

## حل مسأله پخش بار اقتصادی - آلودگی دینامیکی با مشارکت مزارع بادی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات هم تکاملی اصلاح شده

میثم عبدلی<sup>۱</sup> و علیرضا حاتمی<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

m.abdoli@basu.ac.ir

۲- استادیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

**چکیده:** یکی از مباحث مهم در زمینه مدیریت تولید و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، پخش بار اقتصادی دینامیکی است. هدف از حل مسأله مورد نظر، برنامه‌ریزی توان تولیدی ژنراتورهای فعال در سرتاسر یک افق زمانی مشخص است؛ به طوری که در هر بازه زمانی مشخص، بار مورد تقاضا تأمین و قیود بهره‌برداری رعایت شوند. در سال‌های اخیر، مزارع بادی به دلیل هزینه پایین تولید توان (نسبت به دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر) و همچنین، آلودگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است و گسترش زیادی داشته است. در این مقاله، مسأله پخش بار اقتصادی دینامیکی سیستم قدرت شامل: واحدهای حرارتی و مزارع بادی و با در نظر گرفتن هزینه آلودگی بررسی شده است. به منظور حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر از یک روش ابتکاری کارآمد با نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هم تکاملی اصلاح شده استفاده شده است. همچنین، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم مورد نظر، اصلاحاتی از جمله استفاده از یک ضریب اینرسی که به طور خطی در طول شبیه‌سازی کاهش می‌یابد بر روی آن اعمال شده است. در نهایت، کارایی و برتری روش پیشنهادی روی سه سیستم نمونه IEEE (دو سیستم بدون مشارکت مزارع بادی و یک سیستم شامل دو مزرعه بادی) نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پخش بار اقتصادی دینامیکی، مزارع بادی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هم تکاملی اصلاح شده

### ۱- مقدمه

سرمایه‌گذاری است. پخش بار اقتصادی از دسته مسائل بهینه‌سازی غیرخطی است که شامل قیدهای متعددی از جمله تعادل توان تولیدی و مصرفی، حدود بالا و پایین توان تولیدی ژنراتورها، نرخ شیب تغییرات توان و نواحی ممنوعه تولید است [۱].

پخش بار اقتصادی در سیستم قدرت دارای دو مبحث متداول پخش بار اقتصادی استاتیکی و پخش بار اقتصادی دینامیکی است. پخش بار اقتصادی استاتیکی به حل بهینه مسأله مورد نظر در یک بازه زمانی خاص می‌پردازد [۲]؛ در حالی که پخش بار اقتصادی دینامیکی مسأله را در فواصل زمانی پیوسته و متعدد حل می‌کند. در نتیجه فرآیند محاسبات در حالت دینامیکی پیچیده‌تر از حالت استاتیکی

پخش بار اقتصادی یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است که در مراکز کنترل انرژی به منظور تعیین خروجی بهینه واحدهای تولیدی (ژنراتورها) استفاده می‌شود. هدف از حل این مسأله بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه تولید توان و در نتیجه بالا بردن سود

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: علیرضا حاتمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - همدان - خیابان شهید فهمیده -

دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده‌ی مهندسی

عامل‌هایی در مدل پخش بار اقتصادی برای تخمین مازاد/ کمبود تولید واحدهای بادی مدل نموده است. مرجع یاد شده به طور گسترده‌ای در پژوهش‌های انجام شده در پخش بار اقتصادی دینامیکی مشتمل بر واحدهای بادی (و از جمله در مقاله حاضر) استفاده شده است. مرجع [۱۷] نیز یک توزیع احتمالی جدید و غیر متداول " Versatile probability distribution " برای مدل‌سازی دقیق‌تر عدم قطعیت واحدهای بادی معرفی کرده است.

در مقالات بسیاری نشان داده شده است که سرعت باد از تابع توزیع احتمالی ویبول پیروی می‌کند [۱۸]. در این مقاله نیز مدل استفاده شده برای سرعت باد، بر مبنای توزیع احتمالی ویبول است که با استفاده از یک تبدیل، تابع توزیع احتمالی سرعت باد به تابع توزیع احتمالی توان باد تبدیل شده است.

در حل مسأله پخش بار اقتصادی روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: دسته اول روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است که از جمله آن می‌توان به روش برنامه‌ریزی دینامیکی [۱۹]، روش لاگرانژ [۲۰]، روش نقطه میانی [۲۱] و سایر آن اشاره کرد. این روش‌ها تنها در صورتی قادر به حل مسأله پخش بار اقتصادی هستند که تابع هزینه سوخت، دارای منحنی خطی پیوسته باشد. اما در عمل خطی بودن تابع هزینه سوخت که شرط لازم برای استفاده از این روش‌هاست، برقرار نیست.

دسته دوم روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از قبیل شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲۲] و روش‌های بهینه‌سازی احتمالی از جمله الگوریتم ژنتیک [۲۳]، الگوریتم ازدحام ذرات [۲۴]، الگوریتم زنبور عسل [۲۵] و سایر آن است. از توانایی بارز این الگوریتم‌ها می‌توان به استفاده از جستجوی احتمالی به جای روش‌های صریح، بدون کم‌ترین محدودیتی روی شکل تابع هدف و در نتیجه به دست آوردن راه حل‌های بهینه سراسری اشاره کرد. ویژگی خاصی که این‌گونه الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی دارند آن است که این روش‌ها بدون داشتن اطلاعات خاص از مسأله

است؛ اما نتایج محاسبات تطابق بیشتری با نیازهای واقعی در سیستم‌های قدرت امروزی دارد [۴-۳].

به دلیل چالش‌های زیست محیطی به وجود آمده در سال‌های اخیر و به تبع آن گرم شدن کره زمین، در بسیاری از کشورها کوشش‌های بسیاری به منظور کاهش آلاینده‌های زیست محیطی انجام شده است. یکی از مهمترین این فعالیت‌ها جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی است. یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر که در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به سمت خود جلب نموده است انرژی باد است. از فواید انرژی باد می‌توان به آلوده نکردن محیط زیست، هزینه تعمیر و نگهداری بسیار کم و همچنین، هزینه سرمایه‌گذاری مناسب و تا حدودی کم برای احداث این نوع نیروگاه‌ها (در مقایسه با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر) اشاره کرد. گرچه به دلیل ماهیت تصادفی و عدم قطعیت سرعت باد، حل مسأله پخش بار اقتصادی در شبکه قدرت با مشارکت واحدهای بادی با مشکلات و پیچیدگی‌هایی همراه است.

اولین مشکل مرتبط با مسأله مورد نظر (پخش بار اقتصادی دینامیک با مشارکت واحدهای بادی) مدل‌سازی ماهیت تصادفی سرعت باد و پیش‌بینی توان نیروگاه بادی در بازه‌های زمانی مختلف است. تاکنون روش‌های مختلفی به منظور پیش‌بینی سرعت باد از جمله منطق فازی [۵]، شبکه‌های عصبی [۶]، سری‌های زمانی [۷] و سایر آن استفاده شده است. خطای پیش‌بینی نیز معمولاً از قانون گاوس [۸-۱۰] یا توزیع بتا [۱۱-۱۲] پیروی می‌کند.

دومین مشکل، مدل کردن و گنجاندن خطای پیش‌بینی واحدهای بادی در پخش بار اقتصادی دینامیکی است. روش‌های متعددی در پژوهش‌های انجام شده برای مسأله یاد شده پیشنهاد شده است. مراجع [۱۳] روش تولید سناریو (و کاهش آن)، [۱۴] از یک مدل فازی و [۱۵] از برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر شانس برای مدل‌سازی عدم قطعیت نیروگاه‌های بادی استفاده کرده‌اند. در مرجع [۱۶] نیز عدم قطعیت تولید واحدهای بادی را با وارد کردن

بحث شده است. در بخش چهارم، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هم‌تکاملی اصلاح شده معرفی شده است. در بخش پنجم نتایج به دست آمده بیان و با دیگر روش‌ها مقایسه شده و در بخش ششم نیز به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

و یا نیاز به شرایط خاصی از فضای جواب مانند همواری، محدب و تک مقدار بودن، کارایی بالایی در حل مسائل دارند. همچنین، از معایب این‌گونه روش‌ها می‌توان به طولانی‌تر شدن زمان محاسبات و دارا بودن شاخص‌های وابسته به مسأله نام برد.

دسته سوم شامل روش‌های ترکیبی است که در آن از ترکیب دو یا چند روش به منظور رسیدن به ویژگی‌های بهتر استفاده می‌شود که از جمله آن می‌توان به ترکیب روش‌های تکاملی با برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی [۲۶]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات با برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی [۲۷]، شبکه عصبی هاپفیلد با برنامه‌ریزی درجه دوم [۲۸] و سایر آن اشاره کرد. در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی، تابع هزینه مسطح و محدب فرض می‌شود. بنابراین، این روش‌ها برای حل بهینه‌پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن آثار شیر بخار یا نواحی ممنوعه تولید مناسب نیستند؛ بنابراین، به منظور توسعه روش‌های مناسب‌تر در مسأله پخش بار اقتصادی با توابع غیر مسطح و غیرمحدب، روش‌های هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و روش‌های ترکیبی به کار گرفته شده‌اند.

در این مقاله برای حل مسأله پخش بار اقتصادی دینامیکی با مشارکت واحدهای بادی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هم‌تکاملی اصلاح شده<sup>۱</sup> (MCPSO) پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، الگوریتم PSO هم‌زمان ۲ جمعیت را برای فرآیند حل مسأله به کار می‌گیرد؛ طوری که یکی از جمعیت‌ها برای محاسبه ضرایب جریمه (فرآیند مقیدسازی) و دیگری برای یافتن پاسخ‌های مسأله (فرآیند بهینه‌سازی) استفاده می‌شود. همچنین، الگوریتم پیشنهادی با اصلاحاتی از جمله استفاده از یک ضریب اینرسی که به‌طور خطی در طول شبیه‌سازی کاهش می‌یابد معرفی شده است. مقاله حاضر، در ادامه به شکل زیر تدوین شده است: در بخش دوم، مدل‌سازی هزینه واحدهای حرارتی و واحدهای بادی بیان شده است. در بخش سوم قیود مسأله بهینه‌سازی

## ۲- مدل‌سازی مسأله

### ۲-۱- مدل‌سازی هزینه سوخت واحدهای

#### حرارتی

در مسأله پخش بار اقتصادی هزینه کل واحدهای حرارتی به شکل تابعی درجه دوم برحسب توان حقیقی تولید شده توسط هر واحد طبق رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$C_F = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad \& \quad t = 1, 2, \dots, T$$

که در آن  $C_F$ : هزینه کل تولید توان در بازه زمانی مورد مطالعه ( $T$ )؛  $N$  تعداد واحدهای حرارتی نیروگاهی و  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب هزینه واحد  $i$ ام هستند.

اگر در واحدهای حرارتی اثر شیر بخار در نظر گرفته شود تابع هزینه تولید ماهیتی ناصاف به خود می‌گیرد [۲۹]. اثر شیر بخار به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$C_F = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |e_i \times \sin(f_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t}))|) \quad (2)$$

که در آن  $e_i$  و  $f_i$  ضرایب مربوط به اثر شیر بخار و  $P_{i,t}^{\min}$  حد پایین توان تولیدی ژنراتور  $i$ ام است.

### ۲-۲- مدل‌سازی هزینه آلودگی واحدهای

#### حرارتی

مقدار آلودگی ایجاد شده واحدهای حرارتی به میزان توان تولید شده و شرایط واحد تولیدی بستگی دارد. هزینه کل آلودگی واحدهای حرارتی در بازه زمانی مورد مطالعه ( $T$ ) به شکل زیر بیان می‌شود [۳۰]:

$$C_E = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{i,t}) \quad (3)$$

شده)، توان نامی، توان برنامه‌ریزی شده و تابع چگالی احتمال واحد بادی  $j$  ام در بازه زمانی مورد مطالعه ( $T$ ) هستند.

همچنین، تابع چگالی احتمال توان خروجی توربین بادی ( $f_W(w)$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$f_W(w) = \frac{klv_i}{c} \left( \frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c}\right)^k\right) \quad (۶)$$

که در آن  $w$  توان خروجی واحد بادی؛  $v$  سرعت باد؛

$$\rho = \frac{w}{w_r}$$

نسبت توان خروجی به توان نامی باد و

$$l = \left( \frac{(v_r - v_i)}{v_i} \right)$$

نیز نسبت محدوده‌ی خطی سرعت باد

به سرعت وصل توربین بادی است.

حالت سوم: در صورتی که توان خروجی واحد بادی از مقدار تخمین زده شده کمتر باشد، به‌منظور تعادل توان تولیدی و مصرفی به ناچار میزان استفاده از ظرفیت توان رزرو گردان افزایش خواهد یافت، این هزینه که با  $C_R$  نشان داده می‌شود. به اختلاف بین توان بادی برنامه‌ریزی شده و توان خروجی واقعی واحد بادی مرتبط است و طبق رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$C_R = \sum_{t=1}^T k_{R,j} \int_0^{w_{j,t}} (w_{j,t} - w) f_{W,j,t}(w) dw \quad (۷)$$

که در آن  $k_{p,j}$  ضریب جریمه توربین بادی  $j$  ام (به علت تولید کمتر از مقدار برنامه‌ریزی شده) است.

با توجه به مطالب مطرح شده در مورد هزینه واحدهای حرارتی و بادی، تابع بهینه‌سازی مسأله در بازه زمانی برنامه‌ریزی ( $T$ ) به شکل زیر خواهد بود [۳۱ و ۳۲]:

$$\min C = (C_F + C_E + C_W + C_P + C_R) \quad (۸)$$

### ۳- قیود مسأله

#### ۳-۱- قید تعادل توان تولیدی و مصرفی

لازم است در هر لحظه از فعالیت سیستم قدرت، مجموع توان مصرفی و تلفات برابر با توان تولید شده توسط ژنراتورها باشد.

که در آن  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$ ،  $\gamma_i$ ،  $\delta_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب آلودگی مربوط به واحد حرارتی  $i$  ام هستند.

#### ۳-۲- مدل‌سازی هزینه واحدهای بادی

با توجه به اثرات ایجاد شده در سیستم قدرت به واسطه عدم قطعیت انرژی باد، هزینه واحدهای بادی را می‌توان در سه حالت بررسی کرد [۱۶]:

حالت اول: اگر توربین‌های بادی در مالکیت اپراتور سیستم نباشد، هزینه پرداخت شده به مالک توربین بادی می‌تواند به عنوان هزینه مورد انتظار در نظر گرفته شود. هزینه مورد انتظار با خروجی برنامه‌ریزی شده واحد بادی متناسب است و مقدار آن ( $C_W$ ) در بازه زمانی برنامه‌ریزی ( $T$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$C_W = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M d_{j,t} w_{j,t} \quad (۴)$$

که در آن  $M$  تعداد واحدهای بادی؛  $d_j$  و  $w_j$  به ترتیب ضریب هزینه و توان برنامه‌ریزی شده واحد بادی  $j$  ام هستند. اگر توربین‌های بادی به اپراتور سیستم تعلق داشته باشند ضریب  $d_j$  صفر در نظر گرفته می‌شود.

حالت دوم: در صورتی که توان خروجی واحد بادی در بازه زمانی  $t$  ام از مقدار تخمین زده شده بیشتر باشد، از تمام توان باد نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین، ناگزیر مقداری از توان تولیدی تلف خواهد شد. به علت حفظ تعادل توان در شبکه با پخش بار مجدد سریع می‌توان تولید واحدهای دیگر را کاهش داد، در غیر این صورت باید با اتصال مقاومت‌های مجازی توان اضافی را تلف کرد. هزینه این حالت می‌تواند با اضافه کردن تابع هزینه  $C_P$  به تابع هزینه کل نشان داده شود. تابع هزینه جریمه در این حالت به طور مستقیم به اختلاف بین توان بادی برنامه‌ریزی شده و توان خروجی واقعی واحد بادی مرتبط است. تابع هزینه مورد نظر ( $C_P$ ) را به شکل زیر می‌توان در نظر گرفت [۱۶]:

$$C_P = \sum_{t=1}^T k_{P,j} \int_{w_{j,t}}^{w_{r,j}} (w - w_{j,t}) f_{W,j,t}(w) dw \quad (۵)$$

که در آن  $w_{r,j}$ ،  $w_{j,t}$ ،  $k_{P,j}$  و  $f_{W,j,t}(w)$  به ترتیب ضریب جریمه (به علت تولید بیش از مقدار برنامه‌ریزی

محدودیت به شکل زیر بیان می شود:

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,n}^{lb} \\ P_{i,n-1}^{ub} \leq P_i \leq P_{i,n}^{lb} \\ P_{i,M_i}^{ub} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad n = 2, 3, \dots, POZs \quad (13)$$

که در آن  $P_{i,n}^{lb}$  و  $P_{i,n}^{ub}$  به ترتیب حد بالا و پایین  $n$  امین ناحیه ممنوعه تولید مربوط به ژنراتور  $i$  ام و  $POZs$  نیز تعداد نواحی ممنوعه تولید است.

#### ۴- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات هم تکاملی اصلاح شده (MCPSO)

##### ۴-۱- الگوریتم استاندارد بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) از جمله الگوریتم های ابتکاری محسوب می شود که در سال ۱۹۹۵ توسط راسل ابرهارت و جیمز کندی ارائه شد [۳۵]. نحوه عملکرد الگوریتم بدین شکل است که ابتدا الگوریتم با یک گروه از جواب های تصادفی (ذره ها) که به شکل نقاطی در فضای جستجو پخش شده اند شروع به کار می کند. در مرحله بعد هر ذره مقدار تابع را در موقعیتی از فضا که در آن قرار دارد محاسبه می کند و با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که تاکنون در آن بوده ( $Pbest$ ) و همچنین، بهترین موقعیت کشف شده در کل ذرات ( $Gbest$ )، برای حرکت خویش را تعیین می کند. این مرحله تا رسیدن به هدف چندین بار تکرار می شود. در هر تکرار، الگوریتم بعد از یافتن دو مقدار  $Pbest$  و  $Gbest$ ، سرعت و مکان جدید هر ذره را طبق روابط ۱۴ و ۱۵ به روز می کند و این عمل تا زمانی که شرایط خاتمه (از جمله زمان، تعداد تکرار و اندازه خطا) محقق شود ادامه می یابد.

$$v_j^{k+1} = wv_j^k + c_1r_1(Pbest_j^k - x_j^k) + c_2r_2(Gbest^k - x_j^k) \quad (14)$$

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1} \quad (15)$$

طوری که،  $v_j^k$ : سرعت ذره  $i$  ام در تکرار  $k$  ام؛  $r_1$  و  $r_2$ : عدد تصادفی بین ۰ و ۱؛  $x_j^k$ : مکان ذره  $i$  ام در تکرار  $k$  ام؛  $c_1$  و  $c_2$ : ضرایب تسریع و  $w$  ضریب

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = P_{Demand}(t) + P_{Loss}(t) \quad (9)$$

که در آن  $P_{Demand}$  توان مورد تقاضا و  $P_{Loss}$  تلفات سیستم است. تلفات سیستم تابعی از توان تولیدی ژنراتورهاست که مقدار آن با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{Loss}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{i,t} B_{ij} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_{i,t} + B_{00} \quad (10)$$

که در آن  $B_{00}$ ،  $B_{i0}$  و  $B_{ij}$  ضرایب تابع تلفات شبکه هستند.

##### ۳-۲- قید حد بالا و پایین توان تولیدی

در هر لحظه از فعالیت سیستم قدرت توان تولیدی هر واحد تولیدی نباید از حد بالا و پایین آن تجاوز کند، این محدودیت با نامساوی زیر بیان می شود:

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

که در آن  $P_i^{\min}$  و  $P_i^{\max}$  به ترتیب حد بالا و پایین توان تولیدی واحدهای حرارتی است.

##### ۳-۳- قید مربوط به نرخ شیب تغییر تولید

برای جلوگیری از فشار به دیگ بخار و سایر تجهیزات محفظه احتراق، نرخ تغییر توان خروجی هر ژنراتور باید در محدوده قابل قبولی باشد [۳۳]. معادله مربوط به این قید به شکل زیر بیان می شود:

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq DR_i \end{cases} \quad (12)$$

که در آن  $P_{i,t-1}$  توان تولیدی واحد  $i$  ام در زمان  $t-1$  و  $DR_i$  و  $UR_i$  به ترتیب شیب پایین و بالای تغییر توان واحد  $i$  ام هستند.

##### ۳-۴- نواحی ممنوعه تولید

در برخی ژنراتورها به علت محدودیت های اجزای ماشین و نگرانی از ناپایداری، ژنراتورها نمی توانند در تمامی بازه بین حداقل و حداکثر خود توان تولید کنند [۳۴]، این

اینرسی است.

شده است [۳۷]:

$$C = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (17)$$

طوری که:

$$\varphi = c_1 + c_2 = 2/0.5 \quad \& \quad c_1 = c_2 = 4/1$$

بنابراین، معادله ۱۵ به شکل زیر بازنویسی می شود:

$$x_j^{k+1} = x_j^k + (C \times v_j^{k+1}) \quad (18)$$

### ۴-۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

#### هم تکاملی (CPSO)

در حل مسائل مقید، روش تابع جریمه به علت سادگی و اجرای آسان یکی از پرکاربردترین روش هاست، بر همین اساس در این مقاله، از روش تابع جریمه به منظور مدیریت قیود مسأله استفاده شده است. با توجه به اینکه در این روش یافتن ضرایب جریمه مناسب دشوار است، در اکثر مطالعات ضرایب جریمه به شکل سعی و خطا تعیین می شود. در این مقاله، از روش هم تکاملی که روی الگوریتم PSO اجرا شده به منظور مدیریت قیود مسأله استفاده شده است [۳۸]. در روش پیشنهادی (الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات هم تکاملی اصلاح شده) به منظور حل مسأله بهینه سازی، هم زمان از دو جمعیت جهت فرآیند حل مسأله استفاده می شود. اصول عملکرد روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱ مشخص است یکی از جمعیت ها که به وسیله Swarm<sub>2</sub> نشان داده شده است و دارای M<sub>2</sub> عنصر تکی است، برای ایجاد ضرایب جریمه مناسب به کار می رود. دیگر جمعیت که با Swarm<sub>1,1</sub>, Swarm<sub>1,2</sub>, ... & Swarm<sub>1,M<sub>2</sub></sub> نمایش داده شده است و هر کدام از آن ها دارای اندازه M<sub>1</sub> هستند، به شکل موازی برای یافتن پاسخ های مناسب به کار گرفته می شوند. هر ذره B<sub>j</sub> در Swarm<sub>2</sub> معرف مجموعه ای از ضرایب جریمه برای ذرات Swarm<sub>1,j</sub> است که هر کدام از آن ها معرف یک پاسخ هستند.

در هر مرحله از فرآیند، جمعیت Swarm<sub>1,j</sub> به وسیله الگوریتم PSO برای تعداد مشخصی تکرار (G<sub>1</sub>) با جمعیت ذرات B<sub>j</sub> در Swarm<sub>2</sub> به عنوان ضرایب جریمه

### ۴-۲- اصلاحات انجام شده روی الگوریتم

#### PSO

الگوریتم PSO دارای انعطاف پذیری بالا در جستجوی نقاط بهینه محلی و سراسری است. در نسخه اصلی PSO، الگوریتم به ویژه در مسائلی با بهینه های محلی متعدد از همگرایی زودهنگام رنج می برد. بنابراین، در این مقاله اصلاحاتی روی نسخه اصلی به منظور بهبود عملکرد آن اعمال شده است.

یکی از مهم ترین اصلاحات انجام شده روی الگوریتم PSO معرفی شده، ضریب وزن اینرسی (w) اعمال شده روی الگوریتم است. ضریب وزن اینرسی نقشی مهم در همگرایی الگوریتم PSO دارد و شاخصی است که به منظور تاثیر سوابق سرعت های پیشین بر سرعت های جاری استفاده می شود. بنابراین، شاخص w قابلیت ذرات را در اکتشاف مناطق بهینه محلی و سراسری و به تبع آن استخراج جواب بهینه تنظیم می کند. در نسخه اصلی PSO به روز نمودن سرعت ذرات با قرار دادن w = 1 حاصل می شود. اما نتایج تجربی نشان داده است که در ابتدای فرآیند بهینه سازی، برای بهبود اکتشاف سراسری در فضای جستجو مقادیر بزرگ تری برای w در نظر گرفته شود و به تدریج برای به دست آوردن پاسخ بهینه از مقدار آن کاسته شود [۳۶]. برای حصول ضریب اینرسی (w) که به طور خطی در طول شبیه سازی از ۰/۹ به ۰/۴ کاهش یابد از رابطه زیر استفاده شده است:

$$w(it) = \left( \frac{w_{min} - w_{max}}{it_{max} - 1} \right) (it - 1) + w_{max} \quad (16)$$

طوری که در آن، it: تعداد تکرار؛ w(it): ضریب اینرسی در تکرار itام؛ w<sub>min</sub>: ضریب اینرسی مینیمم (نهایی)؛ w<sub>max</sub>: ضریب اینرسی ماکزیمم (ابتدایی) و it<sub>max</sub>: ماکزیمم تکرار هستند.

همچنین، یکی دیگر از اصلاحات انجام شده در این مقاله، استفاده از ضریب انقباض C است، که در نسخه اصلی الگوریتم PSO وجود ندارد و طبق رابطه زیر تعریف

جریمه معرفی می‌شود ( $w_1, w_2$ ) پس از اینکه  $Swarm_{1,j}$  برای تعداد مشخصی تکرار ( $G_1$ ) ارزیابی شد، ذره  $i$  ام در  $B_j$  در  $Swarm_2$  به شکل زیر محاسبه می‌شود:  
 ۱- اگر حداقل یک پاسخ قابل قبول در  $Swarm_{1,j}$  وجود داشته باشد، ذره  $B_j$  که ذره‌ای معتبر (موجه) نامیده می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P(B_j) = \frac{\sum f_{feasible}}{\text{num\_feasible}} - \text{num\_feasible} \quad (21)$$

طوری که  $\sum f_{feasible}$  نشان دهنده مجموع مقادیر تابع هدف برای پاسخ‌های معتبر در  $Swarm_{1,j}$  و  $\text{num\_feasible}$  تعداد پاسخ‌های موجه در  $Swarm_{1,j}$  است.

۲- اگر پاسخ معتبری در  $Swarm_{1,j}$  وجود نداشته باشد، ذره  $B_j$  در  $Swarm_2$  که ذره‌ای نامعتبر (ناموجه) نامیده می‌شود از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P(B_j) = \max(P_{valid}) + \frac{\sum \text{sum\_viol}}{\sum \text{num\_viol}} + \sum \text{num\_viol} \quad (22)$$

طوری که  $\max(P_{valid})$  نشان دهنده برازندگی ماکزیمم همه ذرات موجه در  $Swarm_2$ ؛  $\sum \text{sum\_viol}$  نشان دهنده مجموع تخطی قیود برای همه ذرات  $Swarm_{1,j}$  و  $\sum \text{num\_viol}$  تعداد کل تخطی قیود برای همه ذرات در  $Swarm_{1,j}$  است.

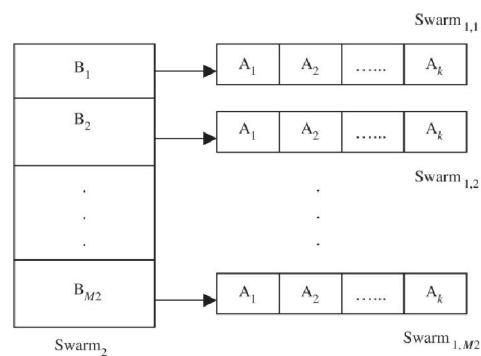
### ۵- نتایج عددی سیستم‌های مورد مطالعه

در این قسمت نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی روی سه سیستم آزمون ارائه شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2012a روی رایانه شخصی Pentium IV با ویژگی‌های CPU: Core 2 Duo-2.9GHz و RAM: 3.25GB انجام شده است.

#### ۵-۱- سیستم ۱: شامل ۱۳ واحد حرارتی

اولین سیستم مورد بررسی دارای ۱۳ ژنراتور است [۴۰]. در این سیستم اثر شیرهای بخار و محدودیت بالا و

ارزیابی می‌شود. سپس، برازندگی هر ذره  $B_j$  در  $Swarm_2$  تعیین خواهد شد. پس از اینکه تمام ذرات در  $Swarm_2$  ارزیابی شدند،  $Swarm_2$  به وسیله الگوریتم PSO برای ایجاد  $Swarm_2$  جدید ارزیابی خواهد شد. فرآیند هم‌تکاملی تا زمانی که یکی از شرایط خاتمه (زمان، تعداد تکرار، اندازه خطا و ...) محقق شود ادامه می‌یابد.



شکل ۱- نمایش گرافیکی فرآیند هم‌تکاملی [۳۸]

#### ۴-۴- تابع ارزیابی $Swarm_{1,j}$

در این مقاله، به منظور طراحی تابع تابع جریمه از روش پیشنهاد شده در مرجع [۳۹] استفاده شده است. در این روش ذره  $i$  ام در  $Swarm_{1,j}$  در الگوریتم CPSO توسط فرمول ۲۴ ارزیابی می‌شود.

$$F_i(x) = f_i(x) + \text{sum\_viol} \times w_1 + \text{num\_viol} \times w_2 \quad (19)$$

طوری که  $f_i(x)$  مقدار ذره  $i$  ام؛  $\text{sum\_viol}$  مجموع همه مقادیر تخطی شده از قیود؛  $\text{num\_viol}$  تعداد تخطی قیود؛  $w_1$  و  $w_2$  ضرایب جریمه متناظر با ذره  $B_j$  در  $Swarm_2$  هستند.

مقدار  $\text{sum\_viol}$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{sum\_viol} = \sum_{i=1}^N g_i(x) \quad \forall g_i(x) > 0 \quad (20)$$

طوری که  $N$  تعداد قیود نامساوی مسئله است.

#### ۴-۵- تابع ارزیابی $Swarm_2$

هر ذره در  $Swarm_2$  به وسیله مجموعه‌ای از ضرایب

است [۴۵]. در این سیستم اثر شیرهای بخار، محدودیت بالا و پایین توان تولیدی هر واحد و نواحی ممنوعه تولید در نظر گرفته شده‌اند. در جدول (۳)، توان خروجی هر یک از واحدها برحسب مگاوات و هزینه کل گزارش شده است. در جدول (۴)، نتایج به‌دست آمده از لحاظ هزینه مینیمم، هزینه میانگین و هزینه ماکزیمم در ۱۰۰ بار اجرای الگوریتم با چندین روش دیگر در مقالات اخیر مقایسه شده است. نمودار همگرایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله مورد نظر نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.

پایین توان تولیدی هر واحد در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۱، توان خروجی هر یک از واحدها برحسب مگاوات و هزینه کل گزارش شده است. در جدول (۲)، نتایج به دست آمده از لحاظ هزینه مینیمم، هزینه میانگین و هزینه ماکزیمم در ۵۰ بار اجرای الگوریتم با چندین روش دیگر در مقالات اخیر مقایسه شده است. نمودار همگرایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله موردنظر نیز در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): نتایج به‌دست آمده (سیستم ۱)

Unit (MW)	SDE	ORCCRO	Proposed
۱	۹۲۸/۳۲	۶۲۸/۳۲	۶۲۸/۳۲
۲	۲۹۹/۲۰	۲۹۹/۲۰	۲۹۹/۲۰
۳	۲۹۹/۲۰	۲۹۹/۲۰	۲۹۹/۲۰
۴	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۵	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۶	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۷	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۸	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۹	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳	۱۵۹/۷۳۳۱
۱۰	۷۷/۴۰	۷۷/۴۰	۷۷/۳۹۹۱
۱۱	۱۱۳/۱۲	۱۱۲/۱۴	۱۱۲/۰۶۲
۱۲	۹۲/۴۰	۹۲/۴۰	۹۲/۴۰
۱۳	۹۲/۴۰	۹۲/۴۰	۹۲/۴۰
Total (MW)	۲۵۲۰	۲۵۲۰	۲۵۲۰
Cost (\$)	۲۴۵۱۴/۸۸	۲۴۵۱۳/۹۱	۲۴۵۱۳/۸۹۴۱
Loss (MW)	۴۰/۴۳	۳۹/۴۳	۳۹/۳۷۹۶

جدول (۳): نتایج به‌دست آمده (سیستم ۲)

Unit	Generation (MW)	Unit	Generation (MW)
۱	۱۱۰/۸۱	۲۱	۵۲۳/۲۷۹
۲	۱۱۰/۸۱	۲۲	۵۲۳/۲۷۹
۳	۹۷/۴	۲۳	۵۲۳/۲۷۹
۴	۱۷۹/۷۳۳	۲۴	۵۲۳/۲۷۹
۵	۸۷/۷۹۸	۲۵	۵۲۳/۲۷۹
۶	۱۴۰/۱۴	۲۶	۵۲۳/۲۷۹
۷	۲۵۹/۵۷	۲۷	۱۰
۸	۲۸۴/۵۹۹	۲۸	۱۰
۹	۲۸۴/۵۹۹	۲۹	۱۰
۱۰	۱۳۰	۳۰	۸۷/۷۹۹۹
۱۱	۹۴	۳۱	۱۹۰
۱۲	۹۴	۳۲	۱۹۰
۱۳	۲۱۴/۷۵۹۵	۳۳	۱۹۰
۱۴	۳۹۴/۲۷۹۹	۳۴	۱۶۴/۷۹۹۸
۱۵	۳۹۴/۲۷۹۹	۳۵	۱۹۴/۲۷
۱۶	۳۹۴/۲۷۹۹	۳۶	۲۰۰
۱۷	۴۸۹/۲۸۵	۳۷	۱۱۰
۱۸	۴۸۹/۲۸۵	۳۸	۱۱۰
۱۹	۵۱۱/۲۷۹	۳۹	۱۱۰
۲۰	۵۱۱/۲۷۹	۴۰	۵۱۱/۳۷۷۶
Cost (\$)	۱۲۱۴۱۲/۰۹		

جدول (۲): مقایسه نتایج (سیستم ۱)

Algorithm	Minimum cost (\$)	Average cost (\$)	Maximum cost (\$)
ICA-PSO [43]	۲۴۵۴۰/۰۶	۲۴۵۴۰/۰۶	۲۴۵۸۹/۴۵
DE-BBO [44]	۲۴۵۱۴/۹۷	۲۴۵۱۴/۹۷	۲۴۵۱۵/۹۸
SDE [41]	۲۴۵۱۴/۸۸	۲۴۵۱۶/۳۱	-
ORCCRO [42]	۲۴۵۱۳/۹۱	۲۴۵۱۳/۹۱	۲۴۵۱۳/۹۱
Proposed	۲۴۵۱۳/۸۹۴۱	۲۴۵۱۳/۹۰۱۳	۲۴۵۱۳/۹۰۸۷

## ۵-۲- سیستم ۲: شامل ۴۰ واحد حرارتی

دومین سیستم آزمون مورد بررسی دارای ۴۰ ژنراتور



جدول (۴): مقایسه نتایج (سیستم ۲)

Algorithm	Minimum cost (\$)	Average cost (\$)	Maximum cost (\$)
FAPSO [46]	۱۲۱۷۱۹/۷۳	۱۲۱۷۸۳/۰۹۳	۱۲۱۸۴۲/۵۲
PSO [46]	۱۲۳۸۶۱/۴۵	۱۲۴۱۲۶/۴۸۱۹	۱۲۴۶۶۳/۰۴۷
KHA-I [47]	۱۲۱۴۶۰/۴۱۵۶	۱۲۱۴۶۸/۹۸۲۲	۱۲۱۴۷۷/۴۵۸۲
KHA-II [47]	۱۲۱۴۴۸/۳۶۴۳	۱۲۱۴۵۳/۶۷۹۹	۱۲۱۴۶۱/۳۸۹۵
KHA-III [47]	۱۲۱۴۲۳/۴۵۵۷	۱۲۱۴۲۸/۲۲۶۳	۱۲۱۴۳۳/۵۶۳۱
KHA-IV [47]	۱۲۱۴۱۲/۵۹۹۱	۱۲۱۴۱۳/۱۴۵۴	۱۲۱۴۱۵/۰۰۴۲
Proposed	۱۲۱۴۱۲/۰۹	۱۲۱۴۱۲/۸۶۲۴	۱۲۱۴۱۴/۵۳۲۹

### ۳-۵- سیستم ۳: شامل ۶ واحد حرارتی و ۲

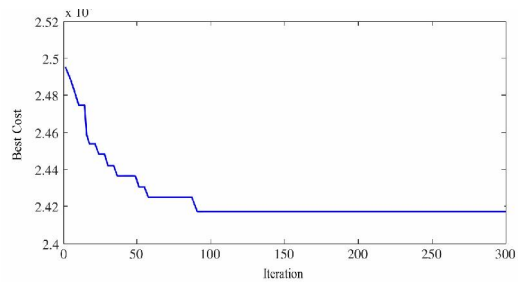
#### مزرعه بادی

در این قسمت، الگوریتم MCPPO پیشنهاد شده روی سیستم نمونه IEEE با ۶ واحد حرارتی، ۲ مزرعه بادی، ۳۰ باس و ۴۱ خط انتقال، اعمال شده است [۳۲].

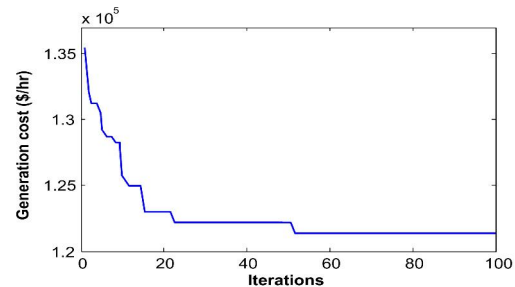
### نتایج پخش بار اقتصادی با و بدون در نظر گرفتن

#### هزینه آلودگی با مشارکت واحدهای بادی

در این قسمت، با استفاده از ویژگی‌های سرعت باد که در جدول (۵) یاد شده است (مرجع [۳۲])؛ از نتایج پیش‌بینی توان باد که توسط تابع ویبول در این پژوهش به دست آمده استفاده شده است. نتایج پیش‌بینی توان هر یک از مزارع بادی نیز در جدول (۶) یاد شده است. همچنین، به منظور به دست آوردن پاسخ‌های پخش بار اقتصادی برای حل مسأله، در الگوریتم پیشنهادی اندازه جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار نیز ۵۰۰ قرار داده شده است. نتایج به دست آمده نیز در جدول (۷) یاد شده است.



شکل (۲): نمودار همگرایی الگوریتم پیشنهادی (سیستم ۱)



شکل (۳): نمودار همگرایی الگوریتم پیشنهادی (سیستم ۲)

جدول (۵): شاخص‌های مربوط به واحدهای بادی

Plant	Model	No	C	k	$v_{in}$	$v_{out}$	$v_r$	$w_r$	$d_j$	$k_{P,j}$	$k_{R,j}$
$G_7$	Vestas	۳۰	۴/۶۰۲۴	۱/۸۸۶۲	۴	۲۵	۱۶	۳	۰	۵	۳۰
$G_8$	Sinovel	۲۰	۴/۴۳۶۳	۱/۷۱۲۸	۳	۲۵	۱۳	۳	۰	۵	۲۰

جدول (۶): مقادیر پیش‌بینی شده توان خروجی مزرعه‌های بادی با استفاده از تابع ویبول

	حالت سوم و ششم و نهم	حالت دوم و پنجم و هشتم	حالت اول و چهارم و هفتم
$G_7$	۱۶/۵	۲۱	۱۳/۵
$G_8$	۱۴	۷/۵	۱۱

۴۰ حل مسأله پخش بار اقتصادی - آلودگی دینامیکی با مشارکت مزارع بادی با استفاده از الگوریتم فرا .....

جدول (۷): پاسخ‌های پخش بار اقتصادی با مشارکت واحدهای بادی با و بدون در نظر گرفتن هزینه آلودگی

	حالت ۱: 1200 MW		حالت ۲: 1400 MW		حالت ۳: 1600 MW	
	بدون آلودگی	با آلودگی	بدون آلودگی	با آلودگی	بدون آلودگی	با آلودگی
$G_1$	۱۰۵/۱۵	۵۰/۱۲	۹۵/۰۵	۶۰/۲۹	۱۰۲/۰۳	۳۰/۵۴
$G_2$	۹۹/۷۸	۲۰/۲۳	۹۷/۵۸	۲۱/۱۴	۹۱/۱۲	۲۰/۹۷
$G_3$	۵۸۰/۲۸	۵۶۹/۷۰	۵۹۷/۲۱	۵۷۲/۲۷	۵۷۹/۵۱	۵۹۹/۱۶
$G_4$	۲۰۷/۰۴	۳۴۰/۰۹	۳۳۲/۱۴	۴۷۴/۷۴	۴۴۹/۷۴	۴۶۴/۲۵
$G_5$	۱۲۷/۳۵	۱۱۰/۶۵	۱۵۹/۴۷	۱۳۰/۳۲	۲۶۴/۲۵	۳۶۵/۲۵
$G_6$	۴۱/۴۷	۴۰/۷۲	۴۵/۵۵	۴۳/۰۷	۴۴/۸۶	۴۰/۰۲
$G_7$	۱۰/۰۸	۹/۲۴	۲۰/۵۳	۴۷/۲۸	۱۵/۰۴	۲۸/۷۴
$G_8$	۲۸/۸۵	۴۵/۰۴	۵۲/۴۷	۵۰/۸۹	۵۳/۴۵	۵۱/۰۷
Total (MW)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰
Cost (\$)	۲۹۰۱۳/۱۳	۴۸۳۱۹/۱۷	۳۲۲۵۹/۷۱	۵۲۵۹۷/۴۱	۳۶۸۱۸/۹۸	۵۷۶۲۱/۳۵

دست آمده که در جدول‌های (۸) و (۹) یاد شده‌اند گویای برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم مورد مقایسه در حل مسأله است. همان‌طور که مشخص است در این حالت (با مشارکت واحدهای بادی) قسمتی از توان تولیدی واحدهای حرارتی کاسته شده است و در نهایت، هزینه و آلودگی کم‌تر نسبت به حالت بدون مشارکت واحدهای بادی داشته باشیم.

### پخش بار اقتصادی با مشارکت واحدهای بادی با در نظر گرفتن هزینه آلودگی و بدون آن

در این قسمت به منظور مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از روش پیشنهاد شده با نتایج مرجع [۳۲]، از نتایج پیش‌بینی شده توان بادی در مرجع یاد شده استفاده شده است. همچنین، به منظور اجرای الگوریتم پیشنهادی اندازه جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار نیز ۵۰۰ قرار داده شده است. نتایج به

جدول (۸): پاسخ‌های پخش بار اقتصادی با مشارکت واحدهای بادی بدون در نظر گرفتن هزینه آلودگی

Unit	حالت ۴: 1200 MW		حالت ۵: 1400 MW		حالت ۶: 1600 MW	
	MCPSO	QPSO [۳۲]	MCPSO	QPSO [۳۲]	MCPSO	QPSO [۳۲]
$G_1$	۱۰۸/۱۳	۱۰۳/۵۶	۹۸/۳۶	۹۴/۳۹	۱۰۰/۱۲	۹۵/۲۷
$G_2$	۹۹/۰۸	۹۹/۰۹	۹۵/۳۰	۹۶/۵۳	۹۵/۴۵	۹۷/۹۵
$G_3$	۵۷۵/۱۳	۵۶۷/۶۶	۵۹۹/۳۴	۵۹۴/۲۴	۵۷۵/۰۳	۵۶۸/۸۷
$G_4$	۲۰۹/۹۴	۲۱۱/۶۴	۳۳۰/۸۶	۳۱۹/۴۶	۴۵۸/۱۳	۴۵۲/۱۳
$G_5$	۱۲۵/۳۵	۱۳۸/۰۵	۱۶۱/۷۲	۱۷۷/۱۶	۲۵۹/۵۰	۲۶۶/۲۳
$G_6$	۴۲/۵۳	۴۰/۲۵	۴۰/۱۲	۴۳/۹۵	۴۱/۷۰	۴۹/۵۲
$G_7$	۶/۵۶۵	۸/۳۱۸	۱۵/۸۰	۱۵/۸۰	۲۵/۳۲	۱۰/۹۱
$G_8$	۳۳/۳۱۱	۳۱/۴۲	۵۸/۴۷	۵۸/۴۷	۴۴/۷۸	۵۹/۱۲
Total (MW)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰
Cost (\$)	۲۹۲۱۸	۲۹۵۱۳/۴۶	۳۲۲۹۹	۳۳۲۵۹/۶۳	۳۶۴۷۷	۳۷۶۰۱/۷۱

جدول (۹): پاسخ‌های پخش بار اقتصادی با مشارکت واحدهای بادی با در نظر گرفتن هزینه آلودگی

Unit	حالت ۷: 1200 MW		حالت ۸: 1400 MW		حالت ۹: 1600 MW	
	MCPSO	QPSO [۳۲]	MCPSO	QPSO [۳۲]	MCPSO	QPSO [۳۲]
G <sub>1</sub>	۵۰/۱۲	۵۵/۵۰	۵۸/۲۳	۶۳/۶۴	۲۵/۰۷	۲۸/۹۸
G <sub>2</sub>	۲۰/۲۳	۲۰/۹۲	۲۱/۱۹	۲۰/۲۱	۲۰/۲۷	۲۰/۳۰
G <sub>3</sub>	۵۸۹/۷۰	۵۶۳/۳۶	۵۹۹/۱۲	۵۶۸/۸۷	۵۹۹/۱۶	۵۷۳/۶۵
G <sub>4</sub>	۳۵۰/۰۹	۳۵۵/۱۲	۴۷۰/۲۶	۴۷۲/۰۸	۴۶۳/۲۵	۴۶۳/۱۶
G <sub>5</sub>	۱۱۰/۶۰	۱۱۰/۴۴	۱۲۴/۳۲	۱۳۲/۴۸	۳۷۰/۴۶	۳۷۴/۸۴
G <sub>6</sub>	۴۰/۳۲	۴۷/۷۴	۴۰/۰۷	۴۲/۸۸	۴۰/۰۲	۴۳/۱۶
G <sub>7</sub>	۱۰/۰۸	۵/۲۵	۳۵/۶۱	۴۰/۸۳	۳۲/۶۹	۳۶/۶۱
G <sub>8</sub>	۲۸/۸۵	۴۱/۶۸	۵۱/۲۳	۵۹/۰۱	۴۹/۰۸	۵۹/۳۰
Total (MW)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰
Cost (\$)	۴۸۳۲۳	۴۸۵۲۷/۴۲	۵۲۳۶۸	۵۲۶۸۹/۷۰	۵۷۳۲۶	۵۷۶۹۹/۲۱

### ۶- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، پژوهش در زمینه انرژی‌های نو به ویژه انرژی باد به دلیل هزینه پایین تولید توان و همچنین، آلودگی کمتر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله، روش جدیدی با نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات هم‌تکاملی اصلاح شده (MCPSO) برای یافتن پاسخ‌های سریع و مناسب‌تر پخش بار اقتصادی دینامیک در یک سیستم قدرت مشتمل بر واحدهای حرارتی و مزارع بادی ارائه شد. در مسأله مورد نظر قیود و شاخص‌هایی مانند نرخ شیب تغییرات توان واحدهای حرارتی، اثرات شیر بخار، نواحی ممنوعه تولید تلفات سیستم، هزینه آلودگی و نواحی ممنوعه تولید واحدهای حرارتی بررسی شده‌اند. عدم قطعیت تولید واحدهای بادی نیز با استفاده از توزیع احتمالی ویبول و تولید مازاد/کمبود واحدهای بادی از مقادیر مورد انتظار با در نظر گرفتن توابع جریمه مدل‌سازی شد.

کارایی الگوریتم پیشنهادی روی ۳ سیستم آزمون IEEE که ۲ سیستم آزمون بدون مشارکت مزارع بادی و یک سیستم شامل شش واحد حرارتی و دو مزرعه بادی است، نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش‌های کلاسیک نظیر PSO، GA و QPSO بیانگر پاسخ‌های بهتر و سریع‌تر

### مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهاد شده

#### (MCPSO) با سایر روش‌ها

به منظور اثبات کارایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌ها (GA، PSO و QPSO) اندازه جمعیت با گام‌های ۲۵ تا ۱۵۰ تغییر داده و میانگین پاسخ‌های به دست آمده در ۱۰۰ اجرای مستقل در جدول (۱۰) نشان داده شده است. شایان ذکر است نتایج مربوط به حالت هفتم (با در نظر گرفتن هزینه آلودگی هوا) است. همان‌طور که مشخص است به کمک الگوریتم پیشنهادی می‌توان به پاسخ‌های بهتری (هزینه کم‌تر) دست یافت.

#### جدول (۱۰): مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهاد شده

##### با سایر روش‌ها

Population size	GA [۳۲]	PSO [۳۲]	QPSO [۳۲]	MCPSO
۵۰	۴۹۶۲۳/۷۷	۴۹۱۱۵/۹۹	۴۸۹۰۰/۱۷	۴۸۸۵۶/۲۵
۷۵	۴۹۵۷۰/۵۲	۴۹۰۸۱/۳۷	۴۸۸۵۲/۶۶	۴۸۷۵۶/۱۳
۱۰۰	۴۹۵۰۲/۶۵	۴۹۰۵۴/۳۴	۴۸۷۹۵/۹۴	۴۸۶۹۸/۳۲
۱۲۵	۴۹۴۶۱/۹۳	۴۹۰۳۱/۲۰	۴۸۷۷۷/۵۳	۴۸۶۷۹/۵۸
۱۵۰	۴۹۴۶۷/۹۱	۴۹۰۲۲/۷۶	۴۸۷۷۲/۳۸	۴۸۶۵۴/۰۹

- [11] Bofinger, S., Luig, A., Beyer, H. G., "Qualification of wind power forecasts", in Proc. Global Wind Power Conf., Paris, France, 2002.
- [12] Fabbri, A., Roman, T. G. S., Abbad, J. R., Quezada, V. H., "Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 3, pp. 1440-1446, 2005.
- [13] Pappala, V. S., Erlich, I., Rohrig, K., Dobschinski, J., "A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 2, pp. 940-950, 2009.
- [14] Miranda, V., Hang, P. S., "Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 4, pp. 2143-2145, 2005.
- [15] Albadi, M. H., El-Saadany, E. F., "Comparative study on impacts of wind profiles on thermal units scheduling costs", IET Renew. Power Gener., Vol. 5, No. 1, pp. 26-35, 2011.
- [16] Hetzer, J., Yu, D. C., "An economic dispatch model incorporating wind power", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 29, pp. 603-611, 2008.
- [17] Zhang, Z. S., Sun, Y. Z., Gao, D. W., Lin, J., Cheng, L., "A Versatile Probability Distribution Model for Wind Power Forecast Errors and Its Application in Economic Dispatch", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 3, pp. 3114-3125, 2013.
- [18] Patel, M. R., Wind and Solar Power Systems, Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [19] Shoults, R. R., Venkatesh, S. V., Helmick, S. D., Lolla, M. J., "A dynamic programming based method for developing dispatch curves when incremental heat rate curves are non-monotonically increasing", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 1, No. 1, pp. 10-16, 1986.
- [20] Hindi, K. S., Ghani, M. R., "Dynamic economic dispatch for large scale power systems: a Lagrangian relaxation approach", Int. J. Elect. Power Energy Syst., Vol. 13, No. 1, pp. 51-56, 1991.
- [21] Irisarri, G., Kimball, L. M., Clements, K.A., Bagchi, A. Davis, P. W., "Economic dispatch with network and ramping constraints via interior point methods", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 1, pp. 236-242, 1998.
- [22] Fukuyama, Y., Ueki, Y., "An application on neural network to dynamic dispatch using multi processors", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 8, No. 4, pp. 1299-1307, 1994.
- [23] Li, F., Morgan, R., Williams, D., "Hybrid genetic approaches to ramping rate constrained dynamic economic dispatch", Elect. Power Syst. Res., Vol. 43, pp. 97-103, 1997.
- [24] Panigrahi, C. K., Chattopadhyay, P. K., Chakrabarti, R., "Load dispatch and PSO algorithm for DED control", Int. J. Autom. Control, Vol. 1, pp. 182-194, 2007.
- [25] Niknam, T., Mojarad, H. D., Meymand, H. Z., Firouzi, B. B., "A new honey bee mating optimization algorithm for non-smooth economic dispatch", Energy, Vol. 36, pp. 896-908, 2011.
- [26] Attaviriyapap, D., Kita, H., Tanaka, E.,
- روش پیشنهادی در حالت‌های مختلف مانند در نظر گرفتن واحدهای بادی و هزینه آلودگی و بدون آن‌هاست.
- شایان ذکر است از نتایج به دست آمده چنین استنباط می‌شود؛ اگرچه هزینه جریمه خطای پیش‌بینی توان بادی قابل توجه است اما با مشارکت مزارع بادی، هزینه آلودگی ناشی از واحدهای حرارتی و در نتیجه مجموع هزینه‌های سیستم کاهش می‌یابد. به علاوه خروجی متغیر واحدهای بادی بیانگر نیاز سیستم قدرت به توان ذخیره به اندازه کافی و یا تجهیزات ذخیره توان است و مؤلفین درصدد هستند در ادامه کار به این موضوع بپردازند.
- ### مراجع
- [1] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., Power generation operation and control, Wiley, New York, USA, 2nd edn, 1996.
- [2] Xia, X., Elaiw A., "Optimal dynamic economic dispatch of generation: a review", Elect. Power Syst. Res., Vol. 80, pp. 975-986, 2010.
- [3] Li, F., Morgan, R., Williams, D., "Hybrid genetic approaches to ramping rate constrained dynamic economic dispatch", Elect. Power Syst. Res., Vol. 43, pp. 97-103, 1997.
- [4] Pandi, V. R., Panigrahi, B. K., "Dynamic economic load dispatch using hybrid swarm intelligence based harmony search algorithm", Expert Syst. Appl., Vol. 38, pp. 8509-14, 2011.
- [5] Damousis, I. G., Alexiadis, M. C., Theocharis, J.B., Dokopoulos, P.S., "A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 19, No. 2, pp. 3352-3361, 2004.
- [6] Li, S., Wunsch, D. C., O'Hair, E. A., Giesselmann, M. G., "Using neural networks to estimate wind turbine power generation", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 16, No. 3, pp. 276-282, 2001.
- [7] Brown, B. G., Katz, R. W., Murphy, A. H., "Time series models to simulate and forecast wind speed and wind power", J. Clim. Appl. Meterol., Vol. 23, pp. 1184-1195, 1984.
- [8] Doherty, R., O'Malley, M., "A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 2, pp. 587-595, 2005.
- [9] Bouffard, F., Galiana, F. D., "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 2, pp. 306-316, 2008.
- [10] Zhang, Z. S., Sun, Y. Z., Li, G. J., Cheng, L. Lin, J., "A solution of the economic dispatch problem considering wind power uncertainty", Autom. Elect. Power Syst., Vol. 35, No. 22, pp. 125-130, 2011.

- Evol. Comput., Vol. 6, pp. 58–73, 2002.
- [38] He, Q., Wang, L., "An effective co-evolutionary particle swarm optimization for engineering optimization problems", *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol. 20, pp. 89–99, 2007.
- [39] Richardson, J. T., Palmer, M. R., Liepins, G., Hilliard, M., "Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions", In *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, George Mason University, Morgan Kaufmann, pp. 191–197, 1989.
- [40] dos Santos Coelho, L., Mariani, V. C., "Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valvepoint effect", *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 21, No. 2, pp. 989–996, 2006.
- [41] Srinivasa Reddy, A., Vaisakh, K., "Shuffled differential evolution for large scale economic dispatch", *Electric Power Syst Res.* Vol. 96, pp. 237–245, 2013.
- [42] Bhattacharya, K., Bhattacharya, A., Sunita Halder nee Dey., "Oppositional Real Coded Chemical Reaction Optimization for different economic dispatch problems. *Electrical Power and energy Systems*", Vol. 55, pp. 378–391, 2014.
- [43] Vlachogiannis, J. G., Lee, K. Y., "Economic load dispatch – a comparative study on heuristic optimization techniques with an improved coordinated aggregation based PSO", *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 24, No. 2, pp. 991–1001, 2009.
- [44] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P. K., "Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch", *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 25, No. 4, pp. 1955–1964, 2010.
- [45] Sinha, N., Chakrabarthy, R., Chattopadhyay, P. K., "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch", *IEEE Transactions on evolutionary computation*, Vol. 7, pp. 83–94, 2003.
- [46] Niknam, T., Mojarad, H. D., Meymand, H. Z., "Non-smooth economic dispatch computation by fuzzy and self-adaptive particle swarm optimization", *Appl Soft Compon*, Vol. 11, No. 2, pp. 2805–2517, 2011.
- [47] Mandal, B., Kumar Roy, P., Mandal, S., "Economic load dispatch using krill herd algorithm. *Electrical Power and energy Systems*", Vol. 57, pp. 1–10, 2014.
- Hasegawa, J., "A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth incremental fuel cost function", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 17, No. 2, pp. 411–416, 2002.
- [27] Victoire, T. A. A., Jeyakumar, A. E., "Deterministically guided PSO for dynamic dispatch considering valve-point effect", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 73, No. 3, pp. 313–322, 2005.
- [28] Abdelaziz, A. Y., Kamh, M. Z., Mekhamer, S.F., Badr, M. A. L., "A hybrid HNN-QP approach for dynamic economic dispatch problem", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 78, No. 10, pp. 1784–1788, 2008.
- [29] Hemamalini, S. Simon, S. P., "Dynamic economic dispatch using artificial immune system for units with valve-point effect", *Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 33, No. 4, pp. 868–874, 2011.
- [30] Gent, M. R., Lamont, J. W., "Minimum emission dispatch", *IEEE Trans. PAS* 90, pp. 2650–2660, 1971.
- [31] Peng, C., Sun, H., Guo, J., Liu, G., "Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, No. 1, pp. 119–126, 2012.
- [32] Yao, F., Dong, Z. Y., Meng, K., Xu, Z., Iu, H. H. C. Wong, K. P., "Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization for Power System Operations Considering Wind Power Uncertainty and Carbon Tax in Australia", *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol. 8, No. 4, pp. 880–888, 2012.
- [33] Ross, D., Kim, S., "Dynamic economic dispatch of generation", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 99, pp. 2060–2067, 1980.
- [34] Neto, J. X. V., de Andrade Bernert, D. L., dos Santos Coelho, L., "Improved quantum inspired evolutionary algorithm with diversity information applied to economic dispatch problem with prohibited operating zones", *Energy Convers. Manage.*, Vol. 52, No. 1, pp. 8–14, 2011.
- [35] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle swarm optimization", In *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Perth, Australia, Vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [36] Abdelaziz, A. Y., Mohammed, F. M., Mekhamer, S. F., Badr, M. A. L., "Distribution Systems Reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm", *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 79, No. 11, pp. 1521–1530, 2009.
- [37] Clerc, M., Kennedy, J., "The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", *IEEE Trans.*

---

<sup>1</sup> Modified co-evolutionary particle swarm optimization

