

بهینه‌سازی یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی برای تولید توان و هیدروژن

علی بداخانیان، اکبر ملکی*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده: در این پژوهش یک سیستم ترکیبی تجدیدپذیر بر مبنای استفاده از انرژی‌های خورشیدی و حرارتی اقیانوسی برای تولید توان و هیدروژن با به کارگیری کلکتور خورشیدی صفحه تخت از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. توابع هدف مورد بررسی در این پژوهش بازده انرژی و نرخ هزینه در نظر گرفته شد. دبی جرمی کلکتور، مساحت کلکتور، دمای ورودی به توربین و شدت تابش خورشیدی به عنوان چهار متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شدند و تأثیر این پارامترها بر روی عملکرد سیستم و اتلاف انرژی سیستم بررسی شد. بهینه‌سازی توابع هدف با روش نلدر-مید انجام شد. از بهینه‌سازی تک هدفه نتیجه شد که بهترین نرخ بازده انرژی سیستم ۷/۳۱ درصد و نرخ هزینه سیستم ۲۷/۴۸ دلار بر ساعت در حالت بهینه است. از تحلیل حساسیت نتیجه شد که افزایش پارامترهای مساحت کلکتور، شدت تابش خورشیدی و دمای ورودی به توربین تأثیر مثبتی را بر روی عملکرد سیستم داشته است و افزایش پارامتر نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی تأثیر منفی بر روی عملکرد سیستم گذاشته است. همچنین از تحلیل اتلاف انرژی سیستم نتیجه شد که افزایش شدت تابش خورشیدی، مساحت کلکتور و همچنین نرخ دبی جرمی کلکتور باعث افزایش اتلاف انرژی کلی سیستم می‌شوند ولی افزایش دمای ورودی به توربین، باعث کاهش اتلاف انرژی سیستم می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم تجدیدپذیر، کلکتور خورشیدی صفحه تخت، تولید هیدروژن، انرژی، نرخ هزینه.

KEYWORDS: Renewable system, flat plate solar collector, hydrogen production, exergy, cost rate.

مقدمه

انرژی نیروی اصلی در جهان و زندگی را تعریف و حفظ می‌نماید. استفاده صحیح و حفظ آن برای نسل‌های آینده از وظایف اصلی نسل حاضر است [۱]. انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی از نگرانی‌های مشترک جوامع امروزی محسوب می‌شوند. پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی از قرن بیستم پدیدار شد. با مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی تهدیداتی از جمله گرمایش جهانی، تغییرات آب‌وهوا و باران اسیدی برای محیط‌زیست به وجود آمده، که سبب شده اکوسیستم‌های جهان در معرض آسیب‌های جدی قرار گیرند. به همین دلیل، جهت تثبیت آب‌وهوای

زمین و جلوگیری از گرم شدن بیشتر، نیاز به کاهش در تولید گازهای گلخانه‌ای موجود، در سال‌های آینده است [۲]. امروزه اهمیت سیستم‌های تجدیدپذیر و همچنین سیستم‌های تولید چندگانه انرژی به عنوان یک راه‌حل قوی برای تأمین انرژی مورد نیاز جوامع مختلف و همچنین کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی شناخته می‌شوند. از انرژی‌های خورشیدی جهت تولید هیدروژن به عنوان یک انرژی و سوخت پاک استفاده شده است و مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده است که نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد که توجه به تولید

*Email: akbar.maleki20@yahoo.com & a_maleki@shahroodut.ac.ir

*عهده‌دار مکاتبات

انجام تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی استفاده شد. نتیجه شد که بازده انرژی و بازده انرژی سیستم به ترتیب ۱۶/۲۸ درصد و ۳۶/۳۵ درصد است [۹]. لی و همکاران^۹ در سال ۲۰۲۰ میلادی، بر روی بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تجدیدپذیر یکپارچه که شامل استفاده از چندین منبع انرژی بود، کار کردند و هدف آن‌ها بهبود بهره‌وری انرژی و عملکرد سیستم بیان شد. یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه بر اساس محدودیت‌های تصادفی شبکه انرژی برای به حداقل رساندن هزینه سرمایه‌گذاری و عملکرد خط لوله انرژی ایجاد شد. در نهایت، برای تأیید اثربخشی و کاربرد مدل و روش پیشنهادی، برای شهر یانگژیانگ^{۱۰} چین شبیه‌سازی شد [۱۰]. جیانگ و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی یک سیستم ترکیبی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر جهت افزایش عملکرد سیستم و تولید توان برای شرایط آب‌وهوایی متغیر کار کردند. در این پژوهش در ابتدا عملکرد طولانی‌مدت چند سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی و یک سیستم انرژی آبی مدل شد. نتیجه شد که ادغام نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی به‌طور قابل‌توجهی قدرت سیستم را در مقایسه با منابع انرژی آبی در شرایط نامشخص اقلیمی بهبود می‌بخشد. نتیجه شد که نیروگاه ترکیبی از انرژی‌های آب-خورشیدی-بادی، عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم انرژی آبی دارد [۱۱]. کائو و همکاران^{۱۲} در سال ۲۰۲۱ میلادی بر روی تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید توان و حرارت مبتنی بر انرژی خورشیدی کار کردند. خالص تولید برق، بازده انرژی و هزینه کل به‌عنوان توابع هدف انتخاب شد. سیستم تولید هم‌زمان برق، سرما و حرارت (CCHP)^{۱۳}، شامل کلکتور خورشیدی، سیکل ارگانیک رانکین، یک مبدل حرارتی برای تولید حرارت و یک سردکن جذبی یک اثر بود. نتیجه شد که نسبت جرم روغن تأثیر قابل‌توجهی بر معیارهای انرژی و هزینه سیستم در طول روز دارد [۱۲]. محمدی و هریبی^{۱۴} در سال ۲۰۲۰ میلادی، بر روی مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم خورشیدی تولید سرمایش کار کردند. پارامترهای طراحی شامل دمای آب گرم، سرد و میزان دبی جرمی و زمان در نظر گرفته شد [۱۳]. نظری و همکاران در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی تجزیه و تحلیل اقتصادی

هیدروژن می‌توان باعث افزایش امنیت انرژی و تأمین سوخت مورد نیاز وسایلی همانند اتومبیل‌ها که با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند، شود و به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک کند [۵-۳]. هرناندز رومرو و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۰ میلادی، بر روی طراحی بهینه سیستم‌های تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس کار کردند. آن‌ها بیان کردند که سیستم‌های تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس^۲ (OTEC) یک جایگزین اقتصادی جذاب در جوامعی است که در مناطق ساحلی به‌منظور تولید برق پاک برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این پژوهش یک بهینه‌سازی چندهدفه برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های انرژی حرارتی اقیانوس با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)^۳ انجام شد. هدف این مطالعه، به حداقل رساندن بازده انرژی سیستم و حداقل رساندن هزینه سالانه کل سیستم به‌صورت هم‌زمان بود [۶]. ورا و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۰ میلادی، بر روی مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی برای تولید برق برای مجمع‌الجزایر سان بلاس (پاناما)^۵ کار کردند. در این پژوهش از بازده سیال ارگانیک برای سیکل رانکین استفاده شد. نتیجه شد که سیال R1234yf، بهترین کارایی را برای سیستم دارد که توان الکتریکی تولیدی ۹۴/۶ کیلووات محاسبه شد [۷]. وو و همکاران^۶ در سال ۲۰۲۰ میلادی، بر روی بهینه‌سازی ترمودینامیکی یک سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی با سیکل ارگانیک رانکین دوگانه کار کردند. توان تولیدی سیستم مبتنی بر انرژی حرارتی اقیانوسی به‌عنوان هدف بهینه‌سازی و شش پارامتر به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب شد. نتیجه شد که توان خروجی خالص با افزایش پارامترهای دبی جرمی سیال ارگانیک، دمای ورودی آب گرم دریا و نسبت قطر توربین افزایش می‌یابد [۸]. تمز و دینسر^۷ در سال ۲۰۲۲ میلادی، بر روی طراحی یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی حرارتی اقیانوسی و انرژی خورشیدی و استفاده از ذخیره‌ساز انرژی حرارتی برای مناطق قطبی برای تولید هیدروژن کار کردند. جذب انرژی خورشیدی به‌وسیله پنل فتوولتائیک^۸ انجام شد. در این پژوهش دو هدفه بررسی بازده انرژی و انرژی برای

(۱) Hernández-Romero et al

(۳) Non-linear Programming

(۵) Algeria San Blas (Panama City)

(۷) Temiz and Dincer

(۹) Lei et al

(۱۱) Jiang et al

(۱۳) Combined Cooling Heat and Power

(۲) Ocean thermal energy

(۴) Vera et al

(۶) Wu et al

(۸) Photovoltaic panel

(۱۰) Yangjiang

(۱۲) Cao et al

(۱۴) Almohammadi and Harby

بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی زمین‌گرمایی برای تولید گرمایش، قدرت و تولید آب تصفیه‌شده با استفاده از الگوریتم تکاملی کار کردند. سیستم توسعه‌یافته شامل سیکل ارگانیک رانکین دوگانه و موتور همزن برای تولید نیرو، یک واحد نمک‌زدایی برای تولید آب تصفیه‌شده و یک آب‌گرمکن برای تولید گرمایش بود. بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک انجام شد. نتیجه شد که در نقطه مطلوب که بازده انرژی کل سیستم و همچنین نرخ هزینه به ترتیب ۵۲/۶۵ درصد و ۴/۳۵ دلار بر گیگاژول است [۱۸]. دینگ و همکاران^۴ در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی بهینه‌سازی چندهدفه و تجزیه و تحلیل اقتصادی یک سیستم زمین‌گرمایی برای تولید برق و سرمایه‌گذاری با استفاده از مخلوط‌های ژئوتروپیک^۵ به‌عنوان سیال کاری، کار کردند. در نیروگاه پیشنهادی، ترکیبی از سیکل ارگانیک رانکین دو فشار و سیکل تبرید اجکتور^۶ استفاده شد. نتیجه شد که افزایش فشار جداکننده منجر به کاهش توان خروجی، بازدهی کمتر، بار خنک‌کننده بیشتر و بازده حرارتی بالاتر می‌شود [۱۹]. سونگ و همکاران^۷ در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی یک روش بهینه‌سازی چندهدفه برای بهبود عملکرد سیستم زمین‌گرمایی کار کردند. این مطالعه، یک رویکرد یکپارچه از عناصر محدود، رگرسیون چندگانه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی بدون غلبه و تکنیک بر اساس شباهت به راه‌حل ایده آل، پیشنهاد شد و برای بهینه‌سازی توسعه زمین‌گرمایی اعمال شد. در نهایت نتیجه شد که روش پیشنهادی نشان‌دهنده برتری، کارایی و هوش در توسعه زمین‌گرمایی است [۲۰]. احمدی و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۳ میلادی، به تحلیل انرژی و انرژی خورشید همراه با یک الکترولایزر غشای تبادل پروتون پرداختند. مدل‌سازی سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شد. در نهایت بازده انرژی و انرژی خورشید پیشنهادی به ترتیب ۳/۶ درصد و ۲۲/۷ درصد و بازده انرژی الکترولایزر غشای تبادل پروتون حدود ۵۶/۵ درصد و میزان هیدروژن تولیدشده توسط آن ۱/۲ کیلوگرم در ساعت گزارش شد [۲۱].

ملکی و همکاران^۹ در سال ۱۴۰۰، به بررسی پتانسیل سنجی مزرعه‌های خورشیدی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در ایران پرداختند. هدف از این پژوهش ارزیابی پتانسیل انرژی

و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید چندگانه بر مبنای انرژی خورشیدی و زیست‌توده کار کردند. در این پژوهش از یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جدید به نام الگوریتم بهینه‌ساز چندمنظوره^۱ (MOMVO) برای به حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداقل رساندن نرخ هزینه سیستم استفاده شد. نتیجه شد که بازده انرژی و انرژی به ترتیب ۵۵/۵۶ درصد و ۲۰/۳۸ درصد و نرخ هزینه محصول ۲۶/۴ دلار بر ساعت است [۱۴]. خانی و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی خورشیدی با حضور ذخیره‌ساز انرژی برای پیک تقاضا در تابستان جهت تولید برق و سرمایه‌گذاری کار کردند. توابع هدف این پژوهش حداکثر بازده انرژی، حداکثر بازده انرژی و به حداقل رساندن هزینه کل بیان شد. نتیجه شد که در بهینه‌ترین حالت سیستم، توان خالص ۱۲ مگاوات، ظرفیت خنک‌کننده ۱۵/۷۴ کیلووات و تولید آب شیرین ۴/۷۲ کیلوگرم بر ثانیه است [۱۵]. پنگ و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۲۱ میلادی بر روی بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل یک سیستم خورشیدی تولید توان و روش ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی به‌صورت انرژی حرارتی شیمیایی کار کردند. بهینه‌سازی این پژوهش با روش برنامه‌ریزی غیرخطی NLP انجام شد. نتایج نتیجه شد که روش ارائه‌شده به بهبود پتانسیل بازده انرژی و عملکرد اقتصادی در ذخیره‌سازی دو مخزن نمک مذاب منجر شده است [۱۶]. تیموری و همکاران^{۱۲} در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندگانه مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست‌توده کار کردند. در این پژوهش از پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک جهت دریافت انرژی خورشیدی استفاده شد. هیدروژن از طریق روش الکترولایز آب استفاده شد. سپس سوخت تولیدشده به‌عنوان افزودنی در محفظه احتراق سیکل برایتون و توربین گاز استفاده شد. در این پژوهش از دو بهینه‌سازی با توابع هدف بازده انرژی و نرخ هزینه کل و همچنین بازده انرژی و هزینه یکسان شده برق انجام شد. در اولین بهینه‌سازی، بازده انرژی ۴/۰۲ درصد و هزینه کل سیستم ۲۱۲/۲۹ دلار بر ساعت گزارش شد. در بهینه‌سازی دوم بازده انرژی و همچنین هزینه تراز شده انرژی^{۱۳} (LCOE) در مقایسه با مورد اصلی مقایسه شد [۱۷]. انصاری نسب و حاج‌عبداللهی^{۱۴} در سال ۲۰۲۱ میلادی، بر روی

(۱) multi-objective multi-verse optimize

(۳) Levelized cost of electricity

(۵) Zeotropic

(۷) Song et al

(۲) Peng et al

(۴) Ding et al

(۶) Ejector

است که در تیرماه اتفاق می‌افتد. بنابراین یک سردکن جذبی با ظرفیت ۱۹ کیلووات (۵ تن تبرید، متناظر با ساختمانی با زیربنای ۲۰۰ مترمربع) انتخاب شد. فعالیت سامانه در زمان کمبود تابش خورشیدی با استفاده از انرژی ذخیره‌شده در مخزن ذخیره گرما و همچنین یک گرم‌کن کمکی ادامه می‌یابد. نتیجه‌های اقتصادی نشان داد که کلکتور لوله‌ای تخلیه‌شده با مساحت ۳۰ مترمربع بهترین انتخاب برای این شرایط است [۲۵].

عرب و قدمیان در سال ۱۳۹۲، بر روی مدل‌سازی ترموآکونومیکی و تحلیل پارامتری چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار/توربین گازی کار کردند. در ابتدا با معرفی چرخه پیشنهادی و ارائه مدل‌ولوژی مدل‌سازی، شبیه‌سازی چرخه با توسعه یک مدل ترمودینامیکی و با استفاده از کدنویسی در محیط نرم‌افزار حل معادلات مهندسی صورت گرفته و معادله‌های موازنه جرمی، انرژی و الکتروشیمی به صورت هم‌زمان حل شدند. با معرفی شاخص‌های بازده الکتریکی و کل سامانه، تحلیل ترمودینامیکی چرخه انجام شد و در ادامه، با ارائه مدل اقتصادی و بر مبنای محاسبه‌های دینامیکی، تحلیل‌های اقتصادی بر روی این چرخه انجام شد [۲۶].

پاکدل و جعفری نصر در سال ۱۳۹۳، به شبیه‌سازی و بررسی پارامتری چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین برای تولید توان الکتریکی پرداختند. این مطالعه به بررسی انتخاب سیال عامل مناسب برای چرخه آلی رانکین، راهکاری برای بهبود عملکرد و افزایش راندمان، شناسایی پارامترها و متغیرهای تأثیرگذار بر راندمان چرخه آلی رانکین، بهره‌گیری از مبدل گرمایی مناسب در چرخه تجمیعی کلکتورهای سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین پرداخت. در این مطالعه تهران به عنوان شهر مورد نظر برای محاسبه‌های تابش خورشید و تغییرهای فصلی، انتخاب شد. بررسی سیال‌های کاری متفاوت به منظور یافتن بیشترین راندمان خالص در چرخه تجمیعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین صورت پذیرفت و نتیجه شد که از آن میان سیال‌های مورد بررسی، سیال R-141B بیشترین راندمان خالص و سیال R-245ca بیشترین توان الکتریکی را دارا است [۲۷].

بداخانیان و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه برای طراحی بهینه یک سیستم چندگانه انرژی بر اساس کلکتور خورشیدی سهموی برای تولید برق پاک، سرمایه‌ش و هیدروژن پرداختند. سیستم طراحی شده شامل یک کلکتور خورشیدی سهموی، سیکل ارگانیک رانکین، سیکل تبرید جذبی لیتیوم برومید و سیستم

خورشیدی ۹ مرکز استان در ایران با ۳ روش تصمیم‌گیری چند معیاره مجموع ساده وزنی، تاپسیس و الکتراه بود. در این راستا از ۳ معیار اصلی محل نصب، شرایط آب و هوایی و ریسک استفاده شد، که شامل ۱۱ زیر معیار بوده و با روش آنتروپی شنون وزندهی بودند. از تحلیل حساسیت نتیجه شد که روش تاپسیس حساسیت کمتری، نسبت به ۲ روش دیگر، بر روی اوزان شاخص‌ها دارد [۲۲].

موسوی و همکاران در سال ۱۳۹۹، به تحلیل انرژی و اگزرژی-اقتصادی سیکل رانکین آلی با محرک انرژی خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز در تانک ذخیره‌سازی پرداختند. در این پژوهش سیکل رانکین آلی با محرک کلکتور لوله خلاء خورشیدی شبیه‌سازی و از منظر انرژی، اگزرژی و اگزرژی-اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت، سپس مورد‌های گوناگون از جمله دما و فشار ورودی به توربین، اختلاف دمای پینچ تبخیرکننده سیکل آلی و شار خورشیدی ارزیابی شد. نتیجه شد که بازده انرژی و اگزرژی به ترتیب ۴۵/۲ و ۹/۷ و مقدار کار خروجی و بازگشت‌ناپذیری نیز ۵۱/۵ و ۱۲۹۱/۸ کیلووات است [۲۳].

آریان فر و همکاران در سال ۱۳۹۶، به تحلیل فنی-اقتصادی چرخه رانکین آلی تولید گرما و توان با منابع انرژی استان اردبیل پرداختند. در این پژوهش به طراحی ترمودینامیکی و بررسی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک چرخه رانکین آلی با هدف تولید هم‌زمان توان و گرما، با منابع انرژی گوناگون در شرایط استان اردبیل پرداخته شد. ضمن ارزیابی فنی پارامترهای اثرگذار بر چرخه رانکین آلی مورد مطالعه، اهمیت و میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای مؤثر نیز مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از منبع‌های گوناگون انرژی شامل خورشیدی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی به عنوان منابع تجدیدپذیر بر اساس شرایط استان اردبیل، در کنار گاز طبیعی به عنوان سوخت فسیلی مورد بررسی قرار گرفت و قیمت توان تولیدی در حالت‌های گوناگون مقایسه شد. با مقایسه راندمان‌های انرژی و اکسرژی در دو حالت تولید توان و همچنین تولید هم‌زمان توان و گرما دیده شد که با استفاده بهینه از منابع انرژی در حالت تولید هم‌زمان توان و گرما، از دیدگاه انرژی ۷۱/۵ درصد و از دیدگاه اکسرژی ۴۵/۵ درصد، افزایش بهره‌وری به دست می‌آید [۲۴].

کریمی نیا و فرهادی در سال ۱۳۹۳، به شبیه‌سازی و بررسی فنی-اقتصادی سامانه سردکن جذبی تک اثره آب-لیتیم برومید مدد یافته با انرژی خورشیدی پرداختند. در این مقاله، شبیه‌سازی و بررسی فنی-اقتصادی یک سامانه سردکن جذبی تک اثره آب-لیتیم برومید خورشیدی در شرایط اقلیمی اصفهان مطالعه شد. بیشترین تقاضای انرژی سرمایه‌ش برای این ساختمان ۱۷ کیلووات

برق و هیدروژن پاک و همچنین بهینه‌سازی تک هدف سیستم با روش نلدر-مید^۱ کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین طبق بررسی در سوابق گذشته، محققان کمتر به فکر بررسی اتلاف انرژی در سیستم‌های ترکیبی و تولید چندگانه بوده‌اند، به همین دلیل در کار حاضر و برای سیستم مورد بررسی، بحث تحلیل اتلاف انرژی سیستم نیز بررسی شده است. همچنین در مدل‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر، جنبه‌های اقتصادی طرح به علت اهمیت در اجرای سیستم، بررسی و نتایج ارائه شده است.

در این پژوهش تأثیر تغییرات سه متغیرهای طراحی شامل دبی جرمی کلکتور، مساحت کلکتور و دمای ورودی به توربین بر روی توابع هدف و خروجی‌های سیستم بررسی می‌شود. در بهینه‌سازی تک هدفه سیستم تأثیر تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری بر روی توابع هدف بررسی می‌شود و بهترین مقدار برای متغیرهای تصمیم‌گیری در هر مرحله از بهینه‌سازی محاسبه می‌شود.

در نتیجه کار حاضر شامل نوآوری‌های زیر است:

- ✓ استفاده از کلکتور خورشیدی صفحه تخت.
- ✓ استفاده از روش بهینه‌سازی تک هدفه نلدر-مید.
- ✓ بهینه‌سازی دو تابع هدف بازده انرژی و نرخ هزینه سیستم.
- ✓ استفاده از سیال آرگانیک R410a در سیکل آرگانیک رانکین.
- ✓ بررسی اتلاف انرژی سیستم.
- ✓ تحلیل انرژی و اقتصادی سیستم.

به عبارت دیگر پژوهش‌های بسیاری در زمینه استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید انرژی و حتی تولید هیدروژن انجام شده است، همچنین پژوهش‌های متعددی در زمینه به‌کارگیری چند انرژی هم‌زمان با هم مانند انرژی خورشیدی-بادی یا انرژی خورشیدی-زیست‌توده انجام شده است، ولی تا به حال کمتر کسی به فکر استفاده هم‌زمان از دو انرژی خورشیدی و حرارتی اقیانوسی برای تولید هم‌زمان برق و هیدروژن بوده است. در این پژوهش با استفاده از ترکیب دو انرژی حرارتی اقیانوسی و خورشیدی علاوه بر افزایش پایداری سیستم و افزایش تعداد ساعات کاری سیستم در زمانی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست، به تولید توان و تبدیل آن به برق پرداخته شده است که از برق تولیدی توسط سیستم انرژی مورد نیاز الکترولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید هیدروژن نیز تأمین می‌شود. انرژی الکتریکی مهم‌ترین انرژی مورد نیاز بشر برای زندگی است و از طرفی با توجه به کاهش منابع فسیلی، انرژی هیدروژن می‌تواند مهم‌ترین جایگزین انرژی فسیلی در سال‌های

الکترولایزر غشای تبادل پروتون بود. نتایج بهینه‌سازی با بهینه‌سازی ازدحام ذرات نشان داد که بهترین نرخ بازده انرژی ۳/۱۲ درصد و نرخ هزینه سیستم ۱۶/۳۶۷ دلار بر ساعت است [۲۸].

زارع علی آبادی و ساعی مقدم در سال ۱۳۹۹، به بررسی تجربی اثر نانو ذره اکسید روی و پارامترهای فرایندی بر عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت پرداختند. هدف از انجام این تحقیق بهبود عملکرد حرارتی و چگونگی بالا بردن بازده گرمایی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت بود. استفاده از نانوسیال اکسید روی در ۰/۰۵ درصد و ۰/۱ درصد حجمی باعث افزایش ۴-۲۰ درصدی در بازده حرارتی متوسط و ۳۳-۸ درصد در حداکثر بازده کلکتور خورشیدی صفحه تخت شد [۲۹].

رضایی عزیزآبادی و همکاران در سال ۱۴۰۰، به شبیه‌سازی یک طرح ابتکاری مایع‌سازی هیدروژن برای استفاده از انرژی اتلافی نیروگاه‌های گازی پرداختند. در این پژوهش طراحی ابتکاری برای مایع‌سازی هیدروژن با پیش‌سرمایش جذبی توسعه یافته و با کمک نرم‌افزار اسپن‌هایسیس نسخه ۹ شبیه‌سازی شده که در آن از انرژی گرمایی موجود در دود خروجی از نیروگاه‌های گازی بهره‌برده شد. استفاده از دو معادله حالت مجزا برای جریان‌های هیدروژن و مبردهای چند جزئی و فرضیات واقعی درباره مبدل‌های حرارتی و توربوماشین‌ها، ضمن افزایش دقت باعث عملی بودن اجرای چرخه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح توسعه یافته از نظر توان ویژه مصرفی و ضریب عملکرد نسبت به سایر طرح‌های پیشنهادی عملکرد بهتری دارد [۳۰].

سعیدی و صفری پور در سال ۱۴۰۰، به بررسی روش‌های بازیابی و مدیریت گازهای دورریز واحدهای صنعتی به منظور بازگشت به چرخه انرژی پرداختند. در این مطالعه به بررسی راهکارها و روش‌های گوناگون جهت کاهش یا بازیابی گازهای ارسالی به سیستم آزادسازی گاز دورریز به منظور بازگشت به چرخه انرژی پرداخته شد. انتخاب بهترین فناوری به منظور پالایش گاز دورریز واحدهای صنعتی، یکی از مهم‌ترین گام‌ها در طراحی سیستم بازیافت گاز دورریز است [۳۱].

با بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات گذشته، نتیجه شد که بر روی سیستم خورشیدی و همچنین تولید هیدروژن پاک با استفاده از الکترولایزر غشای تبادل پروتون مطالعاتی صورت گرفته است، ولی طراحی سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر انرژی خورشیدی و انرژی حرارتی اقیانوسی با الکترولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید

(۱) Nelder-Mead

و ترمودینامیکی اشاره کرد، از این لحاظ یک نرم‌افزار کاربردی و مناسب برای تحلیل سیستم‌های تولید انرژی محسوب می‌شود. چرا که این نرم‌افزار دسترسی بسیار خوبی به خواص ترمودینامیکی و توابع حرارتی دارد و می‌تواند معادلات پیچیده را راحت‌تر حل کند. طراحی مدل‌های غیرخطی دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنعت است که توجه بسیاری از محققان در جهان را به خود جلب کرده است و استفاده از روش نلدر-مید یکی از روش‌های محاسباتی است که توانایی ارزیابی مدل‌های غیرخطی را دارد.

در این پژوهش توجه ویژه‌ای به تحلیل پارامتریک و محاسبه درصد تغییرات پارامترهای طراحی بر روی توابع هدف مسئله و همچنین محصولات سیستم به همراه محاسبه اتلاف انرژی کل سیستم انجام شده است که این تحلیل‌ها به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم منجر می‌شود و می‌توان با تغییر این پارامترها و پیدا کردن بهترین مقدار برای این پارامترها با استفاده از روش بهینه‌سازی به افزایش عملکرد سیستم کمک کرد. به همین دلیل در پژوهش حاضر به بهینه‌سازی پارامترهای طراحی به همراه توابع هدف برای پیدا کردن بهترین مقدار برای این پارامترها پرداخته می‌شود تا به معرفی یک سیستم تجدیدپذیر کارآمد بر اساس ترکیبی از منابع تجدیدپذیر، جهت راه‌اندازی در مناطق مختلف کمک کرد، چرا که تحلیل همزمان پارامتریک و اتلاف انرژی نیز در پژوهش‌های مختلف کمتر انجام شده است و بحث آنالیز اتلاف انرژی نیز به مطالعات بیشتری نیاز دارد، زیرا یکی از راه‌های افزایش عملکرد سیستم، کاهش اتلاف انرژی است.

مدل‌سازی سیستم

در شکل ۱، سیستم ترکیبی تولید چندگانه انرژی در کار حاضر، آورده شده است. این سیستم از زیرسیستم‌های کلکتور خورشیدی صفحه تخت، سیکل ارگانیک رانکین، الکترولایزر غشای تبادل پروتون تشکیل شده است. سیستم طراحی شده در این پژوهش بر اساس استفاده از انرژی خورشیدی و جذب این انرژی توسط کلکتور صفحه تخت به‌عنوان منبع اصلی تأمین‌کننده انرژی مورد نیاز سیستم، متکی است، علاوه بر انرژی خورشیدی از انرژی حرارتی اقیانوسی نیز جهت افزایش عملکرد سیستم استفاده شده است.

این سیستم یکپارچه از آب سطح گرم دریا برای تبخیر یک سیال کاری در تبخیرکننده استفاده می‌کند. آب گرم دریا توسط پمپ شماره ۱ وارد کلکتور خورشیدی می‌شود، آب گرم دریافتی از

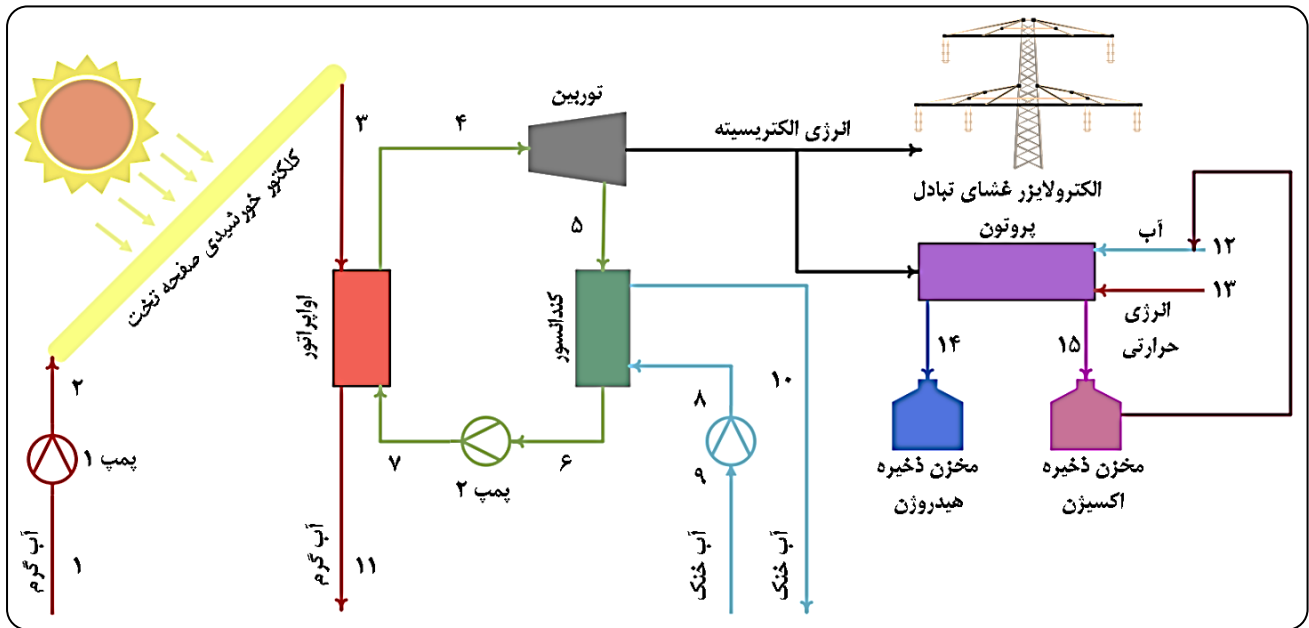
آینده باشد. محققان هیدروژن را یک سوخت پاک و تمیز می‌دانند، که تولید شده از آب و هنگام اکسید شدن به آب بر می‌گردد، که این سوخت کاربردهای فراوانی نیز دارد، که می‌توان به استفاده در اتومبیل‌ها و وسایل نقلیه، استفاده در صنایع شیمیایی برای ساختن آمونیاک برای کودهای کشاورزی، استفاده در صنایع شیمیایی برای ساختن سیکلوهگزان و متانول جهت تولید پلاستیک و استفاده در صنعت داروسازی و استفاده در فرآیند تصفیه روغن برای حذف گوگرد اشاره کرد. به همین دلیل با توجه به اهمیت بالای این سوخت، نیاز به تحقیقات بیشتر و مطالعات گسترده‌تر در زمینه بررسی روش‌ها و تجهیزات مختلف و همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن است، که در تحقیق حاضر به این مسئله توجه ویژه شده است.

همچنین بحث اتلاف انرژی نیز می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم و از طرفی استفاده از تجهیزات مناسب برای طراحی یک سیستم جدید برای به‌کارگیری همه‌منظوره از انرژی پایه (خورشیدی - حرارتی اقیانوسی) باشد تا علاوه بر کاهش اتلافات سیستم به تولید انرژی‌های جدید و همچنین افزایش عملکرد سیستم کمک کند که طبق بررسی‌های انجام شده، تحلیل اتلاف انرژی نیز کمتر مورد توجه قرار گرفته است و نیاز به مطالعات بیشتری دارد. از طرفی بحث بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر نیاز به مطالعات بیشتری دارد که طبق بررسی‌های انجام شده به مدل‌سازی و بهینه‌سازی هم‌زمان سیستم‌های تولید توان و هیدروژن کمتر توجه شده است و عمده تحقیقات انجام شده فقط در زمینه مدل‌سازی بوده است.

در کشور ایران با توجه به موقعیت خوب استان‌هایی نظیر خوزستان، هرمزگان و بوشهر به انرژی پر پتانسیل خورشیدی و همچنین نزدیکی این استان‌ها به خلیج فارس می‌تواند برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی موقعیت مناسبی باشند. انرژی خورشیدی یکی از منابع تجدیدپذیر با دسترسی بسیار بالا است که تمامی کشورهای جهان از این انرژی برخوردار هستند و می‌توانند از این انرژی پاک استفاده کنند. استفاده هم‌زمان از دو انرژی باعث افزایش عملکرد سیستم می‌شود و در شرایطی مانند شب‌ها و روزهای بارانی که دسترسی به انرژی خورشیدی دشوار می‌شود، انرژی مکمل آن می‌تواند به پایداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم کمک کند.

مدل‌سازی این پژوهش با نرم‌افزار حل معادلات مهندسی^۱ یا EES انجام می‌شود که این نرم‌افزار دارای ویژگی‌های بسیار مهمی برای حل مسائل مهندسی است که می‌توان به وجود توابع داخلی ریاضی

(۱) Engineering Equation Solver



شکل ۱- شماتیک سیستم پیشنهادی

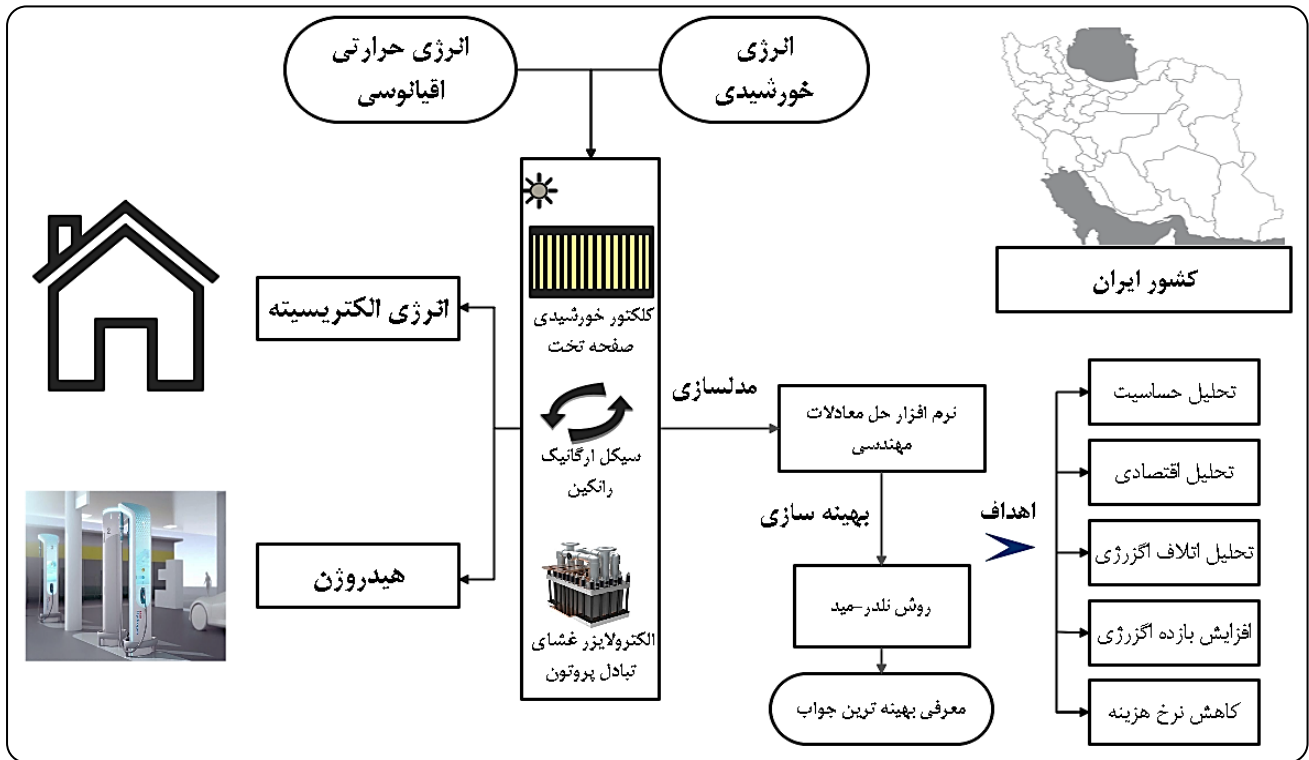
جهت حل معادلات غیرخطی جبری، معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان به بهینه‌سازی تک هدفه نتایج و راه‌حل‌های به دست آمده، پرداخت. در علم سیستم‌های تجدیدپذیر می‌توان از ویژگی نرم‌افزار EES به دسترسی این نرم‌افزار به پایگاه داده‌های ترمودینامیکی نام برد که می‌توان جهت حل معادلات مختلف با روش‌های گوناگون از آن‌ها استفاده کرد. نرم‌افزار EES با استفاده از بررسی مشخصات ترمودینامیکی و ذخیره این مشخصات و ویژگی‌ها از حل تکراری مسئله جلوگیری کرده و به علت کاربرد بالا در حل مسائل ترمودینامیکی شناخته شده است. بهینه‌سازی توابع هدف این پژوهش جهت افزایش بازده انرژی و کاهش هزینه سیستم با استفاده از نرم‌افزار EES و روش نلدر-مید انجام می‌شود که این روش یک روش عددی جهت پیدا کردن کمینه یا بیشینه یک تابع هدف در فضای بهینه‌سازی است.

در این پژوهش با به‌کارگیری دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و حرارتی اقیانوسی توسط کلکتور خورشیدی صفحه تخت و همچنین دریافت اختلاف دمای آب سرد و گرم اقیانوسی توسط پمپاژ آن به اواپراتور و کندانسور سیکل ارگانیک رانکین، انرژی سیستم جهت تولید محصولات فراهم می‌شود. از محصولات این سیستم باید به توان تولیدی توسط توربین ارگانیک رانکین اشاره کرد که به وسیله ژنراتور به برق تبدیل می‌شود و برق تولیدی

دریا مجدداً در کلکتور خورشیدی صفحه تخت انرژی حرارتی خورشید را دریافت کرده و در ادامه آب گرم وارد تبخیرکننده سیکل ارگانیک رانکین شده و با تبخیر شدن سیال ارگانیک، وارد توربین شده و توربین سیکل ارگانیک رانکین را برای تولید توان به حرکت در می‌آورد که به‌نوبه خود از برق تولیدی، برای تأمین نیاز الکتروولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید هیدروژن نیز استفاده می‌شود. در ادامه حرارت تولیدی پس از عبور از توربین ارگانیک، در خنک‌کننده متراکم می‌شود که عمل خنک‌کنندگی توسط آب سرد دریافتی از عمق دریا توسط پمپ شماره ۳ انجام می‌شود. سپس سیال ارگانیک از طریق خنک‌کننده به پمپ شماره ۲ وارد می‌شود و چرخه به‌طور مداوم تکرار می‌شود.

در این سیستم از سیال ارگانیک R410a به‌عنوان سیال ارگانیک در سیکل ارگانیک رانکین و از این سیکل جهت تولید برق پاک استفاده می‌شود. از مبرد R410a به‌عنوان ماده پاک، سازگار با محیط‌زیست و بدون اثر گلخانه‌ای، راندمان بالا، ظاهری شفاف و بدون بو که جزو مبردهای جدید است، استفاده شده است.

در شکل ۲ شرایط بررسی سیستم و بهره‌برداری از این سیستم معرفی شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی (EES) که یک نرم‌افزار مهندسی جهت بررسی سیستم‌های ترمودینامیکی است، به مدل‌سازی و حل معادلات مربوط به شرایط کاری سیستم پرداخته شده است. نرم‌افزار EES



شکل ۲ - روش شناسی پژوهش

هزینه‌های سیستم دارند، به همراه تحلیل اتلاف انرژی به صورت همزمان و برای تولید دو محصول برق و هیدروژن انجام نشده است. با توجه به بررسی تحلیل اتلاف انرژی در سیستم‌های انرژی می‌توان از مقدار انرژی که در فرآیند عملیاتی سیستم از بین می‌رود، شناخت دقیقی پیدا کرد و با توجه به محاسبه این میزان اتلاف انرژی می‌توان به دنبال راه‌کارهایی مناسب جهت کاهش آن با ایجاد نوآوری‌های مختلف و استفاده از انرژی ورودی به سیستم توسط تجهیزات و واحدهای استفاده شده در سیستم، بود. لازم به ذکر است، در مطالعات گذشته بهینه‌سازی و مدل‌سازی همزمان یک سیستم تجدیدپذیر مبتنی بر انرژی خورشیدی و حرارتی اقیانوسی با استفاده از ترکیب سیکل ارگانیک رانکین، کلکتور خورشیدی صفحه تخت و الکترولایزر غشای تبادل پروتون برای تولید دو محصول برق و هیدروژن پاک با استفاده از نرم‌افزار EES و الگوریتم نلدر-مید و ارائه یک تحلیل در زمینه محاسبه اتلاف انرژی و به حداقل رساندن نرخ هزینه و به حداکثر رساندن بازده انرژی به صورت همزمان انجام نشده است. از معایب استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر عدم پایداری و قابلیت اطمینان بالای آن‌ها است، چرا که انرژی خورشیدی در طول ۲۴ ساعت روز در دسترس نیست و همچنین در روزهای بارانی،

به شبکه سراسری برق جهت مصارف صنعتی یا خانگی داده می‌شود. همچنین محصول دوم این سیستم هیدروژن پاک است. منابع پاک و عاری از آلودگی و انتشار CO_2 شناخته می‌شوند، تولید می‌شود. از این محصول می‌توان به عنوان سوخت هیدروژنی استفاده کرد. سوخت هیدروژنی پاک‌ترین سوخت در جهان شناخته می‌شود چرا که عاری از آلودگی زیست‌محیطی است و با جایگزین کردن این سوخت به جای سوخت‌های فسیلی می‌توان از ایجاد آلودگی جلوگیری کرد، چرا که در زمان استفاده از این سوخت، فقط آب تولید می‌شود. در این پژوهش مطالعه جامعی شامل تحلیل حساسیت، تحلیل اقتصادی، تحلیل اتلاف انرژی و بهینه‌سازی دو تابع هدف بازده انرژی و نرخ هزینه سیستم جهت بهبود کارایی این سیستم انجام شده است. همان‌طور که قبلاً نیز به این مسئله اشاره شد، استفاده ترکیبی از دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و حرارتی اقیانوسی در مطالعات گذشته انجام شده است، ولی تاکنون به صورت همزمان تحلیل حساسیت که شامل بررسی پارامترهای طراحی و تغییرات این پارامترها بر روی خروجی‌های سیستم و توابع هدف سیستم است، به همراه تحلیل اقتصادی که نشان می‌دهد، افزایش یا کاهش پارامترهای طراحی چه تأثیری بر روی رشد یا کاهش

جدول ۱- تعریف داده‌های ورودی جهت مدل‌سازی

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت (A)	۵۰۰۰ m ²
۲	دمای ورودی به کلکتور (T ₁)	۳۰ °C
۳	دبی جرمی کلکتور (\dot{m}_1)	۵ kg/h
۴	تابش انرژی خورشیدی بر واحد سطح صفحه جذب‌کننده (I)	۶۰۰ w/m ²
۵	بازده نوری (η)	۰/۸۴ (-)
۶	حداکثر دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین (T ₄)	۶۰ °C
۷	درجه حرارت آب ورودی به تبخیرکننده (T ₃)	۹۵ °C
۸	دمای واقعی خورشید (T _{sun})	۴۵۰۰ °K
۹	دمای آب سرد (T _g)	۵ °C

۲- در لوله‌های اتصال‌دهنده تجهیزات افت فشار ناچیز در نظر گرفته شد.

۳- توربین و پمپ ایزنتروپ در نظر گرفته شد.

۴- خروجی خنک‌کننده مایع اشباع‌شده در نظر گرفته شد.

۵- خروجی تبخیرکننده بخار اشباع در نظر گرفته شد [۹-۶]

جدول ۲- متغیرهای طراحی

ردیف	داده	تعریف پارامتر
۱	\dot{m}_1	نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی
۲	T ₄	دمای ورودی به توربین
۳	A _p	مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت
۴	I	تابش خورشیدی

تحلیل ترمودینامیکی

برای تحلیل ترمودینامیکی سیستم تجدیدپذیر ترکیبی پیشنهادی، در ابتدا معادلات توازن جرم، انرژی و انرژزی برای اجزای مختلف نوشته می‌شود. قانون بقای جرم به صورت معادله (۱) تعریف می‌گردد [۳۲]:

$$\sum_k \dot{m}_i = \sum_k \dot{m}_e \quad (1)$$

در این معادله m و \dot{m} بیانگر دبی جرمی هستند، این معادله اندیس i و e در اینجا به ورودی و خروجی حجم کنترل، اشاره دارند. قانون اول ترمودینامیک که معروف به قانون بقای انرژی است، به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود:

$$\dot{Q} + \sum_i \dot{m}_i = \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \quad (2)$$

که در این معادله، \dot{Q} و \dot{W} بیانگر نرخ کار و نرخ انتقال حرارت است. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک، بالانس انرژی از معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}x_Q + \sum \dot{m}_i ex_i = \dot{E}x_W + \sum \dot{m}_e ex_e + \dot{E}x_D \quad (3)$$

که در این معادله، $\dot{E}x_Q$ ، $\dot{E}x_W$ ، $\dot{E}x_D$ بیانگر اتلاف انرژی، کار و انتقال حرارت است. همچنین ex انرژی فیزیکی هر جریان است و با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند [۳۲]:

استفاده از انرژی خورشیدی امکان‌پذیر نیست. به همین دلیل طراحی سیستم‌هایی که از چند انرژی تجدیدپذیر به صورت همزمان استفاده می‌کنند، جهت افزایش پایداری سیستم، توصیه می‌شود. به همین دلیل در پژوهش حاضر با استفاده از دو انرژی تجدیدپذیر جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم کوشیده شده است. همچنین استفاده همزمان از دو انرژی تجدیدپذیر باعث افزایش راندمان سیستم در زمان وجود هر دو انرژی می‌شود. در سیستم پیشنهادی در زمان عدم وجود یکی از انرژی‌های سیستم قادر به ادامه فعالیت خود است ولی باید گفت که راندمان سیستم کاهش پیدا خواهد کرد. به همین دلیل جهت راه‌اندازی این سیستم منطقه‌ای که از ساعات تابش خورشیدی بالایی برخوردار است و دسترسی مستقیم به آب دریا را دارد، توصیه می‌شود.

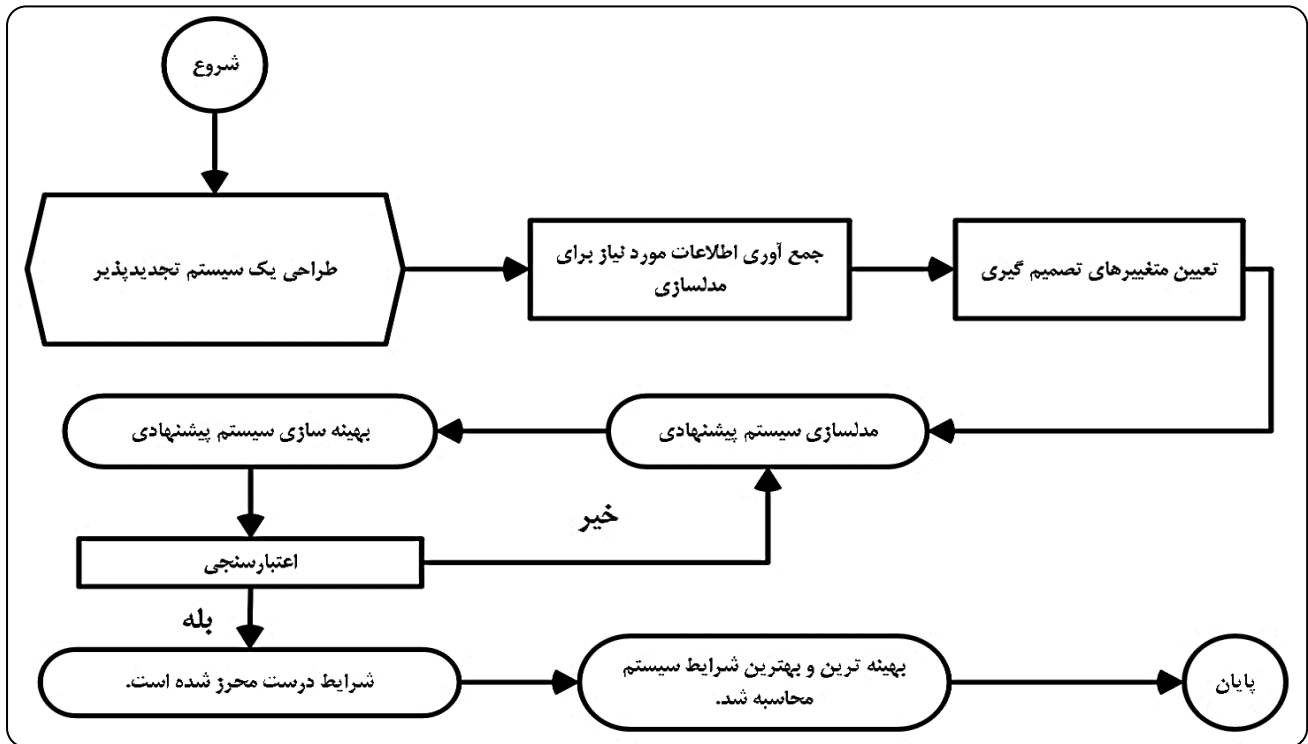
مقدار داده‌های اولیه و مورد نیاز برای مدل‌سازی سیستم در جدول ۱ آورده شده است.

در جدول ۲ متغیرهای طراحی جهت مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم تجدیدپذیر معرفی شده‌اند.

جهت مشخص شدن مسیر انجام پژوهش ابتدا فلوچارت مراحل کار ترسیم شده است و در شکل ۳ قابل مشاهده است.

فرضیات مورد استفاده برای تحلیل سیستم پیشنهادی:

۱- در نظر گرفتن حالت پایدار برای حل معادلات مسئله.



شکل ۳ - مراحل انجام کار در این پژوهش

$$\dot{Q}_u = A_p F_R [(\tau\alpha)I - Q_L] \quad (۸)$$

در معادله (۸)، $\tau\alpha$ راندمان بصری است و I شدت تابش خورشیدی است، F_R عامل دفع حرارت است و از معادله (۹) استفاده می‌شود:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{U_l A_p} \left[1 - e^{-\frac{F_1 U_l A_p}{\dot{m}C_p}} \right] \quad (۹)$$

در معادله (۹)، F_1 عامل راندمان کلکتور است و U_l ضریب افت کلی کلکتور است [۳۴].

مقدار Q_L در معادله (۸)، از معادله (۱۰) به دست می‌آید [۳۳]:

$$Q_L = U_l (T_{in} - T_o) \quad (۱۰)$$

T_o دمای محیط است.

الکترو لایزر غشای تبادل پروتون

از یک الکترو لایزر غشای تبادل پروتون برای تولید هیدروژن استفاده شده است که انرژی الکتریکی مورد نیاز آن از تولیدی سیکل ارگانیک رانکین برای تأمین می‌شود. وظیفه الکترو لایزر جداسازی مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن آب ورودی به آن است. واکنش شیمیایی که منجر به تولید هیدروژن در یک الکترو لایزر غشای تبادل پروتون می‌شود در زیر آورده شده است [۳۵].

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \dot{Q}_i \quad (۴)$$

$$\dot{E}x_w = W \quad (۵)$$

$$ex = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (۶)$$

اندیس 0 بیانگر خواص در دما و فشار محیط است.

کلکتور خورشیدی صفحه تخت

کلکتور صفحه تخت یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین کلکتورهای خورشیدی است.

مقدار گرمای حاصل از سیال کاری را می‌توان به صورت معادله

(۷) بیان نمود [۳۳]:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_3 - T_2) \quad (۷)$$

در معادله (۷)، T_2 دمای ورودی آب به کلکتور خورشیدی، T_3 دمای خروجی آب از کلکتور خورشیدی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و \dot{m} نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی صفحه تخت است.

حرارت دریافتی از کلکتور خورشیدی صفحه تخت و با در نظر گرفتن افت حرارت حاصل از کلکتور با استفاده از معادله (۸) که معروف به هاتلولیر محاسبه می‌شود [۳۳، ۳۴]:

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

اجزا	هزینه اجزاء
تبخیرکننده	$Z_{Ev} = 276 \times (A_{Evap}^{0.88})$
پمپ ۱	$Z_{Pump1} = 3500 \times (\dot{W}_{Pump1}^{0.41})$
پمپ ۲	$Z_{Pump2} = 3500 \times (\dot{W}_{Pump2}^{0.41})$
پمپ ۳	$Z_{Pump3} = 3500 \times (\dot{W}_{Pump3}^{0.41})$
توربین	$Z_{Turbine} = 4750 \times (\dot{W}_{Turbine}^{0.75}) + 60 \times (\dot{W}_{Turbine}^{0.95})$
کلکتور خورشیدی	$Z_{Solarcollector} = 235 \times A_p$
الکترولایزر غشای تبادل پروتون	$Z_{PEM} = 1000 \times \dot{W}_{PEM}$

و در نهایت بازده اگزرژی از طریق معادله (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \dot{W}_{net} \times 100 / \dot{E}x_{Sun} \quad (20)$$

تحلیل اقتصادی

فاکتور بازبایی سرمایه از معادله (۲۱) محاسبه می‌شود [۳۵]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (21)$$

که در این معادله i و n به ترتیب نرخ بهره و طول عمر پروژه را نشان می‌دهند و به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۲۰ است.

جهت دستیابی به هزینه هر جزء از سیستم مورد بررسی و همچنین محاسبه نرخ هزینه کلی سیستم، از تابع هزینه هر جز استفاده می‌شود. نرخ هزینه با استفاده از پارامترهای اقتصادی مثل فاکتور بازبایی سرمایه^۱ و نرخ بهره^۲ به دست آورده می‌شود که این عمل باعث می‌شود هزینه سیستم بهتر ارزیابی شود.

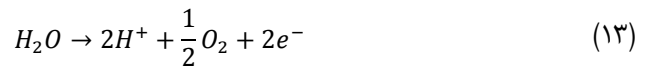
نرخ هزینه هر مؤلفه از معادله (۲۲) محاسبه می‌شود [۳۵]:

$$\dot{Z}_k = \frac{CRF \times \varphi}{N \times 3600} \quad (22)$$

که در این معادله، φ بیانگر ضریب تعمیر و نگهداری سیستم است و مقدار آن برابر ۱/۰۶ است. همچنین در این معادله، N تعداد ساعات کاری سیستم است. در جدول ۳ روابط مربوط به محاسبه هزینه اجزاء سیستم مورد نظر معرفی شده است. در جدول ۴ محدود پارامترهای طراحی آورده شده است.



واکنش شیمیایی کاتد و آند به ترتیب در ادامه آورده شده است.



انرژی مورد نیاز این واکنش‌ها از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta G = \Delta H + T\Delta S \quad (14)$$

که در اینجا، $T\Delta S$ انرژی حرارتی مورد نیاز و ΔG انرژی آزاد گیبس هستند.

تحلیل اگزرژی

معادله بازده اگزرژی جریان‌ها برابر با دو جزء اگزرژی شیمیایی و اگزرژی فیزیکی که در ادامه آورده است [۳۶]:

$$ex = ex_{ch} + ex_{ph} \quad (15)$$

در صورتی که تغییرات در سرعت و ارتفاع بسیار کوچک و ناچیز باشند، اگزرژی پتانسیل و جنبشی قابل چشم‌پوشی است. اگزرژی فیزیکی تا حد زیادی به فشار و دما وابسته است. برای محاسبه اگزرژی فیزیکی رابطه ساده‌ای را به صورت معادله (۱۶) می‌توان بیان کرد [۳۷]:

$$ex_{ph} = h - h_o - T_o(s - s_o) \quad (16)$$

که اندیس ° در آن مشخص‌کننده شرایط محیط است.

اگزرژی هیدروژن را می‌توان از معادله (۱۷) محاسبه کرد [۳۸]:

$$\dot{e}x_{H_2} = \dot{m}_{H_2}(ex_{ph} + ex_{ch})_{H_2} \quad (17)$$

که در اینجا \dot{m}_{H_2} نرخ دبی جرمی هیدروژن و واحد آن kg/s است. ex_{ch} اگزرژی شیمیایی هیدروژن است که از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$ex_{ch} = \frac{253153}{M_{H_2}} \quad (18)$$

که در آن M_{H_2} جرم مولی هیدروژن (H_2) و بر حسب $\frac{kg}{kmol}$ است. با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای تعادل اگزرژی می‌توان معادله (۱۹) را استخراج کرد [۳۹]:

$$\dot{E}x_Q + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} = \sum \dot{m}_{out} ex_{out} + \dot{E}x_W + \dot{E}x_D \quad (19)$$

که در آن $\dot{E}x_Q$ ، $\dot{E}x_W$ ، $\dot{E}x_D$ به ترتیب با حالت اگزرژی گرما، نرخ اگزرژی کار و نرخ اتلاف اگزرژی مرتبط هستند.

(۱) Capital Recovery Factor (CRF)

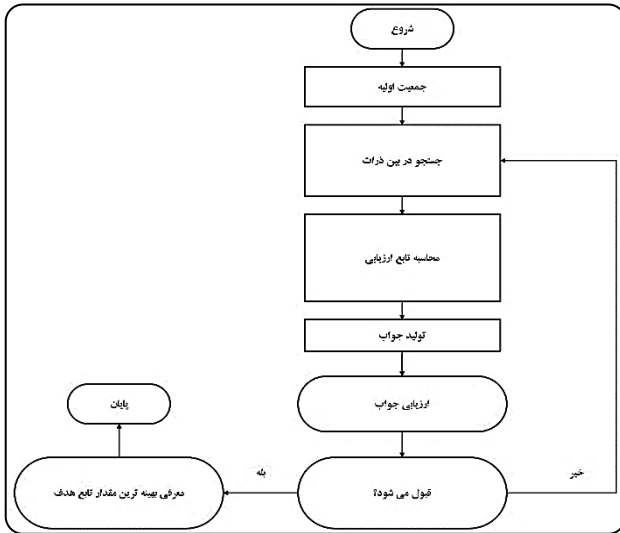
(۲) Interest rate

جدول ۴ - محدوده پارامترهای طراحی

پارامتر طراحی	کران بالا	کران پایین
دمای ورودی به توربین	۷۰ °C	۶۰ °C
مساحت کلکتور	۶۰۰۰ m ²	۴۰۰۰ m ²
نرخ دبی جرمی	۸ kg/s	۳ kg/s
شدت تابش خورشیدی	۷۰۰ w/m ²	۵۰۰ w/m ²

جدول ۵ - اعتبار سنجی

خروجی	کار حاضر	کار/احمدی و همکاران [۴۲]	خطا
هزینه (%)	۲۷/۴۸	۳۳/۲	۱۷/۲۲
ارزش	ارزش		درصد



شکل ۴ - فلوجارت الگوریتم نلدرد-مید

روش بهینه‌سازی تک هدفه نلدرد-مید

روش بهینه‌سازی تک هدفه نلدرد-مید، از روش‌های جستجوی بدون استفاده از مشتق است و کارایی زیادی در بهینه‌سازی نامقید دارد. روش سیمپلکس سرایشی^۱ و یا روش دگرگونی آمیبی^۲، یک روش عددی رایج در پیدا کردن کمینه یا بیشینه یک تابع هدف در فضای بهینه‌سازی است. این روش اغلب برای مشکلات فضای بهینه‌سازی غیرخطی است که مشتقات آن ممکن است مشخص نباشد، استفاده می‌شود. یک سیمپلکس، شکل هندسی است که توسط مجموعه‌ای از $n+1$ نقطه در فضای n بعدی تشکیل می‌شود؛ بنابراین یک سیمپلکس در فضای دوبعدی، یک مثلث و در فضای سه‌بعدی، یک چهاروجهی است. حرکت سیمپلکس توسط سه عمل انعکاس، انقباض و انبساط صورت می‌گیرد. سیمپلکس اولیه در روش نلدرد-مید بسیار مهم و ضروری است، به عبارتی یک سیمپلکس اولیه خیلی کوچک می‌تواند به جستجوی محلی منجر شود و این سیمپلکس باید بستگی به ماهیت مسئله داشته باشد. در روش نلدرد-مید از انحراف استاندارد برای مقادیر تابع، به ازای سیمپلکس فعلی استفاده کردند. اگر مقادیر تابع کوچک‌تر از یک مقدار معین گردد، چرخه متوقف می‌شود و پایین‌ترین نقطه در سیمپلکس به‌عنوان یک نقطه بهینه پیشنهادی بازی می‌گردد. در روش سرازیر سیمپلکس یک سری مراحل را طی می‌کند به طوری که بیشتر مراحل فقط نقاط سیمپلکس را در جایی که خروجی تابع بیشینه است، از طریق نقطه مقابل سیمپلکس، به یک نقطه کمینه انتقال می‌دهد. این مراحل بازتاب نامیده می‌شوند، و برای حفظ حجم سیمپلکس ساخته می‌شوند. وقتی این مراحل انجام می‌شود، سیمپلکس در جهت یا جهت دیگر گسترش می‌یابد تا گام‌های بزرگ‌تری برداشته شود. برعکس روش‌های بهینه‌سازی جدید با استفاده از الگوریتم‌های نو، روش بهینه‌سازی نلدرد-مید می‌تواند به یک نقطه غیرثابت همگرا شود [۴۰، ۴۱]. جهت مشخص شدن روش بهینه‌سازی نلدرد-مید فلوجارت مراحل این روش در شکل ۴ ترسیم شده است.

نتیجه‌ها و بحث

اعتبارسنجی

جهت اطمینان از صحت بهینه‌سازی و کد نوشته‌شده با نرم‌افزار EES، به همین دلیل نتایج بهینه‌سازی تک هدفه این پژوهش با نتایج بهینه‌سازی چندهدفه پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۳) [۴۲] مقایسه شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان تابع هدف خروجی نتایج نزدیکی نسبت به تابع هدف ذکر شده در مقاله احمدی و همکاران دارد و این صحت بهینه‌سازی و کد نویسی را نشان می‌دهد، همچنین باید گفت که مقدار خطای موجود را می‌توان مربوط به این دانست که در کار حاضر بهینه‌سازی تک هدفه انجام شده است و دو تابع هدف به‌صورت مجزا بهینه‌سازی شده‌اند ولی در کار احمدی و همکاران بهینه‌سازی چندهدفه انجام شده است و دو تابع هدف به‌صورت هم‌زمان بهینه‌سازی شده‌اند.

تحلیل حساسیت

جهت تحلیل حساسیت و همچنین تغییرات متغیرهای طراحی بر روی توابع هدف و خروجی‌های سیستم، بررسی شده است و نتایج

(۱) downhill simplex method

(۲) Amoeba method

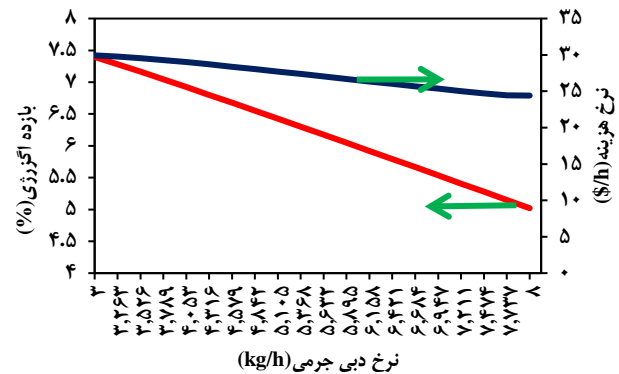
جدول ۶ - تحلیل حساسیت

ردیف	خروجی پارامتر	توان کل	هیدروژن تولیدی	اگرژی	نرخ هزینه
۱	دبی جرمی کلکتور	بیشترین: ۷۹/۸ کمترین: ۷۷/۸ درصد تغییر: -۲/۶	بیشترین: ۰/۲۰۱ کمترین: ۰/۱۹۷ درصد تغییر: -۲/۰۳	بیشترین: ۷/۳۹ کمترین: ۵/۰۲ درصد تغییر: -۴۷/۲	بیشترین: ۲۹/۹۴ کمترین: ۲۴/۴۱ درصد تغییر: -۲۲/۶۵
۲	دمای ورودی به توربین	بیشترین: ۱۵۰/۱ کمترین: ۹۹/۱ درصد تغییر: +۵۱/۴۶	بیشترین: ۰/۳۵۴ کمترین: ۰/۲۴۳ درصد تغییر: +۴۵/۶۷	بیشترین: ۳۲/۰۷ کمترین: ۲۶/۶۳ درصد تغییر: +۲۰/۴۲	بیشترین: ۴۵/۲۴ کمترین: ۴۳/۳۲ درصد تغییر: +۴/۴۳
۳	شدت تابش خورشیدی	بیشترین: ۱۱۲/۶ کمترین: ۶۲/۶ درصد تغییر: +۷۹/۸۷	بیشترین: ۰/۲۷۳ کمترین: ۰/۱۶۳ درصد تغییر: +۶۷/۴۸	بیشترین: ۷/۰۴ کمترین: ۵/۶۶ درصد تغییر: +۲۴/۳۸	بیشترین: ۳۱/۸۳ کمترین: ۲۴/۴۲ درصد تغییر: +۳۰/۳۴
۴	مساحت کلکتور	بیشترین: ۱۰۳/۹ کمترین: ۶۸/۳ درصد تغییر: +۵۱/۱۲	بیشترین: ۰/۲۴۵ کمترین: ۰/۱۷۶ درصد تغییر: +۳۸/۶۳	بیشترین: ۶/۸۷ کمترین: ۵/۸۷ درصد تغییر: +۱۷/۰۳	بیشترین: ۳۴/۲۲ کمترین: ۲۱/۲۲ درصد تغییر: +۶۱/۲۶

تغییرات پارامتر نرخ دبی جرمی کلکتور بر روی بازده اگرژی و نرخ هزینه سیستم بررسی شده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی صفحه تخت از ۳ تا ۸ کیلوگرم بر ساعت، بازده اگرژی کل سیستم از ۷/۳۹ درصد به ۵/۰۲ درصد و به میزان ۴۷/۲ درصد کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نرخ هزینه سیستم نیز از ۲۹/۹۴ به ۲۴/۴۱ دلار بر ساعت و به میزان ۲۲/۶۵ درصد کاهش یافته است. توان تولیدی خالص کل سیستم و بازده اگرژی سیستم باهم رابطه مستقیم دارند یعنی با کاهش توان خروجی کل بازده اگرژی سیستم نیز کاهش خواهد یافت و بالعکس. نرخ هزینه و توان خروجی سیستم نیز با هم رابطه مستقیم دارند یعنی با کاهش توان، نیاز به تعمیرات و نگهداری سیستم کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه سیستم نیز کاهش پیدا می‌کند.

باید گفت که با بیشتر شدن دبی سیال ورودی به کلکتور، عدد رینولدز جریان بیشتر می‌شود و این موضوع باعث افزایش انتقال حرارت کلی و افزایش تلفات حرارتی بیشتر یا همان تخریب اگرژی سیستم می‌شود که در نتیجه بازده اگرژی سیستم کم می‌شود.

در شکل ۶ تأثیر تغییرات نرخ دبی جرمی کلکتور بر روی توان تولیدی و هیدروژن تولیدی سیستم تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی صفحه تخت از ۳ تا ۸ کیلوگرم بر ساعت، باعث کاهش تولید توان سیستم از ۷۹/۸۳ کیلووات به ۷۷/۸ کیلووات و به میزان ۲/۶ درصد شده است که با کاهش تولید توان، مقدار هیدروژن تولیدی سیستم نیز ۲/۰۳ درصد کاهش یافته است. الکترولایزر غشای تبادل پروتون با توان دریافتی از



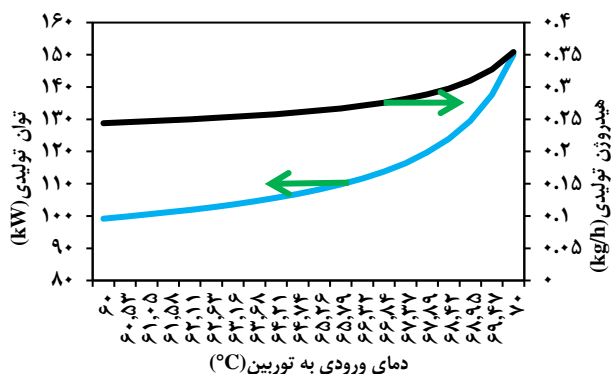
شکل ۵ - تأثیر تغییرات نرخ دبی جرمی کلکتور بر روی بازده اگرژی و نرخ هزینه

در جدول ۶ ارائه شده است.

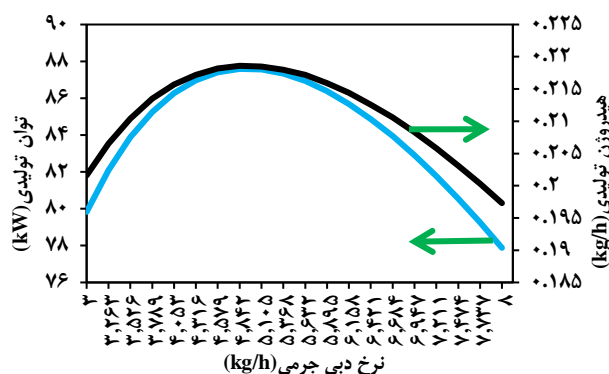
بررسی تحلیل حساسیت متغیرهای طراحی بر روی عملکرد سیستم، نتیجه شد که پارامترهای شدت تابش خورشیدی، مساحت کلکتور و دمای ورودی به توربین تأثیر مثبت را بر روی خروجی‌های سیستم و همچنین دو تابع هدف سیستم داشته‌اند و به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها معرفی می‌شوند. همچنین افزایش متغیر تصمیم‌گیری نرخ دبی جرمی کلکتور تأثیر منفی بر روی عملکرد سیستم گذاشته است.

نتایج پارامتریک

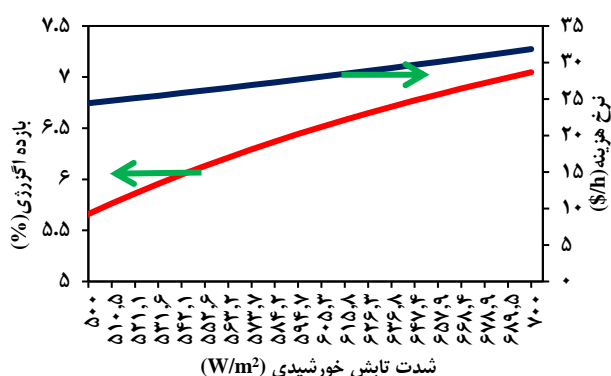
جهت بررسی عملکرد سیستم و همچنین تحلیل حساسیت سیستم، اثر متغیرهای طراحی بر روی خروجی‌های سیستم و بازده اگرژی و نرخ هزینه سیستم بررسی می‌شوند. در شکل ۵ اثر



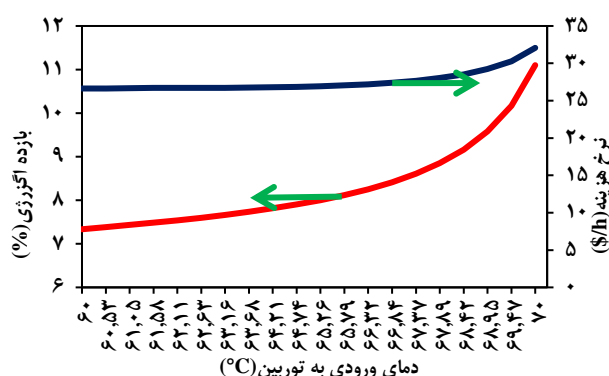
شکل ۸ - تأثیر تغییرات دمای ورودی به توربین بر روی توان تولیدی و نرخ تولید هیدروژن



شکل ۶ - تأثیر تغییرات نرخ دبی جرمی کلکتور توان تولیدی و نرخ تولید هیدروژن



شکل ۹ - تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر روی بازده انرژی و نرخ هزینه



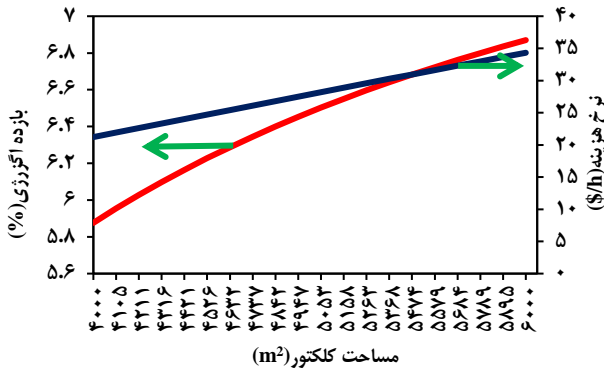
شکل ۷ - تأثیر تغییرات دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین بر روی بازده انرژی و نرخ هزینه

در شکل ۸ تأثیر افزایش دمای ورودی توربین از ۶۰ درجه سلسیوس به ۷۰ درجه سلسیوس به ازای یک نسبت فشار مشخص، بر روی توان تولیدی و هیدروژن تولیدی سیستم تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش دمای ورودی توربین سیکل ارگانیک رانکین، توان تولیدی سیستم از ۹۹/۱ کیلووات به ۱۵۰/۱ کیلووات و به میزان ۵۱/۴۶ درصد افزایش یافته است و با افزایش توان تولیدی، نرخ تولید هیدروژن نیز به میزان ۴۵/۶۷ درصد افزایش یافته است. افزایش دمای ورودی به توربین سیکل رانکین، آنتالپی سیال را نیز افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش توان کل می‌شود. پس هرچه توان افزایش یابد انرژی ورودی به الکترولایزر نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه مقدار هیدروژن تولیدی نیز افزایش می‌یابد.

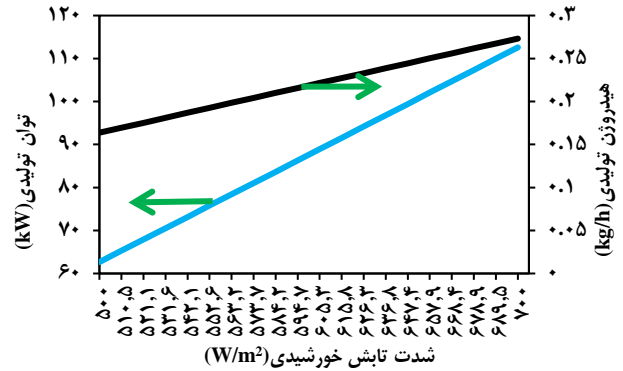
شکل ۹ تأثیر تغییرات شدت تابش خورشید بر روی بازده انرژی و نرخ هزینه سیستم و نرخ هزینه سیستم را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار شدت تابش خورشیدی از ۵۰۰ تا

توربین سیکل ارگانیک رانکین کار می‌کند، پس هرچه توان کاهش یابد، انرژی ورودی به الکترولایزر نیز کمتر می‌شود و در نتیجه مقدار هیدروژن تولیدی که بر اثر تجزیه مولکول‌های آب از هم تولید می‌شود، کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تولید توان و هیدروژن تا دبی ۵ کیلوگرم بر ساعت در حال افزایش بوده است و بعد از دبی ۵ کیلوگرم بر ساعت کاهش پیدا کرده و از مقدار اولیه نیز کمتر شده است. پس بهینه‌ترین مقدار دبی جرمی کلکتور ۵ کیلوگرم بر ساعت است.

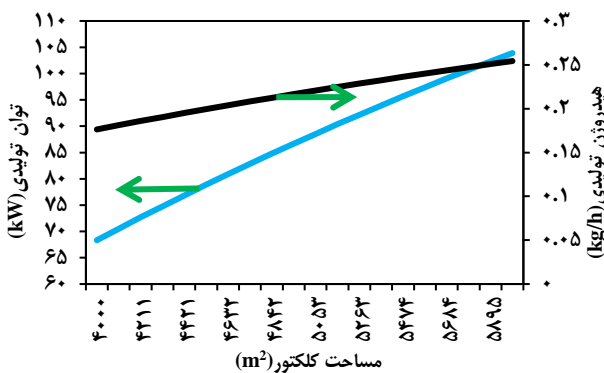
در شکل ۷ تأثیر دمای ورودی توربین بر روی بازده انرژی و نرخ هزینه تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی توربین از ۶۰ درجه سلسیوس به ۷۰ درجه سلسیوس به ازای یک نسبت فشار مشخص، باعث افزایش ۲۰/۴۲ درصدی بازده انرژی سیستم از ۷/۳۳ درصد به ۱۱/۱ درصد شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای ورودی به توربین باعث افزایش مقدار نرخ هزینه سیستم نیز از ۲۶/۶۳ دلار بر ساعت به ۳۲/۰۷ دلار بر ساعت یعنی به میزان ۴/۴۳ درصد شده است.



شکل ۱۱ - تأثیر تغییرات مساحت کلکتور بر روی بازده انرژی و نرخ هزینه



شکل ۱۰ - تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر روی توان تولیدی و تولید هیدروژن



شکل ۱۲ - تأثیر تغییرات مساحت کلکتور بر روی هیدروژن تولیدی و توان تولیدی

در شکل ۱۲ تأثیر افزایش مساحت کلکتور صفحه تخت بر روی تولید توان و تولید هیدروژن سیستم تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت از ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مترمربع، باعث رشد ۵۲/۱۲ درصدی توان تولیدی سیستم از ۶۸/۳۳ کیلووات به ۱۰۳/۹ کیلووات می‌شود. همچنین افزایش مساحت کلکتور خورشیدی و افزایش توان تولیدی سیستم، باعث رشد ۳۸/۶۳ درصدی تولید هیدروژن سیستم شده است. در نهایت باید گفت افزایش مساحت کلکتور باعث افزایش انرژی دریافتی از خورشید و افزایش عملکرد سیستم می‌شود ولی باعث رشد هزینه‌های سیستم نیز می‌شود.

اتلاف انرژی

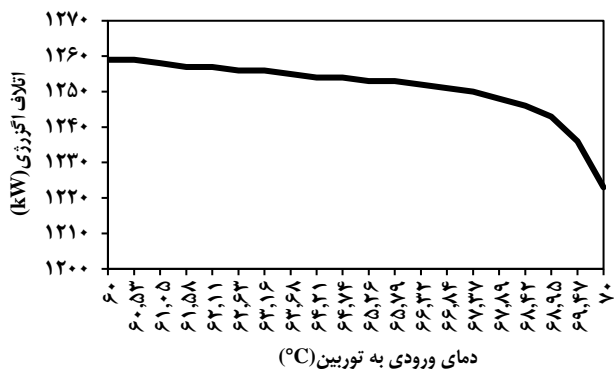
در شکل ۱۳ تأثیر دبی جرمی کلکتور بر روی اتلاف انرژی کل سیستم بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جرمی کلکتور از ۳ کیلوگرم بر ساعت به ۸ کیلوگرم بر ساعت نرخ اتلاف انرژی سیستم از ۱۰۱۵ کیلووات به ۱۴۶۱ کیلووات و به میزان

۷۰۰ وات بر مترمربع، بازده انرژی سیستم از ۵/۶۶ درصد به ۷/۰۴ درصد و به میزان ۲۴/۲۳۸ درصد افزایش یافته است و نرخ هزینه نیز از ۲۴/۴۲ به ۳۱/۸۳ دلار بر ساعت افزایش می‌یابد.

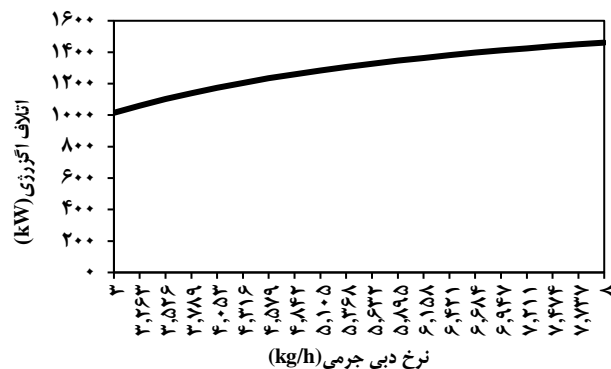
در شکل ۱۰ تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر روی تولید توان و تولید هیدروژن سیستم تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ شدت تابش خورشیدی از ۵۰۰ تا ۷۰۰ وات بر مترمربع، توان تولیدی سیستم از ۶۲/۶۶ به ۱۱۲/۶ کیلووات و به میزان ۷۹/۸۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین افزایش شدت تابش خورشیدی بر روی هیدروژن تولیدی سیستم تأثیری مثبت داشته و باعث رشد ۶۷/۴۸ درصدی تولید هیدروژن شده است. افزایش یا کاهش توان تولیدی ارتباط مستقیم با نرخ تولید هیدروژن دارد زیرا که انرژی دریافتی الکترولایزر از توان تولیدی توربین سیکل ارگانیک رانکین است.

با افزایش مساحت سطح کلکتور در دمای ثابت محیط، مقدار تابش خورشیدی جذب شده توسط کلکتور خورشیدی افزایش می‌یابد، یعنی نرخ گرمای مفید جذب شده توسط کلکتور خورشیدی افزایش می‌یابد و این عمل تأثیر مثبتی بر روی عملکرد سیستم دارد.

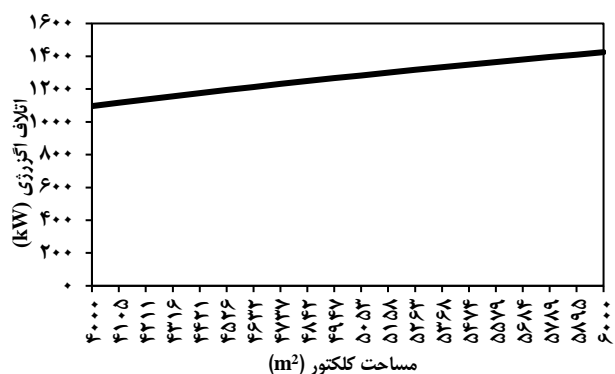
در شکل ۱۱ تأثیر تغییرات مساحت کلکتور بر روی توابع هدف تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت از ۴۰۰۰ تا ۶۰۰۰ مترمربع، باعث رشد ۱۷/۰۳ درصدی بازده انرژی سیستم از میزان ۵/۸۷ درصد به ۶/۸۷ درصدی شده است و به عبارتی مساحت کلکتور با بازده رابطه مستقیم دارد. همچنین نتیجه شد که افزایش مساحت کلکتور رشد ۶۱/۲۶ درصدی نرخ هزینه کل سیستم از ۲۱/۲۲ دلار بر ساعت به ۵۳۴/۳۲ دلار بر ساعت شده است. پس باید گفت که با افزایش بازده انرژی نیاز به تعمیرات سیستم افزایش می‌یابد پس در نتیجه هزینه سیستم نیز افزایش یافته است، یعنی بازده انرژی سیستم و نرخ هزینه سیستم با هم رابطه مستقیم دارند.



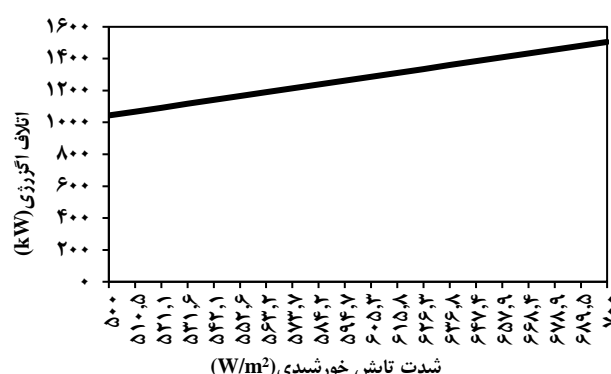
شکل ۱۵ - تأثیر تغییرات دمای ورودی توربین بر روی اتلاف انرژی سیستم



شکل ۱۳ - تأثیر تغییرات دبی جرمی کلکتور بر روی اتلاف انرژی سیستم



شکل ۱۶ - تأثیر تغییرات مساحت کلکتور بر روی اتلاف انرژی سیستم



شکل ۱۴ - تأثیر تغییرات شدت تابش خورشیدی بر روی اتلاف انرژی سیستم

در شکل ۱۶ تأثیر افزایش مساحت کلکتور بر روی اتلاف انرژی کل سیستم بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مساحت کلکتور از ۴۰۰۰ به ۶۰۰۰ مترمربع، نرخ اتلاف انرژی سیستم از ۱۰۹۶ کیلووات به ۱۴۲۵ کیلووات یعنی به اندازه ۳۰٪ درصد افزایش می‌یابد.

بهینه‌سازی تک هدفه

در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی تک هدفه نلدر-مید با استفاده از نرم‌افزار EES به بهینه‌سازی توابع هدف سیستم شامل بازده انرژی (هدف ماکزیمم کردن)، اتلاف انرژی (هدف مینیمم کردن) و نرخ هزینه سیستم (هدف مینیمم کردن) و همچنین بهینه کردن مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری در هر مرحله از بهینه‌سازی پرداخته شده است. پس از انجام بهینه‌سازی بهترین نتایج حاصل شده برای سیستم در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

در جدول ۹ درصد تغییر نتایج بهبود توابع هدف مورد بررسی، بعد و قبل از بهینه‌سازی بررسی شده است و نتایج حاکی از بهبود ارزش توابع هدف است.

۴۳٪ درصد رشد یافته است. علت افزایش اتلاف انرژی در سیستم، کاهش توان تولیدی خالص سیستم و بازده انرژی سیستم است.

در شکل ۱۴ تأثیر تغییرات تابش خورشیدی بر روی اتلاف انرژی کل سیستم بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تابش خورشیدی از ۵۰۰ وات بر مترمربع به ۷۰۰ وات بر مترمربع نرخ اتلاف انرژی سیستم از ۱۰۴۴ کیلووات به ۱۵۰۵ کیلووات و به میزان ۴۴٪ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش شدت تابش خورشیدی در دمای ثابت محیط، اختلاف بین دمای محیط و دمای سطح کلکتور افزایش می‌یابد، بنابراین تلفات گرمایی از سطح کلکتور افزایش و بازده حرارتی کلکتور کاهش می‌یابد. در نتیجه تخریب انرژی کلکتور خورشیدی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵ تأثیر دمای ورودی توربین بر روی اتلاف انرژی کل سیستم بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ورودی توربین از ۶۰ درجه سلسیوس به ۷۰ درجه سلسیوس، نرخ اتلاف انرژی سیستم از ۱۲۵۹ کیلووات به ۱۲۲۳ کیلووات یعنی به اندازه ۲٪ درصد، کاهش می‌یابد.

جدول ۷ - بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هدف بازده انرژی

مقدار	خروجی
۷/۳۱	بازده انرژی (%)
۶۳/۴	دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین (°C)
۴۰۰۰	مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت (m ²)
۳	دبی جرمی کلکتور (kg/h)

جدول ۹ - درصد تغییرات نتایج قبل و بعد از بهینه‌سازی تک هدفه

	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی	
خروجی	ارزش	ارزش	درصد
انرژی (%)	۶/۴۷	۷/۳۱	+۱۲/۹۸
هزینه (%)	۲۷/۶۳	۲۷/۴۸	-۰/۵۴

علامت مثبت حاکی از رشد توابع هدف بازده انرژی سیستم بعد از بهینه‌سازی است و علامت منفی نتایج، حاکی از کم شدن تابع هدف نرخ هزینه سیستم و اتلاف انرژی سیستم بعد از بهینه‌سازی است.

جدول ۸ - بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هدف نرخ هزینه

مقدار	خروجی
۲۷/۴۳	نرخ هزینه (\$/h)
۶۵/۲	دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین (°C)
۴۰۰۰	مساحت کلکتور خورشیدی صفحه تخت (m ²)
۳/۴۶۴	دبی جرمی کلکتور (kg/h)

زمان عدم وجود یکی از انرژی‌های سیستم قادر به ادامه فعالیت خود است. به همین دلیل جهت راه‌اندازی این سیستم مناطقی در کشور ایران که از ساعات تابش خورشیدی بالایی برخوردار هستند و دسترسی مستقیم به آب دریا را دارد، توصیه شده است.

امکان سنجی راه‌اندازی سیستم پیشنهادی

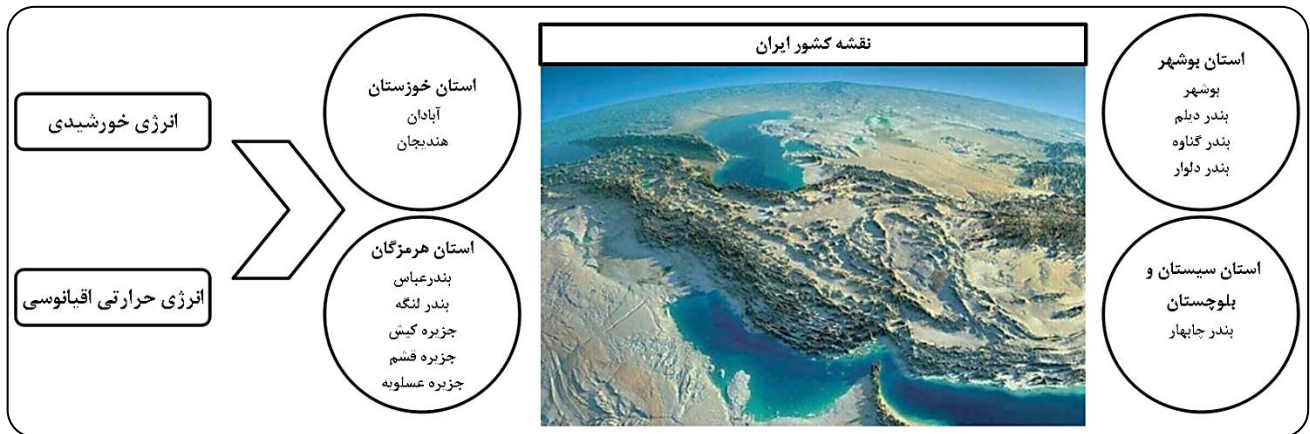
با توجه به استفاده از دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و حرارتی اقیانوسی، این سیستم برای مناطقی از کشور ایران که دسترسی بالایی به انرژی پتانسیل خورشیدی دارند و از طرفی به انرژی حرارتی اقیانوسی نیز دسترسی مستقیم دارند، توصیه می‌شود. انرژی حرارتی اقیانوسی که از اختلاف دمای آب دریا حاصل می‌شود برای مناطقی از کشور ایران مناسب است که به دریای خلیج فارس نزدیک باشند. در شکل ۱۷ استان‌ها و شهرهای که مجاور دریای خلیج فارس هستند و از انرژی خورشیدی مناسبی برخوردار هستند، معرفی شده‌اند. استان‌های خوزستان، هرمزگان، بوشهر و سیستان و بلوچستان از استان‌هایی با تابش خورشیدی بسیار بالا هستند و این استان‌های دارای ساعات بالای تابش خورشیدی در روزهای سال هستند، به همین دلیل برای راه‌اندازی سیستم پیشنهادی با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی مناسب هستند. از طرفی شهرهای آبادان، هندیجان، بوشهر، بندر دیلم، بندر گناوه، بندر دلووار، بندر چابهار، بندرعباس، جزیره کیش، جزیره عسلویه، جزیره قشم و بندرلنگه شهرهای مجاور با دریای خلیج فارس هستند، به همین دلیل برای استفاده از انرژی حرارتی اقیانوسی و راه‌اندازی یک سیستم ترکیبی مبتنی بر انرژی خورشیدی و انرژی حرارتی اقیانوسی مناسب هستند.

لازم به ذکر است از معایب استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر عدم پایداری بالای این انرژی‌ها است، چرا که انرژی خورشیدی در شب‌ها و روزهای بارانی در دسترس نیست، به همین دلیل فعالیت سیستم متوقف خواهد شد، به همین دلیل سیستم پیشنهادی با استفاده از دو انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و حرارتی اقیانوسی دارای پایداری بالاتری نسبت به سیستم‌های تک انرژی است، چرا که در

نتیجه‌گیری

سیستم‌های تولید چندگانه با هدف بهبود مصرف انرژی، کاهش اتلافات ناشی از انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در شبکه و نیز کاهش آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش، یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی خورشیدی و انرژی حرارتی اقیانوسی از نظر انرژی-اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. سیستم طراحی شده متشکل از یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت، سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر غشای تبادل پروتون بود. با استفاده از نرم‌افزار EES یک تحلیل حساسیت و ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای طراحی بر توان خالص خروجی، تولید هیدروژن، بازده انرژی و نرخ هزینه انجام شد. بهینه‌سازی سیستم تجدیدپذیر ترکیبی پیشنهادی، با استفاده از روش نلد-مید و با نرم‌افزار EES به صورت تک هدفه به بهینه کردن توابع هدف که شامل دو تابع هدف بازده انرژی و نرخ هزینه بود، انجام شد. دمای ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین، شدت تابش خورشیدی، نرخ دبی جرمی کلکتور و مساحت کلکتور صفحه‌ای تخت به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری جهت مدل‌سازی و بهینه‌سازی تک هدفه سیستم تجدیدپذیر، در نظر گرفته شدند. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم با نرم‌افزار EES انجام شد.
- از روش بهینه‌سازی تک هدفه نلد-مید یا روش سیمپلکس سراسمی که یک روش عددی رایج در پیدا کردن کمینه یا بیشینه یک تابع هدف است، استفاده شد.



شکل ۱۷ - مناطق مناسب جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی

- با توجه به عدم پایداری انرژی خورشیدی و عدم دسترسی در شب‌ها و روزهای بارانی، استفاده از یک منبع ذخیره انرژی و ترکیب آن با سیستم پیشنهادی برای استفاده در زمانی که انرژی تابشی از خورشید در دسترس نیست، توصیه می‌شود.
- جهت ارائه یک تحلیل مناسب جهت راه‌اندازی سیستم پیشنهادی در مناطق مختلف، بررسی شرایط آب و هوایی منطقه بر روی سیستم پیشنهادی، توصیه می‌شود.
- با توجه به قابلیت بالای انرژی خورشیدی می‌توان با افزایش تعداد کلکتورهای خورشیدی و همچنین گسترش سیستم پیشنهادی، باعث افزایش عملکرد سیستم در تولید محصولات شد.
- بحث اتلاف انرژی در تمامی سیستم‌های انرژی وجود دارد، لذا راه‌کارهایی مانند استفاده از سیکل‌های اصلاح‌شده تولید توان، استفاده از سیستم‌های حرارتی تولیدی کننده محصولاتی مانند سرمایش و گرمایش جهت استفاده از انرژی اتلافی از تجهیزات سیستم پیشنهادی، توصیه می‌شود.

- نتایج بهینه‌سازی با روش بهینه‌سازی تک هدف نلدر-مید نتیجه شد که بهترین میزان بازده انرژی سیستم ۷/۳۱ درصد و نرخ هزینه سیستم ۲۷/۴۸ دلار بر ساعت در حالت بهینه است.
- از تحلیل حساسیت نتیجه شد که افزایش پارامترهای مساحت کلکتور، شدت تابش خورشیدی و دمای ورودی به توربین بیشترین تأثیر مثبت را بر روی خروجی‌ها و عملکرد سیستم داشته است و به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامترها معرفی می‌شود.
- نتیجه شد که افزایش متغیر تصمیم‌گیری نرخ دبی جرمی کلکتور خورشیدی تأثیر منفی بر روی عملکرد سیستم گذاشته است.
- از تحلیل اتلاف انرژی سیستم نتیجه شد که افزایش شدت تابش خورشیدی، مساحت کلکتور و همچنین نرخ دبی جرمی کلکتور باعث افزایش اتلاف انرژی کلی سیستم می‌شوند.
- از تحلیل اتلاف انرژی نتیجه شد که افزایش دمای ورودی به توربین، باعث کاهش اتلاف انرژی سیستم می‌شود.

پیشنهادها

در این قسمت جهت بهبود مدل ارائه شده، پیشنهادهایی ارائه شده است:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

مراجع

[1] Maczulak A., "Renewable Energy: Sources and Methods," Facts on File, New York, (2010)

[2] Flannery T., "The Weather Markers," Text Publishing, Australia, (2005).

[۳] اکبری سنه ر، شریف نیا ش، مرادیف غ، افزایش تولید فتوکاتالیستی هیدروژن از طریق بکارگیری تابش التراسوند

در طول فرآیند سنتز فتوکاتالیست تیتانیا روی پایه کلینوپتیلولیت، پژوهش نفت، ۲۷: ۳۹ تا ۵۲ (۱۳۹۶).

[۴] یحیوی س.ر.، حقیقی م.، شفیعی س.، عبدالهی فر م.، رحمانی ف.، سنتز نانوکاتالیست MgO_3O_2Ni-Co/Al – به روش تلقیح برای تولید هیدروژن با استفاده از فرایند ریفرمینگ خشک متان، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۷(۲): ۲۱ تا ۳۲** (۱۳۹۷).

- [5] Akbari Sene R., Rahmani F., Moradi G.M., Sharifnia S., Immobilization of TiO_2 Nanoparticles Over Treated Natural Aluminasilicate for Hydrogen Production: Effect of Support Treatment and Operational Conditions of Process, *Journal of Petroleum Research*, **30**: 14-30 (2020).
- [6] Hernández-Romero I.M., Nápoles-Rivera F., Flores-Tlacuahuac A., Fuentes-Cortés L.F., Optimal Design of the Ocean Thermal Energy Conversion Systems Involving Weather and Energy Demand Variations, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **157**: 108114 (2020).
- [7] Vera D., Baccioli A., Jurado F., Desideri U., Modeling and Optimization of an Ocean Thermal Energy Conversion System for Remote Islands Electrification, *Renewable Energy*, **162**: 1399-1414 (2020).
- [8] Wu Z., Feng W., Chen L., Tang W., Shi J., Ge Y., Constructal Thermodynamic Optimization for Ocean Thermal Energy Conversion System with Dual-Pressure Organic Rankine Cycle, *Energy Conversion and Management*, **210**: 112727 (2020).
- [9] Temiz M., Dincer I., A Unique Ocean and Solar based Multigenerational System with Hydrogen Production and Thermal Energy Storage for Arctic Communities, *Energy*, **239(Part B)**: 122126 (2022).
- [10] Lei Y., Wang D., Jia H., Chen J., Li J., Song Y., Li J., Multi-Objective Stochastic Expansion Planning based on Multi-Dimensional Correlation Scenario Generation Method for Regional Integrated Energy System Integrated Renewable Energy, *Applied Energy*, **276**: 115395 (2020).
- [11] Jiang J., Ming B., Huang Q., Chang J., Liu P., Zhang W., Ren K., Hybrid Generation of Renewables Increases the Energy System's Robustness in a Changing Climate, *Journal of Cleaner Production*, **324**: 129205 (2021).
- [12] Cao Y., Dhahad H.A., Togun H., Abdollahi Haghghi M., Athari H., Mustafa Mohamed A., Exergetic and Economic Assessments and Multi-Objective Optimization of a Modified Solar-Powered CCHP System with Thermal Energy Storage, *Journal of Building Engineering*, **43**: 102702 (2021).
- [13] Almohammadi K.M., Harby K., Operational Conditions Optimization of a Proposed Solar-Powered Adsorption Cooling System: Experimental, Modeling, and Optimization Algorithm Techniques, *Energy*, **206**: 118007 (2020).
- [14] Nazari N., Mousavi S.M., Mirjalili S.A., Exergo-Economic Analysis and Multi-Objective Multi-Verse Optimization of a Solar/Biomass-based Trigeration System Using Externally-Fired Gas Turbine, Organic Rankine Cycle and Absorption Refrigeration Cycle, *Applied Thermal Engineering*, **191**: 116889 (2021).

- [15] Khani L., Jabari F., Jabari M., Mohammadi-ivatloo B., [Design, Evaluation, and Optimization of an Efficient Solar-based Multi-Generation System with an Energy Storage Option for Iran's Summer Peak Demand](#), *Energy Conversion and Management*, **242**: 114324 (2021).
- [16] Peng X., Bajaj I., Yao M., Maravelias C.T., [Solid-Gas Thermochemical Energy Storage Strategies for Concentrating Solar Power: Optimization and System Analysis](#), *Energy Conversion and Management*, **245**: 114636 (2021).
- [17] Teymouri M., Sadeghi S., Moghimi M., Ghandehariun S., [3E Analysis and Optimization of an Innovative Cogeneration System based on Biomass Gasification and Solar Photovoltaic Thermal Plant](#), *Energy*, **230**: 120646 (2021).
- [18] Ansarinassab H., Hajabdollahi H., [Multi-Objective Optimization of a Geothermal-based Multigeneration System for Heating, Power and Purified Water Production Purpose Using Evolutionary Algorithm](#), *Energy Conversion and Management*, **223**: 113476 (2020).
- [19] Ding P., Zhang K., Yuan Z., Wang Z., Li D., Chen T., Shang J., Shofahaei R., [Multi-Objective Optimization and Exergoeconomic Analysis of Geothermal-based Electricity and Cooling System Using Zeotropic Mixtures as the Working Fluid](#), *J. Clean. Product.*, **294**: 126237 (2021).
- [20] Song G., Song X., Li G., Shi L., Wang G., Ji J., Xu F., Song Z., [An Integrated Multi-Objective Optimization Method to Improve the Performance of Multilateral-Well Geothermal System](#), *Renewable Energy*, **172**: 1233-1249 (2021).
- [21] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M.A., [Energy and Exergy Analyses of Hydrogen Production via Solar-Boosted Ocean Thermal Energy Conversion and PEM Electrolysis](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **38(4)**: 1795-1805 (2013).
- [۲۲] ملکی ا.، لطفی پ.، شهرکی شهدآبادی ر.، احمدی م.ح.، پتانسیل سنجی مزرعه‌های خورشیدی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در ایران، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۴۰: ۲۵۱ تا ۲۷۱ (۱۴۰۰).
- [۲۳] موسوی و.ا.، فرزانه گرد م.، احمدی م.ح.، تحلیل انرژی و انرژی-اقتصادی سیکل رانکین آلی با محرک انرژی خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز در تانک ذخیره‌سازی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۹: ۲۴۷ تا ۲۵۷ (۱۳۹۹).
- [۲۴] آریان فر ل.، یاری م.، عبدی اقدام ا.، تحلیل فنی - اقتصادی چرخه‌ی رانکین آلی تولید گرما و توان با منابع انرژی استان اردبیل، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۶: ۱۶۵ تا ۱۸۵ (۱۳۹۶).
- [۲۵] کریمی نیا ح.، فرهادی ف.ا.، شبیه‌سازی و بررسی فنی - اقتصادی سامانه سردکن جذبی تک اثره آب - لیتیم برومید مدد یافته با انرژی خورشیدی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۳: ۵۳ تا ۶۴ (۱۳۹۳).
- [۲۶] عرب ق.، قدمیان ح.، مدل‌سازی ترموآکونومیکی و تحلیل پارامتری چرخه هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد تحت فشار / توربین گازی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۲: ۹۳ تا ۱۰۳ (۱۳۹۲).
- [۲۷] پاکدل ع.، جعفری نصر م.ر.، شبیه‌سازی و بررسی پارامتری چرخه تجمعی متمرکز کننده‌های سهموی خورشیدی و چرخه آلی رانکین برای تولید توان الکتریکی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۳: ۶۵ تا ۸۳ (۱۳۹۳).

- [28] Bedakhanian A., Maleki A., Haghighat S., [Utilizing the Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Designing a Renewable Multiple Energy System on the Basis of the Parabolic Trough Solar Collector](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **47(86)**: 36433-36447(2022).
- [۲۹] زارع علی آبادی ح.، ساعی مقدم م.، بررسی تجربی اثر نانو ذره اکسید روی و پارامترهای فرایندی بر عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲) ۴۱: ۸۵ تا ۹۵ (۱۳۹۹).
- [۳۰] رضایی عزیزآبادی ح.، ضیابشرحق م.، مافی م.، شبیه‌سازی یک طرح ابتکاری مایع‌سازی هیدروژن برای استفاده از انرژی اتلافی نیروگاه‌های گازی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۴۱: ۳۸۳ تا ۳۹۹ (۱۴۰۰).
- [۳۱] سعیدی م.، صفری پور م.، بررسی روش های بازیابی و مدیریت گازهای دورریز واحدهای صنعتی به منظور بازگشت به چرخه انرژی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۴۱: ۳۲۷ تا ۳۵۴ (۱۴۰۰).
- [32] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M.A., [Multi-Objective Optimization of a Novel Solar-based Multigeneration Energy System](#), *Sol. Energy*, **108**: 576–591 (2014).
- [33] Farahat S., Sarhaddi F., Ajam H., [Exergetic Optimization of Flat Plate Solar Collectors](#), *Renew Energy*, **34(4)**: 1169-74 (2009).
- [34] Khanmohammadi S., Heidarnejad P., Javani N., Ganjehsarabi H., [Exergoeconomic Analysis and Multi Objective Optimization of a Solar based Integrated Energy System for Hydrogen Production](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **42(33)**: 21443-21453 (2017).
- [35] Psomopoulos C.S., [Solar Energy: Harvesting the Sun's Energy for Sustainable Future](#), *Handbook of Sustainable Engineering*, **1(117)**: 1065-1107 (2013).
- [36] Ameri M., Ahmadi P., Khanmohammadi S., [Exergy Analysis of a 420 MW Combined Cycle Power Plant](#), *Int. J. Energy*, **32(2)**: 175-183 (2007).
- [37] Brown C.J., "Advanced Exergy and Exergoeconomic Analysis of the Major Components of a Combined Cycle Power Plant", Thesis M.S.C, Texas A&M University, (2015).
- [38] Peters M.S., Timmerhaus K., West R.E., "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", New York: McGraw-Hill (1968).
- [39] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M.A., [Thermodynamic Modeling and Multi-Objective Evolutionary based Optimization of a New Multigeneration Energy System](#), *Energy Conversion and Management*, **76**: 282-300 (2013).
- [40] Nelder J.A., Mead R., [A Simplex Method for Function Minimization](#), *Computer Journal*, **7**: 308–313 (1965).
- [41] Rao S.S., Bard J., [Engineering Optimization: Theory and Practice](#), *IIE transactions*, **29(9)**: 799 (1997).
- [42] Ahmadi P., Dincer I., Rosen M.A., [Multi-Objective Optimization of an Ocean Thermal Energy Conversion System for Hydrogen Production](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **40(24)**: 7601-7608 (2015).