

آنالیز فنی - اقتصادی اندازه سیستم‌های ترکیبی بادی - خورشیدی برای تغذیه ساختمان‌های اداری نمونه

حسین شایقی

استاد مهندسی برق - قدرت، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی - مهندسی، اردبیل (نویسنده مسئول)

hshayeghi@gmail.com

یانشمار هاشمی

دانشجوی دکتری مهندسی برق - قدرت، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی - مهندسی، اردبیل

yashar_hshm@yahoo.com

مقاله حاضر به طراحی هماهنگ منابع تجدیدپذیر ترکیبی بادی و فتوولتائیک به منظور تغذیه بار الکتریکی ساختمان‌های اداری می‌پردازد. هدف اصلی از این طراحی مینیم کردن هزینه‌های سالیانه و افزایش سود محیطی مربوط به کاهش انتشار گازهای آلوده‌کننده ناشی از کاربرد سیستم‌های تولید پراکنده ترکیبی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم است. هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، جایگزینی، بهره‌برداری و نگهداری هر یک از اجزاست. مسئله طراحی به صورت یک موضوع بهینه‌سازی چند هدفه فرمول‌بندی شده است و توسط الگوریتم بهبودیافته ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (INSGA-II) حل می‌شود. برای یافتن بهترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های پارتوی به دست آمده از الگوریتم INSGA-II، یک روش تصمیم‌گیری بر مبنای تصمیم‌گیری فازی به کار گرفته شده است. روش پیشنهادی روی چهار ساختمان اداری در شهر اردبیل اعمال شده است. در این مقاله، ادارات دولتی برای طراحی سیستم تجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند و فرض بر این است که سرمایه‌گذار اصلی سیستم دولت است، با تمرکز بر سه هدف کاهش هزینه سیستم ترکیبی و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی، و افزایش قابلیت اطمینان سیستم. آنالیز مقایسه‌ای ارائه شده کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های تولید ترکیبی، طراحی چند هدفه، INSGA-II، ایجاد تصمیم‌گیر فازی

۱. مقدمه

سطح فزاینده تقاضا برای انرژی طی دهه‌های اخیر باعث نگرانی تأمین‌کنندگان انرژی شده است. انرژی در هر دو عرصه پیشرفت اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی در همه کشورها ضروری است. استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی و دیگر منابع پیامد این تقاضای روبه‌رشد است. ناپایداری‌های آب و هوایی سراسری حاصل اشتعال سوخت‌های فسیلی برای انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای (GHG) است. طبق نظر مشترک مراجع علمی، اگر رفتار جاری در ناپایداری آب و هوایی ادامه داشته باشد، زمین به نقطه غیربازگشت خواهد رسید. چالش کاهش گازهای گلخانه‌ای، مانند انتشار دی‌اکسید کربن، برای پایدارسازی آب و هوا چشمگیر شده است. از آنجا که تهدید بالقوه به‌وجود آمده بر اثر استفاده از منابع انرژی سنتی جدی است، تولیدکنندگان انرژی لزوم استفاده از منابع تجدیدپذیر تولید انرژی را در دستور کار خود قرار داده‌اند. فناوری انرژی تجدیدپذیر و دائمی، مثل سیستم‌های تبدیل انرژی فتوولتائیک خورشیدی و سیستم‌های تبدیل انرژی بادی، راه حل غلبه بر تقاضای روزافزون انرژی است؛ درحالی‌که به‌طور هم‌زمان تأثیرات سوء استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهند. بسیاری از دولت‌ها سیاست‌های حمایتی برای تأمین و بهبود هزینه‌های پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر (RET) را از طریق پیشنهاد مشوق‌های مالی تصویب کرده‌اند.

برای رسیدن به توسعه پایدار و قابل اطمینان، ترکیب منابع انرژی راه حل تعیین‌کننده‌ای است. مسائلی چون مشکل انتقال الکتریسته به مناطق دوردست و هزینه‌های مربوط به آن حکم می‌کند که استفاده از سیستم‌های ترکیبی توربین بادی - فتوولتائیک در مناطق دارای پتانسیل مناسب تابش و باد مد نظر قرار گیرد. سیستم‌های ترکیبی از دو قسمت تشکیل شده‌اند: توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی. این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌های بادی یا فتوولتائیک منفرد، گزینه‌های مناسبی‌اند (Nikhil & Subhakar, 2013).

برای استخراج ماکزیمم انرژی، باید سهم هر منبع از تولید را بدانیم، چون میزان تولید این منابع مطابق با موقعیت‌های روزانه، فصلی و سالانه تغییر می‌کند. سیستم‌های ترکیبی را می‌توان در مناطق

شهری و روستایی برای موارد بسیاری چون پمپ آب، روشنایی و ارتباطات به کار گرفت. سیستم‌های خورشیدی و بادی خروجی‌های متغیر و متناوب، و همچنین هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبتاً بالایی دارند. از آنجا که هر دو منبع توان بادی و خورشیدی به شدت وابسته به تغییرات آب و هوایی‌اند، ممکن است در تولید توان تغییرات چشمگیری داشته باشیم. برای بهبود یا حتی حذف نوسانات خروجی در سیستم‌های ترکیبی، از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مانند باتری‌های ذخیره‌ساز (SB)، استفاده می‌شود. SBها توان اضافی را دریافت کرده توان کمبود را در شرایط عملکرد مختلف تأمین می‌کنند. از طرف دیگر، در بهره‌برداری از چنین سیستم‌های ترکیبی عدم قطعیت‌های مختلف وجود دارد، مانند خرابی تجهیزات و تغییرات احتمالی بار. بنابراین، به دلیل ماهیت تصادفی سرعت باد، تابش خورشید و بعضی موارد دیگر، مهم‌ترین چالش در تأمین مطمئن بار، طراحی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر در حالت‌های مختلف آب و هوایی با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری و عملکرد تجهیزات است. بعضی مقاله‌ها روش‌هایی را برای به دست آوردن ترکیبات بهینه سیستم انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد داده‌اند (Wang & Singh, 2009). نرم‌افزار هومر برای ساخت سیستم‌های ترکیبی برق آبی، میکرو و فتوولتائیک در شمال آفریقا استفاده شده است (Bekele & Palm, 2009). چندین ترکیب ممکن از ظرفیت‌های تولید بادی - فتوولتائیک آزمایش شده و هزینه سالانه مینیمم به‌عنوان ترکیب بهینه انتخاب شده است. در این منبع، نقش محیطی سیستم‌های ترکیبی بادی - فتوولتائیک در نظر گرفته نشده است و ارزیابی تابش خورشید و سرعت باد، به جای یک‌سال، در یک دوره ۲۴ ساعته صورت گرفته است.

نرم‌افزار هومر جهت مینیمم کردن هزینه سیستم ترکیبی برق آبی، دیزل، بادی، فتوولتائیک و میکرو در مالزی استفاده شده است (Luna-Rubio et al., 2012). تنها اشکال این روش طراحی در استفاده کردن از دیزل است که بهتر است به دلیل مسائل زیست‌محیطی از آن استفاده نکنیم. نرم‌افزار هومر نرم‌افزار انعطاف‌ناپذیری است که روش طراحی سنتی‌ای را برای انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم می‌کند. در روش طراحی نرم‌افزار هومر، بعضی توابع هدف مسئله مانند سود زیست‌محیطی ناشی از وجود انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته نمی‌شود. داده‌های تابش خورشید و سرعت باد فقط به

مناطق خاص مربوط می‌شود و همه مناطق جهان را دربرنمی‌گیرد. ارزیابی اقتصادی و فنی سیستم میکرو در منبع (Diaf et al., 2008) ارائه شده است. برای به‌دست آوردن سائز بهینه‌ای از سیستم سلول سوختی، بادی و خورشیدی، از الگوریتم تکاملی در منبع (Koutroulis et al., 2006) استفاده شده است. کوترولیس و همکاران تکنیکی را برای طراحی سیستم ترکیبی در منبع (Yang et al., 2008) ارائه داده‌اند. اشکال اساسی این منابع ارائه یک روش طراحی براساس شیوه بهینه‌سازی تک هدفه است. روش بهینه‌سازی تک هدفه نمی‌تواند به‌طور کامل همه جنبه‌های یک طراحی کامل را تحت پوشش قرار دهد. روشی برای سائزبندی سیستم ترکیبی منفصل از شبکه در منبع (Belfkira, Zhang & Barakat, 2011) ارائه شده است. این روش از الگوریتم معینی برای مشخص کردن تعداد و نوع بهینه ادوات استفاده می‌کند، درحالی‌که مینیمم‌سازی هزینه و دسترس‌پذیری انرژی کل را مدیریت می‌کند. تکنیک طراحی ارائه شده در این منبع به یک تابع هدف متأثر از هزینه سیستم ترکیبی محدود شده است. لویز و همکارانش بهینه‌سازی ترکیبی را در (Dufo-Lopez & Bernal Agustín) پیشنهاد داده‌اند. سیستم ترکیبی ارائه شده روش مناسبی است برای مقابله با مسائلی مانند رفتار تصادفی سیستم بادی یا خورشیدی منفرد که در این منبع از آن صرف‌نظر شده است. استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان در منبع (Yang et al., 2008) بحث شده است. مقاله‌های ارائه شده در رابطه با بحث قابلیت اطمینان در سیستم‌های ترکیبی درباره زمینه قابلیت اطمینان را به‌طور ژرف و عمقی بحث نکرده‌اند. برای مثال، از بعضی پدیده‌ها مانند خروج یا خرابی تجهیزات چشم‌پوشی شده است (Billinton & Allan, 1992). در رابطه با سائزبندی بهینه منابع تجدیدپذیر توسط الگوریتم ژنتیک، استفاده براساس داده‌های جغرافیایی سالانه در منبع (Ekren & Ekren, 2010) بحث شده است. کاهش گازهای گلخانه‌ای و سود مربوط به آن به‌واسطه نصب سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، هدف مهمی در کاربرد سیستم ترکیبی بادی - فتوولتائیک است. این موضوع در این منبع نادیده گرفته شده است. روش تکاملی دیگر را برنال و همکارانش در منبع (Bernal-Agustín, Dufo-López & Rivas-Ascaso) ارائه داده‌اند. روش یاد شده از جست‌وجوی گرادیان تصادفی برای بهینه‌سازی سراسری استفاده می‌کند.

روش‌های طراحی یاد شده در منابع بالا به‌طور عمده مبتنی بر روش تک هدفه هستند. در روند طراحی سیستم ترکیبی بادی - فتوولتائیک، به‌جای یک تابع هدف منفرد چندین تابع هدف وجود دارد. بعضی توابع ممکن است در تضاد با هم باشند. از این‌رو، برای به‌دست آوردن روش طراحی راضی‌کننده، باید توابع هدف مختلف را بررسی کرد.

در این مقاله، روشی برای طراحی بهینه سیستم ترکیبی فتوولتائیک - بادی به منظور تغذیه بار الکتریکی ساختمان‌های اداری پیشنهاد شده است. بدین منظور، مدل ریاضی سیستم ترکیبی مطالعه شده و تکنیک بهینه‌سازی دینامیکی در مقاله پیشنهاد شده است. روش چند هدفه برای مدیریت طراحی سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن سه هدف سود اقتصادی و محیطی حاصل از سیستم بادی - خورشیدی به کار گرفته شده، و افزایش قابلیت اطمینان سیستم است. روش بهینه‌سازی پیشنهادی مبتنی است بر ارزیابی دینامیکی انرژی بادی و خورشید برای تأمین بار الکتریکی ساختمان‌های اداری. این ملاحظات دینامیکی طراح را قادر می‌سازد که طرح دقیقی ارائه کند. از طرف دیگر، طراحی دارای چند شاخص روش مناسبی را برای رسیدن به اهداف طراحی فراهم می‌کند که حاصل آن طرح‌های متفاوت با اولویت‌های مختلف است. طراحی چند هدفه تصمیم‌گیرنده را قادر می‌سازد که پیشنهادهای معقول مختلف را تعیین کند. با در نظر گرفتن چهار ساختمان اداری نمونه، طرح بهینه ارزیابی می‌شود و تابع بهینه‌سازی سه هدفه متناظر با الگوریتم INSGA-II حل می‌شود. به عنوان الگوریتم مقاوم مبتنی بر الگوریتم ژنتیک به‌واسطه توانایی در مدیریت مسائل بهینه‌سازی سخت در پروسه طراحی اعمال شده است. روند تصمیم‌گیری مبتنی بر روش فازی FDM برای رتبه‌بندی پاسخ‌های آرشیو پارتو و تعیین بهترین پاسخ در یک محیط قطعی با یک تصمیم‌گیرنده منفرد اجرا شده است. به‌طور خلاصه، نوآوری مقاله را می‌توان به این صورت بیان کرد:

- ارزیابی دینامیکی پروسه طراحی بهینه
- ارائه روش بهینه‌سازی چند منظوره برای طراحی سیستم ترکیبی فتوولتائیک - بادی با اعمال سه تابع هدف هزینه سیستم ترکیبی، و هزینه زیست‌محیطی، و افزایش قابلیت اطمینان سیستم

- حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه طراحی به وسیله الگوریتم INSGA-II و انتخاب بهترین پاسخ از میان مجموعه پاسخ‌های آرشیو پارتو توسط سازوکار فازی FDM.

تقسیم‌بندی ساختار مقاله بدین قرار است: بخش‌های ۲ و ۳ به مدل سیستم‌های تولید توربین بادی و فتوولتائیک و استراتژی عملکرد سیستم اختصاص دارد. بیان مسئله و حل بهینه با استفاده از INSGA-II مبتنی بر تصمیم‌گیری فازی در بخش‌های ۴ و ۵ آمده است. در بخش ۶، نتایج حاصل از اجرای مسئله ارائه شده است؛ و در نهایت، نتایج در بخش ۷ تشریح شده است.

۲. مدل سیستم‌های تولید توربین بادی و فتوولتائیک

۲-۱. مدل سیستم تولید فتوولتائیک

ولتاژ خروجی و جریان حاصل شده توسط مدول فتوولتائیک با معادله زیر توصیف می‌شود (Alsayed et al., 2014; Kornelakis & Koutroulis, 2009):

$$I_{mpp} = I_{SC} \left\{ \frac{G_T}{G_{ref}} - \lambda_1 \left[\exp\left(\frac{V_{max}}{\lambda_2 V_{OC}}\right) - 1 \right] \right\} + \sigma_{I,SC} (T_c - T_{c,ref}) \quad (1)$$

$$V_{mpp} = V_{max} + \sigma_{V,OC} (T_c - T_{c,ref}) \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}}\right) \exp\left(-\frac{V_{max}}{\lambda_2 V_{OC}}\right), \lambda_2 = \left(\frac{V_{max}}{V_{OC}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}}\right)\right]^{-1}, T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G_T \quad (3)$$

بنابراین، توان پنل فتوولتائیک در ماکزیمم نقطه توان را می‌توان چنین بیان کرد:

$$P_{mpp} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (4)$$

تعداد کل مدل‌های PV به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N_{PV} = N_{PV}^s N_{PV}^p \quad (5)$$

تعداد مدل‌های سری N_{PV}^s توسط ولتاژ باس DC یعنی V_{bus} با رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$N_{PV}^s = \frac{V_{bus}}{V_{PV}^{nom}} \quad (6)$$

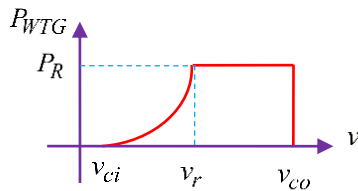
۲-۲. مدل سیستم توربین بادی

مطابق شکل ۱، توان تولیدی ژنراتور توربین بادی تابعی از سرعت باد است. مدل ریاضی ژنراتور توربین بادی با معادله (۷) بیان می‌شود (Chauhan & Saini, 2014):

$$P_{WTG} = \begin{cases} \frac{P_R v^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} - \frac{P_R v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} & , \quad v_{ci} < v < v_r \\ P_R & , \quad v_r < v < v_{co} \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases} \quad (7)$$

برای تبدیل سرعت باد در یک ارتفاع مرجع H_r به سرعت باد در ارتفاع چرخ H_b ، از تابع زیر استفاده شده است:

$$v = v_{H_r} \left(\frac{H_b}{H_r} \right)^K \quad (8)$$



نمودار ۱. منحنی توان - سرعت ژنراتور توربین بادی

۳-۲. مدل بانک باتری

برای یک بانک باتری داریم (Belfkira, Zhang & Barakat, 2011):

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \eta_{bat} (P_B(t) / V_{bus}) \Delta t \quad (9)$$

ماکزیمم نرخ شارژ SOC_{max} برابر است با ظرفیت نامی کل بانک باتری $C_n(Ah)$. چگونگی شارژ باتری باید به مقدار مینیمم و ماکزیمم SOC به صورت زیر محدود شود (Bortolini, Gamberi & Graziani, 2014):

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \eta_{bat} (P_B(t) / V_{bus}) \Delta t \quad (10)$$

$$SOC_{min} = (1 - DOD) SOC_{max} < SOC < SOC_{max} \quad (11)$$

تعداد باتری‌های سری به ولتاژ باس DC و ولتاژ نامی هر باتری وابسته است و به این صورت بیان می‌شود:

$$N_{battery}^s = \frac{V_{bus}}{V_{bus}^{nom}} \quad (12)$$

۳. استراتژی عملکرد سیستم

ورودی - خروجی بانک باتری را می‌توان با رابطه (۱۳) بیان کرد:

$$\Delta P(t) = P_{RE}(t) - P_L(t) \quad (13)$$

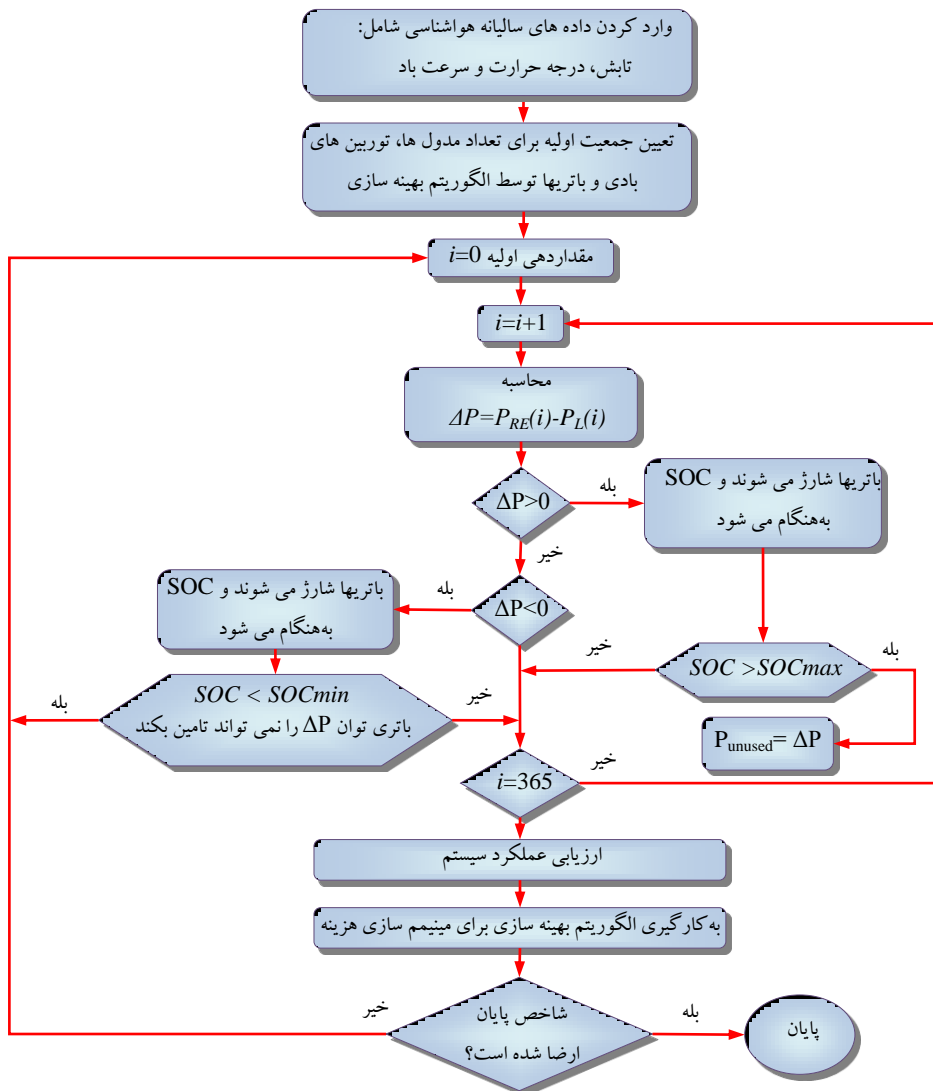
که در آن:

$$P_L(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_i} \quad (14)$$

که η_i ضریب تبدیل و P_{load} توان مورد تقاضا از طرف بار است. می‌توان دو مد را برای مشخص کردن استراتژی اجرای سیستم توسعه داد (Maleki & Askarzadeh, 2014):

مد ۱: $\Delta P \geq 0$ توان ΔP برای تغییر دادن باتری‌ها استفاده می‌شود، تا زمانی که SOC بانک باتری به صورت $SOC < SOC_{max}$ باشد. اگر حالت بانک باتری به صورت $SOC > SOC_{max}$ باشد، توان باقیمانده ΔP بلااستفاده خواهد بود.

مد ۲: $\Delta P < 0$ در این روش، توان مورد نیاز برای تغذیه بار توسط بانک باتری فراهم شده است. تعداد باتری‌ها طوری انتخاب شده است که توان ΔP را تغذیه کند. با در نظر گرفتن روش یاد شده، رویه انجام کار در شکل ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۲. فلوجارت روش پیشنهادی

۴. بیان مسئله

هدف اصلی از این مقاله طراحی بهینه یک سیستم ترکیبی بادی - فتوولتائیک است. پارامترهای بهینه‌سازی عبارت‌اند از: تعداد توربین‌های بادی، پنل‌های فتوولتائیک، اینورتر DC/AC و شارژ کنترل‌کننده. هدف از روش طراحی ارائه شده در این مقاله به‌دست آوردن تعداد بهینه‌ای از ادوات سیستم به نحوی است که سود محیطی و اقتصادی به‌دست آمده طی دوره عملکرد سیستم ماکزیمم شود. تابع هدف اول هزینه خالص حال حاضر^۱ کل ادوات سیستم ترکیبی است. دومین تابع هدف مربوط به سود زیست‌محیطی کاهش آلودگی ناشی از استفاده از سیستم‌های ترکیبی بادی - فتوولتائیک است. بنابراین، دو هدف اصلی در فرایند طراحی در نظر گرفته می‌شود: تابع هزینه مربوط به سیستم، و تابع سود کل زیست‌محیطی. هزینه‌های سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه، جایگزینی، بهره‌برداری و نگهداری تجهیزات است. هزینه سالیانه هر تجهیز نام عبارت است از (Maheri, 2014):

$$AP_i = N_i \{ [CC_i + RC_i k_i(ir, L_i, y_i)] \times CRF(ir, R) + O \& MC_i \} \quad (15)$$

که N_i تعداد نامین تجهیز، CC هزینه سرمایه بر حسب (US\$/unit)، RC هزینه هر جایگزینی بر حسب (US\$/unit-year)، $O \& MC$ هزینه بهره‌برداری و تعمیرات سالیانه تجهیز بر حسب (US\$/unit-year)، و R مدت زمان پروژه است. ir نرخ بهره واقعی است که به نرخ بهره نامی ($ir_{nominal}$) و نرخ تورم سالیانه (f_r) وابسته است و به صورت زیر تعریف می‌شود (Kashefi Kaviani, Riahy & Kouhsari, 2009):

$$ir = \frac{ir_{nominal} - f_r}{1 + f_r} \quad (16)$$

CRF و K به ترتیب ضریب بازگشت سرمایه و ارزش حال حاضر پرداخت است، و به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

1 . net present value

$$CRF = \frac{ir \times (1+ir)^R}{(1+ir)^R - 1} \quad (17)$$

$$K_i(ir, L_i, y_i) = \sum_{n=1}^{y_i} \frac{1}{(1+ir)^{n \times L_i}} \quad (18)$$

L و y به ترتیب طول عمر و تعداد جایگزینی تجهیزات در طول مدت پروژه هستند. در نهایت، تابع هزینه فرایند طراحی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_1 = \sum_i AP_i \quad (19)$$

تابع هدف دوم ماکزیم‌سازی تابع سود کل محیطی f_2 (kg CO₂) است. این تابع انتشار کل CO₂ را که به جهت استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کاهش یافته است بیان می‌کند و عبارت است از:

$$F_2 = E_{conv} - E_{RES} - E_{inst} \quad (20)$$

انتشار CO₂ توسط سیستم انرژی سنتی به صورت زیر است:

$$E_{conv} = E_{tot} \cdot f_{conv} \quad (21)$$

f_{conv} پارامتری است که انتشار CO₂ ایجاد شده توسط سیستم منبع انرژی سنتی را توصیف می‌کند. مقدار این پارامتر برای تعدادی از منابع در جدول (۱) داده شده است (Koutroulis et al., 2006):

جدول ۱. انتشار CO₂ برای تعدادی از منابع

کربن	نفت	گاز طبیعی	دیزل
۹۵۵	۸۱۸	۴۳۰	۷۷۲

مأخذ: نتایج تحقیق

انتشار CO_2 ناشی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{RES} = E_{total} \cdot f_{RES} \quad (22)$$

f_{RES} (kg CO_2 per kWh) پارامتری است که انتشار CO_2 توسط سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی را در واحد انرژی توصیف می‌کند. این پارامتر 0.098 kg/kWh در نظر گرفته شده و همچنین انتشار CO_2 به وجود آمده طی فرایند تولید و نصب سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر برابر است با:

$$E_{inst} = P_{RES} \cdot f_{pro} \quad (23)$$

f_{pro} (kg CO_2 per kW) پارامتری است که انتشار CO_2 ایجاد شده طی تولید و نصب سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را توصیف می‌کند. P_{RES} توان نصب شده سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است.

در حالت کلی، با ترکیب محدودیت‌ها و اهداف، می‌توان مسئله طراحی را به صورت زیر به شکل ریاضی فرمول‌بندی کرد:

$$\text{Min } F(x, u, p) = \text{Min} \{F_1, F_2\} \quad (24)$$

subject to

$$SOC_{\min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC_{\max}(t) \quad (25)$$

$$0 \leq N_{PV,P} \leq N_{PV,P}^{\max}$$

$$0 \leq N_{Bat,P} \leq N_{Bat,P}^{\max}$$

$$0 \leq N_{WT} \leq N_{WT}^{\max}$$

قیدهای اصلی مسئله به بررسی توانایی یا عدم توانایی ترکیب به دست آمده برای سیستم می‌پردازد. این قیدها در همه گام‌های شبیه‌سازی آزمایش شده‌اند، و چنانچه حتی در یک گام ایفا نشود، ترکیب به دست آمده نامناسب از میان طرح‌های ممکن حذف می‌شود.

۵. طراحی بهینه با استفاده از INSGA-II مبتنی بر تصمیم‌گیری فازی

۵-۱. مفهوم INSGA-II

الگوریتم INSGA-II مؤثرترین الگوریتم در میان تمام الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی چندگانه است (Moshtagh & Ghasemi, 2013; Ahmadi et al., 2013). فلوچارت الگوریتم INSGA-II در شکل (۳) نشان داده شده است.

تقاطع باینری شبیه‌سازی (SBX)، جهش چندجمله‌ای (PM)، و فاصله ازدحام دینامیکی (DCD) مربوط به INSGA-II به صورت زیر توصیف می‌شوند:

- تقاطع باینری شبیه‌سازی (SBX): اپراتور SBX با دو جفت والدین کار می‌کند. شاخص تقاطع η_c هر مقدار حقیقی غیر منفی است. مقدار بزرگ‌تر η_c منتج به احتمال بزرگ‌تر برای والدین نزدیک به هم می‌شود. برای یافتن فرزندان $O_i^{(1,t+1)}$ و $O_i^{(2,t+1)}$ از والدین $O_i^{(1,t)}$ و $O_i^{(2,t)}$ مقدار رندوم a_i مابین صفر و یک تولید می‌شود. از یک تابع توزیع احتمالی تعیین شده، بعد قائل ψ_{qi} به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\psi_{qi} = \begin{cases} (2a_i)^{1/\eta_c+1}, & \text{if } a_i \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-a_i)}\right)^{1/\eta_c+1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

در حالی که شاخص η_c هر مقدار حقیقی مثبت را بیان می‌کند. فرزندان به این صورت به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} O_i^{(1,t+1)} = 0.5 \left[(1-\psi_{qi})O_i^{(1,t)} + (1+\psi_{qi})O_i^{(2,t)} \right] \\ O_i^{(2,t+1)} = 0.5 \left[(1-\psi_{qi})O_i^{(2,t)} + (1+\psi_{qi})O_i^{(1,t)} \right] \end{cases} \quad (27)$$

- جهش چندجمله‌ای (PM): PM یک تابع چندجمله‌ای است. ساختار توزیع چندجمله‌ای را یک پارامتر خارجی η_m کنترل می‌کند و توزیع به‌طور دینامیکی با تکرارها تغییر داده می‌شود.

همانند اپراتور SBX توزیع چندجمله‌ای ممکن است به جای توزیع نرمال به صورت یک تابع چندجمله‌ای زیر باشد:

$$y_i^{(1,t+1)} = O_i^{(1,t+1)} + (O_i^{(U)} - O_i^{(L)})\pi_i \quad (28)$$

در حالی که پارامتر δ از توزیع احتمالی چندجمله‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P(\pi_i) = 0.5(1 + \eta_m)(1 - |\pi|)^{\eta_m}$$

$$\pi_i = \begin{cases} (2r_i)^{1/\eta_m - 1}, & \text{if } r_i < 0.5 \\ 1 - [2(1 - r_i)]^{1/\eta_m + 1}, & \text{if } r_i > 0.5 \end{cases} \quad (29)$$

برای مدیریت متغیرهای تصمیم محدود شده، اپراتور جهش برای دو ناحیه اصلاح می‌شود: $[O_i^{(L)}, O_i^{(U)}]$ و $[O_i^{(L)}, O_i^{(U)}]$.

- فاصله ازدحام دینامیکی (DCD): یک فرد با پایین‌ترین DCD در هر زمان حذف شده و DCD برای افراد باقیمانده محاسبه می‌شود. مقدار DCD به این صورت به دست می‌آید:

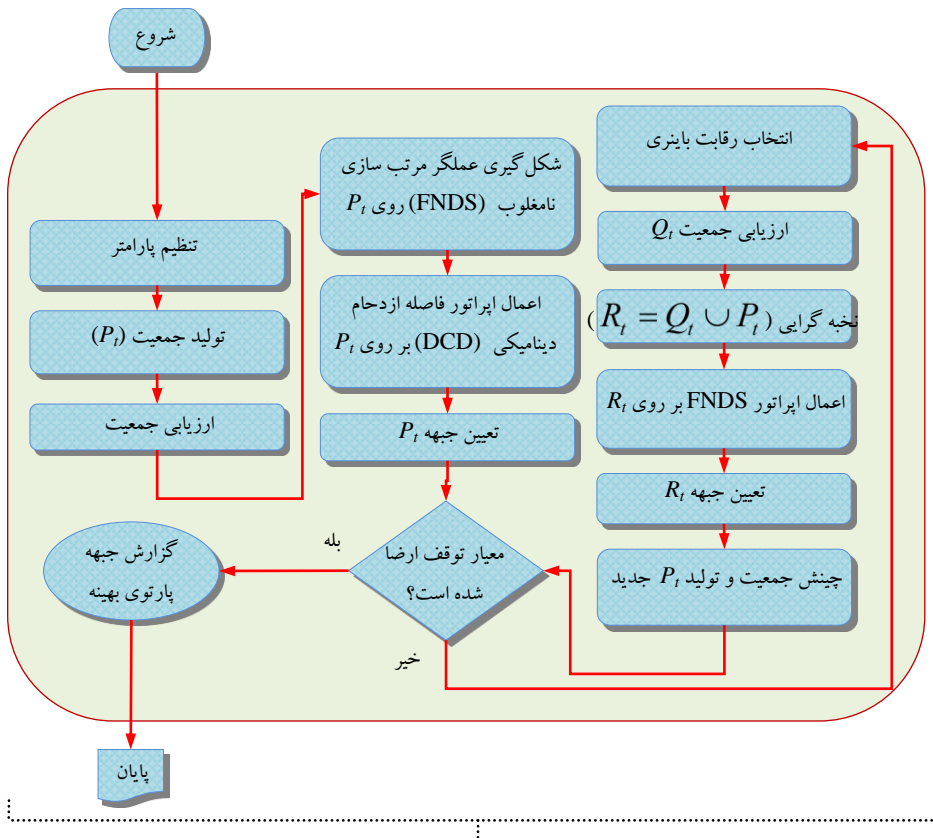
$$DCD_i = \frac{\frac{1}{n_o} \sum_{k=1}^{n_o} |J_{i+1}^k - J_{i-1}^k|}{\log\left(\frac{1}{Var_i}\right)} \quad (30)$$

Var_i به صورت زیر داده می‌شود:

$$Var_i = \frac{1}{n_o} \sum_{k=1}^{n_o} \left(|J_{i+1}^k - J_{i-1}^k| - CD_i \right)^2 \quad (31)$$

$$CD_i = \frac{1}{n_o} \sum_{k=1}^{n_o} |J_{i+1}^k - J_{i-1}^k| \quad (32)$$

که در آن Var_i واریانس CD فرد همسایه با فرد i ام است. n_o تعداد اهداف مورد نظر، J_{i+1}^k هدف k ام از فرد $(i+1)$ ام و J_{i-1}^k هدف k ام از فرد $(i-1)$ ام است.



تولید مجموعه جواب‌های پارتو توسط INSGA-II

نمودار ۳. فلوجارت روش INSGA-II

۵-۲. ابزار تصمیم‌گیری

هنگامی که پاسخ‌ها بر مبنای مجموعه بهینه‌سازی پارتو توسط الگوریتم INSGA-II تخمین زده شد، باید یکی از آنها برای اجرا و پیاده‌سازی انتخاب شود. از دیدگاه تصمیم‌گیرنده، انتخاب یک پاسخ از بین پاسخ‌های بهینه‌سازی پارتو روش استقرایی نامیده می‌شود و نیاز به روش تصمیم‌گیری سطح بالایی دارد. مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه یا MADM در ارزیابی چنین مسائلی به کار گرفته می‌شوند. هدف اصلی در این مدل‌ها، انتخاب و رتبه‌بندی بین گزینه‌های مشخص و معلوم است؛ بدین معنی که تصمیم‌گیرنده از میان چند گزینه معلوم یکی را انتخاب می‌کند و این مدل‌ها با کمک برآورد ماتریس حل می‌شوند. تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه با مسائلی سروکار دارد که تصمیم‌گیرنده می‌خواهد با توجه به عوامل چندگانه از بین چند گزینه، یکی را انتخاب یا آنها را رتبه‌بندی کند. یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه روش تصمیم‌گیری فازی است.

ایجاد تصمیم‌گیری فازی: مجموعه‌های فازی با معادلاتی به نام توابع عضویت تعریف می‌شوند. این توابع درجه عضویت را در مجموعه‌های فازی با استفاده از مقادیر از ۰ تا ۱ نشان می‌دهند. مقدار صفر نشان‌دهنده ناسازگاری با مجموعه است، در صورتی که مقدار ۱ سازگاری کامل را نتیجه می‌دهد. زمانی که مجموعه بهینه پارتو حاصل می‌شود، باید یک جواب را از میان آرشیو پاسخ‌ها انتخاب کنیم. برای این منظور، توابع عضویت برای نشان دادن مقصود هر تابع هدف معرفی می‌شود.

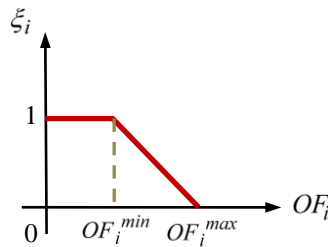
هر تابع عضویت با دانش ذاتی و تجربی از تصمیم‌گیرنده (Abedinia et al., 2013; Christa & Venkatesh, 2011) تعریف شده است. یک تابع عضویت خطی ساده برای هر تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. تابع عضویت برای توابع هدف مینیمم شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\xi_i = \begin{cases} 1 & , \quad OF_i \leq OF_i^{min} \\ \frac{OF_i^{max} - OF_i}{OF_i^{max} - OF_i^{min}} & , \quad OF_i^{min} < OF_i < OF_i^{max} \\ 0 & , \quad OF_i \geq OF_i^{max} \end{cases} \quad (33)$$

و برای توابع هدف ماکزیمم شده:

$$\xi_i = \begin{cases} 0 & , \quad OF_i \leq OF_i^{min} \\ \frac{OF_i - OF_i^{max}}{OF_i^{max} - OF_i^{min}} & , \quad OF_i^{min} < OF_i < OF_i^{max} \\ 1 & , \quad OF_i \geq OF_i^{max} \end{cases} \quad (34)$$

که OF_i^{min} و OF_i^{max} به ترتیب مقادیر ماکزیمم و مینیمم از تابع هدف نام در میان همه جواب‌های ممکن است. تابع عضویت ξ_i^k بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند. شکل (۴) نمایی کلی از تابع عضویت استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تابع عضویت خطی

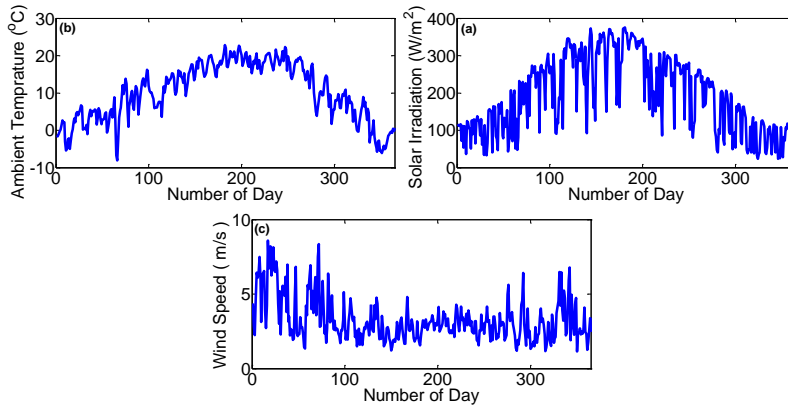
برای هر جواب k ، تابع عضویت نرمالیز شده ξ_i^k به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ob}} \xi_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{ob}} \xi_i^k} \quad (35)$$

که M و N_{ob} به ترتیب تعداد جواب‌ها و توابع هدف هستند.

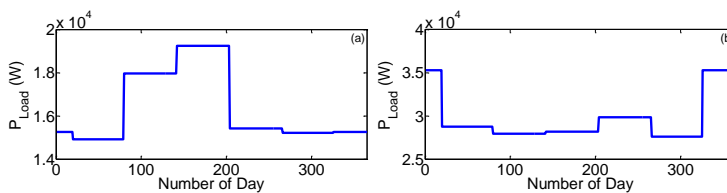
۶. اجرا

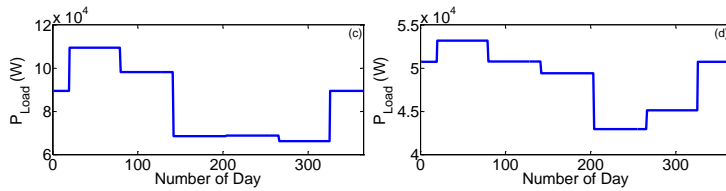
روش ارائه شده در بخش‌های قبلی برای طراحی بهینه سیستم تولید ترکیبی فتوولتائیک - بادی اعمال شده است تا برای تغذیه چهار ساختمان اداری در منطقه اردبیل در ایران استفاده شود. مشخصات جغرافیایی تعریف شده عبارت است از: عرض جغرافیایی $38/24$ و طول جغرافیایی $48/29$. مجموعاً ۱۲ ماه از اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و دمای محیط ثبت شده برای هر روز از سال ۲۰۱۳ استفاده شده است که در شکل (۵) ترسیم شده است (<http://www.soda-pro.com>). سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری که ارتفاع مرجع برای مکان مورد نظر در نظر گرفته شده بود، استخراج شده است. توزیع روزانه تقاضای توان مصرف‌کنندگان طی سال ۲۰۱۳ برای چهار ساختمان اداری در شکل ۶ نشان داده شده است. مشخصات و هزینه‌های مربوط به هر تجهیز در جدول (۲) فهرست شده است.



نمودار ۵. (a) مقادیر متوسط روزانه از تابش خورشید طی یک سال؛ (b) مقادیر متوسط روزانه دمای محیط طی یک سال؛

(c) مقادیر متوسط روزانه سرعت باد طی یک سال





نمودار ۶: توان مورد تقاضای روزانه در یک سال: (a) ساختمان A، (b) ساختمان B، (c) ساختمان C و (d) ساختمان D

جدول ۲. پارامترهای طراحی

مشخصه پنل‌های فتوولتائیک	مقدار	واحد
V_{OC} , I_{SC} , V_{max} , I_{max} , NCOT	۳۷.۸/۶.۳۰.۷/۸۴.۴۷/۵	V, A, V, A, °C
هزینه سرمایه‌گذاری، طول عمر	۲۵.۴۳۹/۷	yr, \$/unit
هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه جای‌گذاری	۳۹۵/۷۳.۴/۳۹۷	\$/unit, \$/unit-yr
مشخصه باتریها	مقدار	واحد
بازده، DOD، ولتاژ، ظرفیت نامی	۲۰۰.۱۲.۶۰.۸۵	Ah, V, %, %
هزینه جای‌گذاری، هزینه سرمایه‌گذاری، طول عمر	۵.۲۴۵/۱.۲۲۰/۶.۲/۴۵۱	yr, \$/unit, \$/unit
هزینه تعمیر و نگهداری	۴/۳۹۷	\$/unit-yr
مشخصه توربین بادی	مقدار	واحد
طول عمر، v_f ، v_{ci} ، v_{CO} ، نرخ توان	۳.۱۰.۳.۲۵.۲۵	kW, m/s, m/s, m/s, yr
هزینه جای‌گذاری، هزینه سرمایه‌گذاری	۴۰۳۹/۸.۳۶۳۵/۸	\$/unit, \$/unit
هزینه تعمیر و نگهداری	۴۰/۳۹۸	\$/unit-yr
مشخصه شارژ کنترل	مقدار	واحد
هزینه سرمایه‌گذاری، طول عمر، ظرفیت نامی	۶۰.۱۵.۵۵۸/۳	A, yr, \$/unit
هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه جای‌گذاری	۵۰۲/۵۴.۵/۵۸۳	\$/unit, \$/unit-yr
مشخصه اینورتر	مقدار	واحد
جریان خروجی ماکزیمم، توان خروجی نامی	۱۲۰۰۰.۱۹	W, A
بازده، نرخ فرکانس شبکه AC	۶۰ یا ۵۰.۹۵	Hz, %
هزینه جای‌گذاری، هزینه سرمایه‌گذاری، طول عمر	۲۵.۱۹۳۵/۴.۱۷۴/۱۹	yr, \$/unit, \$/unit
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۹/۳۵۴	\$/unit-yr

مأخذ: نتایج تحقیق

برای نشان دادن تأثیر روش طراحی ارائه شده، دو چارچوب در نظر گرفته می‌شود:

چارچوب اول: طراحی سیستم ترکیبی با دو تابع هدف

در این چارچوب، طراحی سیستم با در نظر گرفتن دو تابع هدف هزینه سیستم و سود زیست‌محیطی صورت می‌گیرد.

چارچوب دوم: طراحی سیستم ترکیبی با سه تابع هدف

در این چارچوب، روشی دارای چند معیار برای مدیریت مسئله طراحی سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن سه تابع هدف هزینه سیستم، سود زیست‌محیطی و شاخص قابلیت اطمینان اجرا می‌شود. تابع هدف سوم احتمال عدم تأمین بار LPSP در این چارچوب به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$F_3 = LPSP = \frac{\sum_{i=1}^{365} M[LOE(i)]}{n_c \sum_{i=1}^{365} P_{load}(i)} \quad (36)$$

در حالی که $P_{load}(i)$ دیمانند بار در روز i ام و n_c تعداد همه حالت‌های ممکن است. $M[LOE(i)]$ مقدار مورد انتظار انرژی از دست داده شده در روز i ام است و به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$M[LOE] = \sum_{c \in C} ALE(c) \cdot p(c) \quad (37)$$

در حالی که $ALE(c)$ مقدار انرژی تأمین نشده است هنگامی که سیستم با حالت c روبه‌رو می‌شود، و $p(c)$ احتمال روبه‌رو شدن با حالت c است. در مقایسه با آرایه‌های PV و توربین بادی، اجزای دیگر سیستم تولید ترکیبی، قسمت متحرک ندارند و عموماً زیر یک سقف و به دور از محیط بیرون نگهداری می‌شوند. بنابراین، همه اجزای سیستم ترکیبی به جز آرایه‌های خورشیدی و توربین بادی احتمال خروج کمتری دارند و می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. احتمال روبه‌رو شدن با هر پیشامد را می‌توان به وسیله تابع توزیع دو جمله‌ای زیر بیان کرد:

$$p = \left[\binom{N_{WT}}{n_{WT}^{fail}} \times (p_{WT})^{(N_{WT}-n_{WT}^{fail})} \times (1-p_{WT})^{(n_{WT}^{fail})} \right] \times \left[\binom{N_{PV}}{n_{PV}^{fail}} \times (p_{PV})^{(N_{PV}-n_{PV}^{fail})} \times (1-p_{PV})^{(n_{PV}^{fail})} \right] \quad (38)$$

در حالی که n_{WT}^{fail} و n_{PV}^{fail} به ترتیب تعداد خطاهای آرایه‌های خورشیدی و توربین بادی است. p_{WT} و p_{PV} احتمال در دسترس بودن توربین بادی و آرایه خورشیدی است. این اجزا با احتمال ۹۶ درصد در دسترس‌اند. بنابراین، در این چارچوب، می‌توان مسئله را به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\text{Min } F(x, u, p) = \text{Min} \{ F_1, F_2, F_3 \} \quad (39)$$

۶-۱. نتایج اندازه‌یابی سیستم ترکیبی

تکنیک بهینه‌سازی INSGA-II برای بهینه‌سازی هم‌زمان دو تابع هدف سودهای اقتصادی و محیطی ناشی از کاربرد سیستم ترکیبی فتوولتائیک - بادی اعمال شده است. مجموعه جواب‌های پارتو به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا مقادیر مناسبی انتخاب کند. نتایج اندازه‌یابی سیستم ترکیبی مطابق با توابع هدف از سودهای مالی و محیطی در موارد مختلف در جدول (۳) داده آمده است. یک تکنیک تصمیم‌گیری بر مبنای تئوری FDM برای یافتن بهترین راه حل از مجموعه جواب‌های پارتو به دست آمده، با استفاده از روش INSGA-II اعمال شده است. نتایج کامل روش FDM برای دو چارچوب مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است. طبق جدول (۴)، با در نظر گرفتن شاخص قابلیت اطمینان در چارچوب دوم، به دلیل عملکرد قابل اطمینان سیستم، هزینه سیستم و هزینه زیست‌محیطی افزایش یافته است.

جدول ۳. مقدار تابع هدف به‌دست آمده در آرشیو پارتو در موارد مختلف

	$C_1^A : \min f_1$	C_2^A	C_3^A	C_4^A	C_5^A	C_6^A	$C_7^A : \min f_7$
اداره	$f_1=41935/48$	$f_1=48387/0.9$	$f_1=45161/29$	$f_1=54838/70$	$f_1=58064/51$	$f_1=51612/90$	$f_1=161290/32$
A	$f_1=2/1 \times 10^9$	$f_1=1/6 \times 10^9$	$f_1=1/7 \times 10^9$	$f_1=1/5 \times 10^9$	$f_1=1/5 \times 10^9$	$f_1=1/6 \times 10^9$	$f_1=1/1 \times 10^9$
	$C_1^B : \min f_1$	C_2^B	C_3^B	C_4^B	C_5^B	C_6^B	$C_7^B : \min f_7$
اداره	$f_1=83870/96$	$f_1=122580/6$	$f_1=103225/8$	$f_1=93548/38$	$f_1=100000$	$f_1=132258$	$f_1=60322/58$
B	$f_1=6/3 \times 10^9$	$f_1=4/7 \times 10^9$	$f_1=5/7 \times 10^9$	$f_1=5/8 \times 10^9$	$f_1=6/2 \times 10^9$	$f_1=5/5 \times 10^9$	$f_1=3/6 \times 10^9$
	$C_1^C : \min f_1$	C_2^C	C_3^C	C_4^C	C_5^C	C_6^C	$C_7^C : \min f_7$
اداره	$f_1=212903/2$	$f_1=216129$	$f_1=258064/5$	$f_1=216129$	$f_1=219354/8$	$f_1=222580/6$	$f_1=632258/06$
C	$f_1=15/1 \times 10^9$	$f_1=11/8 \times 10^9$	$f_1=10/4 \times 10^9$	$f_1=14/8 \times 10^9$	$f_1=11/9 \times 10^9$	$f_1=14/5 \times 10^9$	$f_1=5/9 \times 10^9$
	$C_1^D : \min f_1$	C_2^D	C_3^D	C_4^D	C_5^D	C_6^D	$C_7^D : \min f_7$
اداره	$f_1=151612/90$	$f_1=158064/51$	$f_1=154838/7$	$f_1=161290/32$	$f_1=158064/51$	$f_1=167741/93$	$f_1=232258/06$
D	$f_1=12 \times 10^9$	$f_1=6/1 \times 10^9$	$f_1=11/8 \times 10^9$	$f_1=12/5 \times 10^9$	$f_1=12/8 \times 10^9$	$f_1=12/1 \times 10^9$	$f_1=4/9 \times 10^9$

مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۴. مقدار توابع هدف با اعمال FDM تحت روش‌های مختلف طراحی

	تابع هدف	اداره A	اداره B	اداره C	اداره D
چارچوب اول	f_1	41935/48	83870/96	212903/22	151612/93
	f_7	$1/8 \times 10^9$	$6/3 \times 10^9$	$15/1 \times 10^9$	$12/00 \times 10^9$
چارچوب دوم	f_1	48387/46	90253/114	234500/31	173140/16
	f_7	$2/1 \times 10^9$	$6/52 \times 10^9$	$16/45 \times 10^9$	$13/50 \times 10^9$
	f_7	0.061951	0.050093	0.056217	0.042222

مأخذ: نتایج تحقیق

نتایج اندازه بهینه از سیستم ترکیبی در موارد مختلف، C_1 تا C_7 ، و برای دو چارچوب مختلف در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است که انواع مختلف تجهیزات و تعدادشان فهرست شده است.

جدول ۵. ساختار بهینه از سیستم بادی - فتوولتائیک در موارد مختلف

		C_1^A	C_2^A	C_3^A	C_4^A	C_5^A	C_6^A	C_7^A
اداره A	تعداد پنل‌ها	۳۵	۲۲	۲۶	۲۳	۲۱	۲۲	۱۴
	تعداد باتری‌ها	۲۱	۳۰	۲۷	۳۹	۴۱	۳۴	۱۴۴
	تعداد توربین‌های بادی	۸	۸	۸	۷	۷	۸	۶
	تعداد شارژ کنترلرها	۱۳	۱۱	۱۱	۱۰	۱۰	۱۱	۸
	تعداد اینورترها	۶	۴	۵	۴	۳	۴	۳
		C_1^B	C_2^B	C_3^B	C_4^B	C_5^B	C_6^B	C_7^B
اداره B	تعداد پنل‌ها	۱۴۹	۱۲۷	۱۴۰	۱۵۳	۱۴۹	۱۱۵	۷۴
	تعداد باتری‌ها	۲۱	۷۴	۴۵	۳۸	۳۷	۷۶	۵۴۸
	تعداد توربین‌های بادی	۱۰	۳	۸	۵	۱۰	۱۳	۱۰
	تعداد شارژ کنترلرها	۳۶	۲۶	۳۲	۳۳	۳۶	۳۲	۲۲
	تعداد اینورترها	۱۵	۱۱	۱۳	۱۳	۱۵	۱۳	۹
		C_1^C	C_2^C	C_3^C	C_4^C	C_5^C	C_6^C	C_7^C
اداره C	تعداد پنل‌ها	۳۰۷	۲۵۹	۲۵۱	۳۲۶	۲۵۹	۲۹۳	۸۳
	تعداد باتری‌ها	۵۸	۹۴	۱۴۹	۶۶	۹۴	۷۲	۵۵۴
	تعداد توربین‌های بادی	۳۹	۲۶	۱۶	۳۱	۲۶	۳۸	۲۶
	تعداد شارژ کنترلرها	۸۷	۶۸	۵۹	۸۴	۶۸	۸۳	۳۵
	تعداد اینورترها	۳۵	۲۸	۲۴	۳۴	۲۸	۳۴	۱۲
		C_1^D	C_2^D	C_3^D	C_4^D	C_5^D	C_6^D	C_7^D
اداره D	تعداد پنل‌ها	۱۰۳	۸۲	۱۱۰	۲۴	۱۵۱	۱۵۳	۱۱۴
	تعداد باتری‌ها	۱۸	۸۹	۲۲	۱۵	۲۱	۲۹	۱۷۸
	تعداد توربین‌های بادی	۸۰	۲۸	۶۸	۹۷	۶۴	۶۳	۹
	تعداد شارژ کنترلرها	۷۲	۳۷	۷۲	۷۷	۷۶	۷۶	۲۸
	تعداد اینورترها	۲۹	۱۵	۲۹	۳۱	۳۱	۳۱	۱۱

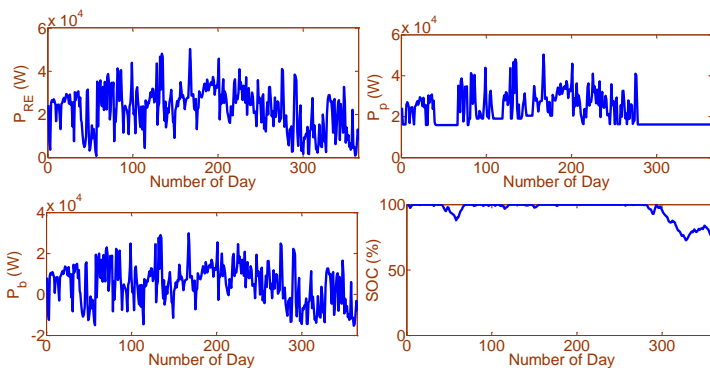
مأخذ: نتایج تحقیق

جدول ۶ ساختار بهینه سیستم بادی - فتوولتائیک با اعمال تکنیک FDM برای دو چارچوب مختلف

تجهیز	اداره A	اداره B	اداره C	اداره D
تعداد پنل ها	۲۷	۱۴۹	۳۰۷	۱۰۳
تعداد باتری ها	۲۳	۲۱	۵۸	۱۸
تعداد توربین های بادی	۸	۱۰	۳۹	۷۰
تعداد شارژ کنترلرها	۱۱	۳۶	۸۷	۷۲
تعداد اینورترها	۵	۱۵	۳۵	۲۹
تعداد پنل ها	۳۰	۱۶۰	۳۳۵	۱۴۲
تعداد باتری ها	۲۵	۲۵	۶۵	۲۴
تعداد توربین های بادی	۹	۹	۴۲	۷۲
تعداد شارژ کنترلرها	۱۳	۳۷	۹۴	۸۰
تعداد اینورترها	۵	۱۵	۳۸	۳۳

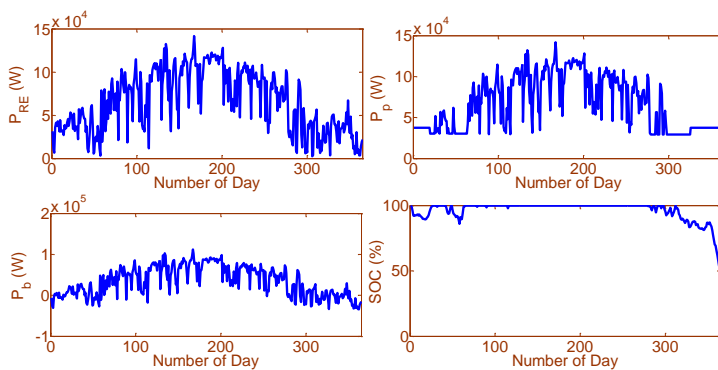
مأخذ: نتایج تحقیق

شبه سازی ها طی یک دوره یکساله برای مورد C_1 اجرا شده اند. توان تولیدی منابع تجدیدپذیر P_{RE} ، توان تولید شده توسط سیستم ترکیبی P_p ، ورودی/خروجی سیستم بانک باتری P_b ، و تغییرات SOC برای ساختمان های A، B، C و D در شکل های (۷) تا (۱۰) گزارش شده اند. مطابق این شکل ها، می توان گفت که توان تولید شده توسط سیستم ترکیبی به طور کامل بارهای در نظر گرفته شده را تحت پوشش قرار می دهد. زمانی که توان منابع تجدیدپذیر بزرگ تر از توان مورد تقاضا باشد، توان اضافی در بانک باتری ذخیره می شود؛ و هنگامی که توان منابع تجدیدپذیر کوچک تر از توان مورد تقاضا باشد، بانک باتری توان کمبود را تغذیه می کند. هنگامی که توان تولید شده منابع تجدیدشده بزرگ تر از توان مورد تقاضا باشد، و بانک باتری به طور کامل شارژ شده باشد، می توان انرژی اضافی را برای پمپ آب یا عملیات دیگر استفاده کرد. از منحنی SOC می توان مشاهده کرد که زمان شارژ بانک باتری هرگز نمی تواند از مقدار ماکزیمم مجاز SOC_{max} و مینیمم مقدار SOC_{min} مجاز تجاوز کند.



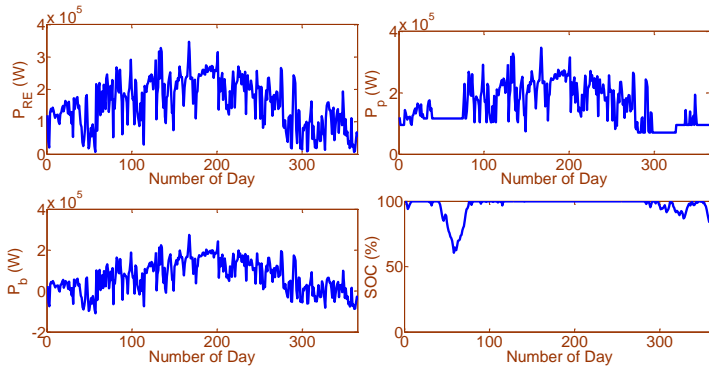
شکل ۷. منحنی توان تولید شده منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی P_{RE} ، توان تولید شده سیستم ترکیبی P_p ، ورودی /

خروجی سیستم بانک باتری P_b و تغییرات SOC برای ساختمان A

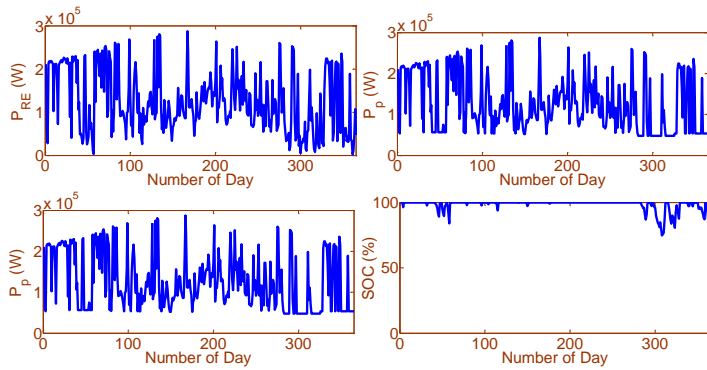


نمودار ۸. منحنی توان تولید شده منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی P_{RE} ، توان تولید شده سیستم ترکیبی P_p ، ورودی /

خروجی سیستم بانک باتری P_b و تغییرات SOC برای ساختمان B



نمودار ۹. منحنی توان تولید شده منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی P_{RE} ، توان تولید شده سیستم ترکیبی P_p ، ورودی P_b خروجی سیستم بانک باتری P_b و تغییرات SOC برای ساختمان C



نمودار ۱۰. منحنی توان تولید شده منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی P_{RE} ، توان تولید شده سیستم ترکیبی P_p ، ورودی P_b خروجی سیستم بانک باتری P_b و تغییرات SOC برای ساختمان D

۶-۲. استراتژی عملکرد سیستم پیشنهادی در حالت اتصال به شبکه

در این حالت، فرض می‌شود که سیستم ترکیبی مورد نظر به شبکه برق سراسری متصل است. سیستم به علت اتصال به شبکه فاقد باتری و ذخیره‌ساز انرژی است و در حالت کمبود توان، توان مورد نیاز را از شبکه تأمین می‌کند که بابت این توان هزینه‌ای را به شبکه پرداخت خواهد کرد. در حالت اضافه توان، مازاد توان تولید شده به شبکه فروخته می‌شود که در نتیجه آن سودی از توان فروخته شده کسب خواهد کرد. هدف مورد نظر در این حالت عبارت است از مینیمم‌سازی تابع هدف متشکل از مجموع هزینه‌های سالیانه تجهیزات، هزینه خرید انرژی از شبکه، هزینه فروش انرژی و هزینه زیست‌محیطی. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالت اتصال به شبکه، به دلیل حذف بانک باتری و تبادل انرژی با شبکه، کاهش هزینه‌های سیستم را خواهیم داشت.

جدول ۷. مقدار توابع هدف با استفاده از اعمال روش FDM طی دو حالت اتصال و انفصال از شبکه

حالت	چارچوب	تابع	اداره A	اداره B	اداره C	اداره D
حالت متصل به شبکه	چارچوب ۱	f_1	۴۱۹۳۵/۴۸	۸۳۸۷۰/۹۶	۲۱۲۹۰۳/۲۲	۱۵۱۶۱۲/۹۳
		f_2	$۱/۸ \times 10^9$	$۶/۳ \times 10^9$	$۱۵/۱۰ \times 10^9$	$۱۲/۸ \times 10^9$
حالت متصل به شبکه	چارچوب ۲	f_1	۴۸۳۸۶/۴۶	۹۰۲۵۳/۱۱۴	۲۳۴۵۰۰/۳۱	۱۷۳۱۴۰/۱۶
		f_2	$۲/۱۰ \times 10^9$	$۶/۵۲ \times 10^9$	$۱۶/۴۵ \times 10^9$	$۱۳/۵۰ \times 10^9$
حالت متصل به شبکه	چارچوب ۱	f_1	۳۵۶۴۴/۷۶	۷۴۶۹۰/۳۸	۱۵۵۴۰۱/۹۳	۱۳۱۴۱۹/۰۱
		f_2	$۱/۷ \times 10^9$	$۵/۵۰ \times 10^9$	$۱۴/۲۰ \times 10^9$	$۱۱/۱۶ \times 10^9$
حالت متصل به شبکه	چارچوب ۲	f_1	۴۱۵۰۲/۳۵	۸۵۴۳۲/۲۳	۱۸۷۴۳۸/۵۲	۱۶۲۵۲۸/۳۵
		f_2	۴۱۵۰۲/۳۵	۸۵۴۳۲/۲۳	۱۸۷۴۳۸/۵۲	۱۶۲۵۸۲/۳۵
حالت متصل به شبکه	چارچوب ۲	f_1	۴۱۵۰۲/۳۵	۸۵۴۳۲/۲۳	۱۸۷۴۳۸/۵۲	۱۶۲۵۸۲/۳۵
		f_2	$۱/۷۶ \times 10^9$	$۶/۲ \times 10^9$	$۱۵/۶۸ \times 10^9$	$۱۲/۸۰ \times 10^9$

مأخذ: نتایج تحقیق

۶-۳. آنالیز اقتصادی

امکان‌پذیری اقتصادی یک پروژه تولید انرژی را باید با استفاده از بعضی تکنیک‌های موجود بررسی کرد. برای ارزیابی کارایی سیستم ترکیبی فتوولتائیک - بادی، باید درباره سودهای اقتصادی و محیطی سیستم ترکیبی طراحی شده تحقیق کرد. این اطلاعات برای طراحی و اجرای مبتنی بر سند ضروری است. هدف اصلی از این بخش فراهم کردن بینش درست از عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک - بادی است برای کاربردهای واقعی در ساختمان‌های اداری مبتنی بر هزینه سیستم، کارایی سیستم و دینامیک خروج انرژی. این کار اطلاعات مفیدی برای تصمیم‌گیرهای سیاسی و سرمایه‌گذاری‌های بالقوه فراهم می‌کند. ارزیابی اقتصادی از سیستم فتوولتائیک - بادی بر مبنای ۳ سناریو تعریف شده است که به صورت زیر مدیریت می‌شود:

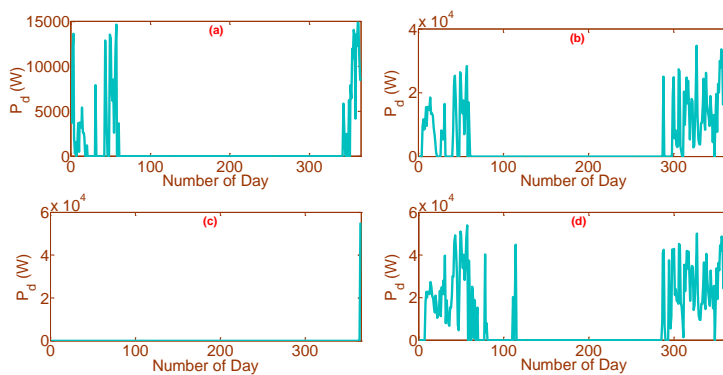
سناریوی ۱) تغذیه بارها با سیستم ترکیبی تجدیدپذیر طراحی شده بدون سیستم دیزل

سناریوی ۲) تغذیه بارها با سیستم ترکیبی تجدیدپذیر طراحی شده با سیستم دیزل

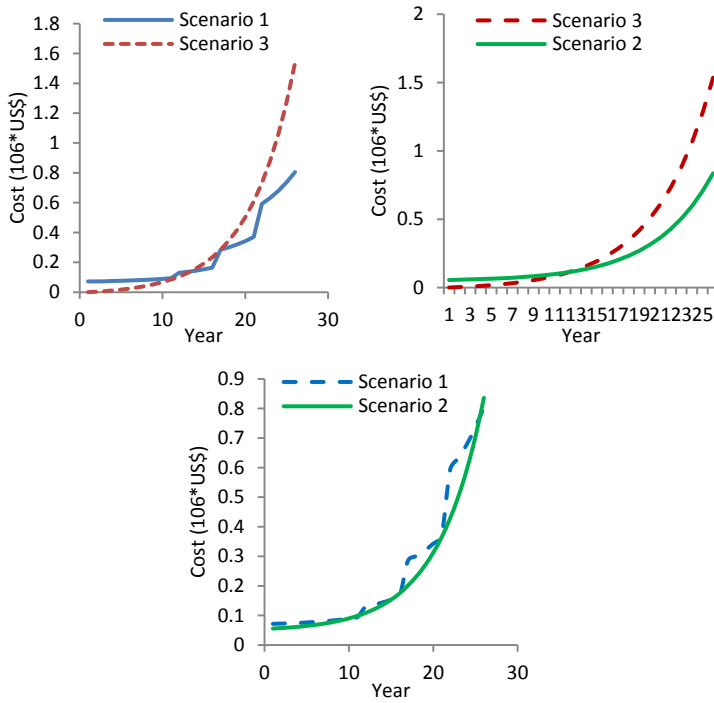
سناریوی ۳) تغذیه بارها با روش سنتی

با در نظر گرفتن هزینه آلودگی، سرمایه‌گذاری، جای‌گذاری، نگهداری و هزینه بهره‌برداری سیستم ترکیبی تجدیدپذیر هر سناریو، هزینه‌های سالیانه یک دوره ۲۵ ساله استخراج شده است. در اینجا، مورد C_1 (مینیمم هزینه برای f_1) برای آنالیز اقتصادی در نظر گرفته شده است. خروجی سیستم دیزل برای چهار ساختمان در شکل (۱۱) نشان داده شده است. هزینه سالانه سیستم تجدیدپذیر برای سه سناریو استخراج شده است. منحنی رشد هزینه‌های سیستم در سه سناریو و مقایسه آنها باهم در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای ساختمان A، نقطه بازگشت هزینه سرمایه‌گذاری به ترتیب در ۱۲ امین و ۱۳ امین سال برای دو سناریوی ۱ و ۲ اتفاق افتاده است. همچنین با مقایسه دو سناریوی ۱ و ۲، هزینه سناریوی ۱ بیش از سناریوی ۲ است. طبق شکل‌های (۱۲) تا (۱۵)، برای ساختمان B، نقاط بازگشت هزینه سرمایه‌گذاری ۲۲ امین و ۱۵ امین سال برای سناریوهای ۱ و ۲، به ترتیب برای ساختمان C، نقطه بازگشت هزینه

سرمایه‌گذاری ۲۰امین و ۱۲امین سال برای سناریوهای ۱ و ۲ و برای ساختمان D، نقطه بازگشت هزینه سرمایه‌گذاری به ترتیب ۲۵امین و ۱۳امین سال برای سناریوهای ۱ و ۲ است.

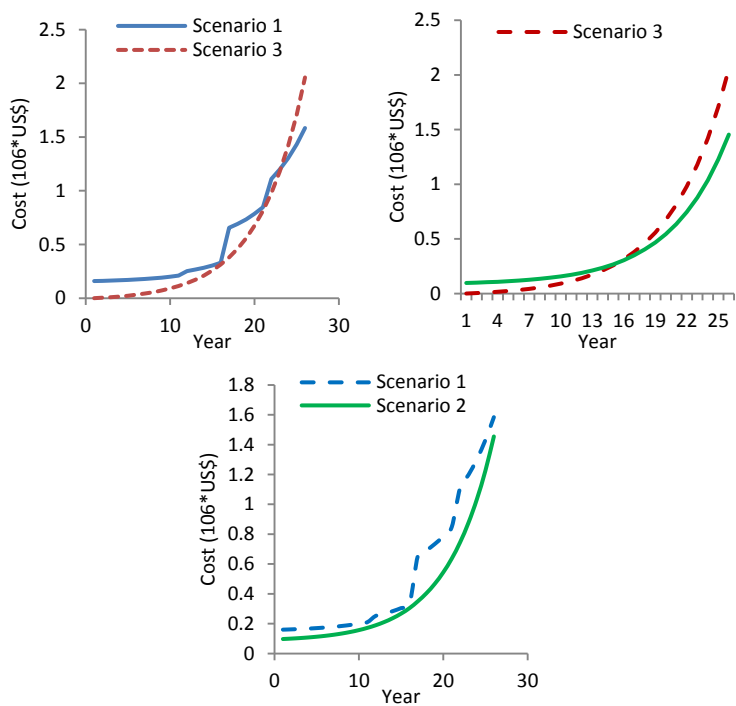


نمودار ۱۱. خروجی سیستم دیزل برای چهار ساختمان: (a) ساختمان A، (b) ساختمان B، (c) ساختمان C و (d) ساختمان D



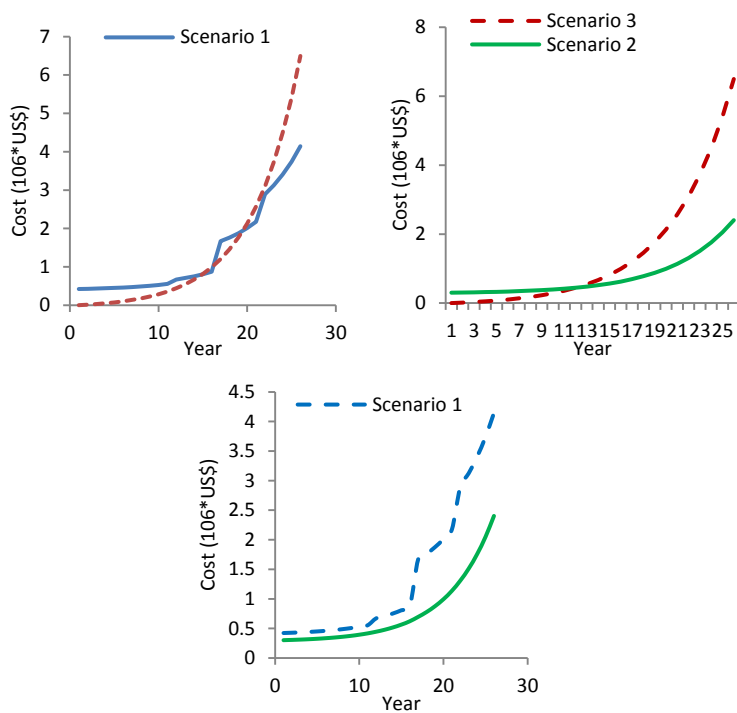
نمودار ۱۲. منحنی رشد هزینه‌های سناریوهای مختلف

و مقایسه آن با هزینه‌های سیستم فتوولتائیک - بادی برای ساختمان A



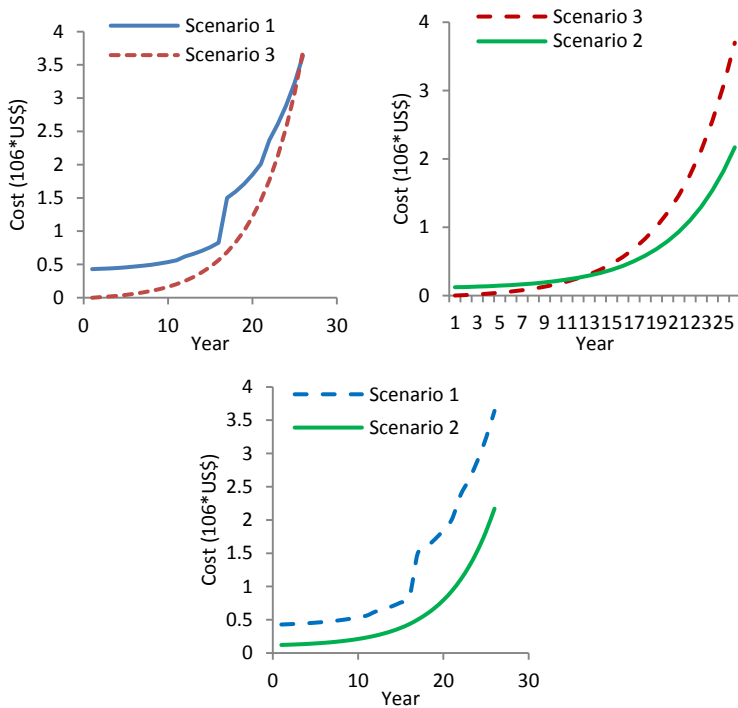
نمودار ۱۳. منحنی رشد هزینه‌های سناریوهای سناریوهای مختلف

و مقایسه آن با هزینه‌های سیستم فتوولتائیک - بادی برای ساختمان B



نمودار ۱۴. منحنی رشد هزینه‌های سناریوهای مختلف

و مقایسه آن با هزینه‌های سیستم فتوولتائیک - بادی برای ساختمان C



نمودار ۱۵. منحنی رشد هزینه‌های سناریوهای مختلف و مقایسه آن با هزینه‌های سیستم فتوولتائیک - بادی برای ساختمان D

۷. نتیجه‌گیری

مدل بهینه‌سازی شده‌ای برای سیستم ترکیبی تجدیدپذیر بر ساختمان‌های اداری نمونه در شهر اردبیل ارائه شده است. هدف اصلی از ترکیب سیستم فتوولتائیک و بادی رسیدن به روشی قابل اطمینان با کمترین هزینه عملکرد و بهره‌برداری است. هدف کلی طرح یافتن پارامترهای طراحی بهینه سیستم ترکیبی بادی - فتوولتائیک است با در نظر گرفتن شاخص‌های محیطی و اقتصادی و قابلیت اطمینان. روش توسعه داده شده مبتنی است بر استفاده از اطلاعات بلندمدت سرعت باد، تابش خورشید و درجه حرارت محیط. بر مبنای دو شاخص اقتصادی و محیطی و قابلیت اطمینان، با تشکیل پروسه

بهینه‌سازی دو منظوره و سه منظوره‌ای تکنیک INSGA-II برای حل مسئله به کار گرفته شد. روش FDM برای یافتن پاسخ بهینه از میان مجموعه پاسخ‌های پارتوی به دست آمده از INSGA-II با در نظر گرفتن تمام معیارهای طراحی استفاده شده است. پروسه بهینه‌سازی تعداد بهینه‌توربین‌های بادی، پنل‌های فتوولتائیک و باتری‌ها را با تضمین هزینه کلی مینیمم و در دسترس بودن انرژی ارائه می‌کند. مجموعه پاسخ به دست آمده از خروجی الگوریتم تکاملی چند هدفه، طراح را قادر می‌سازد که دید وسیع‌تری نسبت به انتخاب طرح مناسب داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که ساختار بهینه‌سازی شده منجر به بازده بالا می‌شود. به کارگیری سیستم ارائه شده تقاضای انرژی الکتریکی مورد نظر را تأمین خواهد کرد؛ در حالی که با کمترین هزینه، آلودگی‌های زیست‌محیطی را کاهش خواهد داد.

Nomenclature

PV	Photovoltaic	$T_{c,ref}$	دمای پنل فتوولتائیک در شرایط عملکرد مرجع برابر با ۲۵ درجه سلسیوس
INSGA-II	Improved non-dominated sorting genetic algorithm-II	V_{mpp}	ولتاژ پنل در نقطه توان ماکزیمم (V)
FDM	Fuzzy decision making	$\sigma_{V,OC}$	ضریب دمایی برای ولتاژ مدار باز ($V/^{\circ}C$)
GHG	Greenhouse gas	I_{max}	جریان ماکزیمم پنل در شرایط عملکرد مرجع (A)
RET	Renewable energy target	T_a	دمای محیط سایت در نظر گرفته شده ($^{\circ}C$)
SB	Storage battery	$NOCT$	دمای عملکرد نرمال سلول فتوولتائیک ($^{\circ}C$)
GA	Genetic algorithm	P_{mpp}	توان پنل فتوولتائیک در نقطه توان ماکزیمم (W)
PSO	Particle swarm optimization	N_{PV}	تعداد کل پنل فتوولتائیک
LPSP	Loss of power supply probability	N_{PV}^s	تعداد پنل های سری
SBX	Binary crossover	N_{PV}^p	تعداد پنل موازی
PM	Polynomial mutation	V_{bus}	ولتاژ باس DC (V)
DCD	Dynamic crowding distance	V_{PV}^{nom}	ولتاژ نامی پنل (V)
DM	Decision maker	P_{WTG}	توان خروجی توربین بادی (W)
I_{mpp}	جریان پنل در ماکزیمم نقطه انتقال توان ماکزیمم (A)	P_R	توان نامی توربین بادی (W)
I_{SC}	جریان اتصال کوتاه پنل (A)	v	سرعت باد در ارتفاع مورد نظر h (m/s)
G_T	تابش روزانه نور خورشید (W/m^2)	v_r	سرعت باد نامی توربین بادی (m/s)
G_{ref}	مقدار تابش مرجع برابر با $1000 W/m^2$	v_{ci}	سرعت قطع داخلی توربین بادی (m/s)
V_{max}	ولتاژ ماکزیمم پنل (V)	v_{co}	سرعت قطع بیرونی توربین بادی (m/s)
V_{OC}	ولتاژ مدار باز پنل (V)	H_b	ارتفاع برج
$\sigma_{I,SC}$	ضریب دمایی برای جریان اتصال کوتاه ($A/^{\circ}C$)	H_r	ارتفاع مرجع
T_c	دمای عملکرد پنل (C)	κ	نمای توان (در حدود ۱/۷ برای زمین باز)
η_{bat}	بازده باتریها	v_{Hr}	سرعت باد در ارتفاع مرجع H_r (m/s)
P_B	توان ورودی-خروجی بانک باتری (W)	SOC	حالت شارژ بانک باتری (Ah)
Δt	پله زمانی ساعتی	SOC_{max}	ماکزیمم حالت شارژ بانک باتری (Ah)
$C_n(Ah)$	ظرفیت نامی بانک باتری (Ah)	SOC_{min}	مینیمم حالت شارژ بانک باتری (Ah)
DOD	عمق دشارژ بانک باتری (Ah)	P_{load}	توان بار (W)

P_{RE}	توان کل تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر (پنل های فتوولتائیک و توربین های بادی) (W)	η_i	بازده آمین اینورتر
P_L	توان ورودی اینورتر DC/AC (W)	AP_i	هزینه سالیانه
E_{conv}	CO ₂ تولید شده توسط سیستم تولید انرژی متداول	N_i	تعداد نام وسیله
E_{RES}	CO ₂ تولید شده توسط سیستم تولید ترکیبی بادی-فتوولتائیک	CC	هزینه سرمایه گذاری (US\$/unit)
E_{inst}	CO ₂ تولید شده در طی فرآیند تولید و نصب ساختار سیستم بادی-فتوولتائیک	RC	هزینه هر جایگذاری (US\$/unit)
E_{tot}	انرژی سالانه کل تولید شده توسط مدول های PV و توربین های بادی	$O \& MC$	هزینه نگهداری و عملکرد سالانه (US\$/unit-yr)
f_{conv}	فاکتور نشان دهنده CO ₂ تولید شده توسط سیستم‌های منابع انرژی متداول در واحد انرژی	CRF	فاکتور بازگشت سرمایه
f_{RES}	فاکتور نشان دهنده CO ₂ تولید شده توسط سیستم تجدیدپذیر در واحد انرژی	k	ارزش پرداخت منفرد
f_{pro}	فاکتور نشان دهنده CO ₂ تولید شده در طی فرآیند تولید و نصب سیستم انرژی تجدیدپذیر	ir	نرخ بهره واقعی
y	تعداد جایگزاری‌های اجرا	L	طول عمر مفید
η_c	شاخص تقاطع	R	طول عمر پروژه
η_m	شاخص جهش چند جمله ای	$ir_{nominal}$	نرخ بهره نامی
Var_i	واریانس CD ها	f_r	نرخ تورم سالانه

منابع

- Nikhil P. and Subhakar D. (2013), "Sizing and Parametric Analysis of a Stand-alone Photovoltaic Power Plant", *IEEE J. Photovolt*, Vol. 3, No. 2, pp. 776-784.
- Wang L. and Singh C. (2009), "Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm", *IEEE Trans. Energy Convers*, Vol. 24, No. 1, PP. 163-172.
- Bekele G. & Palm B. (2009), "Wind Energy Potential Assessment at Four Typical Locations in Ethiopia", *Appl Energ*, Vol. 86, No. 3, pp. 388-396.
- Luna-Rubio R., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez D., and Ríos-Moreno G. (2012), "Optimal Sizing of Renewable Hybrids Energy Systems: A review of Methodologies", *Sol Energy*, Vol. 86, No. 4, pp. 1077-1088.
- Diaf S., Notton G., Belhamel M., Haddadi M. & Louche A. (2008), "Design and Techno-economical Optimization for Hybrid PV/wind System Under Various Meteorological Conditions", *Appl Energ*, Vol. 85, No. 10, pp. 968-987.
- Koutroulis E., Kolokotsa D., Potirakis A., & Kalaitzakis K. (2006), "Methodology for Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic/wind-generator Systems Using Genetic Algorithms", *Sol Energy*, Vol. 80, No. 9, PP. 1072-1088.
- Yang H., Zhou W., Lu L., & Fang Z. (2008), "Optimal Sizing Method for Stand-alone Hybrid Solar-wind System with LPSP Technology by Using Genetic Algorithm", *Sol Energy*, Vol. 82, No. 4, pp. 354-367.
- Belfkira R., Zhang L. & Barakat G. (2011), "Optimal Sizing Study of Hybrid Wind/PV/diesel Power Generation Unit", *Sol Energy*, Vol. 85, No. 1, PP. 100-110.
- Dufo-Lopez R. & Bernal-Agustín J. L. (2005), "Design and Control Strategies of PV-diesel Systems Using Genetic Algorithms", *Sol Energy*, Vol.79, No.1, pp.33-46.
- Billinton R. & Allan R. N. (1992), *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, Springer.
- Ekren O. and Ekren B. Y. (2010), "Size Optimization of a PV/wind Hybrid Energy Conversion System with Battery Storage Using Simulated Annealing", *Appl Energ*, Vol. 87, No. 2, pp. 592-598.
- Bernal-Agustín J. L., Dufo-López R. & Rivas-Ascaso D. M. (2006), "Design of Isolated Hybrid Systems Minimizing Costs and Pollutant Emissions", *Renew Energ*, Vol. 31, No. 14, pp. 2227-2244.
- Alsayed M., Cacciato M., Scarcella G. & Scelba G. (2014), "Design of Hybrid Power Generation Systems Based on Multi Criteria Decision Analysis", *Sol Energy*, Vol. 105, No.7, pp. 548-560.
- Kornelakis A. and Koutroulis E. (2009), "Methodology for the Design Optimisation and the Economic Analysis of Grid-connected Photovoltaic Systems", *IET Renew Power Gen*, Vol. 3, No.4, pp. 476-492.

- Chauhan A. & Saini R. (2014), "A Review on Integrated Renewable Energy System Based Power Generation for Stand-alone Applications: Configurations, Storage Options, Sizing Methodologies and Control", *Renew Sust Energ Rev*, Vol. 38, No.10, PP. 99-120.
- Bortolini M., Gamberi M. & Graziani A. (2014), "Technical and Economic Design of Photovoltaic and Battery Energy Storage System", *Energ Convers Manage*, Vol.86, No.10, pp. 81-92.
- Maleki A. & Askarzadeh A. (2014), "Optimal Sizing of a PV/wind/diesel System with Battery Storage for Electrification to an Off-grid Remote Region: A Case Study of Rafsanjan, Iran", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol.7, No.9, pp. 147-153.
- Maheri A. (2014), "Multi-objective Design Optimisation of Standalone Hybrid Wind-PV-diesel Systems Under Uncertainties", *Renew Energ*, Vol.66, No.6, pp.650-661.
- Kashefi Kaviani A., Riahy G. & Kouhsari S. (2009), "Optimal Design of a Reliable Hydrogen-based Stand-alone Wind/PV Generating System, Considering Component Outages", *Renew Energ*, Vol. 34, No. 11, pp. 2380-2390.
- Moshtagh J., Ghasemi S. (2013), "Optimal Distribution System Reconfiguration Using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol.1, No.1, pp. 12-21.
- Ahmadi M. H., Mohammadi A. H., Dehghani S. & Barranco-Jiménez M. A. (2013), "Multi-objective Thermodynamic-based Optimization of Output Power of Solar Dish-stirling Engine by Implementing an Evolutionary Algorithm", *Energ Convers Manage*, Vol.75, No.11, pp. 438-445.
- Abedinia O., Amjady N., Ghasemi A., Shayeghi H. (2013), "Multi-Stage Fuzzy Load Frequency Control based on Multi-objective Harmony Search Algorithm in Deregulated Environment", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol.1, No.1, pp. 63-73.
- Christa S. & Venkatesh P. (2011), "Multi-objective Optimization Problem for the Thyristor Controlled Series Compensators Placement with Multiple Decision-making Approaches", *Eur T Electr Power*, Vol. 23, No. 2, PP. 249-269.
- <http://www.soda-pro.com>