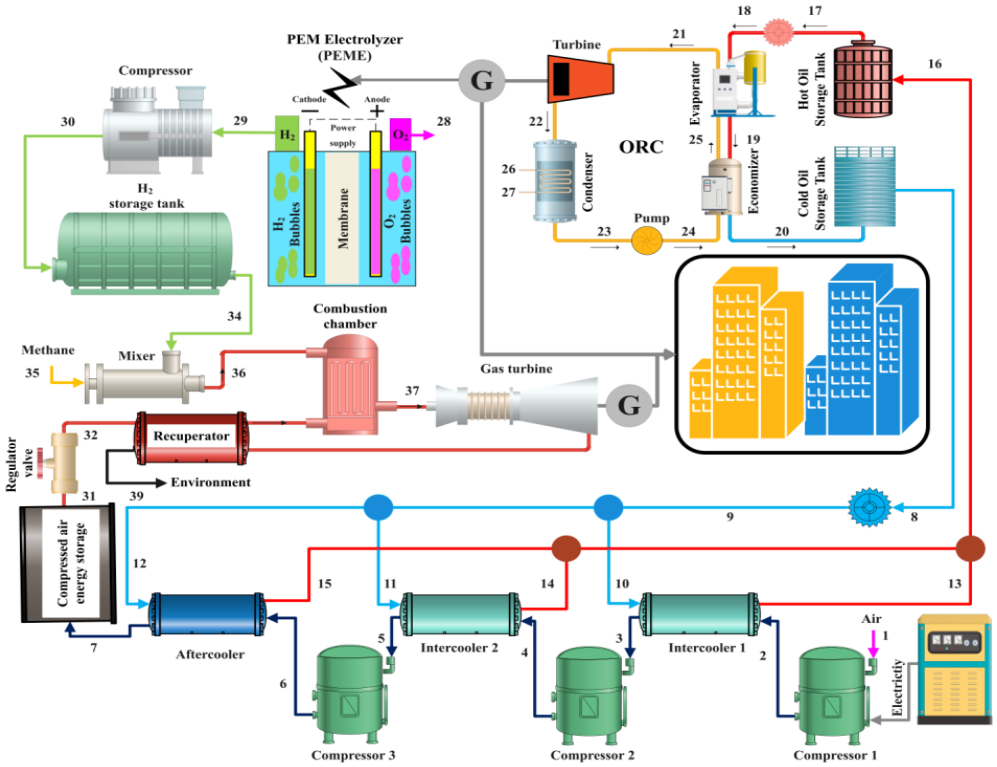
۲-۱- شرح سیستم

در شکل (۱) شماتیک سیستم نشان داده شده است. پیکربندی سیستم پیشنهادی در این مطالعه شامل یک الکترولایزر غشای تبادل پروتون، واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، سیکل برایتون اصلاح‌شده و یک سیکل ارگانیک رانکین است. سیستم مورد مطالعه از ۳ جریان اصلی جریان هوا برای ذخیره انرژی و تولید توان، جریان آب برای خنک کردن دمای ورودی کمپرسور و تأمین گرما به سیکل ارگانیک رانکین و جریان R123 برای تولید توان مورد نیاز برای الکترولایزر غشای تبادل پروتون استفاده شد. در حالت شارژ، الکتریسیته ارزان یا مازاد برق ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر در ساعات کم‌بار به این سیستم هدایت می‌شود تا زنجیره‌ای از کمپرسورها با نسبت تراکم مشابه راه‌اندازی شود. استفاده از اینترکولرها و پس کولرها باعث بهبود راندمان کمپرسورها با کاهش دمای هوای خوراک و جذب گرمای تراکمی تولید شده برای استفاده‌های بعدی می‌شود. درحالی‌که گرمای تراکم توسط آب جذب می‌شود و به سیکل ارگانیک رانکین هدایت می‌شود، خود هوای فشرده به مخزن ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده هدایت می‌شود تا برای اهداف تولید برق در طول زمان اوج تقاضا ذخیره شود. سیال انتقال حرارت سیکل ارگانیک رانکین، گرمای تراکمی را از آب در اواپراتور و اکونومایزر جذب می‌کند تا توربین سیکل ارگانیک رانکین را در حالت‌های ۲۲ و ۲۳ راه‌اندازی کند. یک واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون با تغذیه از توان سیکل ارگانیک رانکین، هیدروژن مورد نیاز برای زمان تخلیه را تولید می‌کند. در حین تخلیه، دودهای توربین گاز، هوای فشرده ذخیره شده را در حین عبور از یک ریکاپراتور، از قبل گرم می‌کنند و سپس آن هوای گرم به محفظه احتراق تزریق می‌شود. ازآنجایی‌که هیدروژن تولید شده توسط الکترولایزر غشای تبادل پروتون در طول حالت شارژ نمی‌تواند کل سوخت مورد نیاز در محفظه احتراق را تأمین کند، هیدروژن تولید شده، جریان ۳۲، با متان مکمل، جریان ۳۳، در یک مخلوط‌کن مخلوط می‌شود تا در محفظه احتراق بسوزد. با استفاده از محفظه احتراق، از نوسانات دما در ورودی توربین گاز جلوگیری می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

هیدروژن تولید شده از طریق جریان ۳۲ به محفظه احتراق فرستاده می‌شود و با متان انرژی مورد نیاز محفظه احتراق را تأمین می‌کند.



شکل ۱- شماتیک سیستم

۲-۲- آنالیز ترمودینامیکی

برای تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستم کار حاضر، موازنه جرم و انرژی برای هر حجم کنترل ایجاد می‌شود.

مفروضات زیر جهت ساده‌سازی حل مسئله می‌شود:

- شرایط حالت پایدار
- افت فشار در خطوط لوله ناچیز است [۲۳].
- خروجی کندانسور مایع اشباع شده است [۲۳].
- خروجی اواپراتور بخار اشباع شده است [۲۳].
- تغییرات در انرژی‌های جنبشی ناچیز است [۲۴].
- تغییرات در انرژی‌های پتانسیل ناچیز است [۲۴].

برای بررسی آنالیز ترمودینامیکی سیستم زمین‌گرمایی از روابط پایه در بحث ترمودینامیکی استفاده شد که با رجوع به منابع [۲۵-۲۸] می‌توان این روابط که شامل قانون بقای جرم، قانون بقای انرژی، بالانس انرژی و اگزرژی و هم‌چنین آنالیز اقتصادی شامل رابطه نرخ هزینه مطالعه شود.

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

جدول ۱- مقدار داده‌های ورودی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

داده	معرفی پارامتر	مقدار
T_0	دمای محیط	25°C
P_0	فشار محیط	101.3kPa
η_{GT}	بازده توربین گازی	0.88
η_{turbin}	بازده توربین	0.8
η_{pump}	بازده پمپ	0.9
η_{comp}	بازده کمپرسور	0.88
η_{Aftc}	بازده افترکولر	0.8
η_{Intc}	بازده اینترکولر	0.8
P_7	فشار ورودی به CAES	5000kPa
T_{37}	دمای ورودی به توربین گاز	1000°C
r_p	نسبت فشار CAES	2(-)
$\dot{m}_1$	دبی جرمی ورودی	1kg/h
$T_{hot\ tank}$	دمای منبع گرم	380°C

$$\dot{Q}-\dot{W}+\sum_i \dot{m}_i\left(h_i+\frac{v_i^2}{2}+gZ_i\right)-\sum_e \dot{m}_e\left(h_e+\frac{v_e^2}{2}+gZ_e\right)=\frac{dE_{CV}}{dt} \quad (۱)$$

استفاده از اولین قانون ترمودینامیک زیر، برای هر حجم کنترل، در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- معادلات تعادل نرخ انرژی سیستم.

اجزا سیستم	معادله
توربین گازی	$\dot{W}_{GT}=\dot{m}_{37}\times(h_{37}-h_{38})$
ذخیره ساز انرژی هوای فشرده	$\dot{W}_{CAES}=Compressor1+Compressor2+Compressor3$
کمپرسور ۱	$\dot{W}_{Compressor1}=\dot{m}_1\times(h_2-h_1)$
کمپرسور ۲	$\dot{W}_{Compressor2}=\dot{m}_3\times(h_4-h_3)$
کمپرسور ۳	$\dot{W}_{Compressor3}=\dot{m}_5\times(h_6-h_5)$
پمپ	$\dot{W}_{Pump}=\dot{m}_{24}\times(h_{24}-h_{23})$
توربین	$\dot{W}_{Turbine}=\dot{m}_{21}\times(h_{21}-h_{22})$
سیکل ارگانیک رانکین	$\dot{W}_{ORC}=\dot{W}_{Turbine}-\dot{W}_{Pump}$
الکترولایزر	$\dot{W}_{PEME}=\dot{W}_{orc}$
ریکاپراتور	$Q_{Rec}=\dot{m}_{32}\times(h_{33}-h_{32})$
اواپراتور	$Q_{Eva}=\dot{m}_{25}\times(h_{21}-h_{25})$
اکونومایزر	$Q_{Eva}=\dot{m}_{24}\times(h_{25}-h_{24})$
اینترکولر ۱	$Q_{Intercooler}=\dot{m}_2\times(h_2-h_3)$
اینتر کولر ۲	$Q_{Intercooler}=\dot{m}_4\times(h_4-h_5)$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

افتر کولر	$Q_{Aftercooler} = \dot{m}_6 \times (h_6 - h_7)$

مقدار توان خالص کل سیستم از رابطه (۲) به‌دقت می‌آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ORC} - \dot{W}_{CAES} \quad (۲)$$

۲-۳- بررسی اقتصادی

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

جدول ۳- بالانس هزینه و روابط کمکی برای تمام اجزا سیستم.

اجزا سیستم	معادله
توربین	$Z_{Turbine}=4750\times\left(\dot{W}_{turbine}^{0.7}\right)\times Z_{ORC}$
پمپ	$Z_{Pump}=3540\times(\dot{W}_{Pump}^{0.71})\times Z_{ORC}$
کندانسور	$Z_{Cond}=1773\times\dot{m}_{22}\times Z_{ORC}$
غشای تبادل پروتون الکترولایزر	$Z_{PEME}=FFFF\times 1000\times\dot{W}_{PEME}\times Z_{ORC}$
اواپراتور	$Z_{Eva}=4122\times\left(A_{Eva}^{0.6}\right)\times Z_{ORC}$
اکونومایزر	$Z_{ECO}=4122\times\left(A_{ECO}^{0.6}\right)\times Z_{ORC}$
ریگلاتور	$Z_{Reg}=114.5\times\dot{m}_{32}\times Z_{discharge}$
ریکاپراتور	$Z_{Rec}=4122\times\left(\frac{A_{Rec}}{100}\right)^{0.6}\times Z_{discharge}$
محفظه احتراق	$Z_{CC}=\frac{(48.64*\dot{m}_{33})}{\frac{0.92-P_{37}}{P_{33}}}\times(1+\exp(0.018\times T_{37}-26.4))\times Z_{discharge}$
اینتر کولر ۱	$Z_{Intc1}=12000\times\left(\frac{A_{Intc\,1}}{100}\right)^{0.6}\times Z_{charge}$
اینتر کولر ۲	$Z_{Intc2}=12000\times\left(\frac{A_{Intc\,2}}{100}\right)^{0.6}\times Z_{charge}$
افتر کولر	$Z_{Aftc}=12000\times\left(\frac{A_{Aftc}}{100}\right)^{0.6}\times Z_{charge}$
کمپرسور ۱	$Z_{Comp1}=91562\times(\frac{\dot{W}_{Comp1}}{455})^{0.67}\times Z_{charge}$
کمپرسور ۲	$Z_{Comp2}=91562\times(\frac{\dot{W}_{Comp2}}{455})^{0.67}\times Z_{charge}$
کمپرسور ۳	$Z_{Comp3}=91562\times(\frac{\dot{W}_{Comp3}}{455})^{0.67}\times Z_{charge}$
توربین گاز	$Z_{GT}=(\frac{1536\times\dot{m}_{37}}{0.92-\eta_{GT}})\times\ln(\frac{P_{37}}{P_{38}})\times(1+\exp(0.036\times T_{37}-54.4)\times Z_{discharge}$
ذخیره ساز انرژی هوای فشرده	$Z_{CAES}=((1.218\times\exp(2.3631+1.3673\times(\ln(V_{Storage}))-0.06309\times(\ln(V_{Storage}))^2))\times Z_{charge}$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

در نهایت باید گفت که میزان هزینه کل سیستم[1] از مجموع هزینه اجزا سیستم به‌دقت آورده می‌شود و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$Z_{total} = Z_{GT} + Z_{Comp\,1} + Z_{Comp\,2} + Z_{Comp\,3} + Z_{CAES} + Z_{Aftercooler} + Z_{Intercooler1} + Z_{Intercooler2} + Z_{Eva} + Z_{Eco} + Z_{Pump} + Z_{PEME} + Z_{Cond} + Z_{Turbine} + Z_{CC} + Z_{Rec} + Z_{Reg} \quad (۳)$$

معادله (۴) برای تبدیل هزینه محاسبه شده به هزینه جاری استفاده می‌شود.

۲-۴- راندمان سیستم

بازده اگزرژی به‌عنوان ویژگی کلیدی بررسی عملکرد انتخاب شد و با معادله (۴) محاسبه می‌شود.

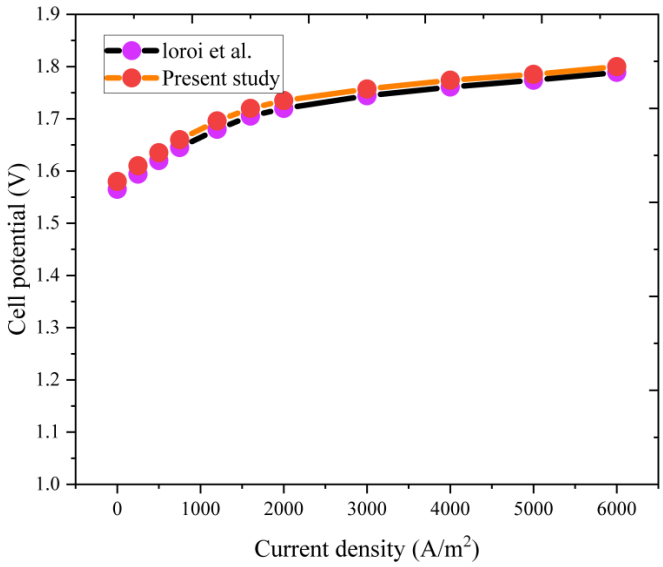
رابطه بازده اگزرژی رفت و برگشتی:

$$ERTE=\frac{(\dot{W}_{GT}\times T_{discharge}+\dot{W}_{ORC}\times Time_{ORC})\times 100}{\dot{W}_{CAES}\times T_{Charge}+EX_{35}\times T_{discharge}} \quad (۴)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج و اعتبار بخشیدن به پژوهش انجام شده، قبل از آنالیز سیستم بحث اعتبارسنجی انجام شده است. با توجه به این‌که سیستم معرفی شده یک سیستم جدید ا ست، اعتبار سنجی زیر سیستم الکترولایزر غشای تبادل پروتون با نتایج پژوهش لوروی و همکاران [۲۹] ارزیابی شده است و دقت نتایج شبیه‌سازی در شکل (۲) بررسی شده است.



شکل ۲- اعتبارسنجی

[1] Total Cost

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

۳-۲- مطالعه پارامتریک

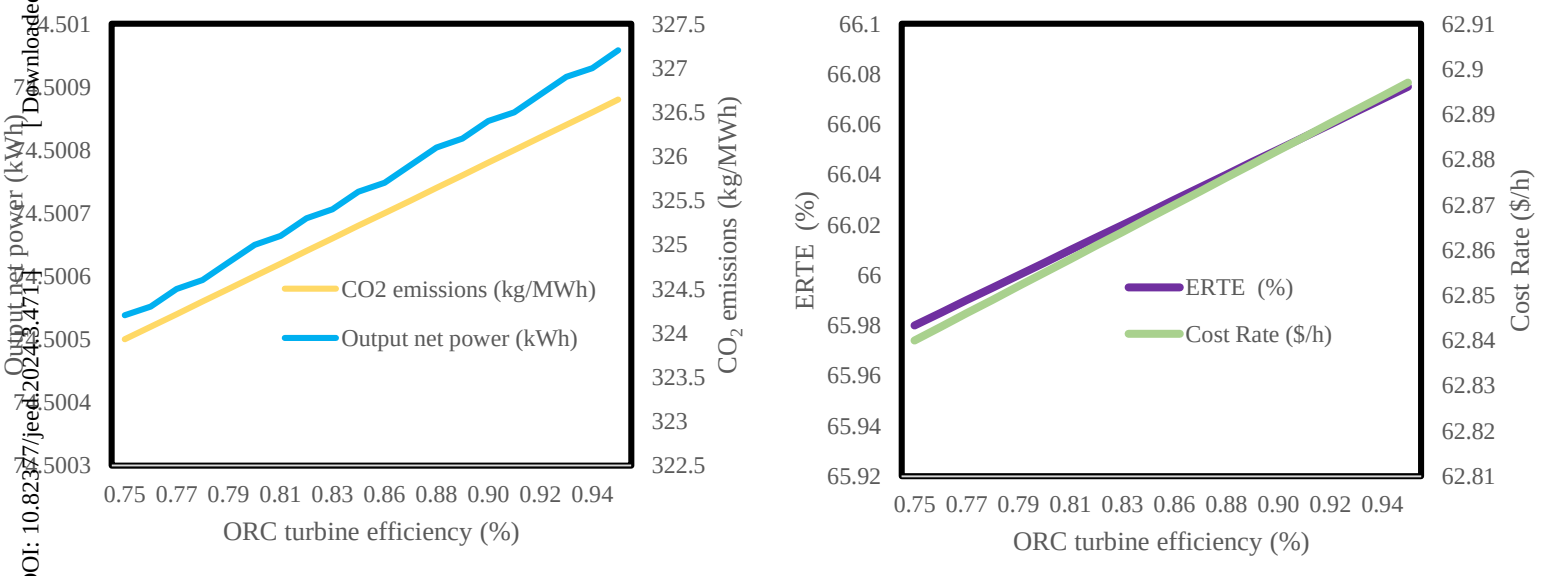
بحث اصلی در طراحی سیستم‌های منابع تولید توان، یافتن بهترین جواب برای راندمان سیستم و هزینه‌ها و تعیین نوع و تعداد پارامترهای بهینه‌ی گوناگون تأثیرگذار در سیستم تولید است. هزینه‌های خارجی، نتایج زیان‌بار فعالیت‌های اقتصادی است که این هزینه‌ها، به‌صورت آثار مخرب بر روی محیط‌زیست ظاهر می‌شوند. تولید انرژی از نیروگاه و تأسیسات، محیط‌زیست را متحمل هزینه‌هایی می‌کند که این هزینه‌ها در قیمت نهایی آن محصول لحاظ نمی‌گردد. عدم توجه به هزینه‌های محیط‌زیستی تولید برق باعث ایجاد آثار مخرب بر منابع طبیعی می‌شود و در مجموعه انرژی کشور، هزینه‌های خارجی که به محیط‌زیست تحمیل می‌گردند باعث آلودگی هوا، آب، کاهش منابع آب شیرین و غیره می‌شوند.

در جدول (۴) به معرفی پارامترهای طراحی برای بررسی بر روی عملکرد سیستم پرداخته شده است.

جدول ۴- پارامترهای طراحی

پارامتر	کران پایین	کران بالا
بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین(٪)	0.75	0.95
فشار ورودی به ذخیره ساز انرژی هوای فشرده (kPa)	2500	7000
دمای ورودی به توربین گازی (K)	1100	1500

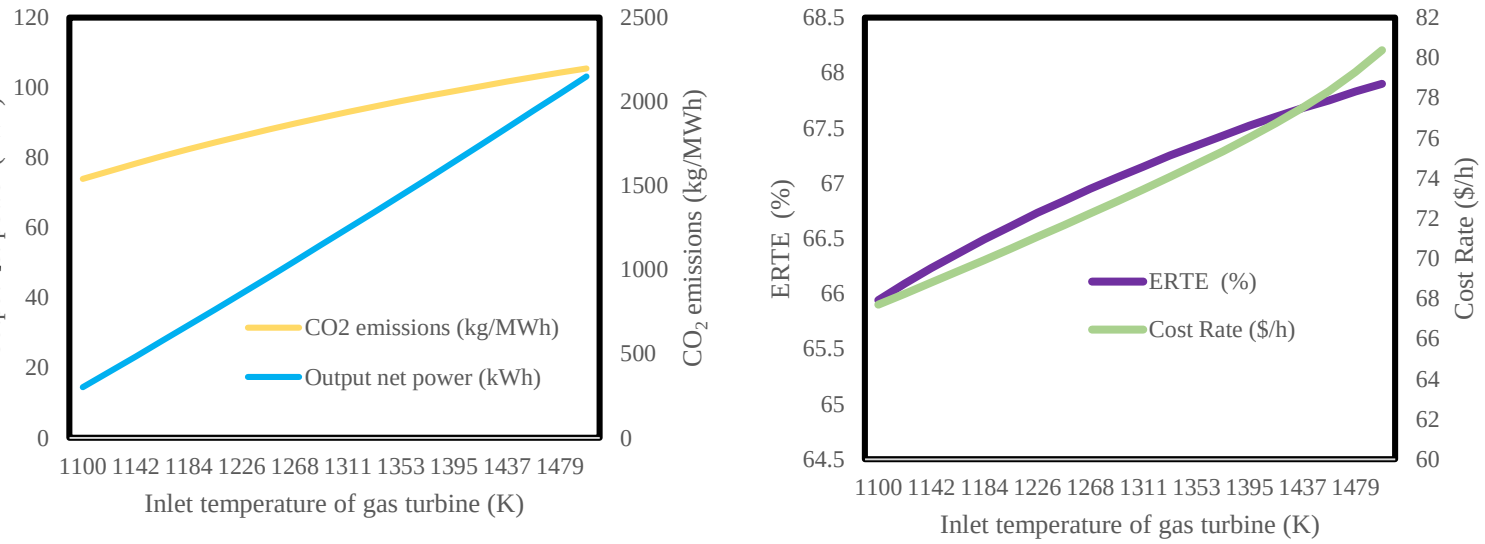
در این قسمت تأثیر افزایش بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین، در محدود ۰/۷۵ تا ۰/۹۵درصد، بر روی عملکرد سیستم بررسی می شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می شود که با افزایش بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین، توان خالص کل سیستم افزایش یافته است، با افزایش بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین، اختلاف آنتالپی در توربین افزایش می‌یابد و درنهایت توان خالص افزایش می‌یابد ولی همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد بازده توربین فقط بر روی عملکرد سیکل ارگانیک رانکین تأثیر گذاشته است و نرخ افزایش تولید بسیار کم است. با افزایش بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین و با توجه به افزایش کار کل سیستم، بازده اگزرژی سیستم نیز افزایش یافته است چراکه بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هم رابطه مستقیمی دارد. با توجه به افزایش بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین، نرخ هزینه سیستم و میزان آلودگی سیستم حاضر به دلیل افزایش تولید برق، افزایش یافته است.



شکل ۳- بررسی تأثیر بازده توربین سیکل ارگانیک رانکین بر روی عملکرد سیستم

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82427/jeed.2024.34711]

در این قسمت تأثیر افزایش دمای ورودی به توربین گازی، در محدود ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، بر روی عملکرد سیستم بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ورودی به توربین گازی، توان خالص کل سیستم افزایش یافته است، با افزایش دمای سیال ورودی به توربین گازی، اختلاف آنتالپی در توربین افزایش می‌یابد که اثر این افزایش اختلاف آنتالپی بیش‌تر از اثر کاهش دبی سیال است و در نهایت کار خروجی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش دمای ورودی به توربین گازی و با توجه به افزایش کار کل سیستم، بازده اگزرژی (ERTE) سیستم نیز افزایش یافته است چراکه بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هم رابطه مستقیمی دارد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با توجه به افزایش دمای ورودی به توربین گازی، میزان نرخ هزینه سیستم و هم‌چنین انتشار کربن دی‌اکسید به دلیل افزایش تولید برق افزایش یافته است که می‌توان نتیجه گرفت آلودگی حاوی از سوختن آلاینده‌های سوخت متان افزایش یافته است.



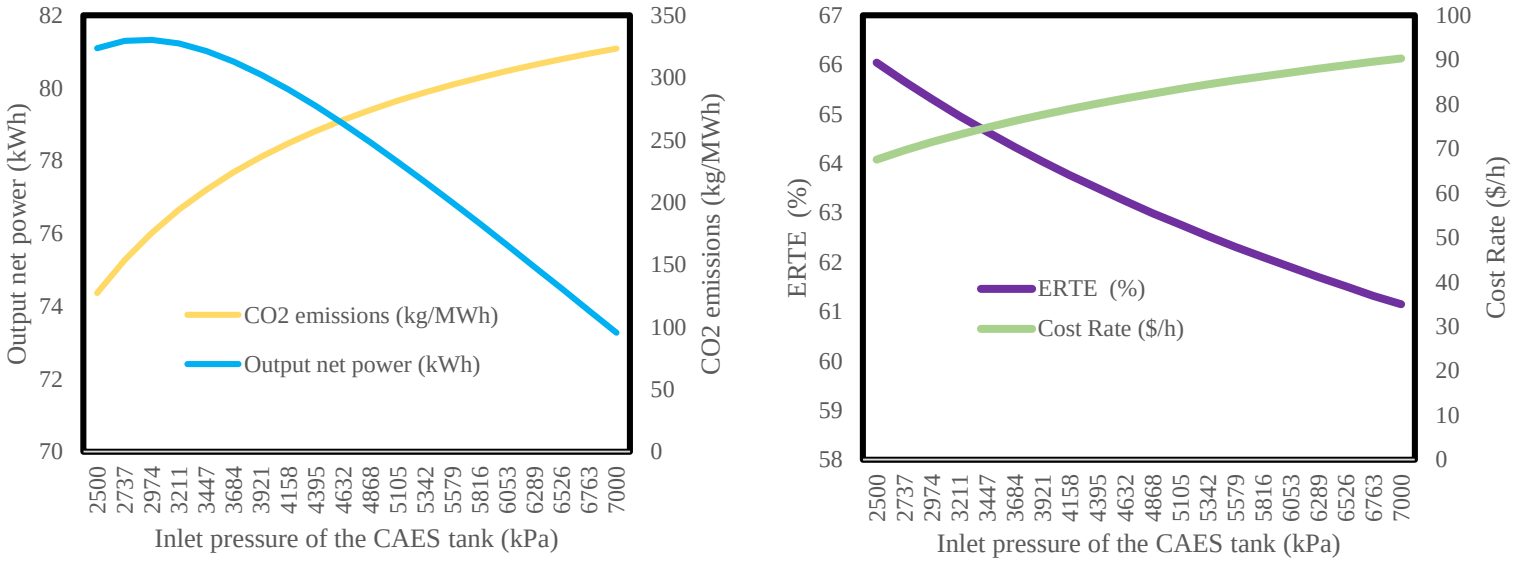
شکل ۴- بررسی تأثیر دمای ورودی به توربین گازی بر روی عملکرد سیستم

در این قسمت به مطالعه پارامتریک تأثیر افزایش فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، در محدود ۲۵۰۰ کیلوپاسکال تا ۷۰۰۰ کیلوپاسکال، بر روی عملکرد سیستم پرداخته می شود. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می شود که با افزایش فشار ورودی به ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، توان خالص کل سیستم کاهش‌یافته است و با توجه به کاهش توان کل سیستم، بازده اگزرژی (ERTE) سیستم نیز کاهش‌یافته است چراکه بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هم رابطه مستقیمی دارد.

با توجه به این‌که برق موردنیاز ذخیره ساز انرژی هوای فشرده تو سط توربین گازی تأمین می شود و با افزایش فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده، نیاز به استفاده از متان برای تولید برق بیش‌تر می‌شود، باعث افزایش انتشار CO_2 می‌شود. ازآن‌جایی‌که واحد CAES و توربین گازی جز تجهیزات گران‌قیمت محسوب می شوند با افزایش فشار ورودی به ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، میزان برق مصرفی کمپرسورها نیز افزایش می‌یابد که علاوه بر تأثیر منفی بر روی توان تولیدی کل سیستم باعث افزایش هزینه سیستم نیز می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-01-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

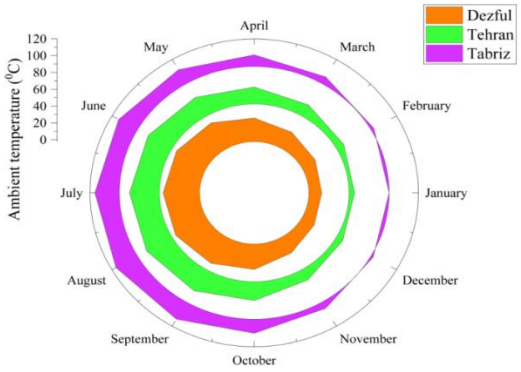


شکل ۵- بررسی تأثیر فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده بر روی عملکرد سیستم

۳-۲- مطالعه موردی

در این پژوهش با انتخاب سه شهر مختلف در کشور ایران به بررسی سیستم طراحی شده پرداخته می‌شود و نتایج جهت تحلیل و بررسی ارائه می‌شود. با توجه بهاین‌که تأثیر تغییرات دمای محیط بر روی عملکرد سیستم می‌تواند مؤثر باشد، به همین دلیل مناطق انتخابی جهت بررسی دارای شرایط آب و هوایی مختلف شامل سرد و گرم انتخاب شدند. شهرهای مورد بررسی در این پژوهش دزفول، تهران و تبریز انتخاب شد که دارای آب و هوای مختلفی هستند. تأثیر تغییرات دمای محیط شهرهای مطالعاتی بر روی عملکرد سیستم به‌صورت ماهیانه بررسی شده است. این بررسی برای محاسبه توان تولیدی، میانگین تغییرات ماهیانه ERTE، میانگین تغییرات ماهیانه نرخ هزینه و نرخ تولید هیدروژن انجام شد.

در شکل (۶) تغییرات میانگین دمای محیط ماهیانه در طول سال برای شهرهای مطالعاتی رسم شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تغییرات دمای محیط شهرهای مطالعاتی بین دمای ۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است و بیش‌ترین دمای محیط مربوط به فصل تابستان است. شهر دزفول جز گرم‌ترین شهرهای مطالعاتی محسوب می‌شوند و شهر تبریز جز شهرهای سرد محسوب می‌شوند. شهر تهران آب‌وهوایی معتدل و رو به سرد دارد و جز شهرهای معتدل محسوب می‌شود. بررسی تغییرات دمای محیط شهرها باعث امکان‌سنجی صحیح جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در دنیا می‌شود.

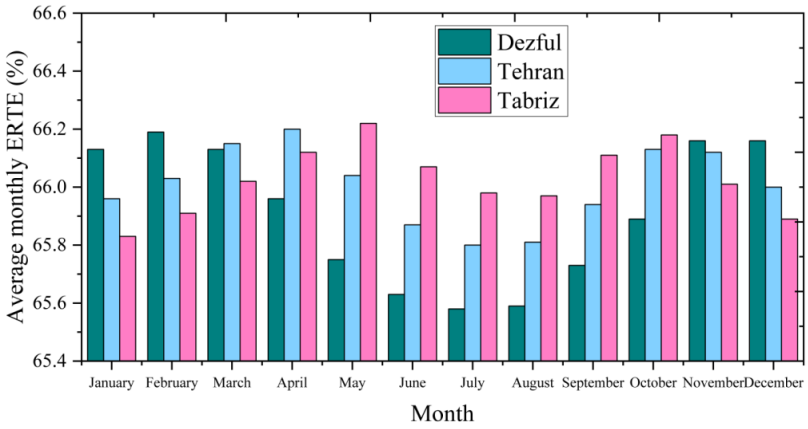


شکل ۶-تغییرات ماهیانه دمای محیط شهرهای مطالعاتی در طول یک سال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

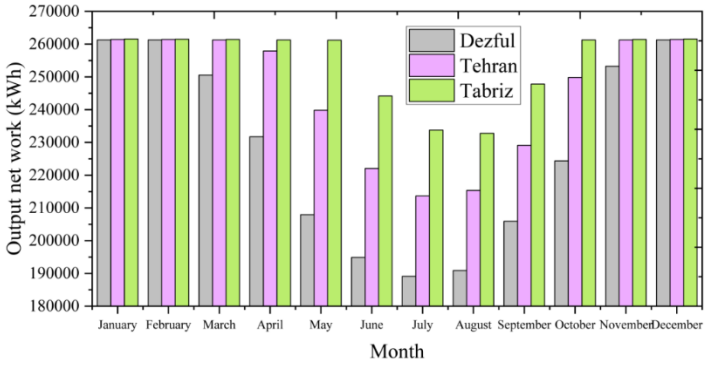
در این پژوهش تغییرات دمای محیط شهرها به‌صورت ماهیانه بر روی عملکرد سیستم بررسی شده است. در شکل (۷) تغییرات ERTE نسبت به تغییرات دمای محیط سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط بازده اگزرژی رفت‌وبرگشتی (ERTE) در ماه‌های گرم سال افزایش می‌یابد و در ماه‌های زمستان و پاییز کاهش می‌یابد. بهترین بازده مربوط به شهر تبریز است که دارای آب و هوای سردتری نسبت به سایر شهرها است. هم‌چنین نتایج نشان داد مناطق گرم خیز مانند شهر دزفول برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی مناسب نیست و مناطق معتدل و سرد برای راه‌اندازی سیستم مناسب است.



شکل ۷- تغییرات ماهیانه ERTE در یک سال

در شکل (۸) تغییرات توان خالص تولیدی کل سیستم نسبت به تغییرات دمای محیط سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد عملکرد توان تولیدی سیستم مشابه به بازده اگزرژی است و با هم رابطه مستقیم دارند. در سیستم پیشنهادی به دلیل وجود کمپرسورهای مصرف‌کننده برق، میزان تولید خالص سیستم در ماه‌های گرم کاهش پیدا کرده است. چراکه کمپرسورها، الکترولایزر غشای تبادل پروتون و پمپ توان موردنیاز خود را از توان تولیدی سیستم دریافت می‌کنند. بهترین عملکرد سیستم مربوط به شهرهای تبریز است که دارای آب و هوای سردتری نسبت به سایر شهرها است.

با افزایش دمای محیط در ماه‌های جولای و ژوئن میزان مصرف توان در کمپرسورها افزایش می‌یابد و به همین دلیل با افزایش توان مصرفی کمپرسورها در ماه‌های گرم سال باعث کاهش توان تولیدی کل سیستم و به دنبال آن هزینه‌های سیستم نیز می‌شود. توان مصرفی کمپرسورها از برق تولیدی توسط توربین گازی تأمین می‌شود و برق تولیدی توسط سیکل ارگانیک رانکین جهت تأمین توان مصرفی پمپ سیکل ارگانیک رانکین و برق مورد نیاز الکترولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید هیدروژن استفاده می‌شود.



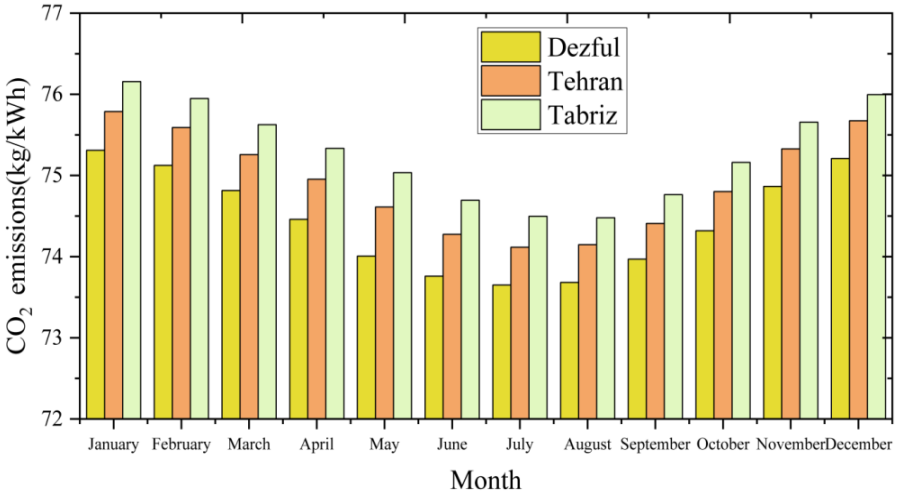
شکل ۸- تغییرات روزانه توان خالص تولیدی در یک سال

در شکل (۹) تغییرات انتشار CO_2 نسبت به تغییرات دمای محیط سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط میزان انتشار CO_2 کاهش‌یافته است و به عبارتی کم‌ترین مقدار انتشار آلودگی به ترتیب در ماه‌های تابستان، بهار، پاییز و زمستان است و باید گفت که افزایش یا کاهش انتشار CO_2 با مقدار توان تولیدی سیستم رابطه مستقیم دارد. میزان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

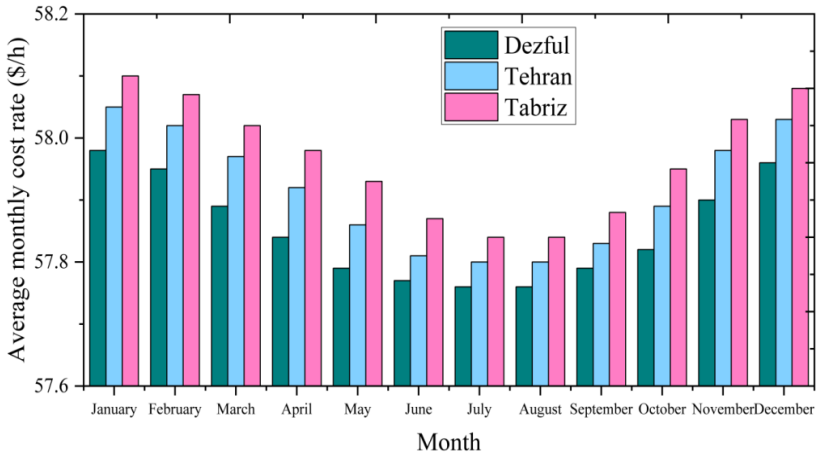
[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

انتشار CO_2 سیستم در شهرهای که دارای عملکرد بهتری بوده است و دارای حداکثر توان خالص تولیدی است، به بالاترین مقدار می‌رسد و در شهرهای کم پتانسیل، نرخ انتشار CO_2 کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات ماهیانه انتشار CO_2 در یک سال

در شکل (۱۰) تغییرات نرخ هزینه سیستم نسبت به تغییرات دمای محیط سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط و کاهش میزان توان تولیدی سیستم نرخ هزینه سیستم نیز به علت کاهش عملیات تعمیر و نگهداری در ماه‌های گرم سال کاهش می‌یابد و در ماه‌های سرد سال که توان خالص تولیدی سیستم افزایش می‌یابد، هزینه‌های سیستم نیز در حال افزایش هستند. هزینه با توان تولیدی رابطه مستقیم دارد، به همین دلیل در شهرهایی که سیستم از بازده بالاتری برخوردار است، نرخ هزینه نیز بالاتر است.



شکل ۱۰- تغییرات ماهیانه نرخ هزینه سیستم در یک سال

لازم به ذکر است توان مورد نیاز پمپ سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر غشای تبادل پروتون توسط توان تولیدی توربین سیکل ارگانیک رانکین تأمین می‌شود و با افزایش یا کاهش توان تولیدی توربین، میزان توان مصرفی پمپ و هم‌چنین عملکرد الکترولایزر برای تولید هیدروژن نیز رفتاری مشابه از خود به‌جای خواهد گذاشت.

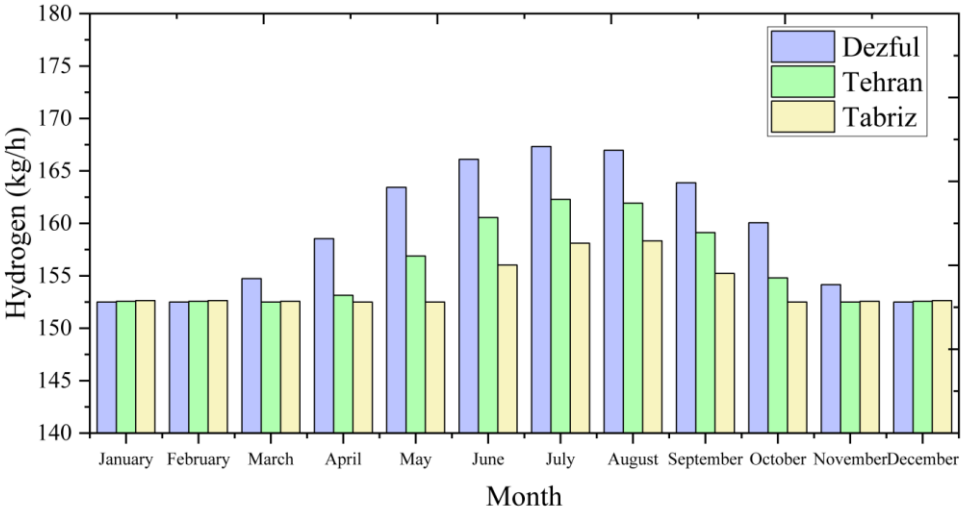
در شکل (۱۱) تغییرات روزانه مقدار هیدروژن تولیدی سیستم توسط الکترولایزر غشای تبادل پروتون نسبت به تغییرات دمای محیط سالانه نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط در ماه‌های جولای و ژوئن میزان هیدروژن تولیدی سیستم افزایش می‌یابد. توان مورد نیاز الکترولایزر توسط سیکل ارگانیک رانکین تأمین می‌شود و با افزایش یا کاهش توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین، مقدار هیدروژن تولیدی نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. افزایش دمای محیط بر روی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

عملکرد سیکل ارگانیک رانکین تأثیر مثبتی دارد و باعث افزایش حرارت اواپراتور برای تأمین انرژی سیکل می‌شود و در نتیجه به افزایش توان تولیدی سیکل ارگانیک رانکین و تولید هیدروژن منجر می‌شود. سوخت هیدروژنی سوختی پاک است که وقتی جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌شود آلودگی‌هایی که از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود را ندارد و فقط آب تولید می‌کند.

نتایج بررسی عملکرد سیستم در شهرهای مطالعاتی نشان داد سیستم به تغییرات آب و هوا واکنش نشان می‌دهد و بهترین منطقه برای راه‌اندازی سیستم مناطقی با آب‌وهوای سرد است و راه‌اندازی سیستم در مناطق گرم طبق بررسی انجام شده، توصیه نمی‌شود. به‌همین دلیل طبق بررسی‌ها بهترین شهر مطالعاتی، شهر تبریز انتخاب شد که دارای آب و هوای سردتری نسبت به سایر شهرها است. در جدول (۵) میزان توان تولیدی سیستم در ماه‌ها و فصل‌های بهترین شهر مطالعاتی (تبریز) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات ماهیانه هیدروژن تولیدی سیستم در طول یک سال

جدول ۵- عملکرد ماهیانه و فصلی سیستم در شهر تبریز

توان تولیدی کل	فصلی	ماهیانه	
۳۰۲۹,۸۵ مگاوات ساعت	بهار ۷۸۳,۹۸ مگاوات ساعت	فرودین	۲۶۱,۲۸ مگاوات ساعت
		اردیبهشت	۲۶۱,۱۸ مگاوات ساعت
		خرداد	۲۴۴,۱۵ مگاوات ساعت
	تابستان ۷۱۰,۷۱ مگاوات ساعت	تیر	۲۳۳,۷۸ مگاوات ساعت
		مرداد	۲۳۲,۷۷ مگاوات ساعت
		شهریور	۲۴۷,۸۲ مگاوات ساعت
	پاییز ۷۷۰,۵۴ مگاوات ساعت	مهر	۲۶۱,۲۸ مگاوات ساعت
		آبان	۲۶۱,۴۳ مگاوات ساعت
		آذر	۲۶۱,۵۷ مگاوات ساعت
	زمستان ۷۸۴,۶۵ مگاوات ساعت	دی	۲۶۱,۵۸ مگاوات ساعت
		بهمن	۲۶۱,۵۰ مگاوات ساعت
		اسفند	۲۶۱,۴۳ مگاوات ساعت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

۴- آنالیز زیست‌محیطی

در جدول (۶) مزیت‌های زیست‌محیطی سیستم طراحی شده توضیح داده می‌شود. به‌طور کلی ۰/۲۰۴ تن CO_2 در نیروگاه‌های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق تولید می‌شود و این انتشار باعث افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود [۳۰]. علاوه‌براین، با توجه به رابطه (۵)، انتشار یک تن CO_2 باعث هزینه زیست‌محیطی ۲۴ دلار می‌شود. در نتیجه با نصب سیستم پیشنهادی می‌توان در طول سال از هزینه‌های زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند که مجموع آن برابر گسترش فضای سبز و گیاهان است. در ضمن باید اشاره کرد که برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب ته‌نشینی در نظر گرفته شده است [۳۱].

$$\dot{C}_{Env} = \dot{C}_{CO2} + \dot{m}_{CO2} \quad (۵)$$

جدول ۶- آنالیز زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی

توان خالص تولیدی (MWh)	مقدار انتشار کربن دی اکسید ($tonCO_2/MWh$)	هزینه زیست محیطی ($/tonCO_2$)	هکتار
۳۰۴۹/۸۶	۶۲۲/۱۶	۱۴۹۳۲/۰۶	۳

۵- مصرف برق سالانه برای یک نفر

تجزیه و تحلیل ساعتی توان تولیدی سیستم پیشنهادی برای تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز برای یک نفر در جهان بررسی شده است. در جدول (۷)، نتایج حاصل از تولید انرژی الکتریکی نیروگاه مورد بررسی برای تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز برای هر فرد در شهرهای مطالعاتی محاسبه شده است [۳۲].

جدول ۷- برق مورد نیاز برای یک نفر در شهرهای مطالعاتی

شهر	برق تولیدی سیستم *(kWh/per year)*	برق مورد نیاز یک نفر در طول سال *(kwh/peryear)*	تعداد افراد
دزفول	۲۷۳۲۵۴۴	۳۰۷۲	۸۸۹
تهران	۲۹۳۴۵۷۶	۳۰۷۲	۹۵۵
تبریز	۳۰۴۹۸۴۸	۳۰۷۲	۹۹۲

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم جدید تولید هم‌زمان هیدروژن و برق پرداخته شد. با استفاده از ترکیبی واحدهای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و الکترولایزر غشای تبادل پروتون و هم‌چنین استفاده از ترکیب سوخت متان و هیدروژن برای تأمین انرژی موردی نیاز سیکل برایتون اصلاح‌شده یک سیستم جدید طراحی شد. جهت مدل‌سازی سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی (EES) استفاده شد.

خلاصه نتایج این پژوهش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- مطالعه پارامتریک نشان داد که دمای ورودی به توربین گازی و فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده از تأثیرگذارترین پارامترها بر روی عملکرد سیستم است.
- یک مطالعه موردی جهت راه‌اندازی سیستم نسبت به تغییرات آب و هوایی شهرهای تبریز، دزفول و تهران در ایران انجام شد.
- نتایج نشان داد سیستم در شهرهایی با آب و هوای متعادل و رو به سرد بهتر عمل می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

- نتایج نشان داد با افزایش دمای محیط و هم‌چنین راه‌اندازی سیستم در شهرهای گرم، عملکرد سیستم کم می‌شود.
- نتایج نشان داد با راه‌اندازی سیستم در شهر تبریز می‌توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در طول سال کم کرد.
- آنالیز بار مصرفی موردنیاز یک نفر در طول سال در شهر تبریز نشان داد که سیستم می‌توان برق مورد نیاز ۸۸۹ نفر را در طول سال تأمین کند.

مراجع

[1] A., Shrestha, A.A., Mustafa, M.M., Htike, V., You, M., Kakinaka, Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy, Renewable Energy 199 (2022) 419-432.
[2] C., Wang, M., Xia, P., Wang, J., Xu, Renewable energy output, energy efficiency and cleaner energy: Evidence from non-parametric approach for emerging seven economies, Renewable Energy 198 (2022) 91-99.
[3] G., Hailu, 8-Energy systems in buildings. Energy Services Fundamentals and Financing, Academic Press (2021) 181-209.
[4] D., Sonar, Chapter 4-Renewable energy based trigeneration systems-technologies, challenges and opportunities, Renewable-Energy-Driven Future. J. Ren, Academic Press, (2021) 125-168.
[5] D., Dadpour, M., Deymi-Dashtebayaz, A., Hoseini-Modaghegh, M., Abbaszadeh-Bajgiran, S., Soltaniyan, E., Tayyeban, Proposing a new method for waste heat recovery from the internal combustion engine for the double-effect direct-fired absorption chiller, Applied Thermal Engineering 216 (2022) 119114.
[6] E., Assareh, M., Jafari, S., Keykhah, M., Lee, Transient thermodynamic modeling and economic assessment of cogeneration system based on compressed air energy storage and multi-effect desalination, Journal of Energy Storage 55 (2022) 105683.
[7] E., Assareh, M., Delpisheh, S.M., Alirahmi, S., Tafi, M., Carvalho, Thermodynamic-economic optimization of a solar-powered combined energy system with desalination for electricity and freshwater production, Smart Energy 5 (2022) 100062.
[8] O., Rejeb, S.M., Alirahmi, E., Assareh, M., El Haj Assad, A., Jemni, M., Bettayeb, C., Ghenai, Innovative integrated solar powered polygeneration system for green Hydrogen, Oxygen, electricity and heat production, Energy Conversion and Management 269 (2022) 116073.
[9] M., Rostami, M., Dehghan Manshadi, E., Afshari, 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.
[10] X., Liu, G., Hu, Z., Zeng, Potential of biomass processing using digester in arrangement with a Brayton cycle, a Kalina cycle, and a multi-effect desalination; thermodynamic/environmental/financial study and MOPSO-based optimization, Energy 261 (2022) 125222.
[11] N., Nedaei, S., Azizi, L., Garousi Farshi, Performance assessment and multi-objective optimization of a multi-generation system based on solar tower power: A case study in Dubai, UAE, Process Safety and Environmental Protection 161 (2022) 295-315.
[12] A., Dezhdar, S.S., Mosaviasl, E., Farhadi, S., Keykhah, M., Nedaei, Performance improvement of a flash-binary geothermal power system using zeotropic working fluid; A comprehensive exergoeconomic analysis and optimization, Advances in Engineering and Intelligence Systems 002(01) (2023) 86-164.
[13] A., Keykhah, M.,Nedaei, B., Kamary, E., Assareh, 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) (2023) 61-57.
[14] R., Carapellucci, L., Giordano, Regenerative gas turbines and steam injection for repowering combined cycle power plants: Design and part-load performance, Energy Conversion and Management, Volume 227 (2021) 113519.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

[15] M.M., Soltani, P., Ahmadi, M., Ashjaee, Techno-economic optimization of a biomass gasification energy system with Supercritical CO_2 cycle for hydrogen fuel and electricity production, Fuel 333 (2023) 126264.
[16] A., Dehdar, E., Assareh, N., Agarwal, A., Bedakhanian, S., Keykhah, G., Yeganeh fard, N., Zadsar, Aghajari, M., Lee, M., 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 (2023) 512-537.
[17] A.R., Razmi, M., Soltani, A., Ardehali, K., Gharali, M.B., Dusseault, J., Nathwani, Design, thermodynamic, and wind assessments of a compressed air energy storage (CAES) integrated with two adjacent wind farms: A case study at Abhar and Kahak sites, Iran, Energy Volume 221 (2021) 119902.
[18] S.M., Alirahmi, S., Bashiri Mousavi, A.R., Razmi, P., Ahmadi, 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, Volume 236 (2021) 114053.
[19] S., Kim, M.S., Kima, M., Kim, Parametric study and optimization of closed Brayton power cycle considering the charge amount of working fluid, Energy, Volume 198 (2020) 117353.
[20] B., Zhang, Y., Chen, Z., Wang, H., Shakibi, Thermodynamic, environmental, and optimization of a new power generation system driven by a gas turbine cycle, Energy Reports, Volume 6 (2020) 2531-2548.
[21] A., Razmi, M., Janbaz, Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES), Energy Conversion and Management, Volume 204 (2020) 112320.
[22] A.R., Razmi, S.M., M.H., Alirahmi, E., Nabat, Assareh, M., Shahbakhti, A green hydrogen energy storage concept based on parabolic trough collector and proton exchange membrane electrolyzer/fuel cell: Thermodynamic and exergoeconomic analyses with multi-objective optimization, International Journal of Hydrogen Energy 47(62) (2022) 26468-26489.
[23] I., Dincer, M.A., Rosen, P., Ahmadi, Optimization of energy systems. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd (2017).
[24] A.R., Razmi, M., Janbaz, Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES). Energy Convers Manage, 204 (2020) 112320.
[25] M., Soltani, M.H., Nabat, A.R., Razmi, M.B., Dusseault, J., Nathwani, A comparative study between ORC and Kalina based waste heat recovery cycles applied to a green compressed air energy storage (CAES) system, Energy Convers Manage 222 (2020) 113203, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113203.
[26] S.M., Alirahmi, E., Assareh, Energy, exergy, and exergoeconomics (3E) analysis and multi-objective optimization of a multi-generation energy system for day and night time power generation-Case study: Dezful city, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 56, (2020) 31555-31573, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.160.
[27] A., Dezhdar, E., Assareh, 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) (2020) 81-94.
[28] E., Assareh, K., Karimi birgani, S., Keykhah, A., Ershadi, M., Lee, An integrated system for producing electricity and fresh water from a new gas-fired power plant and a concentrated solar power plant – Case study – (Australia, Spain, South Korea, Iran, Renewable Energy Focus 44 (2023) 19-39.
[29] T., Ioroi, K., Yasuda, Z., Siroma, N., Fujiwara, Y., Miyazaki, Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells, J Power Sources; 112 (2002) 583–7.
[30] T., Kroegera, F.J., Escobedob, J.H., Hernandezc, S., Varelab, S., Delphinb, J.R.B., Fishera, Waldrond, J., Reforestation as a novel abatement and compliance measure for ground-level ozone, 111 (2014) (40), https://doi.org/10.1073/pnas.1409785111.
[31] https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors- updated 28 July (2020).
[32] https://www.eia.gov/.S. Energy Information Administration 1000 Independence Ave., SW Washington, DC 20585/ electricity consumption.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]

Energy, exergy, economic and environmental analysis of an energy production system based on a combination of compressed air energy storage, hot and cold storage, electrolyzer and organic Rankine cycle

Ardeshir Qalavand, Ali Ershadi*, Ehsanolah Assaerh

Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: Aug. 2024 Accepted: Nov. 2024

Abstract

In this research, the energy, exergy, economic, and environmental analysis of a new hydrogen and electricity production system was discussed. A new system was designed by using the combination of compressed air energy storage units and proton exchange membrane electrolyzer, as well as using the combination of methane and hydrogen fuel to provide the necessary energy required for the modified Brayton cycle. To model the system, thermodynamic software for solving engineering equations was used. R123 organic fluid was used in the Rankine cycle. The parametric study showed that the inlet temperature of the gas turbine and the inlet pressure of the compressed air energy storage are among the most influential parameters on the system performance. The performance of the system was investigated in the three cities of Dezful, Tehran, and Tabriz. The results showed that changes in ambient temperature have an effect on the performance of the system and the system works better in cities with cold weather than in hot cities. The analysis of the consumption load required by one person throughout the year in Tabriz City showed that the system can supply the electricity required by 889 people throughout the year.

Key words: Multi energy production system, compressed air energy storage, proton exchange membrane electrolyzer

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2024.3.471]