



## مدل سازی و بهینه سازی یک سیستم ترکیبی تأمین منابع انرژی با ترکیب پیل سوختی با نرم افزار ترنسیس-مطالعه موردی بندرانزلی

علی دژدار<sup>۱</sup>، احسان اله عصاره<sup>۱\*</sup>، علی ارشادی<sup>۱\*</sup>

\* ۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. [assareh@iaud.ac.ir](mailto: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 زمین گرمایی با ترکیبی هدفمند از واحدهای پیل سوختی، پمپ حرارتی، الکترولایزر غشای تبادل پروتون، توربین بخار و اسمز معکوس پرداخته شد. مدل سازی و شبیه سازی گذرا سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم افزار 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 امکان سنجی راه اندازی سیستم پیشنهادی در شهر ساحلی بندرانزلی در کشور ایران انجام شد. بهینه سازی عملکرد سیستم با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عمر سیستم با روش سطح پاسخ و نرم افزار 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 به عنوان متغیرهای بهینه سازی انتخاب شدند. سیستم در بهینه ترین حالت خود می تواند به توان تولیدی ۳۰۳۶۱۰۵٫۰۲۲ کیلووات ساعت و هزینه چرخه عمر ۷۸۱۹۴۴٫۲۵۴ دلاری برسد. نتایج زیست محیطی نشان داد که با راه اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان ۳۰۳۶٫۱ مگاوات سالیانه می توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد و به کاهش انتشار کربن دی اکسید به میزان ۶۱۹٫۳۶ تن کربن دی اکسید با هزینه ۱۴۸۶۴٫۷۴ دلار کمک کرد.

\* عهده دار مکاتبات: [assareh@iaud.ac.ir](mailto:assareh@iaud.ac.ir)، [ali.ershadi@iau.ac.ir](mailto:ali.ershadi@iau.ac.ir)

**کلمات کلیدی:** مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی، زمین گرمایی، پیل سوختی، پمپ حرارتی، بهینه سازی چندهدفه، TRNSYS.

**نحوه استناد به این مقاله:** علی دژدار، احسان اله عصاره، علی ارشادی، احمد. مدل سازی و بهینه سازی یک سیستم ترکیبی تأمین منابع انرژی با ترکیب پیل سوختی با نرم افزار ترنسیس-مطالعه موردی بندرانزلی  
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲؛ ۱۰ (۳): ۹۷-۱۲۵

## ۱- مقدمه

در دنیای امروز با توجه به محدود بودن منابع سوخت فسیلی ساختمان ها صنایع و دیگر ارگان ها به سمت استفاده از دیگر انرژی های موجود در زمین مانند انرژی بادی، خورشیدی و زمین گرمایی حرکت نموده اند. نیروگاه های تجدید پذیر [۱] با برآیند مصرف انرژی فسیلی صفر و آلاینده کربن صفر سالیانه است که جز نیروگاه های پاک محسوب می شوند. یک نیروگاه بادی و خورشیدی مجموعه ای از چندین توربین بادی و پنل های خورشیدی است که در یک مکان قرار گرفته اند که هدف نیروگاه های تجدید پذیر [۲] تولید انرژی پاک است. همچنین می توان با استفاده از برق تولیدی نیروگاه های تجدید پذیر و تأمین انرژی برقی واحدهایی مانند پمپ حرارتی، اسمز معکوس و الکترو لایزر غشای تبادل پروتون به تولید گرمایش، سرمایش، آب شیرین، اکسیژن و هیدروژن ناحیه ای اقدام کرد. نیروگاه های فسیلی که دارای آلودگی های زیست محیطی فراوانی هستند، بخش اصلی انرژی جهان را تأمین می کند 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 انرژی های تجدید پذیر از جمله سه انرژی خورشیدی و بادی و زمین گرمایی در جهان، باید توجه بیشتری بر روی به کارگیری و جایگزین کردن این منابع پاک به جای 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 پیش بینی مدل و تعیین مقادیر بهینه آن ها دنبال شد و نتایج نشان داد که ۱ متر مکعب در روز آب آشامیدنی ممکن است توسط پنل های 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 سیستم های شهرهای تهران، دوحه و استکهلم به ترتیب برابر با ۵۸۸/۰۹، ۱۲۵۵۶/۳۵ و ۲۶۵۶/۸۳ کیلووات بوده که دبی جرمی ۴۰ کیلوگرم بر ساعت است [۶]. سلامه و همکاران در سال ۲۰۲۲، یک سیستم خنک کننده جذبی-چیلر جذبی 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، هزینه ها را تا ۵۶،۸ درصد در مقایسه با سیستم فشرده سازی بخار معمولی کاهش می دهد. علاوه بر این، سیستم آن ها مصرف انرژی و رد پای 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 زمین گرمایی استفاده کردند. تعداد پانل های فتوولتائیک، ظرفیت توربین بخار، توان پیل سوختی، ظرفیت گرمایش پمپ حرارتی و ظرفیت سرمایش چیلر جذبی به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. ادغام اجزای ذخیره سازی باتری و هیدروژن در سیستم پیشنهادی حداکثر بازده ۹۰٪، ۶۰٪، ۲۳٪ و ۱۸٪ را برای الکترو لیز، سلول سوختی، پنل فتوولتائیک و ژنراتور الکتریکی به دست می آید [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].

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 انرژی است و بازده انرژی ۲۹،۷ درصد و راندمان انرژی ۴،۵ درصد گزارش شد. از نظر تلفات انرژی 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 انرژی 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 انرژی بهینه شود [۲۵]. کائو و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی سیستم انرژی متصل به شبکه زمین‌گرمایی-خورشیدی پرداختند. اجزا این سیستم پنل‌های 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 سیستم خنک‌کننده -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 تجدیدپذیر 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]. پریو 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 انرژی، 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

یک ساختمان مسکونی را در طول سال تأمین کند [۱۷]. سالیم و همکاران در سال ۲۰۲۰، بر روی طراحی و بهینه سازی یک سیستم هیبریدی برای تولید خورشیدی-هیدروژن که شامل پنل فتوولتائیک، الکترولیزر، سلول سوختی، باتری. واحد ذخیره سازی هیدروژن کار کردند و شبیه سازی یک آبگرمکن خورشیدی با یک جمع کننده لوله شیشه ای 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 مبتنی 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 بهینه سازی چند هدفه بر روی یک سیستم تجدید پذیر ترکیبی مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست توده انجام دادند. اهداف طراحی این سیستم تولید برق، گرمایشی، خنک کننده، تولید هیدروژن و آب آشامیدنی بود [۲۰]. مشرواتی و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بهینه سازی چندهدفه گازی سازی زیست توده برای تولید برق و آب شیرین شده با استفاده از بهینه ساز 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 نمک زدایی چند اثر با فشرده سازی بخار حرارتی است [۲۱].

در این مطالعه به بررسی ترمودینامیکی، اقتصادی، بهینه سازی و تحلیل منطقه ای یک سیستم تولید برق، هیدروژن، اکسیژن، سرمایش و گرمایش و گرمایش با استفاده ترکیبی از مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی و انرژی زمین گرمایی متشکل از تعدادی توربین بادی، پنل خورشیدی، توربین بخار و پیل سوختی برای افزایش تولید برق، الکترولیزر غشای تبادلی 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 می شود برای اولین بار انجام می شود. جهت بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی یک مطالعه موردی برای مناطق مختلف که دارای پتانسیل بالایی از سرعت باد، خورشید و زمین گرمایی باشند، انجام می شود. لازم به ذکر است عملکرد سیستم در بهینه ترین و بهترین حالت خود که توسط بهینه سازی با روش سطح پاسخ در نرم افزار دیزاین اکسپرت محاسبه می شود، بررسی می شود. هدف و نوآوری این مطالعه تولید محصولات پاک توسط سیستم پیشنهادی است. برای مدل سازی و به دست آوردن نتایج نرم افزار ترمودینامیکی از نرم افزار شبیه سازی گذرای ترنسیس استفاده می شود.

با توجه به اینکه این سیستم به عنوان یک نیروگاه می تواند 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 می شود و عملکرد سیستم در شهر ساحلی بندرانزلی با در نظر داشتن پتانسیل بالای سه انرژی تجدید پذیر پیشنهادی بررسی می شود. در نهایت میزان برق تولیدی سیستم توسط توربین بادی، پنل خورشیدی، توربین بخار و پیل سوختی برای تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان های مسکونی در طول سال بررسی خواهد شد.

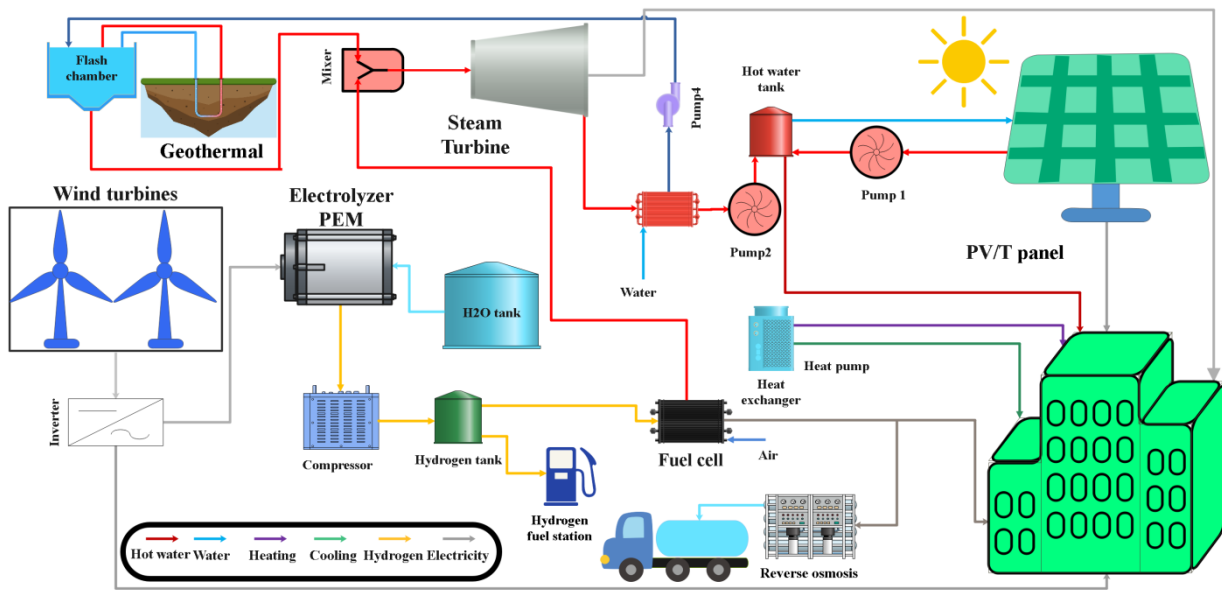
به طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

- استفاده از سه انرژی پرتانسیل خورشیدی، بادی و زمین گرمایی برای راه اندازی یک نیروگاه تجدید پذیر تولید چندانگانه انرژی.
- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای مزرعه بادی، مزرعه خورشیدی، پیل سوختی، الکترولیزر غشای تبادلی،

- 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 تبادلی 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. پیل سوختی به‌عنوان پشتیبان سیستم پیشنهادی نقش بسیار مهمی در پایدار نمودن تولید 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.

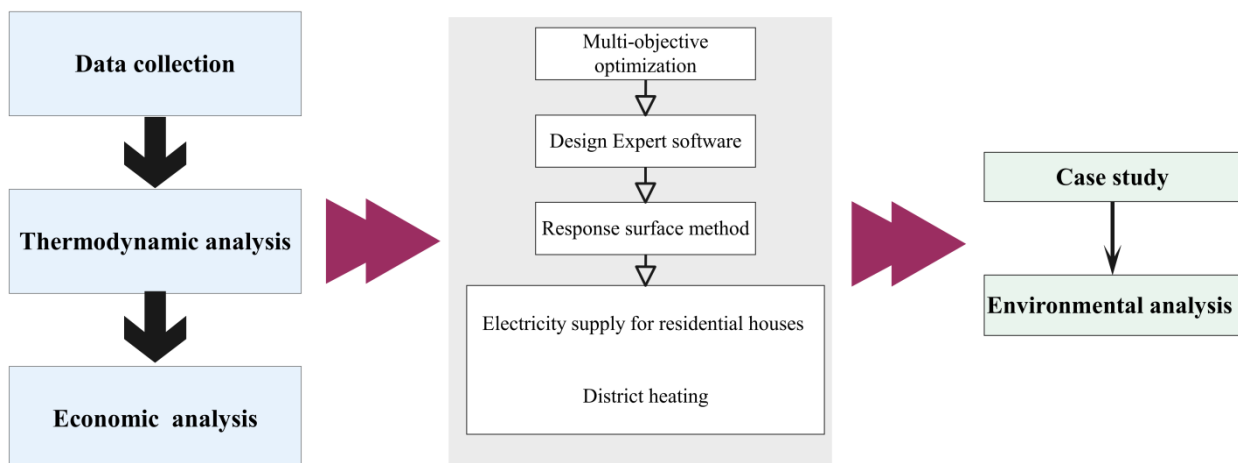


شکل ۱- شماتیک سیستم.

### ۳- روش شناسی پژوهش

فلوچارت روش حل پژوهش در شکل ۲ معرفی شده است.

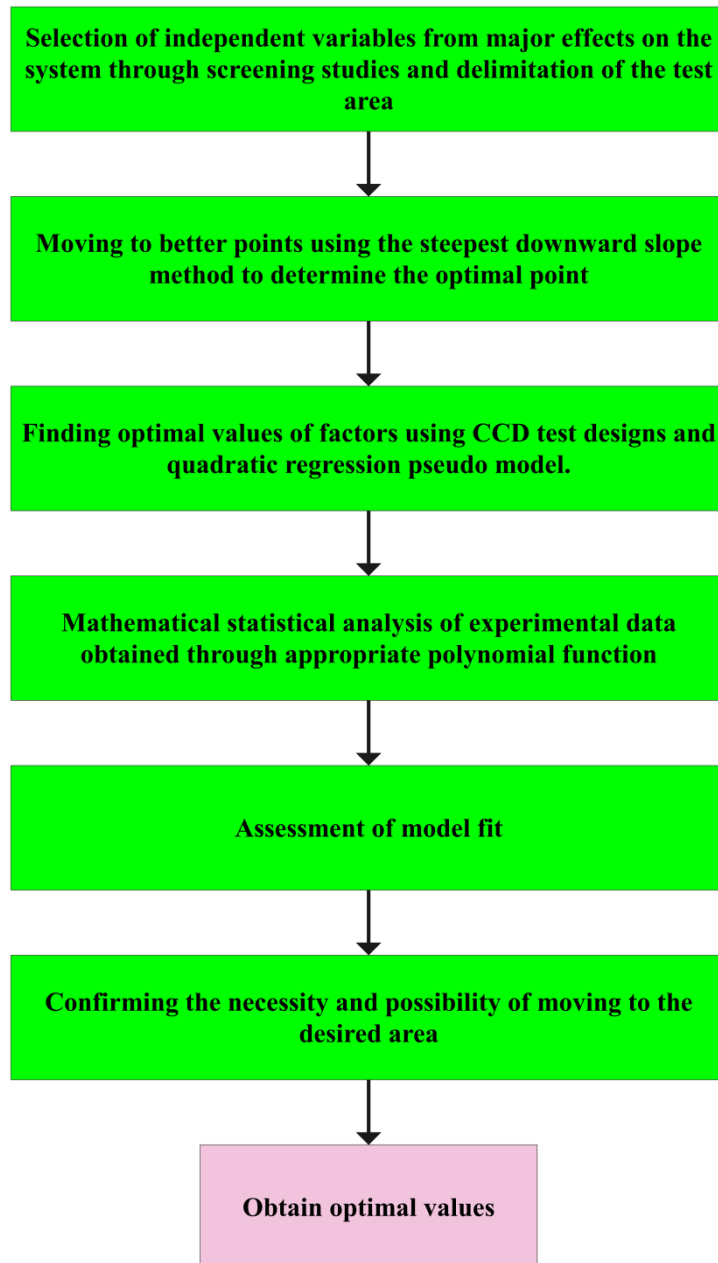
- شبیه سازی گذرا سیستم با استفاده از نرم افزار TRNSYS انجام می شود.
- داده های آب و هوایی شهرهای مطالعاتی با استفاده از نرم افزار متانورم به دست آمده است.
- بهینه سازی چندهدفه برای محاسبه بهترین مقدار برای توابع هدف و متغیرهای تصمیم گیری با استفاده از روش سطح پاسخ و نرم افزار دیزاین اکسپرت انجام می شود.
- گزارش ساعتی عملکرد سیستم در شهر بندرانزلی.



شکل ۲- فلوچارت روش حل

#### 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.

جدول ۱- روابط حاکم بر مسئله [۲۴-۳۳].

| رابطه                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | تجهیز                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $E_{PV/T} = (\tau\alpha)_n \cdot IAM \cdot G_T \cdot A \cdot \eta_{PV/T}$                                                                                                                                                                                                                               | الکتریسیته تولید شده توسط این پنل خورشیدی |
| $T_{f,out} = \left( T_{f,in} + \frac{\varepsilon_m}{\kappa} \right) \exp \left( \frac{N_{tubes} \kappa}{\dot{m}_{fcf} \theta} L \right) - \frac{\varepsilon_m}{\kappa}$                                                                                                                                 | دمای خروجی سیال از پنل خورشیدی            |
| $U_{cell} = \frac{U_{mod}}{n_{c,ser}}$                                                                                                                                                                                                                                                                  | ولتاژ پیل سوختی                           |
| $E_{stack} = U_{stack} I_{stack}$                                                                                                                                                                                                                                                                       | توان خروجی پیل سوختی                      |
| $Q_{gen} = E_{stack} \left( \frac{1 - \eta_E}{\eta_E} \right)$                                                                                                                                                                                                                                          | گرمای کلی تولید شده از پیل سوختی          |
| $\dot{V}_{H_2} = \frac{n_{c,ser} n_{m,ser} I_{FC}}{zF \rho_{gas}} S_{H_2} \eta_F$                                                                                                                                                                                                                       | مصرف هیدروژن پیل سوختی                    |
| $\left\{ \begin{array}{l} f_{totCool} = tc_1 + tc_2 T_{wb,in} + tc_3 T_{wb,in}^2 + tc_4 T_{db,amb} + \\ tc_5 T_{db,amb}^2 + tc_6 T_{wb,in} T_{db,amb} \end{array} \right. f_{sensCool} = sc_1 + sc_2 T_{wb,in} + \\ sc_3 T_{wb,in}^2 + sc_4 T_{db,amb} + sc_5 T_{db,amb}^2 + sc_6 T_{wb,in} T_{db,amb}$ | ضریب سرمایش پمپ حرارتی                    |
| $\left\{ \begin{array}{l} f_{EIR,c} = cp_1 + cp_2 T_{wb,in} + cp_3 T_{wb,in}^2 + cp_4 T_{db,amb} + \\ cp_5 T_{db,amb}^2 + cp_6 T_{wb,in} T_{db,amb} \end{array} \right. \\ f_{Bypass} = bf_1 + bf_2 T_{wb,in} + bf_3 T_{wb,in}^2 + bf_4 T_{db,amb} + \\ bf_5 T_{db,amb}^2 + bf_6 T_{wb,in} T_{db,amb}$  | ضریب گرمایش پمپ حرارتی                    |
| $\left\{ \begin{array}{l} f_{heat} = th_1 + th_2 T_{wb,in} + th_3 T_{wb,in}^2 + th_4 T_{db,amb} + \\ th_5 T_{db,amb}^2 + th_6 T_{wb,in} T_{db,amb} \end{array} \right. \\ f_{EIR,h} = hp_1 + hp_2 T_{wb,in} + hp_3 T_{wb,in}^2 + hp_4 T_{db,amb} + \\ hp_5 T_{db,amb}^2 + hp_6 T_{wb,in} T_{db,amb}$    | ضریب گرمایش پمپ حرارتی                    |
| $\dot{W}_{RO,Pump} = 0.15 \times \dot{W}_{total} = (1000 \times \Delta T_{net} \times M) / (3600 \times \rho \times \eta_{pump,RO})$                                                                                                                                                                    | کار خروجی پمپ اسمز معکوس                  |
| $\dot{W}_{RO,Turbin} = (1000 \times \Delta T_{net} \times M \times \eta_{Turbin,RO}) / (3600 \times \rho)$                                                                                                                                                                                              | کار خروجی توربین اسمز معکوس               |
| $\dot{W}_{net,RO} = (\dot{W}_{RO,Pump} - \dot{W}_{RO,Turbin})$                                                                                                                                                                                                                                          | کار کل اسمز معکوس                         |
| $\dot{n}_{H_2} = \eta_f N_{cells} \frac{I_{ely}}{nF}$                                                                                                                                                                                                                                                   | نرخ تولید هیدروژن واحد الکترولایزر        |
| $E_{WT} = \rho_a C_p A_r v^3$                                                                                                                                                                                                                                                                           | توان تولیدی توربین بادی                   |
| $C_p = 4a(1-a)^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                           |

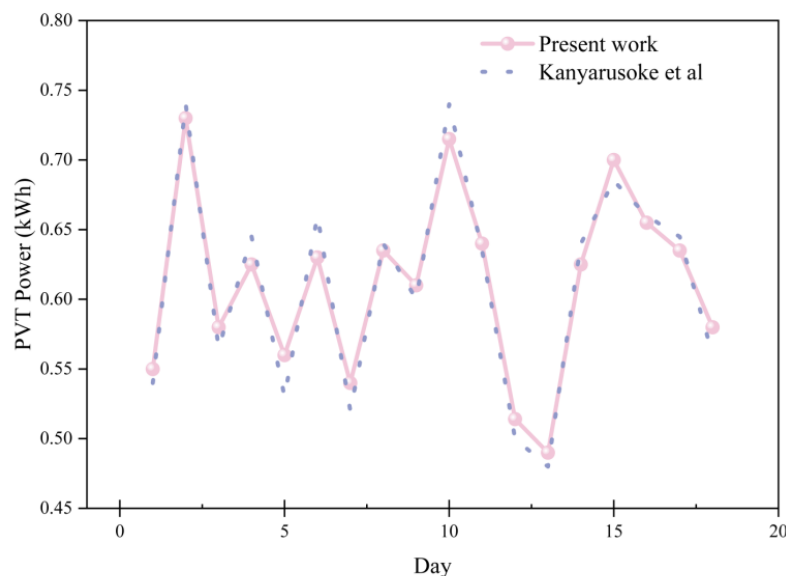
جهت اطلاعات بیشتر از روابط مورد بررسی جهت انالیز سیستم می توان به مراجع [۲۴-۳۳] رجوع کرد و شرایط حل مسئله را

بررسی کرد.

## ۶-نتایج

## ۶-۱- اعتبارسنجی

به علت اینکه سیستم ارائه شده، یک سیستم جدید است، پنل فتوولتائیک-حرارتی جهت اعتبارسنجی انتخاب شد. اعتبار سنجی پنل های فتوولتائیک حرارتی نشان داده شده در نرم افزار 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 نشان دهنده اعتبار خوب این شبیه سازی گذرا و درصد خطای بسیار پایین است.

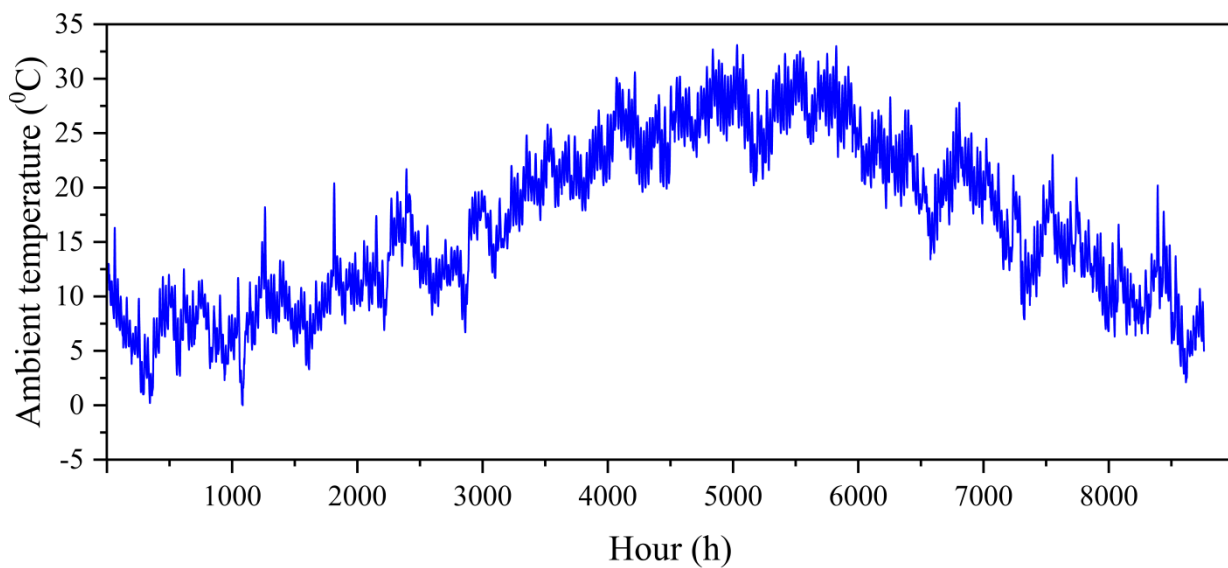


شکل ۴- اعتبارسنجی.

## ۶-۲- مطالعه موردی

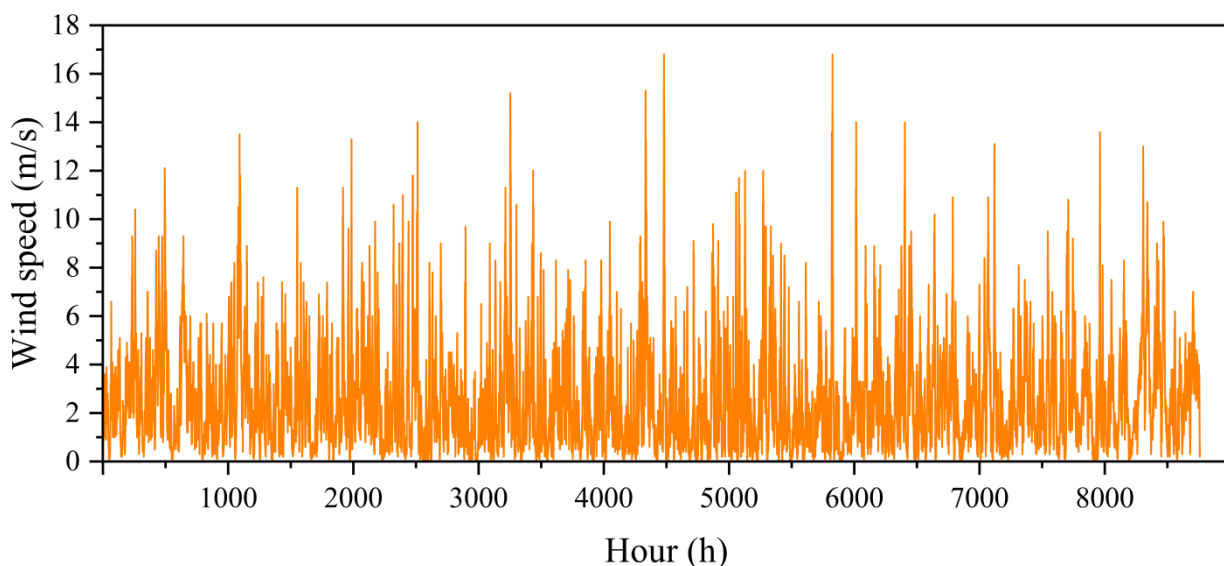
با توجه به وابستگی سیستم به سه انرژی تجدید پذیر، تاثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی، سرعت باد و دمای محیط شهر بندرانزلی به صورت ساعتی بر روی عملکرد سیستم بررسی شد. منطقه انتخابی علاوه بر داشتن پتانسیل بالای انرژی های تجدید پذیر دسترسی خوبی با آب دریا دارد و جز مناطق ساحلی محسوب می شود. همچنین با توجه به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

تغییرات دمای محیط در طول سال به صورت 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.



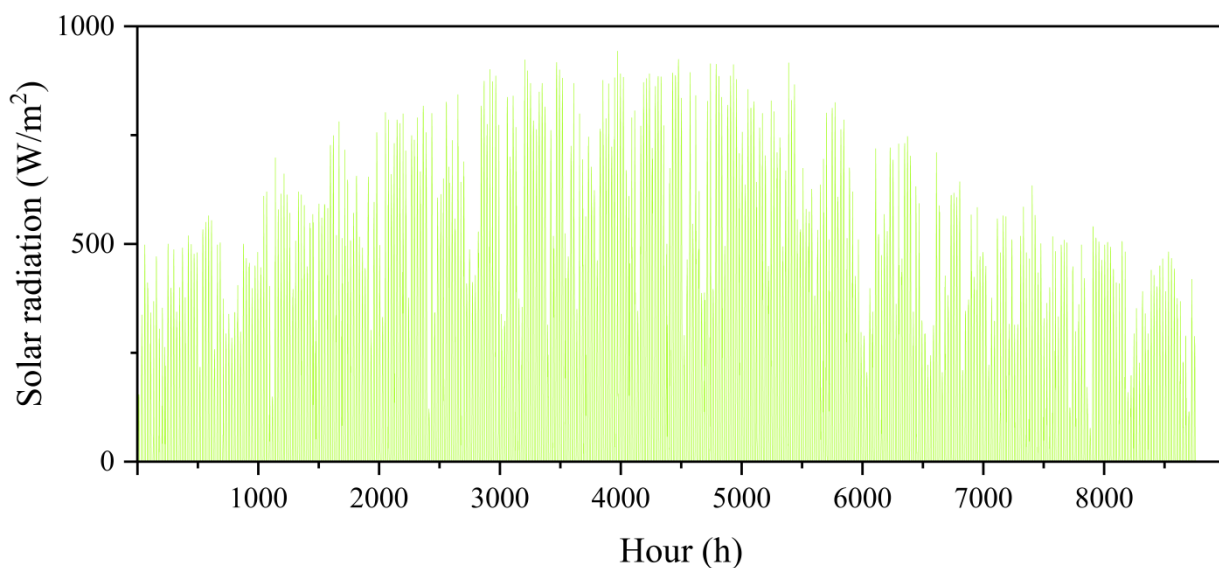
شکل ۵- تغییرات دمای محیط بندرانزلی به صورت ساعتی.

تغییرات سرعت باد در طول سال به صورت 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 می شوند که از پتانسیل بالای انرژی بادی در ساعت برخوردار هستند و به همین دلیل جهت راه اندازی نیروگاه های بادی مناسب است.



شکل ۶- تغییرات سرعت باد بندرانزلی به صورت ساعتی.

تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول سال به صورت 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.



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

### ۳-۶- بهینه‌سازی

بهینه‌سازی چند هدفه این پژوهش با روش سطح پاسخ و با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عملکرد برای آنالیز 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 ترنسپس ۳۲ مرحله ران گرفته شد و سپس نتایج گرفته شده از نرم‌افزار ترنسپس 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.

| 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        |

|    |         |       |        |        |        |             |            |       |
|----|---------|-------|--------|--------|--------|-------------|------------|-------|
| 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 |

|    |         |       |        |        |        |             |            |       |
|----|---------|-------|--------|--------|--------|-------------|------------|-------|
| 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 |

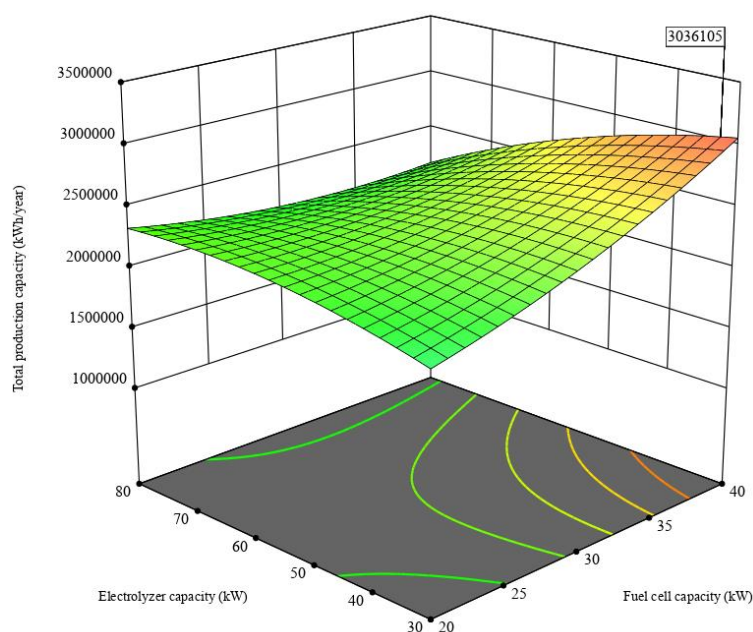
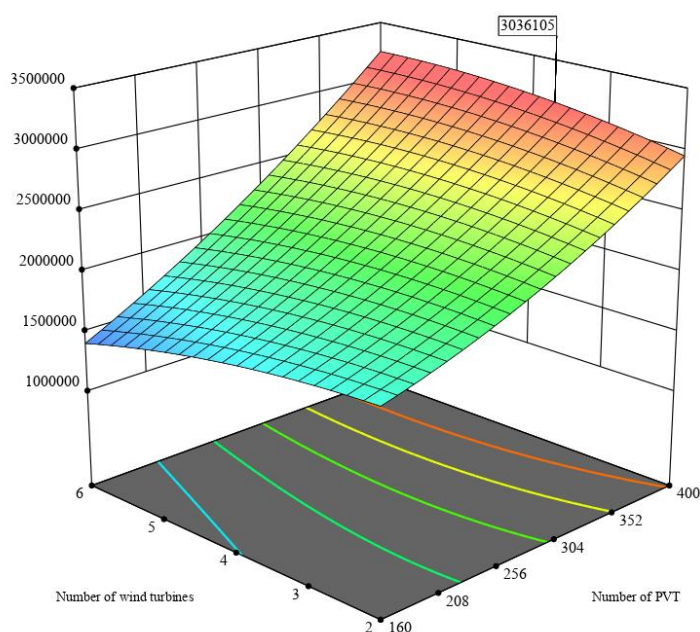
|     |         |       |        |        |        |             |            |       |
|-----|---------|-------|--------|--------|--------|-------------|------------|-------|
| 81  | 387.500 | 2.627 | 20.072 | 50.819 | 75.175 | 2231263.610 | 663518.165 | 0.723 |
| 82  | 387.500 | 3.956 | 31.502 | 47.052 | 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 |

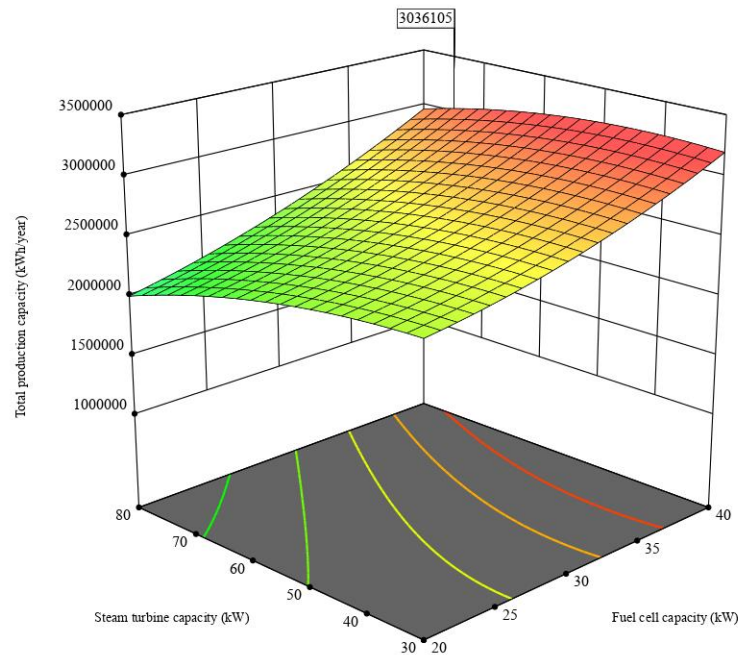
در جدول ۵، نتیجه بهینه‌ترین راه حل به دست آمده از روش سطح پاسخ برای تعیین مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف ارائه شده است. این نتایج از بین ۱۰۰ نقطه بهینه انتخاب شده توسط روش سطح پاسخ و درجه‌بندی بر اساس درصد مطلوبیت نتایج ارائه شده است. درصد مطلوبیت نقطه ۱ برابر با ۰٫۷۹۱ درصد است.

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        |

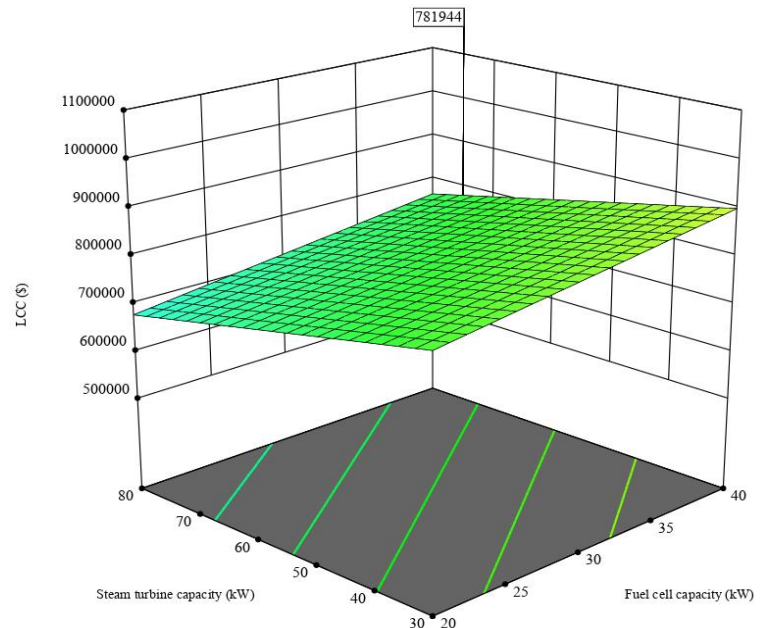
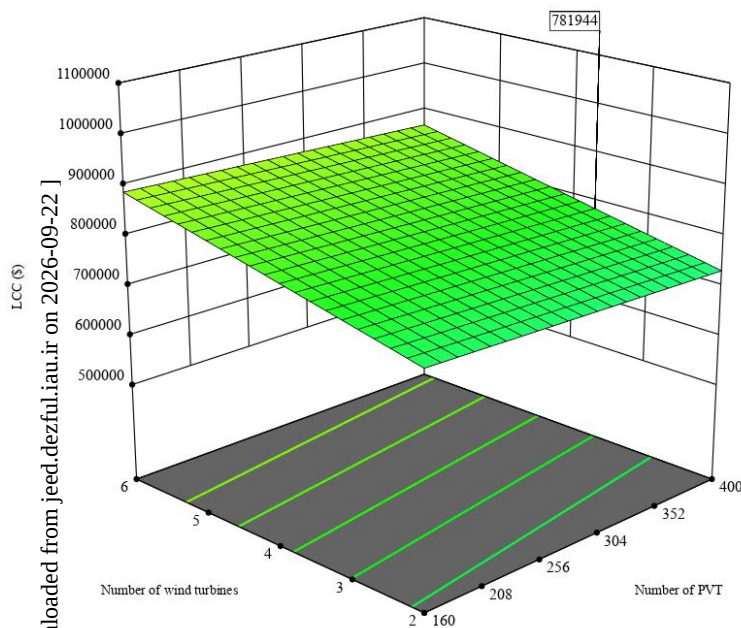
این بخش به ارزیابی متغیرهای طراحی بر روی پاسخ‌های فنی-اقتصادی سیستم مورد بررسی اختصاص دارد. نمودارهای دو بعدی به بررسی تغییرات هم‌زمان دو پارامتر بر روی توابع هدف می‌پردازد. در شکل ۸ تاثیر تغییرات هم‌زمان دو پارامتر ورودی بر روی تابع هدف تولید برق نشان داده شده است. تمامی متغیرها در تلاش‌اند که میزان برق تولیدی سیستم را به حالت بهینه که  $3036105$  کیلووات ساعت است، برسانند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد 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.

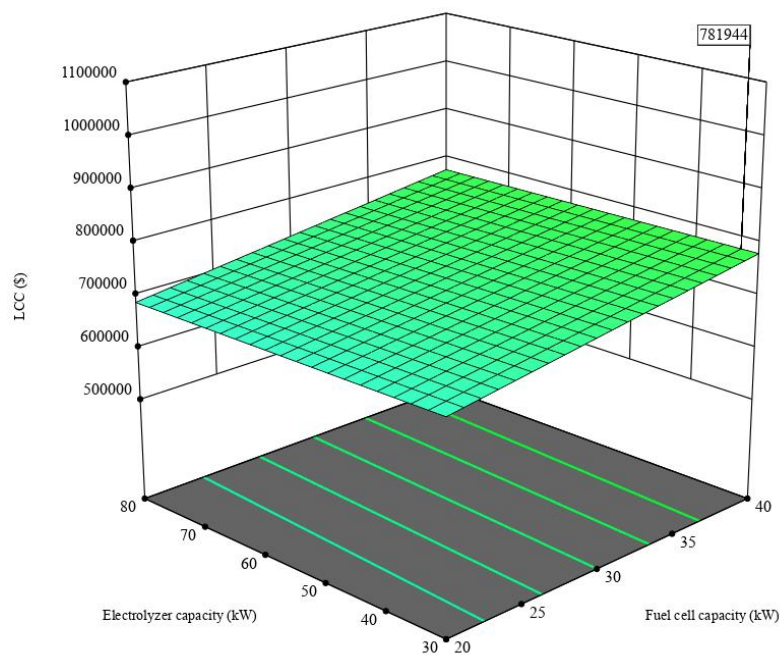




شکل ۸- اثرات متقابل متغیرهای طراحی بر تولید برق

در شکل ۹ تاثیر تغییرات همزمان دو پارامتر ورودی بر روی تابع هدف هزینه چرخه عمر نشان داده شده است. تمامی متغیرها در تلاش اند که هزینه چرخه عمر سیستم را به حالت بهینه که ۷۸۱۹۴۴٫۲۵۴ دلار است، برسانند. همانطور که نتایج نشان می دهد از تأثیرگذارترین متغیرهای تصمیم گیری 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.

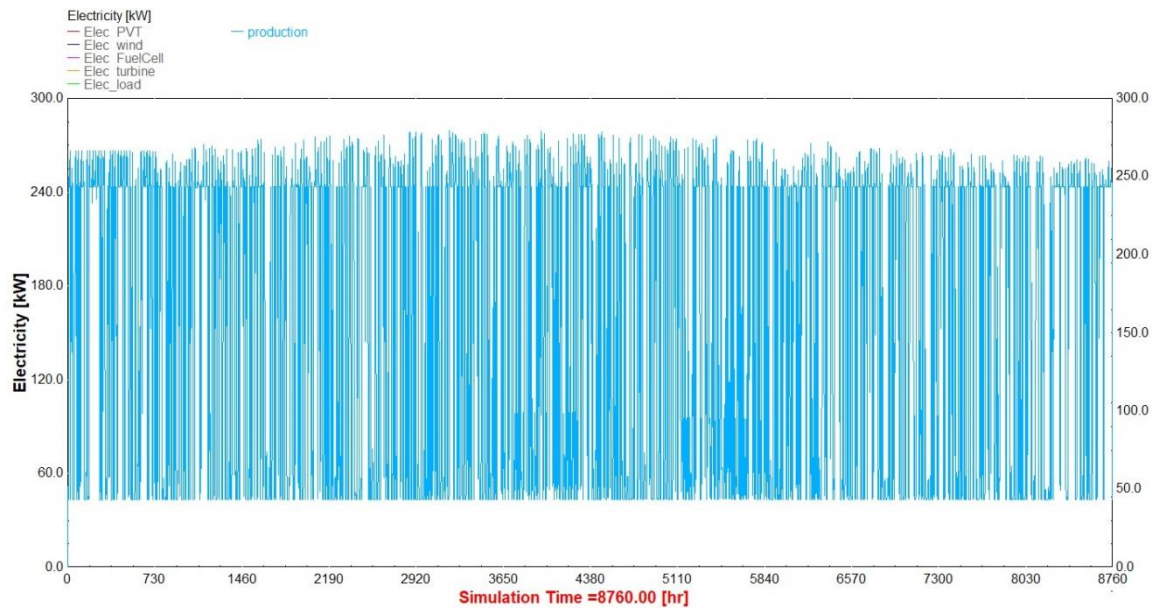




شکل ۹- اثرات متقابل متغیرهای طراحی بر هزینه چرخه عمر

#### ۴-۶- عملکرد ساعتی سیستم

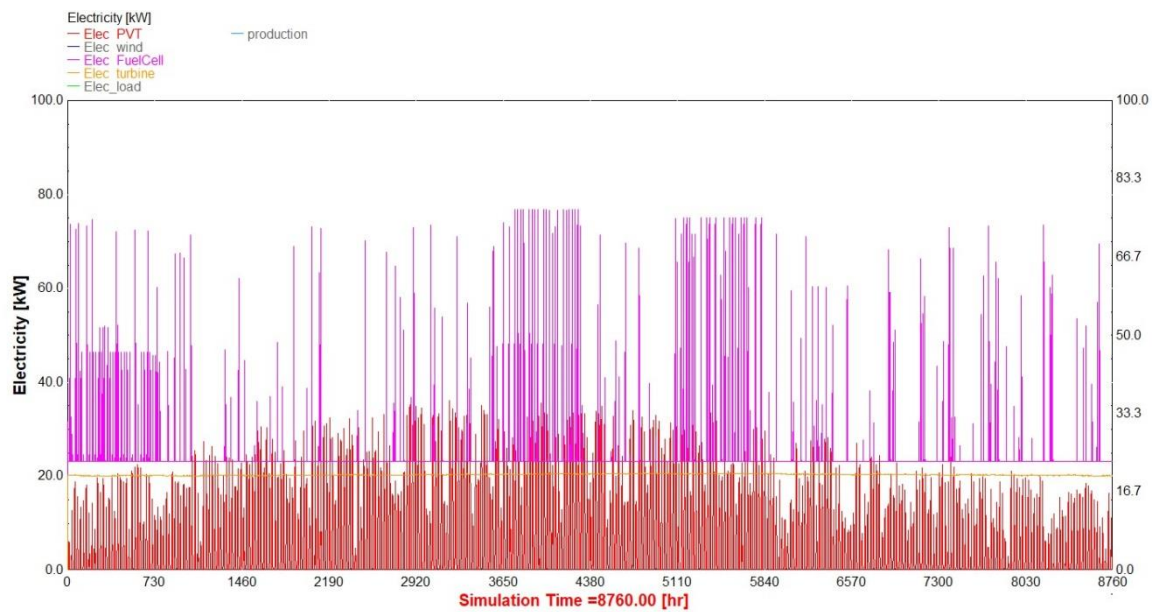
در شکل ۱۰ میزان برق تولیدی سیستم پیشنهادی به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) در طول بررسی شده است. تولید برق بر عهده توربین بادی، توربین بخار، پیل سوختی و پیل فتولتائیک/حرارتی است. انرژی توربین بادی توسط باد، انرژی پیل توسط خورشیدی و انرژی توربین بخار از انرژی زمین گرمایی و پیل سوختی تأمین می شود. پس باید گفت با افزایش یا کاهش شدت تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد در طول سال میزان برق تولیدی سیستم تغییر می کند. 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 ماه های گرم سال است چرا که انرژی خورشیدی افزایش می یابد. همانطور که نتایج نشان می دهد به دلیل کاهش و افزایش شدت تابش خورشیدی در طول روز و همچنین ماه های سال، نوسانات تولید برق توسط پیل خورشیدی زیاد است.



شکل ۱۰- عملکرد ساعتی سیستم در تولید برق.

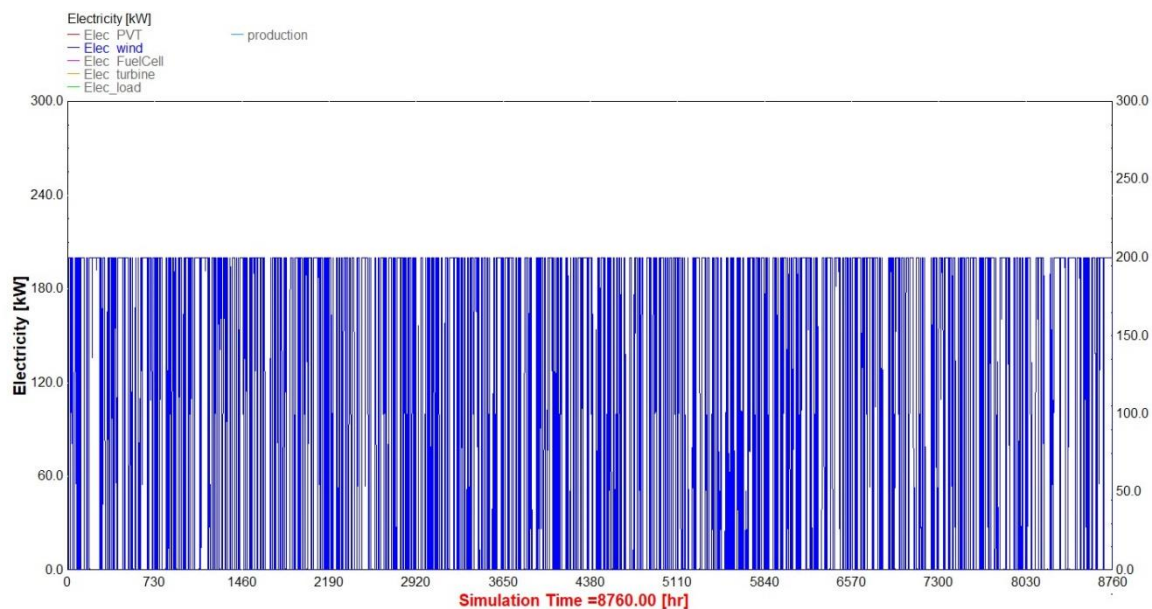
در شکل ۱۱ میزان برق تولیدی پنل های خورشیدی، پیل سوختی و توربین بخار به صورت ساعتی (۸۷۶۰ ساعت) در طول بررسی شده است. نتایج نشان می دهد کمترین میزان برق تولیدی پنل های خورشیدی در طول سال در ۰ کیلووات ساعت (در ساعاتی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، برقی توسط پنل ها تولید نمی شود) است و بیشترین توان تولیدی پنل ها خورشیدی در طول سال حدود ۴۰ کیلووات ساعت است که در فصل تابستان و ماه های 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 می شود و برق مورد نیاز الکترولایزر نیز توسط توربین های بادی تأمین می شود 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 زمین گرمایی که یک انرژی پایدار است، نوسانات کمی داشته و می توان 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 زمین گرمایی را ندارد.



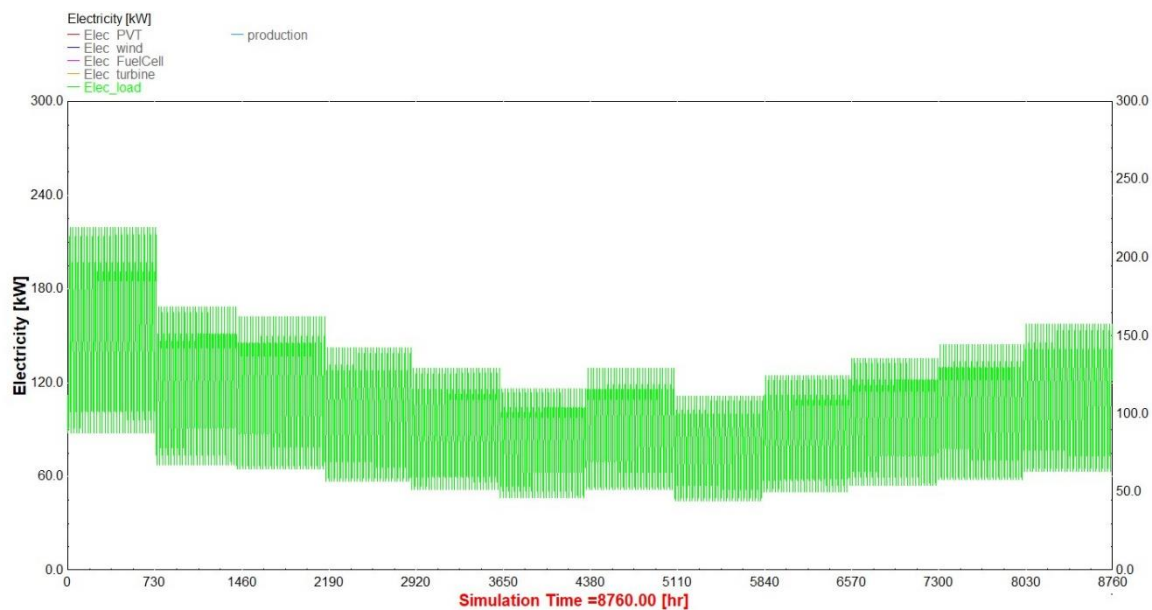
شکل ۱۱- عملکرد ساعتی پنل های خورشیدی، پیل سوختی و توربین بخار در تولید برق.

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 توربین های بادی تولید نمی شود) 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.



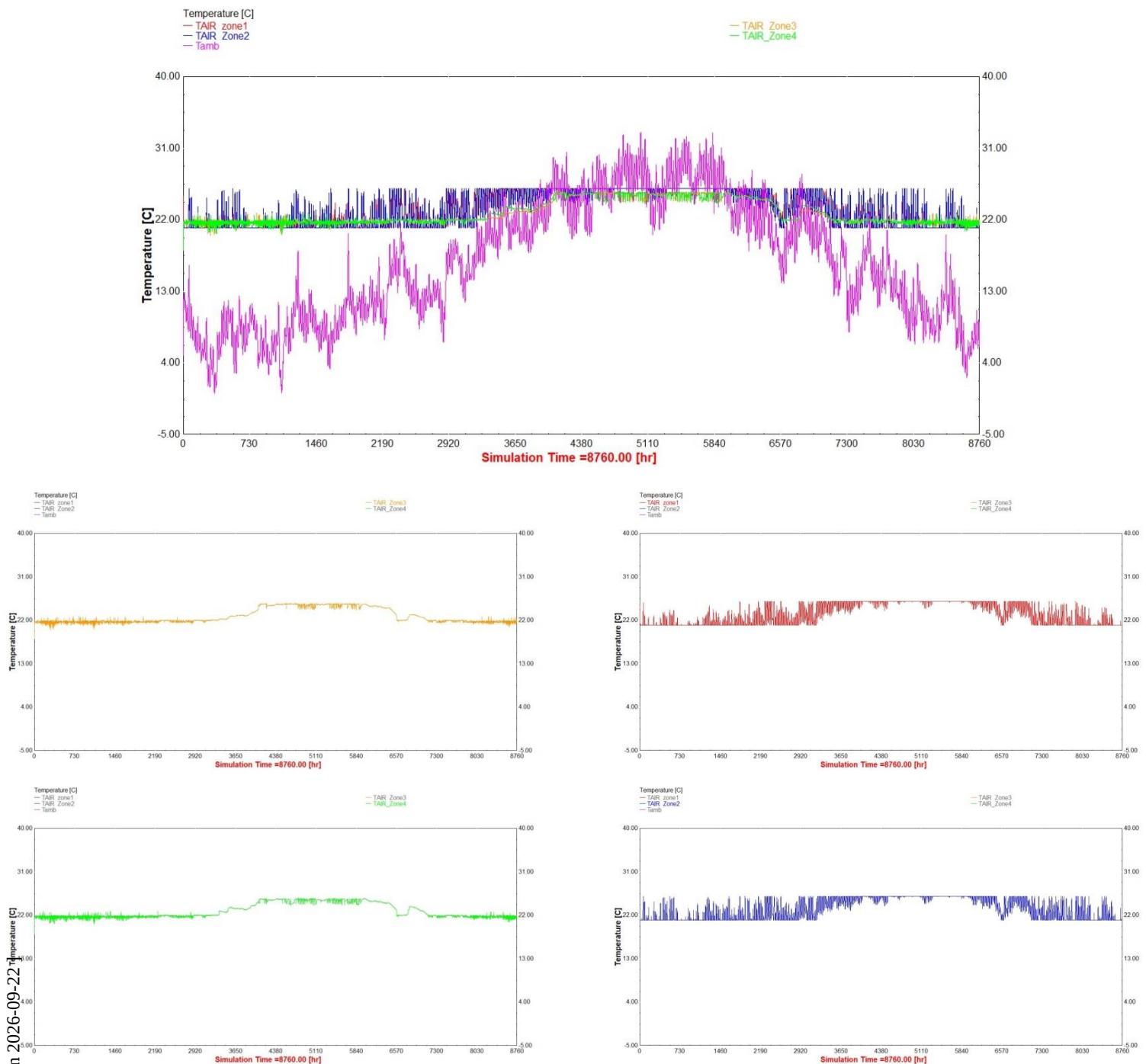
شکل ۱۲- عملکرد ساعتی مزرعه بادی در تولید برق.

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

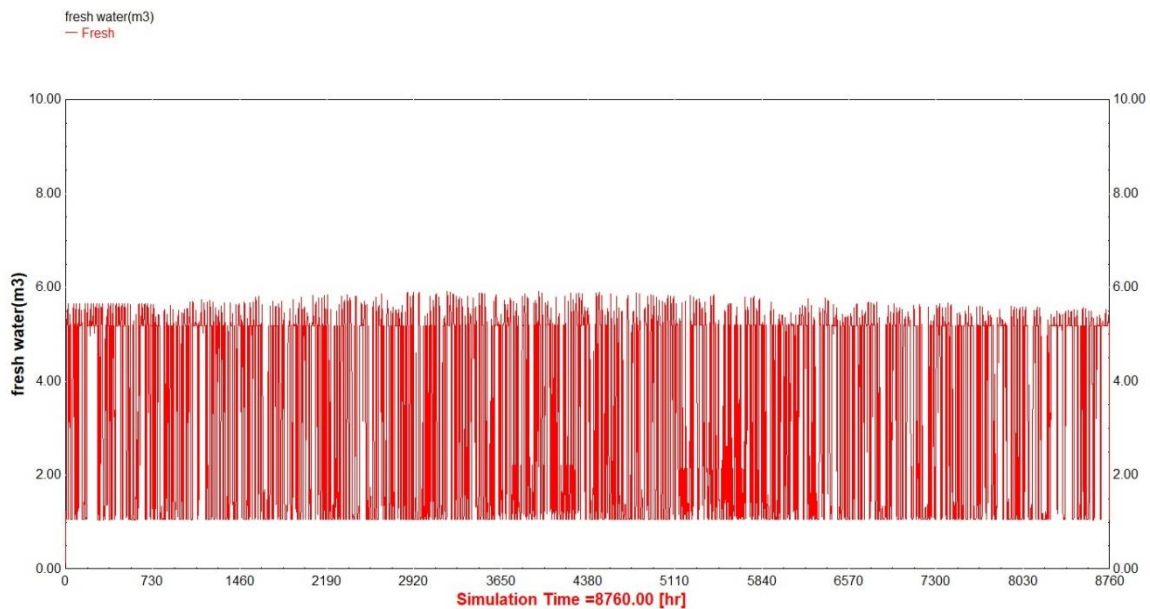
در شکل ۱۴ میزان دمای محیط و دمای زون های انتخابی داخل ساختمان بررسی شده است. همانطور که قبلاً بیان شد، شهر بندر انزلی در طول سال به بار گرمایشی بیشتری نسبت به بار سرمایشی برای رسیدن به ضریب آسایش حرارتی مناسب برای ساختمان‌ها احتیاج دارد. دمای آسایش داخل ساختمان بین ۲۳ تا ۲۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته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



شکل ۱۴- دمای محیط و دمای داخل ساختمان

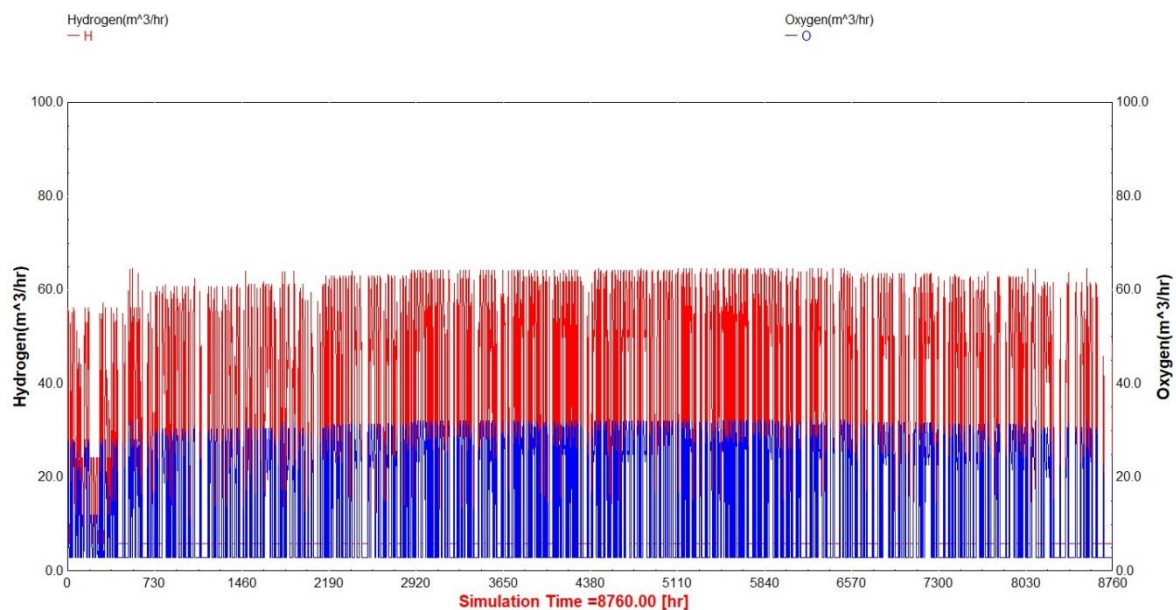
در شکل ۱۵ تغییرات آب شیرین تولیدی سیستم توسط واحد نمک زدای اسمز معکوس با دریافت آب شور دریا در طول سال به صورت ساعتی در شهر بندرانزلی نشان داده شده است. برق مورد نیاز واحد نمک زدای اسمز معکوس توسط واحد پیل سوختی تأمین می شود، پس به عبارتی با افزایش یا کاهش توان تولیدی پیل سوختی، آب شیرین تولیدی سیستم نیز افزایش یا کاهش می یابد. 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 تأمین کننده برق مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن و تأمین سوخت پیل

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.

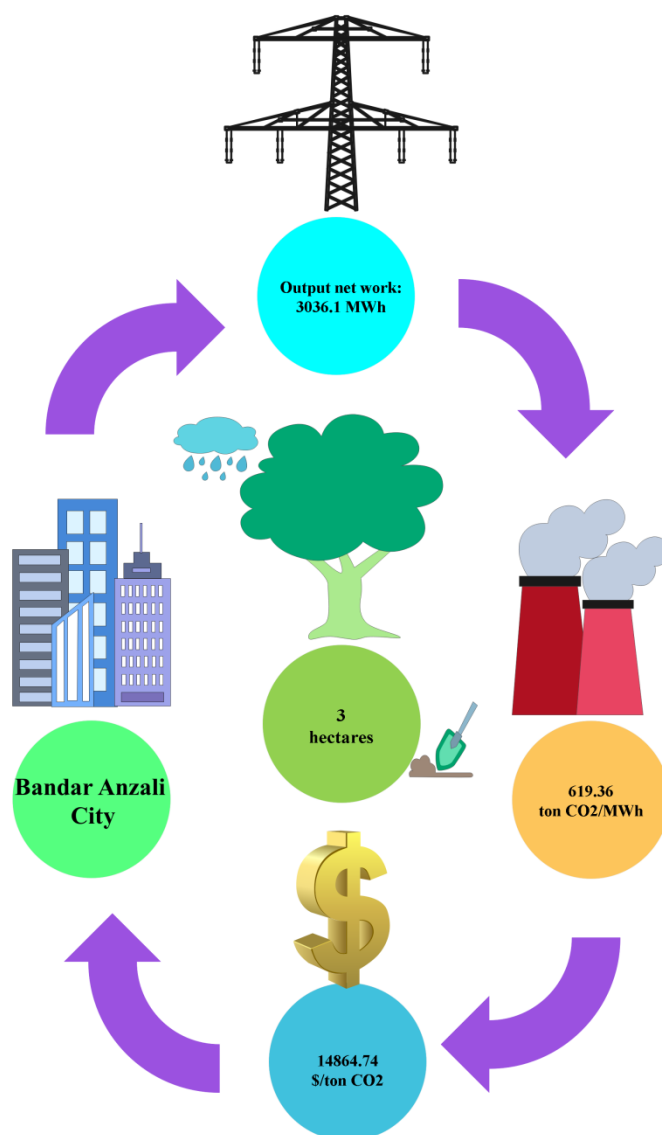
در شکل ۱۶ تغییرات میزان هیدروژن و اکسیژن سیستم توسط واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون در طول سال به صورت ساعتی نشان داده شده است. برق مورد نیاز واحد الکترولایزر توربین‌های بادی تأمین می‌شود و به عبارتی با انرژی بادی که تأمین‌کننده برق مورد نیاز الکترولایزر برای تولید هیدروژن است، ارتباط مستقیم دارد.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

## ۵-۶- آنالیز زیست محیطی

در شکل ۱۷ مزیت های زیست محیطی سیستم طراحی شده توضیح داده می شود. جهت مقایسه عملکرد سیستم تجدید پذیر کار حاضر و بررسی جلوگیری انتشار آلودگی های زیست محیطی باید گفت که به طور کلی ۰,۲۰۴ تن  $CO_2$  در نیروگاه های معمولی برای تولید یک مگاوات ساعت برق آزاد می شود؛ که نتایج نشان داد با راه اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی می توان از انتشار آلودگی به میزان ۶۱۹,۳۶ تن کربن دی اکسید جلوگیری کرد. علاوه بر این، در نیروگاه های فسیلی انتشار یک تن  $CO_2$  باعث هزینه زیست محیطی ۲۴ دلار می شود که با راه اندازی سیستم پیشنهادی در شهر بندرانزلی از هزینه ۱۴۸۶۴,۷۴ دلار برای محیط زیست جلوگیری کرد. همچنین برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب ته نشینی در نظر گرفته شد که با راه اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان ۳۰۳۶,۱ مگاوات سالیانه می توان به گسترش ۳ هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد [۳۵].



شکل ۲۵- آنالیز زیست محیطی عملکرد سیستم.

## ۷- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به آنالیز یک سیستم تجدید پذیر مبتنی بر انرژی بادی، خورشیدی و زمین گرمایی با ترکیبی هدفمند از واحدهای پیل سوختی، پمپ حرارتی، الکتروایزر غشای تبادل پروتون، توربین بخار و اسمز معکوس پرداخته شد. مدل سازی و شبیه سازی گذرا سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم افزار TRNSYS انجام می شود. یک بررسی موردی جهت امکان سنجی راه اندازی سیستم پیشنهادی در شهر ساحلی بندر انزلی انجام شد. بهینه سازی عملکرد سیستم با تعیین دو تابع هدف توان تولیدی و هزینه چرخه عمر سیستم با روش سطح پاسخ و نرم افزار 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 الکتروایزر غشای تبادل پروتون به عنوان متغیرهای بهینه سازی انتخاب شدند.

سیستم در بهینه ترین حالت خود می تواند به توان تولیدی  $3036105.022$  کیلووات ساعت و هزینه چرخه عمر  $781944254$  دلاری برسد. نتایج زیست محیطی نشان داد که با راه اندازی سیستم در حالت بهینه و در شهر بندرانزلی و تولید برق به میزان  $3036.1$  مگاوات سالیانه می توان به گسترش  $3$  هکتاری فضای سبز در سال کمک کرد و به کاهش انتشار کربن دی اکسید به میزان  $619.36$  تن کربن دی اکسید با هزینه  $1486474$  دلار کمک کرد.

سایر نتایج پژوهش را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- دریافت اطلاعات آب و هوایی شهرهای مطالعاتی با استفاده از نرم افزار متانورم انجام شد.
- این سیستم برای تأمین نیازهای یک آپارتمان مسکونی با تعداد  $80$  واحد مسکونی ( $4$  ساختمان  $20$  واحدی) و  $320$  نفر به انرژی الکتریکی، سرمایش و گرمایش طراحی و بررسی شد.
- مطالعه پارامتریک نشان داد از تأثیرگذارترین پارامترهای طراحی می توان از تعداد توربین بادی و پنل فتوولتائیک حرارتی نام برد.

## علائم اختصاری

|                    |                                    |                 |                    |
|--------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------|
| $\rho$             | چگالی آب دریای ورودی به اسمز معکوس | $G_T$           | میزان تابش خورشیدی |
| $M$                | جرم مولی آب ورودی به اسمز معکوس    | $\tau\alpha$    | ضریب انتقال پذیری  |
| $\eta_{pump,RO}$   | بازده پمپ اسمز معکوس               | $A$             | مساحت پنل خورشیدی  |
| $\eta_{Turbin,RO}$ | بازده توربین اسمز معکوس            | $\eta$          | بازده پنل خورشیدی  |
| $\Delta T_{net}$   | اختلاف دمای آب ورودی به اسمز معکوس | $L$             | طول پنل            |
| $\rho_a$           | چگالی هوا                          | $\varepsilon_m$ | انتشار تابش        |
| $A_r$              | نشان دهنده مساحت روتور توربین بادی | $\theta$        | زاویه تابش         |
| $v$                | سرعت باد                           | $C_{P,max}$     | حداکثر ضریب توان   |
| $C_p$              | ضریب توان                          | $IAM$           | اصلاح کننده زاویه  |
| $a$                | ضریب القایی محوری                  |                 |                    |
| مخفف ها            |                                    |                 |                    |

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

## 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. Khanmohammadi, 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.

- 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 Kaviani, 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-based multi-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.

- 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 CO<sub>2</sub> 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.

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

Ali Dezhdar<sup>1</sup>, Ehsanollah Asareh<sup>\*1</sup>, Ali Ershadi<sup>1\*</sup>

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 CO<sub>2</sub> 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](mailto:assareh@iaud.ac.ir), [ali.ershadi@iau.ac.ir](mailto: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