

# پخش بار اقتصادی مبتنی بر روش بهبود یافته ABC با اعمال محدودیت‌های غیر خطی

علی قاسمی مرزبالی<sup>۱\*</sup>، سید جلال سید شنوا<sup>۱</sup>، رضا بازبار<sup>۲</sup>، اویس عابدی نیا<sup>۱</sup>، علی یوسفی<sup>۱</sup>، حسین غلام علی تبار<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق- کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- شرکت توزیع نیروی برق تبریز، تبریز، ایران

[\\*ghasemi.agm@gmail.com](mailto:*ghasemi.agm@gmail.com)

چکیده: تولید انرژی الکتریکی برای سیستم‌های قدرت با هدف کمینه سازی کل هزینه تولیدی برای واحدهای فعال موجود در شبکه قدرت، از مهمترین مباحث برای سیستم‌های مدرن امروزی می‌باشد. به بیانی دیگر هدف از پخش بار اقتصادی برنامه‌ریزی بهینه و مناسب برای واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن عوامل و محدودیت‌های غیر خطی موجود در شبکه قدرت و واحدهای تولیدی می‌باشد. در این مقاله، مساله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیر خطی از جمله تلفات شبکه انتقال، تاثیر شیر ورودی بخار بر تابع هزینه تولیدی، توازن تولید و مصرف در سیستم، زون‌های ممنوعه، حدود تولید و نرخ‌های افزایشی و کاهش‌ی به یک مساله بهینه سازی تبدیل شده و در نهایت با روش بهبود یافته الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC) به حل آن پرداخته شده است. الگوریتم بهبود یافته کلونی مصنوعی زنبور عسل روشی حافظه دار، مبتنی بر هوش جمعی و رفتار زنبورهای یک کلونی در یافتن بهترین منبع تغذیه می‌باشد. در روش بهبود یافته ABC با تبادل اطلاعات دریافتی بین زنبور ها بر اساس قوانین نیوتن و گرانشی سبب استفاده از کلیه ظرفیت این الگوریتم در یافتن جواب بهینه با در نظر گرفتن قیود اعمالی بر سیستم می‌شود. به منظور نشان دادن کارایی این روش، الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم‌های نمونه ۶ نیروگاهی با کل بار درخواستی ۱۲۶۳ مگاوات، سیستم قدرت ۱۳ نیروگاهی با کل تقاضای بار ۱۸۰۰ مگاوات و ۴۰ نیروگاهی با بار درخواستی ۱۰۵۰۰ مگاوات اعمال شده و نتایج بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های دیگر مقایسه شده که نشان دهنده کارایی، دقت و سرعت مناسب این الگوریتم در حل مساله توزیع اقتصادی بار می‌باشد.

واژه های کلیدی: پخش بار اقتصادی، الگوریتم بهبود یافته ABC، شیر ورودی بخار، نرخ شیب افزایشی نیروگاه‌ها.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۰۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : علی قاسمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : مازندران-بابل-

## ۱- مقدمه

هدف از توزیع اقتصادی بار تخصیص تقاضا بین واحدهای مشارکت کننده و از پیش تعیین شده با شرط حداقل نمودن هزینه سوخت و تأمین ذخیره چرخان می باشد. بهره برداری اقتصادی برای یک سیستم قدرت، از نظر برگشت سود سرمایه گذاری انجام شده بسیار مهم بوده و نرخ های تعیین شده به وسیله ارگانهای دولتی و اهمیت صرفه جویی در سوخت، شرکت های برق را جهت حصول حداکثر بازدهی ممکن، تحت فشار قرار می دهد. توزیع اقتصادی بار برای هر شرایط بار پیش بینی شده، توان خروجی هر نیروگاه و نیز هر واحد مولد در داخل یک نیروگاه را تعیین می کند، بطوریکه که هزینه کلی سوخت مورد نیاز برای تأمین بار سیستم را حداقل نماید. روش های محاسباتی و تکنیک های بهینه سازی مختلفی مانند روش مرحله ای لامبدا، روش نقطه بهینه، ضرایب مشارکت و روش گرادیان برای حل مسأله توزیع اقتصادی بار استفاده شده است [۱-۳]. اما این روش ها زمانی که توابع هزینه غیر خطی باشند، مناسب نیستند. در برخی مسائل رسیدن به جواب بهینه بسیار مشکل خواهد بود، یک راه حل برای غلبه بر این مشکل استفاده از الگوریتم های هوشمند می باشد. با استفاده از این الگوریتم ها علاوه بر دستیابی به جواب بهینه، زمان و ابعاد حل مسأله تقریباً بصورت خطی با تعداد واحدها افزایش می یابد که با وجود کامپیوترهای امروزی، انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار می باشد. به همین دلیل استفاده از روش های هوشمندی نظیر بهینه سازی اجتماع ذرات [۴-۶] و الگوریتم ژنتیک [۷] در حل مسأله توزیع اقتصادی بار بسیار رایج می باشند. علاوه بر اینها الگوریتم تفاضل تکاملی (DE) برای توزیع اقتصادی بار نیز اجرا شده است [۸-۱۰].

در این مقاله با استفاده از روش بهبود یافته الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC) به حل مسأله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن تابع هدفی از هزینه سوخت نیروگاه ها با در نظر گرفتن محدودیت های ناشی از اثر شیر ورودی بخار، تلفات شبکه انتقال، توازن تولید و مصرف در سیستم، زون های ممنوعه، حدود تولید، نرخ های افزایشی و کاهششی و پرداخته شده است. الگوریتم حاصل بر روی سیستم های نمونه اجرا شده و نتایج بدست آمده با الگوریتم های دیگر مقایسه شده است. الگوریتم استفاده شده دارای سرعت همگرایی بالا می باشد و قرار گرفتن آن در نقاط محلی به مراتب از الگوریتم های دیگر کمتر است. همچنین پاسخ مناسب تری نسبت به سایر روش ها به دست می دهد. در بخش ۲ فرمول بندی مسأله توزیع بار اقتصادی ارائه و در بخش ۳ الگوریتم بهبود یافته ABC معرفی شده است. در بخش ۴ سیستم آزمون معرفی و نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم آزمون آورده شده و با نتایج ارائه شده در سایر مقالات مقایسه شده است. در نهایت بخش ۵ به نتیجه گیری اختصاص یافته است.

## ۲- فرمول بندی مسأله

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کمترین هزینه و بهره برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت های بهره برداری منابع تولید می باشد. مسأله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه ها به منظور کم کردن هزینه ها معین می کند. فرمول بندی آن نیز به عنوان یک مسأله بهینه سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه هایی که بار و تلفات را تأمین می کنند، ارائه می شود. بنابراین مسأله توزیع اقتصادی بار می تواند با تابع هدف زیر بیان شود [۱۱]:

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

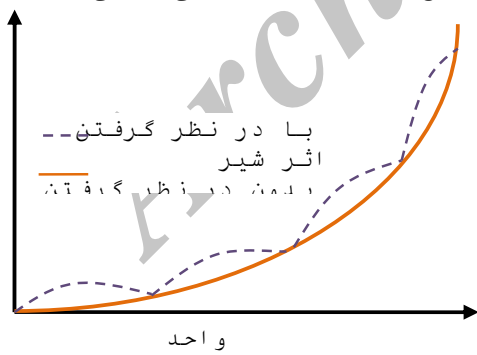
که  $F_i(P_i)$  هزینه سوخت  $i$  امین نیروگاه،  $N$  تعداد ژنراتورهای در حال بهره برداری سیستم و  $P_i$  توان خروجی  $i$  امین ژنراتور است.  $P_D$  تقاضای بار و  $P_{loss}$  تلفات شبکه انتقال می باشد.  $F_i(P_i)$  معمولاً به صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می شود:

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

در رابطه (۲)  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب هزینه  $i$  امین ژنراتور است. برای در نظر گرفتن اثرات موقعیت شیر، توابع سینوسی به شکل زیر وارد تابع هدف می شود.

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i \sin(f_i(P_i^{\min} - P_i))| \quad (3)$$

که  $e_i$  و  $f_i$  ضرایب موقعیت شیر  $i$  امین ژنراتور بوده، تابع هزینه (۱) به یک تابع مرکب چند جمله ای و غیر محدب تبدیل می شود. شکل (۱) تغییرات تابع هزینه را برای واحد نیروگاهی نشان می دهد.



شکل ۱. تاثیر شیر ورودی بر تابع هزینه

علاوه بر اثرات موقعیت شیر، هر نوع هزینه دیگر، همچون هزینه های تعمیر و نگهداری یا آلودگی را می توان به تابع هزینه افزود. تابع هدف حاصل مقید به محدودیت های زیر فرمول بندی مسأله توزیع اقتصادی بار را نتیجه خواهد داد:

### ● توازن تولید و مصرف در سیستم

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

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} = 0 \quad (4)$$

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.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ij} P_i P_j + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_i + B_{00} \quad (5)$$

### ● حدود تولید

قدرت 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.

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

حدود فوق، علاوه بر اینکه 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 و کاهشی

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

$$P_i^{\min}(t) \leq P(t)_i \leq P_i^{\max}(t) \quad (7)$$

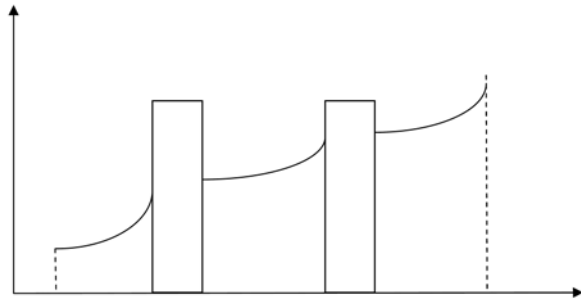
که  $P_i^{\min}(t) = \max(P_i(t-1) - RDR_i, P_i^{\min})$  و  $RDR_i$  نرخ کاهشی نیروگاه و  $P_i^{\max}(t) = \min(P_i(t-1) + RUR_i, P_i^{\max})$  و  $RUR_i$  نرخ افزایشی نیروگاه می‌باشد. به منظور اعمال محدودیت‌های فوق لازم است تا وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد.

### ● 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  $[P_{i,j}^L, P_{i,j}^U]$  مشخص می‌شوند. بدین ترتیب نواحی کار ممکن واحد تولید  $i$  ام 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  $i$  ام می‌باشد. شکل (۲) تاثیر دو منطقه ممنوعه برای یک واحد تولیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تاثیر منطقه ممنوعه بر تابع هزینه

### ● 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.

## ۳- الگوریتم بهبود یافته کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)

### ۳-۱- الگوریتم استاندارد ABC

الگوریتم‌های غیر مبتنی بر فرومن عموماً برگرفته از رفتار زنبورهای عسل می‌باشد. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی یک تکنیک برای حل مسایل بهینه‌سازی می‌باشد که بر مبنای رفتار زنبورهای عسل در طبیعت می‌باشد. در این روش هر یک از زنبورها با همکاری مستقیم و اشتراک گذاشتن اطلاعات سعی در به دست آوردن بهترین جواب بر حسب قوانین احتمال می‌پردازد. هر کلونی در طبیعت از سه بخش منابع غذایی، زنبورهای کارگر و زنبورهای غیر کارگر تشکیل شده است. بیشترین وظیفه در هر کندو بر عهده زنبورهای کارگر می‌باشد که شامل: پرورش بچه‌ها، مراقبت از ملکه و زنبورهای نر، تمیز کردن کندو، تنظیم دمای کندو، جمع‌آوری شهد، گرده‌افشانی و... می‌باشد. زنبورهای غیر کارگر به دو دسته پیش‌آهنگ و تماشاگر تقسیم می‌شوند. زنبورهای پیش‌آهنگ محیط پیرامون را برای یافتن منابع غذایی جدید جستجو می‌کنند و زنبورهای تماشاگر در کندو منتظر رسیدن اطلاعات از سوی کارگرها می‌باشند. زنبورهای عسل از یک سیستم پیچیده برای یافتن اطلاعات در مورد محل و کیفیت منابع غذایی در بیرون کندو استفاده می‌کنند. ارتباط بین زنبورها توسط مراسمی که

۸. انتخاب بهترین جواب (پر خورترین زنبور) بین جواب‌های  $X_{ij}$  و  $V_{ij}$ .

۹. تعیین منابع فاسد و جایگزین منابع تصادفی با آن منابع تصادفی ایجاد شده توسط زنبور پیش‌آهنگ  $X_i$  با استفاده از فرمول زیر:

$$x_{ij} = \min_j + rand(0,1) \times (\max_j - \min_j) \quad (12)$$

۱۰. ذخیره کردن بهترین جواب (منبع تغذیه با کیفیت) که تا این مرحله به دست آمده است.  
 ۱۱. Cycle=Cycle+1

تکرار تمام مراحل قبلی تا رسیدن به شرط پایان برنامه.

### ۳-۲- الگوریتم بهبود یافته IABC

الگوریتم بهبود یافته تجمعی زنبور عسل بر اساس نیروی گرانشی متقابل برای اجسام برقرار می‌باشد. الگوریتم بهبود یافته این الگوریتم در مراحل زیر پیگیری می‌شود:

**قالب دهی اولیه:** مقدار  $ne$  درصد به عنوان جواب‌های اولیه در فضای جستجوی الگوریتم انتخاب می‌شود و مقدار شایستگی آن‌ها براساس تابع هدف مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد که هر کدام به عنوان یک منبع شهد مورد استفاده معرفی می‌شود. در حقیقت انتخاب این جواب‌ها به صورت تصادفی در فضای جستجو بوده و بیانگر زنبورهای کارگر می‌باشند.

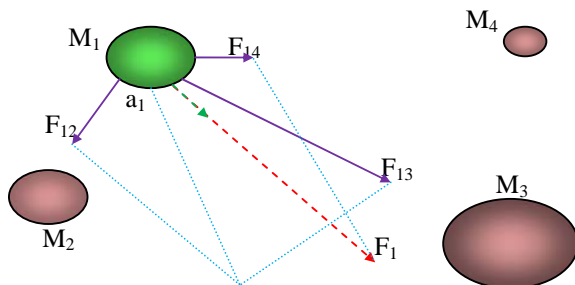
**حرکت زنبورهای کاوشگر:** بررسی میزان احتمال برای منابع انتخاب شده بر اساس فرمول (۱۳) و انتخاب یک منبع غذا به منظور استفاده از انتخاب چرخ رولت برای هر زنبور جستجوگر و تعیین میزان شهد برای هر یک از آن‌ها بر اساس مدل توسعه یافته بر اساس نیروی گرانشی متقابل بین زنبورهای جستجوگر می‌باشد که در معادلات (۱۴) تا (۱۸) بدست می‌آید [۱۴].

$$p_i = fit_i / \left( \sum_{n=1}^{SN} fit_n \right) \quad (13)$$

نیروی متقابل بین دو جسم با  $m_1$ ;  $m_2$  به صورت زیر می‌باشد. که در شکل (۳) تاثیر متقابل این نیروها نشان داده شده است.

$$F_{12} = G \frac{m_1 m_2}{r_{21}^2} \hat{r}_{21} \quad (14)$$

$$\hat{r}_{21} = \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|} \quad (15)$$



اصطلاحاً رقصیدن گفته می‌شود، انجام می‌گیرد. این زبان ارتباطی بر اساس حرکات پشت سر هم از سوی زنبور انجام می‌گیرد. این رقص که اصطلاحاً رقص چرخشی نامیده می‌شود، حاوی اطلاعات در مورد مکان و کیفیت منبع غذایی می‌باشد. در این نوع رقصیدن تعداد چرخش نمایانگر فاصله و مدت زمان چرخش نشان‌گر میزان کیفیت منبع غذایی می‌باشد. در این صورت زنبورهای تماشاگر در کندو با دیدن میزان چرخش، منبع با کیفیت را انتخاب می‌نمایند. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) بر اساس میزان چرخش زنبور و حرکت زنبور تماشاگر به سمت منبع با کیفیت استوار می‌باشد [۱۲، ۱۳]. در ابتدا مجموعه‌ای از منابع غذایی به طور تصادفی (جواب‌های اولیه) انتخاب می‌شود سپس زنبورهای کارگر به منابع رجوع کرده و میزان شهد و کیفیت آنها را بررسی کرده و به کندو بر می‌گردند و اطلاعات خود را در اختیار زنبورهای تماشاگر قرار می‌دهند. سپس هر زنبور به محل حرکت می‌کند و بر اساس اطلاعات یک منبع در همسایگی آن اختیار می‌کند یعنی زنبور بر اساس نوع گل و میزان شهد آن تصمیم می‌گیرد که محل جدید بماند یا به محل قبلی برود. زمانی که منبع تمام شد به یک منبع جدید یافت شده توسط زنبورهای پیش‌آهنگ، حرکت می‌کنند و این روند تا بر آورده شدن نیازها تکرار می‌شود [۱۳]. نحوه کدگذاری این الگوریتم در مراحل زیر نشان داده شده است:

۱. مقدار دهی اولیه به عنوان جواب‌های اولیه  $X_{ij}$

۲. محاسبه جواب‌های اولیه در تابع هدف

۳. تکرار اولیه  $cycle=1$

۴. فراهم کردن جواب‌های جدید بر اساس یافتن منبع تغذیه جدید  $V_{ij}$  در همسایگی  $X_{ij}$ ، برای تولید جواب‌های جدید از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - x_{k,j}) \quad (9)$$

که در این فرمول  $k$  جواب به دست آمده در همسایگی از  $i$  و  $\phi$  یک عدد تصادفی بین  $(-1,1)$  می‌باشد.

۵. انتخاب بهترین منبع یا جواب بهتر بین  $X_{ij}$  و  $V_{ij}$ .

۶. محاسبه میزان احتمال برای جواب‌های  $X_{ij}$  بر اساس فرمول زیر:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (10)$$

در حقیقت برای به دست آوردن شایستگی جواب‌ها از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1+fit_i} & f_i \geq 0 \\ 1+abs(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

جواب‌های  $P_i$  بین  $(-1,1)$  می‌باشد.

۷. تولید جواب‌های جدید (منابع جدید)  $V_i$  بر اساس زنبورهای

تماشاگر از جواب‌های  $X_i$  و تعیین میزان احتمال آنها  $P_i$

حرکت زنبورهای پیش آهنگ: اگر چنانچه مقدار برازندگی تابع در تکرارهای بعدی الگوریتم تصحیح نشود اصطلاحاً به آن Limit می‌گویند و آن منابع اصطلاحاً متروکه نامیده می‌شوند که به کمک حرکت زنبورهای پیش آهنگ به بازیابی و جایگزینی منابع جدید بر آن منابع متروکه می‌پردازد. حرکت این زنبورها به صورت زیر می‌باشد.

$$\theta_{ij} = \theta_{ij_{\min}} + r.(\theta_{ij_{\max}} - \theta_{ij_{\min}}) \quad (19)$$

**جایگذاری:** اگر منبع غذای یافته شده در مراحل بعدی بهتر از قبلی شده است این مقدار وارد حافظه زنبورهای می‌شود.

**پایان برنامه:** برنامه تا پایان یافتن کل تکرارها ادامه می‌یابد در صورتی که به مقدار رضایت بخشی رسیدیم برنامه تمام شده در غیر این صورت به مرحله دوم می‌رویم. شکل (۴) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

شکل ۳. نحوه وارد شده متقابل نیروها از سوی اجرام بر یکدیگر در رابطه‌های بالا  $F_{12}$ ,  $F_{21}$  و  $G$  نیروی متقابل، بردار یکه و ثابت گرانش می‌باشد. به طریقی مشابه برای زنبور بر اساس میزان شایستگی آن‌ها روابط زیر را بیان کنیم [۱۵]:

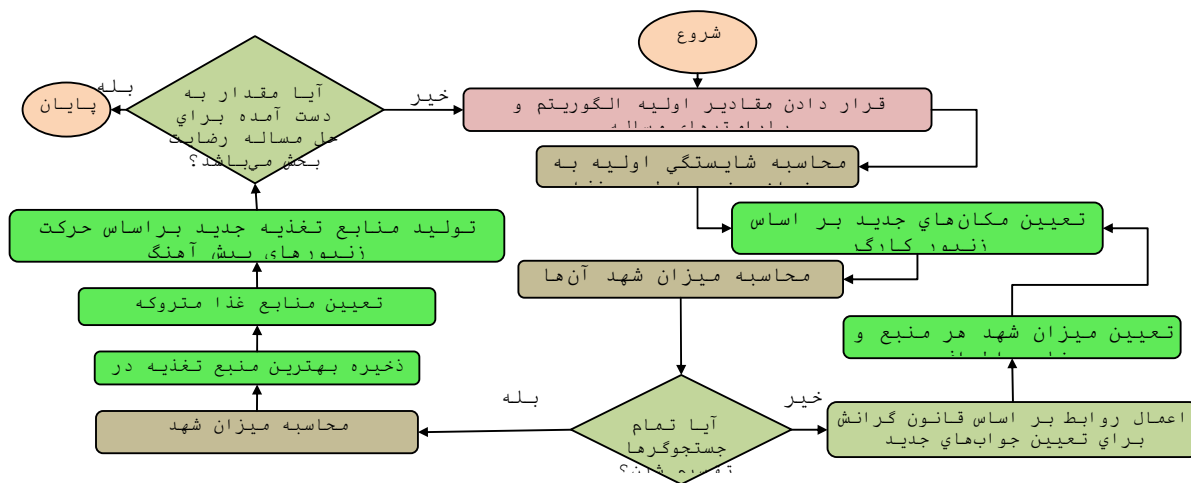
$$F_{ikj} = G \frac{F(\theta_i) \times F(\theta_k)}{(\theta_k - \theta_{ij})^2} \cdot \frac{\theta_k - \theta_{ij}}{|\theta_k - \theta_{ij}|} \quad (16)$$

$$x_{ij}(t+1) = \theta_{ij}(t) + F_{ikj} \cdot [\theta_{ij}(t) - \theta_k(t)] \quad (17)$$

که در رابطه (۱۶)  $F(\theta_i)$  و  $F(\theta_k)$  به ترتیب میزان شایستگی معرفی شده برای زنبورهای کارگر می‌باشد که نتیجه تاثیر آن برای منبع تغذیه جدید به صورت معادله (۱۷) می‌باشد. با در نظر گرفتن تاثیر متقابل کلیه زنبورها برای زنبور انتخاب شده فرمول (۱۷) با بسط دادن به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌شود [۱۵].

$$x_{ij}(t+1) = \theta_{ij}(t) + \sum_{k=1}^n F_{ikj} \cdot [\theta_{ij}(t) - \theta_k(t)] \quad (18)$$

در حقیقت در الگوریتم بهبود یافته تجمع ذرات معیار استفاده شده به جای مقدار رندوم انتخاب شده، می‌شود که سبب افزایش بالای بهزدهی این الگوریتم می‌شود.



شکل ۴. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

جدول ۱- ضرایب هزینه و حدود واحدهای تولیدی سیستم ۶ باس

Unit	ai (\$)	bi (\$/MW)	ci (\$/MW2)	Pimax (MW)	Pimin (MW)
1	240	7.0	0.0070	500	100
2	200	10.0	0.0095	200	50
3	220	8.5	0.0090	300	80
4	200	11.0	0.0090	150	50
5	220	10.5	0.0080	200	50
6	190	12.0	0.0075	120	50

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

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های مورد مطالعه

به منظور نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی‌ها در ۳ سناریو که در چکیده گفته شده، انجام شده است.

##### سناریو اول

سیستم شامل ۲۶ باس، ۴۶ خط انتقال و ۶ واحد تولید حرارتی می‌باشد [۱۶]. ضرایب تابع هزینه و حدود واحدهای تولیدی در جدول ۱ ارائه شده است. نحوه اتصال شبکه برای سیستم در شکل (۵) نشان داده شده است.

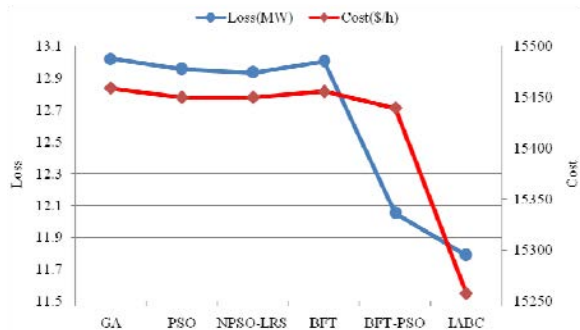
Total Gen.(MW)	1276.030	1276.010	1275.940
Total Load(MW)	1263.00	1263.00	1263.00
Cost(\$/h)	15459.00	15450.00	15450.00

ادامه جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی واحدهای تولیدی سیستم ۶

#### نیروگاهی

Unit	BFT [18]	BFT-PSO [18]	IABC
P1(MW)	448.688	450.129	440.6576
P2(MW)	164.007	173.623	186.6672
P3(MW)	263.156	260.607	254.1010
P4(MW)	131.657	139.489	125.1612
P5(MW)	197.039	159.697	153.1412
P6(MW)	71.488	91.507	103.4585
Loss(MW)	13.0054	12.0525	11.7892
Total Gen.(MW)	1276.034	1275.052	1263.18
Total Load(MW)	1263.00	1263.00	1263.00
Cost(\$/h)	15455.65	15439.45	15257.65

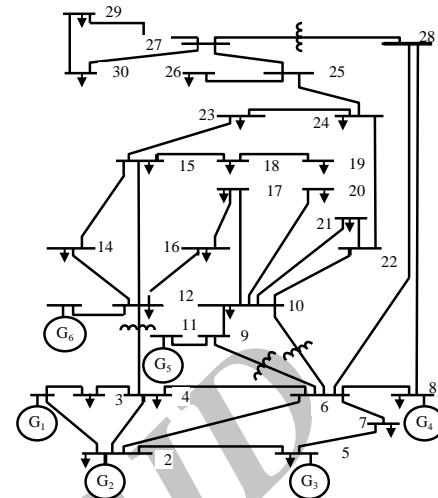
شکل (۶) نتیجه مقایسه بین روش‌های انجام شده برای سیستم ۶ نیروگاهی می‌باشد. همانگونه که از شکل نشان داده شده است الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی بالاتر و بهتری بوده است.



شکل ۶. نتایج مقایسه ای برای سیستم نمونه ۶ واحدی

همانگونه که از شکل ۶ نشان داده شده است مقدار تلفات نهایی برای الگوریتم پیشنهادی برابر با ۱۱/۷۸ بوده است که در مقایسه با بهترین جواب از سایر الگوریتم‌ها ۰/۳ واحد بهبود یافته است. علاوه بر تلفات مقدار نهایی هزینه به اندازه ۱۸۱/۸ واحد کاهش یافته است.

نتایج حاصل از مقدار ماکزیمم و مینیمم برای الگوریتم‌های پیشنهادی در جدول ۴ داده شده است. همان گونه که از جدول ۴ نشان داده شده است روش پیشنهادی کارآمدتر و سریعتر بوده است. همچنین به منظور نشان دادن مقاوم بودن الگوریتم در طراحی، دقت بالا و مناسب آن برای تعیین جواب بهینه نهایی، الگوریتم مورد نظر به دفعات مختلف با افزایش ۵٪ و ۱۰٪ در کل بار درخواستی اجرا و نتایج حاصل از آن در جدول ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در جدول نشان داده شده است الگوریتم از انحراف معیار بسیار کمی برخوردار بوده است و این حاکی از توانایی آن در فرار از نقاط محلی و پیوستگی برای جواب نهایی حاصل از این الگوریتم بوده است.



شکل ۵. دیاگرام سیستم ۶ ماشینه

جدول ۲- مشخصات واحدهای تولیدی سیستم ۶ باس

Unit	Pi0 (MW)	RURi (MW/h)	RDRi (MW/h)	Prohibited zones (MW)
1	440	80	120	[210 240][350 380]
2	170	50	90	[90 110][140 160]
3	200	65	100	[150 170][210 240]
4	150	50	90	[80 90][110 120]
5	190	50	90	[90 110][140 150]
6	110	50	90	[75 85][100 105]

کل تقاضای بار برابر 1263.0MW می‌باشد و ضرایب تلفات B (بر پایه 100MW) به صورت زیر می‌باشد.

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}$$

$$B_{i0} = 10^{-3}[-0.3908 \quad -0.1297 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.6635]$$

$$B_{00} = 0.0056$$

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی واحدهای تولیدی سیستم ۶ نیروگاهی

Unit	GA [16]	PSO [16]	NPSO-LRS [17]
P1(MW)	474.807	447.497	446.960
P2(MW)	178.636	173.322	173.394
P3(MW)	262.208	263.474	262.344
P4(MW)	134.282	139.059	139.512
P5(MW)	151.903	165.476	164.709
P6(MW)	74.181	87.128	89.016
Loss(MW)	13.0217	12.9584	12.936

جدول ۴. نتایج مقایسه برای سیستم ۶ نیروگاهی

GA	PSO	PSO_LRS	BFT	IABC	Unit
0.22	0.06	NA	0.06	0.0438	Time
15,524	15,492	15,455	15,492	15398.78	Maximum
15,459	15,450	15,450	15,450	15257.65	Minimum
15,469	15,454	15,454	15,454	15299.38	Average

جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی واحدهای تولیدی سیستم ۱۳ نیروگاهی

Unit	GA-PS-SQP [19]	DEC-SQP [20]	IABC
P1(MW)	628.31	526.18	507.8882
P2(MW)	148.50	252.19	249.5643
P3(MW)	224.03	257.92	250.5752
P4(MW)	109.75	78.26	98.4068
P5(MW)	109.85	84.49	104.2084
P6(MW)	60.00	89.60	95.4643
P7(MW)	109.86	88.00	103.5368
P8(MW)	109.83	101.16	102.2782
P9(MW)	109.86	132.00	97.0903
P10(MW)	40.00	40.00	40.00
P11(MW)	40.00	40.00	40.00
P12(MW)	55.00	55.00	55.00
P13(MW)	55.00	55.00	55.00
Cost(\$/h)	17964.25	17938.96	17923.241

جدول ۵. اجراهای مختلف الگوریتم پیشنهادی با افزایش ۵٪ و ۱۰٪ در کل بار درخواستی ۱۲۶۳ مگاوات

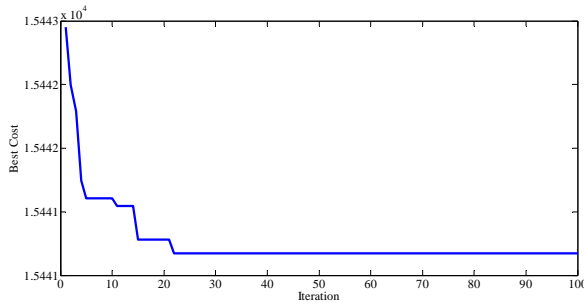
Percent Increase Load	Index	0% 5% 10%		
		Trail 1	Ploss	12.2835
	Max	15443.033	16308.542	17182.534
	Mean	15441.255	16302.122	17176.715
	Min	15441.055	16301.990	17176.686
	Time	0.02322	0.02324	0.02325
	Ploss	12.2843	13.4832	14.9873
	Max	15444.524	16308.645	17182.576
	Mean	15441.243	16302.133	17176.864
	Min	15441.056	16301.993	17176.689
	Time	0.02321	0.02321	0.02322
	Ploss	12.2837	13.4765	14.9876
	Max	15445.315	16308.445	17182.59
	Mean	15441.365	16302.201	17176.732
	Min	15441.048	16301.998	17176.698
	Time	0.02322	0.02323	0.02322
	Ploss	12.2863	13.4778	14.9799
	Max	15443.982	16308.471	17182.59
	Mean	15441.331	16302.165	17176.787
	Min	15441.027	16301.993	17176.687
	Time	0.02322	0.02324	0.02321
	Ploss	12.2836	13.4786	14.9952
	Max	15444.787	16308.762	17182.63
	Mean	15441.191	16302.236	17176.825
	Min	15441.023	16301.999	17176.687
	Time	0.02322	0.02323	0.02322
	Ploss	0.0010	0.0026	0.0057
	Max	0.7772	0.1172	0.0308
	Mean	0.0628	0.0424	0.0558
	Min	0.0140	0.0034	0.0044
	Time (1.0e-3)	0.0133	0.1591	0.0268

سناریو سوم: سیستم شامل ۴۰ ژنراتور می‌باشد که در این مطالعه اثرات شیر ورودی به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. اطلاعات سیستم در مرجع [۲۰] داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۷ داده شده است.

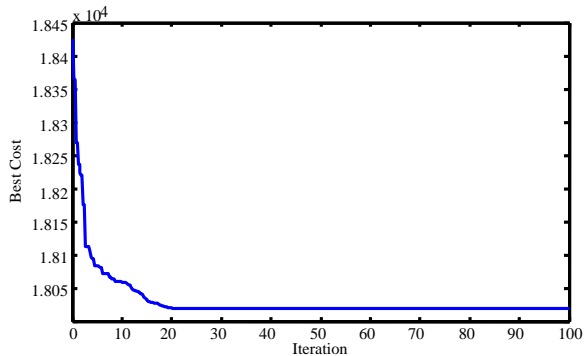
جدول ۷- نتایج شبیه‌سازی واحدهای تولیدی سیستم ۴۰ نیروگاهی

Unit	GA-PS-SQP [19]	DEC-SQP [20]	IABC
P1(MW)	110.97	111.76	114.0000
P2(MW)	111.02	111.59	114.0000
P3(MW)	120.00	97.4	120.0000
P4(MW)	179.73	179.73	175.5075
P5(MW)	88.27	91.66	91.0000
P6(MW)	140.00	140.00	140.0000
P7(MW)	259.60	300.00	261.6922
P8(MW)	284.60	300.00	289.3128
P9(MW)	284.60	284.56	290.0000
P10(MW)	130.00	130.00	130.0000
P11(MW)	168.80	168.8	165.0000
P12(MW)	168.80	94.00	165.3099
P13(MW)	214.76	214.75	210.0334
P14(MW)	394.28	394.28	390.0053
P15(MW)	304.52	304.50	300.0000
P16(MW)	304.52	304.50	300.3701
P17(MW)	489.28	489.28	486.5823
P18(MW)	489.28	489.28	485.8456
P19(MW)	511.28	511.28	513.0000
P20(MW)	511.28	511.28	511.8137
P21(MW)	523.28	523.28	522.9517
P22(MW)	523.28	523.28	526.0000
P23(MW)	523.28	523.28	524.2664
P24(MW)	523.28	523.28	521.9275
P25(MW)	523.28	523.28	526.0000

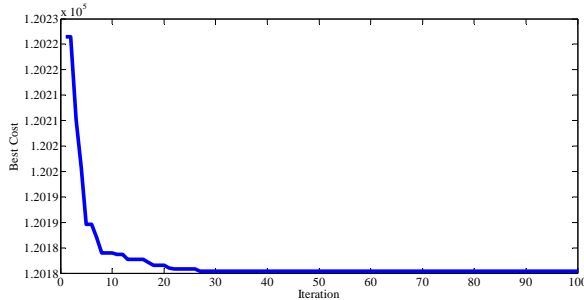
سناریو دوم: سیستم شامل ۱۳ ژنراتور می‌باشد که در این مطالعه اثرات شیر ورودی به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. اطلاعات سیستم در مرجع [۱۹] داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۶ داده شده است.



شکل ۱- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۶ نیروگاهی



شکل ۹- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۱۳ نیروگاهی



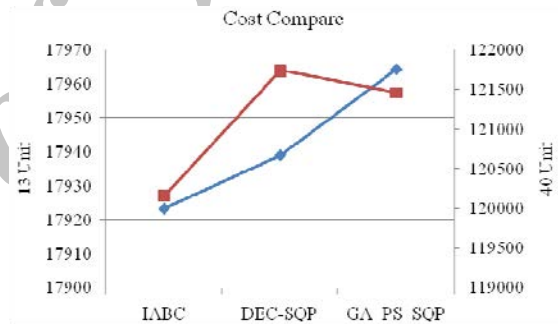
شکل ۱۰- تغییرات تابع هدف برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله از الگوریتم جدیدی برای تعیین توزیع اقتصادی بار بین واحدهای موجود سه سیستم استاندارد استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی بهتر این الگوریتم نتایج به دست آمده از توزیع اقتصادی بار برای سیستم نمونه بوسیله الگوریتم بهبود یافته ABC با نتایج حاصل از الگوریتم‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج حاصل از توزیع اقتصادی بار نشان دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی بیشتر در مواجه شدن با مسائل پیچیده‌تر بوده است. در تابع هدف ارائه شده، همزمان با کمینه سازی هزینه تولید به حداقل کردن تلفات شبکه انتقال نیز توجه شده است و روش ارائه شده در یافتن نقطه بهینه نزدیک به نقطه بهینه کلی موفق‌تر بوده است.

P26(MW)	523.28	523.28	526.0000
P27(MW)	10.00	10.00	10.0000
P28(MW)	10.00	10.00	10.0000
P29(MW)	10.00	10.00	10.0000
P30(MW)	88.66	90.33	90.0000
P31(MW)	190.00	190.00	190.0000
P32(MW)	190.00	190.00	190.0000
P33(MW)	190.00	190.00	190.0000
P34(MW)	164.80	200.00	168.0000
P35(MW)	200.00	200.00	200.0000
P36(MW)	200.00	200.00	200.0000
P37(MW)	110.00	110.00	110.0000
P38(MW)	110.00	110.00	110.0000
P39(MW)	110.00	110.00	110.0000
P40(MW)	511.28	511.28	511.3815
Cost(\$/h)	121458.14	121741.98	120157.77

شکل ۷ مقایسه ای برای هزینه نهایی تمام شده برای دو سیستم ۱۳ نیروگاهی و ۴۰ نیروگاهی را نشان می دهد.



شکل ۷. مقایسه هزینه تولید شده

نتایج حاصل از جداول و شکل ها نشان می دهد که الگوریتم بهبود یافته ABC در پیدا کردن پاسخ بهینه از سایر روش های ذکر شده موفق تر بوده است. تولید در واحد اول در مقدار مرزی قرار دارد و هزینه کل تولید به دست آمده در این روش از سایر روش ها کمتر می باشد در حالیکه تلفات شبکه انتقال به مقدار قابل توجهی کمتر از سایر روش ها می باشد. و زمان اجرای روش به الگوریتم، ساختار کامپیوتر مورد استفاده و کارایی کد نویسی برنامه دارد. در عین حال اجراهای متعدد روش پیشنهاد شده، نشان دهنده زمان اجرای قابل مقایسه با سایر روش ها (در حدود چند ثانیه) می باشد. همچنین میانگین و انحراف معیار پاسخ های به دست آمده در اجراهای متعدد برنامه، در حد قابل قبولی بوده و کارایی روش را برای استفاده های بعدی نشان می دهد. باتوجه به زمان اندک لازم برای اجرای الگوریتم، می توان از آن برای توزیع بار اقتصادی که بر مبنای پیش بینی بار و معمولاً در بازه های چندین دقیقه ای یا ساعتی انجام می یابد، استفاده کرد. در شکل های زیر همگرایی الگوریتم را برای ۳ سیستم نمونه در ۱۰۰ تکرار با جمعیت ۴۰ نشان می دهد.



Particle Swarm Optimization (PSO)  
 Genetic Algorithm (GA)  
 Artificial Bee Colony (ABC)  
 Interactive Artificial Bee Colony (IABC)  
 Economic Load Dispatch (ELD)  
 Self organizing hierarchical PSO (SOH-PSO)  
 New PSO (NPSO)

- [1] L.Z. Xiong, J.D. Glover, A Zoom Feature for a Programming Solution to Economic Dispatch Including Transmission Losses. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, pp. 544-50, 1992.
- [2] X. Yan, V.H. Quintana, An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security-Constrained Economic Dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.12, pp. 803-10, 1997.
- [3] R.K. Pancholi and K.S Swarup, " Particle swarm optimization for security constrained economic dispatch", *Intelligent Sensing and Information Processing*, pp. 7-12, 2004.
- [4] L. dos Santos Coelho, " Particle swarm approach based on quantum mechanics and harmonic oscillator potential well for economic load dispatch with valve-point effects", *Energy Conversion and Management*, pp. 3-10, 2008.
- [5] T. Niknam, "A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for non-linear, non-smooth and non-convex economic dispatch problem", *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 327-339, 2010.
- [6] P. Jong-Bae, L. Ki-Song; Joong-Rin S; Lee, K.Y, "Particle swarm optimization for economic dispatch considering the generator constraints", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 34 - 42, 2005.
- [7] K. Hosam Youssef and M. Khaled El-Naggar, "Genetic based algorithm for security constrained power system economic dispatch", *Electric Power Systems Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 47-51, 2000.
- [8] L. Dos, S. Coelho and Viviana M. Cocco, "Improved differential evolution algorithms for handling economic dispatch optimization with generator constraints", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 5, pp.1631-1639, 2006.
- [9] N. Nasimul and I. Hitoshi, "Differential evolution for economic load dispatch problems", *Electric Power System Research*, Vol. 78, No. 8, pp. 1322-1331, 2008.
- [10] LDS. Coelho, RCT. Souza and VC. Mariani, "Improved differential evolution approach based on cultural algorithm and diversity measure applied to solve economic load dispatch problems", *Math.Comput. Simulat*, Vol. 79, No. 1, pp. 36-47, 2009.
- [11] T. Yalcinoz, h. altun and M. Uzam, "Economic dispatch solution using a genetic algorithm based on arithmetic crossover", *Power Tech. Proceedings, IEEE Porto*, Vol. 2, No. 4, 2001.
- [12] D. Karaboga, B. Akay, A comparative study of artificial bee colony algorithm, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 214, pp. 108-132, 2009.
- [13] C. Zhang, D. Ouyang, J. Ning, An artificial bee colony approach for clustering, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 4761-4767, 2010.
- [14] G. A. Gurzadyan, *Space Dynamics*, Taylor & Francis Inc, London, 2002.
- [15] P. W. TSai, J. S. Pan, B. Y. Liao and S. C. Chu. Enhanced Artificial Bee Colony Optimization. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 5, No. 12, pp. 1-12, 2009.
- [16] Gaing Zwe-Lee, "Particle swarm optimization to solving economic dispatch considering the generator constraints", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1187-1195, 2003.
- [17] Selvakumar A.I. and Thanushkodi K, "A new particle swarm optimization to non-convex economic dispatch problems", *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 22, No. 1, pp. 42-51, 2007.
- [18] Saber A.Y. and Venayagamoorthy G.K., "Economic load dispatch using bacterial foraging technique with particle swarm optimization biased evolution", *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, St. Louis MO USA, Sept. 2008.
- [19] Leandro. D. S. C and Viviana Cocco M, " Combining of Chaotic Differential Evolution and Quadratic Programming for Economic Dispatch Optimization With Valve-Point Effect", *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 21, No. 2, pp. 989-995, May 2006.
- [20] Alsumait a J.S., Sykulski a J.K., Al-Othman A.K , " A hybrid GA-PS-SQP method to solve power system valve-point economic dispatch problems ", *Applied Energy* ,Vol. 87, No. 2, pp.1773-1781, 2010.