در مدار قرار گرفتن بهینه واحدهای نیروگاهی حرارتی با استفاده از روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه

حسن براتی[۱] - اسماعیل فتحی[۲] - محمد نصیر[۲]

(۱) استادیار - گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

(۲) کارشناس ارشد - گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۶

خلاصه: در این مقاله، مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌های حرارتی، با استفاده از ترکیب منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه (CFLFLA)[۱] حل شده است که در آن، محدودیت‌ها و قیود حداقل و حداکثر تولید، حداقل زمان توقف و روشن بودن، زمان راه‌اندازی، ذخیره چرخان و ... در نظر گرفته شده است. از منطق فازی جهت کاهش زمان تولید سیکل‌های خاموش و روشن بودن نیروگاه‌ها به عنوان اعضاء جامعه پاسخ‌های ممکن در حل مسئله در مدار قرار دادن استفاده شده است و الگوریتم جهش قورباغه برای بهینه‌کردن پاسخ‌ها به کار می‌رود و استفاده از روش پیشنهادی، منجر به سرعت در زمان دسترسی به پاسخ بهینه و کاهش هزینه تولید می‌شود. شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری MATLAB انجام شده است و نتیجه آن در مقایسه با برخی الگوریتم‌های هوشمند دیگر بهبودهایی را در هزینه تولید و زمان حل مسئله نشان می‌دهد. این روش قابلیت توسعه در حل مسئله در مدار آوردن نیروگاه‌های حرارتی در ابعاد مختلف با لحاظ سایر قیود و محدودیت‌ها را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: واحدهای حرارتی، در مدار قرار دادن نیروگاه‌ها، روش لاگرانژ، الگوریتم جهش قورباغه، منطق فازی.

Optimal Unit Commitment for Thermal Power Plants using Combined Fuzzy Logic and Shuffled Frog Leaping Algorithm Method

Hassan Barati[1] - Esmaeil Fathi[2] - Mohammad Nasir[2]

(1) Assistant Professor - Dept. of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

barati216@gmail.com

(2) MSc. - Dept. of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

e.fathi@ksc.ir

moh.nasir220@gmail.com

Abstract: In this paper, the thermal unit commitment problem is solved by using combined fuzzy logic and Shuffled Frog Leaping Algorithm, in which the minimum and maximum generation constraints, minimum up/down-time constraints, starting time, spinning reserve and so on are considered. Fuzzy logic is used to reduce the production time of the ON/OFF cycle durations of each unit in the feasible solutions. Shuffled Frog Leaping Algorithm is used to optimize the results. Using the proposed method reduces the computation time and also the generation cost. The simulation has been done in the MATLAB software environment, and as its results compared with some other intelligent algorithms to show improvements in generation cost and problem solving time. This method has the ability to develop solving unit commitment in different dimensions with considering constraints and limits.

Keywords: Thermal units, Unit commitment, Lagrange method, Shuffled Frog Leaping Algorithm, Fuzzy logic.

نویسنده مسئول: حسن براتی، استادیار - گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، barati216@gmail.com

۱- مقدمه

در روند پیشرفت در دانش‌برنامه‌ریزی و مقوله بهینه‌سازی و با بروز انتظارات جدید مصرف‌کنندگان و جامعه از تولید، محققین و صنعت-کاران و کارشناسان، روش‌ها و قواعدی را برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌های حرارتی پیشنهاد کرده و بعضاً به اجرا در آورده‌اند.

مطالعه اقتصادی خارج کردن واحدهای تولیدی از برنامه‌ریزی روزانه جهت کاهش هزینه تولید و استفاده از روش لاگرانژ [۱و۲]، به‌کاربردن الگوریتم ژنتیک [۳و۴]، روش PSO [۵و۶] و روش‌های علمی نظیر اعداد باینری فازی شده و کدهای حقیقی [۷]، برنامه‌ریزی خطی عددی ترکیبی، الگوریتم رقابت استعماری [۸]، الگوریتم جهش قورباغه [۹] و تقریب خطی منحنی هزینه [۱۰] جزئی از تلاش‌ها و اقدامات دامنه‌داری است که جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری واحدهای تولیدی و حرارتی اجرا شده است. در مرجع [۱۱]، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی بترتیب مبتنی بر الگوریتم باینری و الگوریتم ازدحام ذرات و برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها مبتنی بر سود ارائه شده است. مرجع [۱۲] نیز یک الگوریتم ترکیبی شامل الگوریتم سیستم جستجوی شارژ، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی مورچه برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها در سیستم قدرت مقیاس بزرگ ارائه نموده است. در مراجع [۱۳،۱۴] نیز از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها در شرایط متفاوت استفاده شده است.

در این مقاله، برای حل برنامه‌ریزی در مدار بودن واحدهای نیروگاهی، شامل برآوردن برخی از مهمترین قیود تولید، با دقت در پاسخ‌های موجود مسئله و تحلیل راه‌کارها و نتایج حل‌های گوناگون، با به‌کار بردن الگوریتم جهش قورباغه بهبودیافته و ترکیب آن با منطق فازی روشی ارائه شده است که علاوه بر بهبود در سرعت رسیدن به جواب بهینه، هزینه تولید را کاهش می‌دهد. در روش ترکیبی الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی تعداد سیکل‌های روشن و خاموش شدن نیروگاه‌ها براساس بررسی منحنی بار و ماکزیمم و مینیمم‌های این منحنی است ولی به‌جای تقسیم‌بندی واحدهای نیروگاهی به واحدهای پایه و میان‌باری و پرباری، از منطق فازی برای برنامه‌ریزی واحدهای در مدار و خاموش استفاده شده است.

در ادامه سازماندهی مقاله عبارت است از: فرمول‌بندی مسئله در مدار قراردادن نیروگاه‌ها در بخش دوم، تابع هزینه در بخش سوم، فرمول‌بندی مسئله در مدار قراردادن بهینه نیروگاه‌ها با ترکیب منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری در بخش پنجم و نتیجه‌گیری در بخش ششم.

۲- فرمول‌بندی مسئله در مدار قرار دادن نیروگاه‌ها

هر واحد i در زمان روشن بودن می‌تواند در نقطه‌ای از محدوده تولید خود بین حداقل تولید (P_i^{min}) و حداکثر تولید (P_i^{max}) تولید کند و باید قیود زیر را تامین کند.

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^t = D^t \qquad (۱)$$

که در آن، P_i^t: تولید واحدiام در بازه زمانی tام و D^t: تقاضای بار در بازه زمانی tام و N: تعداد واحدهای حرارتی می‌باشد.

در هر زمان مجموع حداکثر توان تولیدی واحدهای حاضر در مدار باید بیشتر یا مساوی مجموع بار و ذخیره چرخان باشد. یعنی:

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^{maxt} \geq P_l^t + R^t \qquad (۲)$$

که در آن، P_i^{maxt}: ظرفیت تولید واحدiام که در زمان tام در مدار است و N: تعداد واحدهای حرارتی روشن در بازه زمانی tام و P_l^t: تقاضای بار در بازه زمانی tام و R^t: ذخیره چرخان در بازه زمانی tام می‌باشد. ذخیره چرخان تفاوت بین ظرفیت بالقوه فعال در سیستم و مجموع بار می‌باشد که در این مقاله، مقدار ۱۰ درصد میزان بار در نظر گرفته شده است.

مجموع حداقل تولید واحدهای در مدار نباید از بار مورد نیاز در زمان t بیشتر باشد، یعنی:

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^{mint} \leq P_l^t \qquad (۳)$$

با در نظر گرفتن نرخ شیب واحد دو پارامتر دیگر وارد معادلات می‌شود: RU_i: نرخ افزایش تولید واحد i، RD_i: نرخ کاهش تولید واحد i. بنابراین دو مشخصه میزان حداقل و حداکثر تولید مجاز هر واحد در ساعت t به تولید واحد در ساعت $(t-1)$ و به ترتیب به مقادیر نرخ کاهش و نرخ افزایش تولید آن واحد بستگی دارد. بنابراین:

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^t = D^t \qquad (۴)$$

که:

$$P_{i\,min}^t = \max\{P_i^{min}, P_i^{t-1} - \tau . RD_i\} \qquad (۵)$$

$$P_{i\,max}^t = \min\{P_i^{max}, P_i^{t-1} + \tau . RU_i\} \qquad (۶)$$

که در آن τ برابر ۶۰ دقیقه است و گام زمانی در مدار آوردن نیروگاه‌ها نام دارد.

$$P_{i\,min}^t \leq P_i^t \leq P_{i\,max}^t \qquad (۷)$$

۳- تابع هزینه

۳-۱- هزینه تولید

$$FC_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + C_i P_i^2 \qquad (۸)$$

در این رابطه، P_iتوان تولیدی واحد iام، $FC_i(P_i)$ تابع هزینه واحد iام، α_i، β_i و C_i ضرایب تابع هزینه واحد i ام است.

۳-۲- هزینه راه‌اندازی واحدهای حرارتی:

هزینه راه‌اندازی بنابر صرفه اقتصادی می‌تواند از حداکثری که به هزینه راه‌اندازی سرد موسوم است تا مقدار هزینه راه‌اندازی گرم برای واحدی که به تازگی متوقف شده است، تغییر یابد. هزینه‌های راه‌اندازی واحدها:

$$SUC_T = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \sum_{C=2}^{C_i} U(T_i^c) . SUC_i(-T_i^{c-1}) \qquad (۹)$$

SUC_T هزینه کل راه‌اندازی‌ها است و SUC_i برابر است با:

$$SUC_i = \begin{cases} HSC_i & \text{if } MDT_i \leq -T_i^{c-1} \leq MDT_i + CSH_i \\ CSC_i & \text{if } -T_i^{c-1} > MDT_i + CSH_i \end{cases} \qquad (۱۰)$$

کل هزینه تولید برای برنامه‌ریزی روشن و خاموش شدن واحدها بصورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود:

$$TC = \sum_{t=1}^{H} \sum_{i=1}^{N_{gen}} \left(FC_i(P_i).u_i(t)\right) + SUC_T \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه، SUC_T هزینه کل راه‌اندازی، $FC_i(P_i)$ تابع هزینه واحد iام، N_{gen} تعدادواحدها، و N تعداد واحدهای حرارتی روشن است.

۴- فرمول‌بندی مسئله در مدار قراردادن بهینه نیروگاه‌ها با ترکیب منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه:

اولین مرحله مشخص کردن تعداد سیکل‌ها و تولید تعداد لازم جمعیت اولیه است. دومین مرحله محاسبه تابع هزینه هر پاسخ ممکن با لحاظ پخش اقتصادی بار بین واحدها است و مرحله سوم بهینه کردن پاسخ‌ها و دستیابی به جواب بهینه می‌باشد.

۴-۱- تولید سیکل‌های روشن و خاموش کردن نیروگاه‌ها

۴-۱-۱-تعداد سیکل‌های خاموش و روشن‌شدن واحدهای حرارتی

پروفیل بار جهت مشخص نمودن تعداد سیکل‌های خاموش و روشن بودن واحدها به کار می‌رود. برای مشخص نمودن تعداد سیکل‌های کاری (حداکثر تعداد خاموش و روشن شدن نیروگاه‌ها) تعداد نقاط ماکزیمم یا مینیمم نسبی، موقعیت آن نقاط، فاصله زمانی آن‌ها از یکدیگر و همچنین اختلاف آن‌ها از نظر اندازه تعیین‌کننده است. با افزایش تعداد نقاط ماکزیمم یا مینیمم نسبی با فاصله زمانی، تعداد سیکل‌های خاموش و روشن شدن نیروگاه‌ها افزایش می‌یابد.

براساس شکل (۱)، تعداد خاموش و روشن شدن بار نیروگاه‌ها برای برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته حداکثر ۵ بار است. بنابراین رفتار هر واحد نیروگاهی در ۲۴ ساعت برنامه‌ریزی شامل پنج عدد می‌باشد.

۴-۱-۲- تولید پاسخ‌های ممکن با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی

با توجه به اینکه عدد به‌دست آمده برای تعداد سیکل‌ها عدد ۵ می‌باشد بنابراین برای y روز، در هر مسئله 5ny متغیر خواهیم داشت. در روش مورد استفاده، وضعیت واحدها با عدد صحیح کد می‌شوند موقعیت قورباغه‌ها (X) شامل یک سری اعداد صحیح علامت‌دار است که بیانگر طول سیکل خاموش (عدد منفی) یا روشن (عدد مثبت) واحدها است.

روشی را که حل مسئله‌های پیشین که از روش جهش قورباغه برای تولید سیکل‌ها استفاده کرده‌اند [۹]، تولید تصادفی در کل فضا جهت دستیابی به پاسخ‌های ممکن است، که با توجه به اینکه در مسئله‌ای حتی در وسعت کوچک و با ۱۰ واحد حرارتی در یک برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته شانس اینکه بتوان ۵۰ عدد صحیح بصورت تصادفی به گونه‌ای تولید کرد که این اعداد در هر ساعت دوره برنامه‌ریزی کل حدود و قیود و شرایط را برآورده نماید، احتمال بسیار کوچکی است. بنابراین تولید جامعه پاسخ‌های ممکن در مسئله‌ای کوچک زمان بسیار زیادی را می‌طلبد. در این مقاله، با بهره‌مندی از منطق فازی و با تحلیل شرایط و اطلاعات و با بهره‌گیری از نتایج حل مسئله که در گذشته و به روش‌های مختلف ارائه شده است، گزینه‌های دیگری نیز برای هر واحد در هر ساعت قابل تعریف است که آن گزینه‌ها عبارتند از: " نباید در مدار باشد" و "باید در مدار باشد". این محدودیت در همان ابتدا از تولید سیکل‌ها و پاسخ‌هایی که از پاسخ بهینه فاصله دارد جلوگیری کرده و حوزه جستجوی پاسخ‌های ممکن و مناسب را تنگ‌تر کرده و سرعت یافتن اعضاء جامعه اولیه را افزایش می‌دهد. عوامل و پارامترهایی که در شبکه فازی برای تدوین سیکل‌های در مدار بودن و خارج از سرویس بودن نیروگاه‌ها استفاده شده است عبارتند از:

۱- اندازه بار

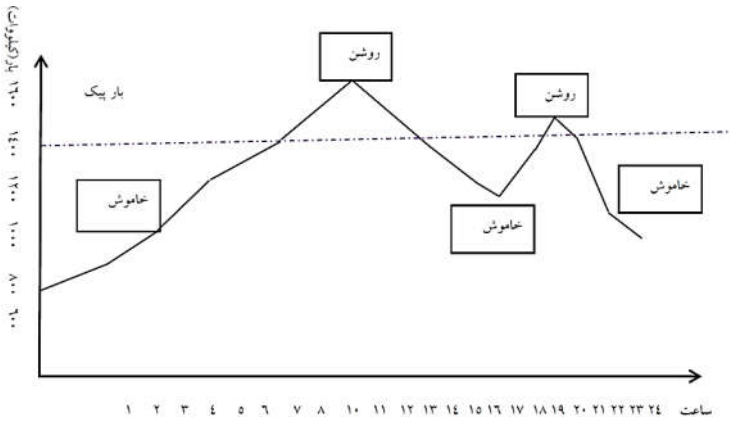
۲- هزینه بار تولید واحد (هزینه تولید هر کیلووات به ازای تولید حداکثر)

۳ - اندازه تولید هر واحد (مقدار کیلووات تولید شده به کل تولید ممکن کل واحدها)

با استفاده از مفاهیم فازی، قوانین فازی تدوین شده و نتیجه آن تولید وزن باید و نباید در مدار بودن نیروگاهی می‌شود. با بهره‌مندی از این وزن در مورد خاموش و یا روشن بودن یک واحد، بعنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در ایجاد سیکل واحد تصمیم‌گیری می‌شود. محدوده خارج از حدود تصمیم‌گیری منطق فازی، پهنه‌ای است که تنها در آن گستره از تولید سیکل‌ها بصورت تصادفی استفاده می‌کنیم. به دلیل کوچک بودن حدود و تعیین تکلیف بسیاری از سیکل‌ها از طریق فازی سرعت تولید قورباغه‌ها بهبود چشمگیری می‌یابد. بدیهی است پاسخ ممکن کلیه محدودیت‌ها و قیود را برآورد می‌کند و در تولید آنها این قیود در نظر قرار داده شده است.

۴-۱-۳- قوانین فازی جهت در مدار قرار دادن نیروگاه‌ها

قوانین فازی تدوین شده در جدول (۱) آورده شده است. در برنامه‌نویسی کامپیوتری، برنامه به گونه‌ای نوشته شده است که چنانچه براساس منطق فازی واحدی باید در مدار باشد، آن واحد در مدار قرار می‌گیرد مگر آنکه قیود و شرایط اجازه در مدار قرار گرفتن را ندهند و چنانچه واحدی نباید در مدار باشد آن واحد به شرط برآورد شرایط قیود و محدودیت‌ها خاموش است. با وجود سه متغیر و هر متغیر با سه حالت، ۲۷ حالت وجود دارد. هر حالت را می‌توان با توجه به علائم اختصاری انتهای جدول تفسیر نمود.



شکل (۱): سیکل واحدهای پیک بار [9]

Fig. (1): Peak-load units cycle [9]

Table (1): Fuzzy rules

جدول (۱): قوانین فازی

وضعت بار	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد
میزان تولید	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	کم	زیاد	زیاد	زیاد
هزینه تولید	کم	متوسط	زیاد	متوسط	کم	زیاد	متوسط	کم	زیاد
نتیجه	با.د.م.ب	به.د.م.ب	به.د.م.ن	با.د.م.ب	به.د.م.ب	می.د.م.ب	با.د.م.ب	به.د.م.ب	م.د.م.ب
وضعت بار	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
میزان تولید	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
هزینه تولید	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
نتیجه	به.د.م.ب	به.د.م.ن	د.م.ن	با.د.م.ب	به.د.م.ن	به.د.م.ن	با.د.م.ب	می.د.م.ب	می.د.م.ب
وضعت بار	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم	کم
میزان تولید	کم	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد
هزینه تولید	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
نتیجه	می.د.م.	د.م.ن	د.م.ن	به.د.م.ب	د.م.ن	د.م.ن	با.د.م.ب	د.م.ن	د.م.ن

حروف اختصاری: با≈باید، د.م≈در مدار، ب ≈باشد و ن ≈نباشد، به ≈بهتر، می ≈می‌تواند(در مدار بودن یا نبودن یک وزن دارد).

۴-۱-۴- تولید سیکل‌های برنامه‌ریزی واحدها:

هر سیکل شامل وضعیت کل واحدها در سراسر زمان برنامه‌ریزی است که با منطق فازی، وضعیت بسیاری از واحدها در ساعت‌های مختلف مشخص می‌شود. برای تکامل سیکل‌ها از روش زیر استفاده شده‌است.

برای واحد i سیکل‌های بهره‌برداری به صورت سری (۱۲) تعریف می‌شود:

$$X_i = [T_i^1, T_i^2, \dots, T_i^c] \quad (۱۲)$$

که c تعداد سیکل‌ها (در اینجا برابر عدد ۵ است) و سیکل nام i امین واحد می‌باشد.

بنابراین یک پاسخ کامل شامل سیکل‌های تمامی واحدها است.

$$X^j = [X_1^j, X_2^j, \dots, X_n^j] \quad (۱۳)$$

که X_j نمونه پاسخ شماره j و X_m^j سیکل‌های واحد mام مربوط به پاسخ شماره j و n تعداد کل واحدهای نیروگاه حرارتی می‌باشد.

در تدوین اولین سیکل واحدها حالت اولیه و اطلاعات آخرین سیکل دوره برنامه‌ریزی قبلی آنها به عنوان مقادیر اولیه و با عنوان $ini(i)$ در برنامه کامپیوتری و T_i^0 در این مقاله، در نظر گرفته شده است.

در کلیه سیکل‌ها قید حداقل زمان‌های روشن و خاموش بودن بصورت (۱۴) لحاظ می‌شود:

$$\begin{cases} T_i^c > MU_i & \text{if} \quad T_i^c > 0 \\ -T_i^c \geq MD_i & \text{if} \quad T_i^c < 0 \end{cases} \quad (۱۴)$$

که در این معادلات MU_i و MD_i به ترتیب حداقل زمان روشن بودن و حداقل زمان خاموش بودن واحد i بوده و T_i^c یک عدد صحیح است که وضعیت خاموش (عدد منفی) و یا روشن بودن (عدد مثبت) واحد i در cامین سیکل برنامه‌ریزی آن واحد است که می‌بایست مجموع این زمان‌ها برابر کل زمان برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت) باشد. با در نظر گرفتن نرخ پاسخ، میزان تولید توان در هر واحد به صورت (۱۵) محدود می‌شوند:

$$P_{i\,min}^t \leq P_i^t \leq P_{i\,max}^t \quad (۱۵)$$

که در آن:

$$P_{i\,min}^t = \max\{P_i^{min}, P_i^{t-1} - \tau . RD_i\} \quad (۱۶)$$

$$P_{i\,max}^t = \min\{P_i^{max}, P_i^{t-1} + \tau . RU_i\} \quad (۱۷)$$

که در آن P_i^{t-1} تولید واحد i در سیکل قبل، RU_i و RD_i به ترتیب نرخ پاسخ کاهش و افزایش تولید بوده و τ برابر ۶۰ دقیقه است و گام زمانی در مدار آوردن نیروگاه‌ها نام دارد.

طول سیکل اول بهره‌برداری واحد i که با T_i^1 نشان داده می‌شود به نحوی انتخاب می‌گردد که وضعیت کارکرد در سیکل آخر برنامه‌ریزی شده ۲۴ ساعت گذشته و حداقل زمان‌های بالا و پایین در آن لحاظ شده باشد:

$$T_i^1 = \begin{cases} +\text{Round}\left(\text{Rand}(\max(0, MU_i - T_i^0), T)\right) \text{if} T_i^0 > 0 \\ -\text{Round}\left(\text{Rand}(\max(0, MD_i + T_i^0), T)\right) \text{if} T_i^0 < 0 \end{cases} \quad (۱۸)$$

در معادله اخیر تابع Rand بصورت تصادفی عددی بین اعداد ۰ تا ۱ یک عدد تولید می‌نماید و T_i^0 مربوط به طول آخرین سیکل برنامه کاری روز گذشته می‌باشد. از آنجایی که حاصل عدد صحیح نمی‌باشد، لازم است از Round آن که عدد را به نزدیکترین عدد صحیح خود گرد می‌کند، استفاده شود.

برای $c<5$ طول بهره‌برداری cامین سیکل واحد i با در نظر گرفتن قیود زمانی و برنامه UC[2] در سیکل قبل یعنی c-1 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و محاسبه می‌گردد:

چنانچه $T_i^{c-1} < 0$ و سیکل c در وضعیت on باشد از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$T_i^c = \begin{cases} +\text{Round}\left(Rand(MU_i, RT_i^{c-1})\right) if\left(RT_i^{c-1} > MU_i\right) \\ +RT_i^{c-1} OTHERWISE \end{cases} \quad (۱۹)$$

و چنانچه $T_i^{c-1} > 0$ باشد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_i^c = \begin{cases} -\text{Round}\left(Rand(MD_i, RT_i^{c-1})\right) if\left(RT_i^{c-1} > MD_i\right) \\ -RT_i^{c-1} OTHERWISE \end{cases} \quad (۲۰)$$

که RT_i^{c-1} مدت زمان باقیمانده و برنامه‌ریزی نشده از کل دامنه برنامه-ریزی می‌باشد که به صورت معادله (۲۱) تعریف می‌شود:

$$RT_i^{c-1} = T - \sum_{n=1}^{c-1} T_i^n \quad (۲۱)$$

که T کل دوره برنامه‌ریزی و برابر ۲۴ است.

چنانچه در سیکل c کل زمان برنامه‌ریزی‌ها پوشش داده شود، بنابراین در سیکل‌هایی تا به انتهای دوره برای آن واحد عدد صفر به موقعیت‌های باقیمانده واحد تخصیص داده می‌شود.

$$T_i^n = 0 \quad \text{if} \quad RT_i^c = 0 \qquad \text{for } n > c \quad (۲۲)$$

در سیکل پنجم نیز باقیمانده زمان برنامه‌ریزی نشده برای هر واحد بعنوان آخرین سیکل تخصیص داده می‌شود:

$$T_i^5 = \begin{cases} +RT_i^4 & \text{if } T_i^4 < 0 \\ -RT_i^4 & \text{if} T_i^4 > 0 \end{cases} \quad (۲۳)$$

اکنون که کلیه سیکل‌ها تولید شده‌اند، شرط تأمین بار را می‌بایست بررسی نمود. شرط لازم برای اینکه X تولید شده به عنوان یک پاسخ ممکن پذیرفته شود آن است که واحدهای در مدار در کل دوره ۲۴ ساعت قادر به تامین بار و ذخیره چرخان باشند. در صورت عدم پاسخگویی این جواب کنار گذاشته می‌شود. پاسخ تولید شده در صورت جواب‌گو بودن به عنوان یک عضو جامعه‌پاسخ‌های ممکن ذخیره گردیده و تا تولید تعداد مورد نیاز پاسخ‌های ممکن برنامه به تولید پاسخ ادامه می‌دهد.

۴-۲- توزیع اقتصادی بار مبتنی بر روش ترکیب عددی لاگرانژ و لیست حق تقدم

هنگامی که یک جواب ممکن تولید می‌شود، کاری که برای بهینه‌شدن هزینه تولید باید انجام شود توزیع اقتصادی بار بین واحدهای در مدار جهت تامین بار است. برای بهینه‌سازی توزیع بار از روشی که تحت عنوان ترکیب عددی لاگرانژ و لیست حق تقدم می‌باشد، صورت گرفته است. بدین‌صورت که ابتدا براساس لیست حق تقدم توزیع بار بین واحدها صورت می‌گیرد. بدین‌ترتیب که واحدهای با اولویت بالاتر در حداکثر ظرفیت خود و واحدهای دارای اولویت کمتر در میزان کمینه ممکن تولید می‌کنند تا تأمین بار لازم صورت گیرد. سپس براساس هزینه تولید به ازای یک کیلووات ساعت تولید در هر واحد و مقایسه بین کل واحدهای در مدار، و با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها و قیود با اولویت تولید به واحدی که کمترین هزینه تولید را داشته باشد داده می‌شود. یعنی چنانچه کاهش هزینه ناشی از کاهش یک کیلووات ساعت تولید در واحد A که با معادله (۲۴) محاسبه می‌شود بیش‌تر از هزینه تولید یک کیلووات ساعت با روش محاسبه معادله (۲۵) در واحد B باشد و قیود واحدها اعم از نرخ شیب، حداقل و حداکثر تولید و ... ممانعتی ایجاد ننماید آنگاه از تولید واحد A یک کیلووات ساعت کسر شده و به تولید واحد B یک کیلووات افزوده می‌شود. این روند تا جایی پیش می‌رود که به علت محدودیت‌ها یا مساوی شدن هزینه‌های تولید، دیگر کاهش هزینه‌ای مقدور نباشد. روندنمای توزیع اقتصادی بار به روش ترکیبی لاگرانژ و لیست حق تقدم در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

کاهش هزینه تولید به ازای یک کیلووات کاهش تولید در واحد A:

$$F(P) - F(P-1) = \beta + 2C\beta P_A \quad (۲۴)$$

هزینه یک کیلووات افزایش تولید در واحد B برابر است با:

$$F(P+1) - F(P) = \beta + 2C\beta P_B + C \quad (۲۵)$$

که β و C ضرایب معادله (۸)، P_A تولید واحد A و P_B تولید واحد B می‌باشند.

۴-۳-بهینه‌سازی سیکل‌ها با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه

شرح کلی اقدامات آن است که با استفاده از منطق فازی در ابتدا وضعیت بسیاری از سیکل‌ها روشن می‌گردد. پس از آن برای مشخص نمودن دیگر سیکل‌ها، ابتدا با لحاظ قوانین فازی و روش تصادفی تولید پاسخ تا تولید جواب مناسب، تعدادی جواب ممکن تولید می‌شود سپس با بهره-مندی از الگوریتم جهش قورباغه جواب‌های ممکن بهینه شده و جواب (جواب‌های) بهینه نهایی حاصل می‌شود. هر سیکل ممکن تولید و تابع هزینه آن یک پاسخ ممکن است. بنابراین هر قورباغه شامل سیکل‌های کاری کلیه واحدهای تولیدی در دوره زمان برنامه‌ریزی بوده و دارای وزن (هزینه) می‌باشد. وزن هر قورباغه برابر هزینه تمام شده تولید براساس سیکل همان قورباغه است. بنابراین بهبود قورباغه‌ها یعنی ایجاد تغییرات در سیکل تولید واحدها که منجر به کاهش وزن و هزینه تولید آن قورباغه می‌شود و می‌توان بدین صورت لحاظ کرد که تغییر در سیکل‌های واحدها که منجر به تغییرات در هزینه می‌شود باعث تولد قورباغه جدید و

مرگ قورباغه قبلی می‌شود. جمعیت اولیه قورباغه‌ها که همان جواب‌های ممکن مسئله می‌باشد بستگی به اندازه مسئله و پیچیدگی آن دارد. چنانچه جمعیت اولیه کم باشد ممکن است منجر به عدم دست‌یابی به جواب بهینه شود و باعث همگرایی حل به جوابی شود که آن جواب، پاسخ بهینه مسئله نیست. جمعیت زیاد قورباغه‌ها (تعداد پاسخ‌های ممکن) نیز باعث طولانی شدن رسیدن به پاسخ می‌شود. لذا لازم است تعداد قورباغه‌ها بصورت مناسب انتخاب شود که تشخیص این تعداد مناسب از طریق شناخت مسئله و تجربه و چند بار حل مسئله حاصل می‌شود.

روش استفاده از این الگوریتم بدین‌صورت است که تعداد جمعیت اولیه را به زیرگروه‌هایی (به نام ممپلکس[۳]) تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس در هر ممپلکس عملیات بهینه‌سازی صورت گرفته و قورباغه‌ها بهبود یافته و پس از چند دوره بهبود، کل جامعه قورباغه‌ها شامل تمام ممپلکس‌ها مجدداً در یک ظرف ریخته می‌شوند و براساس اندازه تابع هزینه مرتب-سازی و گروه‌بندی شده و دوباره عملیات بهینه‌سازی در گروه‌ها انجام می‌گردد و دو باره مرتب‌سازی و... این عملیات تا دستیابی به جواب بهینه ادامه پیدا می‌کند.

در هر ممپلکس با اضافه کردن یک بردار به پاسخ‌های با تابع هدف بدتر که منجر به هزینه بیشتر می‌شود، آن پاسخ را به سمت پاسخ با جواب بهتر سوق می‌دهیم پس از انجام هر دوره جهش مرتب‌سازی قورباغه‌های هر گروه براساس میزان هزینه و بصورت نزولی انجام می‌شود. تعداد جهش‌های ممکن از حداقل یک جهش که حالت جهش بدترین fitness (X_m) به سمت بهترین پاسخ موجود در گروه (X_b) است تا جهش نیمه پایین گروه مرتب شده براساس کاهش اندازه تابع هزینه به سمت نیمه بالای گروه متغیر می‌باشد. در این مقاله، تعداد جهش حداکثر به علت دسترسی سریعتر به جواب که نتیجه‌ای منتج از چندین مرتبه تجربه تعداد جهش متفاوت بود انتخاب گردید و اجرا شد.

در جهش قورباغه j به طرف قورباغه i میزان جهش برای جزء جزء سیکل‌های مشابه بصورت (۲۶) اتفاق می‌افتد:

$$X^{j}_{new} = X^{j} + rand \times \left(X^{i} - X^{j}\right) \qquad (۲۶)$$

برهمین اساس برای واحد نیروگاهی حرارتی i، یکی از سیکل‌های روشن و خاموش شدن نیروگاه بصورت رابطه (۲۷) تغییر می‌کنند:

$$\left(T^{i}_{1new}, T^{i}_{2new}, \dots, T^{i}_{c\,new}\right) = \left(T^{i}_{1}, T^{i}_{2}, \dots, T^{i}_{c}\right) - rand\left(T^{i}_{1b} - T^{i}_{1}, \dots, T^{i}_{cb} - T^{i}_{c}\right) \qquad (۲۷)$$

C تعداد کل سیکل‌ها و سیکل‌های با اندیس زیرنویس b مربوط به قورباغه‌ی هدف جهش بوده و rand نیز عددی بین صفر و یک می‌باشد. این سیکل‌ها باید عددی صحیح و حاصل جمع آنها باید برابر زمان برنامه-ریزی واحد باشد. بنابراین برای اصلاح باید از رابطه‌ی زیر استفاده شود:

$$\left(T^{1}_{inew}, \dots, T^{C}_{inew}\right) = round\left(T^{1}_{iold}, \dots, T^{C}_{iold}\right) \qquad (۲۸)$$

$$\left(T^{1}_{i}, \dots, T^{C}_{i}\right) = round\left(\frac{T}{\sum_{k=1}^{C}|T^{k}_{i}|} \cdot \left(T^{1}_{inew}, \dots, T^{C}_{inew}\right)\right) \qquad (۲۹)$$

که T زمان برنامه‌ریزی بوده و round عدد حاصل را به نزدیکترین عدد صحیح گرد می‌کند و زمان‌ها با اندیس old سیکل‌های بعد از جهش و قبل از صحیح‌سازی و سیکل‌های با اندیس new پس از تبدیل آنها به عدد صحیح و سیکل‌های به صورت T^{1}_{i} نیز نتیجه نهایی است. در مرحله بعد باید کلیه شروط و قیود روی آن بررسی شده و در صورت نیاز سیکل‌ها اصلاح گردند. در این مرحله در صورتی که هر کدام از نتایج عدم بهبود و یا عدم دسترسی به جواب ممکن اتفاق افتد قورباغه به سیکل و هزینه قبلی خود برمی‌گردد و در مرحله بعد به سمت بهترین قورباغه جهش می‌کند. در صورتی که جهش به سمت بهترین قورباغه هم کاهش هزینه را در بر نداشته باشد یا پاسخی ممکن نباشد پس الگوریتم تولید یک جواب ممکن را بعنوان جایگزین قورباغه پیشنهاد می‌دهد که قورباغه تولیدی جدید صرف‌نظر از ایجاد کاهش یا افزایش در هزینه تولید جایگزین قورباغه قبلی می‌گردد.

شرط پایان چرخه بهینه‌سازی تعریف شده در الگوریتم را می‌توان به صورت تعداد مشخصی اجرای چرخه تعریف کرد که پس از آن تعداد مشخص اجرای الگوریتم، بهترین جواب حاصل شده به عنوان نتیجه بهینه‌سازی ارائه می‌شود.

بعنوان شیوه‌ای دیگر می‌توان شرط خاتمه‌ی الگوریتم را عدم تحصیل بهبود در تعداد مشخصی از چرخه‌های اجرای الگوریتم در نظر گرفت. بدین‌صورت که چنانچه طی چندین مرحله مشخص از اجرای الگوریتم بهبودی در نتایج بدست آمده حاصل نشود بهترین پاسخ بدست آمده که الگوریتم به آن همگرا شده است را بعنوان نتیجه بهینه‌سازی در خروجی قرار دهیم. شکل‌های (۴) و (۵)، روندنمای الگوریتم جهش قورباغه و روندنمای جهش در ممپلکس را نشان می‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، حل مسئله در مدار قرار دادن واحدهای نیروگاه حرارتی بر روی شبکه‌ای دارای ده واحد تولیدی (شبکه۱۰واحدی IEEE) [۱۶] با خصوصیات جدول (۲) و به روش ترکیبی الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی و پخش بار به روش لیست حق تقدم بهبود یافته بوسیله روش عددی تکنیک بهینه‌سازی لاگرانژ اجرا شده است. برنامه‌های کامپیوتری بر روی یک رایانه شخصی با CPU 2.5 GHZi5-2450M و با حافظه RAM 4GB شرکت hp و در محیط نرم‌افزار MATLAB R2011 برنامه‌نویسی و اجرا گردیده است. طول زمان برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است و بار مورد تقاضا نیز براساس جدول (۳) می‌باشد. بار مورد برنامه‌ریزی در ۲۴ ساعته دارای دو نقطه ماکزیمم نسبی سه نقطه مینیمم نسبی است که براساس شکل منحنی تعداد دفعات خاموش و روشن شدن واحدها پنج مرتبه برنامه‌ریزی شده است. در برنامه‌ریزی واحدها برای واحدهای در مدار مدت زمان با عدد مثبت و مدت زمان خاموش بودن با عدد منفی نمایش داده شده است.

۵-۱- حل مسئله در مدار قرار دادن نیروگاه‌های حرارتی با روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه

تعداد جمعیت اولیه به کمک ترکیب الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی و بهره‌مندی از قوانین آن (براساس شکل(۶)) تولید می‌شوند. تعیین جمعیت اولیه قورباغه‌ها بستگی به اندازه‌ی مسئله و پیچیدگی آن دارد. جمعیت اولیه کم ممکن است منجر به عدم دست‌یابی به جواب بهینه و

همگرایی به جوابی شود که آن جواب، پاسخ بهینه مسئله نیست. جمعیت زیاد قورباغه‌ها (تعداد پاسخ‌های ممکن) نیز باعث طولانی شدن رسیدن به پاسخ می‌شود. لذا لازم است تعداد قورباغه‌ها بصورت مناسب انتخاب شود که تشخیص این تعداد مناسب از طریق شناخت مسئله و تجربه و چند بار حل مسئله حاصل می‌شود. برای حل مسئله ۱۰واحد نیروگاهی، جمعیت ۱۰ قورباغه ۳۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ پاسخ اجرا گردید که بهترین پاسخ از تعداد جمعیت ۱۰۰ قورباغه حاصل شد.

روش استفاده از این الگوریتم بدین صورت است که تعداد جمعیت اولیه به کمک ترکیب الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی و بهره‌مندی از قوانین آن بر اساس شکل‌های (۶) تولید، سپس به گروه‌هایی تحت عنوان ممپلکس تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس در هرگ روه عملیات بهینه-سازی صورت گرفته و قورباغه‌ها، بهبود یافته و پس از چند دوره بهبود، مجدداً مرتب‌سازی شده و گروه‌بندی می‌شوند و دوباره عملیات بهینه-سازی در گروه‌ها انجام می‌گردد و بار دیگر مرتب‌سازی و... این عملیات تا دستیابی به جواب بهینه ادامه پیدا می‌کند.

جمعیت اولیه ۱۰۰ قورباغه براساس وزن از کمترین به بیشترین مرتب گردیده و سپس به ۱۰ زیرگروه (ممپلکس) تقسیم شدند بدین صورت که قورباغه با کمترین وزن که پاسخ عمومی قلمداد می‌شود در گروه اول، قورباغه دوم در گروه دوم و به همین ترتیب تا این که قورباغه دهم در گروه دهم قرار گرفت سپس قورباغه یازدهم در گروه یک و... به همین ترتیب تا این که ۱۰۰ قورباغه در ده گروه ده‌تایی تقسیم‌بندی شوند و الگوریتم جاری گردد.

تعداد اعضای گروه، تعداد قورباغه‌هایی که در هر دوره در گروه جهش می‌کنند، و تعداد دوره اجرای جهش قورباغه‌ها در گروه‌ها به مسئله و تجربه نیاز دارد. که براساس چندین بار اجرا قابل دستیابی است. تعداد کل دوره‌های اجرای الگوریتم در جامعه قورباغه‌ها تا رسیدن به پاسخ بهینه بستگی به کیفیت گروه‌بندی، تعداد قورباغه‌ها و فراگیر بودن قورباغه‌ها در محدوده وسیعی از محل زندگی آن‌ها (فضای پاسخ‌های ممکن) دارد.

در این مقاله، تعداد قورباغه‌های جهش یافته در هر گروه در هر مرحله ۵ قورباغه (حداکثر تعداد ممکن جهش در یک گروه با تعداد اعضاء ۱۰ قورباغه) در نظر گرفته شده است. بدین صورت که قورباغه با رتبه ۶ به سمت قورباغه با موقعیت ۱ و قورباغه با وزن ۷ به سمت قورباغه با وزن ۲ و... و نهایتاً قورباغه با موقعیت ۱۰ به سمت قورباغه با موقعیت ۵ در گروه جهش می‌کند. تعداد کل مراحل جهش در گروه ۱۲ بار بوده و سپس کل جامعه قورباغه‌ها مرتب‌سازی شده و مجدداً گروه‌بندی شده و مراحل توضیح داده شده مجدداً اجرا می‌شود. تعداد کل اجرا ۱۵ دوره می‌باشد. از آنجایی که فرآیند اجرای الگوریتم بعضاً منجر به تولید جواب‌های ممکن می‌شود. کل زمان اجرای برنامه از تولید فضای نمونه تا بهینه‌کردن تابع هدف، به طور میانگین ۳۵۰ دقیقه زمان‌بر خواهد بود. فرآیند بهبود تابع هزینه در طی روند نماهای شکل‌های (۴) و (۵)، برای چند گروه بعنوان نمونه در شکل‌های (۷) الی (۱۱) آورده شده است. در شکل‌های (۱۰-۷)، جهش به ترتیب در گروه‌های دهم، هفتم، یکم و پنجم در فرآیند بهبود تابع هزینه نمایش داده شده است. همچنین، در شکل (۱۱) تغییر هزینه قورباغه‌ها در گروه یکم نشان داده شده است. جواب نهایی و بهترین جواب بدست آمده از حل به روش ترکیبی جهش قورباغه و منطق فازی در جداول (۴) و (۵) آمده است.

میانگین هزینه بهینه‌شده با بهره‌مندی از ترکیب الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی طی ۵۰ مرتبه اجرای روش تا حصول همگرایی برای ۱۰ واحد تولیدی جدول (۲) و با بار جدول (۳) مبلغ ۵۶۴۶۲۱/۲۵۳ دلار می‌باشد.

سرعت تولید جواب‌های ممکن در شبکه فازی علاوه بر وابستگی به ذخیره چرخان، وابستگی بسیار زیادی به تعریف محدودیت‌های برگرفته از نتایج تحلیل شرایط منطق فازی دارد ولی با این وجود روند تولید پاسخ و حل نهایی سرعت چشمگیری می‌یابد.

۵-۲- حل مسئله با روش ترکیبی جهش قورباغه-منطق فازی و با بهره‌مندی از پخش اقتصادی بار به روش لیست تقدم/لاگرانژ

این روش علاوه بر سرعت تولید پاسخ‌های ممکن، از بهبود روش‌های پخش اقتصادی بار که از ترکیب عددی لیست حق تقدم و لاگرانژ حاصل شده است استفاده می‌کند. به ازای هر جواب ممکن هزینه توزیع اقتصادی بار وابسته به روش توزیع متفاوت است که ترکیب عددی لیست حق تقدم و لاگرانژ باعث بهبود در پخش اقتصادی بار گردیده است که نتایج حاصله در جدول (۶) نمایش داده شده است.

۵-۳- مقایسه حالت‌های مختلف

۵-۳-۱- سرعت تولید پاسخ ممکن

سرعت تولید پاسخ‌های ممکن در روش ترکیبی الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی بیش‌تر بوده و با استفاده از حدود فازی سرعت تولید پاسخ کنترل‌پذیر نیز می‌باشد. در شرایط مساوی با درنظرگرفتن میزان رزرو ۱۰ درصد تولید، و با لحاظ واحدهای پایه به عنوان واحدهای در مدار و با تولید تصادفی پاسخ در فضای برنامه‌ریزی، بصورت میانگین سرعت تولید جواب ممکن به روش پیشنهادی الگوریتم جهش قورباغه [۹]، یک پاسخ ممکن در ۲۰ دقیقه می‌باشد در حالی که این مدت زمان در روش پیشنهادی مقاله، از ۴۰ ثانیه تجاوز نمی‌کند.

۵-۳-۲-بهبود پخش اقتصادی بار

بهبود روش توزیع بار باعث کاهش هزینه تولید می‌شود که در جدول (۷) و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مقایسه هزینه تولید با روش لیست حق تقدم و روش ترکیبی لاگرانژ و لیست حق تقدم صورت گرفته است.

۵-۳-۳-تاثیر تعداد جمعیت قورباغه‌ها

تعداد جمعیت قورباغه‌ها علاوه بر تاثیر مستقیم در سرعت همگرایی تابع هزینه‌ها، تاثیر بسیار زیادی بر میزان انحراف نتیجه همگرایی تابع هزینه و میزان بهینه دارد. به‌گونه‌ای که با انتخاب تعداد ۲۰ قورباغه، تابع هزینه به طور میانگین به مبلغ ۵۶۵۲۱۳ دلار همگرا گردید.

۵-۴-۳- تأثیر میزان ذخیره چرخان بر هزینه تولید

جدول (۸)، میزان هزینه و سرعت تولید هر جواب ممکن به ازای ایجاد تغییر در میزان مشخص شده ذخیره چرخان را نمایش می‌دهد. سرعت

تولید جواب‌های ممکن در شبکه فازی علاوه بر وابستگی به ذخیره چرخان، وابستگی بسیار زیادی به تعریف محدودیت‌های برگرفته از نتایج تحلیل شرایط منطق فازی دارد.

۵-۳-۵- مقایسه نتایج روش‌های حل مختلف

جدول (۹)، نتیجه اجرای برنامه به روش CFLFLA را نشان می‌دهد و جدول (۱۰)، هزینه کل به روش پیشنهادی با روش‌ها دیگر مقایسه شده است که در شرایط یکسان، روش پیشنهادی CFLFLA نسبت به روش‌های دیگر کم هزینه‌تر می‌باشد [۲،۴،۹و۱۵-۱۱].

Table (2): Operating data for 10 units system.

جدول (۲): اطلاعات واحدهای نیروگاه حرارتی

	واحد ۱	واحد ۲	واحد۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
P_{imax} (MW)	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۸۵	۵۵	۵۵	۵۵
$P_{i\,min}$ (MW)	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۲۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
A_i	۱۰۰۰	۹۷۰	۷۰۰	۶۸۰	۴۵۰	۳۷۰	۴۸۰	۶۶۰	۶۶۵	۶۷۰
B_i	۱۶/۱۹	۱۷/۲۶	۱۶/۶۰	۱۶/۵۰	۱۹/۷۰	۲۲/۲۶	۲۷/۷۴	۲۵/۹۲	۲۷/۲۷	۲۷/۷۹
C_i	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۱۱	۰/۰۰۳۹۸	۰/۰۰۷۱۲	۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۰۴۱۳	۰/۰۰۲۲۲	۰/۰۰۱۷۳
MU_i(h)	۸	۸	۵	۵	۶	۳	۳	۱	۱	۱
MD_i(h)	۸	۸	۵	۵	۶	۳	۳	۱	۱	۱
$Hcost_i$($)	۴۵۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰	۵۶۰	۹۰۰	۱۷۰	۲۶۰	۳۰	۳۰	۳۰
$Ccost_i$($)	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۸۰۰	۳۴۰	۵۲۰	۶۰	۶۰	۶۰
$Chour_i$(h)	۵	۵	۴	۴	۴	۲	۲	۰	۰	۰
Ini. state(h)	۸	۸	۵-	۵-	۶-	۳-	۳-	۱-	۱	۱-

$P_{i\,max}$, $P_{i\,min}$: حداقل و حداکثر توان قابل تولید واحدi

A_i, B_i, C_i: ضرایب مربوط به تابع هزینه

MU_i ، MD_iحداقل زمان‌های روشن بودن و خاموش بودن:

$Hcost_i$،$Ccost_i$: هزینه راه‌اندازی گرم، هزینه راه‌اندازی سرد

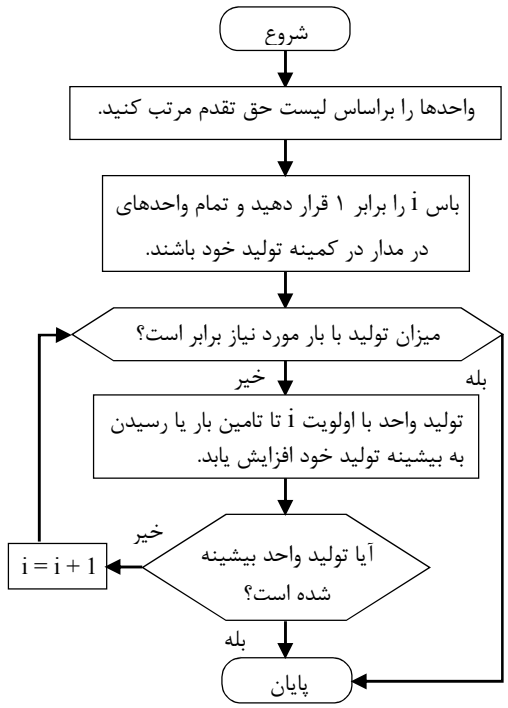
$Chour_i$: مدت زمان راه‌اندازی سرد

Ini state: وضعیت واحد در آخرین دوره قبل از برنامه‌ریزی جاری

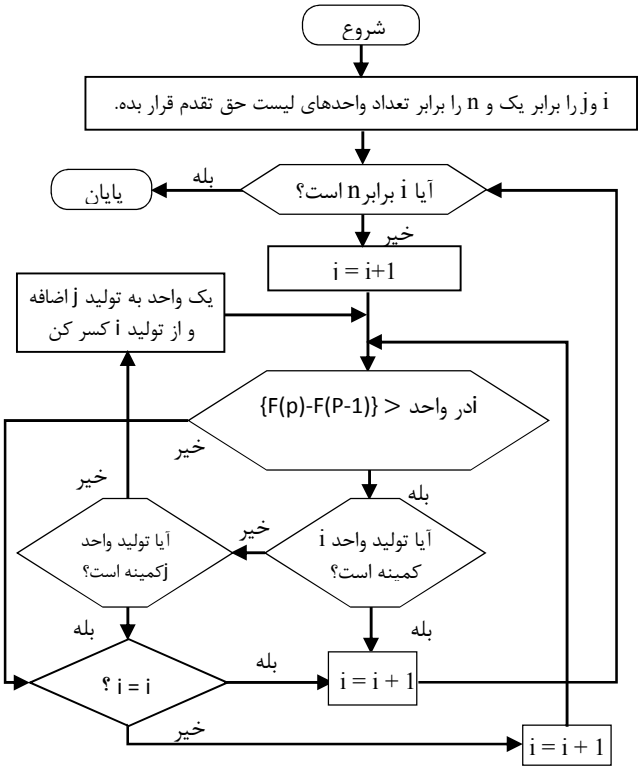
Table (3): Load demand for 24 h

جدول (۳): اطلاعات بار برای ۲۴ ساعت

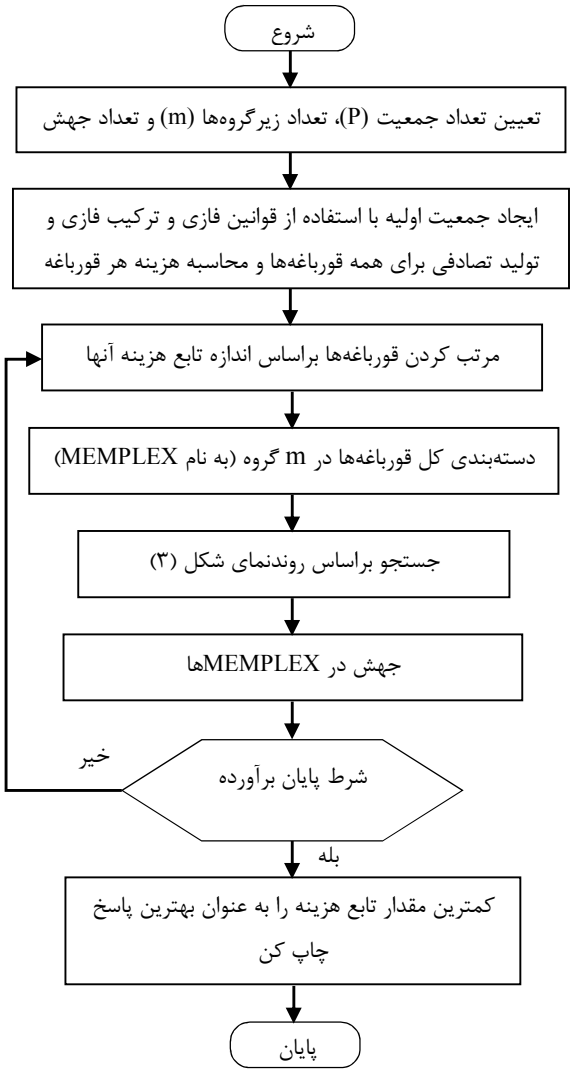
Hour(h)	Load(MW)	Hour(h)	Load(MW)
۱	۷۰۰	۱۳	۱۴۰۰
۲	۷۵۰	۱۴	۱۳۰۰
۳	۸۵۰	۱۵	۱۲۰۰
۴	۹۵۰	۱۶	۱۰۵۰
۵	۱۰۰۰	۱۷	۱۰۰۰
۶	۱۱۰۰	۱۸	۱۱۰۰
۷	۱۱۵۰	۱۹	۱۲۰۰
۸	۱۲۰۰	۲۰	۱۴۰۰
۹	۱۳۰۰	۲۱	۱۳۰۰
۱۰	۱۴۰۰	۲۲	۱۱۰۰
۱۱	۱۴۵۰	۲۳	۹۰۰
۱۲	۱۵۰۰	۲۴	۸۰۰



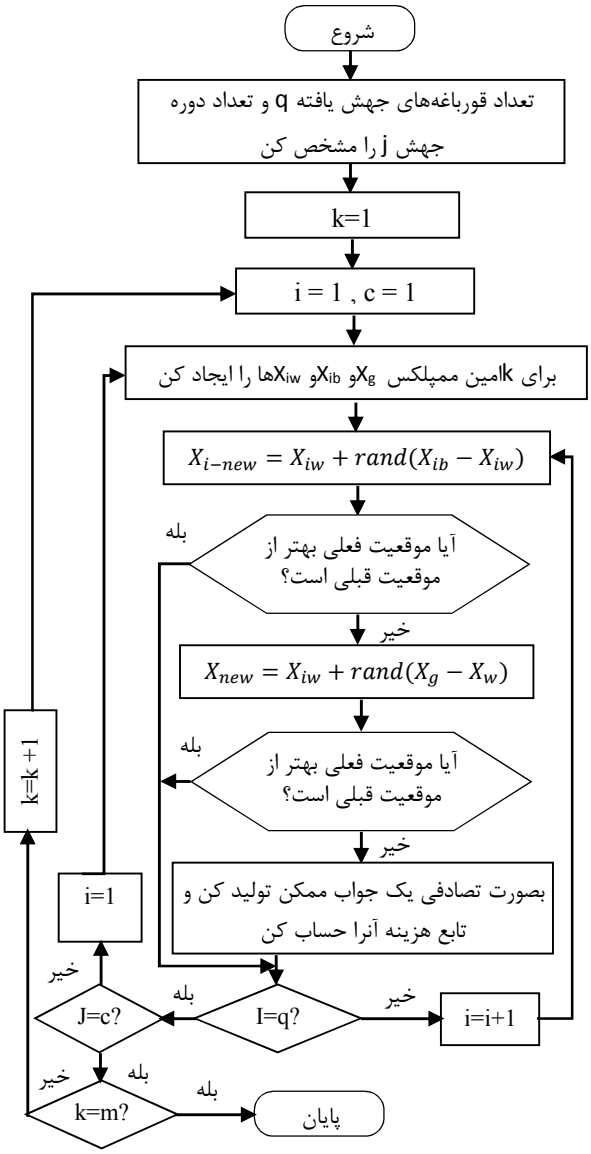
شکل (۲): روند نمای پخش بار براساس لیست حق تقدم
Fig. (2): Flowchart of load dispatch based on priority list.



شکل (۳): روندنمای ترکیب لاگرانژ و لیست حق تقدم
Fig. (3): Flowchart of combined Lagrange and priority list.

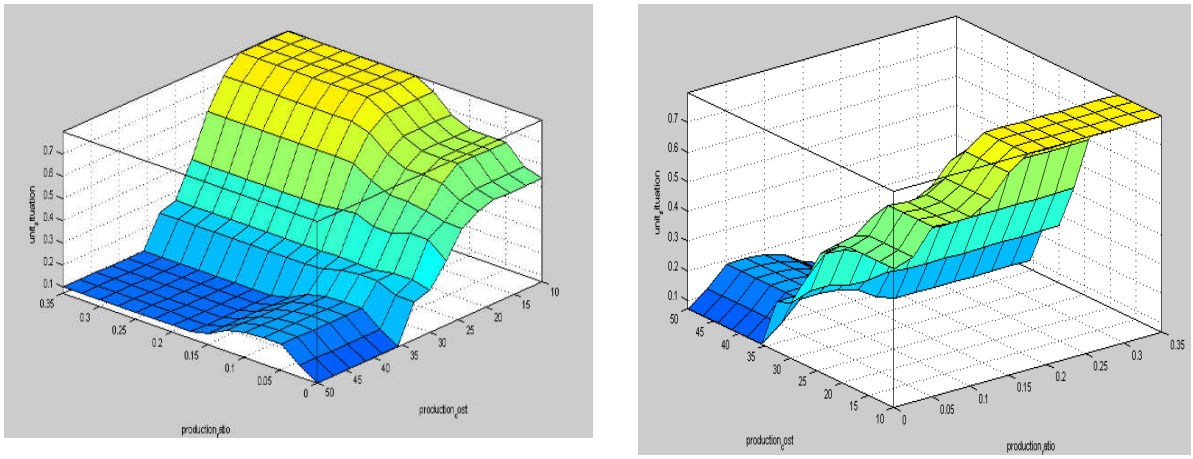


شکل (۴):روندنمای الگوریتم قورباغه[9]
Fig. (4): Flowchart of SFLA [9].



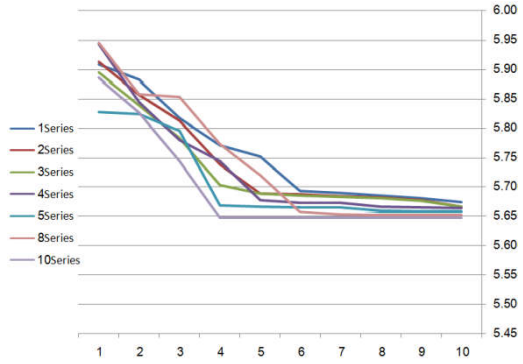
شکل (۵): روندنمای جهش در ممپلکس[9]

Fig. (5): Flowchart of leaping into memeplexe [9].



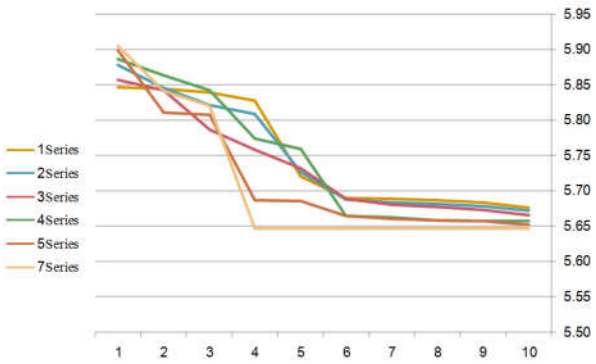
شکل (۶): قوانین فازی

Fig. (6): Fuzzy rules.



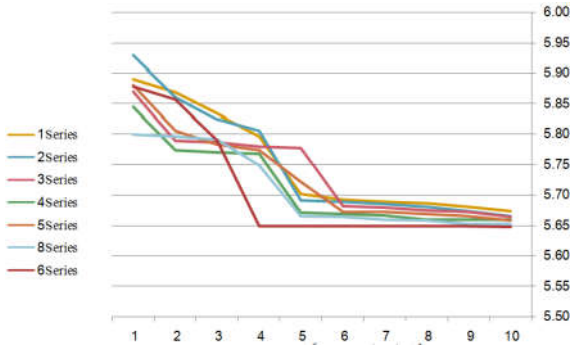
شکل (۸): جهش در گروه هفتم ($\times 10^5$)

Fig. (8): Leaping into 7th group ($\times 10^5$)



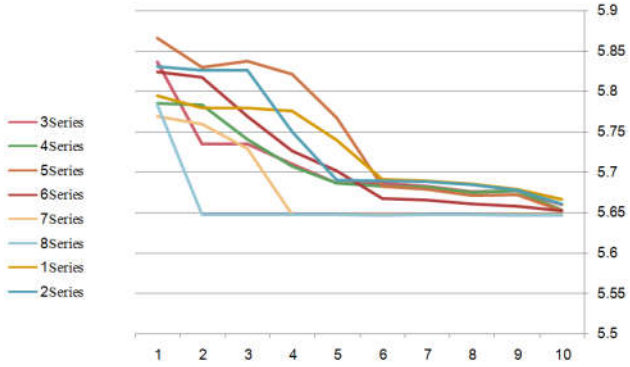
شکل (۷): جهش در گروه دهم ($\times 10^5$)

Fig. (7): Leaping into 10th group ($\times 10^5$)



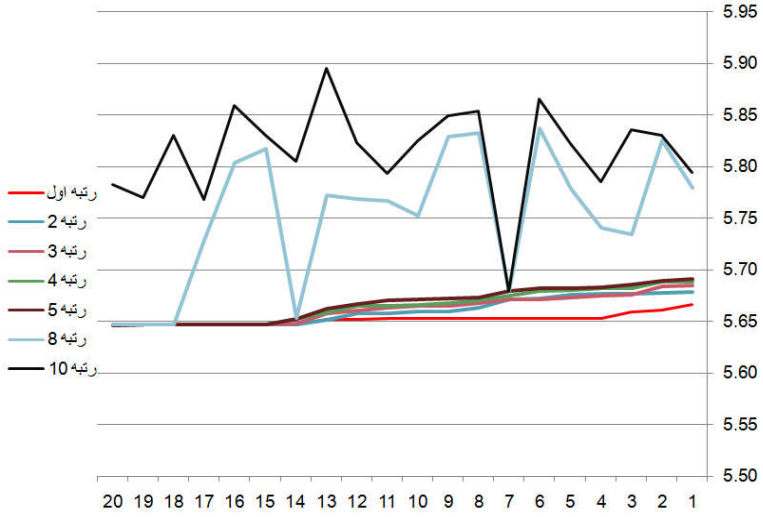
شکل (۱۰): جهش در گروه پنجم ($\times 10^5$)

Fig. (10): Leaping into 5th group ($\times 10^5$)



شکل (۹): جهش در گروه اول ($\times 10^5$)

Fig. (9): Leaping into 1st group ($\times 10^5$)



شکل (۱۱): تغییر هزینه ($\times 10^5$) ($) قورباغه‌ها در گروه یک

Fig.(11): Changing cost of frogs into 1st group ($\times 10^5$) ($)

Table (4): Optimal cycle of combined fuzzy logic and frog leaping algorithm (CFLFLA)

جدول (۴): سیکل بهینه ترکیب منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه

	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
سیکل ۱	۲۴	۲۴	۵-	۴-	۲-	۸-	۸-	۹-	۱۰-	۱۱-
سیکل ۲	۰	۰	۱۶	۱۷	۲۰	۶	۶	۴	۲	۱
سیکل ۳	۰	۰	۳-	۳-	۲-	۵-	۵-	۶-	۱۲-	۱۲-
سیکل ۴	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۳	۱	۰	۰
سیکل ۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱-	۲	۴-	۰	۰

Table (5): Resulted cycles from FLA and fuzzy logic

جدول (۵): سیکل‌های منتج از الگوریتم جهش قورباغه و منطق فازی

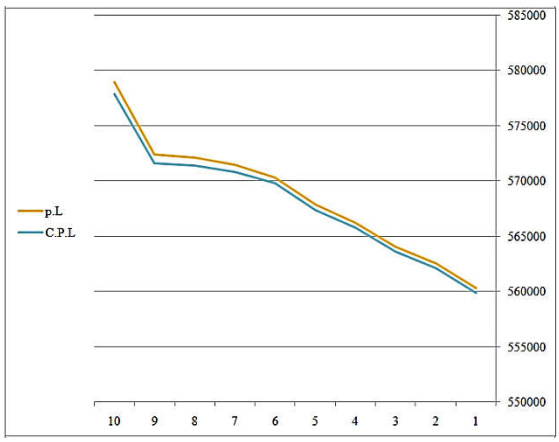
Frog[24,0,0,0,0,24,0,0,0,0,-4,18,-2,0,0,-5,16,-3,0,0,-2,21,-1,0,0,-8,6,-4,3,-3,-8,6,-5,3,-2,-9,4,-6,1,-4,-10,2,-12,0,0,-11,1,-12,0,0]

unit	cycle 1	2	3	4	5	Hourly schedule 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	T_1^1	T_1^2	T_1^3	T_1^4	T_1^5																								
	24	0	0	0	0																								
2	T_2^1	T_2^2	T_2^3	T_2^4	T_2^5																								
	24	0	0	0	0																								
3	T_3^1	T_3^2	T_3^3	T_3^4	T_3^5																								
	-5	16	-3	0	0																								
4	T_4^1	T_4^2	T_4^3	T_4^4	T_4^5																								
	-4	17	-3	0	0																								
5	T_5^1	T_5^2	T_5^3	T_5^4	T_5^5																								
	-2	20	-2	0	0																								
6	T_6^1	T_6^2	T_6^3	T_6^4	T_6^5																								
	-8	6	-5	4	-1																								
7	T_7^1	T_7^2	T_7^3	T_7^4	T_7^5																								
	-8	6	-5	3	-2																								
8	T_8^1	T_8^2	T_8^3	T_8^4	T_8^5																								
	-9	4	-6	1	-4																								
9	T_9^1	T_9^2	T_9^3	T_9^4	T_9^5																								
	-10	2	-12	0	0																								
10	T_{10}^1	T_{10}^2	T_{10}^3	T_{10}^4	T_{10}^5																								
	-11	1	-12	0	0																								

Table (6): Comparison of generation cost with priority list method and combined priority list-Lagrange.

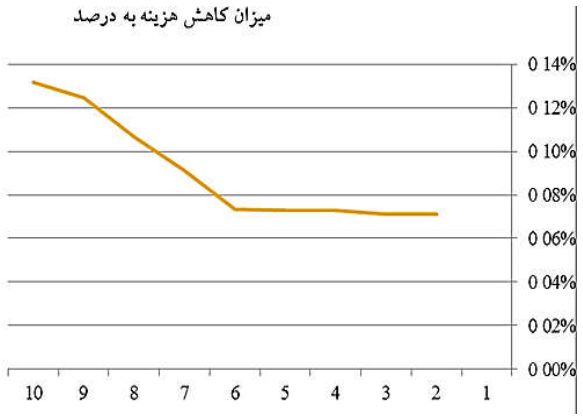
جدول (۶): مقایسه هزینه تولید با روش لیست حق تقدم و روش ترکیبی لاگرانژ و لیست حق تقدم

	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
هزینه تولید با روش لیست حق تقدم($)	۵۶۰۳۰۱	۵۶۲۵۶۱	۵۶۴۰۳۱	۵۶۶۲۲۸	۵۶۷۸۲۸	۵۷۰۳۳۰	۵۷۱۴۲۰	۵۷۲۱۲۱	۵۷۲۳۵۱	۵۷۸۹۳۱
هزینه تولید با ترکیب لاگرانژ و لیست قدم($)	۵۵۹۹۰۲	۵۶۲۱۶۰	۵۶۳۶۲۱	۵۶۵۸۱۶	۵۶۷۴۱۱	۵۶۹۸۱۰	۵۷۰۸۱۰	۵۷۱۴۱۱	۵۷۱۶۰۰	۵۷۷۸۹۱
میزان کاهش هزینه($)	۳۹۹	۴۰۱	۴۱۰	۴۱۲	۴۱۷	۵۲۰	۶۱۰	۷۱۰	۷۵۱	۱۰۴۰



شکل (۱۲): مقایسه هزینه تولید($) روش لیست تقدم (PL) و روش ترکیبی حق تقدم و لاگرانژ (CPL) در ده واحد تولیدی (دلار)

Fig. (12): Comparison of generation cost of priority list method (PL) and combined priority and Lagrange (CPL).



شکل (۱۳): درصد کاهش هزینه تولید در استفاده از روش ترکیبی لاگرانژ و لیست حق تقدم نسبت به استفاده از لیست حق تقدم

Fig. (13): Percentage reduction in generation cost in using combined Lagrange and priority list method compared to using the priority list.

Table (6): Load dispatch of units based on combined priority list and Lagrangemethod

جدول (۶): پخش بار (MW) براساس ترکیب عددی لیست حق تقدم و روش لاگرانژ

ساعت / واحد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
واحد ۱	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۴	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۳	۴۵۴	۴۵۴	۴۵۴
واحد ۲	۲۴۵	۲۹۵	۳۷۰	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
واحد ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰
واحد ۴	۰	۰	۰	۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰
واحد ۵	۰	۰	۲۶	۴۰	۲۵	۲۵	۲۵	۳۰	۸۵	۱۶۲	۱۶۲	۱۶۲
واحد ۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱	۳۳	۷۳	۸۰
واحد ۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۶	۲۵	۲۵	۲۵
واحد ۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱	۱۰	۴۳
واحد ۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱	۱۰
واحد ۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱
ساعت / واحد	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
واحد ۱	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵
واحد ۲	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۳۱۰	۲۶۰	۳۶۰	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۳۸۵	۴۲۵	۳۴۵
واحد ۳	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۰
واحد ۴	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰	۰
واحد ۵	۱۶۲	۸۵	۳۰	۲۵	۲۵	۲۵	۳۰	۱۶۲	۸۵	۱۴۵	۰	۰
واحد ۶	۳۳	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳	۲۰	۲۰	۲۰	۰
واحد ۷	۲۵	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۲۵	۲۵	۰	۰
واحد ۸	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰
واحد ۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
واحد ۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

Table (8): Effect of spinning reserve value in generation cost and computation times.

جدول (۸): تاثیر میزان ذخیره چرخان در سرعت حل و کاهش هزینه تولید در بار ثابت

میزان ذخیره(درصد بار)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
میزان هزینه تولید در ۲۴ ساعت($)	۵۵۷۰۱۱	۵۵۷۱۰۰	۵۵۷۵۹۰	۵۶۰۰۷۱	۵۶۱۷۵۰	۵۶۲۶۱۱	۵۶۳۰۹۲	۵۶۵۹۹۴
میانگین سرعت تولید یک جواب ممکن(sec)	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۸	۲۱

Table (9): Execution of CFL-FLA method.

جدول (۹): اجرای روش CFLFLA

زمان اجرای برنامه (Sec)	هزینه کل($)	تعداد قورباغه‌ها
۲۱/۰۰	۵۶۳۹۹۵/۵	۱۰۰

Table (10): comparison of total cost in different solution methods.

جدول (۱۰): مقایسه هزینه کل($) در روش‌های حل مختلف

تعداد واحدها	LR [۷]	ICGA [۷]	BF [۷]	SFLA	CFLFLA
۱۰	۵۶۵۸۲۵	۵۶۶۴۰۴	۵۶۴۸۴۲	۵۶۴۷۶۹	۵۶۳۹۹۵/۵

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از الگوریتم ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جهش قورباغه برای در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی استفاده شد. همچنین، ضمن بررسی تاثیر میزان تغییرات هزینه‌ی تولید بر اساس تغییر در میزان ذخیره‌ی گردان، در توزیع بار از روشی ابتکاری تحت عنوان ترکیب عددی روش لاگرانژ و روش لیست حق تقدم استفاده شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش CFLFLA در حل مسئله UC نشان می‌دهد علاوه بر اینکه استفاده از منطق فازی سرعت تولید پاسخ‌های ممکن را افزایش می‌دهد، با تغییر در شرایط فازی می‌توان سرعت تولید پاسخ ممکن را تحت تاثیر قرار داد. همچنین، روش پیشنهادی سرعت دستیابی به پاسخ روش الگوریتم جهش قورباغه را بهبود داده، و نشان داد که تعداد مناسب جمعیت جامعه قورباغه‌ها در همگرایی الگوریتم به پاسخ بهینه حائز اهمیت فراوان است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که میزان ذخیره چرخان هم در سرعت رسیدن به پاسخ و هم در کاهش هزینه‌ی تولید تاثیر مستقیم داشته، و استفاده از روش پخش بار لیست حق تقدم /لا گرانژ، هزینه‌های تولید را نسبت به لیست حق تقدم کاهش می‌دهد.

پی‌نوشت:

1. Combined Fuzzy Logic Frog Leaping Algorithm
2. Unit Commitment
3. Memeplex

References

[1] C.P. Cheng, L. Chun and C.W liu, “Unit commitment by lagrangian relaxation and genetic algorithm”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No 2, pp.707-714, May 2000,

[2] Q. Jiang, M. Zhang, B. Zhou B., “Parallel augment lagrangian relaxation method for transient stability constrained unit commitment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp.1140-1148, Oct. 2013.

[3] M. Amani, E. Zonkoly, "Multistage expansion planning for distribution network including unit commitment", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 7, Iss.7, pp.766-778, July 2013.

[4] I.G. Domousis, P.S. Dokopoulos, A.G. Bakirtsis, "A solution to unit-commitment using intiger coded – genetic algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 388-399, May 2004.

[5] Y. Jeong, J. Park, S. Jang, K. Lee, "A new quantum-inspired binary PSO: Application to unit commitment problem for power system", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 3, pp. 486-1495, Aug. 2010.

[6] G. Morales, M. Latorre, "Tight and compact MILP formulation of start up and shut_down ramping in unit cummitment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp.1288-1296, May 2013.

[7] S.P. Simon, K. Chandrasekaran, "Multi-objective unit commitment problem with reliability function using fuzzified binary real coded artificial bee colony algorithm", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 6, No. 10, pp.1060-1073, Oct. 2012.

[8] M. Moghimi, B. Vahidi, "A solution to the unit commitment problem using imperialist competition algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, No. 1, pp.117-124, Feb. 2012.

[9] J. Ebrahimi, S.H. Hossienian, G.B. Gharehpetian, “Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp. 573-580, May 2011,

[10] W. Lei, "A tighter piecewise linear approximation of quadratic cost curve for unit commitment problem", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2581-2589, Nov. 2011.

[11] H. Anand, N. Narang, J.S. Dhillon., "Profit based unit commitment using hybrid optimization technique", Energy, Vol. 148, pp. 701-715, April 2018.

[12] Y. Wu, H. Chang, S. Chang, "Analysis and comparison for the unit commitment problem in a large-scale power system by using three meta-heuristic algorithms", Energy Procedia, Vol. 141, pp. 423-427, Dec. 2017.

[13] M. Nemati, M. Braun, S. Tenbohlen, "Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming", Applied Energy, Vol. 210, pp. 944-963, Jan. 2018.

[14] G.V. SubbaReddy, V. Ganesh, R.C. Srinivasa, "Implementation of genetic algorithm based additive and divisive clustering techniques for unit commitment", Energy Procedia, Vol. 117, pp. 493-500, June 2017.

[15] N.P. Padhy, "Unit commitment – A bibiogrphical survey", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1196-1205, May 2004.

[16] S.A. Kazarlis, A.G. 8akirtzis, V. Petridis. "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem",, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, Feb. 1996.