

## برنامه‌ریزی روزانه تولید واحدهای آبی و حرارتی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با ضریب اینرسی هوشمند

ناصر قربانی<sup>۱</sup>محمدحسین نصری<sup>۲</sup>سید یاسر درخشنده\*<sup>۳</sup>

### چکیده

مسئله برنامه‌ریزی روزانه واحدهای آبی و حرارتی، یکی از مسائل مهم سامانه‌های قدرت است که نقش اساسی در عملکرد اقتصادی سامانه قدرت دارد. برنامه‌ریزی واحدهای آبی و حرارتی با وجود قیود، یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده و غیرخطی است که جهت بهینه‌سازی آن از الگوریتم‌های تکاملی استفاده شده است. در این مقاله جهت حل مسئله فوق الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با ضریب اینرسی هوشمند پیشنهاد شده است. الگوریتم پیشنهادی یک نسخه بسیار قوی و هوشمند الگوریتم اجتماع ذرات است که در آن هر ذره یک ضریب اینرسی و در نتیجه سرعت منحصربه‌فردی جهت استخراج نقطه بهینه جهانی دارد. در الگوریتم پیشنهادی کنترل سرعت ذرات به صورت هوشمند و بر اساس هزینه به دست آمده هر ذره انتخاب می‌شود. جهت حل مسئله برنامه‌ریزی واحدهای آبی-حرارتی و جهت بررسی توانایی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم بر روی دو سامانه گوناگون پیاده‌سازی شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده توانایی بالای الگوریتم پیشنهادی در استخراج نقطه بهینه مسئله برنامه‌ریزی واحدهای آبی-حرارتی است.

### واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی، واحدهای آبی-حرارتی، بهینه‌سازی، الگوریتم اجتماع ذرات، ضریب اینرسی.

۱. شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی.

۲. شرکت برق منطقه ای اصفهان.

۳. عضو هیئت علمی گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، [y\\_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir](mailto:y_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir).

## مقدمه

مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت واحدهای آبی-حرارتی<sup>۱</sup> (STHTS) یکی از مسائل مهم و چالش‌برانگیز سامانه قدرت است. هدف از حل این مسئله کمینه کردن هزینه تولید کل سامانه طی یک بازه‌ی یک یا چندروزه با در نظر گرفتن قیود سامانه است. هزینه بهره‌برداری از واحدهای آبی برخلاف واحدهای حرارتی بسیار پایین است بنابراین بیشترین هزینه تولید توان در مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت واحدهای آبی-حرارتی مربوط به هزینه سوخت واحدهای حرارتی است. با توجه به ناچیز بودن هزینه بهره‌برداری از واحدهای برق‌آبی در مقایسه با واحدهای حرارتی، هدف اولیه در حل این مسئله، تولید توان از طریق واحدهای آبی است بنابراین در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت با توجه به تقاضای بار، محدودیت مربوط به تعادل آب پشت سد، محدودیت فیزیکی مربوط به آب ذخیره‌شده و آب جاری‌شده از طریق توربین‌ها، واحدهای آبی بخشی از تقاضای بار را تأمین می‌کنند و آن قسمت از تقاضای بار که توسط واحدهای آبی تأمین نشده، توسط واحدهای حرارتی تأمین می‌گردد. وجود قیود گوناگون مربوط به واحدهای آبی و واحدهای حرارتی و محدودیت مربوط به تأخیر زمانی و تغییر تقاضای بار در هر ساعت، موجب می‌شود مسئله برنامه‌ریزی واحدهای آبی-حرارتی به یک مسئله غیرخطی و بسیار پیچیده تبدیل شود (وود و ولنبرگ<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) و ال‌هاواری و کریستنسن<sup>۳</sup> (۱۹۷۹)).

در طی دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای جهت بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی تولید واحدهای آبی-حرارتی صورت گرفته و روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی جریان شبکه (الویرا و سوارس<sup>۴</sup> (۱۹۹۵))، روش تجزیه (حبیب اله زاده و بوینکو<sup>۵</sup> (۱۹۸۶))، روش ضرایب لاگرانژ (فینانداری<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، سلام و نور<sup>۷</sup> (۱۹۹۸))، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (چانگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۱)) و برنامه‌ریزی دینامیکی (ارکمن و کاراتاس<sup>۹</sup> (۱۹۹۵))

اشاره نمود. در عمل هر کدام از این روش‌ها نواقص و محدودیت مربوط به خود را دارند. به‌عنوان مثال در روش برنامه‌ریزی جریان شبکه، توان تولیدی به‌صورت خطی، به آب تخلیه‌شده از سد وابسته است بنابراین در این روش تغییر ارتفاع آب سد نادیده گرفته شده که این عامل موجب کاهش توان تولیدی توسط واحدهای برق‌آبی و دور شدن جواب مسئله از جواب ایده‌آل می‌شود (یوان<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۰۸)). بررسی محدودیت‌های گوناگون در روش تجزیه، موجب افزایش متغیرهای دوگانه مسئله و در نتیجه پیچیدگی فرآیند بهینه‌سازی می‌شود (زوماس<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۰۴)). استفاده از روش لاگرانژ بسیار پیچیده بوده و کیفیت جواب‌ها در این روش به نحوه به‌روزرسانی ضرایب لاگرانژ وابسته است (یو<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷)). هرچند روش برنامه‌ریزی دینامیکی قادر به حل مستقیم مسائل بزرگ با قیود پیچیده است ولی در این روش نیز با افزایش اندازه سیستم و مدت برنامه‌ریزی ابعاد مسئله به‌شدت افزایش می‌یابد که می‌تواند موجب همگرا شدن این روش به یک جواب نامناسب شود (یو و همکاران (۲۰۰۷)). علاوه بر محدودیت‌های اشاره‌شده در روش‌های سنتی به مدل واحدهای آبی در کنار مدل واحدهای حرارتی نیاز است تا بتوان این روش‌ها را به شکل خطی تکه‌ای یا به‌صورت ضرایب چندجمله‌ای تقریب زد. این تقریب‌ها ممکن است به دلیل همگرا شدن به راه‌حل‌های نامطلوب موجب از دست رفتن درآمدهای قابل توجهی در طی دوره برنامه‌ریزی گردد (امجدی<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۰۹)).

با توجه به مشکلات و محدودیت‌های روش‌های سنتی، در سالیان اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی تولید واحدهای آبی-حرارتی توسط الگوریتم‌های تکاملی صورت گرفته است. الگوریتم‌های فراابتکاری بدون توجه به پیچیدگی و قیود مسائل می‌توانند با تولید و ساماندهی اعداد تصادفی اقدام به بهینه‌سازی مسائل گوناگون نمایند (قربانی و بابایی<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۴)). از این‌رو در دهه اخیر از روش‌های هوشمندی چون

<sup>9</sup> Erkmen & Karatas

<sup>10</sup> Yuan

<sup>11</sup> Zoumas

<sup>12</sup> Yu

<sup>13</sup> Amjady

<sup>14</sup> Ghorbani & Babaei

<sup>1</sup> Short-term hydro-thermal scheduling

<sup>2</sup> Wood & Wollenberg

<sup>3</sup> El-Hawary & Christensen

<sup>4</sup> Oliveira & Soares

<sup>5</sup> Habibollahzadeh & Bubenko

<sup>6</sup> Finardi

<sup>7</sup> Salam & Nor

<sup>8</sup> Chang

تولید واحدهای آبی و حرارتی، الگوریتم PSO-SIF پیشنهاد می‌شود.

جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله STHTS این الگوریتم به صورت موفقیت‌آمیز بر روی دو سامانه گوناگون با واحدهای آبی- حرارتی پیاده‌سازی شده است. نتایج به دست آمده از حل مسئله فوق با نتایج روش قوی و کارآمد الگوریتم جستجوی باکتری<sup>۱۰</sup> (BFA) مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده کارآمدی و توانایی بالایی الگوریتم پیشنهادی است. الگوریتم پیشنهادی در هر بار اجرای برنامه به جواب‌های تقریباً یکسانی همگرا می‌شود ولی با توجه به عدم امکان مقایسه نتایج با روش‌های تجربی، نقاط استخراجی الگوریتم و جواب‌های حاصل شده با نام نقاط بهینه جهانی مسئله معرفی نشده و تنها به عنوان نقطه بهینه مسئله معرفی می‌شوند. در قسمت بعدی این تحقیق، روابط ریاضی مربوط به مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت واحدهای آبی و حرارتی ارائه شده است. در بخش سوم الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات و الگوریتم پیشنهادی معرفی شده است. در بخش چهارم مراحل پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی جهت حل مسئله STHTS نشان داده شده است. در بخش پنجم نتایج حاصل از حل مسئله STHTS توسط الگوریتم پیشنهادی ارائه شده و نهایتاً در بخش ششم نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق به طور مختصر شرح داده شده است.

### مواد و روش‌ها

به دلیل هزینه بهره‌برداری بسیار پایین واحدهای برق آبی در مقایسه با واحدهای حرارتی، در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت اولویت استفاده از واحدهای برق آبی تا حد امکان و تعیین مقدار بهینه توان تولیدی واحدهای آبی با در نظر گرفتن مقدار آب خروجی از مخازن بوده و در ادامه تأمین باقیمانده توان درخواستی شبکه از طریق واحدهای حرارتی صورت می‌گیرد. یک سامانه آبی- حرارتی از  $N_g$  واحد حرارتی و  $M_H$  واحد آبی تشکیل شده است. هدف از حل مسئله، تعیین توان فعال تولیدی هر واحد

الگوریتم ژنتیک (امجدی و نصیری<sup>۱</sup> (۲۰۰۹))، الگوریتم آبکاری فلزات (ونگ<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۴))، الگوریتم تکامل تفاضلی (لاکشمینارا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸))، الگوریتم جستجوی باکتری (فرهت و الهاواری<sup>۴</sup> (۲۰۱۰)) و الگوریتم بهبودیافته PSO<sup>۵</sup> با نام PSOCFIWA (داسگوپتا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۴)) جهت حل مسئله STHTS استفاده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) یک الگوریتم تکاملی مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی است که در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات بر پایه‌ی تحلیل رفتار گروه پرندگان یا دسته ماهی‌ها پیشنهاد شده است. از مزایای اصلی PSO می‌توان به مفهوم ساده، اجرای آسان و کارآمدی سامانه محاسباتی آن اشاره کرد. با این وجود روش PSO، ممکن است به علت عدم توانایی در جستجوی بهینه یا عدم توانایی مناسب در ایجاد تعادل بین کشف بهینه‌ی جهانی و استخراج بهینه‌های محلی هنگام مواجهه با برخی مسائل با قیود سنگین قادر به استخراج نقطه بهینه نباشد (قربانی و بابایی<sup>۷</sup> (۲۰۱۵)).

بهینه‌سازی اجتماع ذرات با ضرایب اینرسی هوشمند<sup>۸</sup> (PSO-SIF) (قربانی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۴)) یک نسخه بهبودیافته قوی و مقاوم از الگوریتم اجتماع ذرات است که از آن می‌توان به عنوان یک ابزار کارآمد جهت حل مسائل بهینه‌سازی غیر محدب و غیرخطی استفاده نمود. در بهینه‌سازی اجتماع ذرات با ضرایب اینرسی هوشمند، برخلاف روش PSO، مقدار ضریب اینرسی وزنی با افزایش تکرار به صورت نزولی کاهش نمی‌یابد. در الگوریتم پیشنهادی مقدار ضریب وزنی هر ذره بر اساس انحراف معیار هزینه هر فرد از هزینه بهترین جواب گروهی به صورت هوشمند تعیین می‌شود لذا در الگوریتم پیشنهادی هر ذره ضریب اینرسی و در نتیجه سرعت منحصر به فردی جهت استخراج نقطه بهینه جهانی دارد. ایجاد تعادل بین بهترین جواب فردی و گروهی، از بزرگ‌ترین مزایای روش PSO-SIF است که موجب افزایش توانایی الگوریتم در استخراج نقطه بهینه می‌شود. با توجه به توانایی‌های بسیار بالای الگوریتم پیشنهادی در استخراج نقطه بهینه جهانی مسائل، در این تحقیق جهت حل مسئله برنامه‌ریزی

<sup>6</sup> Dasgupta

<sup>7</sup> Ghorbani & Babaei

<sup>8</sup> Particle Sarm Optimization with Smart Inertia Factor

<sup>9</sup> Ghorbani

<sup>10</sup> Bacterial Foraging Algorithm

<sup>1</sup> Amjady & Nasiri

<sup>2</sup> Wong

<sup>3</sup> Lakshminarasimman

<sup>4</sup> Farhat & El-Hawary

<sup>5</sup> Particle Swarm Optimization

$$\phi(P_{Hj}(t)) = b_0 + b_1 P_{Hj}(t) + b_2 P_{Hj}^2(t) \quad (5)$$

که در آن  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  ضرایب ثابت مربوط به مدل واحد آبی هستند. برای یک منبع آب با دهانه ثابت تابع  $\phi(h_j)$  ثابت بوده و در این حالت رابطه (۳) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$q_j(t) = K \phi(P_{Hj}(t)) \quad (6)$$

در این حالت نرخ تخلیه می‌تواند به صورت رابطه (۷) مدل شود ((الهاواری و راویندارا (۱۹۸۸)).

$$q_j(t) = \gamma_j + \beta_j P_{Hj}(t) + \alpha_j P_{Hj}^2(t) \quad (7)$$

که در آن  $\gamma_j, \beta_j, \alpha_j$  ضرایب ثابت مربوط به نرخ تخلیه واحد  $j$ ام هستند.

#### قیود مسئله

در دوره برنامه‌ریزی مقدار آب قابل برداشت هر واحد تولیدی برق آبی برای یک دوره زمانی بر اساس یک مقدار از پیش تعیین شده محدود شده است. به بیان دیگر:

$$\int_0^T q_j(t) dt = V_j \quad (8)$$

توان تولیدی سامانه در یک بازه زمانی باید برابر مقدار توان درخواستی ( $P_D$ ) بعلاوه مقدار تلفات شبکه ( $P_L$ ) باشد به بیان دیگر:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi}(t) + \sum_{j=1}^{M_H} P_{Hj}(t) - P_D(T) - P_L(T) = 0 \quad (9)$$

توان خروجی هر دو واحد تولیدی آبی و حرارتی باید متناظر با قید نامساوی زیر، بین توان کمینه و بیشینه آن نیروگاه باشد:

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi}(t) \leq P_{gi}^{\max} \quad (10)$$

$$P_{Hi}^{\min} \leq P_{Hi}(t) \leq P_{Hi}^{\max} \quad (11)$$

که در آن  $P_{gi}^{\min}$  کمترین توان تولیدی  $i$ امین واحد حرارتی،  $P_{gi}^{\max}$  بیشترین توان تولیدی  $i$ امین واحد حرارتی،

برق آبی و حرارتی با توجه به برنامه زمانی  $T$  به نحوی است که ضمن برآورد شدن قیود هزینه بهره‌برداری از سامانه نیز که عمدتاً هزینه سوخت واحدهای حرارتی است کمینه شود.

#### تابع هدف

هدف کمینه‌سازی هزینه سوخت واحدهای حرارتی مطابق رابطه (۱) است:

$$F_T = \int_0^T \sum_{i=1}^{N_g} F_i(P_{gi}(t)) dt \quad (1)$$

که در آن  $P_{gi}(t)$  مقدار توان تولیدی واحد حرارتی  $i$ ام در زمان  $t$ ام،  $T$  = بازه زمانی برنامه‌ریزی و  $F_i(P_{gi}(t))$  = هزینه سوخت واحد حرارتی  $i$ ام در زمان  $t$ ام. معمولاً ورودی نیروگاه حرارتی برحسب  $\text{btu/h}$  ( $1\text{btu}=1054\text{J}$ ) و خروجی آن‌ها برحسب مگاوات بیان می‌شود. در اکثر موارد می‌توان جهت سادگی هزینه سوخت ژنراتور را به صورت یک تابع درجه دوم برحسب توان حقیقی تولیدشده ژنراتور، نمایش داد (ال‌هاواری و کریستنسن (۱۹۷۹)):

$$F_i(P_{gi}(t)) = a_i P_{gi}^2(t) + b_i P_{gi}(t) + c_i \quad (2)$$

که در آن  $a_i, b_i, c_i$  = ضرایب ثابت سوخت مربوط به واحد  $i$ ام.

#### واحدهای آبی

مشخصه ورود-خروج واحدهای تولیدی برق آبی بر اساس نرخ تخلیه آب و با استفاده از مدل Glimn-Kirchmayer به صورت زیر تعریف می‌شود (ال‌هاواری و راویندارا<sup>۱</sup> (۱۹۸۸)):

$$q_j(t) = K \phi(h_j(t)) \phi(P_{Hj}(t)) \quad (3)$$

که در آن  $q_j(t)$  = نرخ تخلیه آب مربوط به منبع  $j$ ام در زمان  $t$ ام،  $K$  = ضریب ثابت،  $h_j(t)$  = دهانه مؤثر منبع<sup>۲</sup>  $j$ ام در زمان  $t$ ام و  $P_{Hj}(t)$  = توان تولیدی واحد  $j$ ام در زمان  $t$ ام. در این رابطه  $\phi$  و  $\phi$  توابع مستقل هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\phi(h_j(t)) = a_0 + a_1 h_j(t) + a_2 h_j^2(t) \quad (4)$$

<sup>3</sup> fixed-head

<sup>1</sup> El-Hawary & Ravindranath

<sup>2</sup> effective head for the reservoir

گروهی، بازه جستجوی الگوریتم را کنترل می‌کند. جهت افزایش کارایی الگوریتم، ضریب اینرسی طوری طراحی می‌گردد که با افزایش تکرار مقدار آن به صورت خطی کاهش یابد. به بیان دیگر:

$$\omega^k = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times k \quad (15)$$

که در آن،  $\omega_{\max}$  و  $\omega_{\min}$  = کمترین و بیشترین مقدار ضریب اینرسی و  $iter_{\max}$  = آخرین تکرار برنامه.

### الگوریتم PSO با ضریب اینرسی هوشمند

عدم ایجاد تعادل بین اکتشاف بهینه جهانی و استخراج نقاط بهینه محلی از مؤثرترین عوامل عدم استخراج نقطه بهینه توسط الگوریتم PSO است. در PSO مقدار ضریب اینرسی وزنی در هر تکرار برای کل جمعیت مقدار یکسانی دارد که با افزایش تکرار مقدار آن کاهش می‌یابد که موجب کاهش هم‌زمان سرعت کلیه ذرات می‌شود بنابراین در صورتی که الگوریتم در تکرارهای ابتدایی قادر به استخراج نقاط نزدیک نقطه بهینه نباشد در ادامه با کاهش سرعت کلیه ذرات و محدود شدن ناحیه جستجو، الگوریتم قادر به استخراج موفقیت‌آمیز نقطه بهینه نخواهد بود. این موضوع دلیل اصلی توانایی پایین الگوریتم PSO در استخراج نقطه بهینه و همگرایی به جواب‌های غیر یکسان در هر بار اجرای برنامه در برخی مسائل با قیود سنگین است (قربانی و همکاران (۲۰۱۴)).

الگوریتم PSO-SIF یک نسخه بهبودیافته از بهینه‌سازی اجتماع ذرات است که در آن با استفاده از هزینه هر جمعیت و مقدار انحراف معیار آن از هزینه بهترین جواب گروهی، کنترل لازم بر مقادیر ضرایب اینرسی هر جمعیت صورت می‌گیرد. در الگوریتم پیشنهادی ضمن اینکه تابع هزینه هر ذره در سرعت و موقعیت بعدی آن نقش اساسی دارد هر جمعیت ضریب اینرسی و در نتیجه سرعت منحصربه‌فردی نیز در جهت همگرایی به بهترین جواب گروهی دارد. لذا مشکلات اشاره شده در الگوریتم PSO در نسخه بهبودیافته PSO-SIF وجود ندارد. در PSO-SIF جهت محاسبه درصد تغییرات هزینه هر جمعیت از بهترین هزینه گروهی از روابط زیر استفاده می‌شود (قربانی و همکاران، (۲۰۱۴):

$$\delta = \frac{(\cos t_j - \cos t_{gbest})}{\cos t_{gbest}} \quad (16)$$

کمترین توان تولیدی  $P_{Hi}^{\max}$  و زمین واحد آبی و بیشترین توان تولیدی  $P_{Li}$  زمین واحد آبی. تلفات مربوط به خطوط انتقال را می‌توان با استفاده از ضرایب B به صورت زیر تعریف کرد:

$$P_L(t) = \sum_{i=1}^{N_g+M_h} \sum_{j=1}^{N_g+M_h} P_i(t) B_{ij} P_j(t) + \sum_{i=1}^{N_g} B_{i0} P_i(t) + B_{00} \quad (17)$$

که در آن  $P_i(t)$  و  $P_j(t)$  = توان تولیدی مربوط به واحدهای آبی و حرارتی (به ترتیب).

### بهینه‌سازی اجتماع ذرات

#### مروری کلی بر بهینه‌سازی اجتماع ذرات

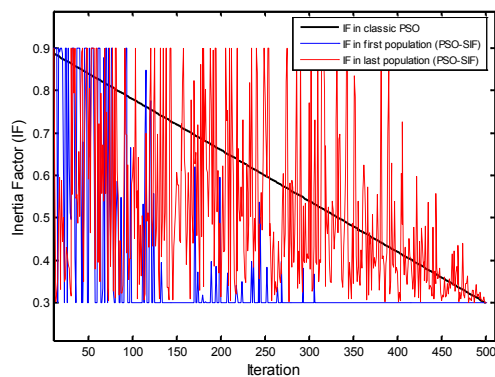
بهینه‌سازی اجتماع ذرات یک الگوریتم مدرن و بر پایه جمعیت است که از نحوه کوچ پرندگان یا جستجوی غذای ماهی‌ها الهام گرفته شده است. در PSO هر ذره نماینده یک جواب مسئله است. قربانی و همکاران (۲۰۱۴) اطلاعات تکمیلی در مورد PSO را ارائه نموده‌اند. در الگوریتم PSO موقعیت جدید ذرات با توجه به سه عامل بهترین جواب فردی، بهترین جواب گروهی و سرعت قبلی ذرات تعیین می‌گردد. در یک فضای جستجوی  $n$  بعدی موقعیت و سرعت  $i$ امین ذره به ترتیب با بردارهای  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  و  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  نشان داده می‌شود. در این الگوریتم بهترین موقعیت ذره‌ای  $i$ ام و بهترین موقعیت همسایه‌هایش تا این لحظه را می‌توان با بردارهای  $(pbest_i = p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$  و  $(pbest_g = p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$  نشان داد. با توجه به موارد اشاره شده در الگوریتم PSO سرعت و موقعیت هر ذره در پایان هر تکرار با توجه به رابطه زیر تغییر می‌یابد (قربانی و بابایی، (۲۰۱۵)).

$$v_{id}^{k+1} = \omega \times v_{id}^k + c_1 \times rand_1 \times (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 \times rand_2 \times (pbest_{gd} - x_{id}) \quad (18)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (19)$$

که در آن  $v_i^k$  = سرعت ذره‌ی  $i$ ام در تکرار  $k$ ام،  $c_1$  و  $c_2$  = ضرایب شتاب،  $rand_1$  و  $rand_2$  = اعداد تصادفی در بازه صفر تا یک،  $x_i^k$  = موقعیت ذره  $i$ ام در تکرار  $k$ ام و  $\omega$  = ضریب اینرسی وزنی. این ضریب ضمن ایجاد تعادل بین بهترین جواب فردی و

تولیدی اولین و آخرین جمعیت در روش PSO-SIF را (که دارای بهترین و بدترین هزینه می‌باشند) در مقایسه با ضریب اینرسی تولیدی PSO کلاسیک نشان می‌دهد. همان‌طوری که از شکل (۱) قابل مشاهده است، در الگوریتم PSO کلاسیک همه جمعیت دارای یک ضریب اینرسی یکسان هستند که با افزایش تکرار مقدار آن از ۰/۹ به صورت خطی تا ۰/۳ کاهش پیدا می‌کند. در الگوریتم PSO-SIF به ازای هر جمعیت یک ضریب اینرسی هوشمند وجود دارد که مقدار آن بر اساس انحراف معیار هزینه آن جمعیت از بهترین هزینه گروهی در بازه ۰/۹ تا ۰/۳ متغیر است. در شکل (۱) به عنوان نمونه ضریب اینرسی اولین و آخرین جمعیت روش PSO-SIF که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین هزینه هستند قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب اینرسی اولین جمعیت دارای ضریب اینرسی کوچک بوده و موجب می‌شود الگوریتم حول نقطه بهینه جستجو نماید. مقدار ضریب اینرسی آخرین جمعیت که دارای بیشترین هزینه است مقدار بیشتری داشته و موجب می‌شود محدوده جستجوی الگوریتم افزایش یافته و الگوریتم نقاط ناشناخته را استخراج نماید.



شکل (۱): مقایسه ضریب اینرسی تولیدی PSO و PSO-SIF

### حل مسئله STHTS با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

فرآیند حل مسئله با روش پیشنهادی بر اساس گام‌های زیر است:  
 گام ۱) مقداردهی پارامترهای الگوریتم و مسئله STHTS؛  
 گام ۲) تولید تصادفی جمعیت اولیه و سرعت اولیه ذرات؛  
 گام ۳) محاسبه هزینه و مرتب نمودن جمعیت بر اساس هزینه و انتخاب بهترین جواب فردی و گروهی ( $pbest_i$  و  $pbest_g$ )؛  
 گام ۴) محاسبه ضریب اینرسی هوشمند برای هر ذره بر اساس رابطه (۲۱)؛

$$\lambda_j = \frac{cost_j}{cost_{gbest}} \quad (17)$$

که در آن،  $cost_j$  = هزینه جمعیت  $j$ ام،  $cost_{gbest}$  = بهترین جواب گروهی تاکنون و  $\lambda_j$  = درصد تغییر هزینه جمعیت  $j$ ام از بهترین هزینه گروهی. در الگوریتم PSO-SIF،  $\lambda_j$  یا همان نرخ هزینه می‌تواند از مقدار ۱ تا مقدار  $1 + \delta_{max}$  تغییر کند و مدنظر است ضریب اینرسی پیشنهادی ( $\omega_g$ ) با توجه به نرخ هزینه، مقداری بین ۰/۳ تا ۰/۹ داشته باشد؛ بنابراین می‌توان با محاسبه شیب خط هر دو نامعادله، یک رابطه خطی بین آن‌ها ایجاد کرد به بیان دیگر:

$$0.3 \leq \omega_g \leq 0.9 \quad (18)$$

$$1 \leq \lambda_j \leq 1 + \delta_{max} \quad (19)$$

$$\frac{\lambda_j - 1}{\omega_g - 0.3} = \frac{(1 + \delta_{max}) - 1}{0.9 - 0.3} \quad (20)$$

$$\omega_g = \frac{0.6 \times (\lambda_j - 1)}{\delta_{max}} + 0.3 \quad (21)$$

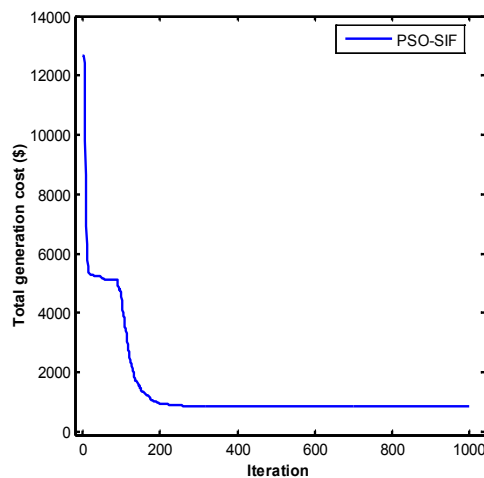
رابطه (۱۸) بازه تغییرات ضریب اینرسی پیشنهادی و رابطه (۱۹) بازه تغییرات نرخ هزینه را نشان می‌دهند. رابطه (۲۰) معادله شیب خط رابطه (۱۸) و (۱۹) بوده و رابطه (۲۱) شکل مرتب‌شده رابطه (۲۰) است. همان‌طور که در رابطه (۲۱) مشاهده می‌شود تنها مجهول معادله مقدار  $\delta_{max}$  یا همان حد بالایی  $\lambda_j$  است؛ و بیانگر این موضوع است به ازای چه مقدار  $\lambda_j$  بیشترین ضریب اینرسی انتخاب شود. مقدار  $\delta_{max}$  در الگوریتم PSO-SIF در تکرارهای ابتدایی مقدار بزرگی بوده و موجب افزایش ناحیه جستجو می‌شود و با افزایش تکرار، مقدار آن کاهش می‌یابد. به بیان دیگر مقدار  $\delta_{max}$  در الگوریتم پیشنهادی برابر است با:

$$\delta_{max} = \delta_1 - \left( \frac{iter}{iter_{max}} \right) \times \delta_2 \quad (22)$$

که در آن  $\delta_1$  و  $\delta_2$  = پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم پیشنهادی و  $iter$  = شماره تکرار برنامه. در الگوریتم PSO-SIF به ازای هر جمعیت و هزینه مربوط به آن یک ضریب اینرسی تولید می‌شود بنابراین در روش پیشنهادی هر جمعیت بر اساس هزینه خود یک ضریب اینرسی و در نتیجه یک سرعت منحصر به فرد برای استخراج نقطه بهینه جهانی دارد. شکل (۱) ضریب اینرسی

جدول (۳) ارائه شده است. نتایج حاصل از حل مسئله STHTS بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه نیز در جدول (۴) ارائه شده است. همان طوری که در جدول (۴) مشاهده می شود الگوریتم PSO-SIF توانسته با موفقیت هزینه ۸۳۸/۷۴۷۷ دلار را استخراج نماید که این هزینه ۹/۵ دلار کمتر از روش MBFA ((فرهت و الهاواری (۲۰۱۰)) است.

همان طور که در جدول (۴) مشاهده می شود الگوریتم پیشنهادی در ۵۰ بار اجرای برنامه به جواب های تقریباً یکسان همگرا شده است به نحوی که متوسط هزینه حاصل شده تنها ۰/۱۵ دلار با بهترین هزینه حاصل شده اختلاف دارد که این موضوع نشان دهنده مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی است. در بهینه سازی سامانه شماره ۱، زمان اجرای برنامه توسط الگوریتم پیشنهادی به ازای ۱۰۰۰ تکرار برابر ۱۰/۸ ثانیه است که این زمان کمتر از زمان اجرای الگوریتم BFA است.



شکل (۲): مشخصات همگرایی الگوریتم PSO-SIF برای سامانه آزمایشی ۱

گام ۵) بروز رسانی سرعت ذرات با استفاده از رابطه (۱۴)؛  
گام ۶) اصلاح موقعیت جدید ذرات جهت برآورده شدن قیود مسئله؛

گام ۷) محاسبه هزینه هر جمعیت و به روزرسانی  $pbest_i$  و  $gbest_g$

گام ۸) شروع مجدد برنامه از گام ۴، تا زمانی که معیار پایان برنامه برآورده نشده است. معیار اتمام برنامه، اتمام تعداد تکرار برنامه است.

### آزمایش های عددی

جهت یافتن جواب بهینه مسئله STHTS و بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم بر روی دو سامانه گوناگون مسئله STHTS پیاده سازی شده است. جهت بررسی کیفیت جواب های حاصل شده و ویژگی های همگرایی توسط الگوریتم پیشنهادی، ۵۰ آزمایش مستقل برای هر سامانه انجام شده است. پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم پیشنهادی ضرایب  $\delta_1$  و  $\delta_2$  هستند که مقدار بهینه آن ها برای این مسئله به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۴ انتخاب شده است. جهت حل مسئله STHTS مقادیر  $C_1$  و  $C_2$  برابر ۲ و تعداد تکرار برنامه و تعداد جمعیت به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و ۱۰۰ انتخاب شده است.

### سامانه آزمایشی ۱

سامانه مورد مطالعه دارای سه واحد تولیدی است که دو واحد تولیدی آن برق آبی و یک مورد حرارتی است. مشخصات مربوط به واحد تولیدی حرارتی و واحد تولیدی برق آبی برای سامانه مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. ضرایب مربوط به ماتریس B تلفات شبکه برای سامانه مورد آزمایش مطابق رابطه (۲۳) است (فرهت و الهاواری (۲۰۱۰)). حجم آب قابل برداشت برای واحدهای آبی شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر  $25 M.ft^3$  و  $35 M.ft^3$  است. بازه زمانی برنامه ریزی شده یک روز بوده و بار درخواستی سامانه برای هر ساعت در جدول (۲) ارائه شده است.

$$B = 10^{-3} \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 \end{bmatrix} MW^{-1}, B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_{00} = 0 \quad (23)$$

توان های بهینه حاصل شده برای واحدهای آبی و حرارتی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش MBFA در

جدول (۱): مشخصات واحدهای آبی و حرارتی استفاده شده در

سامانه آزمایشی ۱ و ۲

مشخصات واحد حرارتی در سامانه ۱					
شماره واحد تولیدی	a	b	c	P <sub>Min</sub> (MW)	P <sub>Max</sub> (MW)
۱	۰/۰۱	۳	۱۵	۱	۲۰
مشخصات واحد برق آبی در سامانه ۱					
شماره واحد تولیدی	α	β	γ	P <sub>Min</sub> (MW)	P <sub>Max</sub> (MW)
۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۳	۰/۲	۲	۴۰
۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۶	۰/۴	۵	۳۰
مشخصات واحد حرارتی در سامانه ۲					
شماره واحد تولیدی	a	b	c	P <sub>Min</sub> (MW)	P <sub>Max</sub> (MW)
۱	۰/۰۱	۰/۱	۱۰۰	۵۰	۲۰۰
۲	۰/۰۲	۰/۱	۱۲۰	۴۰	۱۷۰
۳	۰/۰۱	۰/۲	۱۵۰	۳۰	۲۱۵
مشخصات واحد برق آبی در سامانه ۲					
شماره واحد تولیدی	α	β	γ	P <sub>Min</sub> (MW)	P <sub>Max</sub> (MW)
۱	۰/۰۶	۲۰	۱۴۰	۱۰	۱۰۰

حجم آب قابل برداشت برای واحد آبی برابر  $25000 m^3$  است. بازه زمانی برنامه‌ریزی شده یک روز بوده و بار درخواستی سامانه برای هر ساعت در جدول (۵) ارائه شده است. مقدار بهینه توان خروجی واحدهای آبی و حرارتی به دست آمده توسط الگوریتم PSO-SIF در مقایسه با نتایج الگوریتم MBFA (فرهت و الهاواری (۲۰۱۰)) در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج حاصل شده از بهینه‌سازی مسئله فوق بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه در مقایسه با نتایج الگوریتم MBFA در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود کمترین هزینه حاصل شده توسط روش پیشنهادی برابر  $24261/7244$  دلار است که کمتر از روش MBFA است. متوسط هزینه به دست آمده توسط روش پیشنهادی بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه نیز برابر  $24262/1125$  دلار است که کمتر از متوسط هزینه به دست آمده توسط روش MBFA است.

انحراف معیار کمترین هزینه حاصل شده توسط روش پیشنهادی از متوسط هزینه به دست آمده بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه نیز برابر  $0/38$  دلار است که نشان‌دهنده مقاوم بودن روش پیشنهادی است. زمان اجرای برنامه توسط الگوریتم پیشنهادی با ۱۰۰۰ تکرار برابر  $8/1772$  ثانیه است که کمتر از زمان اجرای روش بهبود یافته BFA است. این زمان کم اجرای برنامه توسط PSO-SIF نشانگر پایین بودن سطح محاسبات الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم MBFA است. نحوه همگرایی الگوریتم پیشنهادی در حل سامانه آزمایشی شماره ۲ در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طوری که از شکل (۳) قابل مشاهده است الگوریتم پیشنهادی توانسته است در ۵۰۰ تکرار اول نقطه بهینه را کشف نماید.

$$B = 10^{-3} \begin{bmatrix} 0.50 & 0.05 & 0.02 & 0.03 \\ 0.05 & 0.04 & 0.18 & -0.11 \\ 0.20 & 0.18 & 0.50 & -0.12 \\ 0.03 & -0.11 & -0.12 & 0.23 \end{bmatrix} MW^{-1} \quad (24)$$

مقدار زمان مورد نیاز الگوریتم پیشنهادی به ازای هر تکرار برابر  $0/108$  ثانیه است در حالی که زمان به تکرار الگوریتم MBFA برای سامانه مورد مطالعه برابر  $0/1196$  ثانیه است. این اختلاف زمان نشان‌دهنده پایین بودن سطح محاسبات الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم MBFA است. نحوه همگرایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله STHS با سه واحد تولیدی در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طوری که از شکل (۲) قابل مشاهده است در بهینه‌سازی سامانه شماره ۱، الگوریتم PSO-SIF توانسته است در ۳۰۰ تکرار اول، هزینه  $839/7477$  دلار را به دست آورد.

سامانه آزمایشی ۲

سامانه مورد آزمایش از سه واحد تولیدی حرارتی و یک واحد تولیدی برق آبی تشکیل شده است. مشخصات مربوط به واحد تولیدی حرارتی و واحد برق آبی برای سامانه مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است (فرهت و الهاواری (۲۰۱۰)). ضرایب مربوط به ماتریس B تلفات شبکه مطابق رابطه (۲۴) بوده و



جدول (۲): بار درخواستی ساعت به ساعت برای سامانه آزمایشی شماره ۱

ساعت	توان درخواستی (MW)	ساعت	توان درخواستی (MW)	ساعت	توان درخواستی (MW)
۱	۳۰	۹	۶۱	۱۷	۷۱
۲	۳۳	۱۰	۵۸	۱۸	۶۲
۳	۳۵	۱۱	۵۶	۱۹	۵۵
۴	۳۸	۱۲	۵۷	۲۰	۵۰
۵	۴۰	۱۳	۶۰	۲۱	۴۳
۶	۴۵	۱۴	۶۱	۲۲	۳۳
۷	۵۰	۱۵	۶۵	۲۳	۳۱
۸	۵۹	۱۶	۶۸	۲۴	۳۰

جدول (۴): نتایج حاصل شده برای سامانه آزمایشی شماره ۱

روش	هزینه حاصل شده (دلار)			زمان اجرا (ثانیه)
	بهترین	متوسط	بدترین	
MBFA	۸۴۸/۲۵۱۲	۸۴۸/۸۵۳۲	۸۴۹/۸۹۶۷	۱۱/۹۶۵۸
PSO-SIF	۸۳۸/۷۴۷۷	۸۳۸/۹۰۱۲	۸۴۹/۴۶۹۸	۱۰/۸۰۲۷

جدول (۵): بار درخواستی ساعت به ساعت برای سامانه آزمایشی شماره ۲

ساعت	توان درخواستی (MW)	ساعت	توان درخواستی (MW)	ساعت	توان درخواستی (MW)
۱	۱۷۵	۹	۴۴۰	۱۷	۴۲۵
۲	۱۹۰	۱۰	۴۷۵	۱۸	۴۰۰
۳	۲۲۰	۱۱	۵۲۵	۱۹	۳۷۵
۴	۲۸۰	۱۲	۵۵۰	۲۰	۳۴۰
۵	۳۲۰	۱۳	۵۶۵	۲۱	۳۰۰
۶	۳۶۰	۱۴	۵۴۰	۲۲	۲۵۰
۷	۳۹۰	۱۵	۵۰۰	۲۳	۲۰۰
۸	۴۱۰	۱۶	۴۵۰	۲۴	۱۸۰

جدول (۳): توان تولیدی و نرخ تخلیه برای سامانه شماره ۱

ساعت	روش	توان تولیدی (MW)			نرخ تخلیه ( $M.ft^3$ )	
		واحد حرارتی	واحدهای آبی		واحد آبی ۱	واحد آبی ۲
			واحد آبی ۱	واحد آبی ۲		
۱	PSO-SIF	۱/۰۰۰۰	۲۰/۹۴۱۰	۸/۵۳۴۰	۰/۸۵۰۲	۰/۹۱۹۳
	MBFA	۱/۲۸۳۴	۲۰/۲۲۷۲	۸/۹۳۵۵	۱۹/۰۶۷۹	۲۱/۶۷۸۳
۲	PSO-SIF	۳/۴۴۴۸	۱۹/۵۸۰۸	۱۰/۴۱۲۰	۰/۸۰۶۶	۱/۰۳۵۶
	MBFA	۲/۰۸۶۰	۳۱/۲۳۲۱	۱۰/۱۸۲۵	۱۹/۷۳۱۸	۲۳/۴۴۴۱
۳	PSO-SIF	۱/۹۷۱۷	۲۲/۳۷۲۵	۱۱/۲۱۹۲	۰/۸۹۶۲	۱/۰۸۵۷
	MBFA	۲/۶۲۷۶	۲۱/۹۰۵۳	۱۱/۰۱۳۹	۲۰/۲۳۰۴	۲۴/۶۲۶۹
۴	PSO-SIF	۵/۱۱۶۰	۲۱/۹۹۴۷	۱۱/۴۳۸۶	۰/۸۸۴۰	۱/۰۹۹۴
	MBFA	۳/۴۲۵۰	۲۲/۹۱۴۷	۱۲/۲۵۴۵	۲۰/۹۷۸۷	۲۶/۴۰۷۲
۵	PSO-SIF	۳/۵۷۲۴	۲۳/۶۹۱۵	۱۳/۳۸۷۰	۰/۹۳۸۸	۱/۲۲۱۱
	MBFA	۳/۹۶۱۹	۲۳/۵۹۱۰	۱۳/۰۸۳۳	۲۱/۴۷۸۹	۲۷/۵۹۹۷
۶	PSO-SIF	۵/۰۴۵۳	۲۶/۴۶۹۴	۱۴/۲۸۸۰	۱/۰۲۹۱	۱/۲۷۷۷
	MBFA	۵/۳۱۰۴	۲۵/۲۷۷۶	۱۵/۱۶۵۲	۲۲/۷۳۲۳	۳۰/۵۹۸۶
۷	PSO-SIF	۶/۱۶۱۴	۲۷/۹۷۸۸	۱۶/۷۸۳۵	۱/۰۷۸۵	۱/۴۳۵۲
	MBFA	۶/۶۷۲۵	۲۶/۹۵۱۸	۱۷/۲۴۶۴	۲۳/۹۹۰۵	۳۳/۶۲۱۷
۸	PSO-SIF	۸/۲۴۷۹	۳۰/۰۳۰۸	۲۱/۸۶۲۱	۱/۱۴۶۰	۱/۷۵۹۵
	MBFA	۹/۱۳۰۱	۲۹/۹۷۰۱	۲۱/۰۰۵۷	۲۶/۲۶۹۴	۳۹/۱۲۸۰
۹	PSO-SIF	۱۰/۲۵۰۵	۳۰/۹۷۹۸	۲۰/۹۴۸۸	۱/۱۷۷۴	۱/۷۰۰۸
	MBFA	۹/۶۸۶۰	۳۰/۶۴۱۸	۲۱/۸۴۲۸	۲۶/۷۷۷۷	۴۰/۳۶۲۷
۱۰	PSO-SIF	۸/۳۹۹۲	۳۰/۷۴۳۸	۲۰/۰۰۲۲	۱/۱۶۹۶	۱,۶۴۰۱
	MBFA	۸/۸۶۱۲	۲۹/۶۴۴۳	۲۰/۵۸۵۸	۲۶/۰۱۵۶	۳۸,۵۱۱۹
۱۱	PSO-SIF	۷/۳۳۵۵	۲۹/۳۸۹۲	۲۰/۳۴۶۱	۱/۱۲۴۹	۱,۶۶۲۲
	MBFA	۸/۳۱۷۲	۲۸/۹۷۳۱	۱۹/۷۵۵۶	۲۵/۵۰۸۱	۳۷,۲۸۳۷
۱۲	PSO-SIF	۷/۴۶۶۹	۳۰/۴۷۶۳	۲۰/۱۸۹۵	۱/۱۶۰۷	۱/۶۵۲۱
	MBFA	۸/۵۸۶۲	۲۹/۳۰۱۷	۲۰/۱۶۲۱	۲۵/۷۶۱۹	۳۷/۸۹۷۴
۱۳	PSO-SIF	۸/۹۸۰۵	۳۱/۶۸۰۹	۲۰/۵۵۳۵	۱/۲۰۰۶	۱/۶۷۵۵
	MBFA	۹/۴۱۲۲	۳۰/۳۱۶۰	۲۱/۴۲۶۴	۲۶/۵۳۱	۳۹/۷۴۵۰
۱۴	PSO-SIF	۸/۹۸۰۲	۳۱/۲۷۶۴	۲۱/۹۶۲۸	۱/۱۸۷۲	۱/۷۶۶۰
	MBFA	۹/۶۸۹۵	۳۰/۶۴۵۵	۲۱/۸۴۴۰	۲۶/۷۷۷۷	۴۰/۳۶۲۷
۱۵	PSO-SIF	۱۰/۷۶۶۵	۳۱/۱۰۸۵	۲۴/۳۹۰۲	۱/۱۸۱۶	۱/۹۲۲۹
	MBFA	۱۰/۷۹۱۲	۳۱/۹۸۲۶	۲۳/۵۱۷۶	۲۷/۷۹۷۶	۴۲/۸۴۴۳
۱۶	PSO-SIF	۱۱/۴۰۸۲	۳۲/۷۴۷۵	۲۵/۲۳۵۱	۱/۲۳۶۰	۱/۹۷۷۸
	MBFA	۱۱/۶۲۱۲	۳۲/۹۹۴۹	۲۴/۷۷۶۳	۲۸/۵۶۳۷	۴۴/۷۱۶۲
۱۷	PSO-SIF	۱۳/۲۳۱۳	۳۲/۹۹۰۰	۲۶/۲۱۰۵	۱/۲۴۴۱	۲/۰۴۱۳
	MBFA	۱۲/۴۶۴۳	۳۳/۹۹۴۲	۲۶/۰۳۰۷	۲۹/۳۳۲۲	۴۶/۵۹۷۹
۱۸	PSO-SIF	۹/۵۷۸۶	۳۰/۰۹۶۲	۲۳/۵۰۷۳	۱/۱۴۸	۱/۸۶۵۷
	MBFA	۹/۹۶۱۹	۳۰/۹۸۴۴	۲۲/۲۶۵۹	۲۷/۰۳۲۲	۴۰/۹۸۱۳
۱۹	PSO-SIF	۷/۲۴۱۹	۲۹/۴۲۴۷	۱۹/۳۸۷۲	۱/۱۲۶۰	۱/۶۰۰۸
	MBFA	۸/۰۳۱۵	۲۸/۶۳۶۲	۱۹/۳۳۱۶	۲۵/۲۵۴۴	۳۶/۶۷۰۸
۲۰	PSO-SIF	۶/۵۹۰۲	۲۶/۶۲۰۹	۱۷/۶۵۳۳	۱/۰۳۴۱	۱/۴۹۰۴
	MBFA	۶/۶۷۰۷	۲۶/۹۵۰۳	۱۷/۲۴۷۵	۲۳/۹۹۰۵	۳۳/۶۲۱۷
۲۱	PSO-SIF	۴/۱۵۸۱	۲۵/۲۳۹۸	۱۴/۳۴۲۰	۰/۹۸۹۰	۱/۲۸۱۱
	MBFA	۴/۷۷۲۹	۲۴/۶۰۷۵	۱۴/۳۳۱۶	۲۲/۲۳۰۴	۲۹/۳۹۵۵
۲۲	PSO-SIF	۳/۰۱۴۸	۲۱/۰۹۲۵	۹/۳۸۱۶	۰/۸۵۵۰	۰/۹۷۱۷
	MBFA	۲/۰۸۳۰	۲۱/۲۳۸۱	۱۰/۱۸۶۱	۱۹/۷۳۱۸	۲۳/۴۴۴۱
۲۳	PSO-SIF	۱/۲۰۳۱	۲۱/۶۵۷۱	۸/۶۴۶۲	۰/۸۷۳۲	۰/۹۲۶۲
	MBFA	۱/۵۵۴۸	۲۰/۵۵۵۰	۹/۳۵۶۴	۱۹/۲۳۴۹	۲۲/۲۶۶۱
۲۴	PSO-SIF	۲/۱۶۷۸	۱۹/۳۰۵۸	۸/۹۳۹۰	۰/۷۹۷۸	۰/۹۴۴۳
	MBFA	۱/۲۸۰۸	۲۰/۲۲۳۱	۸/۹۳۲۹	۱۸/۹۸۶۸	۲۱/۶۷۸۳

جدول (۶): توان تولیدی و نرخ تخلیه برای سامانه شماره ۲

ساعت	روش	واحدهای حرارتی (MW)			واحد آبی (MW)	نرخ تخلیه (m3/h)
		واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳		
۱	PSO-SIF	۶۸/۳۱۲۷	۴۰/۰۵۵۳	۶۳/۸۲۷۲	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰
	MBFA	۶۷/۳۹۴۰	۴۰/۶۵۸۷	۶۳/۸۹۳۲	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۷/۴۹۴۶
۲	PSO-SIF	۷۷/۳۱۶۲	۴۲/۱۷۸۸	۶۹/۲۹۷۹	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰
	MBFA	۷۶/۸۹۸۷	۴۱/۴۸۱۲	۷۰/۷۶۳۴	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۸/۳۵۷۸
۳	PSO-SIF	۷۹/۳۷۸۳	۵۵/۲۶۳۱	۸۴/۹۰۳۷	۱۱/۸۵۸۵	۳۸۵/۶۰۷۷
	MBFA	۳۹/۲۱۰۷	۴۹/۰۷۷۶	۸۳/۳۵۴۹	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۸/۲۷۰۲
۴	PSO-SIF	۱۱۶/۱۴۰۱	۶۵/۷۱۵۹	۱۰۹/۱۱۳۶	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰
	MBFA	۱۱۵/۴۳۱۵	۶۶/۴۶۹۰	۱۰۹/۲۶۱۸	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۹۱۱۴
۵	PSO-SIF	۱۳۴/۲۵۰۰	۷۷/۴۴۳۲	۱۲۴/۹۴۲۵	۱۱/۲۴۴۲	۳۷۲/۴۷۱۲
	MBFA	۱۳۳/۸۳۰۴	۷۷/۱۲۴۶	۱۲۶/۳۴۶۴	۱۰/۰۰۰۰	۳۵۱/۳۳۵۵
۶	PSO-SIF	۱۴۷/۲۳۳۰	۸۸/۱۹۷۱	۱۴۲/۴۱۴۰	۱۶/۹۶۱۴	۴۹۶/۴۸۹۵
	MBFA	۱۴۸/۴۱۳۲	۸۸/۴۰۲۲	۱۴۰/۹۵۳۶	۱۷/۵۷۵۷	۵۱۵/۸۹۹۰
۷	PSO-SIF	۱۵۵/۳۱۵۶	۹۲/۷۷۸۹	۱۵۰/۲۳۴۹	۳۰/۰۱۹۹	۷۹۴/۴۷۰۰
	MBFA	۱۵۵/۸۰۲۹	۹۴/۳۰۸۵	۱۴۸/۱۵۴۵	۲۹/۶۱۴۶	۷۸۷/۵۶۳۴
۸	PSO-SIF	۱۶۴/۰۴۷۱	۹۷/۲۷۳۱	۱۵۲/۳۷۵۱	۳۷/۲۰۵۸	۹۶۷/۱۷۲۱
	MBFA	۱۶۰/۳۱۹۴	۹۸/۵۸۴۷	۱۵۳/۹۴۸۶	۳۷/۸۸۱۳	۹۸۱/۲۷۱۴
۹	PSO-SIF	۱۶۸/۶۵۴۲	۱۰۴/۲۲۸۵	۱۶۲/۰۶۱۵	۴۹/۶۱۶۸	۱۲۸۰/۰۴۶۲
	MBFA	۱۶۸/۱۷۷۳	۱۰۴/۵۰۶۵	۱۶۱/۳۵۱۳	۴۹/۵۵۱۹	۱۲۸۸/۰۷۲۷
۱۰	PSO-SIF	۱۷۹/۴۸۹۰	۱۱۱/۸۰۳۵	۱۶۷/۴۵۳۱	۶۵/۱۰۹۹	۱۶۹۶/۵۵۶۲
	MBFA	۱۷۷/۲۵۴۵	۱۱۱/۲۴۸۳	۱۷۰/۷۶۵۷	۶۴/۵۳۱۹	۱۶۸۰/۴۲۸۴
۱۱	PSO-SIF	۱۹۰/۳۳۲۸	۱۲۰/۸۲۳۳	۱۸۵/۱۹۴۵	۸۵/۵۳۳۴	۲۲۸۹/۶۲۵۵
	MBFA	۱۸۹/۲۴۹۱	۱۲/۳۴۵۶	۱۸۳/۷۸۳۳	۸۵/۵۴۶۷	۲۲۹۱/۶۷۲۷
۱۲	PSO-SIF	۱۹۵/۵۸۸۳	۱۲۷/۵۸۱۵	۱۹۰/۴۸۸۷	۹۶/۳۰۳۴	۲۶۲۲/۵۲۹۳
	MBFA	۱۹۵/۳۸۷۸	۱۲۷/۴۹۸۹	۱۹۰/۵۹۷۴	۹۶/۳۸۰۲	۲۶۲۴/۱۸۱۹
۱۳	PSO-SIF	۲۰۰/۰۰۰۰	۱۳۳/۷۶۴۵	۱۹۳/۳۷۱۷	۱۰/۰۰۰۰	۲۷۴۰/۰۰۰۰۰
	MBFA	۱۹۹/۳۰۹۰	۱۳۳/۱۵۹۶	۱۹۵/۲۱۱۰	۹۹/۹۷۸۴	۲۸۳۱/۴۳۱۶
۱۴	PSO-SIF	۱۹۳/۰۰۷۵	۱۲۲/۱۴۲۳	۱۸۵/۱۷۷۸	۹۳/۹۵۷۸	۲۵۴۸/۸۳۸۸
	MBFA	۱۹۳/۲۷۶۹	۱۲۵/۳۹۰۶	۱۸۷/۳۱۷۷	۹۲/۸۲۰۱	۲۴۸۹/۷۲۹۵
۱۵	PSO-SIF	۱۸۴/۷۸۱۶	۱۱۶/۰۵۷۹	۱۷۵/۳۷۷۱	۷۶/۲۳۴۰	۲۰۱۳/۳۷۸۳
	MBFA	۱۸۳/۶۹۱۷	۱۱۶/۱۸۵۰	۱۷۷/۶۵۹۰	۷۵/۴۴۹۰	۱۹۷۹/۲۶۶۸
۱۶	PSO-SIF	۱۷۱/۴۶۴۵	۱۰۶/۶۰۳۳	۱۶۳/۷۸۴۱	۵۳/۹۰۱۹	۱۳۹۲/۳۶۲۱
	MBFA	۱۷۰/۵۶۰۵	۱۰۶/۵۶۷۶	۱۶۴/۳۶۷۴	۵۴/۱۹۲۲	۱۳۹۹/۳۷۰۴
۱۷	PSO-SIF	۱۶۳/۵۱۰۷	۹۹/۵۴۵۷	۱۶۰/۷۶۱۰	۴۳/۹۸۸۲	۱۱۳۵/۸۶۰۷
	MBFA	۱۶۴/۲۰۵۲	۱۰۱/۱۶۶۰	۱۵۷/۵۶۲۹	۴۳/۴۸۸۴	۱۱۳۳/۵۳۷۸
۱۸	PSO-SIF	۱۵۸/۳۹۸۷	۹۷/۰۳۸۷	۱۵۰/۲۰۰۶	۳۳/۵۱۷۸	۸۷۷/۷۶۳۰
	MBFA	۱۵۸/۵۶۹۶	۹۶/۳۳۹۴	۱۵۱/۴۸۹۷	۳۳/۵۲۱۰	۸۸۶/۶۸۱۶
۱۹	PSO-SIF	۱۵۳/۶۵۰۶	۹۰/۹۹۳۳	۱۴۶/۰۶۱۳	۲۱/۳۸۱۶	۵۹۵/۰۶۳۰
	MBFA	۱۵۱/۰۷۰۲	۹۱/۳۵۴۱	۱۴۴/۷۱۶۸	۲۳/۶۲۸۳	۶۴۸/۹۶۳۹
۲۰	PSO-SIF	۱۴۴/۲۵۵۳	۸۲/۵۲۲۳	۱۳۵/۱۵۹۹	۱۰/۴۶۴۹	۳۵۵/۸۶۹۲
	MBFA	۱۴۲/۸۸۹۴	۸۴/۲۷۰۶	۱۳۵/۹۲۱۵	۱۰/۷۸۷۲	۳۵۷/۵۵۵۳
۲۱	PSO-SIF	۱۲۵/۱۲۱۵	۷۲/۵۶۷۱	۱۱۶/۵۹۴۷	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰۰
	MBFA	۱۲۴/۳۳۵۸	۷۱/۵۳۳۶	۱۱۷/۱۳۱۴	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۷/۸۲۸۰
۲۲	PSO-SIF	۱۰۱/۵۷۶۲	۵۶/۷۵۸۴	۹۷/۲۵۲۵	۱۰/۶۵۴۱	۳۵۹/۸۹۲۷
	MBFA	۱۰۲/۵۹۶۶	۵۷/۶۶۴۸	۹۶/۰۶۹۶	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۹/۰۴۹۲
۲۳	PSO-SIF	۷۹/۱۶۵۵	۴۶/۳۷۸۴	۷۴/۲۸۰۵	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰
	MBFA	۸۰/۶۲۴۳	۴۴/۴۰۴۵	۷۵/۵۱۷۹	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۹/۸۰۰۴
۲۴	PSO-SIF	۷۳/۸۴۸۸	۴۰/۰۰۰۰	۶۳/۹۱۴۳	۱۰/۰۰۰۰	۳۴۶/۰۰۰۰
	MBFA	۷۲/۵۷۷۱	۳۹/۲۹۲۳	۶۶/۱۹۳۸	۱۰/۰۰۰۰	۳۶۶/۰۹۵۹

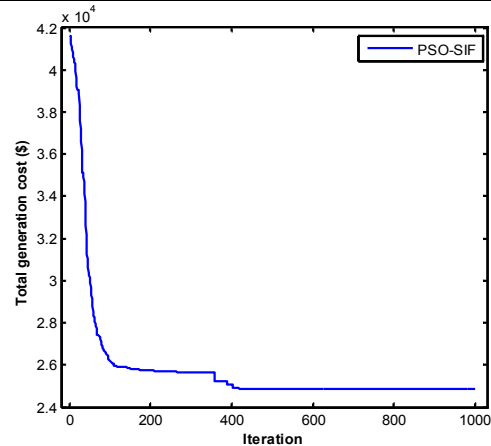
شماره ۱، متوسط نتایج حاصل شده بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه در جدول (۴) ارائه شده و برابر ۸۳۸/۷۴۷۷ دلار و کمترین هزینه حاصل شده برابر ۸۳۸/۹۰۱۲ دلار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انحراف معیار بین بهترین جواب و متوسط جواب‌های به‌دست‌آمده تنها برابر ۰/۱۵ دلار است که نشان‌دهنده مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی سامانه شماره ۲ بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که از جدول فوق مشاهده می‌شود کمترین هزینه حاصل شده توسط روش پیشنهادی برابر ۲۴۲۶۱/۷۲۴۴ دلار، متوسط جواب‌های حاصل شده بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه برابر ۲۴۲۶۲/۱۱۲۵ دلار و انحراف معیار بین جواب‌ها برابر ۰/۳۸ دلار است. نتایج حاصل شده از بهینه‌سازی هر دو سامانه مورد آزمایش نشان می‌دهد الگوریتم PSO-SIF قادر به استخراج موفقیت‌آمیز نقطه بهینه بهتر از روش بهبود یافته BFA است. از مهم‌ترین مزایای الگوریتم PSO-SIF می‌توان به همگرایی به جواب‌های تقریباً یکسان در هر بار اجرای برنامه، زمان کم اجرای برنامه و استخراج موفقیت‌آمیز نقطه بهینه اشاره نمود.

#### مراجع

- 1- Amjady, N. and Nasiri-Rad, H. (2009). "Economic dispatch using an efficient real-coded genetic algorithm." *IET Generation Transmission & Distribution*. 3(3), 266–278.
- 2- Amjady, N. and Soleymanpour, H. (2009). "Daily Hydrothermal Generation Scheduling by a new Modified Adaptive Particle Swarm Optimization technique." *Electric Power Systems Research*. 80(6), 723-732.
- 3- Chang, G. W., Aganagic, M., Waight, J. G., Medina, J., Burton, T., Reeves, S. and Christoforidis, M. (2001). "Experiences with mixed integer linear programming based approaches on short-term hydro scheduling." *IEEE Transactions on Power Systems*. 16(4), 743–749.
- 4- Dasgupta, K. and Banerjee, S. (2014). "Short-term hydrothermal scheduling using particle swarm optimization with constriction factor and Inertia Weight Approach." *International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES)*. pp.1-6, 1-2 Feb. 2014.

جدول (۷): نتایج حاصل شده برای سامانه آزمایشی شماره ۲

روش	هزینه حاصل شده (دلار)			زمان اجرا (ثانیه)
	بهترین	متوسط	بدترین	
MBFA	۲۴۲۶۷/۴۱۳۷	۲۴۲۶۸/۲۵۱۵	۲۴۲۷۱/۵۸۴۷	۹/۹۶۱۸
PSO-SIF	۲۴۲۶۱/۷۲۴۴	۲۴۲۶۲/۱۱۲۵	۲۴۲۶۳/۸۷۷۹	۸/۱۷۷۲



شکل (۳): مشخصات همگرایی الگوریتم PSO-SIF برای سامانه آزمایشی ۲

#### نتیجه‌گیری

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات با ضریب اینرسی هوشمند یک الگوریتم مقاوم، قوی و کارآمد جهت استخراج نقطه بهینه جهانی مسائل بهینه‌سازی است. در الگوریتم پیشنهادی مقدار ضریب وزنی هر ذره بر اساس انحراف معیار هزینه هر فرد از هزینه بهترین جواب گروهی به‌صورت هوشمند تعیین می‌شود. به همین دلیل در الگوریتم پیشنهادی هر ذره ضریب اینرسی و در نتیجه سرعت منحصر به فرد فردی جهت استخراج نقطه بهینه جهانی دارند که این امر موجب استخراج موفقیت‌آمیز نقطه بهینه شده و از به دام افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند. در این تحقیق، استفاده از توانایی‌های الگوریتم PSO-SIF و استخراج نقطه بهینه مسئله STHTS، به‌صورت موفقیت‌آمیز بر روی دو سامانه گوناگون مسئله STHTS پیاده‌سازی شده است.

برای بررسی کیفیت جواب‌های حاصل شده و ویژگی‌های همگرایی توسط الگوریتم پیشنهادی، ۵۰ آزمایش مستقل برای هر سامانه انجام شده است و نتایج حاصل شده بعد از ۵۰ بار اجرای برنامه برای سامانه‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۷) ارائه شده است. در بهینه‌سازی سامانه

- for short-term scheduling of hydrothermal power systems with cascaded reservoirs. ” *Energy Conversion and Management*. 49(10), 2513–2521.
- 15- Oliveira, G. and Soares, S. (1995). “A second order network flow algorithm for hydrothermal scheduling.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 10(3), 1635–1641.
- 16- Salam, M. S., Nor, K. M. and Hamdam, A. R. (1998). “Hydrothermal scheduling based Lagrangian relaxation approach to hydrothermal coordination. ” *IEEE Transactions on Power Systems*. 13(1), 226–235.
- 17- Wong, k. and Wong, Y. W. (1994). “Short-term hydrothermal scheduling. Part I. simulated annealing approach.” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. 141(5), 497–501.
- 18- Wood, A. J. and Wollenberg, B. F. (1996). “Power Generation Operation and Control. ” New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., pp. 592.
- 19- Yu, B., Yuan, X. and Wang, J. (2007). “Short-term hydro-thermal scheduling using particle swarm optimization method. ” *Energy Conversion and Management*. 48(7), 1902–1908.
- 20- Yuan, X., Wang L. and Yuan, Y. (2008). “Application of enhanced PSO approach to optimal scheduling of hydro system. ” *Energy Conversion and Management*. 49(11), 2966–2972.
- 21- Zoumas, C. E., Bakirtzis, A. G., Theocharis, J. B. and Petridis, V. (2004). “A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem. ” *IEEE Transactions on Power Systems*. 19(2), 1356–1364.
- 5- El-Hawary, M. E. and Christensen, G. S. (1979). *Optimal Economic Operation of Electric Power Systems*, New York: Academic Press, pp. 278.
- 6- El-Hawary, M. E. and Ravindranath, K. M. (1988). “Optimal operation of variable head hydrothermal systems using the Glimn-Kirchmayer model and the Newton-Raphson method. ” *Electric Power Systems Research*. 14(1), 11-22.
- 7- Erkmen, I. and Karatas, B. (1994). “Short-term hydrothermal coordination by using multipass dynamic programming with successive approximation.” 7th Mediterranean Electrotechnical Conference. pp. 925–928.
- 8- Farhat, I. A. and El-Hawary, M. E. (2010). “Fixed-Head Hydro-Thermal Scheduling Using a Modified Bacterial Foraging Algorithm.” *IEEE Electrical Power & Energy Conference*.
- 9- Finardi, E. C. and Dasilva, E. L. (2005). “Solving the unit commitment problem of hydropower plants via Lagrangian Relaxation and Sequential Quadratic programming.” *Computational & Applied Mathematics*. 24(3), 317–341.
- 10- Ghorbani, N. and Babaei, E. (2014). “Exchange Market Algorithm.” *Applied Soft Computing*. 19(June 2014), 177-187.
- 11- Ghorbani, N. and Babaei, E. (2015). “Combined Economic Dispatch and Reliability in Power System by Using PSO-SIF Algorithm.” *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 3(1), 23-33.
- 12- Ghorbani, N., Vakili, S., Babaei, E. and Sakhavati, A. (2014). “Particle Swarm Optimization with Smart Inertia Factor for Solving Nonconvex Economic Load Dispatch Problems.” *International Transaction on Electrical Energy System*. 24(8), 1120-1133.
- 13- Habibollahzadeh, H. and Bubenko, J. A. (1986). “Application of decomposition techniques to short term operation planning of hydrothermal power system. ” *IEEE Transactions on Power Systems*. 1(1), 41–47.
- 14- Lakshminarasimman, L. and Subramanian, S. (2008). “A modified hybrid differential evolution