

توزیع بهینه دینامیکی توان به منظور تأمین تقاضای انرژی به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی زنبور عسل با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی

حسین شایقی^۱، استاد، علی قاسمی^۱، دانشجوی دکتری
 ۱- دانشکده فنی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران
 Email: hshayeghi@gmail.com, ghasemi.agm@gmail.com

چکیده: یکی از مهم‌ترین مسائل در سیستم‌های قدرت، تأمین تقاضای مورد نیاز برای انرژی الکتریکی با حداقل هزینه‌های تولید است. این مسئله با در نظر گرفتن قیدهای غیرخطی و تابع هزینه ناصاف دارای پیچیدگی‌های زیادی بوده که باید توسط یک روش بهینه‌سازی با قابلیت پیاده‌سازی ساده و اطمینان بالا حل شود، چراکه به دلیل ماهیت غیرمحدب بودن این مسئله، حل آن با روش‌های ریاضی سخت و بار محاسباتی زیادی به همراه خواهد بود. در این مقاله، مسئله توزیع اقتصادی توان در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز به صورت یک مسئله بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی حل شده است. به منظور اعمال قیود واقعی، تابع ناصاف سینوسی با در نظر گرفتن درجه شیر ورودی و قیدهایی همانند، نرخ افزایش/کاهش تولید، مناطق ممنوعه تولید نیروگاه‌ها، حداکثر و حداقل توان واحدهای تولیدی در مسئله بهینه‌سازی منظور شده است. همچنین وجود مولدهای بادی با در نظر گرفتن میزان سرعت باد در طول یک شبانه‌روز در مسئله توزیع دینامیکی بار در نظر گرفته شده است. در روش پیشنهادی بر اساس هدایت زنبورهای جستجوگر به کمک بهترین پاسخ به دست آمده در هر مرحله، جستجوی کلی^۱ نیز بهبود پیدا نموده است. علاوه بر این، به کمک نظریه آشوب، جستجوی محلی این الگوریتم نیز تقویت شده است. به کمک تکنیک‌های معرفی شده، امکان قرار گرفتن در نقاط محلی کاهش و سرعت همگرایی به پاسخ نهایی افزایش می‌یابد. کارایی روش پیشنهادی برای حل مسئله توزیع بهینه دینامیکی توان روی سیستم‌های نمونه ۱۰، ۳۰، ۵۴ و ۵ نیروگاهی با حضور واحدهای بادی در طول شبانه‌روز بررسی و نتایج آن بر اساس معیارهای عملکرد مناسب، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های دیگر مقایسه شده که نشان‌دهنده کارایی، دقت و سرعت مناسب این الگوریتم در حل مسئله توزیع دینامیکی اقتصادی بار است.

واژه‌های کلیدی: توزیع دینامیکی توان، محدودیت‌های غیرخطی، الگوریتم بهبود یافته زنبور عسل.

Dynamic economic dispatch to meet the energy demand using improved artificial bee colony considering practical constrains

H. Shayeghi¹, Professor, A. Ghasemi¹, Ph.D. Student
 Technical Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
 Email: hshayeghi@gmail.com, ghasemi.agm@gmail.com

Abstract: One of the most important issues in power systems is providing the optimal demand for electrical energy's customers with minimal costs. This goal with non-convex formulation in real-time will be difficult to solve. In this paper, the optimal appropriation of power plants during 24 hours of a day is formulated as an optimization problem which solved by a new modified optimization algorithm. The objective is finding the optimal schedule of the online power plants over a especial time horizon while satisfy the generation unit and ramp-rate constraints. The proposed optimization algorithm work based on the guidance of best solution in the each iteration to enhance searching progress in local and global domains. In addition, by using the chaos theory the local search is enhanced. Also, effect of wind turbine with considering wind speed is investigated in the DED problem solution. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated on 10-unit, 30-unit, 54-unit and 5-unit with wind power system for a period of 24 hours. The simulation results obtained by the proposed MABC algorithm are compared with the available results for other methods in the literature. In terms of solution quality, the proposed algorithm is found to be better compared to other algorithms.

Key words: DED problem, modified artificial bee colony, nonlinear constrains, valve point.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۰۱/۲۲ و ۹۴/۰۳/۰۵ و ۹۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰

نام نویسنده مسئول: حسین شایقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - انتهای خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت الکتریکی یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی محسوب می‌شوند که با رشد روزافزون مصرف انرژی، به پیچیدگی شبکه‌های سراسری برق نیز افزوده شد. در سیستم‌های قدرت یکپارچه، قسمت عمده‌ای از توان موردنیاز توسط نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود. امروزه یکی از مهم‌ترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، توزیع بار بین واحدهای تولید انرژی است، به نحوی که کم‌ترین هزینه را برای نیروگاه‌ها به همراه داشته باشد.

شبکه‌های توزیع برق آخرین زنجیره از سیستم‌های قدرت برای تحویل انرژی از محل تولید به محل مصرف است. بهره‌برداری بهینه از این شبکه‌ها باعث افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم و نیز کاهش قابل توجه تلفات سیستم خواهد شد. شبکه توزیع رابط بین مصرف‌کننده (خانگی، صنعتی، اداری، تجاری، کشاورزی) و سیستم انتقال است. سطح ولتاژ در شبکه‌های توزیع پایین است و در نتیجه اندازه جریان زیاد بوده، بهمن دلیل تلفات اهمی در شبکه‌های توزیع به مراتب مهم‌تر از شبکه‌های انتقال است. هدف اصلی توزیع اقتصادی بار، برنامه‌ریزی تولید واحدهای توزیع‌شده انرژی (DER) است به نحوی که بار موردنیاز شبکه تأمین و هزینه‌های اقتصادی این تولید نیز کمینه شود.

از نظر اقتصادی، هر چه هزینه کل کاهش یابد وضعیت سیستم بهتر است، بنابراین، امروزه تلاش می‌شود که با روش‌های مختلف این هزینه‌ها کاهش یابد. به عبارتی دیگر، در این زمینه روش‌های ریاضی و تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار به کار گرفته شده است. از این دسته می‌توان به روش مرحله‌ای لامبدا [۱]، روش نقطه بهینه [۲]، ضرایب مشارکت [۳] و روش گرادیان [۴] اشاره نمود. اغلب روش‌های ریاضی تکراری هستند که با اینکه جواب نسبتاً دقیقی برای مسئله را به دست می‌دهند، اما محدودیت‌های بسیاری در کاربردهای عملی دارند، از جمله باید مشخصه نرخ افزایش حرارتی واحدها پیوسته باشد. همچنین، در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا با اینکه با این قبیل محدودیت‌ها مواجه نیستند، ولی با افزایش تعداد واحدها زمان و حافظه موردنیاز برای حل مسئله به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۵]. اما در نمونه‌های بر پایه الگوریتم‌های هوشمند علاوه بر مواجه نبودن با محدودیت‌های ذکر شده، زمان و ابعاد حل مسئله تقریباً به صورت خطی با تعداد واحدها افزایش می‌یابد که با وجود رایانه‌های امروزی انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار به نظر می‌رسند [۹-۵]. در مرجع [۶] از یک روش ترکیبی جستجوی قورباغه^۲ و برنامه‌ریزی خطی درجه‌دو برای حل بهینه دینامیکی بار استفاده شده است. در این مدل به کمک برنامه‌ریزی خطی به جستجوی محلی بهبود پیدا کرده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های نمونه مختلف انجام شده و با سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. در مرجع [۷]، از یک الگوریتم توسعه‌یافته آموزش معلم و دانش‌آموز برای حل مسئله استفاده شده است. در این روش

علاوه بر توسعه الگوریتم پیشنهادی بر اساس جستجوی کلی به بررسی اثر سیستم ذخیره انرژی در مسئله بهینه دینامیکی توان پرداخته است. در مرجع [۸] از مدل خود تطبیقی جستجوی هارمونی برای حل مسئله موردنظر استفاده شده است. در حقیقت در این الگوریتم توسعه‌یافته، ضرایب کنترلی به صورت خودتنظیم یافته با تکرارهای برنامه تنظیم می‌شوند. همچنین برای افزایش جستجوی محلی و نهایی، نظریه آشوب بر مبنای لجستیک به کار رفته است. در مرجع [۹] از الگوریتم بهبودیافته باکتری‌ها مبتنی بر معادلات دیفرانسیل برای تعیین بهینه جواب در توزیع اقتصادی بار استفاده شده است. در این مرجع، اثر امنیت شبکه بر روی توزیع اقتصادی بار منظور شده است.

یکی از نقاط ضعف روش‌های پیشین قرار گرفتن در نقاط محلی و عدم حضور جستجوگر کلی قوی در این الگوریتم‌ها است. در این مقاله، برای رفع این نقطه ضعف به ارائه الگوریتم بهبودیافته کلونی مصنوعی زنبور عسل پرداخته شده است. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) توسط کارابوگا در سال ۲۰۰۵ برای بهینه‌سازی ارائه شد، این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی قوی بوده و رفتار کاوشی کلونی زنبورها را برای مسائل بهینه‌سازی بدون محدودیت شبیه‌سازی می‌کند [۱۰]. سادگی در پیاده‌سازی و نتایج موفقیت‌آمیز آن در سایر مقالات دلیل انتخاب الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل در این مقاله شده است. بر این نکته تأکید می‌شود که کارایی یک الگوریتم بستگی بسیاری با نوع و ساختار مسئله دارد و نتایج مطالعات استفاده از الگوریتم ABC در زمینه‌های گوناگون علوم نشان می‌دهد که الگوریتم بسیار موفق‌تری برای حل مسئله بهینه‌سازی است. همچنین سادگی در پیاده‌سازی از ویژگی‌های بارز این الگوریتم است [۱۰].

با وجود موفقیت‌های کسب‌شده توسط الگوریتم کلونی مصنوعی زنبور عسل، همچنان نیاز برای افزایش قابلیت جستجوی محلی و کلی در آن وجود دارد. در این مقاله برای افزایش جستجوی محلی، از نظریه آشوب و برای بهبود جستجوی کلی از هدایت ذرات به کمک بهترین پاسخ در هر مرحله بهره گرفته می‌شود. در حقیقت الهام‌بخش این ایده الگوریتم اجتماع ذرات بوده که با کمک ضریب اجتماعی که مبتنی بر بهترین پاسخ است، به هدایت کلی ذرات می‌پردازد. به کمک هدایت ذرات مبتنی بر بهترین پاسخ، جستجوی کلی الگوریتم به صورت قابل توجهی بهبود بخشیده می‌شود. نهایتاً روش پیشنهادی برای حل مسئله دینامیکی توزیع توان در طول یک شبانه‌روز بر روی یک شبکه تست نمونه اعمال می‌شود. به عبارتی دیگر، در این مقاله تأمین بار در طی ۲۴ ساعت به صورت یک مسئله بهینه‌سازی واقعی در نظر گرفته شده است که در آن قیود فنی نظیر محدودیت در پیچه شیر ورودی، نرخ افزایش/کاهش تولید، مناطق ممنوعه^۳ تولید نیروگاه‌ها، حداکثر و حداقل توان واحدهای تولیدی لحاظ می‌شود. سپس این مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم توسعه‌یافته کلونی زنبور عسل حل خواهد شد. کارایی روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های قدرت نمونه استاندارد ۳۰، ۱۰، ۵۴ و ۵ واحدی با وجود توربین بادی بر اساس معیارهای

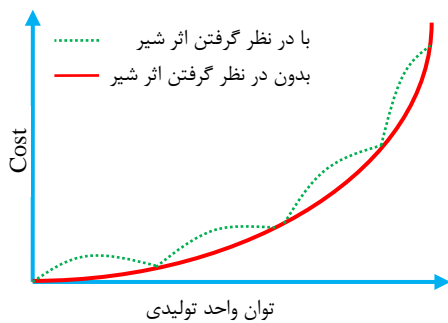
• توازن تولید و مصرف در سیستم

مجموع توان تولیدشده توسط کلیه واحدها در مدار باید با مجموع مصرف سیستم و تلفات آن برابر باشد. یعنی:

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N P_{i,t} - P_{D,t} - P_{loss,t} = 0 \quad (4)$$

تلفات شبکه انتقال (P_{loss}) به ساختار فیزیکی شبکه بستگی دارد و از محاسبات پخش بار یا ماتریس ضرایب تلفات B با رابطه زیر قابل محاسبه است:

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



شکل ۱. تأثیر شیر ورودی بر تابع هزینه

• حدود تولید

قدرت خروجی هر ژنراتور نباید بیش تر از مقدار نامی آن باشد و همچنین نباید کم تر از مقداری باشد که برای بهره برداری پایدار دیگ بخار ضروری است. بنابراین، تولید چنان محدود می شود که در بین دو محدوده از پیش تعیین شده حداقل و حداکثر قرار گیرد. محدوده تولید هر واحد در رابطه زیر باید صدق می نماید:

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (6)$$

حدود فوق، علاوه بر اینکه ناشی از محدودیت های فنی هر واحد می باشند، باعث می شوند تا واحد با هزینه کم تر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیش تر، کم تر از حد مجاز خود تولید نداشته باشد.

• نرخ های افزایشی و کاهششی

به دلایل فنی، نیروگاه های حرارتی نمی توانند 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 محدودیت هایی در شیب افزایش یا کاهش توان تولیدی خود است که تجاوز از این محدودیت ها منجر به خسارت به روتور شده و باعث افزایش هزینه عملکرد می شود. که این محدودیت ها با استفاده از قیود زیر مدل سازی می شوند [۱۲]:

$$P_{i,t}^{\min}(t) \leq P(t)_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max}(t) \quad (7)$$

که در آن $P_{i,t}^{\min}(t) = \max(P_{i,t}(t-1) - RDR_{i,t}, P_{i,t}^{\min})$ نرخ کاهششی نیروگاه) و $P_{i,t}^{\max}(t) = \min(P_{i,t}(t-1) + RUR_{i,t}, P_{i,t}^{\max})$ (نرخ افزایشی نیروگاه) است. به منظور اعمال محدودیت های فوق لازم است تا وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد.

عملکرد مناسب مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج حاصله از الگوریتم پیشنهادی MABC با الگوریتم های دیگر مقایسه شده که نشان دهنده کارایی، دقت و سرعت مناسب این الگوریتم در حل مسئله توزیع اقتصادی بار دینامیکی است. با توجه به توضیحات داده شده می توان نوآوری های مقاله را در بهبود جستجوی محلی الگوریتم بهینه سازی ABC با تئوری آشوب و بهبود جستجوی کلی بر اساس هدایت بهترین جواب در هر مرحله و همچنین مدل سازی قیود عملی در سیستم قدرت بیان نمود.

در ادامه مقاله در بخش های زیر پیگیری می شود: بخش دوم به معرفی مسئله مورد مطالعه، بخش سوم الگوریتم بهبود یافته، بخش چهارم به پیاده سازی و بحث و تحلیل داده ها و بخش آخر به نتیجه گیری اختصاص یافته است.

۲- مدل سازی پخش دینامیکی توان

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیش ترین کارآمدی، کم ترین 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 است. به عبارتی مسئله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه ها به منظور کم کردن هزینه ها تعیین می کند. فرمول بندی آن نیز به عنوان یک مسئله بهینه سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه هایی که بار و تلفات را تأمین می کنند، ارائه می شود. بنابراین مسئله توزیع اقتصادی بار می تواند با بهینه سازی تابع هدف زیر بیان شود [۱۱]:

$$\min \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^N F_{i,t}(P_{i,t}) + \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_{i,t} - P_{D,t} - P_{loss,t} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$F_{i,t}(P_{i,t})$ هزینه سوخت تأمین نیروگاه در ساعت t تعداد ژنراتورهای در حال بهره برداری سیستم و $P_{i,t}$ توان خروجی تأمین ژنراتور در ساعت t است. $P_{D,t}$ تقاضای بار در ساعت t و تلفات شبکه انتقال در ساعت t است. λ ضریب جریمه برای عدم تخطی از قید توازن بین میزان تولید نیروگاه ها و بار است. $F_{i,t}(P_{i,t})$ معمولاً به صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می شود:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (2)$$

در رابطه (۲) a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه تأمین ژنراتور می باشند. برای در نظر گرفتن اثرات موقعیت شیر، توابع سینوسی به شکل زیر به تابع هزینه سوخت واحد تولیدی اضافه می شود:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |e_i \sin(f_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t}))| \quad (3)$$

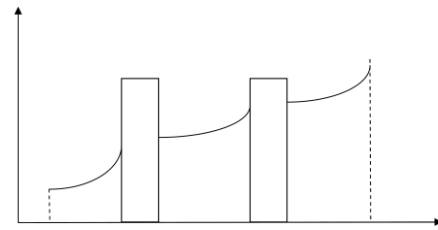
در این رابطه، e_i و f_i ضرایب موقعیت شیر تأمین ژنراتور بوده، بدین ترتیب تابع هزینه بیان شده با معادله (۱) به یک تابع مرکب چند جمله ای و غیر محدب تبدیل می شود (شکل ۱).

• نواحی ممنوعه تولید

نیروگاه‌ها به دلایل فنی نمی‌توانند در برخی از نواحی مابین حداقل و حداکثر تولید خودشان، توان تولید کنند. این نواحی به‌عنوان نواحی ممنوعه نامیده می‌شوند و به‌صورت $[P_{i,j}^L \ P_{i,j}^U]$ مشخص می‌شوند. بدین ترتیب نواحی کار ممکن واحد تولید i ام به شکل زیر بیان می‌شود.

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

که Z_i تعداد زون‌های ممنوعه واحد i ام است. شکل ۲ تأثیر دو منطقه ممنوعه برای یک واحد تولیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تأثیر منطقه ممنوعه بر تابع هزینه

• محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه

سایر محدودیت‌های ناشی از معیارهای قابلیت اطمینان و امنیت شبکه را نیز می‌توان به‌عنوان محدودیت‌های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی در نظر گرفت.

۳- الگوریتم کلونی زنبورعسل

در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی مشابه، روش بهبودیافته پیشنهادی دارای مزایای کلیدی زیر هست:

- این روش برخلاف بسیاری از روش‌های سنتی نیازی به مشتق‌گیری ندارد. در حقیقت عمل مشتقی‌گیری یا گرادیان سبب کند شدن و قرار گرفتن در نقاط محلی می‌شود.
- دارای حساسیت کم‌تری نسبت به ماهیت تابع هدف است، یعنی تحذب یا پیوستگی دارد. به مفهومی دیگر، وابستگی چندانی با سیستم مورد مطالعه نداشته و با افزایش قیود و متغیرهای مسئله کارایی خوبی خواهد داشت.

- در روش پیشنهادی پارامترهای کنترلی الگوریتم کم‌تر و در نتیجه امکان خودتنظیمی آن بیش‌تر شده است. با این تکنیک، وابستگی الگوریتم نسبت به تنظیم دقیق پارامترهای آن کاهش می‌یابد.
- مطابق با نظریه آشوب، دارای قابلیت فرار از نقاط محلی دارد.
- به‌آسانی با عملیات ابتدایی ریاضی و منطقی پیاده‌سازی و برنامه‌ریزی می‌شود.

۳-۱- الگوریتم استاندارد ABC

در این بخش، الگوریتم استاندارد کلونی مصنوعی زنبورعسل به‌صورت خلاصه بیان شده است. برای مطالعه بیش‌تر به مرجع [۱۰] مراجعه شود. شبه‌کد مربوط به الگوریتم پیشنهادی در الگوریتم ۱ برای درک بیش‌تر فراهم شده است.

الگوریتم ۱: الگوریتم استاندارد ABC

۱. مقداردهی اولیه به‌عنوان جواب‌های اولیه X_{ij}
۲. محاسبه جواب‌های اولیه در تابع هدف
۳. تکرار اولیه cycle=1
۴. فراهم کردن پاسخ‌های جدید بر اساس یافتن منبع تغذیه جدید V_{ij} در همسایگی X_{ij}
برای تولید جواب‌های جدید از فرمول زیر استفاده می‌شود:

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

که در این فرمول k جواب به‌دست‌آمده در همسایگی از i و ϕ یک عدد تصادفی بین (۰،۱) است.

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

برای تعیین شایستگی جواب‌ها از فرمول زیر استفاده می‌شود:

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

جواب‌های P_i بین (۰،۱) است.

۷. تولید پاسخ‌های جدید (منابع جدید) V_i بر اساس زنبورهای تماشاگر از پاسخ‌های X_i و تعیین میزان احتمال آن‌ها P_i .
۸. انتخاب بهترین پاسخ (پرخورترین 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 $x_{ij} = \min_j + rand(0,1) \times (\max_j - \min_j)$.
۱۰. ذخیره کردن بهترین جواب (منبع تغذیه باکیفیت) که تا این مرحله به دست آمده است.
۱۱. Cycle=Cycle+1
۱۲. تکرار مراحل ۴-۱۱ تا رسیدن به شرط پایان برنامه.

۳-۲- الگوریتم بهبودیافته کلونی زنبورعسل

همان‌گونه که قبلاً اشاره شده، الگوریتم کلونی زنبورعسل دارای قابلیت‌های بالا در بهبود جستجوی محلی و کلی در ترکیب شدن با سایر روش‌های ریاضی است. فلوجارت الگوریتم کلونی زنبورعسل بهبودیافته پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است. در روش پیشنهادی دو مرحله بهبود در نظر گرفته شده است. قسمت اول برای جستجوی محلی و قسمت دوم برای جستجوی کلی است.

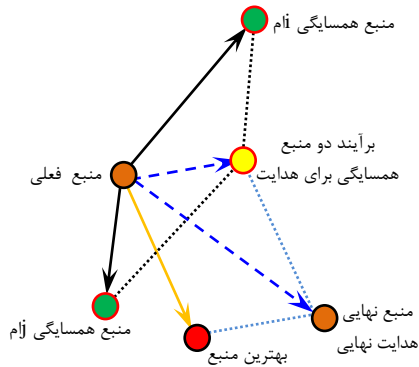
۳-۲-۱- نظریه آشوب

در قسمت اول از نظریه آشوب استفاده شده به این صورت که ذرات به کمک رابطه زیر ارتقا می‌یابند:

بهرتر ذرات در یافتن پاسخ نهایی معادله (۱۲) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$V_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{k,j}) + \lambda_{ij}(y_i - x_{ij}) \quad (15)$$

همان گونه که در معادله (۱۵) نشان داده شده است با استفاده از هدایت الگوریتم اجتماع ذرات در y_i ، در این الگوریتم پاسخها بر اساس بهترین پاسخ هدایت خواهند شد که جستجوی کلی الگوریتم را بهبود می بخشد. در این رابطه، λ_{ij} یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت است. شکل ۳ جستجوی کلی با همسایگی نام را نشان می دهد.



شکل ۳: ارتقا و هدایت پاسخها بر اساس جستجوی کلی

$$c_d^{s+1} = \mu_d^s (1 - c_d^s), 0 \leq c_0 \leq 1 \quad (12)$$

که در آن، s برابر با ۰، ۱ و ... بوده و ضریب لجستیک (μ) برابر با ۴ است. c ذره آشوبناک در مرحله s ام است. به عبارتی دیگر، ضرایب آشوبناک متناسب با محدوده تعیین شده و تعداد متغیر (Ng)، به صورت زیر تولید می شوند:

$$X_{cls}^0 = [X_{cls,0}^1, X_{cls,0}^2, \dots, X_{cls,0}^{Ng}]_{1 \times Ng}$$

$$cx_0 = [cx_0^1, cx_0^2, \dots, cx_0^{Ng}] \quad (13)$$

$$cx_0^j = \frac{X_{cls,0}^j - P_{j,\min}}{P_{j,\max} - P_{j,\min}}, j = 1, 2, \dots, Ng$$

در این رابطه:

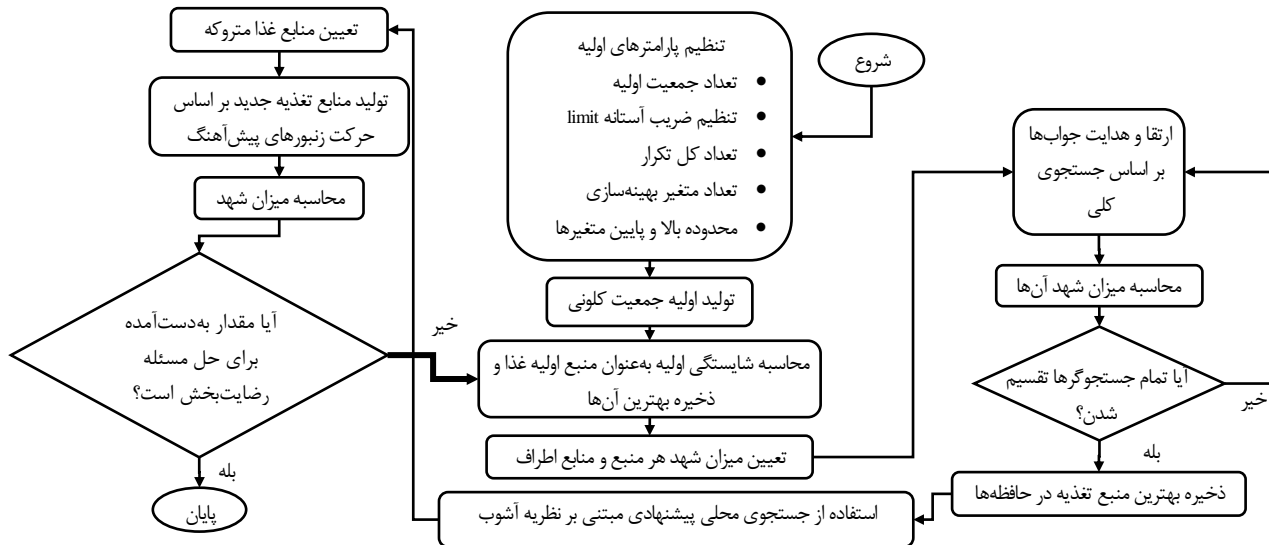
$$X_{cls}^i = [X_{cls,i}^1, X_{cls,i}^2, \dots, X_{cls,i}^{Ng}]_{1 \times Ng}, i = 1, 2, \dots, N_{chaos}$$

$$x_{cls,i}^j = cx_{i-1}^j \times (P_{j,\max} - P_{j,\min}) + P_{j,\min}, j = 1, 2, \dots, Ng \quad (14)$$

در این رابطه، X_{cls}^0 مکان به دست آمده اولیه برای متغیر آشوب است. $P_{j,\max}$ و $P_{j,\min}$ به ترتیب مقدار پایین و بالایی برای متغیر آشوبناک بوده و N_{chaos} تعداد متغیرهای آشوبناک است.

۲-۲-۳- جستجوی کلی

برای افزایش جستجوی کلی در الگوریتم پیشنهادی از اطلاعات به دست آمده بهترین پاسخ y_i استفاده می شود. در حقیقت برای هدایت



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,N} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{T,1} & P_{T,2} & \dots & P_{T,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

در این رابطه، $P_{i,t}$ مقدار تولیدی واحد نام در دوره زمانی t است که می تواند به کمک رابطه زیر محاسبه بشود.

$$P_{i,t} = P_{i,\min} + rand \times (P_{i,\max} - P_{i,\min}), \begin{cases} i = 1, 2, \dots, N \\ t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (17)$$

۴- پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

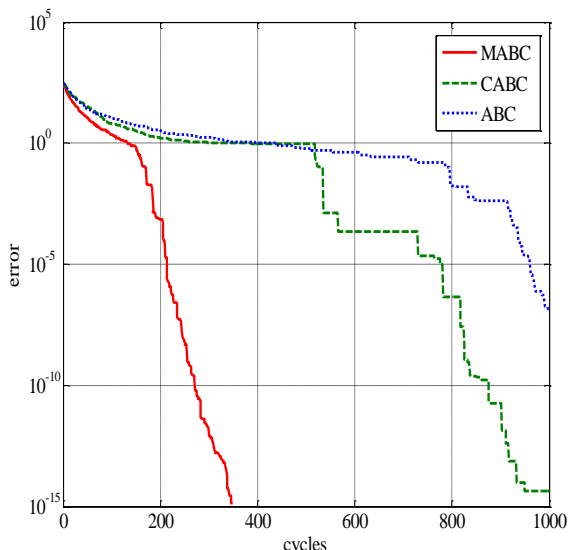
در این بخش، نحوه حل مسئله توزیع اقتصادی دینامیکی توان به کمک الگوریتم پیشنهادی بیان می شود. در حقیقت برای حل مسئله گام های زیر باید پیگیری شود:

گام اول. تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم پیشنهادی از جمله تعداد جمعیت، $limit$ و تعداد تکرار برنامه، تولید جمعیت اولیه، فراخوانی اطلاعات سیستم مورد مطالعه و قرار دادن محدودیت های وارده بر سیستم. جمعیت اولیه در دوره زمانی T با تعداد N واحد به صورت زیر تولید می شود:

هدف معرفی شده در معادله (۱۸)، نحوه همگرایی برای دو الگوریتم پیشنهادی و استاندارد در شکل ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده است. همان گونه که از شکل‌ها و نتایج به دست آمده در جدول ۲ برای انحراف معیار مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی به مراتب بهتر عمل نموده است. همچنین همگرایی با تکرارهای کم‌تر نشان از سرعت بالای این الگوریتم است.

جدول ۲: مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی و استاندارد

معیار مقایسه	تعداد متغیر	محدوده	الگوریتم	نتایج
انحراف معیار	۱۰	[-۳،۳]	ABC	$1/04 \times 10^{-7}$
			CABC	$2/64 \times 10^{-13}$
			MABC	۰/۰۰
میانگین	۱۰	[-۳،۳]	ABC	$8/12 \times 10^{-11}$
			CABC	$8/67 \times 10^{-7}$
			MABC	۰/۰۰
تکرار همگرایی	۱۰	[-۳،۳]	ABC	> ۲۰۰۰
			CABC	> ۱۰۰۰
			MABC	< ۱۰۰۰



شکل ۵: نحوه همگرایی الگوریتم پیشنهادی (MABC) و الگوریتم مبتنی بر جستجوی آشوب (CABC) استاندارد کلونی مصنوعی زنبور عسل (ABC) برای تابع نامقید سینوسی با در نظر گرفتن ۱۰ متغیر

۵-۲- سیستم ۱۰ واحدی

در این بخش سیستم مورد مطالعه معرفی و اطلاعات مورد نظر داده می‌شود. سیستم مورد مطالعه یک سیستم استاندارد ۱۰ واحدی در طول یک شبانه‌روز است. میزان تقاضا در یک دوره ۲۴ ساعته در جدول ۳ و اطلاعات و ضرایب برای تابع هزینه و محدودیت وارده در جدول ۴ و در جدول ۵ ضرایب محاسبه ماتریس تلفات داده شده است. سایر اطلاعات این سیستم از جمله مناطق ممنوعه از مرجع [۸] قابل دریافت است.

گام دوم. اعمال محدودیت‌های وارده بر مسئله بهینه‌سازی و محاسبه برازندگی پاسخ‌های اولیه و مرتب نمودن آن‌ها بر اساس حداقل‌سازی تابع هزینه.

گام سوم. انتخاب بهترین پاسخ از مجموعه پاسخ موجود و ذخیره‌سازی آن در حافظه به منظور ارتقا نسل‌های بعدی.

گام چهارم. ارتقا پاسخ‌ها بر اساس معادله (۱۵) و محاسبه برازندگی آن‌ها و انتخاب بهترین پاسخ.

گام پنجم. مقایسه بهترین پاسخ با پاسخ ذخیره شده در حافظه. اگر این پاسخ از پاسخ موجود در حافظه بهتر باشد جایگزین آن می‌شود در غیر این صورت همان مقدار قبلی در حافظه ذخیره می‌شود.

گام ششم. ارتقا پاسخ‌ها بر اساس معادله آشوب لجستیک (۱۲) و انجام عملیات مشابه به گام چهارم.

گام هفتم. جایگزین نمودن بدترین مجموعه پاسخ به دست آمده با پاسخ‌های تصادفی جدید و استفاده از جستجوی آشوب برای یافتن بهترین پاسخ در هر فضای جستجوی محلی.

گام هشتم. آیا شرط خاتمه تکمیل شده است، اگر بله خروج از برنامه و نمایش دادن اطلاعات، در غیر این صورت رفتن به گام سوم.

فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۵-۱- پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

به منظور تعیین بهترین ضرایب تنظیمی در الگوریتم پیشنهادی آزمایش‌های مختلف بر روی توابع آزمون مختلف انجام گرفته است. بر اساس نتایج حاصله، بهترین ضرایب انتخابی در جدول ۱ ذکر شده است. همچنین به منظور نشان دادن برتری روش پیشنهادی و علت انتخاب آن در حل مسئله توزیع اقتصادی توان، با سایر روش‌ها از جمله الگوریتم استاندارد کلونی مصنوعی زنبور عسل مقایسه صورت می‌گیرد.

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۶۰
limit	۱۰۰
تعداد اجرا	۱۰
تعداد تکرار برنامه	۲۰۰۰
خطای مورد نظر	10^{-20}

تابع هدف مورد مطالعه، تابع نامقید سینوسی یا راسریگین مطابق رابطه (۱۸) است. این تابع با توجه به کارگیری تابع کسینوس در آن دارای نقاط محلی بسیار زیادی است.

$$f(x) = 20 + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x_i)), -3 \leq x_i \leq 3 \quad (18)$$

شبیه‌سازی برای این تابع در دو حالت انجام گرفته است. در حالت اول، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی (بعد مسئله) برابر با ۱۰ است. برای تابع

جدول ۳: تقاضا موردنیاز در یک دوره ۲۴ ساعته

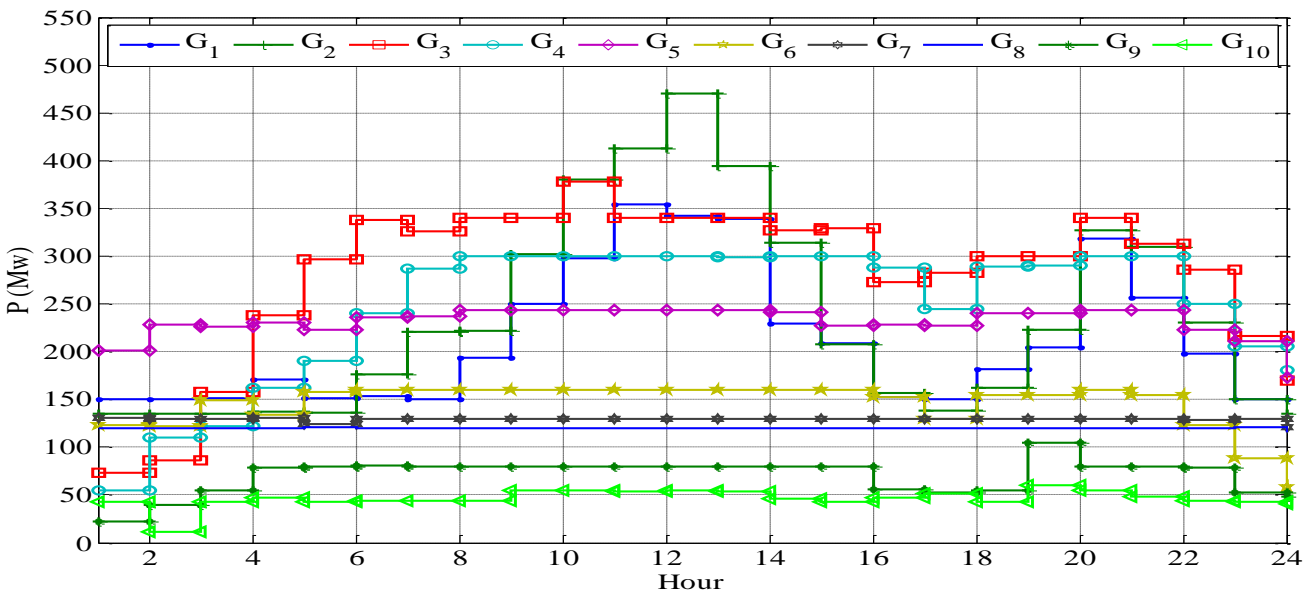
Hour	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
Demand	۱۰۳۶	۱۱۱۰	۱۲۵۸	۱۴۰۶	۱۴۸۰	۱۶۲۸	۱۷۰۲	۱۷۷۶	۱۹۲۴	۲۰۲۲	۲۱۰۶	۲۱۵۰
Hour	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
Demand	۲۰۷۲	۱۹۲۴	۱۷۷۶	۱۵۵۴	۱۴۸۰	۱۶۲۸	۱۷۷۶	۱۹۷۲	۱۹۲۴	۱۶۲۸	۱۳۳۲	۱۱۸۴

جدول ۴: اطلاعات سیستم مورد مطالعه برای تابع هزینه و محدودیت های عملی

Unit	Pmin	Pmax	a	b	c	d	e	UR	DR
۱	۱۵۰	۴۷۰	۰/۱۵۲۴	۳۸/۵۳۹۷	۷۸۶/۷۹۸۸	۴۵۰	۰/۰۴۱	۸۰	۸۰
۲	۱۳۵	۴۷۰	۰/۱۰۵۸	۴۶/۱۵۹۱	۴۵/۳۲۵۱	۶۰۰	۰/۰۳۶	۸۰	۸۰
۳	۷۳	۳۴۰	۰/۰۲۸۰	۴۰/۳۹۶۵	۱۰۴۹/۹۹۷۷	۳۲۰	۰/۰۲۸	۸۰	۸۰
۴	۶۰	۳۰۰	۰/۰۳۵۴	۳۸/۳۰۵۵	۱۲۴۳/۵۳۱۱	۲۶۰	۰/۰۵۲	۵۰	۵۰
۵	۷۳	۲۴۳	۰/۰۲۱۱	۳۶/۳۲۷۸	۱۶۵۸/۵۶۹۶	۲۸۰	۰/۰۶۳	۵۰	۵۰
۶	۵۷	۱۶۰	۰/۰۱۷۹	۳۸/۲۷۰۴	۱۳۵۶/۶۵۹۲	۳۱۰	۰/۰۴۸	۵۰	۵۰
۷	۲۰	۱۳۰	۰/۰۱۲۱	۳۶/۵۱۰۴	۱۴۵۰/۷۰۴۵	۳۰۰	۰/۰۸۶	۳۰	۳۰
۸	۴۷	۱۲۰	۰/۰۱۲۱	۳۶/۵۱۰۴	۱۴۵۰/۷۰۴۵	۳۴۰	۰/۰۸۲	۳۰	۳۰
۹	۲۰	۸۰	۰/۰۱۹۰	۳۹/۵۸۰۴	۱۴۵۵/۶۰۵۶	۲۷۰	۰/۰۹۸	۳۰	۳۰
۱۰	۱۰	۵۵	۰/۱۲۹۵	۴۰/۵۴۰۷	۱۴۶۹/۴۰۲۶	۳۸۰	۰/۰۹۴	۳۰	۳۰

جدول ۵: ضرایب ماتریس تلفات

۰/۰۰۰۰۴۹	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۲۰
۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۸
۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۳۹	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۶
۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۴۰	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۵
۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶
۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۵
۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۳۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۸
۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۴۰	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶
۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۱۹
۰/۰۰۰۰۲۰	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۴۴



شکل ۶: نتایج به دست آمده برای سیستم ۱۰ واحدی در دوره ۲۴ ساعته

الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم ۱۰ واحدی معرفی شده اعمال شده است. همان گونه که قبلاً بیان شده است هدف کم کردن هزینه برای سیستم است. نتایج حاصل از شبیه سازی برای دوره ۲۴ ساعت در شکل ۶ و در جدول ۶ آورده شده است.

الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم ۱۰ واحدی معرفی شده اعمال شده است. همان گونه که قبلاً بیان شده است هدف کم کردن هزینه برای سیستم است. نتایج حاصل از شبیه سازی برای دوره ۲۴ ساعت در شکل ۶ و در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: نتایج به دست آمده برای سیستم ۱۰ واحدی در دوره ۲۴ ساعته

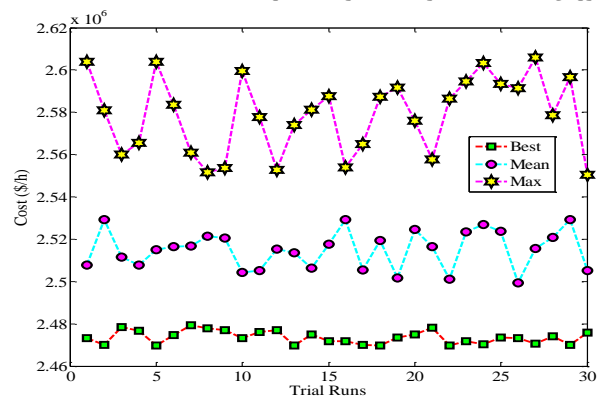
Hour	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
۱	۱۵۰/۰۲	۱۳۵/۰۰	۷۳/۵۲	۵۴/۳۸	۲۰۱/۳۲	۱۲۳/۰۱	۱۳۰/۵۰	۱۱۹/۶۲	۲۲/۰۹	۴۳/۲۳
۲	۱۵۰/۶۱	۱۳۵/۰۰	۸۵/۷۳	۱۱۰/۰۰	۲۲۷/۹۲	۱۲۲/۳۹	۱۲۹/۲۷	۱۲۰/۰۰	۴۰/۰۰	۱۱/۷۸
۳	۱۵۱/۳۹	۱۳۵/۰۰	۱۵۷/۴۶	۱۲۱/۵۳	۲۲۶/۳۵	۱۴۸/۸۵	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۵۵/۰۰	۴۳/۰۰
۴	۱۷۰/۳۹	۱۳۷/۵۸	۲۳۸/۳۷	۱۶۲/۱۱	۲۲۹/۹۹	۱۳۴/۴۰	۱۳۰/۵۹	۱۱۹/۵۸	۷۸/۸۲	۴۷/۰۰
۵	۱۵۱/۱۳	۱۳۶/۴۹	۲۹۶/۶۹	۱۹۰/۱۵	۲۲۳/۰۰	۱۵۸/۰۰	۱۲۴/۰۰	۱۲۰/۴۴	۸۰/۰۰	۴۳/۰۰
۶	۱۵۳/۵۱	۱۷۶/۲۸	۳۳۸/۰۰	۲۴۰/۰۰	۲۳۶/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۴۵	۴۴/۰۰
۷	۱۵۰/۵۲	۲۲۰/۳۶	۳۲۶/۲۹	۲۸۷/۰۰	۲۳۷/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۰۰	۴۴/۰۰
۸	۱۹۴/۱۲	۲۲۲/۲۶	۳۴۰/۱۵	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۴۱	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۰۰	۴۴/۰۰
۹	۲۵۰/۰۱	۳۰۲/۵۳	۳۴۰/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۰۰	۵۵/۰۰
۱۰	۲۹۷/۶۱	۳۷۹/۸۰	۳۷۸/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۵۵/۰۰
۱۱	۳۵۴/۱۲	۴۱۳/۰۰	۳۴۰/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۵۴/۰۰
۱۲	۳۴۲/۰۶	۴۷۰/۰۰	۳۴۰/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۵۵/۰۰
۱۳	۳۳۸/۶۲	۳۹۳/۸۰	۳۴۰/۰۰	۲۹۹/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۵۴/۰۰
۱۴	۲۲۹/۰۱	۳۱۴/۵۳	۳۲۷/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۱/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۴۶/۰۰
۱۵	۲۰۹/۱۳	۲۰۸/۲۶	۳۲۹/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۲۷/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۰۰	۴۳/۰۰
۱۶	۱۵۱/۹۴	۱۵۷/۲۴	۲۷۲/۹۴	۲۸۸/۴۴	۲۲۸/۰۰	۱۵۲/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۵۶/۰۰	۴۷/۰۰
۱۷	۱۵۰/۵۵	۱۳۸/۵۲	۲۸۲/۸۹	۲۴۵/۰۰	۲۲۷/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۳۰/۱۶	۱۲۰/۰۰	۵۲/۱۲	۵۱/۳۶
۱۸	۱۸۱/۴۸	۱۶۲/۶۸	۳۰۰/۰۰	۲۸۹/۰۵	۲۴۰/۰۰	۱۵۴/۴۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۵۵/۰۰	۴۳/۰۰
۱۹	۲۰۴/۱۳	۲۲۳/۲۶	۳۰۰/۰۰	۲۹۰/۰۰	۲۴۰/۰۰	۱۵۵/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۱۰۵/۰۰	۶۰/۰۰
۲۰	۳۱۸/۶۲	۳۲۶/۷۹	۳۴۰/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۶۰/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۱۹/۵۸	۸۰/۰۰	۵۵/۰۰
۲۱	۲۵۷/۰۱	۳۰۹/۵۳	۳۱۳/۰۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۳/۰۰	۱۵۵/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۰۰	۸۰/۰۰	۴۸/۰۰
۲۲	۱۹۸/۲۰	۲۳۰/۲۳	۲۵۸/۵۶	۲۵۰/۰۰	۲۲۳/۰۰	۱۲۳/۰۰	۱۲۹/۰۰	۱۲۰/۰۰	۷۹/۰۰	۴۴/۰۰
۲۳	۱۵۰/۱۹	۱۵۰/۰۰	۲۱۶/۳۵	۲۰۵/۸۹	۲۱۱/۰۲	۸۸/۰۰	۱۳۰/۰۰	۱۲۰/۶۵	۵۲/۰۹	۴۳/۲۱
۲۴	۱۵۰/۰۶	۱۳۵/۰۰	۱۷۰/۰۲	۱۸۰/۰۹	۱۷۳/۴۳	۵۸/۴۶	۱۲۰/۹۶	۱۱۵/۳۵	۴۸/۰۶	۴۰/۸۸
Result	Total cost: ۲۴۶۹۳۹۰/۰۰۹					Total power loss: ۱۲۸۷/۱۷				

به منظور نشان دادن انحراف معیار روش پیشنهادی ۳۰ بار مختلف اجرا و مقدار حداقل، حداکثر و میانگین آن در جدول ۷ و شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین همگرایی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که از نتایج ارائه شده در جداول زیر مشخص است، استفاده از روش پیشنهادی بهبود معتناهایی در پاسخ های مسئله ایجاد کرده است. همچنین از شکل ۸ مشخص است الگوریتم پیشنهادی بعد از تکرار ۷۰۰ توانسته به جواب نهایی خود همگرا شود.

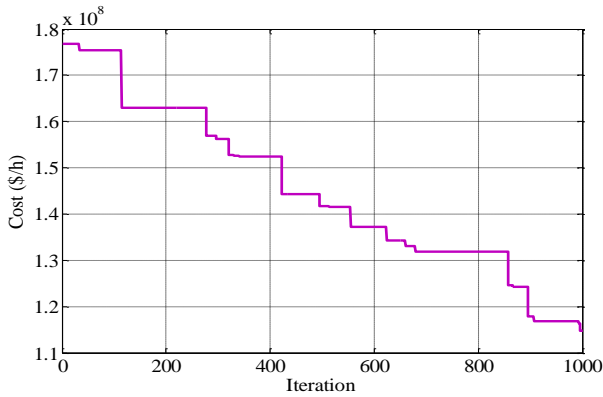
جدول ۷: نتیجه مقدار حداقل، حداکثر و میانگین برای سیستم ۱۰ واحدی

Method	Cost (\$/h)		
	Min	Mean	Max
IBFA [14]	۲/۴۸۱۷×۱۰ ^۶	NA	۲/۶۱۴۳×۱۰ ^۶
RCGA/NSGA-II [13]	۲/۵۱۶۸×۱۰ ^۶	NA	۲/۶۵۶۳×۱۰ ^۶
Proposed method	۲/۴۶۹۳×۱۰ ^۶	۲/۴۹×۱۰ ^۶	۲/۶۱۵۳×۱۰ ^۶

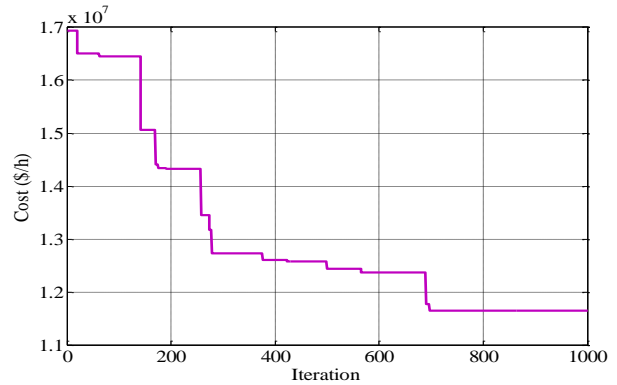
حال به منظور مقایسه نتایج به دست آمده و نشان دادن کارایی بهتر روش پیشنهادی در حل مسئله دینامیکی توان نتایج به دست آمده برای هزینه و تلفات با روش های [13] RCGA/NSGA-II و [14] IBFA مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین هزینه برای روش IBFA برابر ۲۴۸۱۷۳۳/۲۵۷ و برای روش RCGA/NSGA-II برابر با ۲۵۱۶۸۰۰ است؛ که نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب حدود ۰/۵ و ۱/۸ درصد بهبود یافته است. همچنین تلفات به دست آمده از روش پیشنهادی ۱۲۸۷/۱۷ مگاوات بوده که در مقایسه با روش IBFA به اندازه ۰/۶ درصد بهبود یافته است.



شکل ۷: تغییرات مقدار کمینه، بیشینه و میانگین به ازای ۳۰ اجرا مختلف



شکل ۹: روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۳۰ ماشینه



شکل ۸: روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۱۰ ماشینه

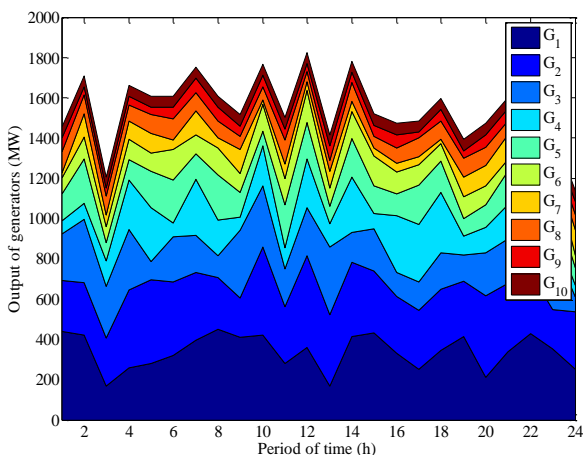
۵-۲- سیستم ۳۰ واحدی

همچنین میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های به‌دست‌آمده در اجراهای متعدد برنامه، در حد قابل قبولی بوده و کارایی روش را برای کاربردهای بعدی نشان می‌دهد. با توجه به زمان اندک لازم برای اجرای الگوریتم، می‌توان از آن برای توزیع بار اقتصادی که بر مبنای پیش‌بینی بار و معمولاً در بازه‌های چندین دقیقه‌ای یا real-time انجام می‌یابد، استفاده کرد. همچنین از آنجا که روش پیشنهادی در زمان کوتاه‌تری نمی‌تواند به جواب بهتری برسد، بنابراین قدرت تصمیم‌گیری برای محدودیت‌های نرخ بالا و پایین افزایش خواهد یافت.

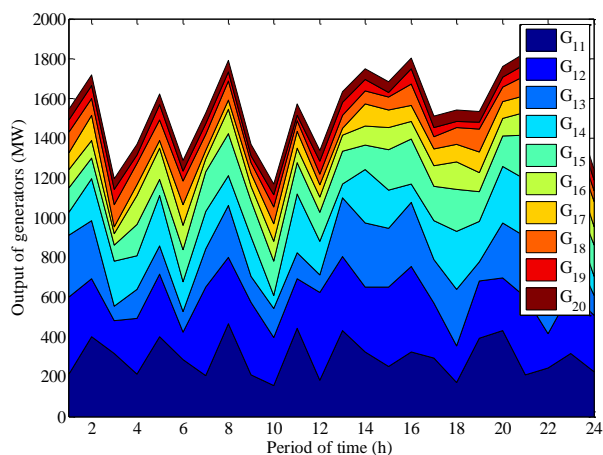
همچنین به‌منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی بر روی یک سیستم با ابعاد بیشتر، با در نظر گرفتن سه دسته سیستم ۱۰ واحدی، سیستم ۳۰ واحدی تشکیل یافته است. با این عمل سیستم بزرگ‌تر و قیود وارد بر آن به‌مراتب بیش‌تر خواهد بود. روش پیشنهادی مطابق با قسمت قبل اجرا و نتیجه حاصله در جدول ۸ آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با روش‌های DE^[۱۵]، EP-SQP^[۱۶]، IPSO^[۱۷]، DEmethod3^[۱۵] و CDBCO^[۱۸] مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از کارایی بهتر الگوریتم پیشنهادی دارد.

جدول ۸: نتیجه سیستم ۳۰ واحد مورد مطالعه

Method	Best costs (x10 ⁶ \$)	Average costs (x10 ⁶ \$)	CPU time (min)
DE	۳/۱۶۳۰	۳/۱۷۳۱	۰/۵۲
EP-SQP	۳/۱۵۹۲	۳/۱۶۹۱	۱۲۷/۲۷
IPSO	۳/۰۹۰۶	۳/۰۹۶۹	۰/۱۷
CDE method3	۳/۰۸۳۹	۳/۰۹۰۵	۰/۶۷
CDBCO	۳/۰۸۱۴	۳/۰۸۸۵	۱/۳
Proposed	۳/۰۸۱۱	۳/۰۰۳۱	۱/۲۹



شکل ۱۰: خروجی واحد ۱۰ الی ۳۰ برای سیستم ۳۰ واحدی



شکل ۱۱: خروجی واحد ۱۱ الی ۲۰ برای سیستم ۳۰ واحدی

همچنین همگرایی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار تولید واحدهای نیروگاهی در شکل ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از جداول و شکل‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در پیدا کردن پاسخ بهینه از سایر روش‌های ذکر شده موفق‌تر بوده است. این نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی نزدیک‌ترین جواب با روش CDBCO داشته که آن‌هم از خانواده الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت است. در مقایسه با روش DE روش‌های مبتنی بر جمعیت توانایی بالاتری از خود نشان داده‌اند. تولید در واحد اول در مقدار مرزی قرار دارد و هزینه کل تولید به‌دست‌آمده در این روش از سایر روش‌ها کم‌تر است در حالی که تلفات شبکه انتقال به مقدار قابل توجهی کم‌تر از سایر روش‌ها است. زمان اجرای روش به الگوریتم، ساختار رایانه مورد استفاده و کارایی کدنویسی برنامه وابسته است. در عین حال اجراهای متعدد روش پیشنهاد شده، نشان‌دهنده زمان اجرای قابل مقایسه با سایر روش‌ها (در حدود چند ثانیه) است.

بهینه منابع تولید انرژی با حضور سیستم‌های بادی می‌پردازیم. سیستم مورد مطالعه شامل یک واحد نیروگاهی IG^6 هست. در شکل ۱۴ ساختار سیستم مورد مطالعه با مقادیر مقاومت و راکتانس آن‌ها در جدول ۹ است. سایر اطلاعات در مرجع [۲۱] داده شده است. پره‌های توربین بادی، انرژی موجود جریان هوای در حال حرکت را جذب می‌کنند. سپس این انرژی به انرژی چرخشی تبدیل شده و توسط واحد محرکه به روتور ژنراتور الکتریکی تحویل داده می‌شود. انرژی جنبشی توده هوای به جرم m که با سرعت v_w در حال حرکت است برابر خواهد بود با:

$$E_w = 0.5 \times m \times v_w^2 \quad (19)$$

توان جریان هوای متحرک، با فرض ثابت بودن سرعت باد با رابطه زیر بیان می‌شود:

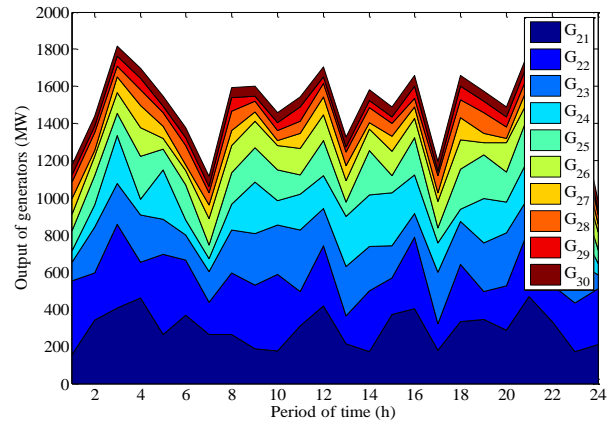
$$P_w = \frac{dE_w}{dt} = 0.5 \times m \times v_w^2 \quad (20)$$

که در آن m نرخ شارش جرم بر زمان است. زمانی که هوا از سطح مقطع A عبور می‌کند (سطح جاروب پره‌های توربین)، توان جریان هوا را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$P_w = 0.5 \times \rho \times A \times v_w^3 \quad (21)$$

جدول ۹: اطلاعات سیستم مورد مطالعه با در نظر گرفتن سیستم بادی

	SG	IG
P(pu)	۱	۰/۱
V(pu)	۱/۰۳	۱
Q(pu)	۰/۳۳۴	۰/۰
E_{in} (pu)	۱/۸۰۳	---
T_m (pu)	۱/۰۰۳	---
Load angle(deg)	۵۰/۷۱	---
Slip	۰/۰	%-۱/۰۹
V_w (m/s)	---	۱۱/۷۹
(deg) β	---	۰/۰



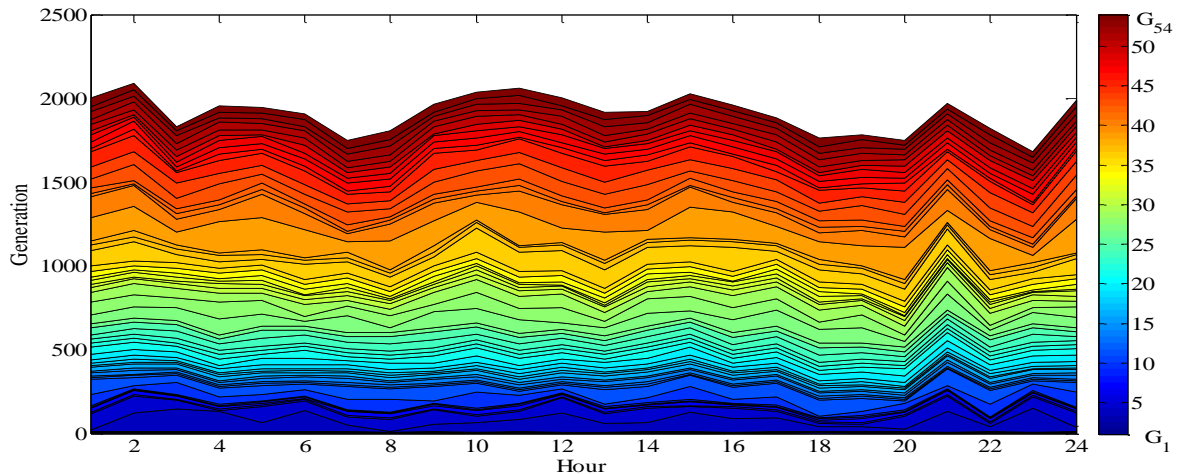
شکل ۱۲: خروجی واحد ۲۱ الی ۳۰ برای سیستم ۳۰ واحدی

۳-۵- سیستم ۵۴ واحدی

به منظور مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های انجام گرفته برای یک سیستم مقیاس بزرگ، شبکه ۱۱۸ با سه استاندارد با ۵۴ واحد تولیدی انتخاب شده است. داده‌های این سیستم از مرجع [۱۷] قابل استخراج است. همچنین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با روش‌های استعماری، اجتماع ذرات و الگوریتم ژنتیک از مرجع [۱۸] مقایسه شده است. بهترین جواب به دست آمده از روش استعماری^{۱۵} برابر با $18070811/174$ \$/day و این مقدار برای الگوریتم‌های اجتماع ذرات و ژنتیک برابر با $1834373/494$ \$/day و $832121/861$ \$/day است. در روش پیشنهادی بهترین پاسخ به دست آمده برابر با $1747614/69$ \$/day است که در مقایسه با بهترین جواب از مرجع [۱۸] به مقدار 59466 دلار کاهش هزینه داشته‌ایم که نشان از بهبود $3/2$ درصدی در میزان کل هزینه داشته است. میزان تولید واحدهای نیروگاهی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. محور افقی در شکل طول مدت یک شبانه‌روز است.

۴-۵- توزیع اقتصادی بار در نظر گرفتن انرژی باد

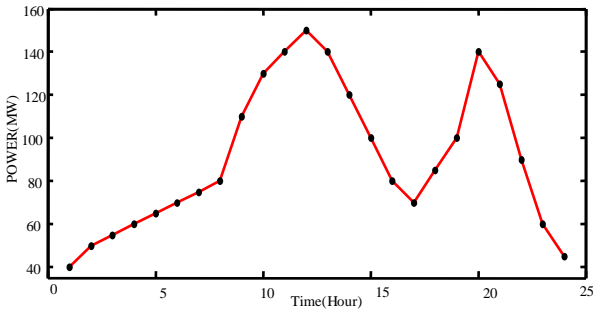
مدیریت انرژی به منظور کاهش هزینه‌ها و استفاده بهینه از سیستم‌های موجود می‌تواند یکی از راه‌ها مهم در استفاده از منابع تولید پاک باشد [۱۹-۲۲]. در این قسمت به مدیریت و یا برنامه‌ریزی



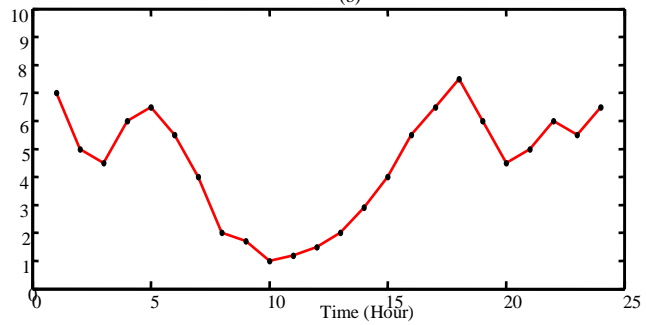
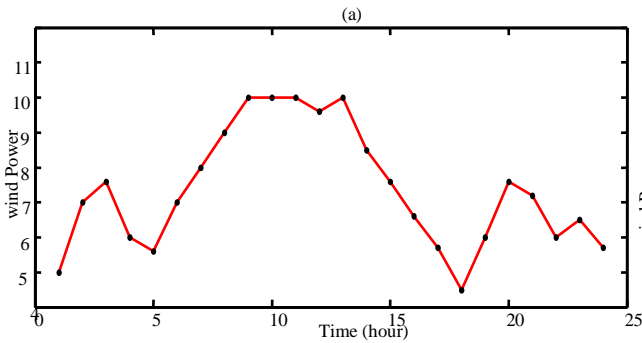
شکل ۱۳. خروجی واحدهای تولیدی برای سیستم استاندارد ۱۱۸ با سه واحد نیروگاهی

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} \quad (22)$$

بیشترین مقدار C_p به صورت تئوری، برابر با 0.593 ($C_p=16/27$) است. در این سیستم از سه ژنراتور سنکرون SG^V و دو واحد IG به صورت اتصال با شبکه در نظر گرفته شده است. میزان تقاضا برای ۲۴ ساعت و انرژی‌های باد برای واحدهای $IG1$ و $IG2$ به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

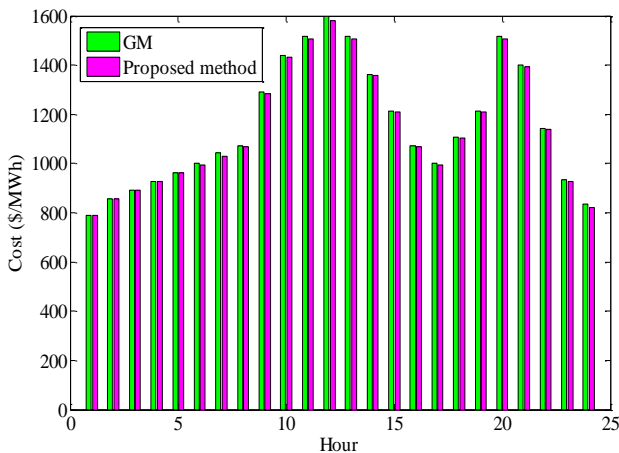


شکل ۱۵: تغییرات تقاضا در دوره ۲۴ ساعت

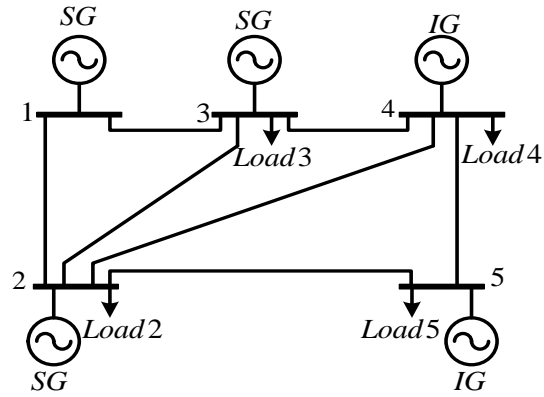


شکل ۱۶: تغییرات توان توربین‌های بادی برای واحدهای شماره ۱ (نمودار سمت چپ) و واحد شماره ۲ (نمودار سمت راست)

شکل ۱۷: خروجی بهینه به دست آمده از واحدهای نیروگاهی به کمک روش پیشنهادی بدون حضور مولدهای بادی



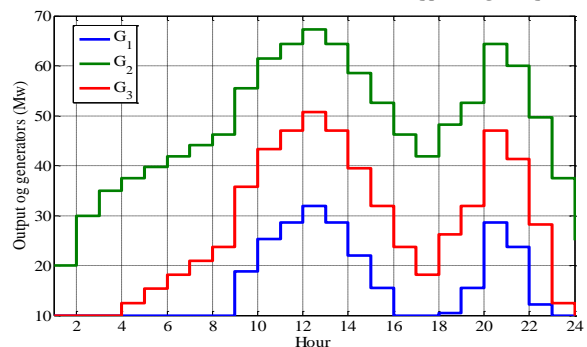
شکل ۱۸: مقایسه هزینه به دست آمده برای طول یک شبانه‌روز بدون حضور مولدهای بادی



شکل ۱۴: ساختار سیستم قدرت با در نظر گرفتن سیستم بادی

که در آن چگالی هوا است. چگالی هوا با فشار و دما تغییر می‌کند و در این پروژه $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ثابت در نظر گرفته شده است. تمام توان موجود در جریان هوا نمی‌تواند توسط توربین بادی جذب شود. نسبت توان مکانیکی کسب شده توسط توربین بادی به توان توده هوا، ضریب توان (C_p) نامیده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

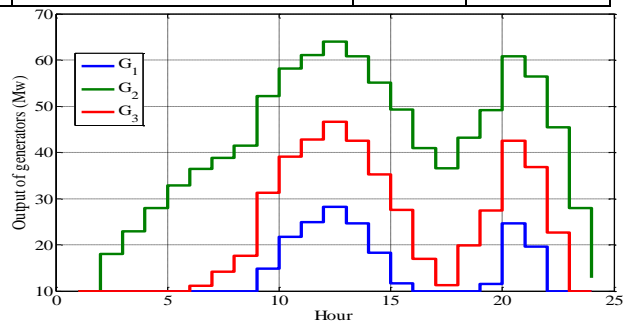
برای مقایسه عملکرد سیستم قدرت، یک بار بدون حضور منابع تولید انرژی پخش بار بهینه در طول یک شبانه‌روز انجام گرفته است و هزینه‌های به دست آمده از روش پیشنهادی با روش گرادیان (GM^{18}) از مرجع [۲۱] به عنوان یک روش غیرتصادفی مقایسه شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی برای توزیع اقتصادی توان در شکل ۱۷، جدول ۱۰ و مقایسه بین هزینه‌های به دست آمده از روش پیشنهادی و GM در شکل ۱۸ آورده شده است.



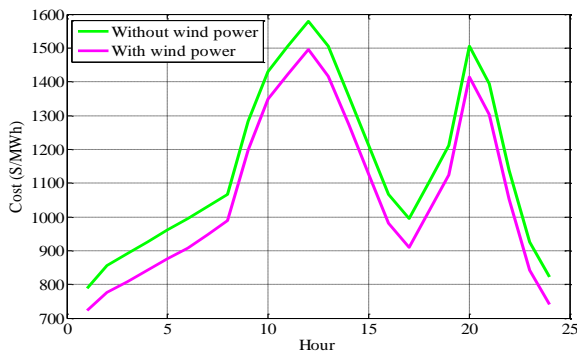
جدول ۱۰: نتایج با اعمال و بدون اعمال انرژی باد

H	Without wind Generation					With wind Generation				
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Total Generation Cost (\$/h)		Unit 1	Unit 2	Unit 3	Total Generation Cost (\$/h)	
				GM [21]	پیشنهادی				GM [21]	پیشنهادی
۱	۱۰/۰۰	۲۰/۰۰	۱۰/۰۰	۷۸۹/۵۸	۷۸۹/۱۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۷۲۳/۴۰	۷۲۳/۴۰
۲	۱۰/۰۰	۳۰/۰۰	۱۰/۰۰	۸۵۷/۵۸	۸۵۶/۶۰	۱۰/۰۰	۱۸/۰۰	۱۰/۰۰	۷۷۶/۸۷	۷۷۵/۸۱
۳	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱۰/۰۰	۸۹۲/۴۵	۸۹۱/۰۲	۱۰/۰۰	۲۲/۹۰	۱۰/۰۰	۸۱۰/۳۰	۸۰۸/۴۸
۴	۱۰/۰۰	۳۷/۵۰	۱۲/۵۰	۹۲۷/۷۱	۹۲۵/۸۰	۱۰/۰۰	۲۸/۰۰	۱۰/۰۰	۸۴۴/۳۱	۸۴۲/۹۵
۵	۱۰/۰۰	۳۹/۶۸	۱۵/۳۱	۹۶۳/۵۴	۹۶۰/۷۷	۱۰/۰۰	۳۲/۹۰	۱۰/۰۰	۸۷۸/۵۸	۸۷۶/۵۱
۶	۱۰/۰۰	۴۱/۸۷	۱۸/۱۲	۱۰۰۲/۷۳	۹۹۵/۹۴	۱۰/۰۰	۳۶/۴۰	۱۱/۰۹	۹۱۳/۹۹	۹۰۸/۳۸
۷	۱۰/۰۰	۴۴/۰۶	۲۰/۹۳	۱۰۴۵/۳۶	۱۰۳۱/۳۱	۱۰/۰۰	۳۸/۸۱	۱۴/۱۸	۹۵۰/۵۸	۹۴۶/۷۶
۸	۱۰/۰۰	۴۶/۲۵	۲۳/۷۵	۱۰۷۳/۲۳	۱۰۶۶/۸۷	۱۰/۰۰	۴۱/۴۳	۱۷/۵۶	۹۹۱/۷۳	۹۸۸/۸۹
۹	۱۸/۷۴	۵۵/۵۴	۳۵/۷۰	۱۲۸۹/۶۷	۱۲۸۳/۴۸	۱۴/۸۸	۵۲/۱۱	۳۱/۲۹	۱۲۲۳/۲۸	۱۱۹۸/۴۳
۱۰	۲۵/۳۴	۶۱/۴۱	۴۳/۲۴	۱۴۴۰/۳۹	۱۴۳۰/۵۳۴	۲۱/۷۱	۵۸/۱۸	۳۹/۱۰	۱۳۸۷/۰۴	۱۳۴۹/۳۹
۱۱	۲۸/۶۳	۶۴/۳۴	۴۷/۰۱	۱۵۱۷/۵۵	۱۵۰۴/۸۵	۲۴/۹۴	۶۱/۰۶	۴۲/۷۹	۱۴۴۱/۰۳	۱۴۲۱/۶۵
۱۲	۳۱/۹۳	۶۷/۲۷	۵۰/۷۸	۱۵۹۸/۸	۱۵۷۹/۶۹	۲۸/۲۷	۶۴/۰۲	۴۶/۶۰	۱۵۱۱/۰۶	۱۴۹۶/۶۵
۱۳	۳۸/۶۳	۶۴/۳۴	۴۷/۰۱	۱۵۱۷/۵۵	۱۵۰۴/۸۵	۲۴/۶۸	۶۰/۸۲	۴۲/۴۹	۱۴۳۲/۸۷	۱۴۱۵/۷۳
۱۴	۲۲/۰۴	۵۸/۴۸	۳۹/۴۷	۱۳۶۲/۹۹	۱۳۵۶/۷۴	۱۸/۲۸	۵۵/۱۳	۳۵/۱۸	۱۲۸۰/۷۰	۱۲۷۳/۲۶
۱۵	۱۵/۴۴	۵۲/۶۱	۳۱/۹۳	۱۲۱۴/۶۹	۱۲۱۰/۷۴	۱۱/۶۱	۴۹/۲۲	۲۷/۵۶	۱۱۲۹/۹۶	۱۱۲۷/۰۳
۱۶	۱۰/۰۰	۴۶/۲۵	۲۳/۷۵	۱۰۷۳/۲۳	۱۰۶۶/۸۷	۱۰/۰۰	۴۰/۹۶	۱۶/۹۴	۹۸۵/۵۰	۹۸۱/۱۴
۱۷	۱۰/۰۰	۴۱/۸۷	۱۸/۱۲	۱۰۰۰/۷۳	۹۹۵/۹۴	۱۰/۰۰	۳۶/۵۳	۱۱/۲۶	۹۱۳/۹۹	۹۱۰/۴۷
۱۸	۱۰/۴۹	۴۸/۲۱	۲۶/۳۸	۱۱۰۶/۱۱	۱۱۰۲/۶۳	۱۰/۰۰	۴۳/۱۸	۱۹/۸۱	۱۰۱۹/۹۸	۱۰۱۷/۱۴
۱۹	۱۵/۴۴	۵۲/۶۱	۳۱/۹۳	۱۲۱۴/۶۹	۱۲۱۰/۷۴	۱۱/۴۸	۴۹/۱۰	۲۷/۴۱	۱۱۲۸/۵۱	۱۱۲۴/۱۶
۲۰	۲۸/۶۳	۶۴/۳۴	۴۷/۰۱	۱۵۱۷/۵۵	۱۵۰۴/۸۵	۲۴/۶۴	۶۰/۷۹	۴۲/۴۵	۱۴۲۷/۷۰	۱۴۱۴/۹۹
۲۱	۲۳/۶۹	۵۹/۹۴	۴۱/۳۶	۱۴۰۰/۶۸	۱۳۹۳/۵۷	۱۹/۶۶	۵۶/۳۷	۳۶/۷۶	۱۳۱۵/۸۱	۱۳۰۳/۹۴
۲۲	۱۲/۱۵	۴۹/۶۸	۲۸/۱۷	۱۱۴۱/۹۳	۱۱۳۸/۵۳	۱۰/۰۰	۴۵/۳۷	۲۲/۶۲	۱۰۷۸/۳۱	۱۰۵۲/۶۲
۲۳	۱۰/۰۰	۳۷/۵۰	۱۲/۵۰	۹۳۴/۸۱	۹۲۵/۸۰	۱۰/۰۰	۲۸/۰۰	۱۰/۰۰	۸۴۴/۳۱	۸۴۲/۹۵
۲۴	۱۰/۰۰	۲۵/۰۰	۱۰/۰۰	۸۳۶/۲۴	۸۲۲/۶۲	۱۰/۰۰	۱۲/۸۰	۱۰/۰۰	۷۴۳/۵۷	۷۴۱/۶۱
	Mean cos(\$/h)			۱۱۵۵	۱۱۴۷/۹۱	Mean cost (\$/h)			۱۰۷۳/۱۰	۱۰۶۴/۲۶

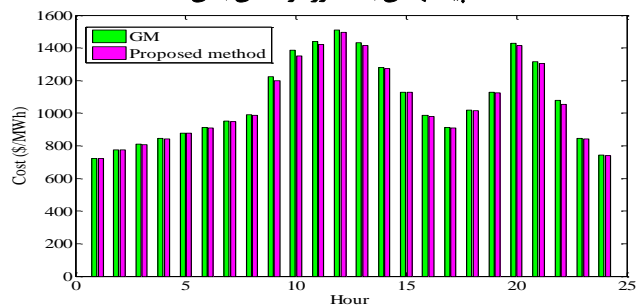
اکنون به توزیع اقتصادی توان در طول یک شبانه‌روز و مقایسه آن با روش پیشنهادی مرجع [۲۱] پرداخته می‌شود. توزیع بهینه توان خروجی در شکل ۱۹ و مقایسه بین هزینه‌های تولید در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مقایسه بین شکل‌های ۱۸ و ۲۰ نشان می‌دهد با حضور مولدهای بادی هزینه‌های تولید به صورت قابل توجهی کاهش یافته‌اند. همچنین مقایسه بین این هزینه‌ها برای روش پیشنهادی در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۹: خروجی بهینه به دست آمده از واحدهای نیروگاهی به کمک روش پیشنهادی با حضور مولدهای بادی



شکل ۲۱: مقایسه هزینه به دست آمده برای طول یک شبانه‌روز برای روش پیشنهادی با حضور و بدون حضور انرژی باد



شکل ۲۰: مقایسه هزینه به دست آمده برای طول یک شبانه‌روز بدون حضور مولدهای بادی

۶- نتیجه‌گیری

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیش‌ترین کارآمدی، کم‌ترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان یک سیستم قدرت را به‌وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسئله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به‌منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می‌کنند، ارائه می‌شود. به مفهومی دیگر، مسئله توزیع بهینه دینامیکی توان یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است که هدف آن یافتن سهم بهینه خروجی توان واحدهای روشن در هر ترکیب تولید است، به‌گونه‌ای که ضمن حفظ توانایی شبکه در تأمین تقاضای بار موردنیاز با کمترین هزینه اجرایی، قیدهای تساوی^{۱۹} و نامساوی^{۲۰} سیستم نیز رعایت شوند. در این مقاله، مسئله توزیع بهینه دینامیکی توان بین نیروگاه‌های حرارتی باهدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و با در نظر گرفتن محدودیت‌های غیرخطی نیروگاه‌ها ازجمله اثر شیر بخار، نواحی ممنوعه تولید و نرخ تغییر توان تولیدی نیروگاه‌ها توسط الگوریتم توسعه‌یافته زنبورعسل حل شده است. همچنین تأثیر نیروگاه بادی در طول یک شبانه‌روز بر میزان هزینه واحدها به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل گشته است. نتایج حاصل نشان از کاهش هزینه‌های تولید توسط سایر واحدهای نیروگاه‌های حرارتی دارد. در روش پیشنهادی، تبادل اطلاعات بین زنبورها بر اساس قوانین بهینه‌سازی انجام می‌گیرد و این عامل سبب به‌کارگیری تمام ظرفیت الگوریتم زنبورعسل در یافتن جواب بهینه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از انحراف معیار و توزیع اقتصادی تحکیم‌بخش این روش در حل مسائل بهینه‌سازی است.

مراجع

- [6] Y. Chen, J. Wen, L. Jiang, and S. Cheng, "Hybrid algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 10, pp. 1096-1104, 2013.
- [7] T. Niknam, R. Aziziapanah-Abarghooee, and J. Aghaei, "A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, 749-763, 2013.
- [8] R. Arul, G. Ravi, and S. Velusami, "Chaotic self-adaptive differential harmony search algorithm based dynamic economic dispatch," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 50, pp. 85-96, 2013.
- [9] K. Vaisakh, P. Praveena, S. R. Mohana Rao, and K. Meah, "Solving dynamic economic dispatch problem with security constraints using bacterial foraging PSO-DE algorithm," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 39, pp. 56-67, 2012.
- [۱۰] پدram شهریاری‌نسب، معین پرستگاری و مهدی معلم، «استفاده از الگوریتم زنبورهای عسل برای بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال توان بدون تماس به روش القایی برای شارژ خودروهای الکتریکی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۳، شماره ۲، ص ۹-۲۰، ۱۳۹۲.
- [11] X. Yan, and V. H. Quintana, "An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security-Constrained Economic Dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, pp. 803-10, 1997.
- [12] M. Basu, "Dynamic economic emission dispatch using non dominated sorting genetic algorithm-II," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, pp. 140-149, 2008.
- [13] N. Pandita, A. Tripathia, S. Tapaswia, and M. Pandit, "An improved bacterial foraging algorithm for combined static/dynamic environmental economic dispatch," *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 3500-3513, 2012.
- [14] Y. Lu, et al., "Chaotic differential evolution methods for dynamic economic dispatch with valve-point effects," *Engineering Application of Artificial Intelligence*, vol. 24, pp. 378-387, 2011.
- [15] T. Victoire, and A. E. Jeyakumar, "A modified hybrid EP-SQP approach for dynamic dispatch with valve-point effect," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 27, pp. 594-601, 2005.
- [16] X. Yuan, et al., "An improved PSO for dynamic load dispatch of generators with valve-point effects," *Energy*, vol. 34, pp. 67-74, 2009.
- [17] P. Lu, et al., "Chaotic differential bee colony optimization algorithm for dynamic economic dispatch problem with valve-point effects," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 130-143, 2014.
- [18] M. Shahidehpour, [Online], Available online at: motor.ece.iit.edu/data/SCUC_118test.xls, 2011.
- [19] B. Mohammadi-Ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Imperialist competitive algorithm for solving non-convex dynamic economic power dispatch," *Energy*, vol. 44, pp. 228-240, 2012.
- [20] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-Álvarez, J. L. Domínguez-García, and B. Tomoiagă, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets," *Applied Energy*, vol. 106, pp. 365-76, 2013.
- [21] S. P. Agrawal, K. B. Porate, and G. H. Rasoni, "College of Engg. Economic Dispatch of Thermal Units with the Impact of Wind Power plant," *Third International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, pp. 48- 53, 2010.
- [1] H. Khorramdel, B. Khorramdel, M. Tayebi Khorrami, and H. Rastegar, "A multi-objective economic load dispatch considering accessibility of wind power with here-and-now approach," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 49-59, 2014.
- [2] X. Yan, and V. H. Quintana, "An efficient predictor-corrector interior point algorithm for security-constrained economic dispatch," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, pp. 803-810, 1997.
- [3] G. C. Contaxis, C. Delkis, and G. Kerres, "Decoupled optimal load flow using linear or quadratic programming," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 1, no. 2, pp 1-7, 1986.
- [4] A. A. El-Keib, and H. Ding, "Environmentally constrained economic dispatch using linear programming," *Electric Power System Research*, vol. 29, pp. 155-159, 1994.
- [5] H. Shayeghi, and A. Ghasemi, "A modified artificial bee colony based on chaos theory for solving non-convex emission/economic dispatch," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 344-354, 2014.

[۲۲] مهدی دارابی، سعید اباذری و جعفر سلطانی، «بررسی تأثیر پارکینگ‌های هوشمند بر تأمین توان راکتیو در شبکه‌های هوشمند با نیروگاه بادی بر اساس کنترل‌کننده غیرخطی مدل‌گزشی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، ص ۱۱-۲۰، ۱۳۹۴.

زیرنویس‌ها

- ¹ Global
- ² Distributed energy resources
- ³ shuffled frog leaping algorithm
- ⁴ Valve point effect
- ⁵ Prohibited operating zones
- ⁶ Scout
- ⁷ Non-dominated sorting genetic algorithm-II
- ⁸ Real-coded genetic algorithm
- ⁹ Improved bacterial foraging algorithm
- ¹⁰ Differential evolution
- ¹¹ Evolutionary programming–sequential quadratic programming
- ¹² Improved particle swarm optimization
- ¹³ Chaotic differential evolution
- ¹⁴ Chaotic differential bee colony optimization
- ¹⁵ Imperialist competitive algorithm
- ¹⁶ Induction Generator
- ¹⁷ Synchronous generator
- ¹⁸ Gradient method
- ¹⁹ Equally
- ²⁰ Inequality