



## در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی و زیست محیطی در مسئله پخش بار با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی

<sup>۱</sup>هادی زاهدی، <sup>۲</sup>محمد بسکابادی، <sup>۳</sup>محمود بسکابادی

<sup>۱</sup>آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران. [h\\_zahedi60@yahoo.com](mailto:h_zahedi60@yahoo.com)  
<sup>۲</sup>شرکت توزیع نیروی برق خراسان جنوبی، بیرجند، ایران. [boskabadi mohamad@yahoo.com](mailto:boskabadi mohamad@yahoo.com)  
<sup>۳</sup>شرکت مدیریت تولید نیروگاه‌های استان سیستان و بلوچستان، ایرانشهر، ایران. [mahmoodboskabadi96@yahoo.com](mailto:mahmoodboskabadi96@yahoo.com)

### چکیده

هدف از توزیع بهینه بار آن است که با تخصیص بهینه سهم هر نیروگاه، علاوه بر تامین توان مورد نیاز شبکه، هزینه تولید توان اکتیو حداقل گردد. با افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، سیستم‌های مرتبط با تامین آن نیز بسیار گسترش یافته‌اند به گونه‌ای که امروزه توزیع بار بین واحدهای تولید انرژی با کمترین هزینه، به یکی از گسترده‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. در این مقاله برای کمینه کردن هزینه‌ها از روشی جدید به نام الگوریتم *ICA* که مبتنی بر هوش مصنوعی می‌باشد، برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه‌ها استفاده شده است. این الگوریتم برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار با توابع غیرخطی هزینه که شامل محدودیت‌های ناشی از نیروگاه‌ها از جمله: توازن تولید و مصرف در سیستم و حدود تولید می‌باشد، استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم نمونه ۶ نیروگاهی با بار درخواستی ۱۲۶۳ مگاوات و ۱۵ نیروگاهی با بار درخواستی ۲۶۵۰ مگاوات با در نظر گرفتن موارد ذکر شده اعمال شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها مقایسه که نشان دهنده کارایی الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم *ICA*، الگوریتم‌های تکاملی، پخش بار اقتصادی، توزیع بهینه توان.

## مقدمه

امروزه ساختار قوانین حاکم بر صنعت برق کشورهای مختلف به گونه‌ای تغییر کرده است که امکان ایجاد رقابت در تولید و مصرف انرژی الکتریکی بیش از پیش فراهم آمده است. سیستم قدرت نیازمند ابزارهایی خاص جهت تحلیل، مانیتور و کنترل بهینه جنبه‌های مختلف بهره برداری و برنامه‌ریزی است. بیشتر این ابزارها به گونه مناسبی به شکل مسائل بهینه سازی فرموله شده‌اند.

برای تغذیه بار سیستم قدرت می‌توان ترکیب‌های مختلفی از تولید توان‌های اکتیو و راکتیو را برای واحدهای نیروگاهی تعیین نمود. آنچه که از دیدگاه توزیع بهینه بار مدنظر است آن است که دریابیم که کدام ترکیب اقتصادی‌تر است. از آنجا که قسمت اصلی هزینه تولید در سیستم قدرت مربوط به تولید توان در نیروگاه‌ها است لذا مساله اصلی در این بحث، تعیین سهم نیروگاه‌های مختلف سیستم در تولید توان می‌باشد، بصورتی که هزینه تولید حداقل شود.

توزیع اقتصادی بار و مشارکت واحدها جزء بهترین راه‌ها برای تامین برق با کیفیت، برای مشتری در یک حالت اقتصادی و امن می‌باشد. هدف از توزیع بهینه بار مورد تقاضای سیستم قدرت مابین واحدهای تولیدی در مدار سیستم می‌باشد. توزیع بهینه یا اقتصادی بار در واقع تخصیص تولید بین واحدهای فعال می‌باشد به نحوی که همزمان با تامین تقاضای بار، حدود تولید، نرخ‌های افزایشی یا کاهش‌ی واحدها، نواحی کار ممنوع و سایر محدودیت‌های نیروگاه‌ها در نظر گرفته شده و با لحاظ تلفات شبکه انتقال، هزینه کل تولید در هر بازه زمانی و برای شرایط بار پیش‌بینی شده حداقل شود. از دید اقتصادی، هر چه هزینه کل کاهش یابد وضعیت سیستم بهتر است. بنابراین امروزه تلاش می‌شود که روش‌های مختلف این هزینه‌ها کاهش یابد. تعدادی از این روش‌ها بر مبنای روش‌های بهینه‌سازی ریاضی می‌باشند، نظیر برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی درجه دوم [۱] و [۲].

هدف اصلی یافتن تنظیمات بهینه برای یک سیستم قدرت است به گونه‌ای که یک تابع هدف معین را برآورده سازد و سایر قیود مانند معادلات پخش بار و محدودیت‌های بهره‌برداری دستگاه‌ها هم برآورده شده باشند ساختار معرفی شده بر اساس معادلات پخش بار بهینه در سیستم قدرت مدل سازی می‌شود. یکی از مهمترین اهداف شرکت‌های برق تولید انرژی الکتریکی و انتقال و توزیع آن بین مصرف‌کنندگان با قابلیت اطمینان بالا و کمترین هزینه بهره‌برداری می‌باشد. قبل از معرفی مفهوم امنیت سیستم قدرت، مسئله پخش بار بطور معمول بر مسائل اقتصادی بهره برداری متمرکز بود تا بر امنیت سیستم [۳]. امروزه با گسترده‌گی شبکه‌های قدرت و افزایش بار سیستم‌ها ترکیب قیود امنیت با مفهوم پخش بار بهینه یک مسئله مهم شده است.

برای حل مسائل پخش بار روش‌های بسیاری ارائه شده است که اکثر آنها بر اساس برنامه ریزی خطی و روش‌های نیوتن-رافسون می‌باشد. یک مزیت مهم این روش‌ها سازگاری آنها با برنامه‌های توزیع اقتصادی موجود است. تکنیک‌های بهینه‌سازی سنتی بسیاری برای حل مسئله پخش بار بهینه به کار گرفته شد که معروف‌ترین آنها برنامه ریزی خطی، روش برنامه ریزی مرتبه دوم متوالی، روش کاهش گرادینان تعمیم یافته و روش نیوتن-رافسون می‌باشند. رشد و توسعه سریع ابزارهای هوشمند محاسباتی اخیر موجب گردید تا محققین آنها را برای مسائل دائمی متغیر پخش بار بهینه به کار گیرند.

## تکنیک های بهینه سازی مدرن

دسته جدیدی از ابزارهای هوشمند محاسباتی معرفی شدند تا با محدودیت‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی مقابله کنند. تکنیک‌های مدرن عمده شامل، برنامه‌ریزی تکاملی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم رقابت استعماری. برخی از این روش‌ها که ابزارهای تازه توسعه یافته‌ای هستند، یک پدیده طبیعی معین را در جستجوی خود برای پاسخ بهینه، تقلید

می‌کنند مانند تکامل گونه‌ها (EP,GA,ES)، و یا سیستم عصبی انسان (ANN)، یا یک رفتار اجتماعی (ICA). این روش‌ها به شکل موفقیت‌آمیزی قابل اعمال در حوزه گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی هستند که در آنها پاسخ جامع بیشتر از پاسخ‌های محلی مورد نظر است یا زمانی که مسئله شامل نواحی غیرمشتق پذیر است. علاوه بر این، این روش‌ها به توانایی در جستجوی سریع در فضای حل بزرگ و قابلیت مواجهه با عدم قطعیت در بخش‌هایی از شبکه قدرت مشهورند.

### فرمول بندی توزیع بهینه بار

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کمترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تامین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه‌ای آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید پراکنده می‌باشد. مساله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول بندی آن نیز به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تامین می‌کنند، ارائه می‌شود. بنابراین مسئله توزیع اقتصادی بار می‌تواند با تابع هدف زیر بیان شود [۴]:

$$\min \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + k_l \left( \sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} \right)^2 \quad (1)$$

که  $F_i(P_i)$  هزینه سوخت  $i$  امین نیروگاه،  $N$  تعداد ژنراتورهای در حال بهره‌برداری سیستم و  $P_i$  توان خروجی  $i$  امین ژنراتور است.  $P_D$  تقاضای بار و  $P_{loss}$  تلفات شبکه انتقال می‌باشد.  $F_i(P_i)$  معمولاً به صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می‌شود:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب هزینه  $i$  امین ژنراتور می‌باشد.

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} = 0 \quad (3)$$

توازن تولید و مصرف در سیستم مجموع توان تولید شده توسط کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم برابر باشد.

تلفات شبکه انتقال،  $P_{loss}$  به ساختار فیزیکی شبکه و مقدار تولید بستگی دارد و از محاسبات پخش بار یا ضرایب تلفات  $B$  با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^N B_{io} P_i + B_{oo} \quad (4)$$

### محدودیت تولید

توان خروجی هر ژنراتور نباید بیشتر از مقدار نامی آن باشد و همچنین نباید کمتر از مقداری باشد که برای بهره‌برداری پایدار دیگ بخار ضروری است. بنابراین تولید چنان محدود می‌شود که در بین دو محدوده از پیش تعیین شده حداقل و حداکثر قرار گیرد. هر واحد تولیدی در مدار دارای حدود تولید با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

حدود فوق، علاوه بر این که ناشی از محدودیت‌های فنی هر واحد می‌باشند، باعث می‌شوند تا واحد با هزینه کمتر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیشتر، کمتر از حد مجاز خود تولید نداشته باشد.

### نرخ‌های افزایشی کاهش

به دلایل فنی نیروگاه‌های حرارتی نمی‌توانند به صورت آبی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش یا کاهش با آهنگی همراه است. بدین صورت که هر نیروگاه دارای محدودیت‌هایی در شیب افزایش یا کاهش توان تولیدی خود است که تجاوز از این محدودیت‌ها منجر به خسارت به رتور شده و باعث افزایش هزینه عملکرد می‌گردد. که این محدودیت‌ها با قیود زیر داده می‌شود:

$$P_i^{\min}(t) \leq P(t)_i \leq P_i^{\max}(t) \quad (6)$$

که  $P_i^{\min}(t) = \max(P_i(t-1) - RDR_i, P_i^{\min})$  و  $RDR_i$  نرخ کاهش نیروگاه و  $P_i^{\max}(t) = \min(p_i(t-1) + RUR_i, P_i^{\max})$  و  $RUR_i$  نرخ افزایشی نیروگاه می‌باشد. به منظور اعمال محدودیت‌های فوق لازم است تا وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد.

### هزینه‌های زیست محیطی

یکی از مهمترین چالش‌های پیشروی بشر در حال حاضر و دردهای آینده به طور قطع، کاهش آلودگی هوا می‌باشد. تولید انرژی الکتریکی ناشی از سوخت‌های فسیلی، چندین ماده مختلف مثل دی اکسید گوگرد، اکسید نیتروژن و دی اکسید کربن را در هوا پخش می‌کند. دو نمونه از مهمترین این ترکیبات که در اکثر نیروگاه‌های قدرت تولید می‌شوند، اکسید نیتروژن ( $NO_x$ ) و دی اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) می‌باشند. در این مقاله هزینه ناشی از جلوگیری انتشار این ترکیبات در هوا نیز در تابع هدف در نظر گرفته شده است.

معادله انتشار به صورت یک تابع درجه دوم با ضرایب ثابت برای هر واحد تولیدی در نظر گرفته می‌شود. کل هزینه انتشار به صورت تابع هدف (تابع هزینه) وارد می‌شود تا حداقل گردد. البته یک ضریب  $g$  به عنوان ضریب خطای قیمت در نظر گرفته می‌شود. ضریب  $g$  دارای واحد  $\$/KG$  می‌باشد و تابع انتشار را به تابع هزینه تبدیل می‌کند:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^n C(p_i) + \sum_{i=1}^n E_i(P_i) \quad (7)$$

### زون‌های ممنوع

نیروگاه‌ها به دلایل فنی نمی‌توانند در برخی از نواحی مابین حداقل و حداکثر تولید خودشان، توان تولید کنند. این نواحی به عنوان زون‌های ممنوع نامیده می‌شوند و به صورت مشخص می‌شوند. بدین ترتیب نواحی کار ممکن واحد تولید نام به شکل زیر مشخص می‌شود.

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^L \\ P_{i,j-1}^U \leq P_i \leq P_{i,j}^L, j = 2, 3, \dots, Z_i \\ P_{i,Z_i}^U \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

که  $Z_i$  تعداد زون‌های ممنوع واحد نام می‌باشد.

### محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه

سایر محدودیت‌های ناشی از معیارهای قابلیت اطمینان و امنیت شبکه را نیز می‌توان به عنوان محدودیت‌های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی در نظر گرفت. در غالب موارد، این محدودیت‌ها در سایر مطالعات یا برنامه‌ریزی‌ها در نظر گرفته می‌شوند و توزیع اقتصادی بار بدون منظور نمودن این محدودیت‌ها حل می‌شود.

## معرفی الگوریتم ICA

در این مقاله، الگوریتم مطرح شده برای بهینه‌سازی، که از مدل‌سازی ریاضی رقابت امپریالیستی الهام گرفته شده است، معرفی شده و اجزای مختلف آن توضیح داده می‌شود. با داشتن تابع  $f(x)$  در بهینه‌سازی می‌خواهیم آرگومان  $x$  را به گونه‌ای بیابیم که هزینه متناظر آن بهینه باشد [۶].

## الگوریتم ICA

همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم، نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک "کشور" نامیده می‌شوند شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست انتخاب می‌شوند. باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص که در ادامه می‌آید، به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد.

برای شروع الگوریتم تعداد  $N_{country}$  کشور اولیه را ایجاد می‌کنیم  $N_{imp}$  تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) را به عنوان امپریالیست انتخاب می‌کنیم باقیمانده  $N_{col}$  تا از کشورها مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست، تعدادی از مستعمرات را که این تعداد، متناسب با قدرت آن است، می‌دهیم. برای انجام این کار، با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه آنها را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$C_n = \max\{c_i\} - c_n \quad (9)$$

که در آن  $c_n$  هزینه امپریالیست  $n$ ام  $\max\{c_i\}$  بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها و  $C_n$  هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست، می‌باشد. هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف‌تری باشد)، دارای هزینه نرمالیزه کمتری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست، به صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره، بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند.

$$P_n = \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \quad (10)$$

از یک دید دیگر قدرت نرمالیزه یک امپریالیست نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N.C.n = \text{round}\{P_n.(N_{col})\} \quad (11)$$

که در آن  $N.C.n$  تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری و  $N_{col}$  نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است.  $\text{round}$  نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن  $N.C$  برای هر امپراطوری، به این تعداد از کشورهای مستعمره اولیه را به صورت تصادفی انتخاب کرده و به امپریالیست  $n$ ام می‌دهیم با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده شدن یک شرط توقف، ادامه می‌یابد. [۷].

### نتایج شبیه‌سازی

روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ICA را به شبکه‌های مورد آزمایش در حالت اول و دوم اعمال می‌کنیم. برای انجام محاسبات پارامترهای الگوریتم ICA به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- (۱) تعداد کشورها: ۶۰۰
- (۲) تعداد امپریالیست: ۱۸
- (۳) تعداد مستعمره: ۵۸۲
- (۴) تعداد تکرار: ۳۰۰
- (۵) درصد انقلاب مستعمرات: ۰/۳
- (۶) همگون‌سازی: ۲

### حالت اول

در این حالت سیستم شامل ۲۶ باس، ۴۶ خط انتقال و ۶ واحد تولید حرارتی می‌باشد. ضرایب تابع هزینه و حدود واحدهای تولیدی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ضرایب هزینه و حدود واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

واحد	$ai(\$)$	$bi$ ( $\$/MW$ )	$ci$ ( $\$/MW^2$ )	$P_i^{max}$ (MW)	$P_i^{min}$ (MW)
۱	۲۴۰	۷	۰/۰۰۷	۵۰۰	۱۰۰
۲	۲۰۰	۱۰	۰/۰۰۹۵	۲۰۰	۵۰
۳	۲۲۰	۸,۵	۰/۰۰۹	۳۰۰	۸۰
۴	۲۰۰	۱۱	۰/۰۰۹	۱۵۰	۵۰
۵	۲۲۰	۱۰,۵	۰/۰۰۸	۲۰۰	۵۰
۶	۱۹۰	۱۲	۰/۰۰۷۵	۱۲۰	۵۰

در جدول ۲ نرخ‌های افزایشی و کاهش‌ی تولید نواحی ممنوعه برای هر کدام از واحدهای تولیدی ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

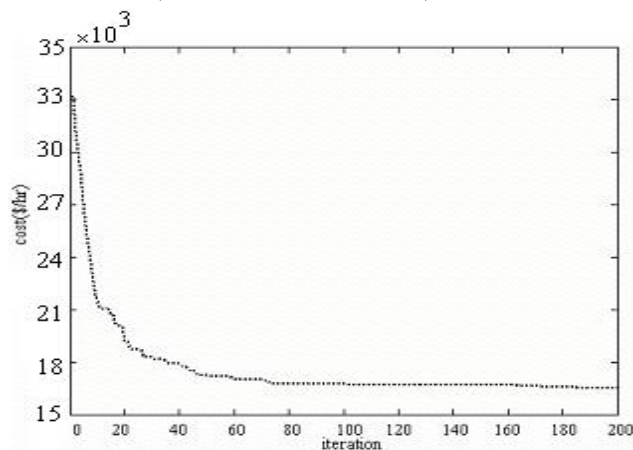
واحد	$P_i^0$	$RURi$ (MW/h)	$RDRi$ (MW/h)	زون‌های ممنوع (MW)
۱	۴۴۰	۸۰	۱۲۰	[۲۱۰ ۲۴۰] [۳۵۰ ۳۸۰]
۲	۱۷	۵۰	۹۰	[۹۰ ۱۱۰] [۱۴۰ ۱۶۰]
۳	۲۰۰	۶۵	۱۰۰	[۱۵۰ ۱۷۰] [۲۱۰ ۲۴۰]
۴	۱۵۰	۵۰	۹۰	[۸۰ ۹۰] [۱۱۰ ۱۲۰]
۵	۱۹۰	۵۰	۹۰	[۹۰ ۱۱۰] [۱۴۰ ۱۵۰]
۶	۱۱۰	۵۰	۹۰	[۷۵ ۸۵] [۱۰۰ ۱۰۵]

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

واحد	GA	PSO	ICA
P1(MW)	۴۷۴,۸۰۷	۴۴۷,۴۹۷	۴۴۶,۹۶
P2(MW)	۱۷۸,۶۳۶	۱۷۳,۳۲۲	۱۷۳,۳۹۴
P3(MW)	۲۶۲,۲۰۸	۲۶۳,۴۷۴	۲۶۲,۳۴۴
P4(MW)	۱۳۴,۲۸۲	۱۳۹,۰۵۹	۱۳۹,۵۱۲

P5(MW)	۱۵۱,۹۰۳	۱۶۵,۴۷۶	۱۶۴,۷۰۹
P6(MW)	۷۴,۱۸۱	۸۷,۱۲۸	۸۹,۰۱۶
تلفات توان (MW)	۱۳,۰۲۱۷	۱۲,۹۵۸۴	۱۲,۹۲۶
توان ژنراتور (MW)	۱۲۷۶,۰۳۰	۱۲۷۶,۱۰	۱۲۷۵,۹۴۰
بار (MW)	۱۲۶۳	۱۲۶۳	۱۲۶۳
هزینه (\$/h)	۱۵۴۵۵/۶۵	۱۵۴۳۹/۴۵	۱۵۴۳۷/۶۸

در جدول شماره ۳ نتایج به دست آمده نشان داده شده است در ستون شماره ۲، نتایج ذکر شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. در ستون شماره ۳، نتایج ذکر شده با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات به دست آمده است. در ستون شماره ۴ نتایج حاصل از روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ICA نشان داده شده است. با توجه به هزینه تولیدی هر ژنراتور، هزینه کل به دست آمده برای سیستم قدرت مورد نظر برای هر یک روش‌های ارائه شده، در سطر آخر مشخص شده است. تلفات توان نیز در روش الگوریتم ICA از روش‌های الگوریتم PSO و الگوریتم ژنتیک کمتر می‌باشد.



شکل ۱. تغییرات تابع هدف برای سیستم ۶ نیروگاهی

شکل شماره ۱ همگرایی تابع هزینه (تابع شماره ۱) را برحسب قیدها نشان می‌دهد هرچه تکرار بیشتر باشد مقدار تابع هزینه کاهش یافته و به سمت بهترین جواب همگرا می‌شود. وقتی الگوریتم به پایان می‌رسد که تکرار به پایان رسیده باشد یا به حالت تک امپریالیست رسیده باشیم.

## حالت دوم

در این حالت سیستم ۱۵ نیروگاهی در دو حالت با در نظر گرفتن تابع آلودگی، زون‌های ممنوعه و تابع تلفات در دو جدول ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی

واحد	$P_i^0$	RURi (MW/h)	RDRi (MW/h)	زون‌های ممنوعه		
				زون ۱	زون ۲	زون ۳
۱	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	-----	-----	-----
۲	۳۰۰	۸۰	۱۲۰	[۲۲۵ ۱۸۵]	[۳۵۵ ۳۰۵]	[۴۵۰ ۴۲۰]
۳	۱۰۵	۱۳۰	۱۳۰	-----	-----	-----
۴	۱۰۰	۱۳۰	۱۳۰	-----	-----	-----
۵	۹۰	۸۰	۱۲۰	[۲۰۰ ۱۸۰]	[۳۳۰ ۳۰۵]	[۴۲۰ ۳۹۰]

۶	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	[۲۵۵ ۲۳۰]	[۳۹۵ ۳۶۵]	[۴۵۵ ۴۳۰]
۷	۳۵۰	۸۰	۱۲۰	----	----	----
۸	۹۵	۶۵	۱۰۰	-----	-----	----
۹	۱۰۵	۶۰	۱۰	-----	-----	----
۱۰	۱۱۰	۶۰	۱۰۰	-----	-----	----
۱۱	۶۰	۸۰	۸۰	-----	-----	----
۱۲	۴۰	۸۰	۸۰	[۴۰ ۳۰]	[۶۵ ۵۵]	----

جدول ۵. اطلاعات سیستم با تابع هزینه درجه سوم با در نظر گرفتن ضرایب آلودگی  $Fi(Pi)=(ai+biPi+ciPi^2+diPi^3)$

واحد	$ai(\$)$	$bi (\$/MW)$	$ci (\$/MW^2)$	$di (10^{-6})$	$Pimax (MW)$	$Pimin (MW)$
۱	۶۷۱	۱۰/۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۳۱	۱۵۰	۴۵۵
۲	۵۷۴	۱۰/۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۵۱	۱۵۰	۴۵۵
۳	۳۷۴	۸/۸	۰/۰۰۱۱	۰/۰۹۱	۲۰	۱۳۰
۴	۳۷۴	۸/۸	۰/۰۰۱۱	۰/۰۹۲	۲۰	۱۳۰
۵	۴۶۱	۱۰/۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۸۱	۱۵۰	۴۷۰
۶	۶۳۰	۱۰/۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۶۱	۱۳۵	۴۶۰
۷	۵۴۸	۹/۸	۰/۰۰۰۴	۰/۰۵۱	۱۳۵	۴۶۵
۸	۲۲۷	۱۱/۲	۰/۰۰۰۳	۰/۳۴۲	۶۰	۳۰۰
۹	۱۷۳	۱۱/۲	۰/۰۰۰۸	۰/۵۵۲	۲۵	۱۶۲
۱۰	۱۷۵	۱۰/۷	۰/۰۰۱۲	۰/۵۳	۲۰	۱۶۰
۱۱	۱۸۶	۱۰/۲	۰/۰۰۳۶	۰/۴۳	۲۰	۸۰
۱۲	۲۳۰	۹/۹	۰/۰۰۵۵	۰/۳۳	۲۰	۸۰
۱۳	۲۲۵	۱۳/۱	۰/۰۰۰۴	۰/۲۳	۲۵	۸۵
۱۴	۳۰۹	۱۲/۱	۰/۰۰۱۹	۰/۱۴۳	۱۵	۵۵
۱۵	۳۲۳	۱۲/۴	۱/۰۰۴۴	۰/۱۳	۱۵	۵۵

جدول ۶. نتایج شبیه‌سازی ۱۵ واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی با در نظر گرفتن تلفات

واحد	PSO	GA	ICA
P1(MW)	۴۵۵	۴۳۹/۱۲	۴۴۹/۱
P2(MW)	۳۸۰	۴۰۷/۹۷	۱۷۴/۵
P3(MW)	۱۳۰	۱۱۹/۶۳	۲۰/۸
P4(MW)	۱۵۰	۱۲۹/۹۹	۸۹/۳
P5(MW)	۱۶۸/۹	۱۵۱/۰۷	۳۶۱/۱۲
P6(MW)	۴۵۹/۳	۴۵۹/۹۹	۳۸۰/۳
P7(MW)	۴۳۰	۴۲۵/۵۶	۴۳۰/۲
P8(MW)	۹۷/۴	۹۸/۵۶	۱۷۰/۳
P9(MW)	۳۰/۶	۱۱۳/۴۹	۱۶۰



P10(MW)	۱۴۲/۵	۱۰۱/۱۱	۱۲۴/۷
P11(MW)	۸۰	۳۳/۹۱	۶۰/۲۵
P12(MW)	۸۵	۷۹/۹۶	۷۰/۲
P13(MW)	۱۵	۲۵	۶۸/۴
P14(MW)	۱۵	۴۱/۴۱	۴۲/۰۸
P15(MW)	۱۵	۳۵/۶۱	۲۸/۷۵
مجموع بار (MW)	۲۶۵۳/۸۵	۲۶۶۲/۴۱	۲۶۴۲/۸۹۳
تلفات (MW)	۲۳/۸۵	۳۲/۴۲	۱۲/۸۹۳
هزینه (\$/h)	۳۲۵۶۸/۵۶	۳۲۸۵۸	۳۲۵۵۰/۳۲

در جدول شماره ۶ نتایج به دست آمده نشان داده شده است در ستون شماره ۲، نتایج ذکر شده با استفاده از الگوریتم بهینه-سازی گروه ذرات به دست آمده است. در ستون شماره ۳، نتایج ذکر شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. در ستون شماره ۴ نتایج حاصل از روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ICA نشان داده شده است. با توجه به هزینه توان تولیدی هر ژنراتور، هزینه کل به دست آمده برای سیستم قدرت مورد نظر برای هر یک روش‌های ارائه شده، در سطر آخر مشخص شده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای هزینه کل، کارایی و دقت الگوریتم ICA مشخص می‌شود. جدول شماره ۷ نتایج حاصله از شبیه‌سازی الگوریتم ICA برای سیستم‌های ۱۵ نیروگاهی با در نظر گرفتن آلودگی را نشان می‌دهد. نتایج حاصله حاکی از کارایی بالای الگوریتم ICA می‌باشد.

البته برای این قسمت از پارامترهای جدید برای الگوریتم ICA استفاده شده است. که براساس نوع داده‌ها و محدوده کاری آنها مشخص شده است.

جدول ۷. نتایج شبیه‌سازی ۱۵ واحدهای تولیدی سیستم ۱۵ نیروگاهی با در نظر گرفتن آلودگی

واحد	بدون نرخ شیب و بدون زون ممنوعه	با نرخ شیب و بدون زون ممنوعه	با نرخ شیب و با زون ممنوعه	بدون نرخ شیب و با زون ممنوعه
P1(MW)	۳۹۳/۲۸	۴۳۰/۱۲	۲۸۰/۱۴	۲۹۰/۱۳
P2(MW)	۲۹۱/۱۲	۳۵۴/۲	۴۲۰	۴۱۶/۸۷
P3(MW)	۱۲۴	۱۲۵/۷۶	۱۲۸/۱۲	۱۲۵/۳۷
P4(MW)	۱۲۹/۴۱	۱۲۸/۶۵	۱۲۷/۵۴	۱۲۱/۲۳
P5(MW)	۳۹۴/۸۴	۲۰۱/۳۶	۳۸۹/۱۲	۳۸۶/۷۱
P6(MW)	۴۲۶/۷۵	۴۴۰/۵۳	۴۳۰	۴۳۰
P7(MW)	۴۶۱/۹۵	۴۳۲/۵	۳۵۰	۴۴۵
P8(MW)	۸۵/۲۳	۹۲/۷۶	۶۷/۲	۸۰/۹۷
P9(MW)	۴۹/۶۶	۵۷/۹۸	۴۳/۶۲	۵۰/۲۳
P10(MW)	۹۰/۶۶	۱۲۰/۴۷	۱۳۲/۸۷	۹۰/۱۲
P11(MW)	۶۹/۴۵	۷۳/۲۱	۷۹/۸	۷۹/۳
P12(MW)	۷۳/۴۱	۷۳/۸۷	۶۵	۶۵/۹
P13(MW)	۳۰/۲	۵۸/۹۳	۶۰/۱	۲۵/۵۵
P14(MW)	۱۶/۵	۳۵/۱۹	۳۹/۲۱	۱۸/۴۵



P15(MW)	۱۳/۵۴	۳۳/۴۷	۳۷/۲۱	۲۴
مجموع بار (MW)	۸/۵۶	۸/۲۳	۸/۸۹۶	۸/۱۹
هزینه (\$/h)	۸۲۷۳۱	۸۵۳۹۲	۹۰۱۲۹	۸۷۹۸۳

### نتیجه گیری

در این مقاله از الگوریتم *ICA* (باتوجه به سرعت بالا و کارایی آن در شبکه‌های پیچیده) برای پخش بار بهینه در سیستم قدرت استفاده شد. این الگوریتم کمتر در مینیمم‌های محلی گیر می‌کند، و به همین دلیل تابع هدف را کمتر فراخوانی می‌کند که باعث افزایش سرعت آن می‌گردد و همچنین این الگوریتم پیچیدگی کمتری دارد که همین مسئله باعث می‌شود زمان حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری نسبت به سایر روش‌ها در این مقاله کمتر باشد. تابع هدف مناسبی تعریف شد نتیجه کار کاهش هزینه تولید توان با توجه به قیدهای مسئله بود. در تابع هدف ارائه شده، محدودیت‌های نقاط کار سیستم، کاهش میزان آلودگی و تلفات در نظر گرفته شده است. همچنین تاثیر در نظر گرفتن تابع هزینه ناصاف با مرتبه سوم، نرخ شیب نیروگاه‌ها و مناطق ممنوعه تولید نشان داده شده و مقایسه شده است. این موارد باعث دقیق‌تر شدن مدل‌سازی حل مسئله می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، که الگوریتم معرفی شده در یافتن نقطه بهینه موفق عمل می‌کند. همچنین استراتژی بهینه‌سازی مطرح شده می‌تواند با موفقیت کامل در کنار سایر روش‌های مطرح بهینه‌سازی همچون الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی گروه ذرات، به حل مسائل کاربردی و مهندسی کمک کند.

### مراجع

- [1] Adler.R.B and Fischl. R., "security constrained economic dispatch with participation factors based on worst case bus load variation", IEEE trans. On power Apparatus and Systems, Vol. 96, No.2, pp.347-356, 2006.
- [2] Bui.R. T.and Ghaderpanah.S., "Real power rescheduling and security assessment", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No.8, pp.2906-2915, 2007.
- [3] Hur, D.; Jong-Keun Park; "Security Constrained Optimal Power flow for evaluation of transmission capability on Korea electric power system", Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, vol.2, pp: 1133 -1138.
- [4] walters DC, Sheble GB., "Genetic Algorithm solution of economic dispatch with valve point loading Power", Syet IEEE Trans, Vol. 8, pp.1325-32, 1993.
- [5] R. Yokoyama, S.H. Bae, T. Morita, H. Sasaki, "Multiobjective Optimal Generation Dispatch Based on Probability Criteria", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 3, No. 1, Feb. 1988, pp 317-324.
- [6] E. Atashpaz-Gargari and C. Lucas, "Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialist Competition", IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), Page(s): 4661-4667, Year 2007.
- [7] Esmail Atashpaz-Gargari, Caro Lucas system for "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition" 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), pp 4461-466.