



آنالیز انرژی و اگزرژی یک نیروگاه بادی بر پایه الکترولایزر غشای تبادل پروتون

غفار کریمی^۱، احسان درونه^۱، احسان اله عصاره^{۲*}

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
 ۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: ۱۴۰۵/۴/۲، بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۸

چکیده

در پژوهش حاضر به مدل سازی ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه سازی چندهدفه سیستم تولید برق مبتنی بر انرژی بادی و متشکل از یک مزرعه بادی و توربین گازی برای تأمین برق شهر ملبورن در کشور استرالیا پرداخته شد. جهت مدل سازی سیستم مورد بررسی و همچنین به دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم افزار حل معادلات مهندسی استفاده شد. در این مطالعه یک بهینه سازی چندهدفه برای پیدا کردن بهینه ترین حالت سیستم نسبت به تغییرات ۸ پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم شامل تعداد توربین بادی، بازده توربین گازی، دمای ورودی به توربین گازی، بازده کمپرسور، بازده افترکولر، بازده اینترکولر، فشار ورودی به تانک ذخیره ساز انرژی هوای فشرده و نسبت فشار با استفاده از ترکیب روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج بهینه نشان داد که سیستم در بهینه ترین حالت خود می تواند به بازده اگزرژی ۴۷/۸۸ درصد و نرخ هزینه ۲۳۶۹/۲۹ دلار بر ساعت برسد که تعداد توربین بادی بهینه برای تشکیل یک مزرعه بادی قدرتمند در حالت بهینه ۱۵۵ تا به دست آمد. نتایج تحلیل اگزرژی نشان داد که نرخ کل تخریب اگزرژی سیستم (مجموع تخریب اگزرژی تجهیزات و واحدها) ۱۷۳۳ کیلووات ساعت است. نتایج نشان داد که سیستم در طول سال می تواند ۱۱۵۷۴۳۶۰۰ کیلووات ساعت برق، با نرخ هزینه ۱۱۵۳۹۹۴۴ دلار در سال تولید کند. نتایج زیست محیطی نشان داد که با تولید ۱۱۵۷۴۳ مگاوات ساعت برق، می تواند از انتشار ۲۳۶۱۱ تن کربن دی اکسید در سال جلوگیری کرد و ۵۶۶۶۸۰ دلار از هزینه های زیست محیطی کاهش داد و ۱۱۴ هکتار گسترش فضای سبز کمک کرد.

کلمات کلیدی: سیستم تجدیدپذیر، شبکه عصبی، بهینه سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک، انرژی بادی، توربین بادی.

*عهده دار مکاتبات: assareh@iaud.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله: غفار کریمی، احسان درونه، احسان اله عصاره. آنالیز انرژی و اگزرژی یک نیروگاه بادی بر پایه الکترولایزر غشای تبادل پروتون. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵؛ ۱۳ (۲): ۶۷-۴۷.

۱- مقدمه

انرژی برق مهم موضوع امروزی است که نیاز به مطالعات کاملی جهت گذر از انرژی‌های فسیلی و استفاده از انرژی‌های نو دارد. پاک بودن، بحث زیست‌محیطی، ایمن بودن و ارزان بودن از ویژگی‌های مهم تأمین انرژی لازم است. در کنار این ویژگی‌ها باید با آگاه‌سازی مردم در مورد صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مصرف انرژی را کاهش داد. زیرساخت‌های انرژی فعلی متأسفانه پایدار نیست و باید در آینده نزدیک تجدید شود. از این منظر، سیستم‌های تجدیدپذیر راه‌حلی با کارایی بالا، ارزان، تمیز و پایدار برای مشکل فعلی ارائه می‌دهند. سیستم‌های تجدیدپذیر با تولید محصولات مختلفی از جمله برق به تأمین انرژی مصرفی موردنیاز شهرها کمک خواهد کرد. علاوه بر عملکرد و کارایی، سرمایه اولیه و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری باید تجزیه و تحلیل شود تا بتوان یک سیستم تجدیدپذیر مؤثر و اقتصادی را انجام داد. رشد عمومی جمعیت با توسعه اقتصادی باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود [۱].

هزینه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ، نفت و گاز بالا است؛ اما با وجود شکست‌های فراوان در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و پذیرش گاه به گاه، در دهه‌های آینده به دلیل پیشرفت‌های فناوری شاهد رشد آن خواهیم بود [۲]. بحث استفاده از انرژی بادی و جذب این انرژی توسط توربین‌های بادی و تشکیل مزارع بادی متشکل از تعدادی زیادی توربین‌های بادی محور عمودی با افقی به دلیل راندمان بالای این نوع از توربین‌ها توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است و به وسیله این انرژی پایه اقدام به تولید انرژی‌های موردنیاز بشر و جوامع مختلف شده است [۳، ۴].

چن و همکاران در سال ۲۰۲۱، بر روی یک سیستم بر مبنای انرژی خورشیدی و ذخیره انرژی شیمیایی مبتنی بر آمونیاک، کار کردند. در این پژوهش یک روش جدید که برای اولین بار توسط الکترولیز آب با دمای بالا و ذخیره انرژی حرارتی شیمیایی مبتنی بر آمونیاک، ارائه شد. در این پژوهش یک سیستم جدید، شامل زیرسیستم‌های پلن خورشیدی، ذخیره انرژی مبتنی بر آمونیاک، سیکل برایتون و الکترولایزر بررسی شد [۵]. چن و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم جدید مبتنی بر انرژی باد و ترکیب توربین بادی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی پرداختند. با توجه به ویژگی متناوب انرژی‌های تجدیدپذیر، ترکیب آن‌ها با سیستم‌های ذخیره انرژی کارآمد و سودآور به نظر رسید. راندمان رفت و برگشت انرژی و هزینه واحد محصولات به صورت $37/0\%$ و $30/41$ دلار بر گیگا ژول در فرآیند بهینه‌سازی به دست آمد [۶]. ژو و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم انرژی مبتنی بر انرژی باد و ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن پرداختند. هنگامی که سیستم با ۱۰-۰ توربین بادی پیکربندی شد، با افزایش مقیاس توربین‌های بادی، اقتصاد، مصرف انرژی و انتشار کربن بهبود یافت. مصرف انرژی و بهره‌برداری از نیروی باد به ترتیب بالای ۶۶،۷۹ درصد و ۹۹،۷۳ درصد بود [۷].

سپریو در سال ۲۰۲۳، به بررسی یک سیستم مبتنی بر انرژی باد، آبی، خورشیدی و زیست‌توده برای تولید پایدار پرداخت. در این مقاله توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق در مجموعه انرژی کشور و به ترتیب میزان تأمین نیاز انرژی در طول سال به منظور کاهش هرچه بیش‌تر میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی ارائه شد. برای تولید انرژی، رومانی دارای تعداد زیادی فناوری انرژی تجدیدپذیر است که در ترکیب انرژی خود ادغام شده است، اما میزان توسعه و تناسبی که آن‌ها تقاضای انرژی را پوشش می‌دادند بسیار متفاوت بود [۸]. سعادت و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده برای توربین‌های بادی پرداختند. این سیستم توان اضافی را قبل از تولید الکتریسیته جذب می‌کند، به طوری که می‌توان اجزای الکتریکی را برای تقاضا به جای عرضه کوچک‌تر کرد. انرژی در یک مخزن ذخیره هوای فشرده با مایع دو محفظه با فشار بالا ذخیره می‌شود [۹].

جین و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده هیبریدی و سیستم توربین بادی برای کاهش نوسانات توان باد کار کردند. سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده هیبریدی و سیستم توربین بادی پتانسیل کاهش نوسانات توان خروجی را در مقایسه با یک توربین بادی مستقل دارد. نتایج شبیه‌سازی دینامیکی نشان داد که نوسان خروجی توان چنین سیستم هیبریدی را می‌توان تا ۳۸ درصد کاهش داد و دوره عملکرد پایدار آن را می‌توان تا سه ساعت افزایش داد [۱۰]. حبیب زاده و همکاران در یال ۲۰۲۵، به ارزیابی پایداری تأمین برق یک کارخانه پتروشیمی بر اساس بهینه‌سازی سناریوهای مختلف سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر

هیبریدی پرداختند. سناریوهای هیبریداسیون مختلف با در نظر گرفتن هزینه برق (اقتصادی)، انتشار کربن دی اکسید (محیط زیست)، از دست دادن احتمال منبع تغذیه (قابلیت اطمینان) و بازده انرژی (فنی) برای به دست آوردن جبهه پارتو، مدل سازی و بهینه سازی می شوند. نتایج نشان می دهد که خورشید + باد پایدارترین پیکربندی با شاخص پایداری ۰/۸۹ است و پس از آن مبدل انرژی خورشیدی + باد + موج (۰/۶۳)، خورشیدی (۰/۴۶) و مبدل انرژی خورشیدی + موج (۰/۶۳) قرار دارند [۱۱].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲، به بررسی سیستم یک نیروگاه بادی تولید کننده سه انرژی سرمایه، گرمایش و برق به صورت هم زمان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار ذخیره سازی کربن دی اکسید و دمای اتلاف حرارت تأثیر زیادی بر عملکرد ترمودینامیکی نیروگاه بادی مطالعاتی در زمان فعالیتش دارد [۱۲]. ژو و همکاران در سال ۲۰۲۴، به تحلیل عملکرد و بهینه سازی چند هدفه سیستم تأمین انرژی یکپارچه انرژی های تجدیدپذیر دریایی پرداختند. این مطالعه یک سیستم مکمل چند انرژی نوآورانه را معرفی می کند که نمک زدایی انجماد آب دریا، تبرید و تولید هم زمان نیرو-هیدروژن-آمونیاک را با انرژی حرارتی اقیانوس، انرژی باد و انرژی خورشیدی ادغام می کند. نتایج بهینه سازی عملکرد نشان می دهد که سیستم به راندمان ذخیره سازی انرژی ۶۵،۹۶ درصد دست می یابد و نرخ کاهش این سیستم تنها ۳،۹۹ درصد است که به طور قابل توجهی کمتر از نرخ کاهش ۱۰ درصدی در سیستم سنتی است [۱۳]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳، یک مدل بهینه سازی قوی مبتنی بر داده برای برنامه ریزی نیروگاه انتشار کربن نزدیک به صفر با در نظر گرفتن عدم قطعیت های خروجی نیروی باد و بازار برق-کربن ارائه کردند. نتایج نشان داد با کاهش انتشار کربن و مصرف منابع انرژی تجدیدپذیر، مزایای زیست محیطی بهتری را نشان می دهد [۱۴].

طراحی و راه اندازی سیستم های نو نیاز به اطلاعات کامل و جامعی از شرایط فنی و محیطی، نوع تجهیزات، امکان سنجی و طراحی دارد. همچنین بحث های محیط زیستی سیستم های تولید انرژی بیش تر باید مورد توجه قرار گیرد و تأمین انرژی با کم ترین اثر تخریبی بر محیط زیست صورت گیرد که نیاز به دانش و فناوری کامل تری دارد؛ بنابراین، توسعه سیستم های انرژی با عملکرد بالا و کاهش آلودگی های زیست محیطی و همچنین هزینه مناسب، از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این راستا، در تحقیق حاضر برای پرداختن به این موضوع یک سیستم نوآورانه برای تأمین انرژی برق شهر ملبورن پیشنهاد شده است. در این مطالعه به بررسی یک سیستم تجدیدپذیر مبتنی بر انرژی باد و متشکل از یک مزرعه بادی به همراه واحد ذخیره ساز انرژی هوای فشرده پرداخته می شود و یک تحلیل جامع ترمودینامیکی، اقتصادی به همراه بهینه سازی چند هدفه و همچنین آنالیز زیست محیطی انجام می شود. عملکرد سیستم نسبت به تغییرات آب و هوایی شهر ملبورن در قاره اقیانوسیه و کشور استرالیا بررسی می شود. به طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای توربین بادی، ذخیره ساز انرژی هوای فشرده و الکتروایزر غشای تبادل پروتون با هدف افزایش عملکرد حداکثری سیستم و به صورت هم زمان کاهش هزینه های سیستم و بدون هیچ گونه اثرات مخرب بر محیط زیست.

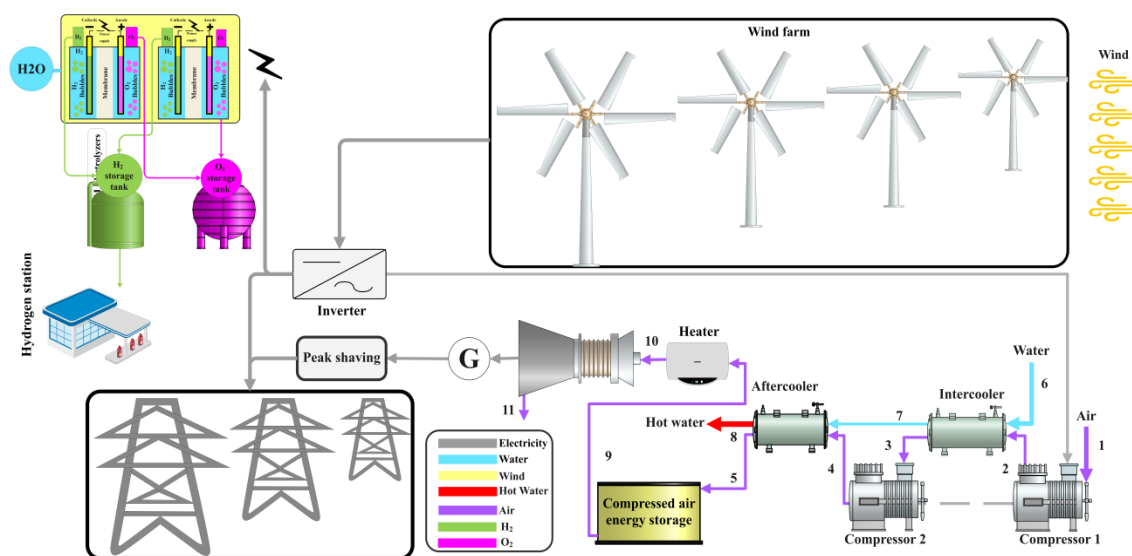
- ارائه یک بهینه سازی چندهدفه برای یافتن بهترین و بهینه ترین شرایط عملکردی سیستم.
- استفاده از ترکیب هم زمان روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی عملکرد فنی و اقتصادی سیستم مطالعاتی.
- بررسی امکان سنجی و قابلیت اطمینان سیستم بر اساس داده های محیطی به دست آمده از نرم افزار متانورم.
- آنالیز انرژی سیستم پیشنهادی با استفاده از تحلیل سانکی.
- آنالیز زیست محیطی سیستم پیشنهادی جهت کاهش آلودگی های زیست محیطی.

بهینه سازی سیستم های تجدیدپذیر تولید انرژی، به مدل سازی ترمودینامیکی و اقتصادی، تحلیل و بهینه سازی انواع سیستم های انرژی در کاربردهای مختلف می پردازد. بهینه سازی انرژی به درک جدیدی از سیستم ها و فرآیندها برای تعیین مناسب ترین پارامترهای طراحی به منظور دستیابی به افزایش کارایی و بهینه سازی هزینه می پردازد. در این پژوهش دو تابع هدف بازده انرژی جهت ماکزیمم کردن مقدار آن و تابع هدف نرخ هزینه جهت مینیمم کردن مقدار آن انتخاب شده است که می توان به معرفی یک سیستم کاربردی جهت راه اندازی کمک کند.

۲- مواد و روش

۲-۱- شرح سیستم

در شکل (۱) شماتیک سیستم نشان داده شده است. پیکربندی سیستم پیشنهادی در این مطالعه شامل یک مزرعه بادی متشکل از توربین‌های بادی، واحد ذخیره ساز انرژی هوای فشرده، توربین گازی و الکترولایزر غشای تبادل پروتون است. ذخیره انرژی هوای فشرده یکی از راه‌های ذخیره انرژی تولید شده در یک زمان، برای استفاده از آن در زمان دیگری با استفاده از هوای فشرده است. سیستم مورد مطالعه از دو جریان اصلی شامل جریان باد برای چرخش توربین‌های بادی و تولید برق و جریان هوا برای ذخیره انرژی توسط واحد ذخیره ساز انرژی هوای فشرده و تولید توان توسط توربین گازی تشکیل شد. محصول این سیستم تولید برق پاک است. انرژی برق تولیدی مزرعه بادی توسط اینورتر به برق مستقیم تبدیل می‌شود و برق مورد نیاز منازل مسکونی و واحدهای ذخیره ساز انرژی هوای فشرده برای ذخیره سازی انرژی هوای فشرده و تولید برق توسط توربین گازی برای افزایش توان تولید سیستم و کمک به پیک مصرف، تأمین می‌شود. در طول فرآیند شارژ، برق اضافی مزرعه بادی، کمپرسور را برای فشرده سازی هوای محیط به حرکت در می‌آورد. سپس هوای فشرده در منبع ذخیره ساز انرژی هوای فشرده برای استفاده بعدی در دوره‌های اوج نیاز و تقاضا ذخیره می‌شود. برای به حداقل رساندن مصرف برق در کمپرسورها دو خنک کننده بین کمپرسورها اعمال می‌شود؛ بنابراین، هوای محیط، گرمای آزاد شده در اینترکولرها را جذب کرده و با کاهش دمای هوای خروجی از آخرین کمپرسور در افترکولر، حجم مخزن ذخیره را کاهش می‌دهد. برق مورد نیاز الکترولایزر شامل ۲۰ درصد توان تولیدی مزرعه بادی در طول سال است و به همین دلیل تمام انرژی تولیدی سیستم به دلیل مصرف و تغذیه از انرژی های پاک، عاری از انتشار کربن دی اکسید هستند. فرآیند الکترولیز به معنای تجزیه آب می‌باشد که برای این کار نیاز به حرارت و الکتریسیته می‌باشد تا هیدروژن و اکسیژن از یکدیگر جدا شوند. الکترولیز با غشای تبادل پروتون شامل دو نیمه سلول PEM و الکترولیز آلکالین می‌باشد. در این الکترولیز از غشای تبادل آنیون استفاده می‌شود تا به یون‌های OH^- اجازه ترک الکترولیت و خنثی ماندن الکترولیت را بدهد و در نتیجه کاتالیست بیشترین راندمان را خواهد داشت. آب پس از ورود به الکترولیز از سمت کاتد هیدروژن و از سمت آند اکسیژن و آب خارج می‌شود که در حین خروج تا دمای مرجع خنک می‌شود. الکترولایزر آب با غشای تبادل پروتون دارای چندین مزیت نسبت به فناوری متداول آلکالینی می‌باشد که می‌توان از میان آن‌ها به راندمان ولتاژ بالا در دانسیته جریان بالاتر، راندمان بهره‌برداری دینامیک بهتر و طراحی فشرده‌تر اشاره نمود.



شکل ۱- شماتیک سیستم پیشنهادی.

۲-۲- روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی جهت تحلیل روند ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم مورد مطالعه ارائه شده است:

- مدل‌سازی سیستم بادی با نرم‌افزار حل معادلات مهندسی^۱ انجام شده است.
- برای پیدا کردن بهترین شرایط کاری سیستم یک بهینه‌سازی چندهدفه با روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک انجام شده است.
- شهر ملبورن به عنوان یک منطقه پر پتانسیل بادی در کشور استرالیا و قاره اقیانوسیه برای تحلیل تغییرات پارامترهای آب و هوایی بر روی عملکرد سیستم انتخاب شد.
- اطلاعات آب و هوایی شهر مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار متانورم استخراج شده است.

۲-۳- آنالیز ترمودینامیکی

در جدول (۱) داده‌های ورودی جهت آنالیز سیستم بادی مورد بررسی، آورده شده است. برای تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سیستم کار حاضر، موازنه جرم و انرژی برای هر حجم کنترل ایجاد می‌شود.

جدول ۱- مقدار داده‌های ورودی [۱۵-۱۸].

داده	معرفی پارامتر	مقدار
T_0	دمای محیط	۲۵ درجه سانتی‌گراد
$V_{Wind\ speed}$	میانگین سرعت باد	۵ متر بر ثانیه
P_0	فشار محیط	۱۰۱/۳ کیلوپاسکال
η_{GT}	بازده توربین گازی	۰/۸
η_{Comp}	بازده کمپرسور	۰/۸
η_{Aftc}	بازده افترکولر	۰/۸
η_{Intc}	بازده اینترکولر	۰/۸
P_5	فشار ورودی به ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده	۴۰۰۰ کیلوپاسکال
r_p	نسبت فشار ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده	۴
n	تعداد توربین بادی	۱۴۰
η_{lwt}	بازده توربین بادی	۰/۸۵
$\eta_{ecoefficiency}$	بازده	۰/۵۹
D	قطر توربین بادی	۳۴ متر

در جدول (۲) به بررسی معادلات تعادل نرخ انرژی سیستم پرداخته شده است.

^۱ Engineering Equation Solver (EES)

جدول ۲- معادلات تعادل نرخ انرژی سیستم [۲۰-۱۷].

رابطه	اجزا سیستم
$\dot{W}_{GT} = \dot{m}_{10} \times (h_{10} - h_{11})$	توربین گازی
$\dot{W}_{CAES} = \text{Compressor1} + \text{Compressor2}$	ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده
$\dot{W}_{\text{Compressor1}} = \dot{m}_1 \times (h_2 - h_1)$	کمپرسور ۱
$\dot{W}_{\text{Compressor2}} = \dot{m}_3 \times (h_4 - h_3)$	کمپرسور ۲
$Q_{\text{Intercooler}} = \dot{m}_2 \times (h_2 - h_3)$	اینترکولر
$Q_{\text{Aftercooler}} = \dot{m}_4 \times (h_4 - h_5)$	افت‌کولر
$Q_{\text{Heater}} = \dot{m}_9 \times (h_{10} - h_9)$	هیتر

A_{wt} مساحت توربین بادی است که طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$A_{wt} = (D^2) \times (\pi/4) \quad (1)$$

برق تولیدی توربین بادی، از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۱]:

$$\dot{W}_{wt} = \frac{1}{2} \times \eta_{wt} \times \rho_{air} \times A_{wt} \times \eta_{coefficient} \times V_{wind} \times speed^3 \times 4/1000 \quad (2)$$

که $\dot{W}_{wt}$ برق تولید شده از توربین بادی است، η_{wt} بازده توربین بادی است، ρ_{air} چگالی هوا است، و V سرعت متوسط باد است. با توجه به مزرعه بادی متشکل از تعدادی توربین بادی است که تولید برق را افزایش دهند، به همین دلیل میزان توان تولیدی مزرعه بادی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{Wind_Farm} = n \times \dot{W}_{wt} \quad (3)$$

در نهایت مقدار توان خالص کل سیستم از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Wind_Farm} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{CAES} \quad (4)$$

الکترولایزر وسیله‌ای است که با استفاده از جریان مستقیم الکتریکی، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند. به عبارت دیگر، وسیله تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی است که می‌تواند به عنوان یک بار DC غیرخطی حساس به ولتاژ در نظر گرفته شود. با افزایش مقدار ولتاژ DC اعمالی به الکترولایزر، جریان آن بیش تر شده و میزان بیش تری هیدروژن تولید می‌گردد. در این قسمت به آنالیز الکترولایزر PEM که جهت تولید هیدروژن مورد استفاده قرار گرفته است، پرداخته می‌شود [۲۲، ۲۳]. میزان کار الکترولایزر PEM طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{PEM} = \dot{W}_{net} \quad (5)$$

به علت این که هدف اصلی این پژوهش تولید هیدروژن است، به همین دلیل تمام برق تولیدی سیستم به الکترولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید هیدروژن داده می‌شود. انرژی حرارتی مورد نیاز الکترولایزر با مقدار دمای ورودی $T_{PEM} = 353[K]$ به الکترولایزر غشای تبادل پروتون داده می‌شود. برای محاسبه مقدار هیدروژن تولیدی سیستم از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{m}_{24} = \dot{M}_{H2Out} \quad (6)$$

$$\dot{M}_{H2Out} = a_{H2} \times \dot{W}_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2} \quad (7)$$

که در این رابطه:

$$a_{H2} = 3.382e-06 \quad (8)$$

$$b_{H2} = 0.9727 \quad (9)$$

$$c_{H2} = 5.928e-06 \quad (10)$$

برای آنالیز انرژی در این پژوهش از روابط زیر استفاده شده است:

$$Ex_Q + \sum_{in} \dot{m}_{in} ex_{in} = Ex_W + Ex_D + \sum_{out} \dot{m}_{out} ex_{out} \quad (11)$$

در این جا:

$$Ex_W = W \quad (12)$$

$$Ex_Q = Q_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \quad (13)$$

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (14)$$

۴-۲- بررسی اقتصادی

نرخ هزینه هر مؤلفه عبارت است از [۲۴، ۲۵]:

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \times CRF \times \phi}{T} \quad (15)$$

در این رابطه، $\dot{Z}_k$ ، نرخ هزینه، ϕ بیان کننده ضریب تعمیر و نگهداری است و مقدار آن برابر ۱/۰۶ است. T تعداد ساعات کاری سیستم است. فاکتور بازایی سرمایه از رابطه (۱۶) به دست می آید [۲۴، ۲۵]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (16)$$

که در رابطه ۹، i و n به ترتیب میزان بهره و دوره عملکرد نیروگاه را نشان می دهند. در جدول (۳) روابط مربوط به هزینه هر جزء و روابط کمی موردنظر آورده شده است:

جدول ۳- بالانس هزینه و روابط کمی برای تمام اجزا سیستم [۲۰-۱۷].

اجزا سیستم	رابطه
مزرعه بادی	$Z_{Wind, farm} = 5000 \times W_{Wind, Farm}$
اینترکولر	$Z_{Intc1} = 12000 \times \left(\frac{A_{Intc1}}{100}\right)^{0.6}$
الکترولایزر غشای تبادل پروتون	$Z_{electrolyzer} = 1000 \times W_{PEM} \times Z_e$
افترکولر	$Z_{Aftc} = 12000 \times \left(\frac{A_{Aftc}}{100}\right)^{0.6}$
کمپرسور ۱	$Z_{Comp1} = 91562 \times \left(\frac{\dot{W}_{Comp1}}{455}\right)^{0.67} \times Z_{charge}$
کمپرسور ۲	$Z_{Comp2} = 91562 \times \left(\frac{\dot{W}_{Comp2}}{455}\right)^{0.67}$
توربین گازی	$Z_{GT} = \left(\frac{1536 \times \dot{m}_g}{0.92 - \eta_{GT}}\right) \times \ln\left(\frac{P_{10}}{P_{11}}\right) \times (1 + \exp(0.036 \times T_{10} - 54.4))$
ذخیره ساز انرژی هوای فشرده	$Z_{CAES} = ((1.218 \times \exp(2.3631 + 1.3673 \times (\ln(V_{Storage}))) - 0.06309 \times (\ln(V_{Storage}))^2))$

در نهایت باید گفت که میزان هزینه کل سیستم از مجموع هزینه اجزا سیستم به دست آورده می شود و طبق رابطه (۱۷) محاسبه می شود:

$$Z_{\text{total}} = Z_{\text{GT}} + Z_{\text{Comp1}} + Z_{\text{Comp2}} + Z_{\text{CAES}} + Z_{\text{Aftercooler}} + Z_{\text{Intercooler}} + Z_{\text{Wind.farm}} + Z_{\text{PEM}} \quad (17)$$

۵-۲- راندمان سیستم

راندمان رفت و برگشت یک معیار عملکرد کلیدی برای یک سیستم انرژی است که انرژی از دست رفته در طول یک چرخه شارژ-تخلیه کامل را مشخص می کند. به عنوان نسبت انرژی خروجی از سیستم در هنگام تخلیه به انرژی ورودی تامین شده در هنگام شارژ تعریف می شود. راندمان رفت و برگشت بالاتر نشان دهنده تلفات انرژی و هزینه های عملیاتی کم تر است. بازده اگزرژی به عنوان ویژگی کلیدی بررسی عملکرد انتخاب شد و با معادله (۱۸) محاسبه می شود:

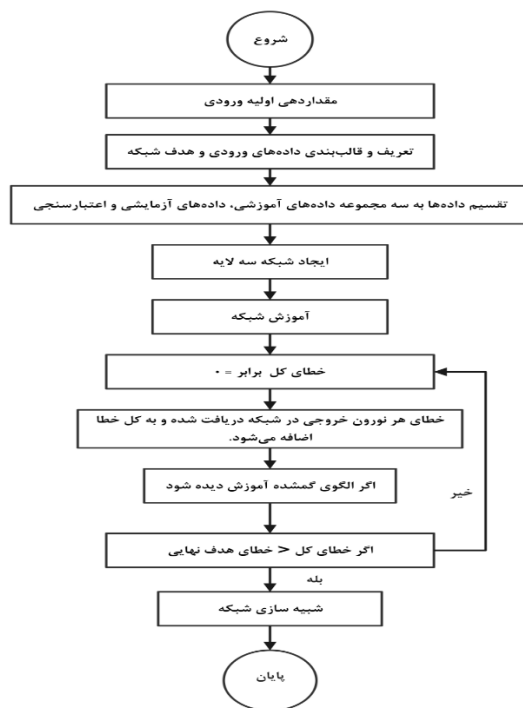
رابطه (ERTE) Exergy round trip efficiency:

$$ERTE = \frac{(\dot{W}_{GT} + \dot{W}_{net}) \times 100}{\dot{W}_{CAES} + Q_{heater} + E_{wind.turbine} \times 24} \quad (18)$$

۶-۲- روش بهینه سازی

شبکه های عصبی هوش مصنوعی^۲، به دسته ای خاص از مدل های یادگیری ماشین اطلاق می شوند که برای انجام فعالیت های مختلفی طراحی و بهینه شده اند. یک شبکه عصبی، به مدلی گفته می شود که به هوش مصنوعی اجازه می دهد تا داده ها را با الهام از روش تفکر و پردازش ذهنی انسان، مورد بررسی قرار دهد. این فرآیند به یادگیری عمیق مرتبط بوده و ساختار نسبتاً پیچیده ای را در خود جای داده است [۲۶-۲۷]. نام و ساختار آن ها از مغز انسان الهام گرفته شده است و از روشی که نورون های بیولوژیکی به یکدیگر سیگنال می دهند تقلید می کند. شبکه عصبی مجموعه ای از الگوریتم ها است که تلاش می کنند تا روابط زیربنایی را در مجموعه ای از داده ها از طریق فرآیندی که نحوه عملکرد مغز انسان را تقلید می کند، تشخیص دهد. یک شبکه عصبی حاوی لایه هایی از گره های به هم پیوسته است. هر گره به عنوان پرسپترون شناخته می شود و شبیه یک رگرسیون خطی چندگانه است. پرسپترون سیگنال تولید شده توسط یک رگرسیون خطی چندگانه را به یک تابع فعال سازی که ممکن است غیرخطی باشد می دهد. شبکه های عصبی مصنوعی از لایه هایی از گره ها تشکیل شده اند که شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است [۲۸-۲۹]. در شکل (۲) فلوچارت روش شبکه عصبی ارائه شده است.

² ANN



شکل ۲- فلوچارت شبکه عصبی [۲۶-۲۹].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی

سیستم معرفی شده در این مطالعه، ترکیبی از واحدهای ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده و مزرعه بادی است. با توجه به این که سیستم معرفی شده یک سیستم جدید است، اعتبارسنجی واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده با پژوهش رزمی و همکاران (۲۰۱۹) [۳۰] بررسی شده است. در جدول ۴ نتایج اعتبارسنجی پژوهش حاضر ارائه شده است. همان گونه از نتایج مشخص است، این پژوهش از اعتبار خوبی برخوردار است و به این معنی است که فرآیند شبیه سازی قابل اعتماد و نتایج واقعی هستند.

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده.

خطا	[۳۰]	کار حاضر	پارامتر	
۰	۲۰	۲۰	Maximum pressure of CAES (bar)	ورودی
۰	۶,۶۶۷	۶,۶۶۷	Minimum pressure of CAES (bar)	
۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	Inlet temperature of air turbine (K)	
۰/۵۶	۲۸۱/۴	۲۷۹/۸	Power consumption of second compressor (kW)	خروجی
۰/۶	۲۸۱/۸	۲۸۰/۱	Power consumption of third compressor (kW)	
۰/۰۳	۲۲۸۰	۲۲۷۹/۳	Output power of air turbine (kW)	

با توجه به این که سیستم معرفی شده یک سیستم جدید است، اعتبارسنجی زیر سیستم الکترولایزر غشای تبادل پروتون با نتایج پژوهش لوروی و همکاران [۳۱] ارزیابی شده است و دقت نتایج شبیه سازی در جدول (۴) بررسی شده است. همان گونه از نتایج مشخص است، این پژوهش از اعتبار خوبی برخوردار است و به این معنی است که فرآیند شبیه سازی قابل اعتماد و نتایج واقعی هستند.

جدول ۴- اعتبارسنجی.

چگالی جریان (A/m^2)	پتانسیل سلولی (V)	
	کار حاضر	[۳۱]
۰	۱/۵۸	۱/۵۶۵
۲۵۰	۱/۶۱	۱/۵۹۴
۵۰۰	۱/۶۳۵	۱/۶۲
۷۵۰	۱/۶۶	۱/۶۴۵
۱۲۰۰	۱/۶۹۶	۱/۶۸
۱۶۰۰	۱/۷۲	۱/۷۰۵
۲۰۰۰	۱/۷۳۵	۱/۷۲
۳۰۰۰	۱/۷۵۷	۱/۷۴۴
۴۰۰۰	۱/۷۷۴	۱/۷۶۱
۵۰۰۰	۱/۷۸۵	۱/۷۷۴
۶۰۰۰	۱/۸	۱/۷۸۹

۲-۳- بهینه سازی چندهدفه

بهینه سازی چندهدفه جهت بهبود عملکرد سیستم و کاهش هزینه سیستم با روش شبکه عصبی انجام شد. بهینه سازی با هدف افزایش بازده انرژی و کاهش نرخ هزینه صورت گرفته است. در جدول ۵ متغیرهای بهینه سازی و محدوده آن ها معرفی شده است.

جدول ۵- متغیرهای بهینه سازی و محدوده آن ها.

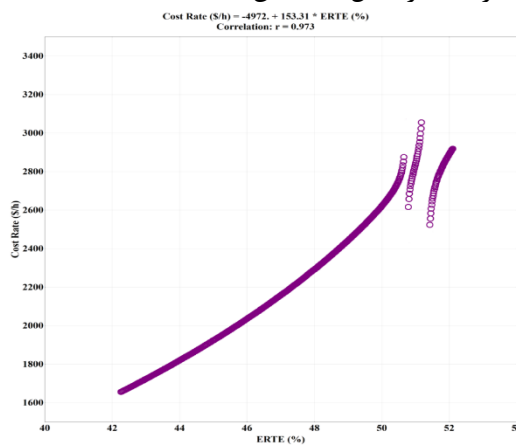
متغیر تصمیم گیری	کران پایین	کران بالا
تعداد توربین بادی	۱۰۰	۱۸۰
بازده توربین گازی (%)	۰/۷	۰/۹۵
بازده کمپرسور (%)	۰/۷	۰/۹۵
فشار ورودی به مخزن ذخیره هوای فشرده (kPa)	۳۵۰۰	۷۵۰۰
نسبت فشار	۲	۶
بازده اینترکولر (%)	۰/۷	۰/۹
بازده افترکولر (%)	۰/۷	۰/۹
دمای ورودی به توربین گازی ($^{\circ}C$)	۷۰۰	۹۵۰

هدف این بهینه‌سازی افزایش پارامتر فنی سیستم شامل بازده انرژی و کاهش هزینه سیستم است. در جدول (۶) مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف ارائه شده است. در این پژوهش با استخراج دیتاهای موردنیاز از حل مدل‌سازی سیستم، با استفاده از روش شبکه عصبی به حل مسئله پرداخته می‌شود و به عبارتی دیتاها وارد شبکه عصبی شده و سپس توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهینه‌سازی انجام می‌شود.

جدول ۶- مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری و توابع هدف

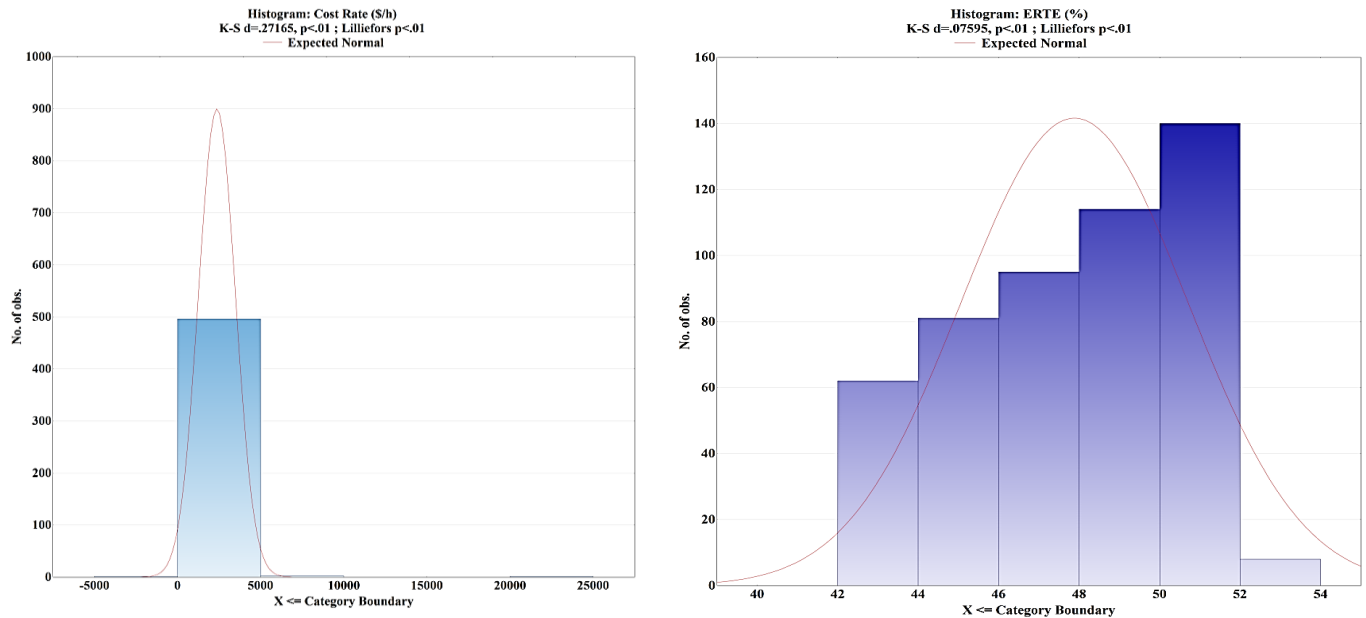
متغیر تصمیم‌گیری و تابع هدف	تعداد ران	مقدار بهینه
تعداد توربین بادی	۵۰۰	۱۵۵
بازده توربین گازی (%)	۵۰۰	۰/۸۲۵
بازده کمپرسور (%)	۵۰۰	۰/۸۲۵
فشار ورودی به مخزن ذخیره هوای فشرده (kPa)	۵۰۰	۵۵۰۰
نسبت فشار	۵۰۰	۴
بازده اینترکولر (%)	۵۰۰	۰/۸
بازده افترکولر (%)	۵۰۰	۰/۸
دمای ورودی به توربین گازی ($^{\circ}\text{C}$)	۵۰۰	۸۴۸/۷۰۲
بازده انرژی (%)	۵۰۰	۴۷/۸۸۵
نرخ هزینه (\$/h)	۵۰۰	۲۳۶۹/۲۹

برای بهینه‌سازی چندهدفه مسئله، جواب‌های بهینه‌ای یافت می‌شود که به‌طور هم‌زمان، دو تابع هدف تعریف شده در مسئله را بهینه‌سازی می‌کند. در این پژوهش توابع هدف تعریف شده در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با یکدیگر در تناقض هستند که برای حل مسئله جواب‌های بهینه پارتو وجود دارد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



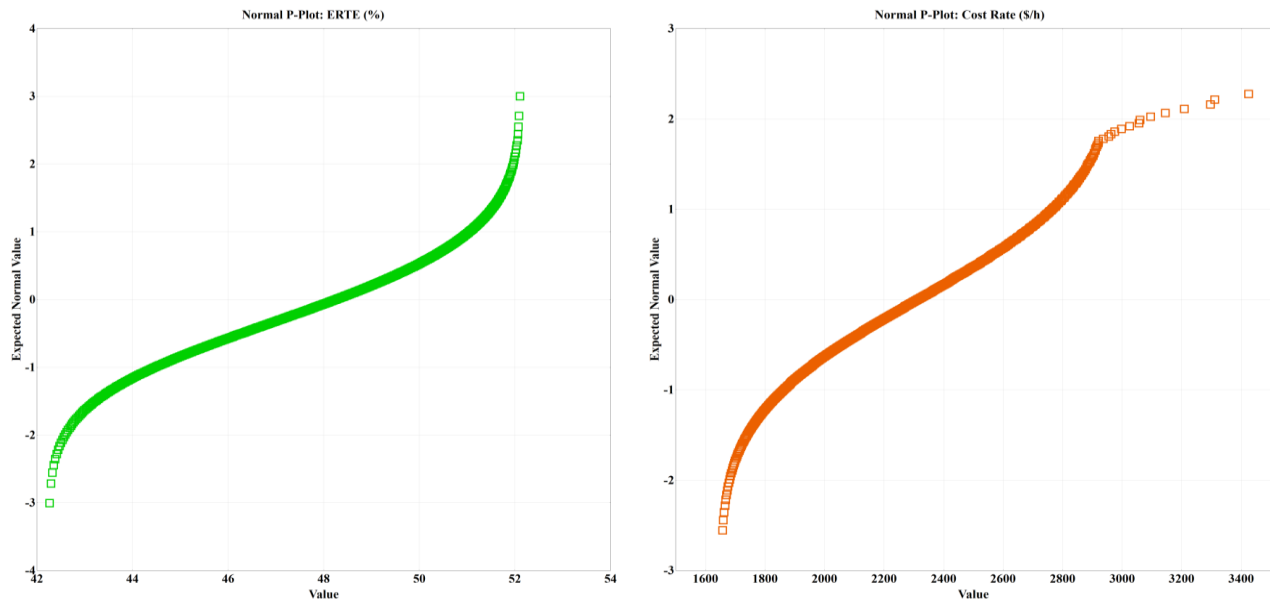
شکل ۳- نمودار پارتو.

در شکل (۴) نمودار هیستوگرام دو تابع هدف بازده اگزرژی و نرخ هزینه نشان داده شده است که دو پاسخ کلی برای دو فرآیند آموزش و آزمایش محاسبه است که در این نمودار ارتفاع هر ستون بیانگر میزان فراوانی دسته آن ستون است. در محور افقی، مقدار تابع هدف درج شده است و در محور عمودی درصد فراوانی آمده است.



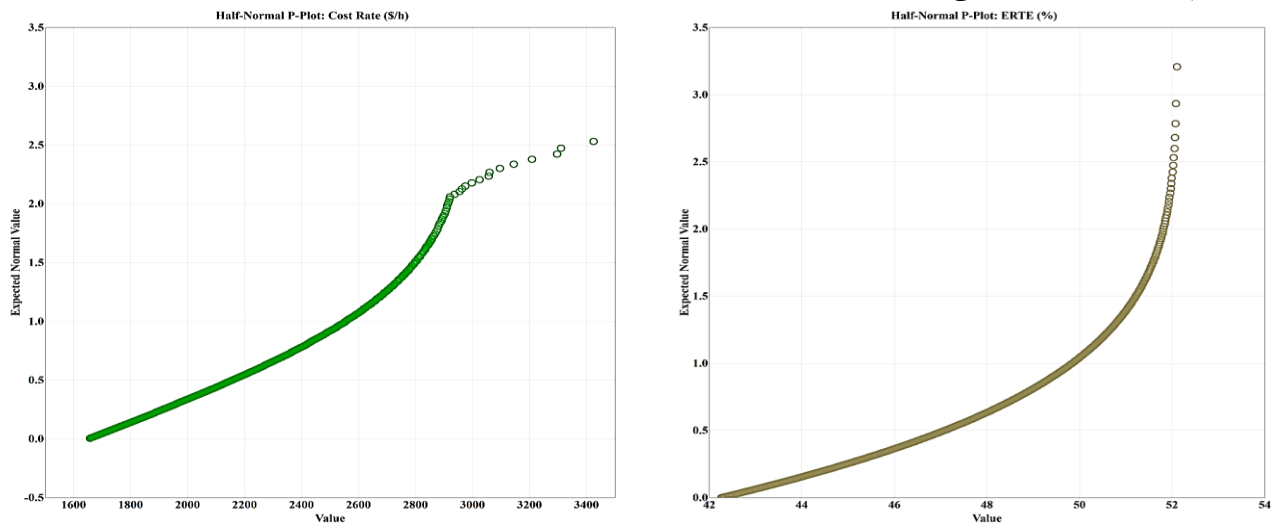
شکل ۴- نمودار هیستوگرام دو تابع هدف مورد بررسی.

در شکل (۵) نمودار نرمالیتی دو تابع هدف بازده اگزرژی و نرخ هزینه نیروگاه بادی به دست آمده است؛ که این نمودار شامل احتمال عادی باقی مانده‌ها که از تحلیل رگرسیون خطی به دست آمده است را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار نرمالیتی توابع هدف.

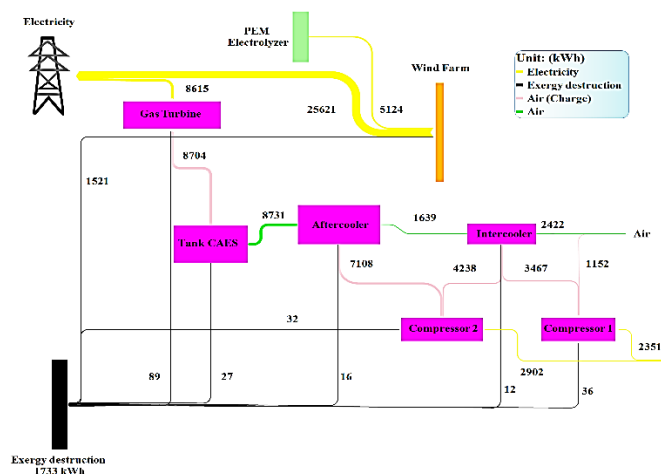
در شکل (۶) به بررسی مقدار نرمال موردانتظار برای دو تابع هدف بازده انرژی و نرخ هزینه پرداخته شده است. در این نمودار محور افقی تغییرات تابع هدف در هنگام بهینه سازی نسبت به مقدار طبیعی مورد انتظار را نشان می دهد که پخش بار و تمرکز تابع هدف در هنگام بهینه سازی را نشان می دهد.



شکل ۶- پیش‌بینی توابع جریان دو تابع هدف مورد بررسی.

۳-۳- تحلیل سانکی

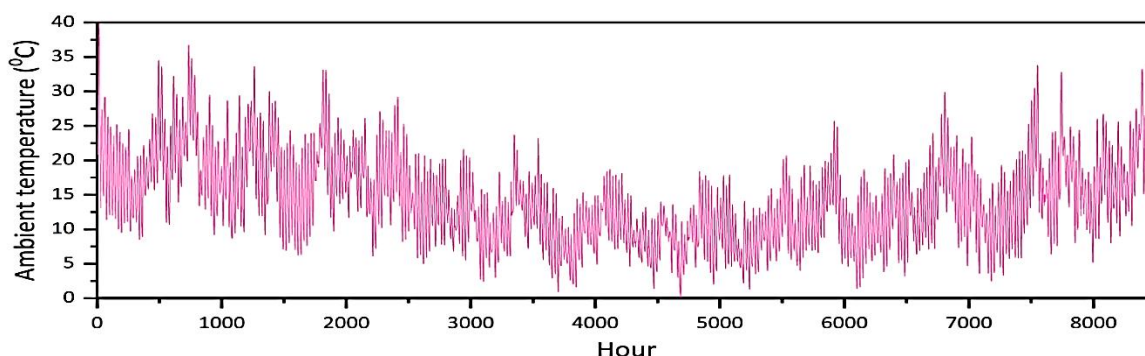
شکل (۷) نمودار انرژی را در شرایط بهینه نشان می‌دهد. این نمودار نرخ انرژی هر جریان و تخریب انرژی همه اجزا را به صورت گرافیکی نشان داده است. این آنالیز نشان می‌دهد که بیشترین تخریب انرژی در مزرعه بادی اتفاق می‌افتد که نرخ تخریب انرژی ۱۵۵ توربین بادی به میزان ۱۵۲۱ کیلووات ساعت است. به عبارتی هر توربین بادی دارای نرخ تخریب انرژی ۹/۸ کیلووات ساعت است. بعد از توربین بادی بیشترین نرخ تخریب انرژی مربوط به توربین گازی با ۸۹ کیلووات ساعت است. کمپرسورها و اینترکولر در ردیف بعدی بیشترین تخریب انرژی هستند. تغذیه اصلی سیستم از انرژی بادی در مزرعه بادی و هوای محیط برای واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده است. همچنین آنالیز نشان داد که مجموع توان تولیدی مزرعه بادی ۲۵۶۲۱ کیلووات ساعت توان و توربین گازی ۸۶۱۵ کیلووات ساعت توان است و میزان برق مصرفی الکترولایزر غشای تبادل پروتون ۵۱۲۴ کیلووات ساعت است. آنالیز سیستم نشان داد که نرخ کل تخریب انرژی سیستم (مجموع تخریب انرژی تجهیزات و واحدها) ۱۷۳۳ کیلووات ساعت است.



شکل ۷- نمودار سانکی سیستم پیشنهادی در حالت بهینه.

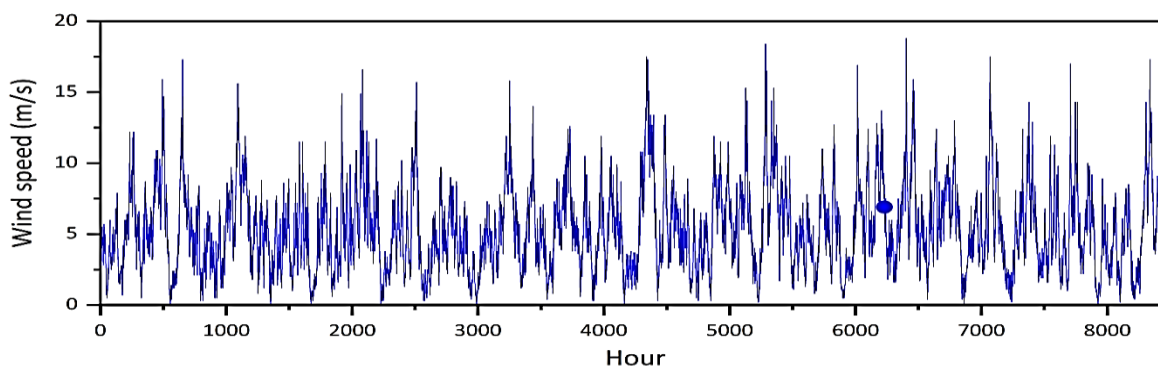
۳-۴- مطالعه موردی

در این پژوهش با انتخاب منطقه پر پتانسیل ملبورن در کشور استرالیا به بررسی سیستم طراحی شده پرداخته می‌شود و نتایج جهت تحلیل و بررسی به صورت ماهیانه ارائه می‌شود. در این پژوهش تأثیر تغییرات سرعت باد و دمای محیط شهر ملبورن بر روی عملکرد سیستم پیشنهادی کار حاضر به صورت ماهیانه بررسی شده است. این بررسی برای محاسبه عملکرد سیستم جهت تولیدی است و این سیستم برای تأمین برق شهر ملبورن برای ۲۰ سال طراحی شده است. در شکل (۸) تغییرات دمای محیط در طول سال به صورت ساعتی برای شهر ملبورن رسم شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد تغییرات میانگین دمای محیط شهر ملبورن در طول سال بین دمای ۸ درجه سانتی‌گراد و دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. لازم به ذکر است به علت موقعیت جغرافیایی شهر ملبورن در ماه‌های ژوئن و ژولای کاهش دمای محیط مشاهده می‌شود.



شکل ۸- تغییرات دمای محیط شهر ملبورن (نرم افزار متانورم).

تغییرات ساعتی سرعت باد در طول سال برای شهر ملبورن در شکل ۹ رسم شده است. میانگین ماهیانه سرعت باد در شهر ملبورن بین ۰ تا ۲۰ متر بر ثانیه است.

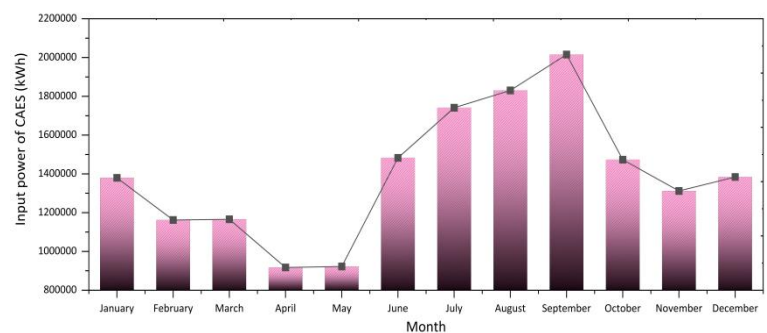
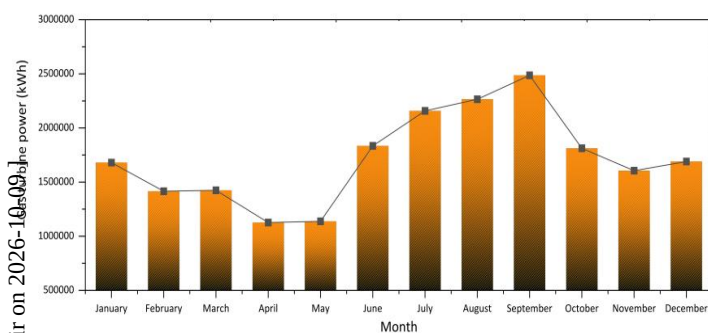
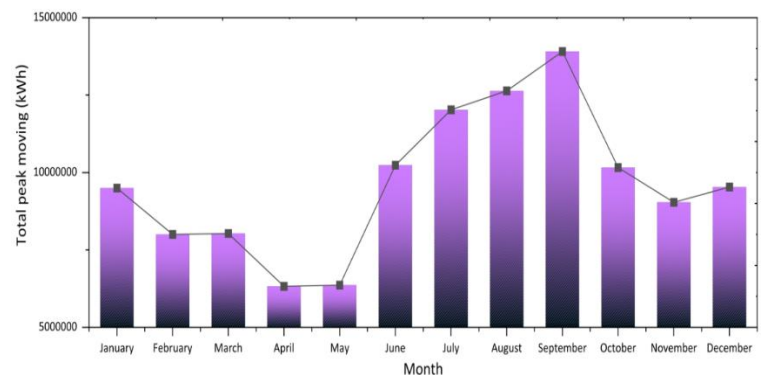
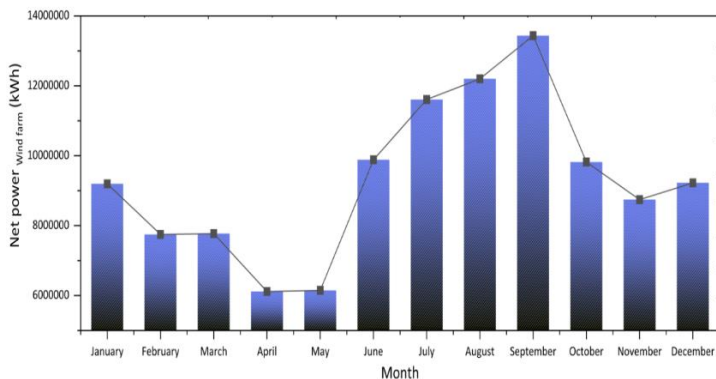


شکل ۹- تغییرات سرعت باد شهر ملبورن (نرم افزار متانورم).

در این پژوهش تغییرات دمای محیط و سرعت باد شهر مطالعاتی به صورت هم‌زمان بر روی عملکرد سیستم بررسی شده است. در شکل (۱۰) تغییرات توان تولیدی کل سیستم و توان مصرفی واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده نسبت به تغییرات پارامترهای آب و هوایی نشان داده شده است. در سیستم پیشنهادی وظیفه تولید برق بر عهده مزرعه بادی و توربین گازی است و مجموع برق تولیدی توربین بادی و توربین گازی برای تأمین برق شهر ملبورن در طول سال استفاده می‌شود. دو تجهیز کمپرسور در واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده مصرف کننده برق تولیدی سیستم هستند. همان طور که نتایج نشان می‌دهد عملکرد توان تولیدی مزرعه بادی با تغییرات سرعت باد رابطه مستقیم دارد. در سیستم پیشنهادی به دلیل وجود کمپرسورهای مصرف کننده برق، میزان تولید خالص مزرعه بادی در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد کاهش پیدا کرده است. چرا که کمپرسورها توان مورد نیاز خود را از

توان تولیدی مزرعه بادی دریافت می‌کنند. انرژی توربین گازی توسط واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده تأمین می‌شود. واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده توسط دو جریان هوا و برق کار می‌کند. برق موردنیاز این واحد توسط مزرعه بادی تأمین می‌شود. پس به عبارتی سرعت باد بر روی تغییرات توان تولیدی توربین گازی تأثیر گذار است. همچنین دمای محیط بر روی هوای ورودی به واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده اثر می‌گذارد و باعث افزایش مصرف کمپرسورها می‌شود. دمای محیط بالا در عملکرد توربین گازی تأثیر منفی می‌گذارد. توربین‌های گازی ماشین‌هایی هستند که هوا را با حجم ثابت مکش می‌کنند. در نتیجه در ماه‌های گرم سال، بالا رفتن دمای هوا و کاهش چگالی آن، دبی جرمی هوای ورودی به توربین کم شده و بنابراین توان تولید و راندمان توربین گاز کاهش خواهد یافت. برای رفع این مشکل می‌توان به شرایط اقلیمی و مکان راه‌اندازی این نیروگاه در شهرهای خنک توجه کرد. نتایج نشان داد ناپایداری تولید مزرعه بادی در عملکرد توربین گازی تأثیر گذاشته است چرا که برق موردنیاز واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده از مزرعه بادی تأمین می‌شود.

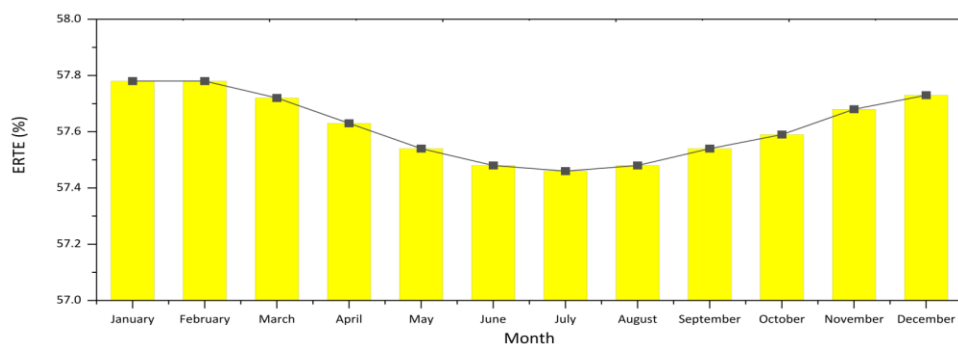
لازم به ذکر است با افزایش دمای محیط میزان مصرف توان در کمپرسورها افزایش می‌یابد و به همین دلیل با افزایش توان مصرفی کمپرسورها در ماه‌های گرم سال باعث کاهش توان تولیدی کل سیستم و به دنبال آن هزینه‌های سیستم نیز می‌شود. توان مصرفی کمپرسورها از برق تولیدی توسط مزرعه بادی تأمین می‌شود به همین دلیل تغییرات سرعت باد نیز بر روی عملکرد میزان مصرف واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده تأثیر گذار است.



شکل ۱۰- توان تولیدی سیستم تجدیدپذیر مطالعاتی.

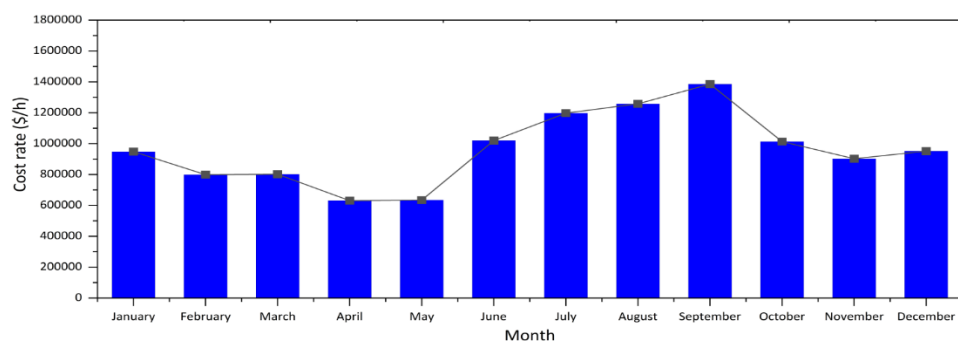
در شکل (۱۱) تغییرات ماهیانه ERTE سیستم نسبت به تغییرات پارامتر آب و هوایی به صورت ماهیانه نشان داده شده است. بازده انرژی با توان تولیدی رابطه مستقیم دارد و بیانگر بیشینه کار مفید سیستم است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد در روزهای پرتانسیل سال، بازده انرژی رفت و برگشتی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است توان تولیدی اصلی سیستم توسط ۱۵۵ توربین بادی تولید می‌شود و توربین گازی برای کمک به تأمین برق در زمان پیک مصرف استفاده شده است. در ماه‌های گرم سال به دلیل این که توان مصرفی کمپرسورها افزایش می‌یابد و با توجه به این که توان مصرفی واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده توسط

مزرعه بادی تأمین می‌شود، به‌همین دلیل افزایش دمای محیط تاثیر منفی بر روی عملکرد سیستم می‌گذارد. به‌همین دلیل در ماه‌های گرم سال بازده کاهش یافته است.



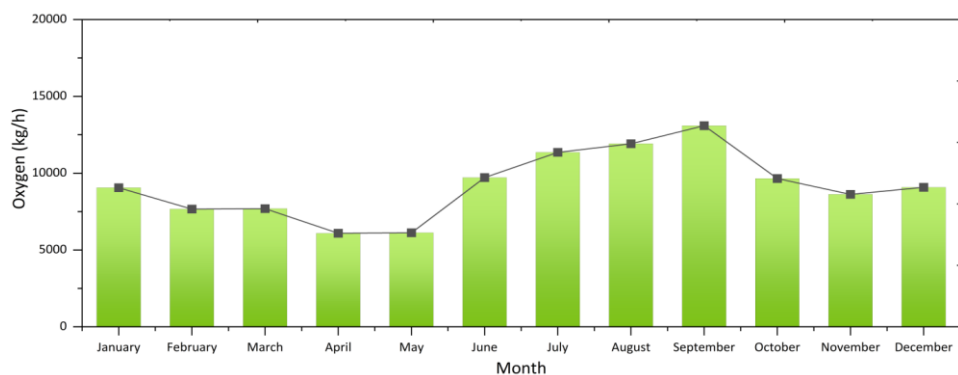
شکل ۱۱- تغییرات بازده اگزرژی سیستم در طول سال.

در شکل (۱۲) تغییرات نرخ هزینه سیستم نسبت به تغییرات پارامتر آب و هوایی به‌صورت ماهیانه نشان داده شده است. نرخ هزینه با توان تولیدی سیستم و تعمیر و نگهداری سیستم در زمان تولید رابطه مستقیم دارد. به عبارتی با افزایش توان تولیدی میزان نرخ هزینه افزایش و با کاهش توان تولیدی میزان نرخ هزینه سیستم نیز کاهش می‌یابد.



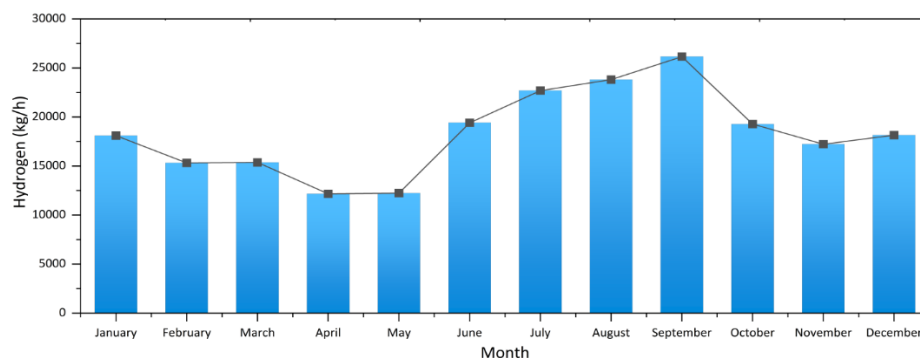
شکل ۱۲- تغییرات نرخ هزینه سیستم در طول سال.

در شکل (۱۳) تغییرات اکسیژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. ۲۰ درصد برق تولیدی مزرعه بادی به واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون برای تولید اکسیژن داده می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد اکسیژن تولیدی سیستم روند مشابهی نسبت به تغییرات توان تولیدی مزرعه بادی دارد.



شکل ۱۳- محاسبه اکسیژن تولیدی.

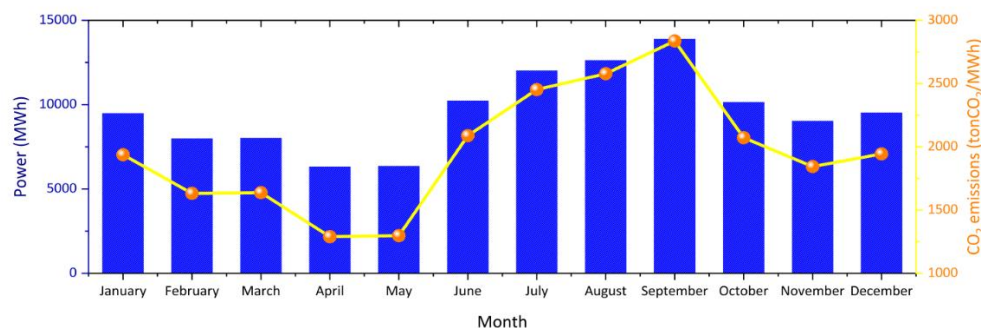
در شکل (۱۴) تغییرات هیدروژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب و هوایی نشان داده شده است. ۲۰ درصد برق تولیدی مزرعه بادی به واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون برای تولید هیدروژن داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد هیدروژن تولیدی سیستم روند مشابهی نسبت به تغییرات توان تولیدی مزرعه بادی دارد.



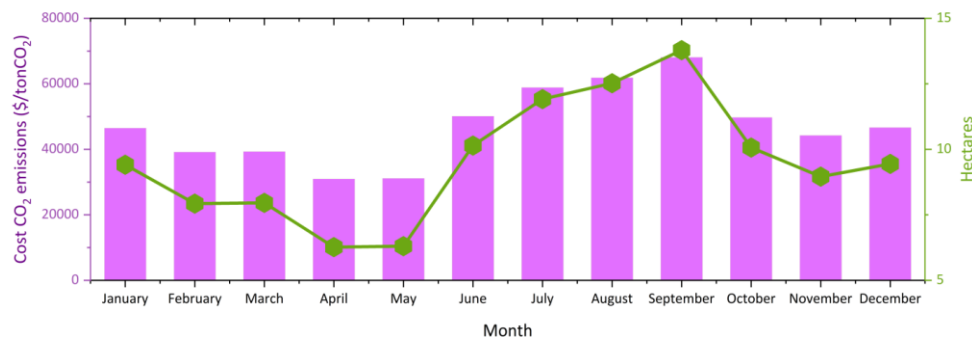
شکل ۱۴- محاسبه هیدروژن تولیدی.

۳-۵- آنالیز زیست‌محیطی

در شکل (۱۵) و (۱۶) به تحلیل زیست‌محیطی سیستم طراحی شده جهت رسیدن به نتیجه ای از عملکرد سیستم در کاهش انتشار کربن دی‌اکسید پرداخته شده است. برای تحلیل عملکرد زیست محیطی سیستم پیشنهادی به موارد زیر باید توجه کرد: در نیروگاه‌های فسیلی ۰/۲۰۴ تن کربن دی‌اکسید برای تولید یک مگاوات ساعت برق در محیط انتشار داده می‌شود [۳۲]. با استفاده از تولید برق سالانه سیستم نسبت به تغییرات آب و هوایی شهر ملبورن و جهت تأمین برق شهر ملبورن می‌توان از انتشار کربن دی‌اکسید محاسبه شده در طول سال و به‌صورت روزانه جلوگیری کرد. انتشار یک تن کربن دی‌اکسید باعث هزینه زیست‌محیطی ۲۴ دلار می‌شود. برآوردی معادل ۴۹۴۰ دلار در هکتار برای میانگین قیمت رویشگاه غیرآب‌تشنه‌شینی در نظر گرفته شده است [۳۳].



شکل ۱۵- انتشار کربن دی‌اکسید.



شکل ۱۶- هزینه‌های انتشار کربن دی‌اکسید و گسترش فضای سبز.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به مدل سازی و بهینه سازی سیستم تولید برق مبتنی بر انرژی بادی و متشکل از یک مزرعه بادی و توربین گازی برای تأمین برق شهر ملبورن در کشور استرالیا پرداخته شد. جهت مدل سازی سیستم مورد بررسی و همچنین به دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم افزار حل معادلات مهندسی استفاده شد. در این مطالعه یک بهینه سازی چندهدفه برای پیدا کردن بهینه ترین حالت سیستم نسبت به تغییرات ۸ پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم انجام شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- متغیرهای تصمیم گیری شامل تعداد توربین بادی، بازده توربین گازی، دمای ورودی به توربین گازی، بازده کمپرسور، بازده افترکولر، بازده اینترکولر، فشار ورودی به تانک ذخیره ساز انرژی هوای فشرده و نسبت فشار کمپرسور بود.
- از ترکیب روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی چندهدفه استفاده شد.
- نتایج بهینه نشان داد که سیستم در بهینه ترین حالت خود می تواند به بازده انرژی ۴۷/۸۸ درصد و نرخ هزینه ۲۳۶۹/۲۹ دلار بر ساعت برسد.
- تعداد توربین بادی بهینه برای تشکیل یک مزرعه بادی قدرتمند در حالت بهینه ۱۵۵ تا به دست آمد.
- آنالیز انرژی نشان داد که بیشترین تخریب انرژی در مزرعه بادی با نرخ تخریب انرژی ۱۵۲۱ کیلووات ساعت است.
- نرخ کل تخریب انرژی سیستم (مجموع تخریب انرژی تجهیزات و واحدها) ۱۷۳۳ کیلووات ساعت است.
- نتایج نشان داد که سیستم در طول سال می تواند ۱۱۵۷۴۳۶۰ کیلووات ساعت برق، با نرخ هزینه ۱۱۵۳۹۹۴۴ دلار در سال تولید کند.
- نتایج نشان داد که سیستم با تأمین برق الکترولایزر می تواند در سال به میزان ۲۱۹۸۷۳/۶ کیلوگرم هیدروژن و ۱۱۰۰۲۷/۵ کیلوگرم اکسیژن تولید کند.
- میزان برق تولیدی مزرعه بادی در سال ۱۱۱۸۹۳۰۴۰ کیلووات و برق تولیدی توربین گازی ۲۰۶۳۴۴۸۰ کیلووات گزارش شد.
- نتایج زیست محیطی نشان داد که با تولید ۱۱۵۷۴۳ مگاوات ساعت برق، می تواند از انتشار ۲۳۶۱۱ تن کربن دی اکسید در سال جلوگیری کرد و ۵۶۶۶۸۰ دلار از هزینه های زیست محیطی کاهش داد و ۱۱۴ هکتار گسترش فضای سبز کمک کرد.

مراجع

1. Ahmadi P, Rosen MA, Dincer I. Multi-objective exergy-based optimization of a polygeneration energy system using an evolutionary algorithm. *Energy* 2012; 46:21e31.
2. Sajid, Z., Khan, F., Zhang, Y., 2016. Process simulation and life cycle analysis of biodiesel production. *Renew. Energy* 85, 945–952.
3. Pourmoghdam, P. and A. Kasaeian (2022). "Economic and energy evaluation of a solar multi-generation system powered by the parabolic trough collectors." *Energy*: 125362.
4. Büker, M. S., et al. (2022). "Experimental investigation on the dehumidification performance of a parabolic trough solar air collector assisted rotary desiccant system." *Case Studies in Thermal Engineering* 34: 102077.
5. Chen, C., Xia, Q., Feng, S., Liu, Q., 2021, A novel solar hydrogen production system integrating high temperature electrolysis with ammonia based thermochemical energy storage, *Energy Conversion and Management*, Volume 237, 114143.

6. Chen, Y., et al. (2023). "Exergy-economic analysis and multi-objective optimization of a multi-generation system based on efficient waste heat recovery of combined wind turbine and compressed CO2 energy storage system." *Sustainable Cities and Society* 96: 104714.
7. Zhao, X., et al. (2023). "Optimization and analysis of an integrated energy system based on wind power utilization and on-site hydrogen refueling station." *International Journal of Hydrogen Energy* 48(57): 21531-21543.
8. Spuru, P. (2023). "Assessment of renewable energy generated by a hybrid system based on wind, hydro, solar, and biomass sources for decarbonizing the energy sector and achieving a sustainable energy transition." *Energy Reports* 9: 167-174.
9. Saadat, M., et al. (2015). "Modeling and control of an open accumulator Compressed Air Energy Storage (CAES) system for wind turbines." *Applied Energy* 137: 603-616.
10. Jin, H., et al. (2019). "Dynamic modeling and design of a hybrid compressed air energy storage and wind turbine system for wind power fluctuation reduction." *Computers & Chemical Engineering* 122: 59-65.
11. Habibzadeh, S., et al. (2025). "Sustainability assessment of a petrochemical plant electricity supply based on 4E optimization of various hybrid renewable energy systems scenarios." *Energy Conversion and Management* 325: 119357.
12. Zhang, Y., et al. (2022). "Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating, and power system consisting of wind energy and transcritical compressed CO2 energy storage." *Energy Conversion and Management* 260: 115609.
13. Zhao, Y., et al. (2024). "Performance analysis and multi-objective optimization of the offshore renewable energy powered integrated energy supply system." *Energy Conversion and Management* 304: 118232.
14. Li, Y., et al. (2023). "A data driven robust optimization model for scheduling near-zero carbon emission power plant considering the wind power output uncertainties and electricity-carbon market." *Energy* 279: 128053.
15. Alirahmi SM, Rostami M, Farajollahi AH. Multi-criteria design optimization and thermodynamic analysis of a novel multi-generation energy system for hydrogen, cooling, heating, power, and freshwater. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45:15047–62.
16. Alirahmi S. M., Assareh E., 2020, Energy, exergy, and exergoeconomics (3E) analysis and multi-objective optimization of a multigeneration energy system for day and night time power generation-Case study: Dezful city, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 56, Pages 31555-31573.
17. Assareh, E., Assareh, M., Alirahmi, S. M., Shayegh, M., 2022, Thermodynamic assessment of a cogeneration system with CSP Driven-Brayton and Rankine cycles for electric power and hydrogen production in the framework of the energy and water nexus, *Energy Nexus*, 100031.
18. Assareh, E., Delpisheh, M., Farhadi, E., Peng, W., Moghadasi, H., 2022, Optimization of geothermal- and solar-driven clean electricity and hydrogen production multi-generation systems to address the energy nexus, *Energy Nexus*, Volume 5, 100043.

19. Shakibi, H., et al. (2023). "Exergoeconomic and optimization study of a solar and wind-driven plant employing machine learning approaches; a case study of Las Vegas city." *Journal of Cleaner Production* 385: 135529.
20. Assareh, E., et al. (2023). "An integrated system for producing electricity and fresh water from a new gas-fired power plant and a concentrated solar power plant – Case study – (Australia, Spain, South Korea, Iran)." *Renewable Energy Focus* 44: 19-39.
21. Yilmaz, F., 2019, Energy, exergy and economic analyses of a novel hybrid ocean thermal energy conversion system for clean power production, *Energy Conversion and Management* 196, 557–566.
22. Kianfard, H., Khalilarya, S., Jafarmadar S., 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, pp. 339–349.
23. Boyaghchi, F. A., Chavoshi, M., Sabeti, V., 2018, Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations, *Energy*, vol. 145, pp. 38–51.
24. Dincer, M. A. Rosen, and P. Ahmadi, *Optimization of energy systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
25. Razmi, A. R., Janbaz M., 2020, Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES), *Energy Convers. Manag.*, vol. 204, no. October, p. 112320, Jan. 2020.
26. Wang, X., et al. (2023). "Artificial neural networks in predicting of the gas molecular diffusion coefficient." *Chemical Engineering Research and Design* 200: 407-418.
27. Bas, E., et al. (2024). "Robust training of median dendritic artificial neural networks for time series forecasting." *Expert Systems with Applications* 238: 122080.
28. Deepak, M., et al. (2023). "Crack width prediction of RC beams by artificial neural networks." *Materials Today: Proceedings*.
29. Soori, M., et al. (2023). "Artificial neural networks in supply chain management, a review." *Journal of Economy and Technology* 1: 179-196.
30. Razmi, A. R., Soltani, Aghanajafi, C., M., Torabi, M., 2019, Thermodynamic and economic investigation of a novel integration of the absorption-recompression refrigeration system with compressed air energy storage (CAES), *Energy Conversion and Management*, Volume 187, Pages 262-273.
31. Ioroi, T., Yasuda, K., Siroma, Z., Fujiwara, N., Miyazaki, Y., 2002, Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells, *J Power Sources*; 112:583–7.
32. Kroegera, T., Escobedob, F.J., Hernandezc, J.H., Varelab, S., Delphinb, S., Fishera, J.R.B., Waldronb, J., Reforestation as a novel abatement and compliance measure for ground-level ozone, (2014) 111 (40), <https://doi.org/10.1073/pnas.1409785111>.
33. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-> updated 28 July 2020.

Energy and Exergy Analysis of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer-Based Wind Power Plant

Ghafar karimi ¹, Ehsan Darouneh ¹, Ehsanolah assareh ^{2,*}

¹ Department of Chemical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: Summer 2026 Accepted: Summer 2026

Abstract

In the current research, thermodynamic, economic modeling and multi-objective optimization of the wind energy-based electricity generation system consisting of a wind farm and a gas turbine to supply electricity to the city of Melbourne in Australia were discussed. In order to model the investigated system and also to obtain the results of the system analysis, engineering equation solving software was used. In this study, a multi-objective optimization was carried out to find the most optimal state of the system with respect to the changes of 8 parameters affecting the system performance, including the number of wind turbines, gas turbine efficiency, gas turbine inlet temperature, compressor efficiency, aftercooler efficiency, intercooler efficiency, input pressure to the compressed air energy storage tank and pressure ratio using a combination of neural network method and genetic algorithm. The optimal results showed that the system in its most optimal state can reach an exergy efficiency of 47.88% and a cost rate of 2369.29 \$/h, and the optimal number of wind turbines to form a powerful wind farm in the optimal state was 155. The results of exergy analysis showed that the total rate of exergy destruction of the system (total exergy destruction of equipment and units) is 1733 kWh. The results showed that the system can produce 115743600 kWh of electricity during the year, with a cost rate of 11539944 \$/year. The environmental results showed that by producing 115,743 MWh of electricity, it could prevent the emission of 23,611 tons of carbon dioxide per year, reduce \$566,680 in environmental costs, and help expand 114 hectares of green space.

Keywords: Renewable system, neural network, multi-objective optimization, genetic algorithm, wind energy, wind turbine.

*Corresponding authors: assareh@iaud.ac.ir

Cite this article as: Ghafar karimi, Ehsan Darouneh, Ehsanolah assareh, Energy and Exergy Analysis of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer-Based Wind Power Plant. **Journal of Energy Conversion**, 2026, 13(2), 47-67