

## تعیین اندازه بهینه سیستم ترکیبی، فتولتائیک / باد / باتری با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات با عامل انقباض

اکبر ملکی<sup>۱</sup>، مهران عامری<sup>۲\*</sup>، فرشید کی‌نیا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی سیستم های انرژی، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران

akbar.maleki20@yahoo.com

<sup>۲</sup> استاد دانشکده فنی و مهندسی و پژوهشکده انرژی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

ameri\_mm@uk.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

fkeynia@gmail.com

**چکیده:** در این مقاله، یک سیستم ترکیبی فتولتائیک، بادی با ذخیره‌ساز باتری به منظور تأمین یک الگوی بار نمونه مستقل از شبکه طراحی می‌شود. هدف از این طراحی، تأمین انرژی مورد نیاز و کمینه‌سازی هزینه کل تولید در طول عمر سیستم است. به همین دلیل، با استفاده از الگوریتم جدیدی تحت عنوان الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با عامل انقباض که دارای ویژگی‌هایی از قبیل سرعت همگرایی بالا و توانایی جست‌وجوی بیشتر فضای جست‌وجوست، اندازه بهینه این منابع تعیین و تابع هزینه کمینه می‌شود. اندازه بهینه اجزای این سیستم در شرایط مختلف عملکرد با اطلاعات واقعی بار و هواشناسی یکی از مناطق جنوبی (شهر رفسنجان) و شمال غرب (شهر نمین) و شمال شرق (شهر داورزن) ایران مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ذکرشده قدرتمندتر از الگوریتم انبوه ذرات و جست‌وجوی ممنوع است.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی، پنل فتولتائیک، باتری، بهینه‌سازی، انبوه ذرات با عامل انقباض.

## ۱. مقدمه

شدن قیمت‌ها و افزایش قیمت سوخت دیزل و کاهش قیمت هیدروژن، دریافتند که سوخت هیدروژن می‌تواند در مواقعی جایگزین مناسبی برای سوخت دیزل باشد. کورتولیز و کلوکوتسا [۷] از الگوریتم ژنتیک برای اندازه‌یابی بهینه یک نیروگاه مختلط بادی-فتوولتائیک استفاده کرده‌اند.

از مشکلاتی که در این روش‌ها می‌توان به آن اشاره کرد، سرعت همگرایی پایین الگوریتم‌های اعمالی، همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و امکان گیر افتادن در بهینه‌های محلی الگوریتم‌ها و عدم بررسی جامع روی سیستم‌های مورد نظر است. می‌توان با حل این مسئله به صورت جامع و با در نظر گرفتن تغییر شرایط به کمک الگوریتم انبوه ذرات با عامل انقباض، سرعت همگرایی را افزایش داد و از افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری کرد. این الگوریتم دامنه وسیع‌تری از فضا را جست‌وجو کرده و در نتیجه می‌توان به یک جواب با قابلیت اطمینان بالاتری برای تأمین بار با هزینه بهینه رسید.

در این مقاله، پس از بهینه‌سازی ابعاد سیستم، به بررسی اندازه بهینه اجزای سیستم ترکیبی<sup>۳</sup> (HS)، فتوولتائیک-بادی با ذخیره‌سازی باتری پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، کمینه سازی هزینه‌های این نیروگاه در طول عمر سیستم با قید پوشش کامل تقاضای بار با قابلیت اطمینان بالا و سرعت همگرایی بالاست. به همین دلیل، از الگوریتم انبوه ذرات با عامل انقباض استفاده شده است. برای مشاهده کارایی این روش با الگوریتم انبوه ذرات و جست‌وجوی ممنوع مورد مقایسه قرار گرفته است. داده‌های بادسنجی و تابش مورد استفاده مربوط به نواحی جنوب (شهر رفسنجان)، شمال غرب (شهر نمین) و شمال شرق (شهر داورزن) ایران است.

## ۲. ابعاد و کارکرد سیستم ترکیبی

تعیین ابعاد سیستم برای قابلیت اطمینان مناسب برق تولیدی و همچنین بهینه بودن از لحاظ اقتصادی ضروری است. بدین منظور باید اختلاف توان تولیدی ( $P_{Gen}$ ) از انرژی‌های نو و تقاضای بار ( $P_L$ ) طبق معادله (۱) حداقل شود.

$$\Delta P = P_{Gen} - P_L \quad (1)$$

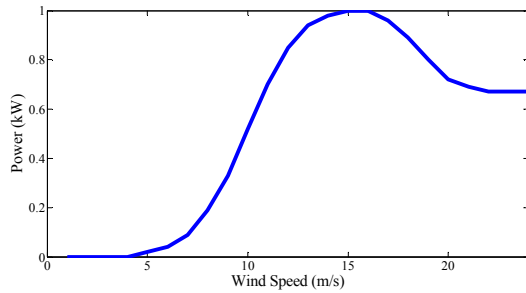
شکل (۱) سیستم ترکیبی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این سیستم، PV و WG به عنوان منابع اصلی در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که از باتری به عنوان سیستم پشتیبان و ذخیره‌کننده استفاده می‌شود. در شکل (۱)، خروجی واحدها به یک جعبه فرمان متصل می‌شوند. تعدادی باتری نیز به عنوان سیستم ذخیره‌ساز به این جعبه

افزایش همیشگی تقاضای انرژی، طبیعت تجدیدنپذیر و هزینه‌های سنگین سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های موجود در زمینه زیست‌محیطی و مشکلاتی از این قبیل، تمایلات جدیدی را به فناوری‌های تولید توان تجدیدنپذیر ایجاد کرده است. در این بین، انرژی‌های بادی و خورشیدی از مهم‌ترین منابع تجدیدنپذیر محسوب می‌شوند. این منابع انرژی به دلایلی از قبیل بازده بالا، عدم انتشار گازهای آلاینده و ساختار انعطاف‌پذیر، پتانسیل بالایی در تبدیل به منابع انرژی سبز در آینده‌ای نزدیک را خواهند داشت [۱].

منابع انرژی متعدد شامل پیل سوختی، فتوولتائیک (PV)، توربین بادی<sup>۲</sup> (WG)، مولدهای دیزلی، توربین‌های گازی و میکروتوربین‌ها در ترکیب با یکدیگر می‌توانند سیستم ترکیبی انرژی تشکیل دهند. با وجود این منابع، از واحدهای سلول خورشیدی و توربین‌های بادی در تغذیه بار مناطق دورافتاده به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مشخصه این سیستم‌ها تقریباً مکمل یکدیگرند، معمولاً به صورت ترکیبی با یکدیگر به کار می‌روند. به علت پاکیزگی و تجدیدنپذیر بودن این انرژی‌ها، کشورهای متعددی علاقه‌مند به استفاده از آن بوده و تحقیقاتی در این راستا انجام می‌دهند.

روش‌های مختلفی برای طراحی بهینه و کمینه‌سازی هزینه‌های نیروگاه‌های بادی و خورشیدی ارائه شده است. عسکری و عامری [۲] امکان‌سنجی اقتصادی سیستم ترکیبی، دیزل-فتوولتائیک با ذخیره‌سازی باتری را انجام داده و نتیجه گرفتند که با افزایش قیمت سوخت دیزل، سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک-باتری، بهترین گزینه هستند. آن‌ها همچنین در تحقیق دیگری، اندازه‌یابی بهینه یک سیستم ترکیبی بادی-فتوولتائیک مستقل از شبکه را در شهر کرمان مورد بررسی قرار داده‌اند و بیان کردند سیستم ترکیبی فتوولتائیک-باتری برای این نوع مناطق بهترین حالت است [۳]. زئی [۴] روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی برای انتخاب ظرفیت بهینه و محل نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه بر اساس حالت‌های مختلف ارائه داده که هدف این روش کم کردن هزینه‌ها و پیشینه‌سازی انرژی بر مترمربع بود. کلگ و نه‌ریر [۵] از یک الگوریتم جست‌وجوی تکراری برای یافتن اندازه بهینه یک سیستم ترکیبی بادی-فتوولتائیک با ذخیره‌ساز باتری استفاده کرده‌اند. گُش و همکاران [۶] ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های تولید پراکنده را مورد توجه قرار داده‌اند. آن‌ها با واقعی‌تر

1. Photovoltaic
2. Wind Generation



شکل (۲): توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد

جدول (۱): مشخصات فنی توربین بادی مورد مطالعه

۱kW	توان نامی
۳m.s <sup>-1</sup>	سرعت قطع پایین
۹m.s <sup>-1</sup>	سرعت نامی
۲۰m.s <sup>-1</sup>	سرعت قطع بالا
۱۴۴۳ \$.turbine <sup>-1</sup>	هزینه سرمایه اولیه
۲۵٪ هزینه هر توربین	هزینه نصب و راه اندازی
۲۰ سال	طول عمر
۲Cents.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	هزینه نگهداری و عملکرد

## ۲.۲. پنل فتوولتائیک

سیستم فتوولتائیک فرایندی است که انرژی خورشید را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. در فناوری فتوولتائیک، از سلول های نیمه هادی که از یک دیود p-n بزرگ تشکیل شده اند، استفاده می شود؛ به این صورت که با تابش نور بر روی هر سلول، اختلاف پتانسیل الکتریکی و جریان مستقیم تولید می شود. چندین سلول با هم ترکیب شده و یک ماژول را برای تولید جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی مورد نظر ایجاد می کنند. توان تولیدی PV از معادله (۳) به دست می آید [۱۱].

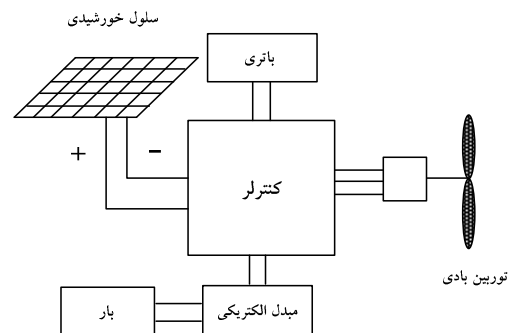
$$P_{Sol-Each}^t = P_{rs} \left( \frac{r^2}{R_{STD} R_C} \right) \quad \text{if} \quad 0 \leq r < R_C$$

$$P_{Sol-Each}^t = P_{rs} \frac{r}{R_{STD}} \quad \text{if} \quad R_C \leq r < R_{STD} \quad (3)$$

$$P_{Sol-Each}^t = P_{rs} \quad \text{if} \quad R_{STD} \leq r$$

در این رابطه،  $P_{Sol-Each}^t$ ، توان تولیدی پنل فتوولتائیک در زمان  $t$ ،  $P_{rs}$ ، توان نامی هر پنل فتوولتائیک،  $r$  پیش بینی تابش خورشید در زمان مورد نظر،  $R_C$  یک نقطه تابش معین که معمولاً  $150 \text{ W.m}^{-2}$  در نظر گرفته می شود،  $R_{STD}$  تابش استاندارد خورشید که معمولاً  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  در نظر گرفته می شود. سایر مشخصات و پارامترهای پنل فتوولتائیک

فرمان متصل می باشند. باتری ها مازاد انرژی سیستم را در خود ذخیره کرده و در زمان مقتضی، مانند کاهش سرعت باد یا تابش یا پیک مصرف، آن را بار دیگر به سیستم بازمی گردانند. یک جعبه فرمان نیز پل ارتباطی بین اختلاف پتانسیل الکتریکی DC و بار AC مصرفی است. خروجی باتری ها و ورودی جعبه فرمان DC/AC به صورت موازی به یکدیگر متصل می شوند. انرژی تولیدی پنل های فتوولتائیک و توربین های بادی از طریق جعبه فرمان DC/AC به مصرف کننده منتقل می شود. مازاد انرژی موجود نیز در اختیار بانک باتری قرار می گیرد.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم ترکیبی مورد مطالعه

## ۱.۲. توربین بادی

توربین بادی با تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی و سپس با انتقال این انرژی به ژنراتور، الکتریسیته تولید می کند. شکل (۲) توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد را نشان می دهد. مشاهده می شود توان خروجی توربین بر حسب توربین از مقدار مشخصی از سرعت باد به بعد ثابت شده و برای سرعت های بیشتر از سرعت بیشینه، توربین متوقف می شود. توان خروجی توربین بادی از معادله (۲) به دست می آید [۸].

$$P_{Wind-Each}^t = 0 \quad \text{if} \quad v \leq V_i \quad \text{or} \quad v \geq V_o$$

$$P_{Wind-Each}^t = P_r \frac{v - V_i}{V_r - V_i} \quad \text{if} \quad V_i < v < V_r \quad (2)$$

در این رابطه،  $P_{Wind-Each}^t$ ، توان خروجی توربین بادی در زمان  $t$ ،  $P_r$ ، توان نامی هر توربین،  $v$ ، سرعت باد،  $V_i$ ، سرعت قطع پایین،  $V_o$ ، سرعت قطع بالا و  $V_r$ ، سرعت نامی توربین است. سایر مشخصات و پارامترهای توربین بادی استفاده شده در مدل سازی، در جدول (۱) نشان داده شده است [۷، ۹ و ۱۰].

استفاده شده در مدل سازی، در جدول (۲) نشان داده شده است [۷، ۹ و ۱۰].  
 مبدل های استفاده شده در مدل سازی، در جدول (۳) نشان داده شده است [۹، ۱۰ و ۱۲].

جدول (۳): مشخصات باتری ها و مبدل های مورد مطالعه		جدول (۲): مشخصات فنی ماژول های خورشیدی	
باتری		توان نامی	
۲/۱ kWh	ظرفیت نامی	۲۶۰ W	
۱۲ V	اختلاف پتانسیل الکتریکی نامی	۳۱/۶ V	اختلاف پتانسیل الکتریکی
٪۸۰	DOD	۸/۷۳ A	جریان
٪۸۵	بازده زمان شارژ	۳۱۲\$.panel <sup>-1</sup>	هزینه سرمایه اولیه
٪۱۰۰	بازده زمان دشارژ	۵۰٪ قیمت اولیه	هزینه نصب و راه اندازی
۱۷۰\$.	هزینه سرمایه اولیه	۲۰	طول عمر
-	هزینه نگهداری و عملکرد	۰/۵Cent.kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	هزینه نگهداری و عملکرد
۰/۰۰۰۲	تلفات		
۴ سال	عمر کاری		
مبدل			
۴۴۰۰W	توان نامی		
٪۸۰	بازده		
۲۱۵۹\$.	هزینه سرمایه اولیه		
-	هزینه تعمیر و نگهداری		
۱۰ سال	عمر کاری		

### ۳.۲. باتری و مبدل

توان ورودی باتری با توجه به عملکرد شارژ یا دشارژ می تواند مثبت یا منفی باشد. وضعیت شارژ (SOC) باتری، با توجه به محاسبات توان تولیدی و بار مصرفی، چنین به دست می آید:

اگر  $P_{pw}(t) + P_{pv}(t) = P_L(t)$ ، آنگاه ظرفیت باتری بدون تغییر باقی می ماند. اگر  $P_{pw}(t) + P_{pv}(t) > P_L(t)$ ، آنگاه مازاد توان تولیدی سیستم ترکیبی به منظور شارژ بانک باتری مورد استفاده قرار گرفته و ظرفیت جدید باتری از معادله (۴) به دست می آید [۱۲].

$$P_b(t) = P_b(t-1) \times (1 - \sigma) + \left[ P_z(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_{bc} \quad (4)$$

اگر  $P_{pw}(t) + P_{pv}(t) < P_L(t)$ ، آنگاه کسری توان، برای پاسخگویی به نیاز بار، باید توسط باتری تأمین شده و باتری در حالت دشارژ قرار بگیرد. البته بانک باتری، با ظرفیت نامی تنها مجاز است تا میزان محدودی دشارژ شود. میزان حداکثر عمق دشارژ مجاز (DOD) توسط طراح سیستم و در آغاز فرایند بهینه سازی تعیین می شود. ظرفیت جدید باتری در این حالت، از معادله (۵) به دست می آید [۱۲].

$$P_b(t) = P_b(t-1) \times (1 - \sigma) + \left[ \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} - P_z(t) \right] \cdot \eta_{bf} \quad (5)$$

در این روابط،  $P_{pw}(t)$ ،  $P_{pv}(t)$  و  $P_L(t)$  به ترتیب توان تولیدی توسط توربین بادی، پنل فتوولتائیک و تقاضای بار است؛  $P_b(t)$  و  $P_b(t-1)$  مقدار شارژ باتری در لحظه  $t$  و  $t-1$  است؛  $P_z(t)$  مجموع توان تولیدی سیستم ترکیبی و  $P_L(t)$  توان مورد نیاز بار در لحظه  $t$  است.  $\eta_{bc}$ ،  $\eta_{bf}$  و  $\eta_{inv}$  به ترتیب بازده لحظه شارژ باتری، دشارژ و بازده اینورتر،  $\sigma$  تلفات باتری است. در همین راستا شکل (۳) نشان دهنده نقش شارژ و دشارژ باتری در سیستم های ترکیبی در هر لحظه (بازه یک ساعتی) یا به عبارت دیگر، نقش باتری در تأمین توان لحظه ای بار در سیستم های ترکیبی است. سایر مشخصات و پارامترهای باتری ها و

### ۳. فرمول بندی مسئله و راهبرد کنترلی

با توجه به مشخصه غیرپیوسته باد و همچنین تابش خورشید و وابستگی زیاد آن ها به شرایط جوی، مهم ترین بحث، طراحی سیستم با قابلیت اطمینان مناسب در تأمین بار است. در این صورت، توجه به هزینه سیستم اجتناب ناپذیر است، لذا هدف از طراحی بهینه سیستم ترکیبی، تأمین بار با قابلیت اطمینان بالا و هزینه مناسب است. در سیستم ترکیبی مورد مطالعه، تعداد توربین های بادی، پنل های فتوولتائیک و ظرفیت باتری باید به طور بهینه تعیین شود. بدین منظور از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات با عامل انقباض استفاده شده است که با توجه به عملکرد سیستم، هزینه تمام اجزای سیستم را در حالت های قابل قبول محاسبه کند. بنابراین سیستم به گونه ای است که با حداقل هزینه، انرژی باتری را برای روز بعد نگه داشته و در مواقعی که میزان انرژی مورد نیاز بیشتر از مقدار تولید شده باشد، به سیستم بازگرداند.

(۹) و (۱۰) به دست می آید. بنابراین کل هزینه سرمایه اولیه  $C_{Cpt}$ ، از رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$i = \frac{f - i'}{f + 1} \quad (۸)$$

$$C_{Batt} = P_{Batt} \times \sum_{m=0,4,8,12,16} \frac{1}{(1+i)^m} \quad (۹)$$

$$C_{Inv} = P_{Inv} \times \sum_{m=0,10} \frac{1}{(1+i)^m} \quad (۱۰)$$

$$C_{Cpt} = CRF \times \left[ \begin{matrix} N_{Sol} C_{Sol} + N_{Wind} C_{Wind} + \dots \\ N_{Batt} C_{Batt} + N_{Inv} C_{Inv} + C_{Backup} \end{matrix} \right] \quad (۱۱)$$

$i'$  نرخ بهره اسمی و  $f$  نرخ تورم،  $N_{Sol}$  تعداد پنل های فتوولتائیک،  $C_{Sol}$  واحد هزینه پنل شامل هزینه اولیه و هزینه نصب و راه اندازی،  $N_{Wind}$  تعداد توربین های بادی،  $C_{Wind}$  واحد هزینه توربین شامل قیمت و هزینه نصب و راه اندازی توربین بادی،  $N_{Batt}$  تعداد باتری ها،  $P_{Batt}$  هزینه باتری،  $C_{Batt}$  واحد هزینه باتری،  $P_{Inv}$  هزینه مبدل جریان،  $C_{Inv}$  واحد هزینه کنترلر،  $N_{Inv}$  تعداد مبدل های جریان،  $C_{Backup}$  هزینه ژنراتور پشتیبان برای استفاده در زمانی که انرژی خورشیدی و بادی و ذخیره باتری کافی نباشد (که در این پروژه \$۲۰۰۰ در نظر گرفته شده)، است [۹ و ۱۰].

قدرت تولید شده توسط پنل های خورشیدی در زمان  $t$  طبق معادله (۱۲) محاسبه می شود.

$$P_{Sol}^t = N_{Sol} \times P_{Sol-Each}^t \quad (۱۲)$$

می توان قدرت هر سال را با توجه به داده های تابشی به دست آورد. همچنین می توان قدرت تولید شده توسط توربین های بادی را با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه کرد.

$$P_{Wind}^t = N_{Wind} \times P_{Wind-Each}^t \quad (۱۳)$$

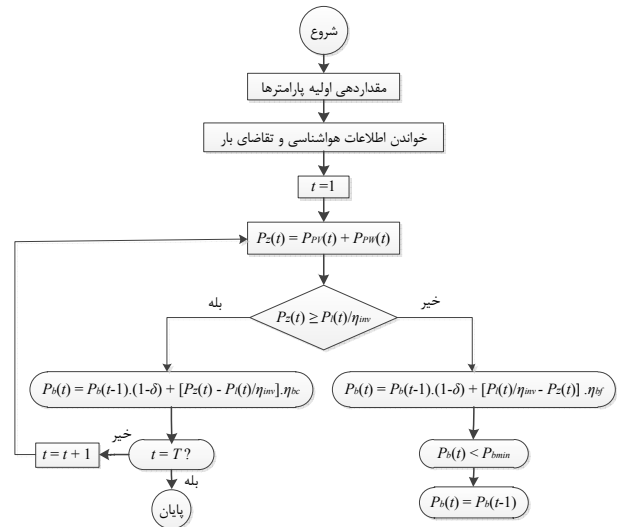
می توان با استفاده از داده های سرعت باد در ارتفاع معین، قدرت تولیدی را محاسبه کرد. هزینه کل تعمیر و نگهداری  $C_{Mtn}$ ، توسط معادله (۱۴) قابل محاسبه است.

$$C_{Mtn} = \left[ C_{Mtn}^{Sol} \times \sum_{t=1}^{24} (P_{Sol}^t \cdot \Delta t) + C_{Mtn}^{Wind} \times \sum_{t=1}^{24} (P_{Wind}^t \cdot \Delta t) \right] \times 365 \quad (۱۴)$$

$C_{Mtn}^{Sol}$  هزینه تعمیر و نگهداری PV بر هر kWh و  $C_{Mtn}^{Wind}$  هزینه تعمیر و نگهداری توربین بادی بر هر kWh است.

### ۲.۳. قیود

روابط (۱) تا (۱۴) نشان دهنده جزئیات تابع هدف است. علاوه بر این معادلات، برخی از محدودیت ها نیز باید در طول بهینه سازی در نظر



شکل (۳): بلوک دیاگرام، محاسبه وضعیت شارژ باتری در سیستم

### ۱.۳. تابع هدف

در روش پیشنهادی، خروجی الگوریتم، تعداد توربین های بادی، پنل های فتوولتائیک و باتری هاست. این تعداد باید به گونه ای بهینه شود که علاوه بر تأمین انرژی مصرفی، هزینه ۲۰ ساله سیستم را نیز به حداقل برساند. هزینه سیستم شامل هزینه خرید و نصب، هزینه نگهداری و تعمیرات اجزا در طول ۲۰ سال عملکرد سیستم است که از معادله (۶) محاسبه می شود.

$$C_T = C_{Cpt} + C_{Mtn} \quad (۶)$$

$C_T$  هزینه ۲۰ ساله کل طرح،  $C_{Cpt}$  هزینه سرمایه اولیه،  $C_{Mtn}$  کل هزینه تعمیر و نگهداری در ۲۰ سال عملکرد سیستم است.

در اینجا باید توجه کرد که کل هزینه اولیه در شروع پروژه رخ می دهد، اما هزینه های تعمیر و نگهداری در طول پروژه رخ می دهد. در نتیجه هزینه های زمان های مختلف را نمی توان مستقیماً در مقایسه با هزینه های اولیه مورد استفاده قرار داد، اما می توان با استفاده از معادله (۷) ارزش پولی را در یک زمان به ارزش معادل پولی در زمان دیگر تبدیل کرد. در این معادله، هزینه اولیه ( $P$ ) به هزینه سالیانه ( $A$ ) تبدیل می شود.

$$CRF = \frac{A}{P} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۷)$$

در آن،  $i$  نرخ بهره سالیانه است که از رابطه (۸) به دست می آید و  $n$  طول عمر سیستم (بر حسب سال) است. در این پروژه، بعضی از اجزای سیستم ترکیبی باید در طول عمر سیستم چند بار تعویض شوند. طول عمر باتری ۴ سال و طول عمر مبدل های جریان ۱۰ سال است. به همین دلیل واحد هزینه باتری و مبدل های جریان از رابطه

در این روابط،  $x^{gbast}$  بهترین موقعیتی است که به وسیله همه ذرات پیدا شده،  $w$  ضریب اینرسی،  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  با توزیع یکنواخت و همچنین  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب یادگیری هستند.  $r_1$  و  $r_2$  باعث می شوند که نوعی گوناگونی در جوابها به وجود بیاید و به این نحو، جست و جوی کاملی روی فضا انجام پذیرد.  $c_1$  ضریب یادگیری مربوط به تجارب هر ذره است و در مقابل  $c_2$ ، ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع است. ضریب اینرسی  $w$  بر روی همگرایی الگوریتم PSO تأثیر مستقیم دارد. در واقع می توان به واسطه ضریب اینرسی، تأثیر سرعت های گذشته را بر سرعت های زمان حال کنترل کرد. می توان برای برقراری موازنه بهتر میان جست و جوی سراسری و جست و جوی محلی، مقدار  $w$  را تغییر داد. مقدار زیاد برای  $w$  باعث می شود که ذرات موجود در الگوریتم، به جست و جوی مناطق جدیدتر روی بیایند و یک جست و جوی سراسری انجام دهند. در مقابل یک مقدار کم برای  $w$  باعث می شود که ذرات در منطقه محدودی بمانند و در واقع یک جست و جوی محلی را انجام دهند [۱۴ و ۱۵]. مقادیر بزرگتر از یک برای  $w$  باعث ناپایدار شدن سیستم ذرات می شود. از طرفی به ازای مقادیر کمتر برای  $w$ ، سرعت همگرایی سامانه بیشتر خواهد شد [۱۶]. یک مقدار مناسب برای  $w$ ، باعث ایجاد تعادل بین جست و جوی محلی و سراسری می شود و در اغلب اوقات باعث کاهش تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی به یک جواب مناسب می شود. در الگوریتم ابتدایی PSO، مقدار  $w$  ثابت در نظر گرفته می شد (در این مقاله ضریب اینرسی اعمال شده  $w=1$  است). اما نتایج عملی حاکی از آن هستند که بهتر است مقدار  $w$  در مراحل ابتدایی، یک مقدار بزرگ در نظر گرفته شود تا یک جست و جوی کامل و سراسری از فضای جست و جوی صورت گیرد. سپس در طی مراحل اجرای الگوریتم، مقدار  $w$  به تدریج کاهش داده می شود تا الگوریتم به مرز همگرایی نزدیک شود و جواب های دقیق تری به دست بدهد. با استفاده از معادله (۲۳) می توان به این اصل دست یافت.

کندی ضمن تحقیقات خود در سال ۱۹۹۸، دریافت که برای ذرات تک بعدی که به صورت غیر تصادفی حرکت می کنند، اگر مقدار  $c_1+c_2$  برای الگوریتم PSO بین صفر و ۴ باشد، مسیرهایی که ذرات طی می کنند، قابل قبول ترند (این ضرایب در این مقاله  $c_1=c_2=2$  اعمال شده است). با تحلیل هایی که بر روی سیستم حرکت ذرات انجام شد، راهبردی برای تعیین ضرایب یادگیری  $c_1$  و  $c_2$  ایجاد شده است که ۱. از ناپایدار شدن سیستم حرکتی ذرات جلوگیری می کند؛ ۲. همگرایی ذرات را تضمین می کند و ۳. نیازی به تعریف کمیت محدودکننده وجود ندارد. با استفاده از معادله (۲۳) که معرف جهشی است که در

گرفته شود. روند این محدودیتها در روابط (۱۵) تا (۲۰) شرح داده شده است.

$$N_{Sol} = Integer, \quad 0 \leq N_{Sol} \leq N_{Sol}^{max} \quad (15)$$

$$N_{Wind} = Integer, \quad 0 \leq N_{Wind} \leq N_{Wind}^{max} \quad (16)$$

$$N_{Batt} = Integer, \quad 0 \leq N_{Batt} \leq N_{Batt}^{max} \quad (17)$$

در این معادلات،  $N_{Sol}^{max}$ ،  $N_{Wind}^{max}$  و  $N_{Batt}^{max}$  به ترتیب بیشترین تعداد PV، WG و باتری های در دسترس است.

$$\sum_{t=1}^{24} (P_{Sol}^t \cdot \Delta t) + \sum_{t=1}^{24} (P_{Wind}^t \cdot \Delta t) \geq \sum_{t=1}^{24} (P_{Dmd}^t \cdot \Delta t) \quad (18)$$

$$P_{bmin} \leq P_b \leq P_{bmax} \quad (19)$$

$$P_{bmin} = (1 - DOD) \cdot P_{bmax} \quad (20)$$

معادله (۱۸) نشان می دهد که مجموع کل توان تولیدی توربین بادی و پنل فتوولتائیک باید بیشتر از مقدار بار مورد نیاز سیستم باشد.  $P_{bmax}$  بیشینه ظرفیت باتری و  $P_{bmin}$  کمینه ظرفیت باتری است. معادله (۱۹) نیز توانایی یا عدم توانایی ترکیب به دست آمده برای سیستم، در پاسخگویی به تقاضای بار را بررسی می کند.

### ۳.۳. الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO) روش بهینه سازی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که کندی و ابرهات در سال ۱۹۹۵ آن را توسعه دادند. الگوریتم PSO الهام گرفته از رفتار اجتماعی هجوم پرندگان یا ماهیان است که به آن ها ذره گفته می شود و در فضای جست و جوی تابعی که قصد کمینه کردن (یا بهینه کردن) مقدار آن را داریم، پخش شده اند (در این مقاله کمینه کردن فرض شده است). هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار  $d$  بعدی تشکیل شده که  $d$  فضای جست و جوست. برای ذره  $k$ ام،  $x^k$  موقعیت فعلی ذره،  $v^k$  سرعت حرکت ذره و  $x^{k,bast}$  بهترین موقعیتی است که ذره تا به حال تجربه کرده [۱۳].

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیتها و سرعت های تصادفی ایجاد می شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله  $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می شوند. اگر مؤلفه  $Z_j$  نام از بردار  $Z$  باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می دهند، عبارت اند از:

$$v_j^k [t+1] = w v_j^k [t] + c_1 r_1 (x_j^{k,bast} [t] - x_j^k [t]) + c_2 r_2 (x_j^{gbast} [t] - x_j^k [t]) \quad (21)$$

$$x_j^k [t+1] = x_j^k [t] + v_j^k [t+1] \quad (22)$$

این روش به صورت یک الگوریتم متوالی مجموعه‌ای از جواب‌های مسئله، یعنی  $X$  را با حرکت‌های پی‌درپی از یک جواب  $s$  به جواب دیگری مثل  $S'$  در همسایگی آن، یعنی  $N(s)$  به دست می‌آورد. این حرکت‌ها با هدف رسیدن به یک جواب خوب (بهینه یا نزدیک به بهینه) و با ارزیابی تابع هدفی مثل  $f(s)$  که می‌بایست حداقل شود، صورت می‌گیرند. الگوریتم کلی TS را می‌توان در مراحل زیر توضیح داد:

مرحله ۱: تنظیم شمارنده تکرار،  $(K=0)$  و تولید راه‌حل اولیه  $(x_{initial})$  به صورت تصادفی. تنظیم راه‌حل انتخابی به عنوان راه‌حل جاری  $(x_{current})$  و همچنین بهترین راه‌حل،  $(x_{best})$ ،  $x_{current} = x_{best} = x_{initial}$ .

مرحله ۲: تولید راه‌حل‌های تصادفی  $(x_{trial})$  در مجاورت راه‌حل جاری. سپس مرتب کردن جواب‌های تولیدی بر اساس ارزش تابع هدف در جهت صعودی، برای یک مسئله کمینه‌سازی صورت می‌گیرد. فرض می‌شود که  $x_{trial}^j$ ،  $1 \leq j \leq nt$  در اینجا  $x_{trial}^1$  نشان‌دهنده بهترین راه‌حل تولیدشده از نظر ارزش تابع هدف است.

مرحله ۳: تنظیم  $j=1$  اگر  $J(x_{trial}^j) > J(x_{best})$ ، به مرحله ۴ می‌رویم، در غیر این صورت،  $x_{best} = x_{trial}^j$  و می‌رویم به مرحله ۴.

مرحله ۴: بررسی وضعیت ممنوع بودن  $x_{trial}^j$ . اگر در لیست ممنوع نباشد، آن را در لیست ممنوع قرار می‌دهیم، تنظیم  $x_{current} = x_{trial}^j$  و رفتن به مرحله ۷. اگر در لیست ممنوع بود، می‌رویم به مرحله ۵.

مرحله ۵: بررسی معیار آرمانی  $x_{trial}^j$ . اگر متقاعد کننده بود، نادیده گرفتن محدودیت‌های ممنوع و به روزرسانی سطح انتظارات و تنظیم  $x_{current} = x_{trial}^j$  و رفتن به مرحله ۷. در غیر این صورت، تنظیم  $j=j+1$  و رفتن به مرحله ۶.

(معیار آرمانی با نادیده گرفتن وضعیت ممنوعه حرکت می‌کند و اگر به یک راه‌حل بهتر از حالت‌های پیشین برسد، حرکت را ادامه می‌دهد. اهمیت استفاده از معیار آرمانی، اضافه کردن انعطاف‌پذیری به الگوریتم TS با هدایت آن به سمت بهترین جواب).

مرحله ۶: اگر  $j > nt$  به مرحله ۷ می‌رویم، در غیر این صورت به مرحله ۴ برمی‌گردیم.

مرحله ۷: بررسی معیار توقف. اگر یکی از آن‌ها متقاعد کننده بود، توقف، در غیر این صورت تنظیم  $k=k+1$  و برگشتن به مرحله ۲.

الگوریتم PSO صورت گرفته است. جهش صورت گرفته در الگوریتم PSO را با اسم جدیدی به نام الگوریتم انبوه ذرات با عامل انقباض<sup>۱</sup> (PSO-CF) می‌شناسند. در این روش، تمام شرایط صادق است با این تفاوت که ضرایب یادگیری و ضریب اینرسی از معادله‌های (۲۳) به دست می‌آید. با استفاده از عامل انقباض، الگوریتم قادر است دامنه وسیعی از فضای جست‌وجو را جست‌وجو کند و باعث ایجاد تعادل بین جست‌وجوهای محلی و سراسری شود. این الگوریتم در اغلب اوقات، باعث کاهش تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی به یک جواب مناسب می‌شود و از ناپایدار شدن سیستم حرکتی ذرات جلوگیری می‌کند، همگرایی ذرات را تضمین می‌کند و نیاز به تعریف کمیت محدودکننده را از بین می‌برد. در نتیجه الگوریتم PSO-CF باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم در تکرارهای برابر نسبت به الگوریتم PSO می‌شود.

$$w = ch_k = \frac{2}{(ph_k - 2 + \sqrt{ph_k^2 - 4 \times ph_k})} \quad (23)$$

$$ph_k = ph_{k1} + ph_{k2}$$

$$c_1 = ch_k \times ph_{k1}$$

$$c_2 = ch_k \times ph_{k2}$$

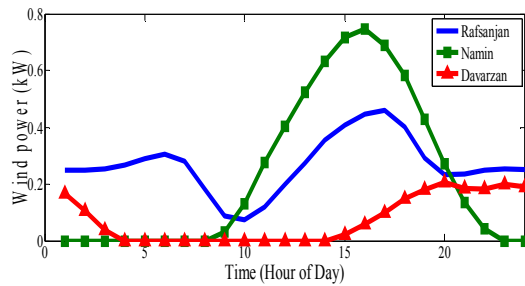
در این روابط،  $ph_k$  ضریب انقباض است.  $ph_{k1}$  و  $ph_{k2}$  اعدادی مثبت هستند و به نحوی انتخاب می‌شوند که  $ph_{k1} + ph_{k2} \geq 4$  در این مقاله،  $ph_{k1} = ph_{k2} = 2.05$  در نظر گرفته شده است. از معادله (۲۱) می‌توان به این نتیجه رسید که هر ذره به هنگام حرکت، سه موقعیت را در نظر می‌گیرد: ۱. جهت حرکت قبلی خود؛ ۲. بهترین موقعیتی را که در آن قرار داشته؛ ۳. بهترین موقعیتی را که به وسیله کل جمع تجربه شده است.

### ۴.۳. الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی ممنوع

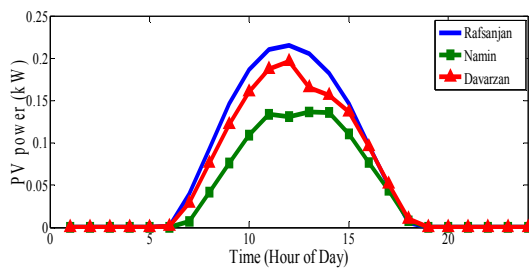
اگرچه ریشه بحث جست‌وجوی ممنوع<sup>۲</sup> (TS) به اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد، شکل فعلی این روش تنها چندین سال پیش توسط گلور ارائه شد. این روش در حال حاضر به عنوان یک روش بهینه‌سازی که به سرعت در بسیاری از زمینه‌های جدید به کار گرفته می‌شود، مطرح است. TS را می‌توان به عنوان تکنیکی برگرفته از مفاهیم هوش مصنوعی در نظر گرفت. این تکنیک روشی کلی برای هدایت جست‌وجو در دستیابی به جواب‌های خوب در فضای جواب پیچیده است [۱۷ و ۱۸].

1. Particle Swarm Optimization with Constriction Factor  
2. Tabu Search

#### ۴. نتایج مدل‌سازی



شکل (۵): متوسط سالیانه توان تولیدی در یک شبانه‌روز توسط توربین بادی



شکل (۶): متوسط سالیانه توان تولیدی در یک شبانه‌روز توسط پنل فتوولتائیک

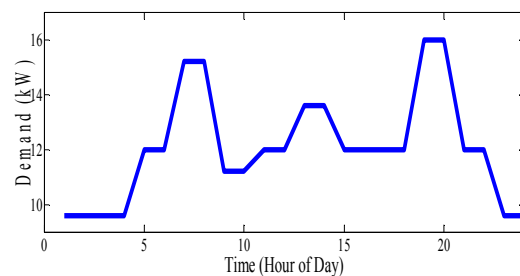
با توجه به اطلاعات تابش، سرعت باد و بار، جداول نشان می‌دهند که سیستم ترکیبی (فتوولتائیک-باد-باتری) بهینه‌ترین حالت برای شهرهای رفسنجان و نمین بوده و سیستم ترکیبی (فتوولتائیک-باتری) بهینه‌ترین حالت برای شهر داورزن است. برای شهر نمین ملاحظه می‌شود که سیستم ترکیبی فتوولتائیک-باد-باتری با اختلاف ۱۰ دلار نسبت به سیستم ترکیبی فتوولتائیک-باتری، برتری پیدا کرده است. در این حالت، تعداد بهینه توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به ترتیب برابر ۱ و ۲۸۵ عدد برای سیستم ترکیبی فتوولتائیک-باد-باتری، به دست آمده است. در نتیجه، در حالت کلی می‌توان سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک-باتری را نیز، یکی از بهینه‌ترین سیستم‌های تأمین توان برای شهر نمین در نظر گرفت. سیستم‌های معرفی شده برای مناطق ذکر شده می‌توانند بار مورد نظر را با قابلیت اطمینان بالا و هزینه مناسب تأمین کنند. شرایط آب‌وهوایی و قیمت اجزای سیستم ترکیبی از مهم‌ترین عوامل انتخاب شدن سیستم‌های ذکر شده است. تابش خورشیدی مطلوب و هزینه‌های بالای توربین‌های بادی نسبت به پنل‌های فتوولتائیک، می‌تواند از دلایل مهم انتخاب شدن سیستم‌های ترکیبی (فتوولتائیک-باتری) به‌عنوان بهینه‌ترین حالت در اغلب مناطق ایران باشد. اما اگر وزش باد نیز مطلوب باشد، آنگاه سیستم ترکیبی (فتوولتائیک-باد-باتری) بهینه‌ترین

برای بررسی قابلیت روش پیشنهادی و قابلیت پتانسیل مناطق جنوب، شمال غرب و شمال شرق کشور، سیستم ترکیبی مورد مطالعه براساس داده‌های سرعت باد (در ارتفاع ۱۰ متر)، تابش خورشید و پروفیل بار مربوط به مناطق ذکر شده کشور ایران، (شهر رفسنجان استان کرمان، شهر نمین استان اردبیل و شهر داورزن استان خراسان رضوی) مدل‌سازی شده است. در جدول (۱) تا (۳)، مشخصات فنی و اقتصادی تجهیزات به‌کاررفته در سیستم برحسب دلار (\$) نشان داده شده است. پروفیل بار یک شبانه‌روز نمونه، برای مصرف روستایی ۲۰ خانوار استفاده‌شده در مدل‌سازی، در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن، پیک بار مصرفی ۱۶ کیلووات و حداقل بار مصرفی ۹.۶ کیلووات است. می‌توان توان تولیدی توسط توربین‌های بادی و پنل فتوولتائیک سیستم مورد نظر را با استفاده از اطلاعات تابش خورشید و سرعت باد و اطلاعات داده‌شده به‌صورت متوسط در ۲۴ ساعت تبدیل کرد که به‌ترتیب، در شکل‌های (۵) و (۶) توان تولیدی پنل و توربین بادی برای شهرهای رفسنجان، نمین و داورزن نمایش داده شده است. شایان ذکر است که در لحظه اولیه، باتری ۳۰ درصد شارژ دارد.

در این پژوهش، با توجه به اعلام بانک مرکزی، نرخ تورم برابر با ۲۵/۶٪ و نرخ بهره برابر با ۱۸٪ در نظر گرفته شده و طول عمر پروژه ۲۰ سال در نظر گرفته شده است و با توجه به رابطه (۸)، نرخ بهره واقعی برابر است با:

$$i = \frac{f - i'}{f + 1} = \frac{0.256 - 0.18}{0.256 + 1} = 0.061 = 6.1\%$$

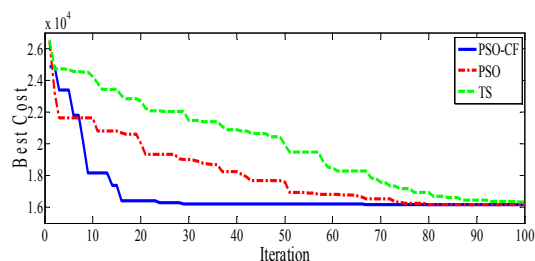
نتایج بهینه الگوریتم‌های PSO، PSO-CF و TS در منطقه‌های جنوب (رفسنجان)، شمال غرب (نمین) و شمال شرق (داورزن) کشور به‌صورت جداگانه به‌دست آمده است. برای هر منطقه، نتایج سیستم‌های ترکیبی، فتوولتائیک و باد به‌صورت جداگانه بررسی شده و پس از ۳۰ اجرای مستقل برای هر الگوریتم، و با در نظر گرفتن جمعیت اولیه ۱۰ و تعداد ۱۰۰ تکرار، در جداول (۴) تا (۶) نشان داده شده است.



شکل (۴): متوسط سالیانه پروفیل بار در یک شبانه‌روز



ترکیبی (فتوولتائیک-باد-باتری) برای شهر رفسنجان نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که الگوریتم PSO-CF در تکرار پایین‌تری (تکرار ۶۶) نسبت به الگوریتم PSO (تکرار ۸۰) و الگوریتم TS (تکرار ۹۸) به همگرایی می‌رسد. این در حالی است که الگوریتم TS نتوانسته است به مقدار هزینه/ بهینه‌ای که دو الگوریتم PSO-CF و PSO رسیده‌اند، برسد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که الگوریتم PSO-CF در مقایسه با الگوریتم PSO و TS در تکرارهای پایین‌تری به جواب بهینه همگرا شده است. در حالت کلی، با توجه به نتایج و اعتبارسنجی صورت‌گرفته بین الگوریتم PSO-CF با دو الگوریتم PSO و TS، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی (PSO-CF) می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد در امر بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۷): روند همگرایی الگوریتم‌های اعمال شده

حالت است (رفسنجان). با توجه به اینکه هزینه پیل‌ها و توربین‌ها رو به کاهش است و حمایت دولت ایران نیز از تأمین بار به‌وسیله انرژی‌های نو در حال افزایش است و به‌دلیل تابش قابل‌توجه خورشیدی در ایران، سیستم‌های ذکرشده می‌توانند برای تأمین بارهای مستقل از شبکه در مناطق دورافتاده به‌عنوان یک سیستم با قابلیت اطمینان بالا، عملی و مقرون به‌صرفه مورد استفاده قرار بگیرند.

با توجه به جداول (۴) تا (۶) مشاهده می‌شود که الگوریتم PSO-CF در تمامی سه حالت بررسی‌شده با شرایط یکسان، دارای میانگین جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم‌های PSO و TS است. همچنین الگوریتم ذکرشده دارای زمان محاسبه کمتری نسبت به الگوریتم PSO است. این در حالی است که الگوریتم TS دارای زمان محاسبات بهتری نسبت به دو الگوریتم PSO-CF و PSO است، اما از نظر شاخص‌های اصلی مورد مقایسه (انحراف معیار، بهترین، بدترین و میانگین هزینه‌ها) در رتبه آخر قرار گرفته است. در حالت کلی مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های ذکرشده در اکثر مواقع، دارای جواب یکسانی هستند. حتی مشاهده می‌شود که بدترین جواب‌های الگوریتم PSO-CF نیز بهتر از بدترین جواب‌های الگوریتم PSO و TS است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم PSO-CF به‌دلیل اینکه فضای جست‌وجوی بیشتری را جست‌وجو می‌کند، در مواقعی در تکرارهای برابر، جواب‌های بهتری نسبت به الگوریتم PSO و TS دارد. شکل (۷) روند همگرایی الگوریتم‌های PSO-CF، PSO و TS را در حالت

جدول (۴): نتایج بهینه الگوریتم PSO-CF در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و TS برای رفسنجان استان کرمان

نوع	الگوریتم	$N_{PV}$	$N_{WG}$	$N_{Batt}$	زمان (S)		هزینه (\$)	
					بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
PV/WG/Batt	PSO-CF	۵۰	۵۴	۳۴	۰/۲۳۴	۰/۳۰۵۲	۱۶۱۸۱	۱۶۲۲۷
	PSO	۵۰	۵۴	۳۴	۰/۲۴۹۶	۰/۳۴۷۹	۱۶۱۸۱	۱۶۲۳۳
	TS	۴۴	۵۵	۳۸	۰/۳۱۲	۰/۰۴۲۱	۱۶۳۱۷	۲۲۷۶۵
PV/Batt	PSO-CF	۱۹۶	-	۴۳۴	۰/۲۴۹۶	۰/۳۰۹۹	۳۱۲۹۵	۳۱۲۹۵
	PSO	۱۹۶	-	۴۳۴	۰/۲۶۵۲	۰/۳۰۹۹	۳۱۲۹۵	۳۱۲۹۶
	TS	۱۹۶	-	۴۳۴	۰/۱۵۶	۰/۰۳۸	۳۱۲۹۵	۳۳۲۲۶
WG/Batt	PSO-CF	-	۷۰	۴۱	۰/۲۴۹۶	۰/۲۸۴۴	۱۷۵۷۹	۱۷۵۷۹
	PSO	-	۷۰	۴۱	۰/۲۶۵۲	۰/۳۰۹۴	۱۷۵۷۹	۱۷۵۷۹
	TS	-	۶۸	۶۳	۰/۳۱۲	۰/۰۳۵	۱۸۲۵۵	۲۷۱۹۳

جدول (۵): نتایج بهینه الگوریتم PSO-CF در مقایسه با الگوریتم های PSO و TS برای نمین استان اردبیل

نوع	الگوریتم	$N_{PV}$	$N_{WG}$	$N_{Batt}$	زمان (S)		هزینه (\$)	
					بهترین	بدترین	بهترین	بدترین
	PSO-CF	۲۸۵	۱	۴۹۱	۰/۲۴۹۶	۰/۲۹۵۴	۰/۳۷۴۴	۳۷۹۱۹
PV/WG/Batt	PSO	۲۸۵	۱	۴۹۱	۰/۲۸۰۸	۰/۳۱۸۸	۰/۴۹۹۲	۳۷۹۱۹
	TS	۲۸۵	۱	۴۹۱	۰/۰۳۱۲	۰/۰۵۴۱	۰/۱۴۰۴	۳۷۹۱۹
	PSO-CF	۲۹۱	-	۴۹۰	۰/۲۴۹۶	۰/۲۹۱۷	۰/۳۴۳۲	۳۷۹۲۹
PV/Batt	PSO	۲۹۱	-	۴۹۰	۰/۲۴۹۶	۰/۳۲۱۹	۰/۵۳۰۴	۳۷۹۲۹
	TS	۲۹۱	-	۴۹۰	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۲۹	۰/۰۶۲۴	۳۷۹۲۹
	PSO-CF	-	۱۶۴	۶۰۰	۰/۳۲۷۶	۰/۴۲۰۷	۰/۶۰۸۴	۶۳۲۴۲
WG/Batt	PSO	-	۱۶۴	۶۰۰	۰/۳۷۴۴	۰/۴۳۴۴	۰/۵۶۱۶	۶۳۲۴۲
	TS	-	۱۶۴	۶۰۰	۰/۰۳۱۲	۰/۰۴۵۲	۰/۰۷۸	۶۳۲۴۲
	PSO-CF	-	۱۶۴	۶۰۰	۰/۳۲۴۲	۰/۴۲۰۷	۰/۶۰۸۴	۶۳۲۴۲

جدول (۶): نتایج بهینه الگوریتم PSO-CF در مقایسه با الگوریتم های PSO و TS برای داورزن استان خراسان رضوی

نوع	الگوریتم	$N_{PV}$	$N_{WG}$	$N_{Batt}$	زمان (S)		هزینه (\$)	
					بهترین	بدترین	بهترین	بدترین
	PSO-CF	۲۲۰	۰	۴۴۶	۰/۲۶۵۲	۰/۳۱۷۲	۰/۳۹	۳۲۸۶۵
PV/WG/Batt	PSO	۲۲۰	۰	۴۴۶	۰/۲۹۶۴	۰/۳۶۵۶	۰/۴۶۸	۳۲۸۶۵
	TS	۲۲۰	۰	۴۴۶	۰/۰۳۱۲	۰/۰۴۶۸	۰/۰۹۳۶	۳۲۸۶۵
	PSO-CF	۲۲۰	-	۴۴۶	۰/۲۶۵۲	۰/۲۹۸۵	۰/۳۵۸۸	۳۲۸۶۵
PV/Batt	PSO	۲۲۰	-	۴۴۶	۰/۲۶۵۲	۰/۳۱۳۶	۰/۴۳۶۸	۳۲۸۶۵
	TS	۲۲۰	-	۴۴۶	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۹۵	۰/۰۶۲۴	۳۲۸۶۵
	PSO-CF	-	۳۴۴	۶۰۰	۰/۲۳۴	۰/۲۹۳۸	۰/۳۵۸۸	۸۹۶۴۳
WG/Batt	PSO	-	۳۴۴	۶۰۰	۰/۲۴۹۶	۰/۳۰۹۹	۰/۳۵۸۸	۸۹۶۴۳
	TS	-	۳۴۴	۶۰۰	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۸۵	۰/۰۶۲۴	۸۹۶۴۳
	PSO-CF	-	۳۴۴	۶۰۰	۰/۲۳۴	۰/۲۹۳۸	۰/۳۵۸۸	۸۹۶۴۳

### نتیجه گیری

سرعت همگرایی بالاتری دارد و قادر است دامنه وسیع تری از فضا را جست و جو کند و بدین ترتیب باعث ایجاد تعادل بین جست و جوهای محلی و سراسری شود. آنالیز اقتصادی از نتایج مدل سازی نشان داد که به دلیل شرایط جغرافیایی ایران (تابش قابل توجه خورشید و سرعت کم باد)، سیستم ترکیبی (فتوولتائیک-باتری) سیستم مناسبی برای اغلب مناطق کشور است. اما اگر وزش باد دائم و مناسبی نیز وجود داشته باشد، آنگاه سیستم ترکیبی (فتوولتائیک-باد-باتری) می تواند استفاده شود.

در این مقاله، الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات با عامل انقباض برای تعیین ابعاد بهینه سیستم های ترکیبی فتوولتائیک، باد، با ذخیره ساز بانک باتری برای تغذیه بار مستقل از شبکه در منطقه های دورافتاده جنوب، شمال غرب و شمال شرق کشور در شهرهای رفسنجان، نمین و داورزن معرفی شد. همچنین جهت اعتبارسنجی روش پیشنهادی از دو الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات و جست و جوی ممنوع استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم جهش یافته انبوه ذرات با عامل انقباض،

### فهرست علائم

$P_{Gen}$	توان تولیدی از انرژی های نو (kW)	$C_{Backup}$	هزینه ژنراتور پشتیبان (\$)
$P_{Inv}$	هزینه مبدل جریان (\$)	$C_{Batt}$	واحد هزینه باتری (\$)
$ph_k$	ضریب انقباض	$C_{Cpt}$	کل، هزینه سرمایه اولیه (\$)
$P_L$	تقاضای بار (kW)	$C_{Inv}$	هزینه کنترلر (\$)
$P_{PV}$	توان تولیدی توسط پنل های فتوولتائیک (kW)	$C_{Mtn}$	کل هزینه تعمیر و نگهداری (\$)
$P_{PW}$	توان تولیدی توسط توربین های بادی (kW)		واحد هزینه پنل، شامل هزینه اولیه و هزینه نصب و راه اندازی (\$)
$P_r$	توان نامی توربین بادی (kW)	$C_{Sol}$	
$P_{rs}$	توان نامی پنل فتوولتائیک (W)	$C_T$	هزینه کل طرح (\$)
$P_z$	مجموع توان تولیدی سیستم ترکیبی (kW)		واحد هزینه توربین، شامل قیمت و هزینه نصب و راه اندازی توربین بادی (\$)
$P_{Sol-Each}^t$	توان تولیدی پنل فتوولتائیک در زمان $t$ (W)	$C_{Wind}$	
$P_{Wind-Each}^t$	توان خروجی توربین بادی در زمان $t$ (kW)	$C_{Mtn}^{Sol}$	هزینه تعمیر و نگهداری پنل ( $cent.kW^{-1} h^{-1}$ )
		$C_{Mtn}^{Wind}$	هزینه تعمیر و نگهداری توربین بادی ( $cent.kW^{-1} h^{-1}$ )
$r$	پیش بینی تابش خورشید در زمان مورد نظر ( $kW h.m^{-2}$ )	$c_1$	ضریب یادگیری مربوط به تجارب هر ذره
$R_C$	یک نقطه تابش معین ( $W.m^{-2}$ )	$c_2$	ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع
$R_{STD}$	تابش استاندارد خورشید ( $W.m^{-2}$ )	$DOD$	حداکثر عمق دشارژ مجاز (%)
$r_2$ و $r_1$	اعداد تصادفی در بازه [۰,۱]	$f$	نرخ تورم (%)
$t$	زمان (h)	$i$	نرخ بهره سالانه (%)
$v$	سرعت باد ( $m.s^{-1}$ )	$i'$	نرخ بهره اسمی (%)
$V_i$	سرعت قطع پایین توربین بادی ( $m.s^{-1}$ )	$n$	طول عمر سیستم (سال)
$V_o$	سرعت قطع بالا توربین بادی ( $m.s^{-1}$ )	$N_{Batt}$	تعداد باتری ها
$V_r$	سرعت نامی توربین بادی ( $m.s^{-1}$ )	$N_{Inv}$	تعداد مبدل های جریان
$v^k$	سرعت حرکت ذره	$N_{Sol}$	تعداد پنل های فتوولتائیک
$w$	ضریب اینرسی	$N_{Wind}$	تعداد توربین های بادی
$x_{best}$	همچنین بهترین راه حل	$N_{Batt}^{max}$	بیشترین تعداد باتری در دسترس
$x_{current}$	راه حل جاری	$N_{Sol}^{max}$	بیشترین تعداد پنل در دسترس
$x_{initial}$	راه حل اولیه	$N_{Wind}^{max}$	بیشترین تعداد توربین بادی در دسترس
$x_{trial}$	راه حل تصادفی	$P_b(t)$	مقدار شارژ باتری در لحظه $t$ (kW)
$x^{gbast}$	بهترین موقعیتی که به وسیله همه ذرات پیدا شده	$P_b(t-1)$	مقدار شارژ باتری در لحظه $t-1$ (kW)
$x^k$	موقعیت فعلی ذره	$P_{Batt}$	هزینه باتری (\$)
$x^{k,bast}$	بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده	$P_{bmax}$	بیشینه ظرفیت باتری (kW)
		$P_{bmin}$	کمینه ظرفیت باتری (kW)

### علائم یونانی

$\eta_{inv}$	بازده اینورتر (%)	$\Delta P$	اختلاف توان تولیدی انرژی های نو از تقاضای بار (kW)
$\sigma$	تلفات باتری	$\eta_{bc}$	بازده لحظه شارژ باتری (%)
		$\eta_{bf}$	بازده لحظه دشارژ باتری (%)

- [1] Wang, C., Nehrir, M. H., "Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol. 23, pp. 957-967, 2008.
- [2] Baniasad Askari, I., Ameri, M., "The Effect of Fuel Price on the Economic Analysis of Hybrid (Photovoltaic/Diesel/Battery) Systems in Iran," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol. 6, pp. 357-377, 2011.
- [3] Askari, I. B. Ameri, M., "Techno-economic feasibility analysis of stand-alone renewable energy systems (PV/bat, Wind/bat and Hybrid PV/wind/bat) in Kerman, Iran," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol. 7, pp. 45-60, 2012.
- [4] Roy, S., "Optimal planning of wind energy conversion systems over an energy scenario," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol. 12, pp. 248-254, 1997.
- [5] Kellogg, W., Nehrir, M., Venkataramanan, G., Gerez, V., "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol. 13, pp. 70-75, 1998.
- [6] Ghosh, P., Emonts, B., Stolten, D., "Comparison of hydrogen storage with diesel-generator system in a PV-WEC hybrid system," *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 187-198, 2003.
- [7] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., Kalaitzakis, K., "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms," *Solar energy*, Vol. 80, pp. 1072-1088, 2006.
- [8] Tina, G., Gagliano, S., Raiti, S., "Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment," *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 578-588, 2006.
- [9] Geem, Z. W., "Size optimization for a hybrid photovoltaic-wind energy system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 42, pp. 448-451, 2012.
- [10] <http://www.wholesalesolar.com/>.
- [11] Park, J., Liang, W., Choi, J., El-Keib, A., Shahidehpour, M., Billinton, R., "A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*, pp. 1-6, 2009.
- [12] Zhao, Y., Zhan, J., Zhang, Y., Wang, D., Zou, B., "The optimal capacity configuration of an independent Wind/PV hybrid power supply system based on improved PSO algorithm," in *Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), 8th International Conference on*, pp. 1-7, 2009.
- [13] Eberhart, R., Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory," in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, pp. 39-43, 1995.
- [14] Hoorfar, A., "Evolutionary programming in electromagnetic optimization: a review," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Vol. 55, pp. 523-537, 2007.
- [15] Qing, A., "Electromagnetic inverse scattering of multiple two-dimensional perfectly conducting objects by the differential evolution strategy," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, Vol. 51, pp. 1251-1262, 2003.
- [16] Clerc, M. Kennedy, J. "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 6, pp. 58-73, 2002.
- [17] Glover, F., "Tabu search—part I," *ORSA Journal on computing*, Vol. 1, pp. 190-206, 1989.
- [18] Abido, M., "Optimal power flow using tabu search algorithm," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 30, pp. 469-483, 2002.