دیدگاهی جدید در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی: ارزیابی معیارهای تطابق تولید و مصرف توان همراه با بررسی قابلیت اطمینان سیستم

محمد علی یزدان پناه جهرمی[1] سید مسعود برکاتی[2]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه گیلان- گیلان- ایران
M.yazdanpanah.j@gmail.com
۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان - زاهدان- ایران
Smbaraka@ece.usb.ac.ir

چکیده: انرژی در دنیای امروز یکی از حیاتی‌ترین الزامات توسعه جوامع محسوب می‌شود. در دهه اخیر توجه کشورها به منابع تجدیدپذیر انرژی افزایش یافته است. علی‌رغم مزیت‌های آشکار، وابستگی به تغییرات آب‌وهوایی، یکی از اساسی‌ترین مشکلات پیش روی توسعه این منابع می‌باشد. کنترل و طراحی بهینه این سیستم‌ها از موضوعات مهم در سیستم‌های قدرت است. در این مقاله، روشی جدید برای تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود در سیستم ترکیبی توربین باد و سلول‌های فتوولتائیک، با هدف حداکثر کردن نرخ تطابق بازه‌های تولید و مصرف توان در حداقل هزینه اقتصادی، ارائه شده است. این مهم با در نظر گرفتن سه هدف ضریب غیر یکنواختی (IC)، ضریب همبستگی (CC) و هزینه سالیانه سیستم (ACS) انجام گرفته است. همچنین قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از روش احتمال هدر رفت توان (LPSP) بررسی شده است. از داده‌های آب‌وهوایی و تقاضای بار برای روستایی در جنوب شرقی ایران، به عنوان یک مطالعه موردی استفاده شده است. الگوریتم کنترلی طراحی شده، راه‌اندازی ژنراتور دیزل و یا استفاده از باتری را در زمان‌های کمبود توان کنترل می‌کند. اینچنین مطالعاتی قبل از راه اندازی عملی پروژه، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم، سبب صرفه‌جویی اقتصادی نیز می‌شود.

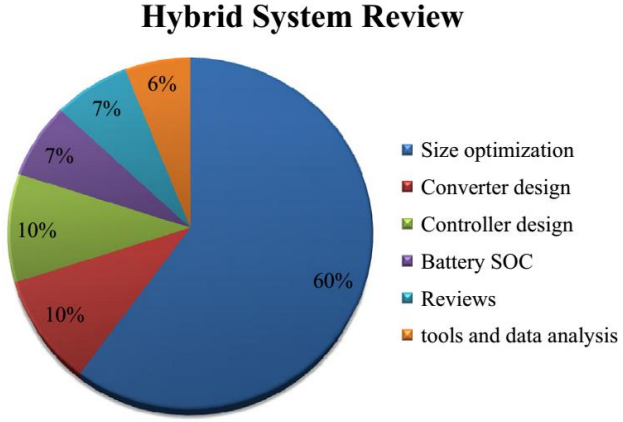
کلمات کلیدی: طراحی، استراتژی عملکردی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، بهینه سازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۳/۱
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱/۱۴
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مسعود برکاتی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سیستان و بلوچستان - زاهدان - دانشگاه سیستان و بلوچستان - دانشکده مکانیک

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

تقاضای انرژی روز به روز در جهان در حال افزایش است. آژانس اطلاعات انرژی آمریکا، پیش‌بینی کرده است که تا سال ۲۰۴۰، تقاضای انرژی در جهان ۴۰٪ بیشتر از میزان فعلی خواهد بود [۱]. در کنار این افزایش تقاضا، خطرات ناشی از تغییرات آب و هوایی، آلودگی و گرمایش زمین احساس می‌شود. امروزه افزایش نگرانی های ناشی از فعالیت‌های انسانی در افزایش مداوم دمای میانگین زمین فراگیر شده است [۲]. دلیل اصلی این تغییرات آب و هوایی افزایش میزان دی اکسید کربن در اتمسفر می‌باشد که اغلب به دلیل مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد. یکی از موضوعات کلیدی پیش روی کشورهای درحال توسعه ای مانند ایران، چگونه ایجاد ثبات و نهایتاً کاهش انتشار گازهای آلوده کننده می‌باشد، به نحوی که بتوان به رشد اقتصادی ادامه داد. گزینه های متعددی برای حل این مشکل، مبتنی بر تکنولوژی های روز دنیا وجود دارد که می‌توان به مواردی مانند انتخاب سوخت های با میزان کربن کمتر، انرژی های تجدید پذیر و انرژی هسته ای اشاره نمود [۳و۴]. استفاده از منابع تجدید پذیر راه حل مناسبی برای صرفه جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد که علاوه بر کاهش هزینه و آلایندگی کمتر، بازگشت آن‌ها نیز نهایتاً به خود طبیعت است [۵]. قابلیت اطمینان انرژی، تحت شرایط مختلف آب و هوایی و هزینه‌های مرتبط با آن، دو موضوع مهم در طراحی سیستم‌های تجدیدپذیر انرژی است. استفاده از انرژی باد، بیشترین رشد را در زمینه استفاده از منابع تجدیدپذیر داشته است [۶]. انرژی خورشید نیز به عنوان منبعی سازگار با محیط زیست شناخته شده است. این دو منبع انرژی، به دلیل اینکه به نوعی مکمل یکدیگر هستند، بیشترین استفاده را در سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی داشته‌اند. سیستم‌های قدرت ترکیبی، معمولاً قابلیت اطمینان بالاتر، و نیز هزینه تولید الکتریسیته کمتری، نسبت به سیستم‌های منفرد دارا می‌باشند [۷- ۹]. وجود سیستم‌های ذخیره کننده انرژی در سیستم‌های قدرت، به دلیل ماهیت تصادفی انرژی باد و خورشید، ضروری است [۱۰]. تکنیک‌های بهینه‌سازی گوناگونی در مجلات برای طراحی سیستم‌های قدرت ترکیبی استفاده شده است. زوها و همکارانش، یک سیستم قدرت ترکیبی متشکل از توربین بادی (WT) و سلول فتوولتائیک (PV) را با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌سازی کردند [۱۱]. کوترولیس و همکارانش همین سیستم را با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی نمودند [۱۲]. از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه NSGA-II، برای حداقل کردن هم‌زمان تلفات توان ناشی از انتقال و نیز هزینه اقتصادی، در [۱۳] استفاده شده است. جوهری، به تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود در یک سیستم ترکیبی متشکل از توربین بادی، ماژول فتوولتائیک، هیدروتوربین و دیزل پرداخت [۱۴]. شهیری نیا و همکارانش یک سیستم قدرت ترکیبی مستقل از شبکه متشکل از ماژول های فتوولتائیک، توربین بادی، دیزل و ژنراتور را با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی نمودند [۵]. روش‌های مختلف تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود در سیستم‌های ترکیبی که در مقالات موجود است، در [۱۵] مرور و بررسی شده است. سیستم‌های ترکیبی معمولاً بر اساس کاهش هزینه اقتصادی و تولید آلودگی کم‌تر طراحی می‌شوند. بومسما و همکارانش چارچوبی برای ارزیابی ظرفیت و نیز هزینه های سرمایه گذاری در چارچوب زمانی، برای حالت‌های مختلف منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه نمودند [۱۶]. برخی دیگر از محققان، تکنیک‌های پیش‌پردازش و الگوریتم‌های ابداعی برای زمان‌بندی پروژه ارائه کردند و نتایج جالبی را بدست آوردند [۱۷]. یکی از پارامترهایی که قابلیت اطمینان سیستم را مشخص می‌کند، احتمال هدر رفت توان (LPSP) است. سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی مختلفی با پیکربندی‌های متفاوت، با استفاده از روش LPSP و حداقل کردن هزینه سالانه سیستم (ACS)، طراحی شده‌اند [18-23]. برخی دیگر، سیستم‌های قدرت ترکیبی را بر اساس کاهش سطح هزینه انرژی (LCE) و نیز میزان CO_2 تولیدی بهینه کرده‌اند [24-26]. یک سیستم قدرت ترکیبی با هدف حداقل کردن هزینه، کاهش انتشار آلودگی و نیز میزان تقاضای بار برآورده نشده، در [۲۷] انجام شده است. گلکار و همکارانش یک سیستم توزیع پراکنده را با هدف کاهش توان تلف شده در حداقل هزینه را بهینه سازی و طراحی نمودند [۲۸]. روش‌های مختلف بهینه‌سازی سیستم‌های تجدیدپذیر انرژی که در سال‌های پیش گسترش یافته‌اند، در [۲۹] بررسی شده است. مرجع [۳۰] پس از بررسی مقالات مختلف در زمینه سیستم‌های ترکیبی توربین بادی، سلول خورشیدی و باتری در سال ۲۰۱۵، حجم بالای تحقیقات در این زمینه را به تفکیک، به صورت نمودار دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۱ ارائه نمود.



شکل (۱): حجم مطالعات انجام شده در زمینه سیستم‌های ترکیبی توربین باد، سلول خورشیدی و باتری [۳۰]

طبق این نمودار، اهمیت مطالعات بهینه سازی اندازه سیستم‌ها تجدیدپذیر انرژی مشخص می‌شود. سیستم‌های تجدیدپذیر انرژی ترکیبی، شامل اجزای مختلفی هستند. روشی مناسب، برای تطابق و هماهنگی این اجزا، چالشی بزرگ در سیستم‌های قدرت است. هماهنگی بیشتر بین این اجزا، سبب افزایش راندمان سیستم می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

در این مقاله، یک سیستم تجدیدپذیر ترکیبی که شامل توربین بادی، سلول فتوولتائیک، دیزل و باتری است، پیشنهاد شده است. روشی جدید برای تعیین اندازه بهینه واحدهای موجود در سیستم‌های ترکیبی، بر اساس میزان هماهنگی بین بازه‌های تولید و مصرف الکتریسیته، به نحوی که کمترین هزینه اقتصادی میسر شود، ارائه شده است. نرخ تطابق الکتریسیته، به عنوان معیاری برای تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود در سیستم ترکیبی پیشنهادی، پیشنهاد شده است. این تکنیک، بر اساس الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) گسترش یافته است. برای این کار، داده‌های شدت تابش خورشید، دما، سرعت باد و میزان تقاضای بار، برای روستایی کوچک در استان سیستان و بلوچستان، ایران، به صورت ساعت به ساعت و برای مدت یک سال، جمع آوری شده است. از این داده‌ها برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی استفاده شده است. فرض شده است که داده‌های تولید و مصرف در هر بازه زمانی ثابت بمانند. در تکنیک پیشنهادی، از سه پارامتر ضریب نابرابری (IC)، ضریب همبستگی (CC)، و هزینه سالیانه سیستم (ACS) استفاده شده است. دو ضریب IC و CC، میزان EMR را کنترل می‌کنند، و پارامتر ACS، هزینه سالیانه سیستم را نشان می‌دهد. ضریب IC، معیاری برای نشان دادن میزان هماهنگی یک سری داده زمانی تخمین زده شده، با مقادیر مشاهده شده واقعی را ارائه می‌کند [31]. به عبارت دیگر، IC، یک اندازه گیری نسبی از میزان دقت داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به داده‌های واقعی را فراهم می‌کند [۳۲]. ضریب CC، نشان می‌دهد که مقادیر تخمین زده شده تا چه اندازه برای مدل پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی تناسب دارد [۳۳]. ضریب IC، نشان دهنده میزان اندازه تطابق است، در حالی که ضریب CC، روند تطابق را نشان می‌دهد. به همین دلیل، این دو ضریب هر دو با هم، برای بررسی میزان EMR بین بازه‌های تولید و مصرف، مد نظر قرار گرفته شده است. برای بررسی میزان کارایی تکنیک پیشنهادی، فرایند بهینه-سازی با استفاده از مدل سیستم، و داده‌های واقعی شرایط جوی و تقاضای بار برای منطقه گفته شده، بر اساس یک روند تکرار بدست می‌آید. استفاده از این تکنیک، سیستمی با راندمان بالا در کمترین هزینه اقتصادی را ممکن می‌سازد.

۲- مدل ریاضی سیستم ترکیبی

مدل‌سازی و شبیه‌سازی به کمک کامپیوتر، ابزاری برای طراحی، آنالیز و شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت می‌باشد. در مقایسه با پیاده‌سازی مدل آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های کامپیوتری سبب کاهش هزینه، زمان، ایمنی و مقیاس بندی آسان مسئله می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها سبب می‌شوند که کامپیوتر به آزمایشگاهی مجازی جهت انجام آزمایشات عددی معادل، تبدیل شود و برای پیاده‌سازی عملی آن پروژه، بینشی صحیح، پیش‌بینی دقیق و میزان بازگشت سرمایه را بتوان تخمین زند.

سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی، شامل توربین بادی، آرایه PV، بانک باتری، دیزل، کنترل کننده، اینورتور، کابل و لوازم جانبی می‌باشد. قبل از اعمال الگوریتم بهینه سازی مناسب، مدل‌سازی ریاضی واحدها باید انجام گیرد. مدل‌سازی واحدهای موجود در سیستم ترکیبی پیشنهادی به اختصار در بخش‌های زیر ارائه شده است.

۲-۱- مدل توربین بادی (WT)

تنظیم سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع توپی توربین بادی (Hub)، با استفاده از داده‌های سرعت باد در ارتفاع مرجع نسبت به سطح زمین، مرحله مهمی است و باید قبل از محاسبه توان خروجی توربین بادی انجام گیرد. این مهم توسط رابطه (۱) که معروف به قانون توان توربین است، انجام می‌گیرد [۳۴].

$$v(t) = v_r(t)\left(\frac{h}{h_r}\right)^{\gamma} \quad (۱)$$

که در آن، v سرعت باد در ارتفاع دلخواه h، و v_r سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع معلوم h_r؛ γ ضریب توان تغییرات جهت باد است که برای زمین‌های باز، برابر یک-هفتم است. روش‌های احتمالاتی به صورت گسترده برای پیش‌بینی میزان توان تولیدی منابع تجدیدپذیر استفاده شده است [35]. تغییرات سرعت باد به بهترین نحو توسط تابع توزیع احتمال ویبال (Weibull PDF) توصیف می‌شود. PDF، احتمالی را محاسبه می‌کند که سرعت باد در طول بازه زمانی، بین صفر تا بی‌نهایت اتفاق خواهد افتاد. مساحت زیر منحنی بین هر دو سرعت بزرگ‌تر از صفر، برابر با احتمالی است که باد در مکانی بین آن دو سرعت، وزش خواهد کرد. به طور فیزیکی، این به معنای تصادفی بودن وزش باد است. تابع ویبال PDF توسط رابطه (۲) به دست می‌آید [۳۶].

$$f(v) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{v}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (۲)$$

که در آن، β فاکتور شکل، η فاکتور اندازه و v سرعت باد است. β، شکل منحنی ویبال را کنترل می‌کند و η، چگونگی انبساط منحنی توزیع را معین می‌کند. برای نمودار سرعت باد نشان داده شده در شکل (۲)، منحنی توزیع احتمال ویبال در شکل (۳)، نشان داده شده است.

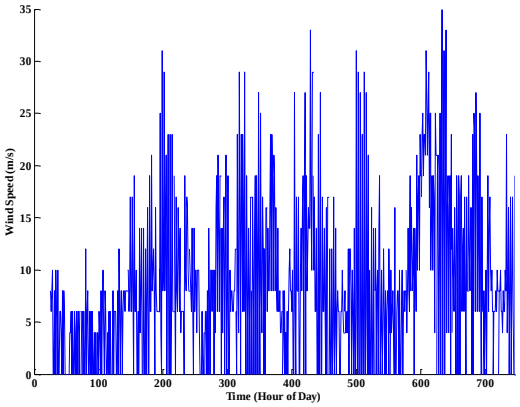
منحنی PDF و نیز منحنی توان توربین بادی، از اطلاعات کلیدی مورد نیاز، برای تخمین میزان کل کیلو وات-ساعت تولیدی در یک سال، توسط توربین بادی در مکان مورد بررسی است. منحنی توان توربین بادی، نموداری است که توان خروجی توربین بادی را در هر میزان سرعت باد نشان می‌دهد و به طور معمول توسط تولیدکنندگان توربین داده می‌شود. منحنی توان توربین بادی انتخاب شده در این مقاله، در شکل (۴) داده شده است. میزان انرژی در دسترس برای یک توربین بادی توسط رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$E_{WT} = (days)(hours).P_c f(v, \beta, \eta) \quad (۳)$$

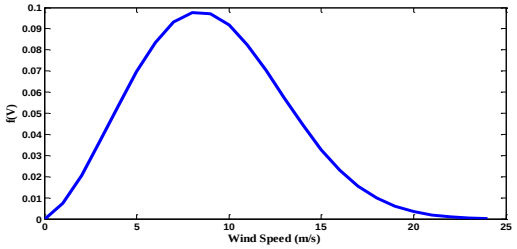
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

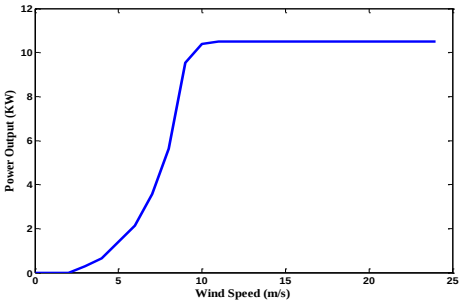
که در آن، E_{wt} انرژی تولیدی توسط توربین بادی بر حسب [kWh]؛ P_c توان خروجی توربین بادی، $f(v)$ تابع توزیع ویبال برای سرعت باد v، β فاکتور شکل و η فاکتور اندازه است. ضریب $(day)(hours)$، میزان کل ساعت‌های شبیه سازی است. در این مقاله از نمونه توربین بادی کوچک "ARE442" برای فرایند شبیه سازی استفاده شده است. شکل (۵)، انرژی خروجی کل توربین برای منطقه داده شده در یک سال را نشان می‌دهد.



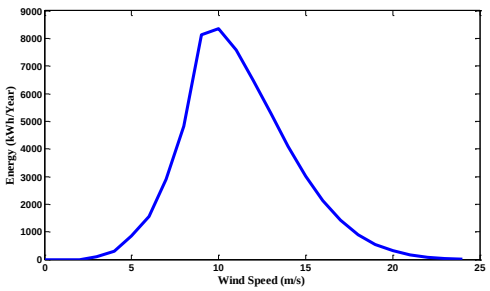
شکل (۲): سرعت باد برای یک سال به صورت ساعتی



شکل (۳):تابع توزیع احتمال ویبال ($f(v)$)



شکل (۴): منحنی توان توربین بادی ARE442



شکل (۵): انرژی خروجی کل توربین بادی برای یک سال

۲-۲- مدل‌سازی مولد PV

تکنولوژی استفاده از سلول‌های PV، به عنوان سازگارترین تکنولوژی با محیط زیست شناخته شده است [۳۷]. شبیه سازی عملکرد آرایه PV، با در نظر گرفتن وجود کنترل کننده دنبال‌کننده حداکثر نقطه توان (MPPT) انجام شده است. مدل استفاده شده می‌تواند توان خروجی پنل‌های PV را در دما و شدت تابش‌های مختلف خورشید پیش‌بینی کند [38]. ولتاژ مدار باز سلول، در هر دما و شدت تابش خورشید توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$Vx = s.\frac{E_i}{E_{iN}}TCV.(T - T_N) + sV_{\max} - s.(V_{\max} - V_{\min}).\exp(\frac{E_i}{E_{iN}}.\ln(\frac{V_{\max} - V_{oc}}{V_{\max} - V_{\min}})) \quad (۴)$$

که در آن، V_x ولتاژ مدار باز بر حسب ولت [V]، در هر شدت تابش خورشید موثر برخوردی به سطح پنل (E_i) بر حسب [W/m^2] و دما (T) است، E_{iN} شدت تابش خورشید در شرایط تست استاندارد (STC) ([W/m^2] ۱۰۰۰) است، TCV، ضریب دمایی V_{oc} بر حسب [V/°C]، T، دمای پنل خورشیدی بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد، T_N، دمای شرایط استاندارد آزمایش که [°C] ۲۵ است، s تعداد پنل های فتوولتائیک سری شده؛ p تعداد پنل های فتوولتائیک موازی شده؛ V_{max} حداکثر ولتاژ مدار باز در دمای [°C] ۲۵ و شدت تابش [W/m^2] ۱۲۰۰ است (معمولاً V_{max} نزدیک به $1/03.V_{oc}$ است)، V_{min} حداقل ولتاژ مدار باز در دمای [°C] ۲۵ و شدت تابش [W/m^2] ۲۰۰ است (معمولاً V_{min} نزدیک به $0/85.V_{oc}$ است)، و V_{oc} ولتاژ مدار باز در دمای [°C] ۲۵ و شدت تابش [W/m^2] ۱۰۰۰ می‌باشد.

جریان مدار کوتاه سلول خورشیدی (I_x) در هر دما و شدت تابش خورشید، توسط رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$Ix = p.\frac{E_i}{E_{iN}}.\left[I_{sc} + TCi.(T - T_N)\right] \quad (۵)$$

که در آن، I_{sc} جریان مدار کوتاه در دمای [°C] ۲۵ و شدت تابش [W/m^2] ۱۰۰۰، و TC_i، ضریب دمایی I_{sc} بر حسب [A/°C] است. جریان خروجی پنل فتوولتائیک بر حسب آمپر [A] توسط رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$I(V) = \frac{Ix}{1-\exp(-\frac{1}{b})}.\left[1 - \exp(\frac{V}{b.Vx} - \frac{1}{b})\right] \quad (۶)$$

که در آن، V ولتاژ خروجی پنل بر حسب ولت [V]، و b مشخصه ثابت است که بر اساس منحنی I-V، با استفاده از رابطه (۷) با یک روند تکرار محاسبه می‌شود. محدوده تغییرات b، بین ۰/۰۱-۰/۱۸ می‌باشد.

$$b_{n+1} = \frac{V_{op} - V_{oc}}{V_{oc}.\ln(1 - \frac{I_{op}}{Isc}.(1 - \exp(\frac{-1}{b_n})))} \quad (۷)$$

نهایتاً توان خروجی پنل فتوولتائیک، P، بر حسب وات [W] طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود ($P(V).I(V)$).

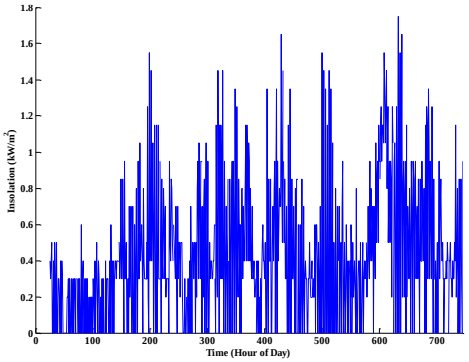
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

$$P(V)=\frac{V.Ix}{1-\exp(\frac{-1}{b})}.[1-\exp(\frac{V}{bVx}-\frac{1}{b})] \quad (۸)$$

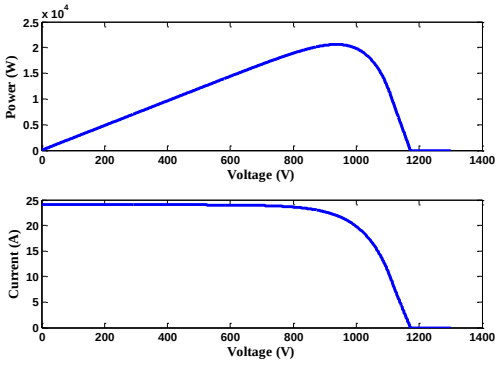
برای محاسبه مقدار کیلو وات-ساعت تولیدی در یک سال در یک مکان به خصوص، که نمودار شدت تابش خورشید آن در شکل (۶) داده شده است، از معادله (۹) استفاده می‌کنیم [۳۹].

$$E_{PV}=P_{out}(E_x).(SolarWindow).(TotalDay) \quad (۹)$$

که در آن، E_{PV} انرژی فتوولتائیک تولیدی مورد انتظار بر حسب [kWh] در طول مدت زمان $TotalDay$ برای یک مکان خاص است. $SolarWindow$، تعداد کل ساعت‌هایی است که خورشید با سطح ماژول با مقدار متوسط ساعتی شدت تابش برخورد می‌کند. $P_{out}(E_x)$ توان خروجی ماژول PV، در میانگین شدت تابش خورشید در هر ساعت است. در این جا از مشخصات نمونه ماژول " KyoceraKC200 GHT-2 " برای فرایند شبیه سازی استفاده شده است. در اینجا فرض شده است که ۳۶ ماژول PV به صورت سری به یک‌دیگر متصل شده باشند. نمودارهای مشخصه P-V و I-V در شکل (۷) آورده شده است.



شکل (۶): شدت تابش خورشید برای یک سال به صورت ساعتی



شکل (۷): نمودار مشخصه P-V و I-V برای ماژول PV

۳-۲- مدل عملکردی باتری

باتری‌ها، معمول‌ترین دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی در کاربردهای مختلف صنایع هستند. انرژی الکتریکی تولید شده اضافی در بانک باتری ذخیره می‌شود، تا در زمانی که توان تولیدی کل، برای تقاضای بار موجود ناکافی است، کمبود توان را جبران کند. بنابراین، تعیین تعداد صحیح باتری‌ها امری مهم است. مدل‌سازی باتری بر اساس میزان سطح شارژ باتری (SOC)، یکی از معمول‌ترین روش‌ها است. SOC، پارامتری مهم برای ارزیابی سیستم است [20]. دما می‌تواند بر ظرفیت باتری تأثیر گذار باشد. میزان ظرفیت در دسترس باتری [AH] $C_{bat}^{'}$، در دمای داده شده (T_{bat} [K])، می‌تواند توسط رابطه (۱۰) محاسبه شود [۱۸].

$$C_{bat}^{'}=C_{bat}^{''}.(1+\delta_c.(T_{bat}-298.15)) \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، δ_c ضریب دمایی باتری و به طور معمول مقدار ۰/۶٪ در هر درجه، برای آن استفاده می‌شود. $C_{bat}^{''}$، ظرفیت نامی باتری است که در کاتالوگ تهیه شده توسط کارخانه سازنده داده می‌شود. در این-جا فرض شده است که توربین بادی دارای خروجی DC باشد. اگر از تلفات ناشی از هدر رفت توان در کابل صرفه نظر شود، نرخ جریان باتری در زمان t، می‌تواند توسط رابطه (۱۱) بیان شود [۲۰].

$$I_{bat}(t)=\frac{P_{PV}(t)+P_{Wind}(t)-P_{ACLoad}(t)/\eta_{inverter}-P_{DCLoad}}{V_{bat}(t)} \quad (۱۱)$$

که در آن، $\eta_{inverter}$ راندمان اینورتور می‌باشد، و برابر ۹۲٪ در نظر گرفته شده است. مقدار SOC در هر بازه زمانی t، وابسته به جریان باتری، شارژ و یا دی شارژ شدن باتری و میزان شارژ در زمان قبل دارد. با در نظر گرفتن همه این موارد، SOC باتری توسط رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$SOC(t+1)=SOC(t).(1-\frac{\sigma.\Delta t}{24})+\frac{I_{bat}(t).\Delta t.\eta_{bat}}{C_{bat}^{'}} \quad (۱۲)$$

که در آن، η_{bat} راندمان باتری است که در فرایند شارژ شدن برابر ۹۰٪ و در دی شارژ شدن، برابر ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است. σ نرخ دی شارژ شدن خودبه‌خودی باتری است که ۰/۲ ٪ برای هر روز پیشنهاد شده است. زمانی که توربین بادی و سلول خورشیدی، توانی بیشتر از میزان تقاضای بار موجود تولید کنند، فرایند شارژ شدن بیش از حد اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، زمانی که تقاضای بار بیشتر از انرژی خروجی کل منابع تولید کننده انرژی باشد، میزان SOC باتری کاهش می‌یابد. حداقل سطح SOC باتری توسط رابطه SOC_{min}=1–DOD مشخص می‌شود؛ که DOD، عمق دی شارژ شدن باتری می‌باشد. برای افزایش طول عمر باتری و محافظت از آن در برابر خراب شدن، مقدار DOD، برابر ۵۰٪ و SOC در قید (۱۳) کنترل می‌شود.

$$SOC_{\min}\le SOC\le SOC_{\max} \quad (۱۳)$$

که SOC_{max}، حداکثر حالت شارژ باتری است (SOC_{max}=۱). در اینجا از نمونه باتری "USBattery US250"برای فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است که مشخصات ان در جدول (۱) آورده شده است [۴۰].

جدول (۱): مشخصات باتری USBattery US250 [40]

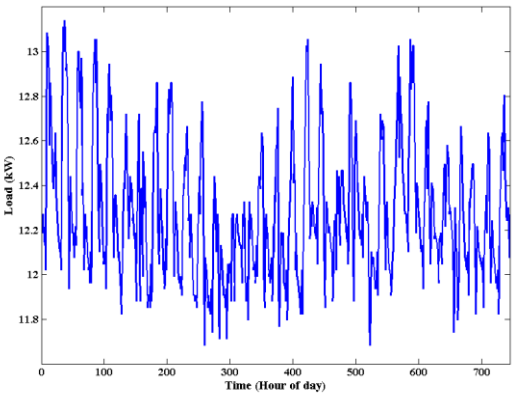
وزن (lbs)	ابعاد (mm)			ظرفیت ($C_{20}(Ah)$)	ولتاژ
	ارتفاع	طول	عرض		
۷۲	۱۱/۷	۱۱/۷	۷/۲	۲۵۰	۶

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۴-۲- مدل بار

توان خروجی کل سیستم ترکیبی پیشنهادی باید بتواند تقاضای بار موجود را برآورده سازد. تغییرات میزان تقاضای بار موجود در طول یک سال به صورت ساعتی، در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات سالیانه میزان تقاضای بار

۳- دو مدل پیشنهادی برای طرحی سیستم

در این قسمت، طراحی سیستم ترکیبی پیشنهادی، از دو دیدگاه مختلف بررسی شده است. در دیدگاه اول، بر اساس ارزیابی نرخ تطابق بازه‌های تولید و مصرف، و در دیدگاه دوم، بر اساس احتمال نرخ هدر رفت توان (LPSP) طراحی شده است. واحدهای در نظر گرفته شده مانند ماژول PV، توربین بادی، باتری و دیزل در هر دو طراحی یکسان می باشد. در زیر این رو رویکرد بررسی شده است.

۳-۱- رویکرد اول: مدل پیشنهادی بر مبنای ارزیابی نرخ تطابق

افزایش نرخ تطابق الکتریسیته بین تولید و مصرف در سیستم‌های تجدیدپذیر انرژی ترکیبی، موضوع مهمی در صنایع قدرت است. برای اندازه‌گیری میزان انحراف دو مجموعه از داده‌های متغیر، روش حداقل مربعات (LS)، طبق معادله (۱۴)، توصیف می‌شود [۴۱].

$$LS = \sum_{t=0}^{n} (D_t - S_t)^2 \qquad (۱۴)$$

که در آن، D_t و S_t، به ترتیب میزان توان تولیدی و تقاضای بار در زمان t می‌باشند. مقدار LS، همواره مثبت است و مقدار صفر برای آن، نشان دهنده تطابق کامل است. ضریب رتبه همبستگی اسپیرمن (CC) که بر مبنای روش LS است، یکی از توابعی است که می‌تواند برای نشان دادن میزان تطابق بازه‌های تولید و مصرف استفاده شود. نرخ تغییرات CC بین ۱- تا ۱+ است. مقدار "۱+" نشان دهنده تطابق مثبت و مقدار "۱-" تطابق منفی بین توان تولیدی و تقاضای بار را نشان می‌دهد. مقدار صفر برای این ضریب، نشان دهنده عدم وجود تطابق می‌باشد. ضریب CC، توسط معادله (۱۵) تعریف می‌شود [۴۲].

$$CC = \frac{\sum_{t=0}^{n} (D_t - d).(S_t - s)}{\sqrt{\sum_{t=0}^{n} (D_t - d)^2 . \sum_{t=0}^{n} (S_t - s)^2}} \qquad (۱۵)$$

که در آن، D_t، بار و S_t توان تولید در زمان t می‌باشد. d و s، به ترتیب، میانگین بار و توان تولیدی در مدت زمان n هستند. از ضریب CC، برای بررسی روند تطابق بین سری‌های زمانی استفاده می‌شود. این ضریب، اندازه تطابق نسبی بین متغیرهای مورد بررسی را بیان نمی‌کند. بنابراین اگر اندازه منبع تولیدکننده توان دو برابر شود، با وجود اینکه توان اضافی تولید شده است، اما CC همچنان ثابت باقی می‌ماند. علاوه بر این، اگر دو سری مورد بررسی دقیقاً با یکدیگر هم‌فاز باشند، اما در اندازه‌های بسیار متفاوت، CC تطابق کاملی را به ما نشان می‌دهد. این در حالی است که در واقعیت چنین نیست. برای داشتن تطابق کامل، باید فاز و اندازه، هر دو به صورت همزمان در نظر گرفته شوند. از این رو معیار دیگری برای بررسی اندازه تطابق نیاز است. ضریب نابرابری (IC)، میزان نابرابری، در حوزه اندازه را با توجه به سه منبع: میانگین، واریانس و کوواریانس، توصیف می‌نماید [۴۲]. بنابراین، IC و CC هر دو با هم برای بررسی میزان EMR در نظر گرفته شده‌اند. ضریب IC می‌تواند در محدوده ۰ تا ۱+ تغییر کند. هرچه IC کوچک‌تر باشد، نرخ تطابق بالاتر است. مقدار "۰" برای ضریب IC، نشان دهنده نرخ تطابق کامل و مقدار "۱+" عدم تطابق را نشان می‌دهد. ضریب IC، می‌تواند توسط رابطه (۱۶) محاسبه شود [۴۲].

$$IC = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{n} (D_t - S_t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{n} (D_t)^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=0}^{n} (S_t)^2}} \qquad (۱۶)$$

مقدار IC بین ۰/۴ – ۰ نشان دهنده تطابق مناسب بین دو سری مورد بررسی است و مقادیر بالاتر از ۰/۵، تطابق ضعیفی را نشان می‌دهد [42]. S_t در معادلات (۱۵) و (۱۶) از مجموع دو قسمت تقسیم شده است؛ $N_{PV}.S_{PV}$ و $N_{WT}.S_{WT}$ که به ترتیب نشان دهنده منابع تولیدکننده انرژی، توربین‌های بادی و پنل‌های PV هستند. N_{PV} تعداد کل پنل‌های PV، و N_{WT} تعداد کل توربین‌های بادی را نشان می‌دهد.

۳-۲- رویکرد دوم: مدل پیشنهادی بر مبنای احتمال هدر رفت توان (LPSP)

در رویکرد LPSP، احتمال حالت هایی را که منابع تولید کننده توان، قادر به تامین میزان تقاضای بار نیستند محاسبه می شود [۴۳]. مقدار LPSP برابر با صفر، نشان دهنده این است این تقاضای بار به طور کامل توسط منابع تولید کننده توان تامین می شود، مقدار LPSP برابر با یک، به معنی این است که منابع تولید توان نمیتوانند تقاضای بار را تامین کنند [۴۴].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^{n} (Time(P_{available}(t) < P_{needed}(t)}{n} \quad (۱۷)$$

که در این رابطه، n تعداد ساعت های در نظر گرفته شده برای فرایند شبیه سازی می باشد، $P_{available}$ توان در دسترس می باشد و طبق رابطه زیر میتواند محاسبه شود:

$$P_{available}(t) = P_{PV} + P_{WT} + C.V_{bat}.Min\left[\frac{\frac{0.2C_{bat}}{\Delta t}}{\frac{C_{bat}.(SOC(t)-SOC_{\min})}{\Delta t}}\right] \quad (۱۸)$$

که C، برای حالت شارژ شدن باتری برابر با صفر و برای حالت تخلیه شارژ باتری برابر ۱ در نظر گرفته می شود. همچنین P_{needed} میزان تقاضای بار در زمان t می باشد، که طبق رابطه زیر میتواند محاسبه شود:

$$P_{needed}(t) = \frac{P_{AC\ load}(t)}{\eta_{inverter}(t)} + P_{DC\ load}(t) \quad (۱۹)$$

۴- تحلیل اقتصادی سیستم

تحلیل اقتصادی سیستم بر اساس مفهوم هزینه سالیانه سیستم (ACS) انجام شده است [9]. ACS، شامل هزینه سرمایه گذاری (ACC)، هزینه عملکرد و نگهداری (AOC)، هزینه تعویض (ARC)، و هزینه سوخت (AFC) است. در این تحلیل فرض شده است که طول عمر پروژه ۲۰ سال باشد. ACS طبق معادله (۲۰) بیان می‌شود.

$$ACS = ACC(PV + Wind + Tower + Diesel + Battety) + AOC(PV + Wind + Tower + Battey) + ARC(Battery) + AFC(Diesel) \quad (۲۰)$$

۴-۱- هزینه سرمایه گذاری (ACC)

میزان ACC برای هر واحد، با توجه به هزینه نصب آن‌ها محاسبه می‌شود. ACC برای هر واحد با استفاده از معادله (۲۱) بیان می‌شود.

$$ACC = C_{cap} * CRF(i,n) \quad (۲۱)$$

که در آن، C_{cap}، هزینه سرمایه گذاری هر واحد و CRF فاکتور بازگشت سرمایه می‌باشد که از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$CRF(i,n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۲۲)$$

که n، طول عمر سیستم و i، نرخ بهره سالیانه می‌باشد. نرخ بهره سالیانه شامل نرخ بهره اسمی (i_{loan}، نرخی که با آن وام گرفته می‌شود) و نرخ تورم، f ، است و از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است.

$$i = \frac{i_{loan} - f}{1+f} \quad (۲۳)$$

۴-۲- هزینه عملکرد و نگهداری (AOC)

هزینه تعمیر و نگهداری هر واحد، توسط رابطه (۲۴) بدست می‌آید.

$$AOC = AOC(1) * (1+f)^n \quad (۲۴)$$

که در آن، $AOC(1)$ هزینه تعمیر و نگهداری واحد، برای اولین سال راه اندازی پروژه است.

۴-۳- هزینه تعویض (ARC)

واحدهایی که طول عمری کم‌تر از طول عمر پروژه دارند، در طول عمر پروژه نیاز به تعویض دارند. ARC از معادله (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$ARC = C_{rep} * SFF(i, n_{rep}) \quad (۲۵)$$

که در آن، C_{rep} هزینه تعویض واحد و SFF فاکتور وجوه استهلاکی است و به طول عمر هر واحد (n_{rep}) و نرخ بهره (i)، طبق (۲۶) وابسته است.

$$SFF(i, n_{rep}) = \frac{i}{(1+i)^{nrep} - 1} \quad (۲۶)$$

۴-۴- هزینه سوخت (AFC)

هزینه سوخت برای ژنراتور دیزل از معادله (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$AFC = T_{fc} * CRF(i,n) \quad (۲۷)$$

که در آن، T_{fc} مصرف سوخت کل برای طول عمر پروژه است.

توان خروجی ژنراتور دیزل برابر ۵ kW، میزان آلودگی CO_2 تولیدی برابر ۰/۶۶۹ kg/kWh و قیمت سوخت گازوئیل، ۰/۱۶۰۴۹ $/kWh در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مربوط به هزینه که در این تحلیل در نظر گرفته شده است، در جداول (۲) و (۳) آمده است.

جدول (۲): هزینه و طول عمر واحدها برای سیستم پیشنهادی [۳۹]

واحد	هزینه سرمایه گذاری تولید US $	هزینه تعمیر در اولین سال پروژه US $	هزینه تعویض US $	طول عمر (سال)
ماژول PV	۸۰۰/۰۰	۶۵/۰۰	-	۲۰
توربین بادی و برج آن	۱۴۰۴/۸۶	۱۰۱/۵۰	-	۲۰
باتری	۱۲۶/۳۵	۲۵/۰۰	۱۲۶/۳۵	۵
دیزل	۵۰۰/۰۰	۱۰۰۰/۰۰	-	۲۰
سایر اجزا	۹۰۰/۰۰	۹۰/۰۰	-	۲۰

جدول (۳): پارامترهای هزینه [9]

هزینه سوخت ($/kWh)	مالیات کربن ($/kWh)	نرخ تورم f%	نرخ بهره بانکی i_{loan}%
۰/۱۶۰۴۹۰	۰/۰۱۰۴۸۵	۲	۵

۵- بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از MOPSO

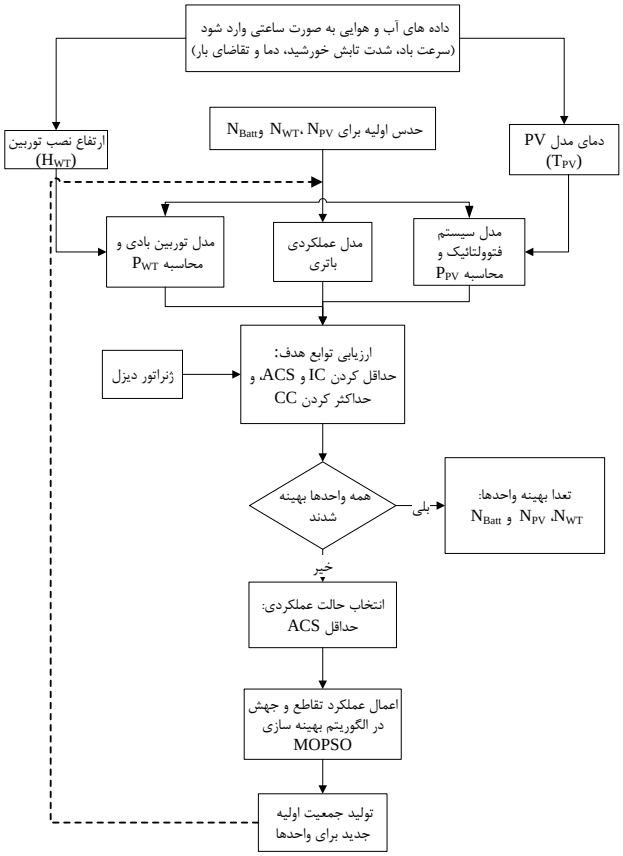
روش بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت معرفی شد [۴۵]. به طور کلی، الگوریتم PSO دارای زمان محاسباتی پایین، پیاده سازی ساده و حافظه محاسباتی کم می باشد. این الگوریتم با بایگانی جمعیتی از جواب های بهینه بدست آمده عمل میکند. هر جواب به عنوان یک ذره در نظر گرفته می شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

ذرات در فضای محاسباتی به صورت کنترل شده ای حرکت می‌کنند. در هر تکرار الگوریتم، جواب های بایگانی شده که به عنوان بهترین ذرات ذخیره شده اند، مقایسه و ارزیابی می شوند. بهترین جواب بدست آمده به عنوان بهترین فضای تجربه شده توسط آن ذره نگه داشته می شود. بهترین مکان تجربه شده توسط کل ذرات نیز ذخیره می شود. این جواب ها در هر تکرار الگوریتم مقایسه و به روز می شود تا نهایتاً بهترین جواب ها بدست آید. برای هدف در نظر گرفته شده در این مقاله، ابتدا سلول خورشیدی، توربین بادی و باتری با مشخصات و هزینه های اقتصادی متفاوت طبق روند بیان شده در بالا مدل سازی شده اند. با اعمال الگوریتم بهینه سازی MOPSO، الگوریتم به صورت دینامیکی پیکربندی های بهینه سیستم را مورد جستجو قرار می دهد، به نحوی که بیشترین تطابق بین بازه های تولید و مصرف در کمترین هزینه محاسباتی میسر شود.

به طور کلی، طراحی و بهینه سازی یک سیستم ترکیبی، به دلیل وجود متغیرها و پارامترهای چندگانه‌ای که در فرایند بهینه سازی باید مد نظر قرار گیرند و نیز تضاد بین توابع هدف، به مراتب مشکل‌تر از یک سیستم با یک منبع منفرد است. عملکرد سیستم برای مدت طولانی، پارامترهای هزینه و بررسی EMR، برای رسیدن به بهترین مصالحه بین نرخ تطابق وس هزینه، باید مد نظر قرار گیرند. دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO و NSGA-II، بر سیستم پیشنهادی اعمال شده است. با تعداد برابر جمعیت اولیه و تکرار، الگوریتم MOPSO سریع‌تر همگرا می‌شود. بنابراین، الگوریتم MOPSO برای این فرایند انتخاب شده است. این الگوریتم با هدف حداکثر کردن EMR، به وسیله حداقل کردن ACS و IC، و حداکثر کردن CC، به دنبال ترکیب‌های بهینه می‌گردد. با اعمال الگوریتم، مجموعه ای از جواب‌های ممکن (سطح پرتو) بدست می‌آید. تعداد پنل‌های PV، توربین‌های بادی و باتری، متغیرهای تصمیم‌گیری برای این فرایند بهینه‌سازی هستند. حد پایین متغیرهای تصمیم‌گیری برابر با یک در نظر گرفته شده است تا از وجود حداقل یک واحد از هرکدام در واحدها اطمینان حاصل شود. حد بالای این متغیرها، برابر $max(D)/min(S_n)$ در نظر گرفته شده است، که در آن، $max(D)$ و $min(S_n)$ به ترتیب، مقادیر حداکثر و حداقل تقاضای بار و توان تولیدی هستند. داده های ورودی برای این فرایند شبیه سازی، دمای محیط، ارتفاع نصب توربین بادی، شدت تابش خورشید، سرعت باد و میزان تقاضای بار به صورت ساعتی برای یک سال می باشد. با اعمال الگوریتم بهینه سازی MOPSO به پیکربندی گفته شده، مجموعه ای از جواب های ممکن بدست می آیند. فلوچارت اعمال شده توسط توسط الگوریتم بهینه سازی در شکل (۹) نشان داده شده است.

فرایند بهینه سازی با گرفتن داده های ورودی بیان شده شروع می شود. سپس حلقه ای برای اعمال الگوریتم بهینه سازی برای چندین تکرار و با هدف کاهش IC و ACS، و نیز حداکثر کردن CC راه اندازی می شود. نتایج بدست آمده برای تعداد بهینه واحدها، به نزدیک ترین عدد صحیح به بالا گرد شده اند تا اندازه بهینه هر واحد بدست آید. اندازه بهینه واحدهای بدست آمده در یک آرایه سلولی ذخیره می شوند و در هر تکرار به روز می شوند. زمانی که تعداد تکرارهای تعیین شده ($n = n_{\max}$) انجام شد، الگوریتم به پایان می رسد. در اینجا $n = 200$ و $n_{pop} = 200$ در نظر گرفته شده است. نهایتاً مجموعه ای از جواب های بهینه و تعداد متناسب هر کدام از واحدها بدست خواهند آمد.



شکل (۹): فلوچارت الگوریتم بهینه سازی اعمالی

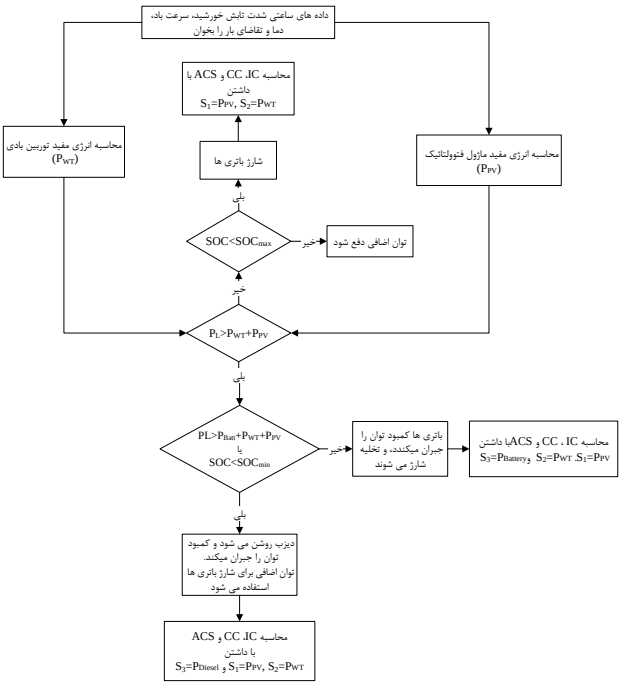
۶- استراتژی عملکردی سیستم

به منظور تولید توان به صورت پیوسته، نیاز به سیستم های منبع پشتیبان مانند ژنراتور دیزل و باتری می باشد. مصرف سوخت ژنراتور دیزل یکی از موضوعات مهم است که بر هزینه کل سیستم تاثیر گذار است. بنابراین یکی از فاکتورهای مهم، مدیریت زمان های شروع و پایان کارکرد ژنراتور دیزل می باشد. استراتژی عملکردی سیستم اعمالی در فلوچارت شکل (۱۰) نشان داده شده است. این استراتژی عملکردی طبق زیر عمل می‌کند:

- اگر توان تولیدی کل، که مجموع توان تولیدی توربین‌های بادی (P_{WT}) و پنل های PV (P_{PV}) است، بیشتر از بار (P_L) باشد، از توان اضافی برای شارژ باتری‌ها استفاده می‌شود. در این حالت، فرایند تعیین تعداد بهینه واحدها، تنها با دو منبع انجام می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

- اگر توان تولیدی کل ($P_{WT} + P_{PV}$)، کمتر از تقاضای بار باشد، و SOC باتری‌ها، بالاتر از SOC_{min}، از باتری‌ها برای جبران کمبود توان استفاده خواهد شد. اگر SOC باتری‌ها کوچک‌تر و یا مساوی SOC_{min} باشد، ژنراتور دیزل روشن شده و کمبود توان را جبران می‌کند تا از دی شارژ شدن باتری‌ها، جلوگیری کند. از توان اضافی تولیدی توسط دیزل، برای شارژ باتری‌ها تا حد بالای SOC_{max} استفاده می‌شود. در این حالت، تعیین تعداد بهینه واحدها به دو گروه تقسیم می‌شود: یکی شامل توربین بادی-پنل PV-باتری؛ و بار دیگر توربین بادی–پنل PV و ژنراتور دیزل.

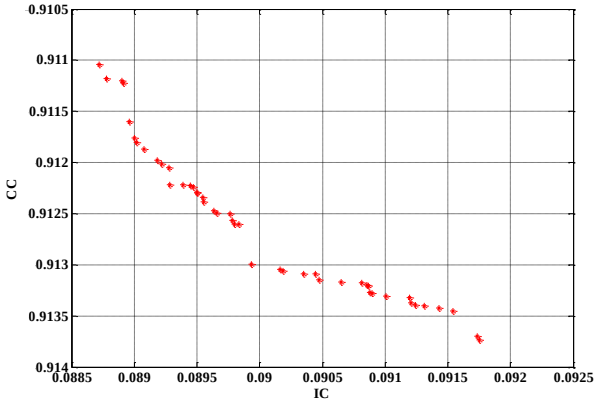


شکل (۱۰): استراتژی عملکردی سیستم ترکیبی پیشنهادی

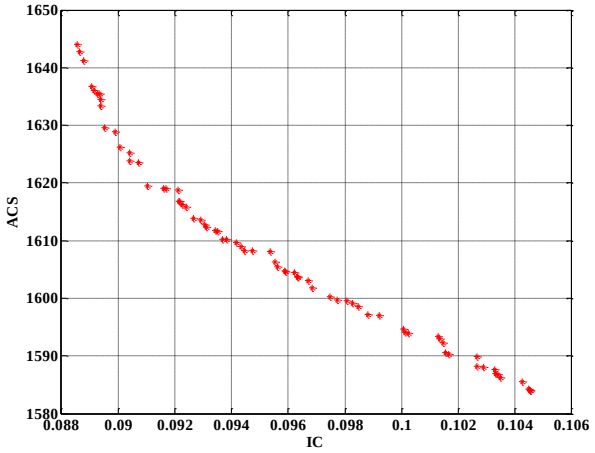
۷- نتایج بهینه سازی

توان خروجی توربین بادی و پنل فتوولتائیک، بر اساس مدلی که در بخش‌های قبل بیان شد، انجام گرفته است. الگوریتم بهینه سازی، به صورت دینامیکی به جستجوی ترکیب‌های بهینه‌ای که دارای حداکثر تطابق بین توان تولیدی و تقاضای بار، با حداقل هزینه هستند، می‌پردازد. همان‌طور گفته شد، برای داشتن تطابق مطلوب، ضریب IC باید تا حد امکان کوچک باشد. مقادیر کم‌تر از ۰/۴، نشان دهنده تطابق مطلوبی هستند. هزینه ACS نیز باید تا حد امکان کوچک باشد. بزرگ بودن CC، معیار دیگری برای این فرایند است. لازم به ذکر است که CC روند تطابق و IC اندازه آن را نشان می‌دهد پس IC نسبت به CC مهم‌تر است [۴۶]. سطوح پرتو برای توابع هدف، دوبه‌دو رسم شده است که در شکل‌های (۱۱-۱۳) آورده شده است. سطح پرتوی سه بعدی برای سه تابع هدف موجود نیز در شکل (۱۴) آورده شده است.

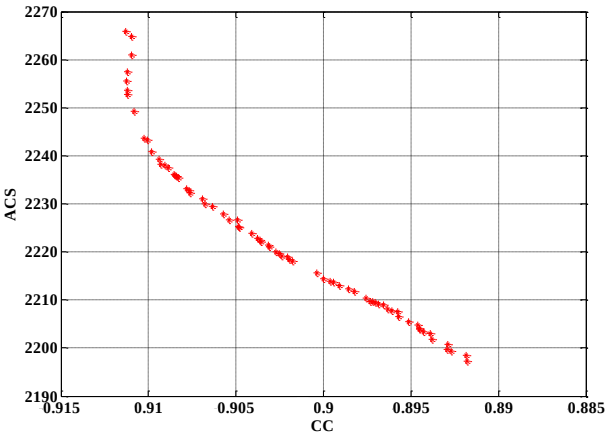
الگوریتم پس از تعداد معین تکرار ($N = N_{max}$) متوقف می‌شود (۳۰۰ = N_{max} و اندازه جمعیت ۲۰۰ = N_{pop} در نظر گرفته شده است).



شکل (۱۱): سطح پرتو دوبعدی برای توابع هدف IC-CC



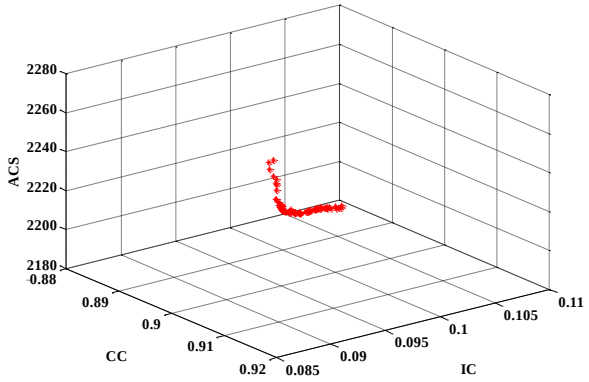
شکل (۱۲): سطح پرتو دوبعدی برای توابع هدف IC-ACS



شکل (۱۳): سطح پرتو دوبعدی برای دو توابع هدف CC-ACS

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016



شکل (۱۴): سطح پرتو سه بعدی برای سه هدف IC-CC-ACS

نتایجی که توسط این فرایند بهینه سازی به دست آمده است، در جدول (۴) نشان داده شده است. ۲۰ جواب بهینه بعد از ۳۰ مرتبه راه-اندازی الگوریتم برای واحدها در این جدول آورده شده است.

جدول (۴): جواب‌های پرتو بدست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی

حل	نتایج به دست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO					
	$N_{Battery}$	N_{Wind}	N_{PV}	ACS	CC	IC
۱	۱/۰۲۴۲	۱/۰۲۶۶	۱/۰۱۰۲	۲۲۰۷/۱	۰/۸۹۲۴	۰/۱۰۴۱
۲	۱/۰۰۰۰	۱/۴۲۰۳	۱/۰۱۱۶	۲۳۰۱/۸	۰/۸۹۳۴	۰/۱۰۵۵
۳	۱/۳۲۴۶	۱/۱۶۴۱	۱/۰۶۸۰	۲۲۷۳/۲	۰/۹۰۲۲	۰/۰۹۸۰
۴	۱/۸۸۴۴	۱/۳۲۵۶	۱/۰۰۶۵	۲۳۴۷/۷	۰/۹۱۱۶	۰/۰۹۰۳
۵	۱/۷۸۰۳	۱/۰۰۲۴	۱/۰۰۰۰	۲۵۵۹/۴	۰/۹۱۱۱	۰/۰۸۸۶
۶	۱/۰۹۴۲	۱/۰۰۰۰	۱/۰۱۰۵	۲۲۰۶/۲	۰/۸۹۴۸	۰/۱۰۱۸
۷	۱/۷۳۷۱	۱/۴۰۰۴	۱/۰۰۵۰	۲۳۵۴/۱	۰/۹۱۲۳	۰/۰۹۰۰
۸	۱/۰۰۰۰	۱/۲۵۱۵	۱/۰۰۴۲	۲۵۵۹/۳	۰/۸۹۰۰	۰/۱۰۴۶
۹	۱/۶۰۳۱	۱/۵۷۵۴	۱/۰۴۴۲	۲۳۹۲/۲	۰/۹۰۸۶	۰/۰۹۴۲
۱۰	۱/۴۹۵۴	۱/۰۰۰۰	۱/۰۲۸۸۶	۲۲۴۰/۶	۰/۹۰۷۸	۰/۰۹۲۳
۱۱	۱/۴۵۸۲	۱/۰۱۷۶	۱/۰۱۲۶	۲۳۳۹/۵	۰/۹۰۷۷	۰/۰۹۲۱
۱۲	۱/۷۰۷۰	۱/۱۴۴۳	۱/۱۶۲۰	۲۳۱۲/۶	۰/۸۹۶۵	۰/۱۰۴۴
۱۳	۱/۵۴۵۲	۱/۴۸۰۵	۱/۰۰۵۱	۲۳۵۸/۶	۰/۹۱۰۹	۰/۰۹۱۴
۱۴	۱/۶۳۳۴	۱/۰۵۲۵	۱/۰۳۷۸	۲۲۶۵/۷	۰/۹۰۸۶	۰/۰۹۱۷
۱۵	۱/۴۵۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۲۴۲	۲۲۶۳/۳	۰/۹۰۶۹	۰/۰۹۲۸
۱۶	۱/۶۸۲۹	۱/۴۵۰۰	۱/۰۱۴۶	۲۳۶۳/۴	۰/۹۱۱۶	۰/۰۹۱۱
۱۷	۱/۵۴۰۸	۱/۲۲۴۹	۱/۰۰۱۷	۲۲۹۵/۱	۰/۹۱۰۵	۰/۰۹۰۷
۱۸	۱/۶۵۰۴	۱/۴۴۹۹	۱/۰۲۸۹	۲۳۶۲/۹	۰/۹۱۰۶	۰/۰۹۲۳
۱۹	۱/۶۵۲۹	۱/۰۰۰۰	۱/۰۱۱۰	۲۳۵۰/۴	۰/۹۱۰۴	۰/۰۸۹۹
۲۰	۱/۴۵۳۶	۱/۹۲۷۵	۱/۰۰۵۰	۲۴۶۰/۷	۰/۹۰۹۶	۰/۰۹۴۱

با گردکردن اعداد بدست آمده برای تعداد بهینه واحدها به سمت بالا، کلیه مقادیر در جدول (۵) خلاصه می‌شود. مقادیر توابع هدف جدید، برای تعداد جدید واحدها نیز در جدول محاسبه شده است.

جدول (۵): مقادیر نهایی توابع هدف برای تعداد بهینه واحدهای

N_{PV}	N_{Wind}	$N_{Battery}$	IC	CC	ACS
۲	۲	۲	۰/۲۵۶۵	۰/۷۵۹۲	۲۶۷۰/۹
۲	۱	۲	۰/۲۴۷۷	۰/۷۵۶۹	۲۴۲۶/۲
۱	۲	۲	۰/۰۹۳۸	۰/۹۱۱۰	۲۵۲۰/۹
۲	۲	۱	۰/۲۵۷۷	۰/۷۵۱۴	۲۵۹۱/۹

از مقایسه جدول (۴) و (۵) مشاهده می‌شود که گرد کردن اعداد بدست آمده برای تعداد واحدها، سبب تغییرات فراوانی در توابع هدف می‌شود. همان‌طور که از جدول (۴) مشخص است، نتایج به دست آمده برای تعداد بهینه واحدها، نزدیک به عدد یک هستند. گرد کردن این اعداد به سمت بالا، سبب برهم خوردن میزان تطابق می‌شود. به همین دلیل است که تعداد بهینه ۱ پنل PV، ۲ توربین بادی و ۲ باتری، دارای نرخ تطابق بسیار بهتری نسبت به دیگر جواب‌ها می‌باشد. یکی از اهداف استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، استفاده حداقل از منابع تجدید ناپذیر (مانند دیزل در این تحلیل) است. پس تعداد ساعت‌هایی که دیزل در کل سال وارد مدار می‌شود، می‌تواند معیاری برای انتخاب ترکیب مطلوب باشد. بنابراین نیاز است که تعداد ساعت-های عملکرد دیزل را نیز محاسبه کنیم. همچنین برای تعداد واحدهای بهینه بدست آمده میزان قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از LPSP بررسی می‌شود. جدول (۶)، تعداد ساعت‌های عملکردی ژنراتور دیزل و نیز مقادیر LPSP هر کدام نشان داده شده است.

جدول (۶): تعداد ساعت‌های عملکردی دیزل برای جواب‌های بهینه

N_{PV}	N_{Wind}	$N_{Battery}$	$LPSP\%$	تعداد ساعات عملکرد دیزل در یک سال (تعداد کل ساعت‌ها = ۸۷۶۰)
۲	۲	۲	۲/۸۵	۳۲۳۰
۲	۱	۲	۱/۰۱	۳۲۶۹
۱	۲	۲	۰/۵۸	۴۹۰۷
۲	۲	۱	۱/۲۴	۳۹۰۶

با بررسی جدول (۶)، مشخص می‌شود که دیزل در حالت استفاده از ۲ پنل PV، ۲ توربین بادی و ۲ باتری، نسبت به دیگر جواب‌ها، کم-تر وارد مدار می‌شود. در این صورت استفاده از منابع تجدید ناپذیر به حداقل می‌رسد اما طبق جدول (۵)، بالاترین هزینه اقتصادی را به دنبال دارد. حالت استفاده از ۱ پنل PV، ۲ توربین بادی و ۲ باتری، اگرچه دارای بیشترین EMR است، اما بیشترین ساعات عملکردی دیزل را نیز به همراه دارد. انتخاب یکی از جواب‌های بهینه به دست آمده، بستگی به نظر طراح، میزان LPSP مورد نظر، شرایط محیطی، قیمت سوخت در کشور مورد بررسی و اطلاع از میزان بحرانی بودن بار دارد.

۸- نتیجه گیری

به دلیل مصرف بسیار سریع منابع فسیلی، به طور قطع در آینده‌ای نه چندان دور منابع تجدیدپذیر انرژی، نقش کلیدی را در تولید انرژی در جهان ایفا خواهند کرد. منابع تجدیدپذیر باد و خورشید، اصلی‌ترین منابع انرژی هستند که تا اندازه زیادی پتانسیل تامین توان را در مقیاس بالا دارند. با این حال، زمانیکه این منابع به صورت مستقل

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

استفاده می شوند، به دلیل ذات غیرقابل پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی، قابلیت اطمینان آن‌ها پایین است. به دلیل ذات تکاملی این دو منبع انرژی، هنگامی که با یکدیگر ترکیب می شوند، نه تنها قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد بلکه هزینه اقتصادی نیز کاهش می یابد. در این مقاله، تمرکز اصلی، تأمین انرژی برای تقاضای بار موجود، با هدف استفاده حداکثر از منابع تجدیدپذیر انرژی، علی‌رغم غیرقابل پیش‌بینی بودن شرایط جوی بود؛ که امروزه موضوع اغلب مقالات و نیز مشکل اساسی در راه‌اندازی این سیستم‌ها به صورت عملی به شمار می‌آید. سیستم ترکیبی مستقل پیشنهادی، متشکل از سلول خورشیدی، توربین بادی، دیزل و باتری می باشد. هدف، تعیین تعداد بهینه واحدهای موجود می باشد. از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه MOPSO برای رسیدن به این هدف، استفاده شده است. از داده‌های واقعی شرایط آب و هوایی، برای یک منطقه انتخابی در جنوب شرقی ایران استفاده شده است. دو رویکرد مختلف، بر مبنای تطابق توان تولیدی و تقاضای بار، و نیز ارزیابی احتمال هدر رفت توان (LPSP) بررسی شده شده است. اضافه نمودن باتری و دیزل به سیستم ترکیبی توربین بادی-سلول فتوولتائیک، و اعمال الگوریتم کنترلی مناسب برای راه‌اندازی ژنراتور دیزل و استفاده از باتری، نه تنها سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود، بلکه میزان تطابق بازه‌های تولید و مصرف را بالا برده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که استفاده از ۱ پنل PV، ۲ توربین بادی و ۲ باتری دارای نرخ تطابق الکتریسیته بالاتری نسبت به دیگر جواب‌ها و نیز مقدار LPSP قابل قبولی می باشد. اما این، در گرو تعداد ساعت‌های عملکردی بالاتری نسبت به سایر جواب‌ها است. حالت دیگر، استفاده از تعداد ۲ برای هرکدام از پنل های PV، توربین بادی و باتری را پیشنهاد می‌کند، که ساعت‌های عملکردی دیزل، کم‌ترین و میزان تطابق در حد قابل قبول است، اما دارای بالاترین هزینه اقتصادی می‌باشد. طراح می‌تواند بهترین ترکیب را با توجه میزان اهمیتی که به هر هدف می‌دهد، انتخاب کند.

مراجع

[1] Energy Information Administration, "*Annual Energy Outlook 2015 With Projections to 2040*", US Energy Information Administration, Washington, DC, 2015.

[2] A. F. Ghoniem, "*Needs, resources and climate change: clean and efficient conversion technologies*", Progress in Energy and Combustion Science, Elsevier, vol. 37, no. 1, pp. 15-51, 2011.

[3] Massachusetts Institute of Technology, *"The Future of* Coal", Cambridge, MA, United States, 2007.

[4] National Energy Technology Laboratory (NETL), "*Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants: Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity*", U.S., 2007.

[۵] امیرحسین شهیری نیا، سید مسعود مقدس تفرشی، امین حاجی زاده گستج، علیرضا مقدم جو، **"طراحی بهینه سیستم قدرت ترکیبی چند منبعی مستقل از شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال سوم، شماره دوم، ص ۲۴-۳۲، پاییز و زمستان ۱۳۸۵.

[6] B. Tarroja, F. Mueller, D. E. Joshua, S. Samuelsen, *"Metrics for evaluating the impacts of intermittent renewable generation on utility load-balancing"*, Journal of Energy, vol. 44, p. 546-562, 2012.

[7] S. Abedi, A. Alimardani, G. B. Gharehpetian, G. H. Riahy, S. H. Hosseinian, *"A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 1577–1587, 2012.

[8] Debbie Sparks, A. M., Samantha, K., Krog Pieter, M. M., Thuli, D., "*Optimization of a PV/wind hybrid system under limited water resources*", Renewable Sustainable Energy; 47 (0): 324–31, 2015.

[9] Vafaei,M., *Optimally-Sized Design of a Wind/Diesel/Fuel Cell Hybrid System fo Remote Community*, Master of Applied Science Electrical and Computer Engineering University of Waterloo 2011.

[10] Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J. F., Abdulwahid, U., & Baring-Gould, I. *Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries*, Risø National Laboratory Information Service Department, Denmark, 2005.

[11] Zhao, Y. S., Zhan, J., Zhang, Y., Wang, D. P., & Zou, B. G. *"The Optimal Capacity Configuration Of an Independent Wind/PV Hybrid Power Supply System Based On Improved PSO Algorithm"*, IEEE,pp.1-7, 2006.

[12] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, K. Kalaitzakis, *"Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms*". Solar Energy, pp. 1072–1088, 2006.

[13] J. Dhillon, *Multi-objective Optimization Of power Dispatch Problem Using NSGA-II*, Master of Engineering Power Systems & Electric Drives, Thapar University, Patiala, 2009.

[14] Juhari Ab., Razak, Sopian, K., Ali, Y., Alghoul, M. A., Zaharim, A., & Ahmad, I. "*Optimization of PV-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity*", European Journal of Scientific Research, vol. 25, pp. 663-671, 2009.

[15] Erdinc, O., & Uzunoglu, M. *"Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 1412– 1425, 2012.

[16] Boomsma, T. K., Meade, N., & Fleten, S. E. *"Renewable energy investments under different support schemes: A real options approach"*, European Journal of Operational Research, pp. 225–237, 2012.

[17] Alvarez-Valdes, R., Crespo, E., Tamarit, J.M., & Villa, F. *"GRASP and path relinking for project scheduling under partially renewable resources*", European Journal of Operational Research, pp. 1153–1170, 2008.

[18] Yang, H., Zhou, W., Lua, L., & Fang, Z., "*Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm*", Solar Energy, pp. 354–367, 2008.

[19] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., & Wang, C. *"Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems*", Renewable Energy, pp. 1641 – 1656, 2006.

[20] Wei, Z. *Simulation and Optimum Design of Hybrid Solar-Wind and Solar-Wind-Diesel Power Generation Systems*, Doctor of Philosophy, The Hong Kong Polytechnic University, 2007.

[21] Mokheimer, E. A., Abdullah, A. S., Habib, M. A., Alzaharnah, L., *"A new study for hybrid PV/wind off-grid*

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

[41] Scheaffer, L., Mulekar, S., & MvClave, T. *Probability and Statistics for Engineers*. (5th ed.), Canada: Richard Stratton, 2011.
[42] Born, F. J. *Aiding Renewable Energy Integration through Complimentary Demand-Supply Matching*, Doctor of Philosophy, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, 2001.
[43] Yang, H.X., Burnett, J., Lu, L., "Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong", Renew Energy, 28(11), 1813-24, 2003.
[44] Nazari Estahbanati, S. R., Barakati, S. M., Mehrjoo, M., "*Linear Integer (LIP) Programing to Optimization and Sizing a Wind/Solar/Battery System for Islanding Purpose*", Journal of mathematics and computer science, 13, pp. 194-211, 2014.
[45] Rao, S. S. *Engineering Optimization Theory and Practice*, Fourth Edition, 2009.
[46] Waqas, S. *Development of an Optimisation Algorithm for Auto sizing Capacity of Renewable and Low Carbon Energy Systems*, Master of Science, Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde Engineering, 2011.

power generation systems with the comparison of results from homer", Int J Green Energy, pp. 526–42, 2015.
[22] Elbaset, A. A. *"Design, Modeling and Control Strategy of PV/FC Hybrid Power System", Electrical Systems*, pp. 270-286, 2011.
[23] Bakelli, Y., Arab, A. H., & Azoui, B. *"Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept*", Solar Energy, pp. 288-294, 2011.
[24] Bilala, B. O., Samboua, V., Kébé, C.M.F., Ndiaye, P. A., & Ndongo, M. *"Methodology to Size an Optimal Stand-Alone PV/wind/diesel/battery System Minimizing the Levelized cost of Energy and the CO2 Emissions*", Energy Procedia, pp. 1636 – 1647, 2012.
[25] Yang, H., Lu, L., & Zhou, W. *"A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system"*, Solar Energy, pp. 76-84, 2007.
[26] Fetanat, A., Khorasaninejad, E., "*Size optimization for hybrid photovoltaic wind energy system using ant colony optimization for continuous domains based integer programming*", Appl Soft Comput, pp. 196–209, 2015.
[27] Dufo-Lopez, R., & Bernal-Agustin, J. L. "*Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems*", Renewable Energy, pp. 2559– 2572, 2008.
[28] Golkar, M.A., Hosseinzadeh, S., and Hajizadeh, A. "*Optimal Multi-Objective Planning of Distribution System with Distributed Generation*", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.5, No.2, Fal and Winter 2008.
[29] Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Va´zquez, D., & Rı´os-Moreno, G.J. *"Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies*", Solar Energy, pp. 1077–1088, 2012.
[30] Mahesh, A., Singh Sandhu, K., "*Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review andfindings*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 52, pp. 1135–1147, 2015.
[31] AEMO, *Victorial Annual Planning Report: Australian Energy Market Operator Limited (AEMO)*, 2010.
[32] Henderson, N. *Report to reliability panel on demand forecast: AEMO*, 2010.
[33] Hsieh, C. Y., & Hsieh, C. Y., "*Climate Change Prediction by Wireless Sensor Technology*", International Electrical Engineering Journal (IEEJ), pp. 620-624, 2012.
[34] Borowy, B. S., & Salameh, Z. M., *"Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System*", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 11, pp. 367-375, 1996.
[35] Nelson, F., Biswas MA, R., "*Regression analysis for prediction of residential energy consumption*", Renewable Sustainable Energy;47(0):332–43, 2015.
[36] Patel, M. R. *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*, Second ed, Taylor & Francis Group, 2006.
[37] Mohammadi, M., Hosseinian, S.H., & Gharehpetian, G.B. *"GA-based optimal sizing of microgrid and DG units under pool and hybrid electricity markets*", Electrical Power and Energy System, pp. 83–92, 2012.
[38] Ortiz Rivera, E. I. (2006). *Modeling and analysis of solar distributed generation*, Ph.D. Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University.
[39] Rios Rivera, M. *Small Wind/Photovoltaic Hybrid Renewable Energy System Optimization*, Master of Science, Electrical Engineering, Puerto Rico, Mayagüez Campus, 2008.
[40] U. S. Battery, Corona, California Location, 2016, www.usbattery.com

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.5.3]