J. Energy Conversion

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

Volume: 13, Issue:2, 2026: 47-67

دوره ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص: ۶۷-۴۷

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

غفار کریمی[۱]، احسان درونه[۱]، احسان اله عصاره[۲و*]

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 مدل‌سازی ترمودینامیکی، اقتصادی و بهینه‌سازی 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 مدل‌سازی سیستم مورد بررسی و هم‌چنین به‌دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی استفاده شد. در این مطالعه یک بهینه‌سازی چندهدفه برای پیدا کردن بهینه‌ترین 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 ذخیره‌ساز 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 بهینه‌ترین حالت خود می‌تواند 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 به‌دست 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 می‌تواند 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، می‌تواند از انتشار ۲۳۶۱۱ تن کربن دی‌اکسید در سال جلوگیری کرد و ۵۶۶۶۸۰ دلار از هزینه‌های زیست محیطی کاهش داد و ۱۱۴ هکتار گسترش فضای سبز کمک کرد.

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

* **عهده‌دار 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.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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 راه‌حل‌هایی 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 تجزیه‌وتحلیل 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 به‌دلیل 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 به‌دلیل راندمان بالای این نوع از توربین‌ها توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است و به‌وسیله 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 پنل 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 رفت‌وبرگشت اگزرژی و هزینه واحد محصولات به‌صورت ۳۷/۰۲۷٪ و ۳۰/۴۱ دلار بر گیگا ژول در فرآیند بهینه‌سازی به‌دست 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 ۰-۱۰ 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 به‌ترتیب میزان تأمین نیاز انرژی در طول سال به‌منظور 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، به‌طوری‌که می‌توان اجزای الکتریکی را برای تقاضا به‌جای 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

هیبریدی پرداختند. سناریوهای هیبریداسیون مختلف با در نظر گرفتن هزینه برق (اقتصادی)، انتشار کربن دی‌اکسید (محیط‌زیست)، از دست دادن احتمال منبع تغذیه (قابلیت اطمینان) و بازده اگزرژی (فنی) برای به‌دست آوردن جبهه پارتو، مدل‌سازی و بهینه‌سازی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد 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 سرمایش، گرمایش و برق به‌صورت هم‌زمان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید 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 بهینه‌سازی چند هدفه سیستم تأمین انرژی یکپارچه انرژی‌های تجدیدپذیر دریایی پرداختند. این مطالعه یک سیستم مکمل چند انرژی نوآورانه را معرفی می‌کند که نمک‌زدایی انجماد آب دریا، تبرید و تولید هم‌زمان نیرو-هیدروژن-آمونیاک را با انرژی حرارتی اقیانوس، انرژی باد و انرژی خورشیدی ادغام می‌کند. نتایج بهینه‌سازی عملکرد نشان می‌دهد که سیستم به راندمان ذخیره‌سازی انرژی ۶۵,۹۶ درصد دست می‌یابد و نرخ کاهش این سیستم تنها ۳,۹۹ درصد است که به طور قابل‌توجهی کم‌تر از نرخ کاهش ۱۰ درصدی در سیستم سنتی است [۱۳]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳، یک مدل بهینه‌سازی قوی مبتنی بر داده برای برنامه‌ریزی نیروگاه انتشار کربن نزدیک به صفر با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های خروجی نیروی باد و بازار برق-کربن ارائه کردند. نتایج نشان داد با کاهش انتشار کربن و مصرف منابع انرژی تجدیدپذیر، مزایای زیست‌محیطی بهتری را نشان می‌دهد [۱۴].

طراحی و راه‌اندازی سیستم‌های نو نیاز به اطلاعات کامل و جامعی از شرایط فنی و محیطی، نوع تجهیزات، امکان‌سنجی و طراحی دارد. هم‌چنین بحث‌های محیط‌زیستی سیستم‌های تولید انرژی بیش‌تر باید مورد توجه قرار گیرد و تأمین انرژی با کم‌ترین اثر تخریبی بر محیط‌زیست صورت گیرد که نیاز به دانش و فناوری کامل‌تری دارد؛ بنابراین، توسعه سیستم‌های انرژی با عملکرد بالا و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی 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 ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده پرداخته می‌شود و یک تحلیل جامع ترمودینامیکی، اقتصادی به همراه بهینه‌سازی چند هدفه و هم‌چنین آنالیز زیست‌محیطی انجام می‌شود. عملکرد سیستم نسبت به تغییرات آب و هوایی شهر ملبورن در قاره اقیانوسیه و کشور استرالیا بررسی می‌شود. به‌طور خلاصه فعالیت کار حاضر به شرح زیر است:

- معرفی سیستم جدیدی از ترکیب واحدهای توربین بادی، ذخیره ساز انرژی هوای فشرده و الکترولایزر غشای تبادل پروتون با هدف افزایش عملکرد حداکثری سیستم و به‌صورت هم‌زمان کاهش هزینه‌های سیستم و بدون هیچ‌گونه اثرات مخرب بر محیط‌زیست.
- ارائه یک بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن بهترین و بهینه‌ترین شرایط عملکردی سیستم.
- استفاده از ترکیب هم‌زمان روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی عملکرد فنی و اقتصادی سیستم مطالعاتی.
- بررسی امکان‌سنجی و قابلیت اطمینان سیستم بر اساس داده‌های محیطی به‌دست آمده از نرم‌افزار متانورم.
- آنالیز اگزرژی سیستم پیشنهادی با استفاده از تحلیل سانکی.
- آنالیز زیست‌محیطی سیستم پیشنهادی جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی.

بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر تولید انرژی، به مدل‌سازی ترمودینامیکی و اقتصادی، تحلیل و بهینه‌سازی انواع سیستم‌های انرژی در کاربردهای مختلف می‌پردازد. بهینه‌سازی انرژی به درک جدیدی از سیستم‌ها و فرآیندها برای تعیین مناسب‌ترین پارامترهای طراحی به‌منظور دست‌یابی به افزایش کارایی و بهینه‌سازی هزینه می‌پردازد. در این پژوهش دو تابع هدف بازده اگزرژی جهت ماکزیمم کردن مقدار آن و تابع هدف نرخ هزینه جهت مینیمم کردن مقدار آن انتخاب شده است که می‌توان به معرفی یک سیستم کاربردی جهت راه‌اندازی کمک کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

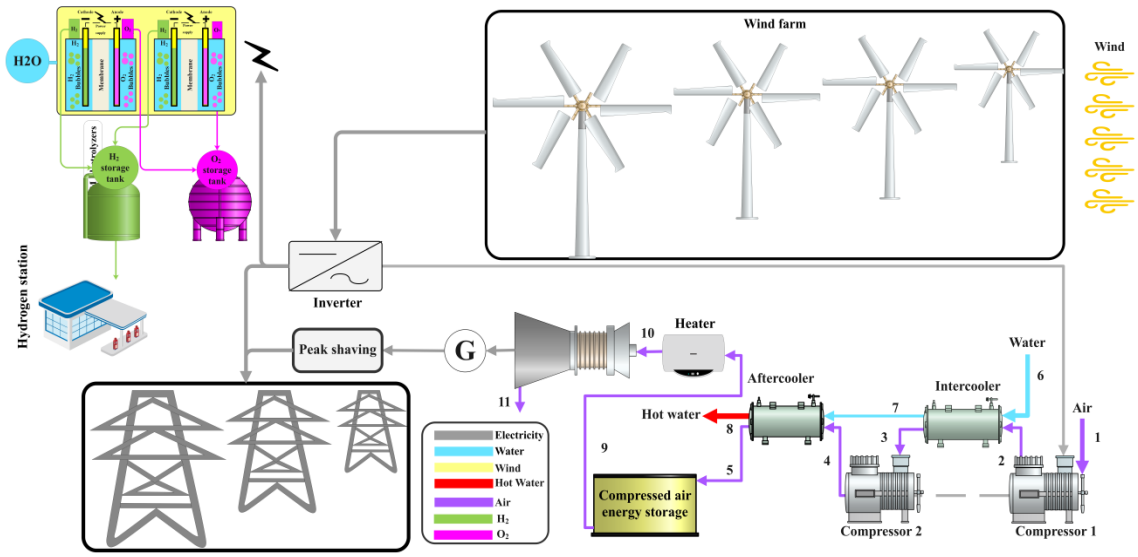
۲- مواد و روش

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 ذخیره‌ساز 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 موردنیاز منازل مسکونی و واحدهای ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده برای ذخیره‌سازی 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 می آورد. سپس هوای فشرده در منبع ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده برای استفاده بعدی در دوره‌های اوج نیاز و تقاضا ذخیره می‌شود. برای به حداقل رساندن مصرف برق در کمپرسورها دو خنک‌کننده 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 می دهد. برق موردنیاز الکترولایزر شامل ۲۰ درصد توان تولیدی مزرعه بادی در طول سال است و به‌همین دلیل تمام انرژی تولیدی سیستم به‌دلیل مصرف و تغذیه از انرژی های پاک، عاری از انتشار کربن دی‌اکسید هستند.

فرآیند الکترولیز به معنای تجزیه آب می‌باشد که برای این کار نیاز به حرارت و الکتریسیته می‌باشد تا هیدوژن 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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[1] انجام شده است.
- برای پیداکردن بهترین شرایط کاری سیستم یک بهینه‌سازی چندهدفه با روش شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک انجام شده است.
- شهر ملبورن به‌عنوان 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 [۱۸-۱۵].

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_{wt}	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.

[1] Engineering Equation Solver (EES)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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

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

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

$$A_{wt}=(D^2)\times(\pi/4) \quad (۱)$$

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

$$\dot{W}_{wt}=\frac{1}{2}\times\eta_{wt}\times\rho_{air}\times A_{wt}\times\eta_{ecoefficiency}\times V_{wind.speed}^{3}\times 4/1000 \quad (۲)$$

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 ا ست که تولید برق را افزایش دهند، به‌همین دلیل میزان توان تولیدی مزرعه بادی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{Wind_Farm}=n\times\dot{W}_{wt} \quad (۳)$$

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

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Wind_Farm} + \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{CAES} \quad (۴)$$

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

$$\dot{W}_{PEM} = \dot{W}_{net} \quad (۵)$$

به‌علت این‌که هدف اصلی این پژوهش تولید هیدروژن است، به‌همین دلیل تمام برق تولیدی سیستم به الکترولایزر غشای تبادل پروتون جهت تولید هیدروژن داده می‌شود. انرژی حرارتی موردنیاز 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:

$$\dot{m}_{24} = \dot{M}_{H2Out} \quad (۶)$$

$$\dot{M}_{H2Out} = a_{H2} \times \dot{W}_{PEM}^{b_{H2}} + c_{H2} \quad (۷)$$

که در این رابطه:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

$$a_{H2} = 3.382e\text{-}06 \quad (۸)$$

$$b_{H2} = 0.9727 \quad (۹)$$

$$c_{H2} = 5.928e\text{-}06 \quad (۱۰)$$

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

$$\dot{Ex}_Q + \sum_{in} \dot{m}_{in} ex_{in} = \dot{Ex}_W + \dot{Ex}_D \sum_{out} \dot{m}_{out} ex_{out} \quad (۱۱)$$

در این‌جا:

$$\dot{Ex}_W = \dot{W} \quad (۱۲)$$

$$\dot{Ex}_Q = \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \quad (۱۳)$$

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (۱۴)$$

۴-۲- بررسی اقتصادی

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

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \times CRF \times \varphi}{T} \quad (۱۵)$$

در این رابطه، $\dot{Z}_k$، نرخ هزینه، φ بیان‌کننده ضریب تعمیر و نگه‌داری است و مقدار آن برابر ۱/۰۶ است. T تعداد ساعات کاری سیستم است. فاکتور بازیابی سرمایه از رابطه (۱۶) به‌دست می‌آید [۲۴، ۲۵]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۱۶)$$

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

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

اجزا سیستم	رابطه
مزرعه بادی	$Z_{Wind.farm} = 5000 \times \dot{W}_{Wind.Farm}$
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	$Z_{GT} = \left(\frac{1536 \times \dot{m}_9}{0.92 - \eta_{GT}}\right) \times \ln\left(\frac{P_{10}}{P_{11}}\right) \times (1 + \exp(0.036 \times T_{10} - 54.4)$
ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده	$Z_{CAES} = ((1.218 \times \exp(2.3631 + 1.3673 \times (\ln(V_{Storage})) - 0.06309 \times (\ln(V_{Storage}))^2))$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

در نهایت باید گفت که میزان هزینه کل سیستم از مجموع هزینه اجزا سیستم به‌دست آورده می‌شود و طبق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$Z_{total} = Z_{GT} + Z_{Comp1} + Z_{Comp2} + Z_{CAES} + Z_{Aftercooler} + Z_{Intercooler} + Z_{Wind.farm} + Z_{PEM} \quad (۱۷)$$

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 می‌کند. به‌عنوان نسبت انرژی خروجی از سیستم در هنگام تخلیه به انرژی ورودی تامین شده در هنگام شارژ تعریف می‌شود. راندمان رفت و برگشت بالاتر نشان دهنده تلفات انرژی و هزینه‌های عملیاتی کم‌تر است. بازده اگزرژی به‌عنوان ویژگی کلیدی بررسی عملکرد انتخاب شد و با معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

رابطه Exergy round trip efficiency (ERTE):

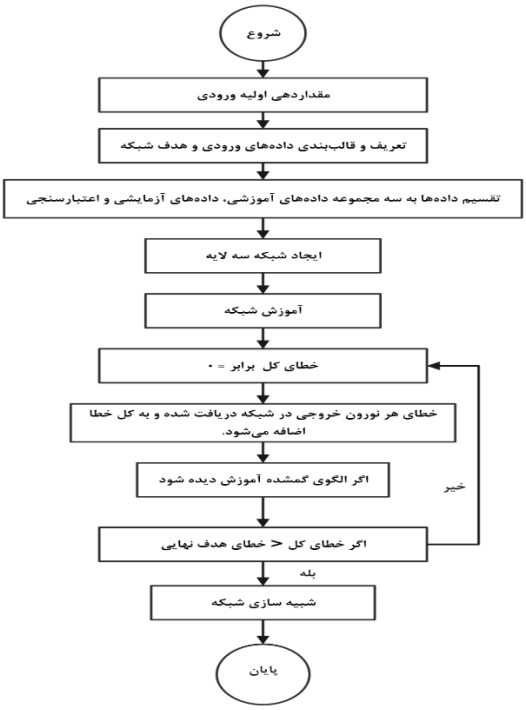
$$ERTE = \frac{(\dot{W}_{GT} + \dot{W}_{net}) \times 100}{\dot{W}_{CAES} + Q_{heater} + E_{wind.turbine} \times 24} \quad (۱۸)$$

۶-۲- روش بهینه‌سازی

شبکه‌های عصبی هوش مصنوعی[2]، به‌دسته‌ای خاص از مدل‌های یادگیری ماشین اطلاق می‌شوند که برای انجام فعالیت‌های مختلفی طراحی و بهینه شده‌اند. یک شبکه عصبی، به مدلی گفته می‌شود که به هوش مصنوعی اجازه می‌دهد تا داده‌ها را با الهام از روش تفکر و پردازش ذهنی انسان، مورد بررسی قرار دهد. این فرآیند به یادگیری عمیق مرتبط بوده و ساختار نسبتاً پیچیده‌ای را در خود جای داده است [۲۷-۲۶]. نام و ساختار آن‌ها از مغز انسان الهام گرفته شده است و از روشی که نورون‌های بیولوژیکی به یکدیگر سیگنال می‌دهند تقلید می‌کند. شبکه عصبی مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها است که تلاش می‌کنند تا روابط زیربنایی را در مجموعه‌ای از داده‌ها از طریق فرآیندی که نحوه عملکرد مغز انسان را تقلید می‌کند، تشخیص دهد. یک شبکه عصبی حاوی لایه‌هایی از گره‌های به هم پیوسته است. هر گره به‌عنوان پرسپترون شناخته می‌شود و شبیه یک رگرسیون خطی چندگانه است. پرسپترون سیگنال تولید شده توسط یک رگرسیون خطی چندگانه را به یک تابع فعال‌سازی که ممکن است غیرخطی باشد می‌دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی از لایه‌هایی از گره‌ها تشکیل شده‌اند که شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است [۲۹-۲۸]. در شکل (۲) فلوچارت روش شبکه عصبی ارائه شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

[2] ANN



شکل ۲- فلوچارت شبکه عصبی [۲۹-۲۶].

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 این‌که 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. همان‌گونه 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.

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

با توجه به این‌که سیستم معرفی شده یک سیستم جدید است، اعتبارسنجی زیرسیستم 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. همان‌گونه 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- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی چندهدفه جهت بهبود عملکرد سیستم و کاهش هزینه سیستم با روش شبکه عصبی انجام شد. بهینه‌سازی با هدف افزایش بازده اگزرژی و کاهش نرخ هزینه صورت گرفته است. در جدول ۵ متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده آن‌ها معرفی شده است.

جدول ۵- متغیرهای بهینه‌سازی و محدوده آن‌ها.

متغیر تصمیم‌گیری	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 (^0C)	۷۰۰	۹۵۰

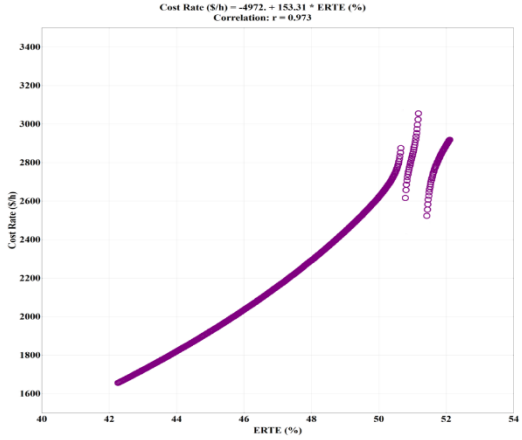
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

هدف این بهینه‌سازی افزایش پارامتر فنی سیستم شامل بازده اگزرژی 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 تصمیم گیری 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 (^{0}C)	۵۰۰	۸۴۸/۷۰۲
بازده اگزرژی (%)	۵۰۰	۴۷/۸۸۵
نرخ هزینه ($/h)	۵۰۰	۲۳۶۹/۲۹

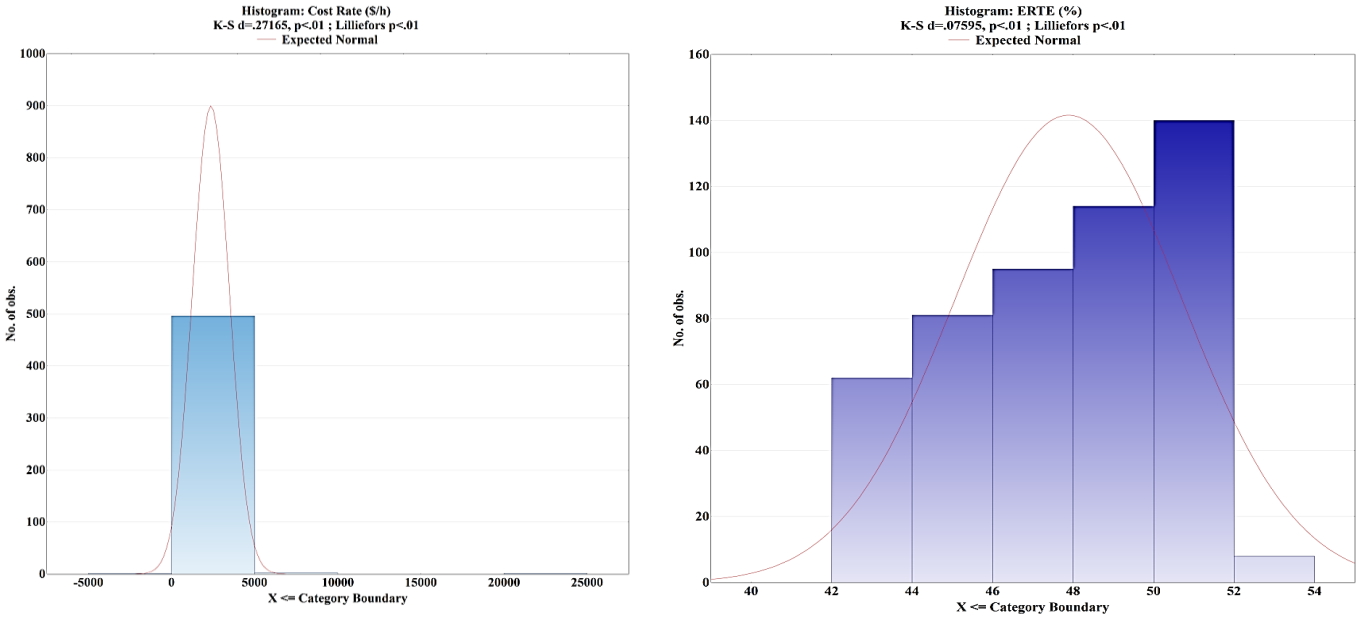
برای بهینه‌سازی چندهدفه مسئله، جواب‌های بهینه‌ای یافت می‌شود که به‌طور هم‌زمان، دو تابع هدف تعریف شده در مسئله را بهینه‌سازی می‌کند. در این پژوهش توابع هدف تعریف شده در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با یکدیگر در تناقض هستند که برای حل مسئله جواب‌های بهینه پارتو وجود دارد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار پارتو.

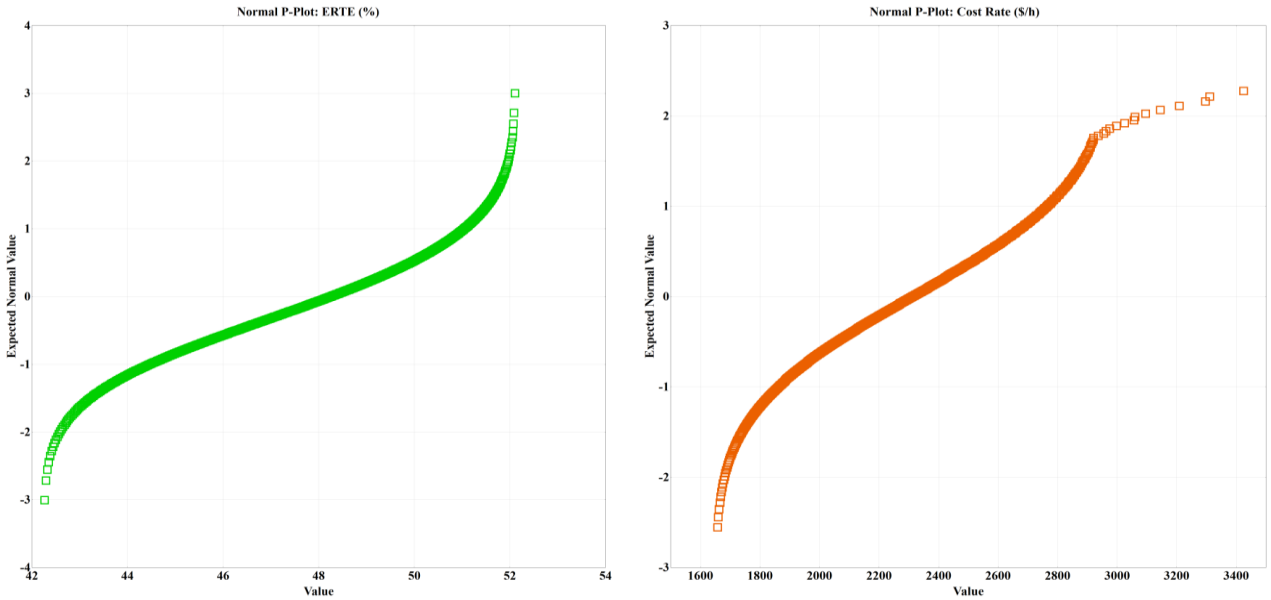
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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.

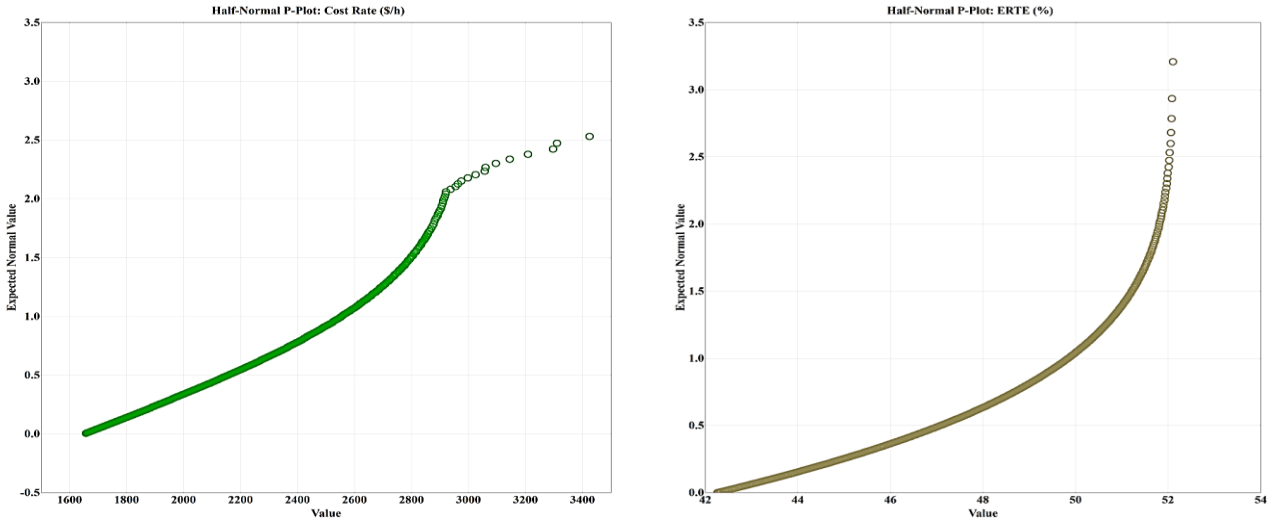
در شکل (۵) نمودار نرمالیتی دو تابع هدف بازده اگزرژی و نرخ هزینه نیروگاه بادی به‌دست آمده است؛ که این نمودار شامل احتمال عادی باقی‌مانده‌ها که از تحلیل رگرسیون خطی به‌دست آمده است را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار نرمالیتی توابع هدف.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

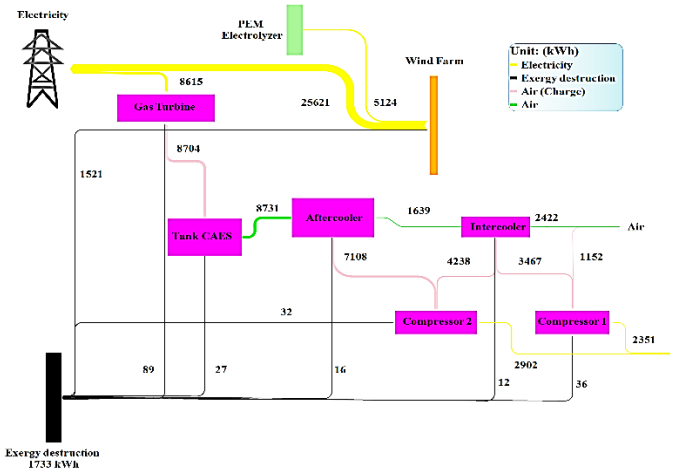
در شکل (۶) به بررسی مقدار نرمال موردانتظار برای دو تابع هدف بازده اگزرژی و نرخ هزینه پرداخته شده است. در این نمودار محور افقی تغییرات تابع هدف در هنگام بهینه سازی نسبت به مقدار طبیعی مورد انتظار را نشان می دهد که پخش بار و تمرکز تابع هدف در هنگام بهینه سازی را نشان می دهد.



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

۳-۳- تحلیل سانکی

شکل (۷) نمودار اگزرژی را در شرایط بهینه نشان می‌دهد. این نمودار نرخ اگزرژی هر جریان و تخریب اگزرژی همه اجزا را به‌صورت گرافیکی نشان داده است. این انالیز نشان می دهد که بیش‌ترین تخریب اگزرژی در مزرعه بادی اتفاق می افتد که نرخ تخریب اگزرژی ۱۵۵ توربین بادی به مبزان ۱۵۲۱ کیلووات ساعت است. به‌عبارتی هر توربین بادی دارای نرخ تخریب اگزرژی ۹/۸ کیلووات ساعت است. بعد از توربین بادی بیش‌ترین نرخ تخریب اگزرژی مربوط به توربین گازی با ۸۹ کیلووات ساعت است. کمپرسورها و افترکولر و اینترکولر در ردیف بعدی بیش‌ترین تخریب اگزرژی 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 اگزرژی سیستم (مجموع تخریب اگزرژی تجهیزات و واحدها) ۱۷۳۳ کیلووات ساعت است.

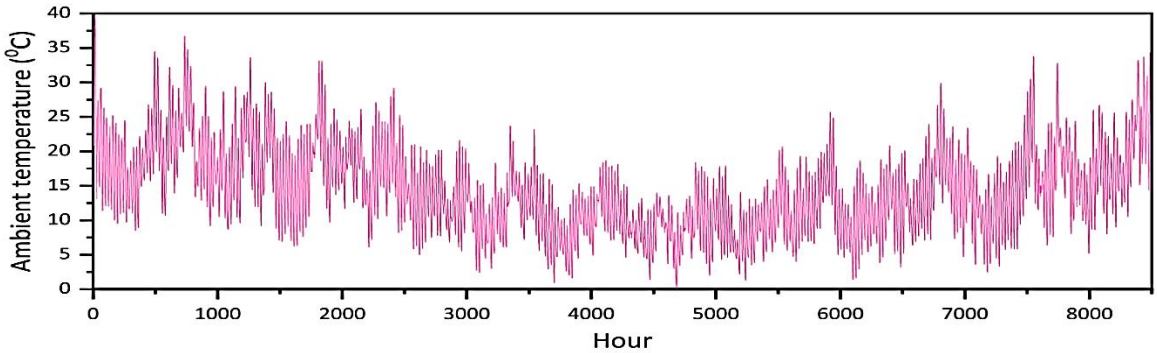


شکل ۷- نمودار سانکی سیستم پیشنهادی در حالت بهینه.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

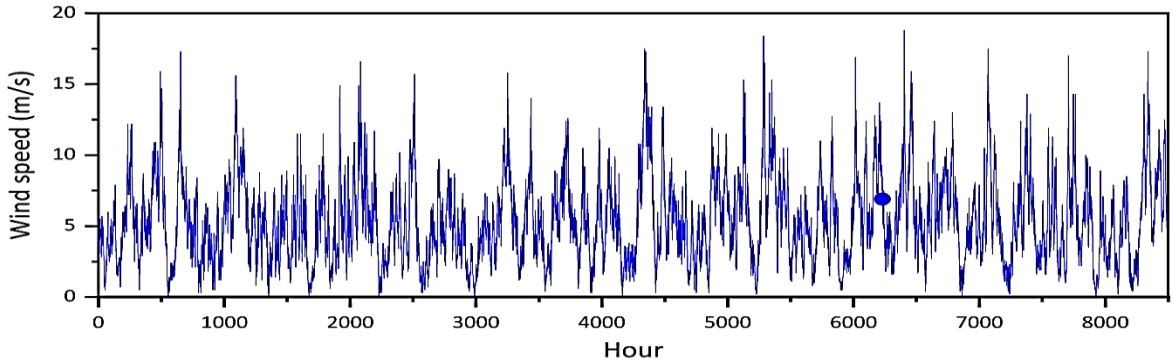
۴-۳- مطالعه موردی

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 به‌صورت ماهیانه ارائه می‌شود. در این پژوهش تأثیر تغییرات سرعت باد و دمای محیط شهر ملبورن بر روی عملکرد سیستم پیشنهادی کار حاضر به صورات ماهیانه بررسی شده است. این بررسی برای محاسبه عملکرد سیستم جهت برق 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 به‌صورت ساعتی برای شهر ملبورن رسم شده است. همان‌طور 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 به‌علت 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.



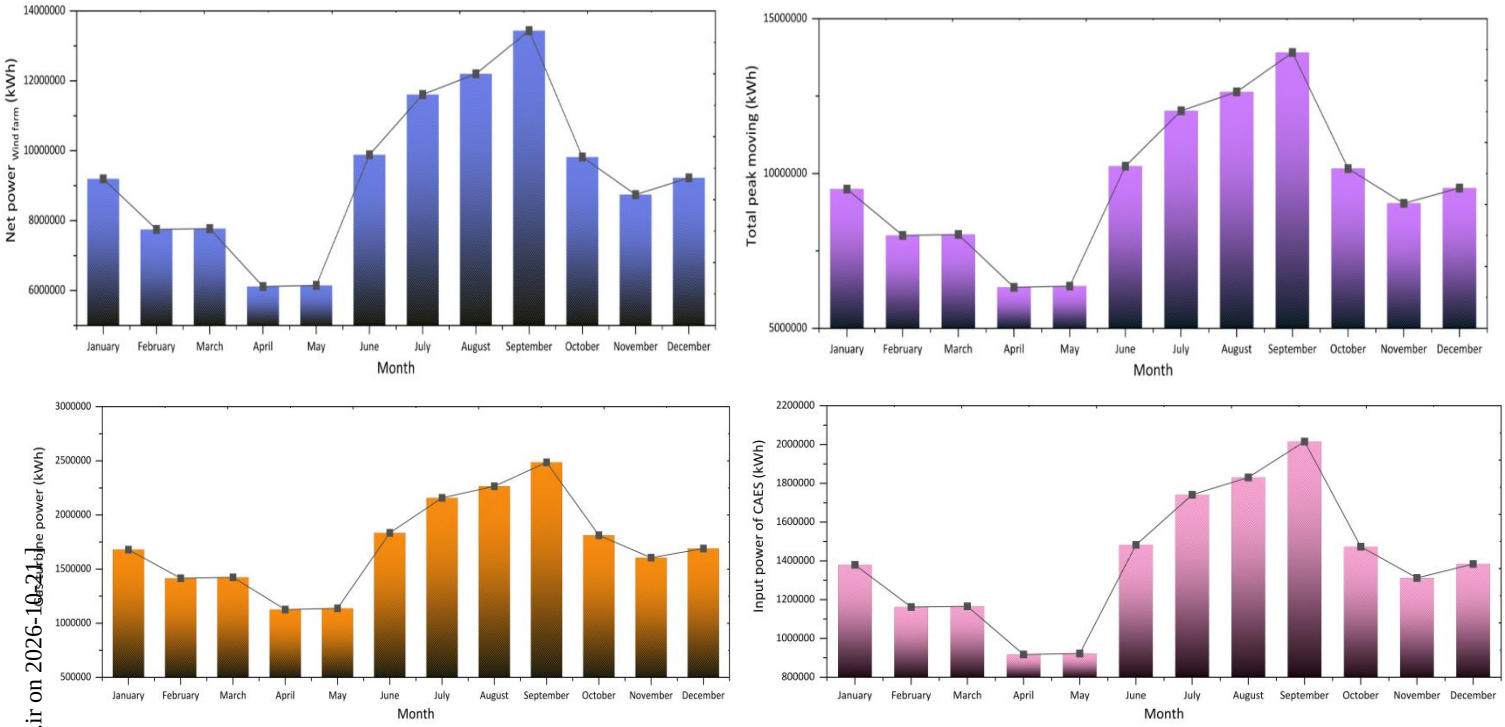
شکل ۹- تغییرات سرعت باد شهر ملبورن (نرم افزار متانورم).

در این پژوهش تغییرات دمای محیط و سرعت باد شهر مطالعاتی به‌صورت 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. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد عملکرد توان تولیدی مزرعه بادی با تغییرات سرعت باد رابطه مستقیم دارد. در سیستم پیشنهادی به‌دلیل وجود کمپرسورهای مصرف‌کننده برق، میزان تولید خالص مزرعه بادی در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های سرد کاهش پیدا کرده است. چرا که کمپرسورها توان موردنیاز خود را از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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 تغییرا توان تولیدی توربین گازی تاثیر گذار است. هم‌چنین دمای محیط بر روی هوای ورودی به واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده اثر می گذارد 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 تاثیر 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 به‌همین دلیل با افزایش توان مصرفی کمپرسورها در ماه‌های گرم سال باعث کاهش توان تولیدی کل سیستم و به دنبال ان هزینه‌های سیستم نیز می‌شود. توان مصرفی کمپرسورها از برق تولیدی توسط مزرعه بادی تأمین می‌شود به‌همین دلیل تغییرات سرعت باد نیز بر روی عملکرد میزان مصرف واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده تاثیر گذار است.

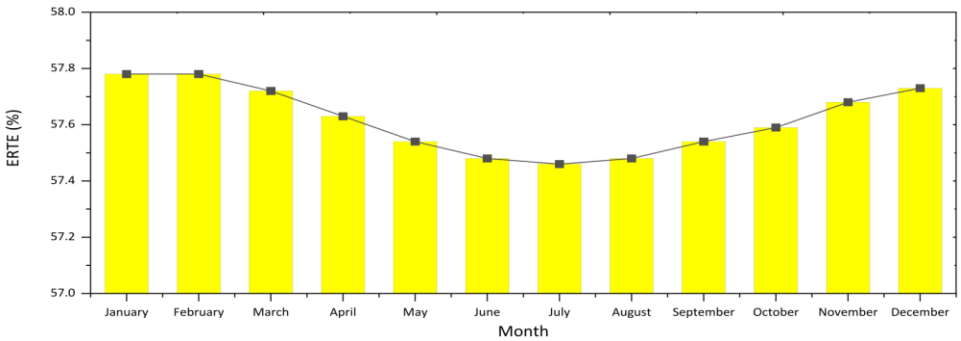


شکل ۱۰- توان تولیدی سیستم تجدیدپذیر مطالعاتی.

در شکل (۱۱) تغییرات ماهیانه ERTE سیستم نسبت به تغییرات پارامتر آب و هوایی به‌صورت ماهیانه نشان داده شده است. بازده اگزرژی با توان تولیدی رابطه مستقیم دارد و بیانگر بیشینه کار مفید سیستم است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد در روزهای پرپتانسیل سال، بازده اگزرژی رفت‌وبرگشتی 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 به‌دلیل این‌که توان مصرفی کمپرسورها افزایش می یابد و با توجه به این‌که توان مصرفی واحد ذخیره‌ساز انرژی هوای فشرده توسط

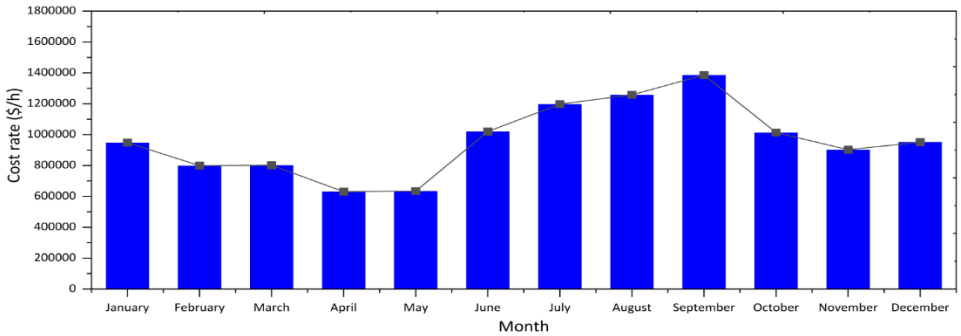
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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



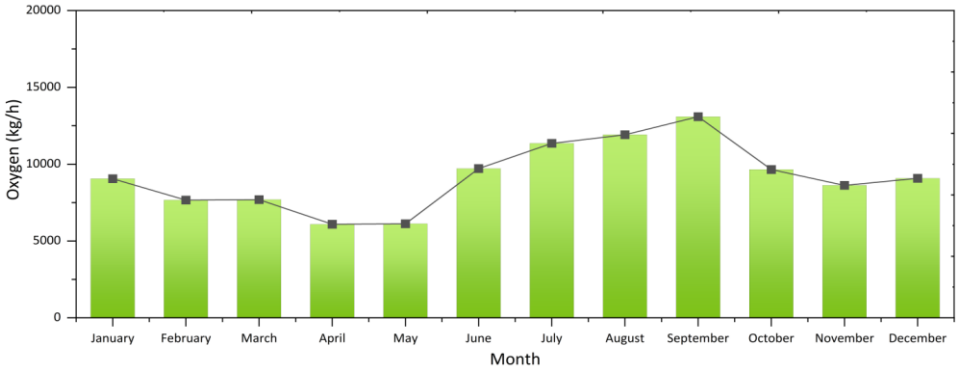
شکل ۱۱- تغییرات بازده اگزرژی سیستم در طول سال.

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 می یابد.



شکل ۱۲- تغییرات نرخ هزینه سیستم در طول سال.

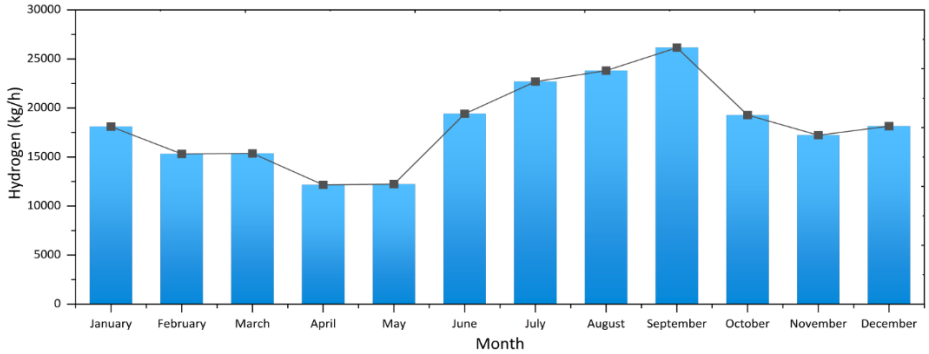
در شکل (۱۳) تغییرات اکسیژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی نشان داده شده است. ۲۰ درصد برق تولیدی مزرعه بادی به واحد الکترولایزر غشای تبادل پروتون برای تولید اکسیژن داده می‌شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد اکسیژن تولیدی سیستم روند مشابهی نسبت به تغییرات توان تولیدی مزرعه بادی دارد.



شکل ۱۳- محاسبه اکسیژن تولیدی.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

در شکل (۱۴) تغییرات هیدروژن تولیدی نسبت به تغییرات پارامترهای آب‌وهوایی 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.

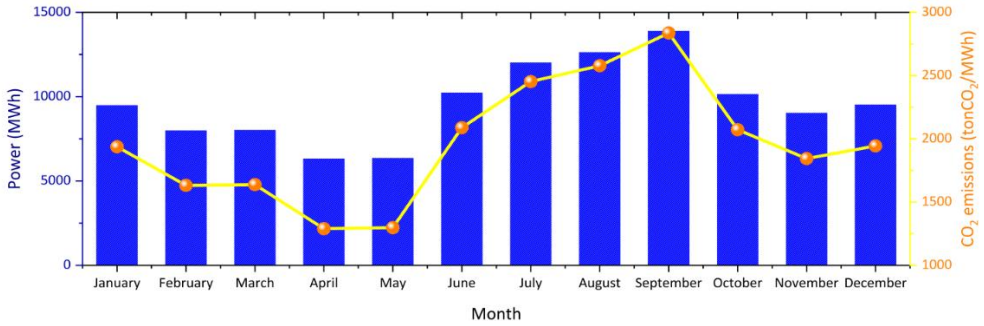


شکل ۱۴- محاسبه هیدروژن تولیدی.

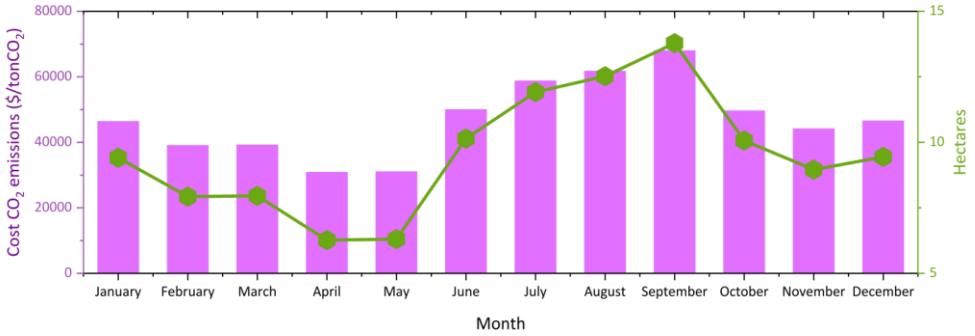
۵-۳- آنالیز زیست‌محیطی

در شکل (۱۵) و (۱۶) به تحلیل زیست‌محیطی سیستم طراحی شده جهت رسیدن به نتیجه ای از عملکرد سیستم در کاهش انتشار کرین 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 غیرآب ته‌نشینی در نظر گرفته شده است [۳۳].



شکل ۱۵- انتشار کربن دی‌اکسید.



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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

۴- نتیجه‌گیری

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 مدل‌سازی سیستم مورد بررسی و هم‌چنین به‌دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار حل معادلات مهندسی استفاده شد. در این مطالعه یک بهینه‌سازی چندهدفه برای پیدا کردن بهینه‌ترین حالت سیستم نسبت به تغییرات ۸ پارامتر تأثیرگذار بر روی عملکرد سیستم انجام شد.

خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تعداد توربین بادی، بازده توربین گازی، دمای ورودی به توربین گازی، بازده کمپرسور، بازده افترکولر، بازده اینترکولر، فشار ورودی به تانک ذخیره‌ساز 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 بهینه‌ترین حالت خود می‌تواند به بازده اگزرژی 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 به‌دست آمد.
- انالیز اگزرژی نشان داد که بیش‌ترین تخریب اگزرژی در مزرعه بادی با نرخ تخریب اگزرژی ۱۵۲۱ کیلووات ساعت است.
- نرخ کل تخریب اگزرژی سیستم (مجموع تخریب اگزرژی تجهیزات و واحدها) ۱۷۳۳ کیلووات ساعت است.
- نتایج نشان داد که سیستم در طول سال می‌تواند ۱۱۵۷۴۳۶۰۰ کیلووات ساعت برق، با نرخ هزینه ۱۱۵۳۹۹۴۴ دلار در سال تولید کند.
- نتایج نشان داد که سیستم با تأمین برق الکترولایزر می‌تواند در سال به میزان ۲۱۹۸۷۳/۶ کیلوگرم هیدروژن و۱۱۰۰۲۷/۵ 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، می‌تواند از انتشار ۲۳۶۱۱ تن کربن دی‌اکسید در سال جلوگیری کرد و ۵۶۶۶۸۰ دلار از هزینه‌های 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. Pourmoghadam, 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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. Spiru, 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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., Waldrond, 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]

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**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-10-21]