J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 3, 2023: 97-125

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۳، پائیز۱۴۰۲، ص: ۱۲۵-۹۷

مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی تأمین منابع انرژی با ترکیب پیل سوختی با نرم‌افزار ترنسیس-مطالعه موردی بندرانزلی

علی دژدار[۱]، احسان اله عصاره[۱*]، علی ارشادی[۱*]

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

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۲

چکیده

در پژوهش حاضر به آنالیز یک سیستم تجدید پذیر مبتنی بر انرژی بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی با ترکیبی هدفمند از واحدهای پیل سوختی، پمپ حرارتی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون، توربین بخار و اسمز معکوس پرداخته شد. مدل‌سازی و شبیه‌سازی گذرا سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام شد. این سیستم برای تأمین نیازهای یک مجتمع مسکونی ۸۰ واحد مسکونی و ۳۲۰ نفر به انرژی الکتریکی، سرمایش و گرمایش طراحی و بررسی شد. یک بررسی موردی جهت امکان‌سنجی راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر ساحلی بندرانزلی در کشور ایران انجام شد. بهینه‌سازی عملکرد سیستم با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عمر سیستم با روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد. پنج پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم شامل تعداد توربین بادی، تعداد پنل خورشیدی، ظرفیت پیل سوختی، ظرفیت توربین بخار و ظرفیت الکترولایزر غشای تبادل پروتون به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شدند. سیستم در بهینه‌ترین حالت خود می‌تواند به توان تولیدی ۳۰۳۶۱۰۵,۰۲۲ کیلووات ساعت و هزینه چرخه عمر ۷۸۱۹۴۴,۲۵۴ دلاری برسد. نتایج زیست‌محیطی نشان داد که با راه‌اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان ۳۰۳۶,۱ مگاوات سالیانه می‌توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد و به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید به میزان ۶۱۹,۳۶ تن کربن دی‌اکسید با هزینه ۱۴۸۶۴,۷۴ دلار کمک کرد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** assareh@iaud.ac.ir, ali.ershadi@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی، زمین‌گرمایی، پیل سوختی، پمپ حرارتی، بهینه‌سازی چندهدفه، TRNSYS.

نحوه استناد به این مقاله: علی دژدار، احسان اله عصاره، علی ارشادی، احمد. مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی تأمین منابع انرژی با ترکیب پیل سوختی با نرم‌افزار ترنسیس-مطالعه موردی بندرانزلی
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۳) : ۱۲۵-۹۷

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

۱- مقدمه

در دنیای امروز با توجه به محدود بودن منابع سوخت فسیلی ساختمان‌ها صنایع و دیگر ارگان‌ها به سمت استفاده از دیگر انرژی‌های موجود در زمین مانند انرژی بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی حرکت نموده‌اند. نیروگاه‌های تجدید پذیر [۱] با برآیند مصرف انرژی فسیلی صفر و آلاینده کربن صفر سالیانه است که جز نیروگاه‌های پاک محسوب می‌شوند. یک نیروگاه بادی و خورشیدی مجموعه‌ای از چندین توربین بادی و پنل های خورشیدی است که در یک مکان قرار گرفته‌اند که هدف نیروگاه‌های تجدید پذیر [۲] تولید انرژی پاک است. همچنین می‌توان با استفاده از برق تولیدی نیروگاه‌های تجدید پذیر و تأمین انرژی برقی واحدهایی مانند پمپ حرارتی، اسمز معکوس و الکترولایزر غشای تبادل پروتون به تولید گرمایش، سرمایش، آب شیرین، اکسیژن و هیدروژن ناحیه‌ای اقدام کرد. نیروگاه‌های فسیلی که دارای آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی هستند، بخش اصلی انرژی جهان را تأمین می‌کند و امروزه به علت استفاده زیاد، منابع فسیلی در حال کاهش هستند و باید جایگزین مناسبی برای منابع فسیلی پیدا کرد. با توجه به پتانسیل بالای انرژی‌های تجدید پذیر از جمله سه انرژی خورشیدی و بادی و زمین‌گرمایی در جهان، باید توجه بیشتری بر روی به‌کارگیری و جایگزین کردن این منابع پاک به‌جای منابع فسیلی شود. [۳ و ۴].

جباری و همکاران در سال ۲۰۲۰، به طراحی یک سیستم جدید متشکل از اسمز معکوس ادغام شده با پنل فتوولتائیک پرداختند. روش شبکه عصبی و هوش مصنوعی برای ارزیابی اهمیت پارامترهای طراحی در پیش‌بینی مدل و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها دنبال شد و نتایج نشان داد که ۱ متر مکعب در روز آب آشامیدنی ممکن است توسط پنل‌های خورشیدی با حداکثر توان خروجی ۲۸۰ وات و اندازه باتری ۹,۲۲ کیلووات ساعت تولید شود [۵]. خان محمدی و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی سیستم فتوولتائیک-حرارتی برای تولید برق، گرمایش و آب آشامیدنی پرداختند؛ و عملکرد سیستم با استفاده از داده های آب و هوایی شهرهای دوحه، استکهلم و تهران مورد بررسی قرار گرفت. مجموع توان خالص سالانه برای سیستم‌های شهرهای تهران، دوحه و استکهلم به‌ترتیب برابر با ۵۸۸/۰۹، ۱۲۵۵۶/۳۵ و ۲۶۵۶/۸۳ کیلووات بوده که دبی جرمی ۴۰ کیلوگرم برساعت است [۶]. سلامه و همکاران در سال ۲۰۲۲، یک سیستم خنک‌کننده جذبی-چیلرجذبی مبتنی بر انرژی را برای شرایط آب و هوایی امارات متحده عربی بررسی کردند. زاویه شیب بهینه و مساحت کلکتور لوله خلا، حجم مخزن ذخیره آب گرم و کسر خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم بهینه، هزینه‌ها را تا ۵۶,۸ درصد در مقایسه با سیستم فشرده‌سازی بخار معمولی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، سیستم آن‌ها مصرف انرژی و ردپای کربن را به ترتیب ۹۱,۵ و ۹۱,۳ درصد کاهش داد [۷]. عصاره و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی عملکرد سیستم تجدید پذیر تولید سرمایش، گرمایش و نیرو پرداختند و از دو انرژی خورشیدی و زمین‌گرمایی استفاده کردند. تعداد پانل های فتوولتائیک، ظرفیت توربین بخار، توان پیل سوختی، ظرفیت گرمایش پمپ حرارتی و ظرفیت سرمایش چیلر جذبی به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. ادغام اجزای ذخیره‌سازی باتری و هیدروژن در سیستم پیشنهادی حداکثر بازده ۹۰٪، ۶۰٪، ۲۳٪ و ۱۸٪ را برای الکترولیز، سلول سوختی، پنل فتوولتائیک و ژنراتور الکتریکی به دست می‌آید [۸]. عصاره و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی سیستم تجدید پذیر تولید سرمایش، گرمایش و برق برای یک جامعه آپارتمانی پرداختند. سیستم متشکل از پنل فتوولتائیک/حرارتی، توربین بادی، پیل سوختی، پمپ حرارتی، باتری و مخزن ذخیره هیدروژن تشکیل شد. نتایج نشان داد که زیرسیستم پیل سوختی، پنل فتوولتائیک و توربین بادی با حداکثر توان ۷۵ کیلووات، ۵۲ کیلووات و ۲۴ کیلووات بیشترین سهم را در تولید برق دارند.[۹].

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

سوری و همکاران در سال ۲۰۲۱، به بررسی تأثیر حرارتی شرایط آب و هوایی شهر مطالعاتی در مراکش بر نیازهای انرژی ساختمان پرداختند. تأثیر نسبت ابعاد بر دمای سطوح ساختمان و تابش جذب شده توسط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جذب تشعشع بیشتری در نمای ساختمان در دره‌های خیابانی نسبت به ساختمان‌های مستقل وجود دارد. این اثرات منجر به دمای سطح بالاتر در دره‌های خیابانی می‌شود و در نتیجه نیاز به انرژی خنک‌کننده در تابستان افزایش می‌یابد و نیاز به انرژی گرمایشی در زمستان کاهش می‌یابد [۱۰]. چن و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم گرمایش هیبریدی خورشیدی و بیوگاز متمرکز برای مناطق روستایی پرداختند. راندمان انرژی سیستم گرمایش هیبریدی بسیار بالاتر از راندمان اگزرژی است و بازده انرژی ۲۹,۷ درصد و راندمان اگزرژی ۴,۵ درصد گزارش شد. از نظر تلفات اگزرژی در سیستم، کلکتور خورشیدی و دیگ بیوگاز عوامل اصلی این تلفات بودند [۱۱]. بامیسلیه و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی جدید زمین‌گرمایی-خورشیدی-بادی برای تولید انرژی پاک پرداختند. بازده انرژی و اگزرژی کلی سیستم ۴۸,۶۱ درصد و ۸۸,۳۱ درصد است و این بازده می‌تواند به ترتیب به ۵۱,۷۶ درصد و ۹۵,۰۸ درصد برسد که سیستم با توجه به بازده اگزرژی بهینه شود [۲۵]. کائو و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی سیستم انرژی متصل به شبکه زمین‌گرمایی- خورشیدی پرداختند. اجزا این سیستم پنل های خورشیدی، مخازن ذخیره انرژی حرارتی، یک توربین، یک چیلر جذبی و یک پمپ حرارتی بود. نتایج نشان داد که سیستم علاوه بر تأمین نیاز تقاضای الکتریکی سالانه خود، می‌تواند مقدار زیادی توان نیز تولید کند که برای جبران هزینه‌های سیستم می‌توان آن را به شبکه برق سراسری فروخت [۱۲]. دزفولی و همکاران در سال ۲۰۲۲، به تجزیه سیستم‌خنک‌کننده -خشک‌کن خورشیدی برای ساختمان‌هایی در مناطق گرمسیری پرداختند. چگونگی عملکرد یک واحد فن کویل، سه سیستم خنک‌کننده خشک‌کن خورشیدی در یک اتاق با بار بالا مورد مقایسه قرار گرفت. سیستم خنک‌کننده خشک‌کننده خورشیدی با ۱۷,۳ درصد توانایی صرفه‌جویی در انرژی را برای ساختمان‌هایی با بار بالا دارد. سیستم خنک‌کننده خشک‌کننده خورشیدی دو مرحله‌ای در حالت‌های تهویه و چرخش مجدد ۲۷,۹ درصد و ۳۳,۹ درصد صرفه‌جویی در انرژی را ثبت کردند [۱۳]. دژدار و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم تجدید پذیر مبتنی بر انرژی خورشید و باد برای تولید انرژی پرداختند. تحلیل عملکرد شش شهر اصفهان، زنجان، بندر انزلی، اهواز، بندرعباس و تبریز برای تعیین محل قرارگیری نیروگاه پیشنهادی انجام شد. ترکیب واحدهای هیدروژن و ذخیره باتری تغییرات عرضه و تقاضا را کاهش داده و انرژی ذخیره شده را در طول افت تولید به درستی تثبیت می‌کند. هزینه چرخه عمر ۶۷۴۲۷۸,۴ دلار در ساعت و ظرفیت تولید ۲۲۵۶۹۴,۸ کیلووات ساعت گزارش شد [۱۴]. پریتو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی ادغام یک سیستم گرمایش و سرمایش با انرژی حرارتی خورشیدی و زیست‌توده برای یک گلخانه در آب‌وهوای مدیترانه‌ای پرداختند. در این مطالعه، سیستمی مبتنی بر انرژی حرارتی خورشیدی، زیست‌توده و یک چیلر جذبی با هوا خنک ارائه شد که برای کنترل دمای گلخانه برای تولید گوجه‌فرنگی در آب‌وهوای مدیترانه‌ای یکپارچه شد [۱۵]. دزفولی و همکاران در سال ۲۰۲۲، به تجزیه - تحلیل انرژی و عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده -خشک‌کن خورشیدی برای ساختمان‌هایی در مناطق گرمسیری پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که سیستم خنک‌کننده خشک‌کننده خورشیدی با ۱۷,۳ درصد توانایی صرفه‌جویی در انرژی را برای ساختمان‌هایی با بار بالا دارد [۱۶]. کاویان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی اگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی و بهینه‌سازی یک سیستم پمپ حرارتی هیبریدی فتوولتائیک- زمین‌گرمایی پرداختند. در این تحقیق طرح‌های مختلفی از سیستم پمپ حرارتی هیبریدی فتوولتائیک – زمین‌گرمایی مورد مطالعه قرار گرفت تا بتواند نیازهای بار گرمایشی و سرمایشی

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

یک ساختمان مسکونی را در طول سال تأمین کند [۱۷]. سالیم و همکاران در سال ۲۰۲۰، بر روی طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم هیبریدی برای تولید خورشیدی-هیدروژن که شامل پنل فتوولتائیک، الکترولایزر، سلول سوختی، باتری. واحد ذخیره‌سازی هیدروژن کار کردند و شبیه‌سازی یک آبگرمکن خورشیدی با یک جمع کننده لوله شیشه‌ای تخلیه شده انجام شد [۱۸]. اوزترک و دینسر در سال ۲۰۲۲، به توسعه سیستم و ارزیابی یک سیستم ترکیبی تولید هیدروژن پرداختند. در این مطالعه، یک سیستم یکپارچه میتنی بر انرژی خورشیدی، امواج دریا و بادی برای تولید هیدروژن تجدید پذیر و ترکیب آن با گاز طبیعی به طور بالقوه موجود در دریای سیاه برای استفاده طراحی و مطالعه شد و یک مطالعه موردی در این راستا برای شهر زونگلدک در کشور ترکیه در نظر گرفته شد [۱۹]. هاشمیان و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک ارزیابی به همراه بهینه‌سازی چند هدفه بر روی یک سیستم تجدید پذیر ترکیبی مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست‌توده انجام دادند. اهداف طراحی این سیستم تولید برق، گرمایشی، خنک‌کننده، تولید هیدروژن و آب آشامیدنی بود [۲۰]. مشرواتی و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بهینه‌سازی چندهدفه گازی‌سازی زیست‌توده برای تولید برق و آب شیرین‌شده با استفاده از بهینه‌ساز گرگ خاکستری و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. اجزای اصلی این نیروگاه شامل یک گاز ساز، یک کمپرسور، یک مبدل حرارتی، یک توربین گاز، یک محفظه احتراق و یک واحد نمک‌زدایی چند اثر با فشرده‌سازی بخار حرارتی است [۲۱].

در این مطالعه به بررسی ترمودینامیکی، اقتصادی، بهینه‌سازی و تحلیل منطقه‌ای یک سیستم تولید برق، هیدروژن، اکسیژن، سرمایش و گرمایش و گرمایش با استفاده ترکیبی از مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی و انرژی زمین‌گرمایی متشکل از تعدادی توربین بادی، پنل خورشیدی، توربین بخار و پیل سوختی برای افزایش تولید برق، الکترولایزر غشای تبادل پروتون برای تولید هیدروژن و استفاده از واحد پمپ حرارتی برای تولید گرمایش و سرمایش و همچنین اسمز معکوس برای تولید آب شیرین پرداخته شده است. ترکیب اجزا و واحدهایی که در این سیستم استفاده می‌شود برای اولین بار انجام می‌شود. جهت بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی یک مطالعه موردی برای مناطق مختلف که دارای پتانسیل بالایی از سرعت باد، خورشید و زمین‌گرمایی باشند، انجام می‌شود. لازم به ذکر است عملکرد سیستم در بهینه‌ترین و بهترین حالت خود که توسط بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت محاسبه می‌شود، بررسی می‌شود. هدف و نوآوری این مطالعه تولید محصولات پاک توسط سیستم پیشنهادی است. برای مدل‌سازی و به دست آوردن نتایج نرم‌افزار ترمودینامیکی از نرم‌افزار شبیه‌سازی گذرای ترنسیس استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه این سیستم به‌عنوان یک نیروگاه می‌تواند در آینده کمک بزرگی به صنعت کند، تأثیر پارامترهای آب و هوایی شامل دمای محیط، شدت تابش خورشیدی و سرعت باد نیز بر روی عملکرد سیستم سنجیده می‌شود و عملکرد سیستم در شهر ساحلی بندرانزلی با در نظر داشتن پتانسیل بالای سه انرژی تجدید پذیر پیشنهادی بررسی می‌شود. در نهایت میزان برق تولیدی سیستم توسط توربین بادی، پنل خورشیدی، توربین بخار و پیل سوختی برای تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان‌های مسکونی در طول سال بررسی خواهد شد.

به طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

- استفاده از سه انرژی پرپتانسیل خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی برای راه‌اندازی یک نیروگاه تجدید پذیر تولید چندگانه انرژی.
- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی، پیل سوختی، الکترولایزر غشای تبادل،

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

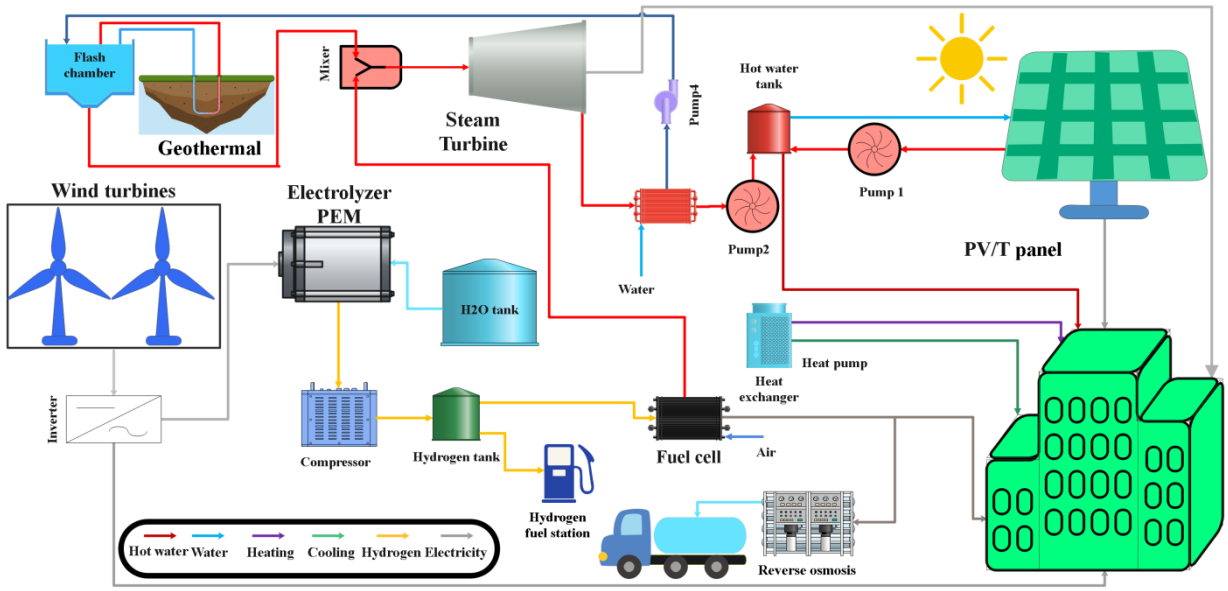
پمپ حرارتی، اسمز معکوس و توربین بخار با هدف حداکثر تولید و هزینه مناسب

- استفاده از واحد تولید برق پیل سوختی برای تأمین نیازهای الکتریکی در زمان پیک مصرف ساختمان و زمانی که انرژی ای تجدید پذیر در دسترس نیست.
- ترکیب استفاده هم‌زمان از دو نرم‌افزار ترنسیس و دیزاین اکسپرت جهت شبیه‌سازی گذرا و بهینه‌سازی چندهدفه
- بهینه‌سازی چندهدفه سیستم با روش سطح پاسخ.
- ارائه یک تحلیل حساسیت برای ارزیابی تأثیر متغیرهای طراحی بر عملکرد سیستم
- بررسی عملکرد فنی و اقتصادی سیستم در شهر بندر انزلی.
-

۲-شرح سیستم

در شکل ۱ شماتیک پیشنهادی که بر مبنای انرژی تجدید پذیر نشان داده شده است. سیستم پیشنهادی بر پایه استفاده از سه انرژی تجدید پذیر خورشیدی، زمین‌گرمایی و انرژی بادی طراحی شد. اجزای اصلی سیستم شامل پنل خورشیدی، توربین‌های بادی، پمپ حرارتی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون، پیل سوختی، واحد نمک‌زدایی اسمز معکوس، مخزن ذخیره آب گرم، توربین بخار، کمپرسور، کندانسور، پمپ، مخزن هیدروژن است. پنل خورشیدی در طول روز و زمانی که از خورشید بهره می‌گیرند دو وظیفه تولید برق و تولید آب گرم را بر عهده دارند. آب گرم تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی بسته به محل به‌کارگیری آن‌ها متفاوت است اما در هر صورت دمای آب را به میزان لازم برای مصارف خانگی بالا نمی‌برند، ولی توان پیش گرم کردن آب را دارند. آب گرم تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی به مخزن ذخیره آب گرم منتقل می‌گردد که در آنجا توسط هیترهای برقی به دمای مورد نیاز برای مصرف برسد. یل سوختی به‌عنوان پشتیبان سیستم پیشنهادی نقش بسیار مهمی در پایدار نمودن توان تولیدی مورد نیاز واحدهای مسکونی و همچنین تولید آب گرم در زمانی که سیستم خورشیدی فعال نیست را بر عهده دارد. عملکرد پیل سوختی به گونه‌ای است که در زمان‌هایی که تولید برق و آب گرم کاهش می‌یابد به کمک سیستم می‌آید. جریان آب گرم تولیدی پیل سوختی مستقیماً به مخزن ذخیره آب گرم متصل است. پمپ حرارتی در سیستم پیشنهادی وظیفه تأمین سرمایش و گرمایش را برعهده دارد و با توجه به نیاز واحدهای مسکونی ظرفیت یا تعداد آن تعیین می‌گردد. واحد اسمز معکوس توان مورد نیاز خود را از برق تولیدی سیستم می‌گیرند.

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

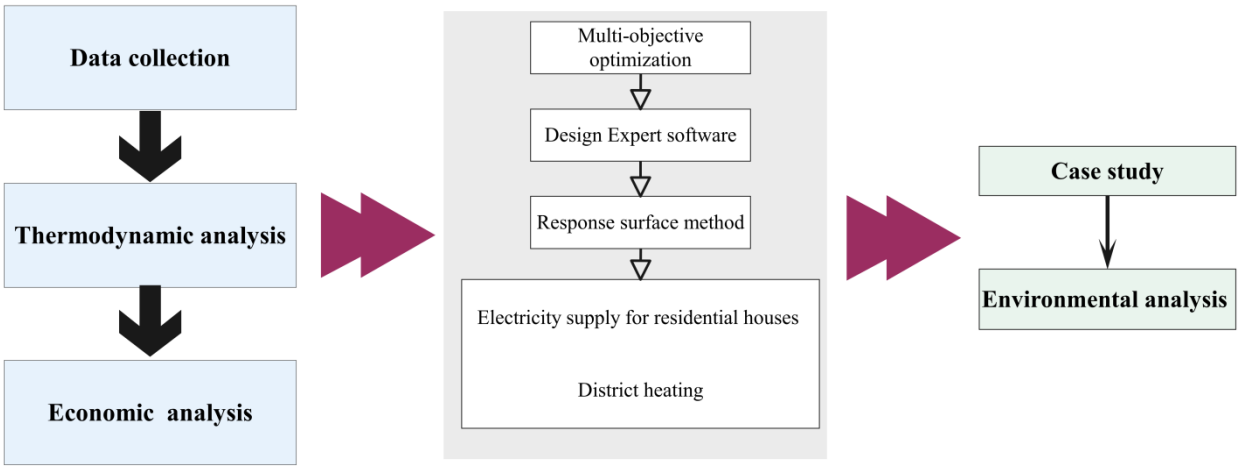


شکل ۱- شماتیک سیستم.

۳-روش شناسی پژوهش

فلوچارت روش حل پژوهش در شکل ۲ معرفی شده است.

- شبیه‌سازی گذرا سیستم با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام می‌شود.
- داده های آب و هوایی شهرهای مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار متانورم به دست امده است.
- بهینه‌سازی چندهدفه برای محاسبه بهترین مقدار برای توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام می‌شود.
- گزارش ساعتی عملکرد سیستم در شهر بندرانزلی.

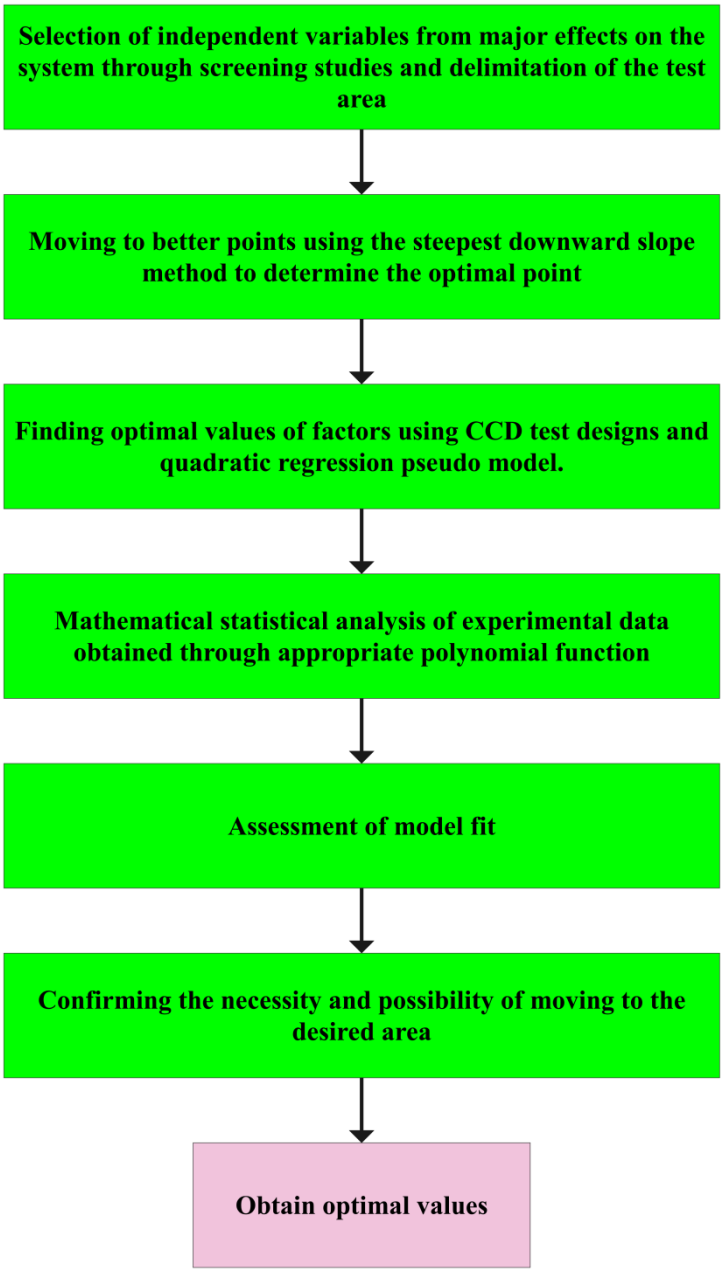


شکل ۲- فلوچارت روش حل

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

۴-روش بهینه‌سازی سطح پاسخ

بهینه‌سازی چند هدفه این پژوهش با روش سطح پاسخ و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام می‌شود که در نهایت به معرفی بهینه‌ترین مقادیر برای توابع هدف و متغیرهای بهینه‌سازی می‌پردازد [۲۲، ۲۳]. در شکل ۳ فلوچارت روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی عملکرد سیستم ارائه شده است.



شکل ۳- فلوچارت روش RSM.

۵-آنالیز ترمودینامیکی سیستم

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام شده است. جهت بیان ریاضی و بررسی کارکرد اجزا مورد استفاده در ادامه روابط حاکم بر مسئله در جدول ۱ بیان شده است.

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

جدول ۱- روابط حاکم بر مسئله [۲۴-۳۳].

تجهیز	رابطه
الکتریسیته تولید شده توسط این پنل خورشیدی	$E_{PV/T}=(\tau\alpha)_n \cdot IAM \cdot G_T \cdot A \cdot \eta_{PV/T}$
دمای خروجی سیال از پنل خورشیدی	$T_{f,out}=\left(T_{f,in}+\frac{\varepsilon_m}{\kappa}\right)\exp\left(\frac{N_{tubes}\,\kappa}{\dot{m}_f c_f}\frac{}{\theta}L\right)-\frac{\varepsilon_m}{\kappa}$
ولتاژ پیل سوختی	$U_{cell}=\frac{U_{mod}}{n_{c,ser}}$
توان خروجی پیل سوختی	$E_{stack}=U_{stack}I_{stack}$
گرمای کلی تولید شده از پیل سوختی	$Q_{gen}=E_{stack}\left(\frac{1-\eta_E}{\eta_E}\right)$
مصرف هیدروژن پیل سوختی	$\dot{V}_{H_2}=\frac{n_{c,ser}n_{m,ser}I_{FC}}{zF\rho_{gas}}S_{H_2}\eta_F$
ضریب سرمایش پمپ حرارتی	$\begin{cases} f_{totCool}=tc_1+tc_2T_{wb,in}+tc_3T^2{}_{wb,in}+tc_4T_{db,amb}+ \\ tc_5T^2{}_{db,amb}+tc_6T_{wb,in}T_{db,amb}\ f_{sensCool}=sc_1+sc_2T_{wb,in}+ \\ sc_3T^2{}_{wb,in}+sc_4T_{db,amb}+sc_5T^2{}_{db,amb}+sc_6T_{wb,in}T_{db,amb} \\ f_{EIR,c}=cp_1+cp_2T_{wb,in}+cp_3T^2{}_{wb,in}+cp_4T_{db,amb}+ \\ cp_5T^2{}_{db,amb}+cp_6T_{wb,in}T_{db,amb} \\ f_{Bypass}=bf_1+bf_2T_{wb,in}+bf_3T^2{}_{wb,in}+bf_4T_{db,amb}+ \\ bf_5T^2{}_{db,amb}+bf_6T_{wb,in}T_{db,amb} \end{cases}$
ضریب گرمایش پمپ حرارتی	$\begin{cases} f_{heat}=th_1+th_2T_{wb,in}+th_3T^2{}_{wb,in}+th_4T_{db,amb}+ \\ th_5T^2{}_{db,amb}+th_6T_{wb,in}T_{db,amb} \\ f_{EIR,h}=hp_1+hp_2T_{wb,in}+hp_3T^2{}_{wb,in}+hp_4T_{db,amb}+ \\ hp_5T^2{}_{db,amb}+hp_6T_{wb,in}T_{db,amb} \end{cases}$
کار خروجی پمپ اسمز معکوس	$\dot{W}_{RO,Pump}=0.15\times\dot{W}_{total}=(1000\times\Delta T_{net}\times M)/(3600\times\rho\times\eta_{pump,RO})$
کار خروجی توربین اسمز معکوس	$\dot{W}_{RO,Turbin}=(1000\times\Delta T_{net}\times M\times\eta_{Turbin,RO})/(3600\times\rho)$
کار کل اسمز معکوس	$\dot{W}_{net,RO}=(\dot{W}_{RO,Pump}-\dot{W}_{RO,Turbin})$
نرخ تولید هیدروژن واحد الکترولایزر	$\dot{n}_{H_2}=\eta_f N_{cells}\frac{I_{ely}}{nF}$
توان تولیدی توربین بادی	$E_{WT}=\rho_a C_P A_r v^3$ $C_P=4a(1-a)^2$

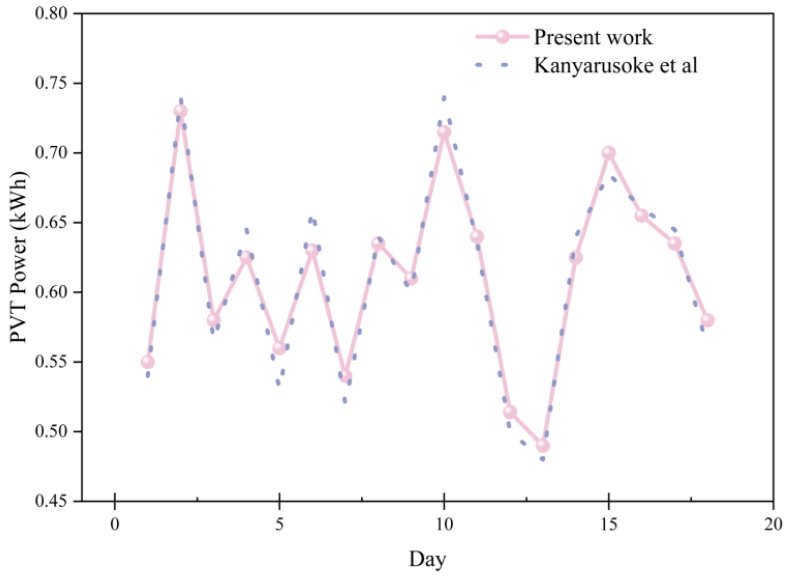
جهت اطلاعات بیشتر از روابط مورد بررسی جهت انالیز سیستم می‌توان به مراجع [۲۴-۳۳] رجوع کرد و شرایط حل مسئله را بررسی کرد.

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

۶-نتایج

۶-۱- اعتبارسنجی

به علت اینکه سیستم ارائه شده، یک سیستم جدید است، پنل فتولتائیک-حرارتی جهت اعتبارسنجی انتخاب شد. اعتبار سنجی پنل های فتوولتائیک حرارتی نشان داده شده در نرم‌افزار TRNSYS با پژوهش Kanyarusoke و همکاران در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۴]. همانطور که نتایج اعتبارسنجی پنل خورشیدی فتوولتائیک نشان می دهد، این مقایسه برای بررسی میزان برق تولید شده در ۲۰ روز بررسی شده است، نتایج نشان‌دهنده اعتبار خوب این شبیه‌سازی گذرا و درصد خطای بسیار پایین است.



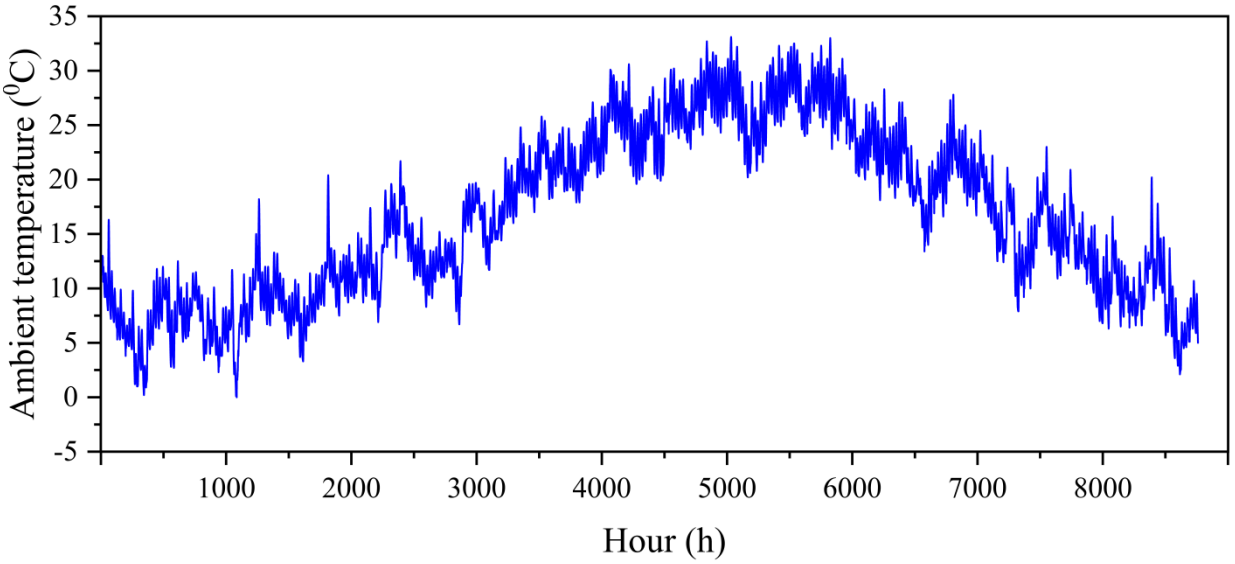
شکل ۴- اعتبارسنجی.

۶-۲- مطالعه موردی

با توجه به وابستگی سیستم به سه انرژی تجدید پذیر، تاثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی، سرعت باد و دمای محیط شهر بندرانزلی به صورت ساعتی بر روی عملکرد سیستم بررسی شد. منطقه انتخابی علاوه بر داشتن پتانسیل بالای انرژی های تجدید پذیر دسترسی خوبی با آب دریا دارد و جز مناطق ساحلی محسوب می‌شود. همچنین با توجه به کاهش منابع آب شیرین شهر مطالعاتی نیاز به آب شیرین جهت مصرف نیز دارند.

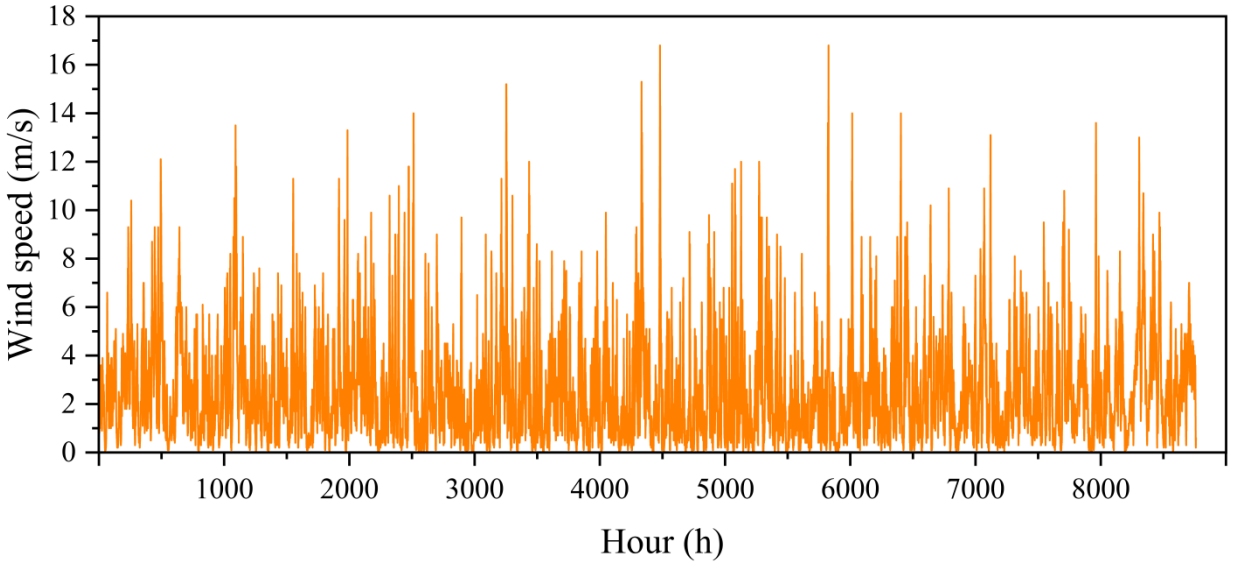
تغییرات دمای محیط در طول سال به‌صورت ساعتی برای شهر مطالعاتی در شکل ۵ رسم شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد دمای محیط بندر انزلی در طول سال بین ۵- تا ۳۵ درجه سانتی گراد است که این شهر نیاز به بار گرمایشی بیشتری نسبت به بار سرمایشی در طول سال دارد.

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



شکل ۵- تغییرات دمای محیط بندرانزلی به صورت ساعتی.

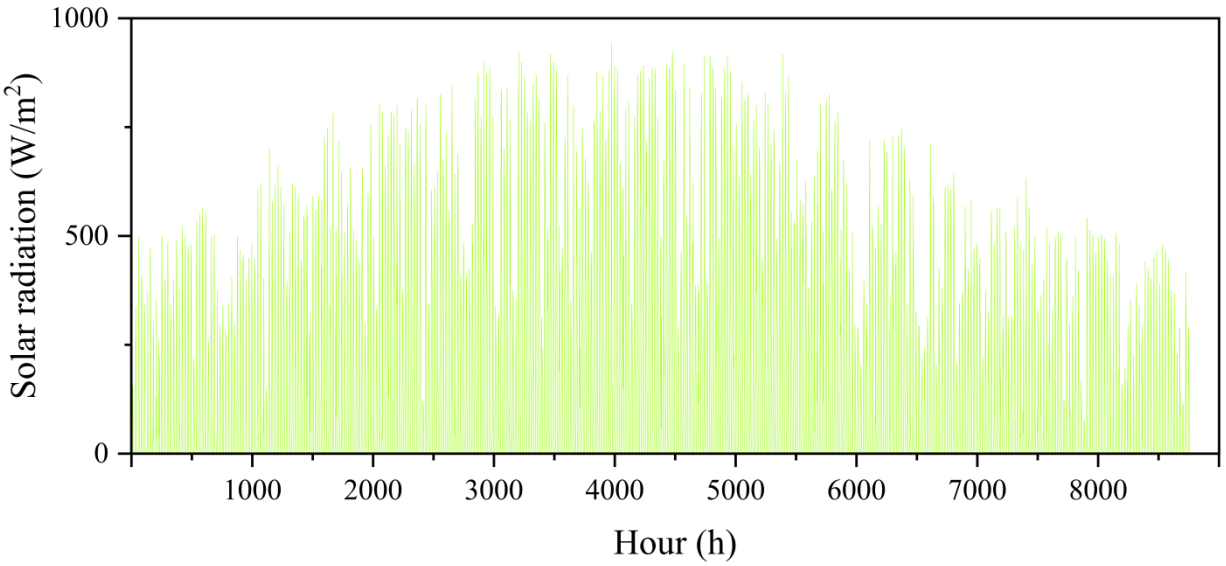
تغییرات سرعت باد در طول سال به‌صورت ساعتی برای بندر انزلی در شکل ۶ رسم شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد تغییرات سرعت باد بندر انزلی در طول سال بین ۰ تا ۱۸ متر بر ثانیه است که جز مناطق پر باد نیز محسوب می‌شوند که از پتانسیل بالای انرژی بادی در ساعت برخوردار هستند و به همین دلیل جهت راه‌اندازی نیروگاه‌های بادی مناسب است.



شکل ۶- تغییرات سرعت باد بندرانزلی به صورت ساعتی.

تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول سال به‌صورت ساعتی برای بندرانزلی در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد تغییرات شدت تابش خورشیدی شهرهای مطالعاتی در طول سال بین ۰ تا ۱۰۰۰ وات بر متر مربع است که نتایج نشان می دهد بندرانزلی از پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در ساعت برخوردار هستند.

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



شکل ۷- تغییرات شدت تابش خورشیدی بندرانزلی به صورت ساعتی.

۶-۳- بهینه‌سازی

بهینه‌سازی چند هدفه این پژوهش با روش سطح پاسخ و با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عملکرد برای انالیز عملکرد فنی و اقتصادی سیستم انجام شد. برای بهینه‌سازی چهار متغیر تأثیرگذار به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شدند که در جدول ۳ معرفی شدند.

جدول ۳- متغیرهای تصمیم‌گیری و دامنه تغییرات آن‌ها

Variable	Minimum	Maximum
Number of PVT	160	400
Number of wind turbines	2	4
Fuel cell capacity(kW)	20	40
Electrolyzer capacity (kW)	30	80
Steam turbine capacity(kW)	30	80

در محاسبات اقتصادی عمر سیستم ۲۵ سال در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شده است. جهت انجام بهینه‌سازی از سیستم مدل شده در نرم‌افزار ترنسیس ۳۲ مرحله ران گرفته شد و سپس نتایج گرفته شده از نرم‌افزار ترنسیس جهت پیدا کردن بهینه‌ترین شرایط ورودی و خروجی سیستم به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت داده شد. در جدول ۴ نتایج حاصل از ۱۰۰ نقطه از بهترین نقاط عملکردی سیستم با استفاده از روش سطح پاسخ معرفی شده است که به ترتیب درصد مطلوبیت انتخاب شده اند.

جدول ۴- نتایج نقاط بهینه سیستم.

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

Number	Number of PVT	Number of wind turbines	Fuel cell capacity(kW)	Electrolyzer capacity (kW)	Steam turbine capacity(kW)	production capacity (kWh/year	lcc	Desirability
1	388	3	40.000	32.501	74.379	3036105.022	781944.254	0.791
2	387.500	3.390	40.000	32.503	73.068	3048113.375	784525.778	0.790
3	387.500	3.479	39.997	34.089	76.527	3000916.074	778085.274	0.789
4	387.500	3.439	40.000	32.501	76.622	3011800.166	776648.970	0.788
5	387.500	3.295	39.999	32.500	69.354	3074674.203	791260.167	0.788
6	387.500	3.315	39.850	32.500	69.553	3065445.421	790718.136	0.787
7	387.500	3.414	39.784	33.598	72.528	3030969.052	785707.433	0.787
8	387.500	3.279	39.735	32.536	68.016	3067218.282	793138.152	0.785
9	386.950	3.494	39.433	32.500	77.233	2966450.212	774432.447	0.785
10	386.781	3.528	39.129	32.502	77.500	2943972.501	773549.696	0.784
11	387.422	3.117	39.996	32.501	64.354	3089342.895	798622.415	0.783
12	385.955	3.222	40.000	32.503	66.297	3080449.964	797115.469	0.781
13	387.500	2.952	39.991	32.500	61.504	3079940.947	800650.648	0.780
14	387.500	2.909	39.986	32.909	60.544	3071106.852	801700.007	0.778
15	387.494	3.553	40.000	40.198	75.048	2957041.591	783857.503	0.777
16	387.499	2.906	39.655	32.503	60.007	3058264.787	801623.112	0.776
17	387.500	3.483	37.994	32.619	70.730	2953931.428	785089.835	0.776
18	387.499	2.711	39.999	32.500	58.378	3049175.525	800904.258	0.775
19	387.481	2.681	40.000	32.500	58.051	3044173.342	800769.286	0.774
20	379.245	3.561	40.000	36.555	77.499	2909958.599	778687.176	0.774
21	386.949	2.828	40.000	33.394	59.140	3052530.592	802758.377	0.774
22	387.500	2.816	39.998	32.500	59.197	3066058.079	802254.568	0.774
23	386.632	3.498	37.889	32.500	70.464	2946559.403	785947.718	0.772
24	387.500	3.214	40.000	37.631	63.148	3042316.248	804565.712	0.771
25	387.377	2.431	40.000	32.501	56.099	2996158.155	797556.208	0.771

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

26	387.040	3.643	39.659	43.089	77.500	2881559.002	778578.390	0.770
27	387.500	3.650	37.555	35.963	77.500	2833852.547	770319.807	0.768
28	387.469	2.581	39.266	32.500	55.905	2985199.347	799912.345	0.767
29	387.500	2.076	40.000	32.500	54.553	2917480.350	789661.581	0.766
30	386.846	2.000	40.000	32.698	54.216	2892735.670	788046.567	0.763
31	387.500	2.426	39.998	33.718	55.128	2976690.972	799812.064	0.762
32	387.500	3.700	39.852	47.717	76.935	2845084.669	782298.346	0.761
33	162.500	2.767	20.031	77.500	48.697	2712741.275	755488.139	0.761
34	162.501	2.715	20.210	77.437	49.189	2696806.627	753236.248	0.760
35	162.628	2.847	20.000	77.279	49.495	2706599.601	755941.134	0.759
36	387.499	3.583	36.689	37.326	66.569	2889529.439	793356.479	0.758
37	387.500	3.681	35.482	35.608	73.665	2770629.438	772575.324	0.757
38	170.216	2.534	20.000	77.295	45.128	2692922.244	756407.497	0.757
39	387.479	3.276	36.609	34.244	58.905	2931199.202	803517.433	0.755
40	162.505	2.300	20.571	77.004	42.728	2692582.156	758139.568	0.755
41	387.494	2.425	38.779	32.500	53.648	2926246.862	798544.511	0.755
42	162.501	2.681	21.032	77.498	53.564	2617908.881	743969.252	0.753
43	387.464	3.774	40.000	52.711	77.498	2779085.349	783403.875	0.749
44	162.501	2.794	20.000	73.014	51.847	2616276.201	748340.801	0.749
45	162.504	2.148	21.236	74.421	48.294	2586375.131	741299.031	0.749
46	162.502	2.149	22.303	77.498	55.522	2525648.684	726300.165	0.748
47	387.346	3.821	36.191	45.510	77.481	2696430.270	769099.339	0.747
48	163.805	3.397	20.000	77.296	51.833	2691452.072	768170.145	0.747
49	387.500	3.784	34.448	40.660	75.935	2667943.373	764877.941	0.745
50	177.067	3.313	20.000	77.500	52.006	2647570.787	763705.385	0.743
51	162.928	2.032	21.217	70.958	49.786	2520170.244	733626.413	0.742
52	387.500	3.758	33.360	38.309	77.498	2603825.038	755293.677	0.741
53	190.610	2.408	20.000	77.361	42.194	2608817.176	758232.199	0.740

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

54	387.336	3.671	40.000	51.010	64.590	2881864.479	814686.439	0.737
55	387.249	2.765	20.000	64.966	77.315	2281089.453	660593.634	0.737
56	387.420	3.827	33.301	43.370	76.718	2594203.426	758881.804	0.737
57	385.115	3.678	32.191	32.500	72.952	2599942.987	760459.574	0.737
58	162.501	3.849	20.007	77.500	51.463	2706726.338	784559.648	0.736
59	162.500	2.453	22.867	77.500	62.683	2439755.257	719891.152	0.735
60	387.499	2.903	20.021	64.383	70.833	2327413.296	682726.858	0.734
61	387.265	2.707	20.000	59.764	76.703	2266958.632	660838.410	0.733
62	387.237	2.706	20.000	62.947	77.499	2271121.150	658319.150	0.733
63	387.500	3.017	20.000	76.991	76.787	2301418.325	669165.774	0.733
64	386.763	2.723	20.012	58.572	74.005	2280475.959	668840.653	0.732
65	387.500	3.265	20.011	76.254	69.998	2348942.025	695855.774	0.731
66	164.079	3.918	20.007	77.500	51.615	2699388.348	786353.762	0.731
67	162.501	2.557	20.022	66.918	55.575	2457443.642	731121.379	0.731
68	387.499	2.964	20.557	59.468	70.049	2328144.812	689818.587	0.730
69	183.105	2.000	22.990	77.500	63.979	2349207.158	699864.901	0.729
70	387.499	3.936	33.190	49.852	74.960	2578072.800	766083.452	0.728
71	387.499	2.997	20.927	57.260	71.487	2316818.388	688941.427	0.728
72	386.981	2.654	20.000	54.526	69.104	2290456.677	679990.741	0.727
73	387.500	3.904	39.901	59.454	76.183	2683553.054	790141.568	0.727
74	384.940	2.689	20.000	55.957	69.256	2291073.481	680779.148	0.727
75	386.597	3.264	21.452	65.271	72.616	2332612.512	696434.883	0.727
76	162.917	3.106	22.223	77.096	60.168	2489523.159	745867.286	0.727
77	387.500	3.539	28.728	33.443	65.182	2545210.940	761035.393	0.726
78	387.500	3.096	21.418	55.898	71.112	2325071.038	695600.177	0.726
79	166.706	2.000	23.750	76.810	68.828	2312306.944	691714.391	0.725
80	193.637	2.414	20.000	77.500	37.896	2609952.002	769666.476	0.723

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

81	387.500	2.627	20.072	50.819	75.175	2231263.610	663518.165	0.723
82	387.500	3.956	31.502	47.052	62.146	2668578.330	793942.575	0.721
83	387.500	2.911	21.198	49.251	68.619	2306092.967	695793.637	0.721
84	239.949	2.703	20.000	77.396	53.542	2421871.776	733541.174	0.721
85	355.026	2.819	20.000	75.355	72.229	2256982.779	677670.624	0.721
86	341.135	2.390	20.007	77.367	77.500	2191523.105	650062.055	0.720
87	233.809	2.997	20.261	77.500	55.640	2435776.227	739513.753	0.720
88	387.499	3.070	21.811	49.630	62.232	2371138.831	720918.717	0.719
89	368.073	3.232	20.002	69.972	63.246	2350935.142	715160.898	0.719
90	387.500	2.740	20.000	58.743	57.669	2344345.037	713030.421	0.719
91	387.499	2.945	20.000	60.509	56.641	2375361.294	722495.319	0.719
92	387.500	3.534	22.863	55.470	62.219	2432273.230	740629.638	0.719
93	387.497	3.567	24.244	53.093	69.379	2392675.881	728890.848	0.719
94	387.499	3.104	22.542	44.739	64.725	2354633.816	719150.997	0.717
95	387.500	3.481	24.714	44.893	61.132	2460923.128	751015.065	0.717
96	387.500	3.369	25.772	38.442	58.903	2488072.381	758589.116	0.717
97	387.500	2.000	33.188	32.508	48.236	2547952.666	774097.277	0.716
98	387.476	3.056	27.090	32.500	53.851	2519064.138	767986.539	0.716
99	387.500	3.312	23.928	44.455	57.553	2450695.024	751490.636	0.715
100	387.468	3.197	24.082	40.830	58.553	2429438.707	746014.890	0.714

در جدول ۵، نتیجه بهینه‌ترین راه حل به دست آمده از روش سطح پاسخ برای تعیین مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف ارائه شده است. این نتایج از بین ۱۰۰ نقطه بهینه انتخاب شده توسط روش سطح پاسخ و درجه‌بندی بر اساس درصد مطلوبیت نتایج ارائه شده است. درصد مطلوبیت نقطه ۱ برابر با ۰,۷۹۱ درصد است.

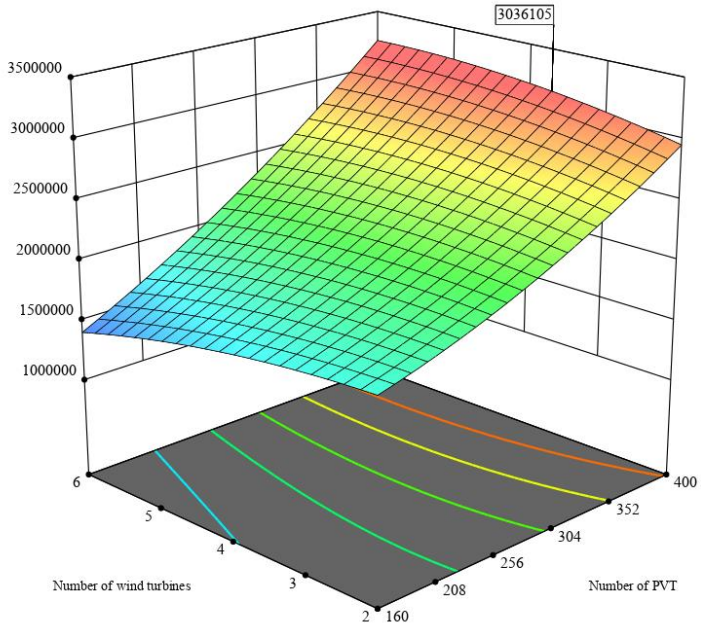
جدول ۵- نتایج بهینه

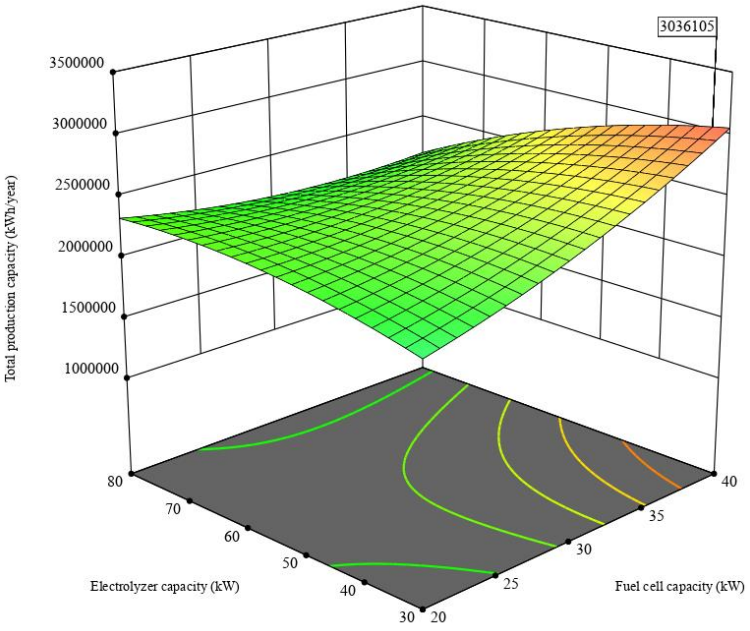
Number of PVT	Number of wind turbines	Fuel cell capacity(kW)	Electrolyzer capacity (kW)	Steam turbine capacity(kW)	production capacity (kWh/year	LCC	Desirability
388	3	40.000	32.501	74.379	3036105.022	781944.254	0.791

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

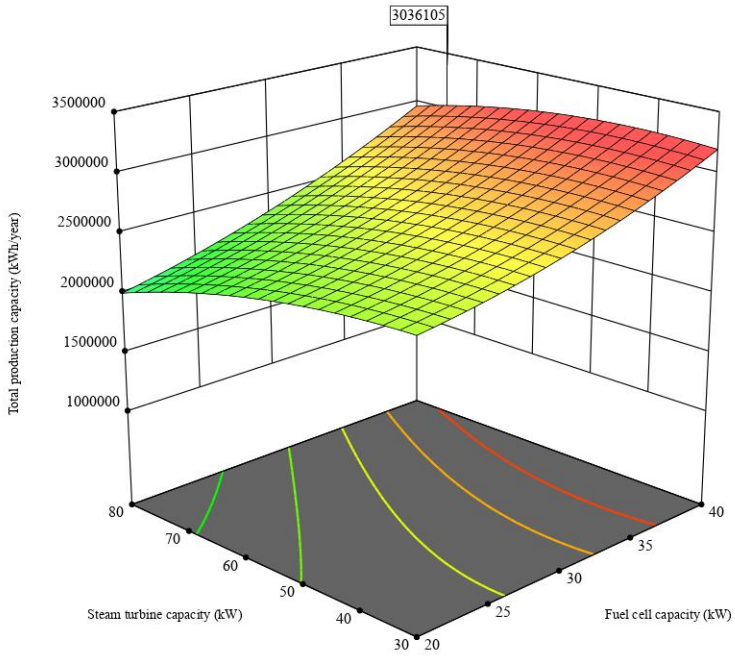
این بخش به ارزیابی متغیرهای طراحی بر روی پاسخ‌های فنی-اقتصادی سیستم مورد بررسی اختصاص دارد. نمودارهای دو بعدی به بررسی تغییرات هم‌زمان دو پارامتر بر روی توابع هدف می‌پردازد.

در شکل ۸ تاثیر تغییرات هم‌زمان دو پارامتر ورودی بر روی تابع هدف تولید برق نشان داده شده است. تمامی متغیرها در تلاش‌اند که میزان برق تولیدی سیستم را به حالت بهینه که ۳۰۳۶۱۰۵,۰۲۲ کیلووات ساعت است، برسانند. همانطور که نتایج نشان می دهد از بین پنج متغیر ورودی در بهینه‌سازی دو پارامتر تعداد توربین بادی و تعداد پنل خورشیدی بر روی تولید برق بیشترین تاثیر را داشته و به افزایش دو برابری تولید برق منجر شده است.



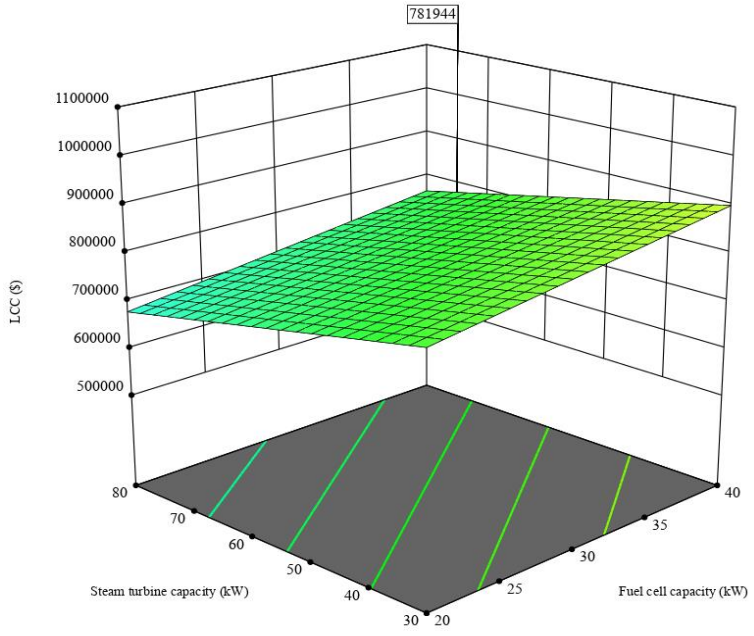


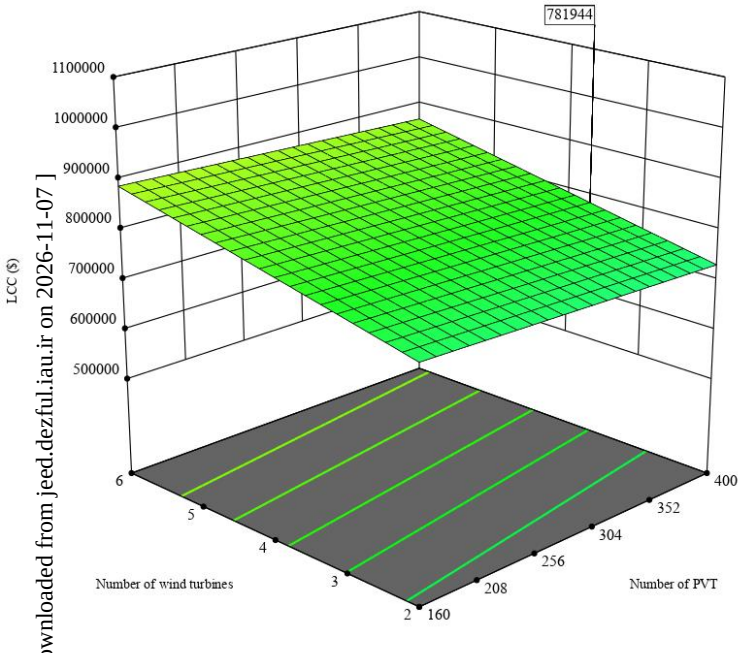
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]



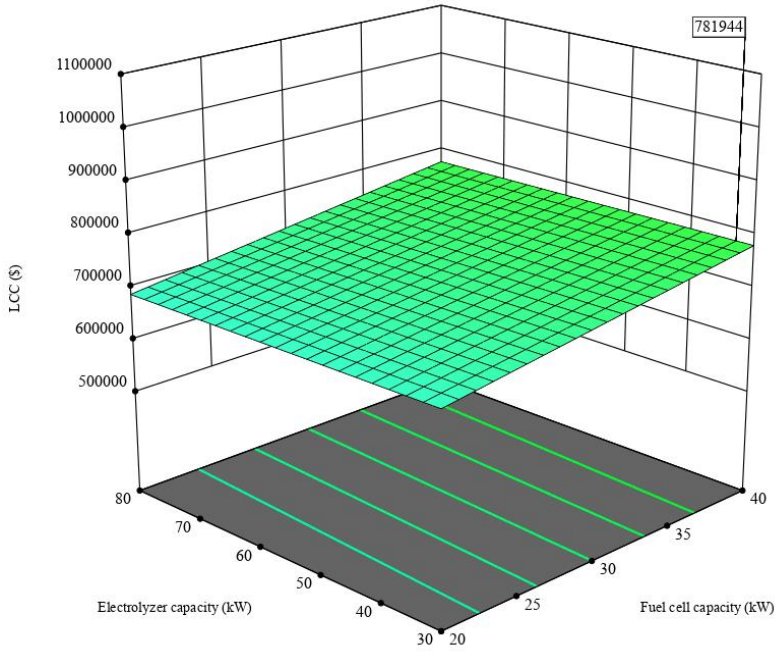
شکل ۸- اثرات متقابل متغیرهای طراحی بر تولید برق

در شکل ۹ تاثیر تغییرات هم‌زمان دو پارامتر ورودی بر روی تابع هدف هزینه چرخه عمر نشان داده شده است. تمامی متغیرها در تلاش‌اند که هزینه چرخه عمر سیستم را به حالت بهینه که ۷۸۱۹۴۴,۲۵۴ دلار است، برسانند. همانطور که نتایج نشان می دهد از تأثیرگذارترین متغیرهای تصمیم‌گیری بر روی هزینه چرخه عمر باید به تعداد توربین بادی و تعداد پنل فتوولتائیک اشاره کرد که به افزایش قابل توجه هزینه چرخه عمر منجر شده است. علت افزایش هزینه چرخه عمر توسط توربین بادی و پنل خورشیدی گران بودن این تجهیزات است.





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

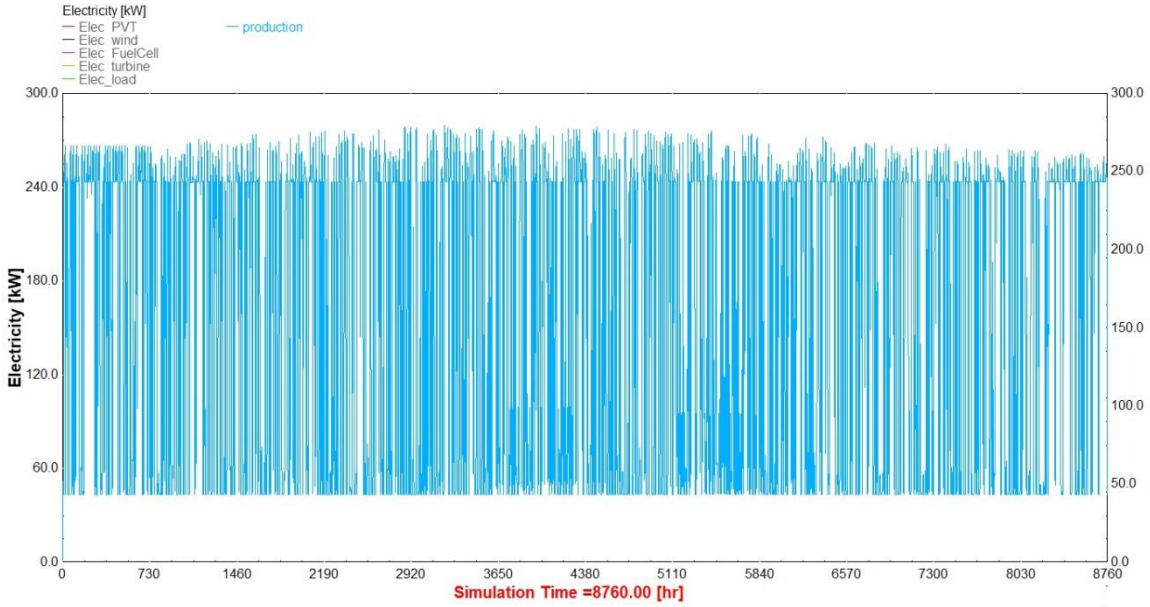


شکل ۹- اثرات متقابل متغیرهای طراحی بر هزینه چرخه عمر

۶-۴- عملکرد ساعتی سیستم

در شکل ۱۰ میزان برق تولیدی سیستم پیشنهادی به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) در طول بررسی شده است. تولید برق بر عهده توربین بادی، توربین بخار، پیل سوختی و پنل فتولتائیک/حرارتی است. انرژی توربین بادی توسط باد، انرژی پنل توسط خورشیدی و انرژی توربین بخار از انرژی زمین‌گرمایی و پیل سوختی تأمین می‌شود. پس باید گفت با افزایش یا کاهش شدت تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد در طول سال میزان برق تولیدی سیستم تغییر می‌کند. نتایج نشان می دهد کمترین میزان برق تولیدی سیستم در طول سال در حدود ۵۰ کیلووات ساعت است و بیشترین توان تولیدی در طول سال حدود ۲۶۰ کیلووات ساعت است و از طرفی نتایج نشان می دهد که تراکم تولید سیستم در ماه‌های گرم سال است چرا که انرژی خورشیدی افزایش می‌یابد. همانطور که نتایج نشان می دهد به دلیل کاهش و افزایش شدت تابش خورشیدی در طول روز و همچنین ماه‌های سال، نوسانات تولید برق توسط پنل خورشیدی زیاد است.

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

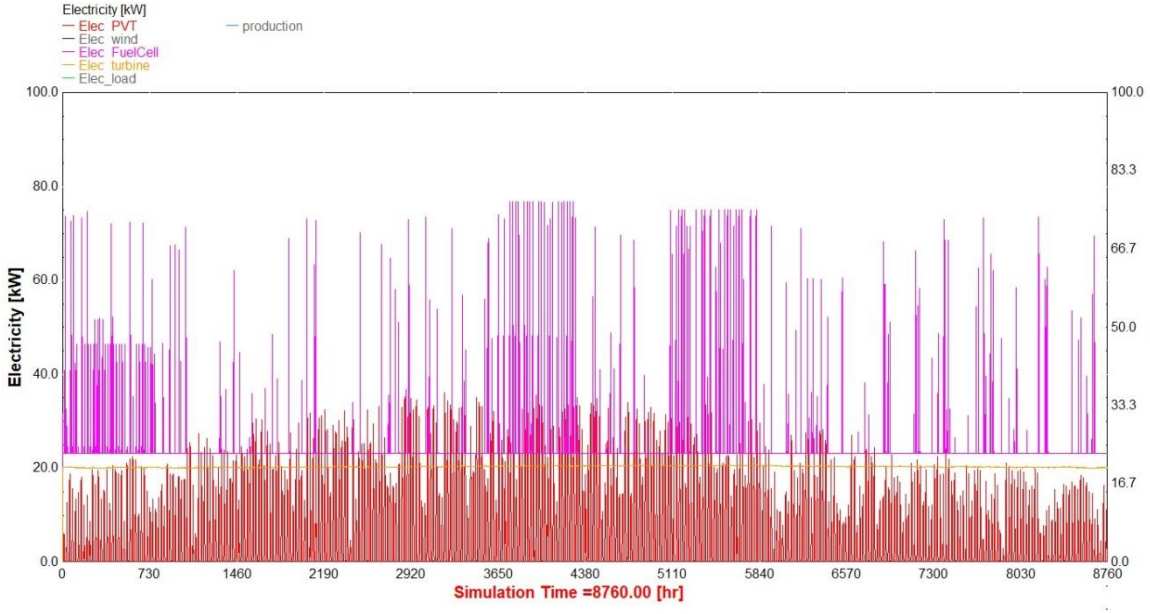


شکل ۱۰- عملکرد ساعتی سیستم در تولید برق.

در شکل ۱۱ میزان برق تولیدی پنل های خورشیدی، پیل سوختی و توربین بخار به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) در طول بررسی شده است. نتایج نشان می دهد کمترین میزان برق تولیدی پنل های خورشیدی در طول سال در ۰ کیلووات ساعت (در ساعاتی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، برقی توسط پنل ها تولید نمی‌شود) است و بیشترین توان تولیدی پنل ها خورشیدی در طول سال حدود ۴۰ کیلووات ساعت است که در فصل تابستان و ماه‌های جولای و اوت به دست می آید. همچنین میزان برق تولیدی واحد پیل سوختی در طول سال در ۲۰ کیلووات ساعت و بیشترین توان تولیدی پنل ها خورشیدی در طول سال حدود ۸۰ کیلووات ساعت است. انرژی پیل سوختی توسط سوخت هیدروژن تولیدی توسط واحد الکترولایزر تأمین می‌شود و برق مورد نیاز الکترولایزر نیز توسط توربین‌های بادی تأمین می‌شود پس باید که که برق تولیدی واحد پیل سوختی با عملکرد توربین بادی رابطه مستقیم دارد.

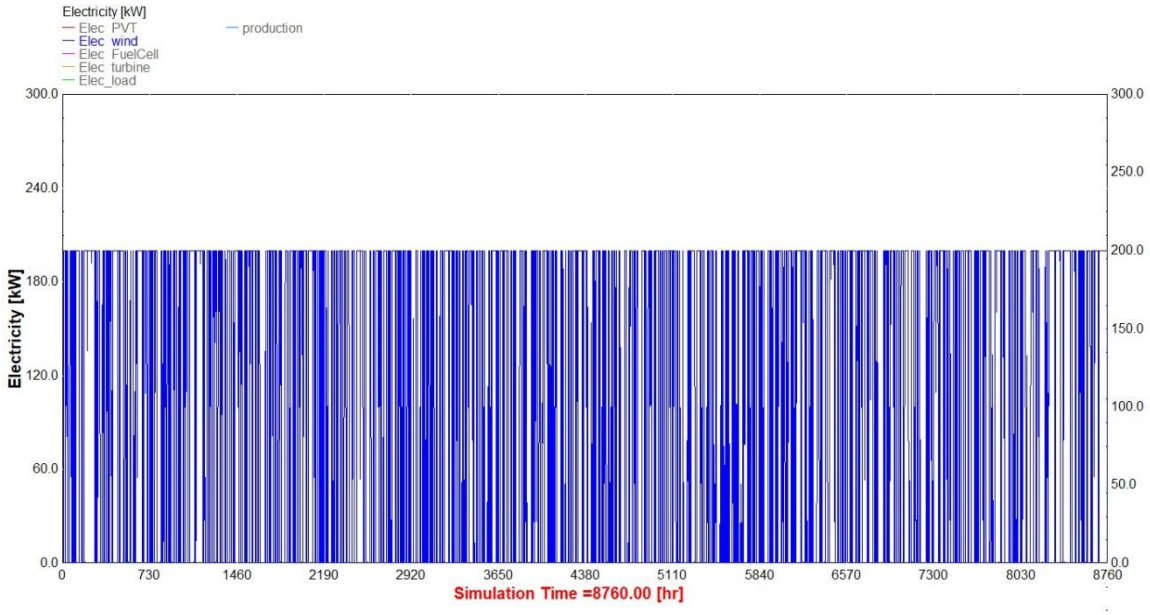
همچنین مقایسه توان تولیدی واحدها نشان می دهد که توان تولیدی توربین بخار به دلیل استفاده از انرژی حرارتی زمین‌گرمایی که یک انرژی پایدار است، نوسانات کمی داشته و می‌توان گفت علت این نوسانات هم کاهش یا افزایش انرژی حرارتی ورودی از سمت پیل سوختی است، چرا که فعالیت پیل سوختی براساس انرژی بادی است و انرژی باد همانند خورشید پایداری انرژی زمین‌گرمایی را ندارد.

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



شکل ۱۱- عملکرد ساعتی پنل های خورشیدی، پیل سوختی و توربین بخار در تولید برق.

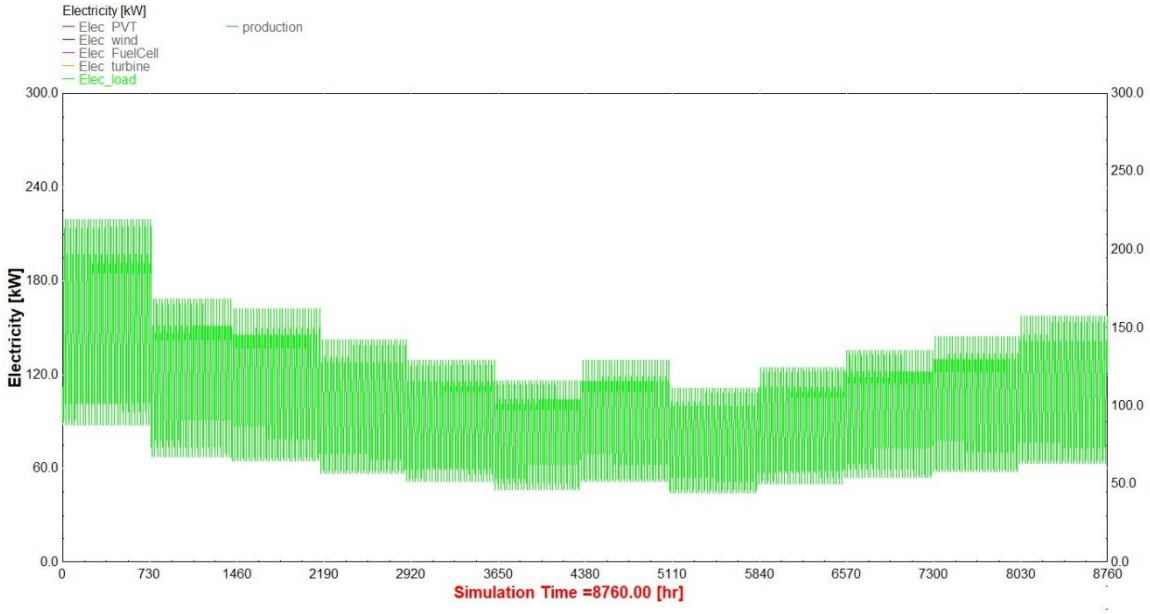
در شکل ۱۲ میزان برق تولیدی مزرعه بادی به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) در طول بررسی شده است. نتایج نشان می دهد کمترین میزان برق تولیدی مزرعه بادی در طول سال در ۰ کیلووات ساعت (در ساعاتی که انرژی بادی در دسترس نیست، برقی توسط توربین‌های بادی تولید نمی‌شود) است و بیشترین توان تولیدی مزرعه بادی در طول سال حدود ۱۹۰ کیلووات ساعت است. همانطور که نتایج نشان می دهد به دلیل پتانسیل بالای شهر بندر انزلی از نظر انرژی بادی، میزان توان تولیدی مزرعه بادی با ۳ توربین بادی بسیار بالا است.



شکل ۱۲- عملکرد ساعتی مزرعه بادی در تولید برق.

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

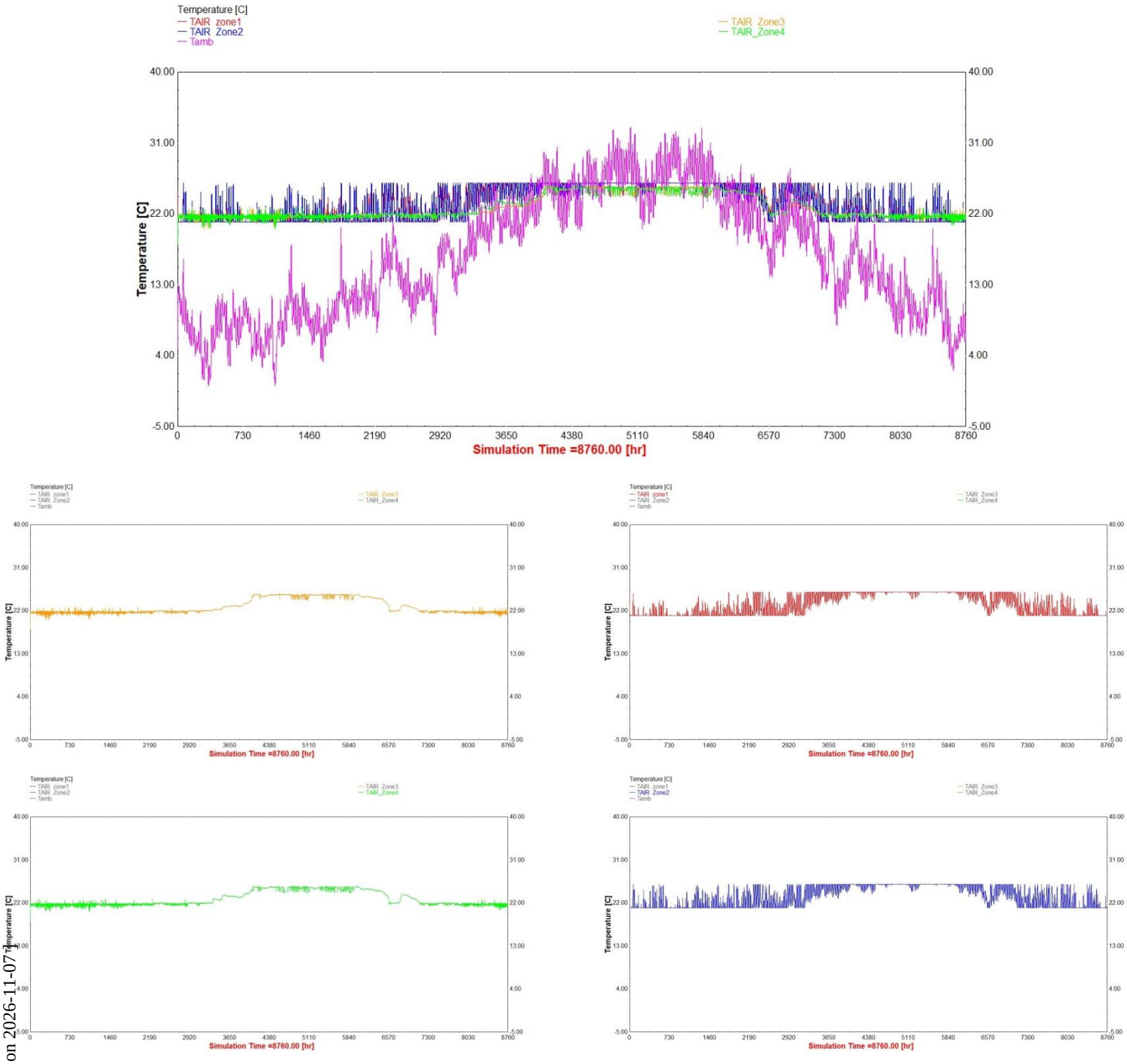
در شکل ۱۳ میزان برق مصرفی مجتمع مسکونی (۴ ساختمان ۲۰ واحدی) در این پژوهش و در بندرانزلی محاسبه شده است. میزان برق مصرفی برای یک سال است که به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) محاسبه شده است. نتایج نشان می دهد لود برق ساختمان‌ها در بندرانزلی در طول سال بین ۵۰ کیلووات در کمترین مقدار و ۲۱۰ کیلووات در بیشترین مقدار خود است و با توجه به محدود توان تولیدی سیستم که در شکل ۱۰ گزارش شد (میزان توان تولیدی کل سیستم در طول سال در محدود ۵۰ و ۲۶۰ کیلووات ساعت است)، سیستم پیشنهادی به راحتی توانایی تأمین بار ساختمان‌ها را دارد و علاوه بر آن توانایی فروش انرژی مازاد به شبکه را نیز دارد.



شکل ۱۳- میزان برق مصرفی مجتمع مسکونی

در شکل ۱۴ میزان دمای محیط و دمای زون های انتخابی داخل ساختمان بررسی شده است. همانطور که قبلا بیان شد، شهر بندر انزلی در طول سال به بار گرمایشی بیشتری نسبت به بار سرمایشی برای رسیدن به ضریب آسایش حرارتی مناسب برای ساختمان‌ها احتیاج دارد. دمای اسایش داخل ساختمان بین ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. در بحث آسایش حرارتی منظور از دمای هوا، دمایی است که شخص آن را از سر تا پا حس می‌کند و می‌تواند با زمان تغییر یابد دمای ۲۳ تا ۲۵ درجه سیلیسیوس تقریباً برای همه افراد، موجب آسایش حرارتی می‌شود برای برقراری آسایش حرارتی، اختلاف دمای سر و پاها نباید از مقدار ۳ درجه سیلیسیوس تجاوز کند.

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

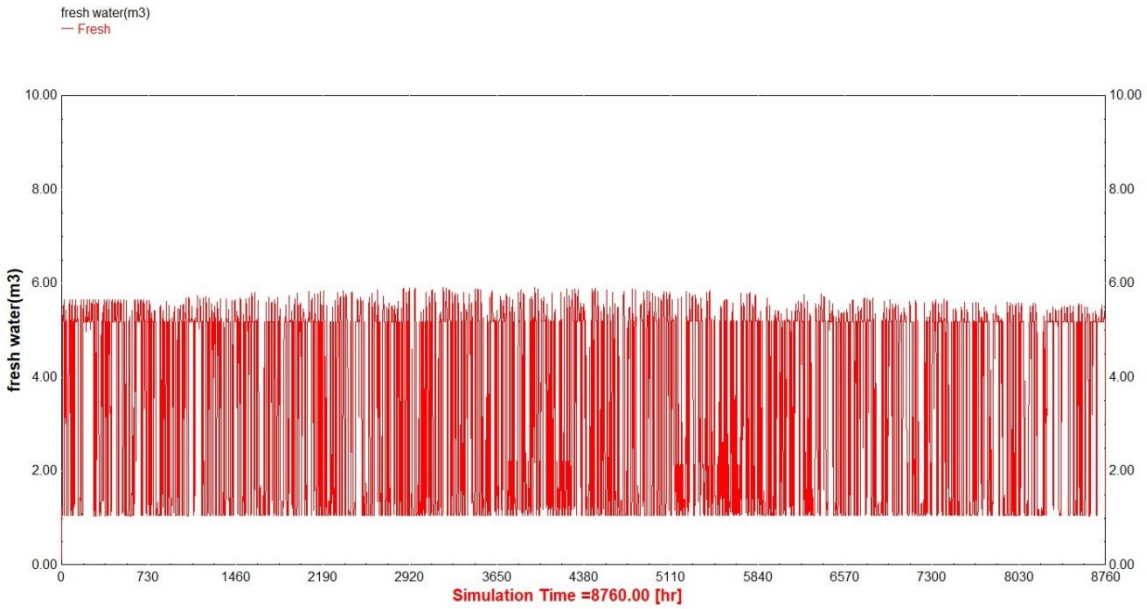


شکل ۱۴- دمای محیط و دمای داخل ساختمان

در شکل ۱۵ تغییرات آب شیرین تولیدی سیستم توسط واحد نمک زدای اسمز معکوس با دریافت آب شور دریا در طول سال به صورت ساعتی در شهر بندرانزلی نشان داده شده است. برق مورد نیاز واحد نمک زدای اسمز معکوس توسط واحد پیل سوختی تأمین می‌شود، پس به عبارتی با افزایش یا کاهش توان تولیدی پیل سوختی، آب شیرین تولیدی سیستم نیز افزایش یا کاهش می‌یابد. به همین دلیل تغییرات آب شیرین تولیدی سیستم مشابه تغییرات توان تولیدی واحد پیل سوختی در طول سال است و به عبارتی با انرژی بادی که تأمین‌کننده برق مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن و تأمین سوخت پیل

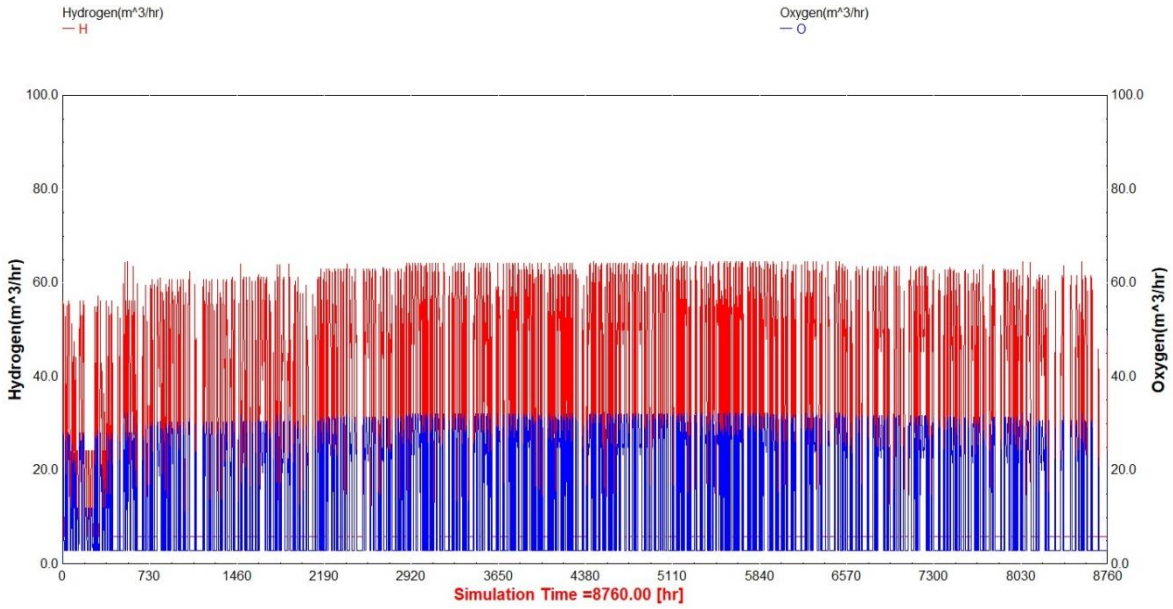
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

سوختی است، ارتباط مستقیم دارد. میزان آب شیرین تولیدی سیستم در طول سال بین مدود ۱ مترمکعب بر ساعت و ۶ مترمکعب بر ساعت است.



شکل ۱۵- تغییرات نرخ آب شیرین تولیدی سیستم به صورت ساعتی در طول سال.

در شکل ۱۶ تغییرات میزان هیدروژن و اکسیژن سیستم توسط واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون در طول سال به صورت ساعتی نشان داده شده است. برق مورد نیاز واحد الکترولایزر توربین‌های بادی تأمین می‌شود و به عبارتی با انرژی بادی که تأمین‌کننده برق مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن است، ارتباط مستقیم دارد. میزان هیدروژن تولیدی در محدود ۱۰ تا ۶۵ مترمکعب بر ساعت و میزان اکسیژن تولیدی در محدود ۲ تا ۳۰ مترمکعب بر ساعت است.

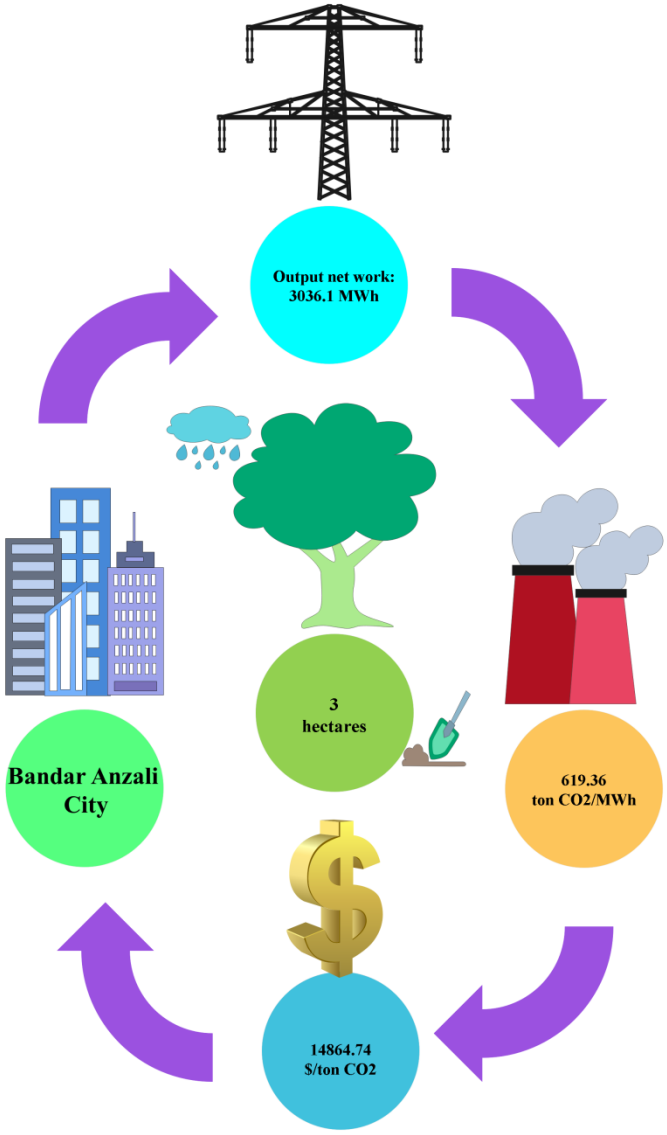


شکل ۱۶- تغییرات نرخ هیدروژن و اکسیژن تولیدی سیستم به صورت ساعتی در طول سال.

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

۶-۵- آنالیز زیست‌محیطی

در شکل ۱۷ مزیت‌های زیست‌محیطی سیستم طراحی‌شده توضیح داده می‌شود. جهت مقایسه عملکرد سیستم تجدید پذیر کار حاضر و بررسی جلوگیری انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی باید گفت که به‌طور کلی ۰,۲۰۴ تن CO_2 در نیروگاه‌های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق آزاد می‌شود؛ که نتایج نشان داد با راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی می‌توان از انتشار آلودگی به میزان ۶۱۹,۳۶ تن کربن دی‌اکسید جلوگیری کرد. علاوه بر این، در نیروگاه‌های فسیلی انتشار یک‌تن CO2 باعث هزینه زیست‌محیطی ۲۴ دلار می‌شود که با راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی از هزینه ۱۴۸۶۴,۷۴ دلار برای محیط‌زیست جلوگیری کرد. همچنین برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب تەنشینی در نظر گرفته شد که با راه‌اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان ۳۰۳۶,۱ مگاوات سالیانه می‌توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد [۳۵].



شکل ۲۵- انالیز زیست‌محیطی عملکرد سیستم.

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

۷-نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به آنالیز یک سیستم تجدید پذیر مبتنی بر انرژی بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی با ترکیبی هدفمند از واحدهای پیل سوختی، پمپ حرارتی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون، توربین بخار و اسمز معکوس پرداخته شد. مدل‌سازی و شبیه‌سازی گذرا سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام می‌شود. یک بررسی موردی جهت امکان‌سنجی راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در شهر ساحلی بندر انزلی انجام شد. بهینه‌سازی عملکرد سیستم با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عمر سیستم با روش سطح پاسخ و نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد. پنج پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم شامل تعداد توربین بادی، تعداد پنل خورشیدی، ظرفیت پیل سوختی، ظرفیت توربین بخار و ظرفیت الکترولایزر غشای تبادل پروتون به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شدند.

سیستم در بهینه‌ترین حالت خود می‌تواند به توان تولیدی ۳۰۳۶۱۰۵,۰۲۲ کیلووات ساعت و هزینه چرخه عمر ۷۸۱۹۴۴,۲۵۴ دلاری برسد. نتایج زیست‌محیطی نشان داد که با راه‌اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان ۳۰۳۶,۱ مگاوات سالیانه می‌توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد و به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید به میزان ۶۱۹,۳۶ تن کربن دی‌اکسید با هزینه ۱۴۸۶۴,۷۴ دلار کمک کرد.

سایر نتایج پژوهش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- دریافت اطلاعات آب و هوایی شهرهای مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار متانورم انجام شد.
- این سیستم برای تأمین نیازهای یک آپارتمان مسکونی با تعداد ۸۰ واحد مسکونی (۴ ساختمان ۲۰ واحدی) و ۳۲۰ نفر به انرژی الکتریکی، سرمایش و گرمایش طراحی و بررسی شد.
- مطالعه پارامتریک نشان داد از تأثیرگذارترین پارامترهای طراحی می‌توان از تعداد توربین بادی و پنل فتوولتائیک حرارتی نام برد.

علائم اختصاری

ρ	چگالی آب دریای ورودی به اسمز معکوس	G_T	میزان تابش خورشیدی
M	جرم مولی آب ورودی به اسمز معکوس	$\tau\alpha$	ضریب انتقال‌پذیری
$\eta_{pump,RO}$	بازده پمپ اسمز معکوس	A	مساحت پنل خورشیدی
$\eta_{Turbin,RO}$	بازده توربین اسمز معکوس	η	بازده پنل خورشیدی
ΔT_{net}	اختلاف دمای آب ورودی به اسمز معکوس	L	طول پنل
ρ_a	چگالی هوا	ε_m	انتشار تابش
A_r	نشان‌دهنده مساحت روتور توربین بادی	θ	زاویه تابش
v	سرعت باد	$C_{P,\max}$	حداکثر ضریب توان
C_P	ضریب توان	IAM	اصلاح کننده زاویه
a	ضریب القایی محوری		

مخففها

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

PEM	غشای تبادل پروتون
LCC	هزینه چرخه عمر
PMV	ضریب آسایش حرارتی
PV/T	پنل فتوولتائیک حرارتی
RSM	روش سطح پاسخ

مراجع

1) Asadi, M., et al. (2023). "A global evaluation model applied to wind power plant site selection." Applied Energy 336: 120840.

2) Odoi-Yorke, F., et al. (2023). "Techno-economic assessment of a utility-scale wind power plant in Ghana." Energy Conversion and Management: X 18: 100375.

3) Liu, G., et al. (2023). "Geothermal-solar energy system integrated with hydrogen production and utilization modules for power supply-demand balancing." Energy 283: 128736.

4) Santos, S. F., et al. (2017). Chapter 1 - Introduction to Renewable Energy Systems. Optimization in Renewable Energy Systems. O. Erdinç. Boston, Butterworth-Heinemann: 1-26.

5) Y. Jbari, S. Abderafi. Parametric study to enhance performance of wastewater treatment process, by reverse osmosis-photovoltaic system. Applied Water Science. 10 (2020) 1-14.

6) S. Khanmohammdi, F. Musharavati, M. Sheykhmohammadi. Energy and exergy examinations of PVT based hybrid system for power, heating and potable water production: Transient modeling. Renewable Energy, (2022).

7) T. Salameh, A. Alkhalidi, M.K.H. Rabaia, Y. Al Swailmeen, W. Alroujmah, M. Ibrahim, et al. Optimization and life cycle analysis of solar-powered absorption chiller designed for a small house in the United Arab Emirates using evacuated tube technology .Renewable Energy. 198 (2022) 200-12.

8) Assareh, E., et al. (2022). "Performance analysis of solar-assisted-geothermal combined cooling, heating, and power (CCHP) systems incorporated with a hydrogen generation subsystem." Journal of Building Engineering: 105727.

9) Assareh, E., et al. (2023). "Techno-economic analysis of combined cooling, heating, and power (CCHP) system integrated with multiple renewable energy sources and energy storage units." Energy and Buildings 278: 112618.

10) M'Saouri El Bat, A., et al. (2021). "Thermal impact of street canyon microclimate on building energy needs using TRNSYS: A case study of the city of Tangier in Morocco." Case Studies in Thermal Engineering 24: 100834.

11) Chen, Y., et al. (2023). "Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas." Energy Conversion and Management 276: 116591.

12) Bamisile, O., et al. (2023). "Thermo-enviro-exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a novel geothermal-solar-wind micro-multi-energy system for cleaner energy production." Process Safety and Environmental Protection 170: 157-175.

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

13) Dezfouli, M. M. S., et al. (2022). "Energy and performance analysis of solar solid desiccant cooling systems for energy efficient buildings in tropical regions." Energy Conversion and Management: X 14: 100186.

14) 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.

15) Prieto, J., et al. (2023). "Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in Mediterranean climates." Applied Thermal Engineering 221: 119928.

16) Dezfouli, M. M. S., et al. (2022). "Energy and performance analysis of solar solid desiccant cooling systems for energy efficient buildings in tropical regions." Energy Conversion and Management: X 14: 100186.

17) Soheil Kavian, Cyrus Aghanajafi, Hassan Jafari Mosleh, Arash Nazari, Ashkan Nazari,Exergy, economic and environmental evaluation of an optimized hybrid photovoltaic-geothermal heat pump system,Applied Energy,Volume 276,2020 .https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115469

18) Saleem, M. S., et al. (2020). "Design and optimization of hybrid solar-hydrogen generation system using TRNSYS." International Journal of Hydrogen Energy 45(32): 15814-15830.

19) Ozturk, M. and I. Dincer (2022). "System development and assessment for green hydrogen generation and blending with natural gas." Energy 261: 125233.

20) Musharavati, F., et al. (2022). "Multi-objective optimization of a biomass gasification to generate electricity and desalinated water using Grey Wolf Optimizer and artificial neural network." Chemosphere 287: 131980.

21) Hashemian, N., Noorpoor, A., 2019, Assessment and multi-criteria optimization of a solar and biomass-basedmulti-generation system: Thermodynamic, exergoeconomic and exergoenvironmental aspects, Energy Conversion and Management 195, 788–797.

22) Allaix, D. L. and V. I. Carbone (2011). "An improvement of the response surface method." Structural Safety 33(2): 165-172.

23) Li, D.-Q., et al. (2016). "Response surface methods for slope reliability analysis: Review and comparison." Engineering Geology 203: 3-14.

24) D. Wei, L. Zhang, A.A. Alotaibi, J. Fang, A.H. Alshahri, K.H. Almitani. Transient simulation and comparative assessment of a hydrogen production and storage system with solar and wind energy using TRNSYS. International Journal of Hydrogen Energy, (2022).

25) S. Klein, B. Newton, J. Thornton, D. Bradley, J. Mitchell, M. Kummert. TRNSYS Reference Manual: Mathematical Reference. (2006).

26) TESS. Component Libraries v. 17.01 for TRNSYS v17. 0 and the TRNSYS Simulation Studio, Parameter/Input/Output Reference Manual, Thermal Energy System Specialists, LLC. (2004).

27) Rashidi, H., Khorshidi J., 2018, Exergoeconomic analysis and optimization of a solar based multigeneration system using multiobjective differential evolution algorithm, J. Clean. Prod., vol. 170, pp. 978–990.

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

28) Nemati A., Sadeghi M., Yari M., 2017, Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a marine engine waste heat driven RO desalination system integrated with an organic Rankine cycle using zeotropic working fluid, Desalination, vol. 422, pp. 113–123, 2017.
29) Naseri A., Bidi M., Ahmadi M. H., Saidur R., 2017, Exergy analysis of a hydrogen and water production process by a solar-driven transcritical CO2 power cycle with Stirling engine, J. Clean. Prod., vol. 158, pp. 165–181.
30) F. Oueslati. Hybrid renewable system based on solar wind and fuel cell energies coupled with diesel engines for Tunisian climate: TRNSYS simulation and economic assessment. International Journal of Green Energy. 18 (2021) 402-23.
31) R.F. Asrami, A. Sohani, E. Saedpanah, H. Sayyaadi. Towards achieving the best solution to utilize photovoltaic solar panels for residential buildings in urban areas. Sustainable Cities and Society. 71 (2021) 102968.
32) E. Saedpanah, R.F. Asrami, A. Sohani, H. Sayyaadi. Life cycle comparison of potential scenarios to achieve the foremost performance for an off-grid photovoltaic electrification system. Journal of Cleaner Production. 242 (2020) 118440.
33) A. Buonomano, F. Calise, M.D. d'Accadia, M. Vicidomini. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment. Energy. 155 (2018) 174-89.
34) Kanyarusoke, K., Gryzagoridis, J., & Oliver, G. (2016). Validation of TRNSYS modelling for a fixed slope photovoltaic panel. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24(6), 4763–4772.
35) Alirahmi, S. M., Razmi, A. R., Arabkoohsar, A., 2021c, 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.

چکیده انگلیسی:

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

Modeling and optimization of a hybrid energy supply system by combining fuel cell with TRNSYS software - Bandar Anzali case study

Ali Dezhdar[1], Ehsanollah Asareh[*,1], Ali Ershadi[1*]

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

Received: July 2023, Accepted: September 2023

Abstract

In the current research, a renewable system based on wind, solar, and geothermal energy was analyzed with a targeted combination of fuel cell units, heat pump, proton exchange membrane electrolyzer, steam turbine and reverse osmosis. Transient modeling and simulation of the proposed system was done using TRNSYS software. This system was designed and evaluated to meet the needs of a residential complex with 80 residential units and 320 people for electrical energy, cooling, and heating. A case study was conducted for the feasibility of setting up the proposed system in the coastal city of Bandar Anzali in Iran. Optimization of system performance was done by determining two objective functions of production power and system life cycle cost with response surface method and Design Expert software. Five parameters affecting the system performance including the number of wind turbines, number of solar panels, fuel cell capacity, steam turbine capacity, and proton exchange membrane electrolyzer capacity were selected as optimization variables. In its most optimal state, the system can reach a production power of 3036105.022 kWh and a life cycle cost of 781944.254 $. The environmental results showed that by setting up the system in an optimal mode in Bandar Anzali city and producing electricity at the rate of 3036.1 MW per year, it is possible to help expand 3 hectares of green space per year. It also helped reduce carbon dioxide emissions by 619.36 tons of CO2 at a cost of 14,864.74 $.

Key words: Wind farm, Solar farm, Geothermal, Fuel cell, Heat pump, Multi objective optimization, TRNSYS.

*corresponding author: **assareh@iaud.ac.ir, ali.ershadi@iau.ac.ir**

Cite this article as: Ali Dezhdar, Ehsanollah Asareh, Ali Ershadi, Modeling and optimization of a hybrid energy supply system by combining fuel cell with TRNSYS software - Bandar Anzali case study. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(3), 97-125

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