

# برنامه ریزی توان راکتیو چند هدفه در شبکه های قدرت با استفاده از روش کلونی مورچه شتاب یافته و وزن دهی سلسله مراتبی

رضا قاضی

استاد دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

ابوالفضل عرب پور

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۸۴/۲/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۶/۵، تاریخ تصویب ۸۵/۷/۸)

## چکیده

این مقاله حل مساله برنامه ریزی توان راکتیو را با استفاده از روش کلونی مورچه شتاب یافته (AAC)<sup>۱</sup> ارائه می دهد. این روش که از روشهای هوشمند می باشد در حل پاره ای از مسائل سیستمهای قدرت بکار رفته است لیکن تا کنون برای حل مساله برنامه ریزی توان راکتیو مورد استفاده قرار نگرفته است. در این مقاله ضمن استفاده از یک تابع هدف چند منظوره با روش وزن دهی فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)<sup>۲</sup> و بکار گیری روش کلونی مورچه، از تمامی امکانات کنترل VAR موجود در شبکه به بهترین شکل ممکن در حل برنامه ریزی توان راکتیو استفاده شده است تا اینکه هزینه کمتری را در برداشته باشد. جهت نشان دادن کارایی روش الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه های اصلاح شده ۱۴ و ۳۰ باس IEEE پیاده سازی شده است. نتایج مربوط به شبکه ۳۰ باس اصلاح شده IEEE با نتایج مربوط به حالت ۲ مقاله [۱] که باروش باز پخت فلزات (SA)<sup>۳</sup> انجام شده است مقایسه گردیده است.

**واژه های کلیدی:** برنامه ریزی توان راکتیو، روش کلونی مورچه (AC)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

## مقدمه

هزینه های خریداری، نصب و نگهداری منابع جدید توان راکتیو که در شبکه نصب می شوند، می باشد. هزینه بهره برداری بصورت هزینه تلفات توان راکتیو در نظر گرفته و در پی مینیمم کردن این هزینه می باشند. قیودی که در مساله برنامه ریزی توان راکتیو وجود دارند به صورت زیر می باشند:

۱- قیود بار: عبارتند از معادلات پخش توان راکتیو و راکتیو که همان معادلات مرسوم پخش بار می باشند و برای هر سطح باری در شبکه قدرت باید برقرار باشند.  
۲- قیود بهره برداری: این قیود بیشتر به مسائل فیزیکی و ظرفیت عناصر شبکه قدرت بر می گردد که عبارتند از:

- حدود جریان خط
- حدود تغییرات اندازه ولتاژ
- محدودیت تولید توان های اکتیو و راکتیو ژنراتورها
- تغییرات تپ ترانسفورماتورها

مساله برنامه ریزی بهینه توان راکتیو یکی از موضوعات مهم در شبکه های قدرت می باشد. هدف از برنامه ریزی توان راکتیو (VAR) تأمین منابع توان راکتیو کافی در سیستم قدرت است طوری که قادر باشد در شرایط اقتصادی مورد بهره برداری قرار گیرد.

مساله برنامه ریزی توان راکتیو به صورت تعیین بهینه مکان، نوع و اندازه منابع جدید توان راکتیو برای دستیابی به اهداف مورد نظر شامل کاهش تلفات و حداقل کردن هزینه سرمایه گذاری و کاهش انحراف ولتاژ و ... در حالت کار عادی و پیشامدهای احتمالی شبکه، با در نظر گرفتن یک سری قیود می باشد. لذا مساله برنامه ریزی توان راکتیو را می توان به صورت یک مساله بهینه سازی بیان کرد که شامل تابع هدف و قیود می باشد.

برای حل این مساله توابع هدف مختلفی را می توان در نظر گرفت. در اکثر مقالات مساله برنامه ریزی توان راکتیو به صورت مینیمم کردن هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری به شرط قیود سرمایه گذاری و بهره برداری در نظر گرفته شده است. هزینه سرمایه گذاری شامل

در این مقاله از روش کلونی مورچه شتاب یافته در حل مسأله برنامه ریزی توان راکتیو استفاده شده است. این روش برگرفته از طبیعت و چگونگی حرکت مورچه‌ها می‌باشد. با انتخاب مناسب پارامترهای مربوط به روش، الگوریتم به جواب بهینه کلی همگرا خواهد شد.

در حل مسأله برنامه ریزی توان راکتیو، اگر کل باس‌های شبکه برای نصب منابع جدید کاندید باشند، حجم محاسبات بالا رفته و حتی ممکن است در شبکه‌های بزرگ به جواب مطلوب نرسد. در عمل بسیاری از باس‌ها، نیازی به کاندید شدن ندارند و می‌توانند از ملاحظه و بررسی حذف شوند. برای کاهش حجم محاسبات، یک گزینش مقدماتی باید انجام گیرد تا تعداد مکانهای اختیاری برای نصب منابع توان راکتیو مینیمم شود. بنابراین نیاز است که باس‌های کاندید برای نصب منابع جدید توان راکتیو مشخص گردند. معیارهایی برای تعیین باس‌های کاندید گزارش شده است [۲، ۳، ۸]. در این مقاله، معیار باس ضعیف و باس بار سنگین به عنوان معیار تعیین باس‌های کاندید در نظر گرفته شده است.

باس ضعیف، باسی است که احتمال ناپایداری ولتاژ در آن به هر دلیلی بیشتر باشد. در معیار باس ضعیف، باس ضعیف را بعنوان باس نامزد انتخاب می‌کنیم. معیار دیگر برای تعیین باس‌های کاندید معیار باس بار سنگین<sup>۹</sup> می‌باشد. این معیار بر اساس یک مفهوم شهودی است. یک باس بار سنگین معمولاً یک باس خیلی حساس به ولتاژ می‌باشد. در این معیار، باس بارهای سنگین به عنوان باس‌های کاندید برای نصب منابع جدید در نظر گرفته می‌شوند.

### فرمول بندی مسأله

در مرحله اول حل مسأله برنامه ریزی توان راکتیو تابع هدف به صورت مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره برداری در نظر گرفته شده است. تابع هدف و قیود مسأله را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$\text{Min} ((d_i + q_{ci} S_{ci} + q_{ri} S_{ri}) + Ke \sum_{l \in m} D_l P_{loss,l}) \quad (1)$$

که در آن  $d_i$  هزینه ثابت نصب در باس  $i$  ام،  $q_{ci}$  تعداد منابع خازنی نصب شونده در باس  $i$  ام،  $q_{ri}$  تعداد منابع

۳- قیود سرمایه‌گذاری: قیود سرمایه‌گذاری را می‌توان با حدود اندازه منابع توان راکتیو جدیدی که باید نصب شوند نشان داد.

۴- قیود پیشامد های احتمالی: قیود مربوط به پیشامد های احتمالی، قیود پخش بار و بهره برداری هستند. یعنی در هنگام وقوع پیشامد احتمالی نیز باید قیود پخش بار و بهره برداری سیستم برقرار باشند.

با توجه به اینکه حدود و تغییرات ولتاژ به صورت یک قید وارد مسأله می‌شود ولتاژ باس می‌تواند به حد ماکزیمم کاهش برسد که احتمال ناپایداری ولتاژ در آن باسها را افزایش می‌دهد. این مسأله بخصوص در سیستم های قدرت تحت استرس که در سالهای اخیر بدلیل مسائل اقتصادی مطرح است حائز اهمیت می‌باشد. لذا در این مقاله دو تابع هدف دیگر یعنی افزایش امنیت سیستم و حداقل کردن انحراف ولتاژ باسها منظور شده است و مسأله تحت عنوان برنامه ریزی چند هدفه بررسی شده است. در گذشته در حل این مسأله یک تابع هدف بصورت تابع اصلی و توابع دیگر بصورت قید در نظر گرفته می‌شده و بهینه سازی انجام می‌گرفته است. پیاده سازی چنین روشی برای حل مسائل بهینه سازی مقید چند هدفه که غیر قابل مشتق گیری بوده و فضای حل غیرمحدب می‌باشد مشکل است.

$$P_i - V_i \sum_{j \in N_B} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_i - V_i \sum_{j \in N_B} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$q_{ri}^{\min} \leq q_{ri} \leq q_{ri}^{\max} \quad i \in N_r$$

$$q_{ci}^{\min} \leq q_{ci} \leq q_{ci}^{\max} \quad i \in N_c$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i \in N_g$$

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad k \in N_T$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N_B$$

روشهای هوشمند زیادی برای حل این مسأله استفاده شده است. روشهای فازی، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بازپخت فلزات (SA)، استراتژی تکاملی (ES)<sup>۴</sup>، برنامه ریزی تکاملی (EP)<sup>۵</sup> و جستجوی ممنوع (TS)<sup>۶</sup> روش‌هایی هستند که تا بحال در حل مسأله برنامه ریزی توان راکتیو بکار رفته است [۵-۱]. روش کلونی مورچه از جمله روشهای هوشمندی است که در حل بعضی مسائل سیستم قدرت نظیر مسأله جایابی خازن<sup>۷</sup> [۶] و در مدار قرار گرفتن نیروگاهها<sup>۸</sup> [۷] استفاده شده است.

[۱۰]:

$$X \Leftrightarrow \{b_N, b_{N-1}, \dots, b_1\} \quad (2)$$

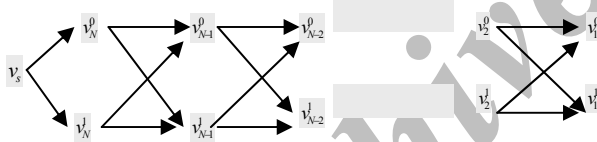
که  $b_j \in \{0,1\}$  برای  $j=1,2,\dots,N$  کم ارزش ترین بیت و  $b_N$  با ارزش ترین بیت در رشته است. یک گراف جهت دار  $C=(V,S)$  تعریف می شود که در آن:

$$V = \{v_s, v_N^0, v_{N-1}^0, \dots, v_1^0, v_N^1, v_{N-1}^1, \dots, v_1^1\} \quad (3)$$

و  $S$  مجموعه کمانهای جهت دار می باشد.

$$S = \{ (v_N^0, v_{N-1}^0), \dots, (v_j^0, v_{j-1}^0), (v_j^1, v_{j-1}^1), (v_j^1, v_{j-1}^0), \dots, (v_2^1, v_1^1) \} \quad (4)$$

که گره  $v_s$ ، گره اولیه یکتایی است. گره های  $v_j^0$  و  $v_j^1$  برای هر  $j$  به ترتیب، دو وضعیت ۰ و ۱ برای بیت  $b_j$  نمایش می دهند. از هر یک از گره های  $v_j^0$  و  $v_j^1$  برای  $j=1,2,\dots,N$  فقط و فقط دو کمان متصل به گره های  $v_{j-1}^0$  و  $v_{j-1}^1$  وجود دارند. گراف جهت دار توصیف شده در بالا را می توان به صورت شکل (۱) نشان داد:



شکل ۱: نمودار گراف جهت دار.

بنابراین مساله بهینه سازی سیستم غیر خطی پیچیده به یک مساله جستجو روی گراف جهت دار  $C$  برای جستجوی بهترین مسیر، در میان همه مسیرهای جهت دار با شروع از  $v_s$  و ختم شده به  $v_1^0$  یا  $v_1^1$  تبدیل می شود. مورچه  $A_i$  از یک مجموعه کولونی مورچه مصنوعی  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  جستجو را از گره  $v_s$  شروع کرده و از یک به یک  $N$  مسیر ساخته شده (کمان های جهت دار متصل بهم)، به شکل یک مسیر  $W_i$  شامل ترتیب گره ها به صورت  $\{v_N^{i_N}, v_{N-1}^{i_{N-1}}, \dots, v_1^{i_1}\}$  برای  $i_1, i_2, \dots, i_N \in \{0,1\}$  (که برابر با یک رشته باینری  $\{b_N^i, b_{N-1}^i, \dots, b_1^i\}$  که  $b_j^i \in \{0,1\}$  برای  $j=1,2,\dots,N$  می باشد) عبور می کند.  $k$  رشته  $N$  بیتی بدست آمده توسط هر مورچه را به رشته های  $M$  بیتی

سلفی نصب شونده در باس  $i$  ام،  $S_{ci}$  هزینه هر بانک خازنی،  $S_{ri}$  هزینه هر بانک سلفی،  $Ke$  هزینه پریونیت انرژی،  $D_l$  پرپود دوام سطح بار  $l$ ،  $P_{loss,l}$  تلفات توان اکتیو شبکه در پرپود سطح بار  $l$ ،  $Q_{gi}$  توان راکتیو ژنراتور  $i$  ام،  $T_k$  تب ترانسفورماتور  $k$  ام و ولتاژ باس  $i$  ام می باشند.

## روش کولونی مورچه

نظریه رفتار مورچه ها برای یافتن جوابهای مسائل بهینه سازی، توسط کولونی<sup>۱۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار مطرح شد [۹]. این روش بهینه سازی بر اساس رفتار مورچه های واقعی می باشد. یکی از مسائل مورد مطالعه این بود که چگونه موجودات تقریباً کور شبیه مورچه ها می توانند کوتاهترین مسیرها از کولونی هایشان به منابع تغذیه و بر عکس را پیدا کنند. پی برده شد که باید یک ارتباط اطلاعاتی بین مورچه های مسیرها وجود داشته باشد که مورچه ها، مسیرهای خود را انتخاب کنند. متوجه شدند که این ارتباط اطلاعاتی بین مورچه ها با ریختن مقداری فرمون<sup>۱۱</sup>، روی زمین می باشد. هنگامی که یک مورچه به طور تصادفی در یک مسیری حرکت می کند، مورچه بعدی اثر ریخته شده فرمون قبلی را کشف می کند و به احتمال زیاد تصمیم به دنبال کردن آن می کند. بنابراین فرمون قبلی مسیرها را با ریختن فرمون خود تقویت می کند. این کار برای همه مورچه ها ادامه می یابد تا سرانجام همه مورچه ها، مسیر کوتاه تر (به علت فرمون بیشتر آن مسیر) را انتخاب می کنند. اگر مساله بهینه سازی را بتوان بصورت زیر فرموله کرد:

$$\text{Min } J = f(x)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad ; \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$$

بعنوان قدم اول در حل این مساله می توان پاسخ  $x$  را بصورت یک رشته باینری به طول  $N$  بیان کرد. لذا با توجه به حداقل و حداکثر منبعی که می توان در یک باس کاندید نصب کرد یک رشته باینری با  $M$  بیت انتخاب می شود. هر بیت از این رشته می تواند یک یا صفر باشد. با کنار هم گذاشتن این رشته های  $M$  بیتی (به تعداد باسهای کاندید) یک رشته  $N$  بیتی را تشکیل می دهیم. رشته باینری به طول  $N$  را به صورت زیر بیان می کنیم

باعث رسیدن به بهترین جواب نشود، زیرا برای بدست آوردن جواب مورد نظر (با یک مقدار هدف کوچکتر) جستجو در پیوند بعدی باید در ناحیه محدودی در اطراف آن جواب به منظور بالا بردن سرعت همگرایی انجام شود. برای بدترین جواب کاندید (با یک مقدار هدف بزرگتر)، در پیوند بعدی یک جستجوی بزرگتر باید برای بهینه سازی سراسری در نظر گرفته شود.

با توجه به مطالب بالا، استراتژی تخصیص افزایش فرومون برای تسریع در روش جستجو، با ریختن فرومون افزایشی  $\Delta\varphi$  روی بخش مسیر  $\{v_i, v_j\}$ ، به کمک قانون زیر بهبود داده شده است:

$$\Delta\varphi_{i,j}(f_s(t), k) = \frac{1}{1 + e^{\beta \cdot k \cdot f_s(t) \cdot (f_s(t) - (f_{\min}(t) + \delta))}} \quad (6)$$

که  $f_{\min}(t)$  مینیمم مقدار هدف تعیین شده در تکرار  $t$  ام (آخرین تکرار تا تکرار جاری)،  $f_s(t)$  مقدار تابع هدف مربوط به مسیر  $\{v_i, v_j\}$  که مورچه  $A_s$  در گردش جستجوی  $t$  ام از آن گذشته است،  $K$  موقعیت بیت ترسیم شده مربوط به یک گره در گراف  $C$  و  $\beta$  و  $\delta$  پارامترهای مثبت قابل تنظیم هستند.

با توجه به معادله (۵) برای جواب کاندید بدتر، احتمال کمتری در انتخاب بخش مسیر مربوط به آن توسط مورچه‌ها وجود دارد. در پیوند جستجوی بعدی، مورچه‌ها یک جستجو با مقیاس کوچکتر در اطراف جواب کاندید اصلی، به منظور استفاده از اطلاعات ارزیابی شده در پیوند جستجوی قبلی را انجام می‌دهند.

همگرایی الگوریتم کلونی مورچه پیشنهاد شده برای تعداد زیاد مورچه‌ها (به اندازه کافی مورچه) و به شرط کوچک بودن مقدار ضریب تبخیر فرومون، ضمانت شده و موارد زیر برآورده می‌شوند:

۱- جواب بهینه مساله بهینه سازی یکتا بوده و بوسیله فقط یک مسیر (بهینه) در گراف جهت دار  $C$  حاصل می‌شود.

۲- یک استراتژی معروف به حفظ نخبان بکار می‌رود [۵]، یعنی فقط مسیریایی که در لیست بهترین مسیریهای پیدا شده توسط یک مورچه تا تکرار جاری قرار گرفته‌اند، یک مقدار افزایش فرومون مثبت می‌گیرند و داریم:

$$\forall f'_s(t) \leq f_s(t) \rightarrow \Delta\varphi_{i,j}(f'_s(t), k) \geq \Delta\varphi_{i,j}(f_s(t), k) \quad (7)$$

تقسیم می‌کنیم. برای بدست آوردن تعداد بانک‌هایی که باید در باس مورد نظر نصب کرد، رشته  $M$  بیتی با توجه به فرمول زیر به مقدار مبنای ده تبدیل می‌شود:

$$\phi(W_i) = \{b_M^i \ b_{M-1}^i \ \dots \ b_1^i\} \Leftrightarrow x_i = \frac{X_i}{2^M - 1} \cdot (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min} \quad (8)$$

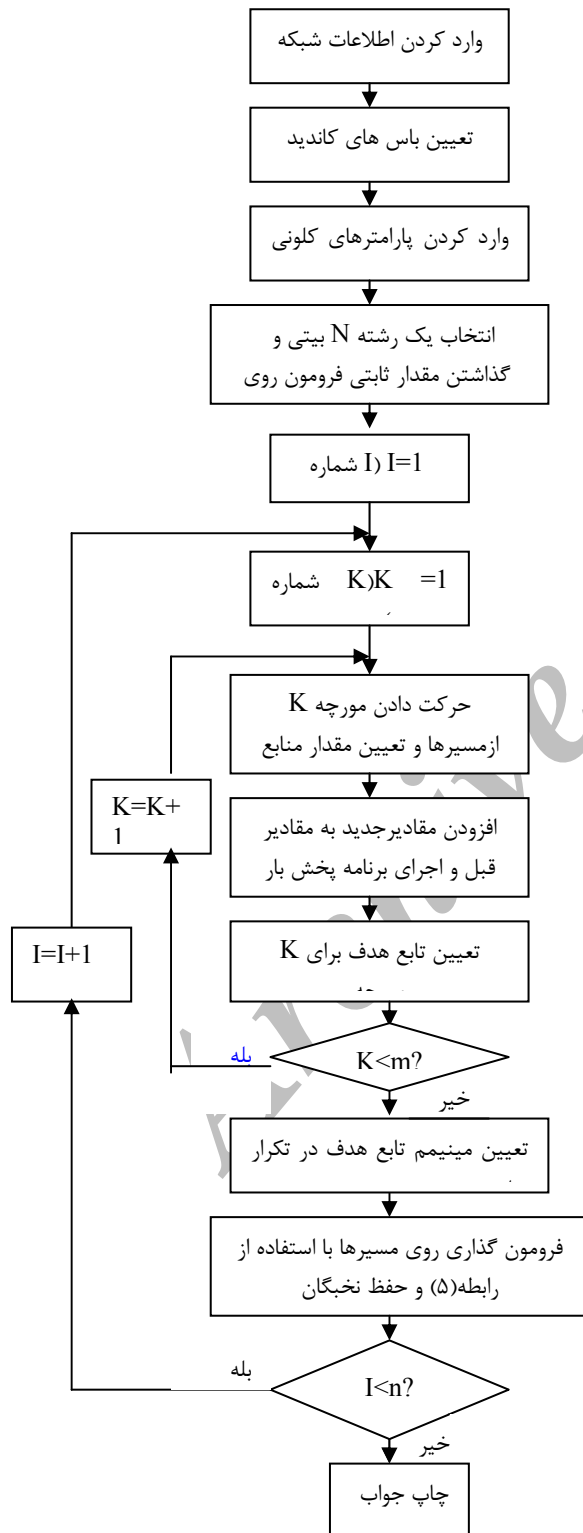
که  $X_i$  مقدار دسیمال برای رشته  $\{b_N^i \ b_{N-1}^i \ \dots \ b_1^i\}$  است. برای ضمانت این که همه مسیرهای ممکن، جستجو می‌شوند (برآوردن قید  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ )،  $x_i$  به صورت معادله بالا بیان می‌شود. با توجه به اینکه منابعی که باید در باسهای کاندید نصب شوند بصورت بانک می‌باشند، مقدار مبنای ده بدست آمده بالا را گرد می‌کنیم تا تعداد بانک‌هایی که باید در باس کاندید مورد نظر نصب شوند حاصل شود.

هر مورچه سفر خود را از حالت اتفافی شروع می‌کند. به هر گره که می‌رسد، یکی از دو مسیر جهت‌دار از گره را با احتمال  $p$  (در تکرار اول با احتمال  $1/2$ ) که متناسب با مقدار فرومون  $\varphi$  روی مسیر است، انتخاب می‌کند و مقدار فرومون  $\Delta\varphi$  را برای آگاه کردن مورچه‌های دیگر برای دنبال کردن مسیر گردش خود روی آن مسیر می‌ریزد. مقدار فرومون ریخته شده روی مسیرها دلخواه نیست و از قانونی که مسیر کامل بهتر (ارزیابی شده بوسیله محاسبه مقدار تابع برای  $X$  که از رشته باینری منطبق بر مسیر کشف رمز شده) افزایش مقدار فرومون دارد، پیروی می‌کند. این به مفهوم فیدبک مثبت است که مورچه‌ها مسیری را که توسط مورچه‌های قبلی بیشتر انتخاب شده‌اند را انتخاب می‌کنند و مورچه‌های مصنوعی روی بهترین مسیر گراف، برای یافتن جواب بهینه کلی مساله تمرکز می‌کنند.

در الگوریتم کلونی مورچه پایه، که به طور عمومی استفاده می‌شود، مقدار کل فرومون ریخته شده بوسیله یک مورچه، به طور یکنواخت به هر بخش از مسیری که روی آن راه می‌رود تخصیص داده می‌شود. در ساختار گراف جهت‌دار، استراتژی تخصیص افزایش فرومون یکنواخت، خراب شدن رفتار جستجو را نتیجه می‌دهد. زیرا تخصیص افزایش فرومون به طور یکنواخت به همه بخش‌های مسیره‌ها، احتمال یکسانی را در انتخاب مراحل جستجوی بعدی نتیجه می‌دهد. این نوع رفتار جستجو ممکن است

هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری در نظر گرفته شده است.

جهت مقایسه نتایج، باس های کاندید برای نصب منابع جدید باس های ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۴، ۳۰ به عنوان باس های کاندید در نظر گرفته شده است [۱].



شکل ۲: فلوچارت حل مساله برنامه ریزی توان راکتیو با AAC.

## الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله برنامه ریزی بهینه

توان راکتیو به صورت زیر می باشد:

- ۱- وارد کردن اطلاعات شبکه
  - ۲- تعیین باس های کاندید برای نصب منابع جدید توان راکتیو (با استفاده از معیار باس ضعیف و باس بار سنگین)
  - ۳- وارد کردن اطلاعات مربوط به روش کلونی مورچه (ضرایب  $\beta$  و  $\delta$ ، تعداد مورچه ها  $(m)$  و تعداد تکرار  $(n)$ ).
  - ۴- انتخاب رشته  $N$  بیتی که تعداد بیت ها با توجه به حداقل و حداکثر منبعی که می توان در یک باس کاندید نصب کرد تعیین می شود.
  - ۵- فرومون گذاری و حرکت دادن هر مورچه از یک به یک گره ها و ساختن یک جواب برای باس های کاندید و گرد کردن جوابها که بصورت اعداد صحیح در آیند. زیرا که منابع جدیدی که نصب می شوند بصورت بانک هایی با مقادیر صحیح می باشند.
  - ۶- افزودن جوابهای بدست آمده بالا به مقادیر بدست آمده در تکرار قبلی یعنی به توان راکتیو باس های کاندید و اجرای برنامه پخش بار
  - ۷- تعیین تابع هدف برای هر مورچه (تابع هدف شامل تابع هدف اصلی و قیود می باشد که به صورت توابع پنالتی در تابع اصلی در نظر گرفته شده اند).
  - ۸- بدست آوردن مینیمم مقدار تابع هدف بدست آمده از مراحل ۵ تا ۷
  - ۹- فرومون گذاری روی تک تک مسیرهایی که هر مورچه آن را پیموده با استفاده از رابطه (۶) و (۷).
  - ۱۰- چاپ جواب (مقدار مینیمم تابع)
- فلوچارت حل مساله در شکل ۲ آمده است.

## نتایج شبیه سازی

جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، الگوریتم بر روی شبکه ۳۰ باسه اصلاح شده IEEE اعمال و نتایج با نتایج حالت ۲ مقاله [۱] مقایسه شده است.

### الف- نتایج شبکه ۳۰ باسه اصلاح شده IEEE

همانطوری که بیان شد در اینجا تابع هدف بصورت مجموع

باس های ۱۰ و ۲۲ و خط انتقال بین باس های ۲۷ و ۳۰ در نظر گرفته شده است.

باس های نامزد برای برنامه ریزی در شرایط اضطراری همان باس های ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۴ و ۳۰ در نظر گرفته شده است.

با قطع دو خط فوق ملاحظه می شود که قیود سیستم نقض می شوند. حال باید منابعی که در برنامه ریزی در حالت عادی کار سیستم بدست آمده اند، جزء منابع موجود شبکه در نظر گرفته شوند و برنامه ریزی مجدداً انجام شود تعداد منابعی که باید در باس های کاندید نصب شوند تا قیود شبکه در پیشامد خروج دو خط مذکور نقض نشوند، در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: تعداد منابعی که باید در باس های کاندید اضافه کرد.

شماره باس	۱۷	۱۹	۲۱	۲۴	۳۰
تعداد بانک راکتیو	۱۷	۸	۱۸	۱۲	۱۰

در این صورت هزینه نصب منابع بالا \$ ۵۸۵۰۰ می باشد که با افزودن این مقدار به هزینه بدست آمده در حالت عادی، هزینه کل \$ ۷۶۲۹۲۵۶ خواهد شد. مقایسه این نتایج با نتایج حالت ۲ مقاله [۱] که با همین باسهای کاندید لیکن با روش SA انجام شده در جدول (۴) آمده و نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی مقاله است.

جدول ۴: مقایسه نتایج فوق با نتایج مقاله [۱].

درصد کاهش تلفات	درصد کاهش هزینه	
۳۹/۵۹	۳۷/۲۸	نتیجه مقاله حاضر
۳۶	۳۱/۳۰	نتیجه مقاله [۱]

ب- نتایج شبکه ۱۴ باسه اصلاح شده IEEE شبکه ۱۴ باس IEEE با افزایش توان اکتیو و راکتیو مصرفی بعضی از باس بارها اصلاح شده است. شبکه اصلاح شده برگرفته از مرجع [۲] می باشد. تابع هدف همچنان بصورت مجموع هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری در نظر گرفته شده است پارامترهایی که در شبکه ۱۴ باس اصلاح شده بکار رفته اند از مرجع [۱۲] می باشند:

هزینه انرژی: ضریب هزینه تلفات انرژی ۲/۳ دلار تایوانی بازای هر کیلووات ساعت می باشد (Ke= ۲/۳NTS\$).

پارامترهایی که برای برنامه ریزی توان راکتیو شبکه ۳۰ باسه اصلاح شده بکار رفته از مرجع [۱۱] و بصورت زیر می باشد:

$$Ke = 0.06 \$/kWh$$

هزینه منابع جدید توان راکتیو: این منابع بصورت بانکهای خازنی هستند که هر بانک معادل ۳۰kVAR توان راکتیو بوده و هزینه هر بانک برابر Sci= ۹۰۰ \$/bank می باشد.

هزینه نصب منابع جدید توان راکتیو: هزینه نصب و نگهداری منابع جدید مقدار ثابتی است و در هر باس مقدار آن برابر di=۱۰۰۰\$ است.

حدود منابع جدید توان راکتیو: ماکزیمم تعداد بان در هر مکان ۱۰۰ بانک می باشد bank<sup>max</sup><sub>ci</sub> = ۱۰۰ کهای خازنی

$$D = 6760 \text{ h}$$

دوره زمانی برنامه ریزی: D = ۶۷۶۰ h نتایج شبکه ۳۰ باسه شامل تعداد بانک های منصوبه و درصد کاهش هزینه به ترتیب در جدول (۱) و (۲) آمده است.

جدول ۱: تعداد بانک های راکتیوی که باید در باس های کاندید نصب شوند.

شماره باس	۱۷	۱۹	۲۱	۲۴	۳۰
تعداد بانک راکتیو	۵۱	۴۱	۷۰	۵۵	۲۵

هر بانک خازنی معادل ۳۰kVAR می باشد.

جدول ۲: مقایسه نتایج قبل و بعد از برنامه ریزی.

تابع هدف	قبل از برنامه ریزی	بعد از برنامه ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (kW)	۲۹/۹۹۰۳	۱۸/۱۱۶۳	۳۹/۵۹
هزینه تلفات توان (\$)	۱۲۱۶۴۰۹۷	۷۳۴۷۹۵۶	۳۹/۵۹
هزینه نصب منابع جدید (\$)	-----	۲۲۲۸۰۰	-----
هزینه کل شبکه (\$)	۱۲۱۶۴۰۹۷	۷۵۷۰۷۵۶	۳۷/۷۶

برنامه ریزی توان راکتیو با وجود حادثه خارج شدن همزمان دو خط انتقال از شبکه شامل خط انتقال بین

جدول ۶: مقایسه نتایج قبل و بعد از برنامه ریزی (بدون تغییر تپ ترانسفورماتور).

تابع هدف	قبل از برنامه ریزی	بعد از برنامه ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (kW)	۳۹/۴۰۱۲	۲۷/۲۹۲۰	۳۰/۷۳
هزینه تلفات توان (NT\$)	۱۳۰۴۹۶۸۵۲۴	۹۰۳۹۱۰۹۴۰	۳۰/۷۳
هزینه نصب منابع جدید (NT\$)	-----	۵۹۹۹۰۰	-----
هزینه کل شبکه (NT\$)	۱۳۰۴۹۶۸۵۲۳	۹۰۴۵۱۰۸۴۰	۳۰/۷۹

حال تپ ترانسفورماتورهای TCUL موجود در شبکه را جزء متغیرهای کنترلی مساله در نظر گرفته، شبکه ۱۴ باسه اصلاح شده IEEE را برنامه ریزی کرده و نتایج آن را با نتایج قسمت قبل مقایسه می کنیم. نتایج این قسمت در جداول (۷) و (۸) آمده است. جدول (۷) تعداد بانک های خازنی که باید در این حالت در باس های کاندید نصب شوند را نشان می دهد. مشاهده می شود که مجموع بانک های راکتیوی که باید در این مرحله نصب شوند ۱۰۰ بانک خازنی است در حالیکه در مرحله قبل (بدون در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتورهای TCUL جزء متغیرهای کنترلی) این تعداد ۱۱۶ بانک خازنی بود. پس می توان نتیجه گرفت که برای برنامه ریزی توان راکتیو باید از امکانات موجود در شبکه به نحو احسن استفاده کرد، در این صورت نیاز به نصب منابع کمتری می باشد. در جدول (۸) تلفات و هزینه شبکه قبل و بعد از برنامه ریزی با هم مقایسه شده اند. این جدول نشان می دهد که با در نظر گرفتن امکانات موجود شبکه در برنامه ریزی توان راکتیو، تلفات و هزینه شبکه کاهش بیشتری پیدا می کند.

جدول ۷: تعداد بانک های راکتیوی که باید در باس های کاندید نصب شوند (با تغییر تپ ترانسفورماتور).

شماره باس	۴	۱۲	۱۳	۱۴
تعداد بانک راکتیو	۶۰	۱۹	۱۲	۹

در شکل (۳) نمودار ولتاژ باس ها قبل از برنامه ریزی و بعد از برنامه ریزی، بدون در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتورهای TCUL و با در نظر گرفتن تپ

هزینه منابع جدید توان راکتیو: منابع جدید بصورت بانکهای خازنی و سلفی می باشند که هر بانک معادل یک مگاوار توان راکتیو می باشد. هزینه هر بانک خازنی NT\$ ۲۲۷۵ و هر بانک سلفی NT\$ ۳۲۸۰ است  $(S_{ci} = 2275 \text{ NT\$/bank}, S_{ri} = 3280 \text{ NT\$/bank})$ .

هزینه نصب منابع جدید: هزینه نصب و نگهداری منابع جدید

توان راکتیو مقدار ثابتی است و در هر باس مقدار آن NT\$ ۸۴۰۰۰ است.  $(di = 84000 \text{ NT\$/location})$ .

حدود منابع جدید توان راکتیو: ماکزیمم تعداد بانکهای خازنی و سلفی در هر مکان ۱۵۰ بانک است.  $(q_{ci}^{\max}, q_{ri}^{\max} = 150 \text{ bank})$ .

دوره زمانی برنامه ریزی: برنامه ریزی برای مدت ۱۰ سال انجام شده است که هر ساله ۶ ماه و روزانه ۸ ساعت با الگوی بار مصرفی شبکه اصلاح شده از آن بهره برداری می شود. یعنی زمان بهره برداری از شبکه اصلاح شده برابر است با:  $D = 14600 \text{ h}$ .

در مقالات عموماً از کلیه امکانات موجود استفاده نشده است منجمله تپ ترانسفورماتورهای TCUL را جزء متغیرهای کنترلی مساله در نظر نگرفته اند. در این مقاله، مساله برنامه ریزی توان راکتیو یکبار، بدون در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتورهای TCUL و بار دیگر با در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتورهای TCUL جزء متغیرهای کنترلی اجرا و نتایج با هم مقایسه شده است. نتایج برنامه ریزی بر روی شبکه ۱۴ باسه اصلاح شده IEEE بدون در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتورهای TCUL به ترتیب در جداول (۵) و (۶) آمده است.

جدول (۵) تعداد بانک راکتیوی که باید در باس های کاندید نصب شوند و جدول (۶) نتایج قبل و بعد از برنامه ریزی توان راکتیو را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود تلفات توان و هزینه تلفات به میزان ۳۰/۷۳ درصد نسبت به قبل از برنامه ریزی کاهش یافته اند. هزینه کل شبکه نیز ۳۰/۶۹ درصد نسبت به قبل از برنامه ریزی کاهش یافته است.

جدول ۵: تعداد بانک های راکتیوی که باید در باس های کاندید نصب شوند (بدون تغییر تپ ترانسفورماتور)

شماره باس	۴	۱۲	۱۳	۱۴
تعداد بانک راکتیو	۶۱	۱۷	۱۴	۲۴

ترانسفورماتورهای TCUL جزء متغیرهای کنترلی نشان داده شده است.

### برنامه‌ریزی توان راکتیو چند منظوره

همانطور که در قسمت‌های قبل این مقاله عنوان شد، تابع هدف برنامه‌ریزی توان راکتیو در اکثر مقالات به صورت هزینه نصب و سرمایه‌گذاری منابع جدید توان راکتیو و هزینه تلفات انرژی در نظر گرفته می‌شود. در قسمت قبل این مقاله دیده شد که بعد از روند بهینه سازی، ولتاژ بسیاری از باس ها به حدود ماکزیمم خود می‌رسند که این شرایط از جهت پایداری ولتاژ و امنیت سیستم مطلوب نخواهد بود. در این قسمت، دو معیار دیگر را در تابع هدف در نظر می‌گیریم تا با در نظر گرفتن این معیارها، بعد از برنامه‌ریزی به پروفایل ولتاژ مناسبی دست پیدا کنیم و پایداری سیستم را بهبود ببخشیم. این دو معیار عبارتند از:

**الف- ماکزیمم کردن حد امنیت سیستم:** این تابع هدف مربوط به پایداری ولتاژ استاتیکی سیستم و چگونگی کاهش خطر فروپاشی ولتاژ سیستم می‌باشد. فروپاشی ولتاژ به این معنی است که سیستم برای مواجه شدن با یک بار داده شده، غیر فعال می‌باشد و این حالت یک وضعیت بحرانی سیستم می‌باشد. با داشتن حالت بحرانی حد امنیت می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

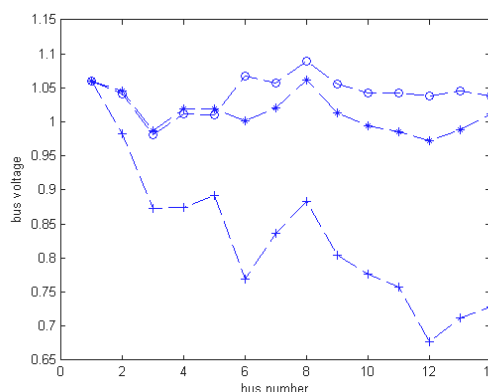
$$SM = \frac{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit} - \sum_{j \in J_L} S_j^{initial}}{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}} \quad (8)$$

که  $S_j^{limit}$  و  $S_j^{initial}$  به ترتیب MVA بارهای باسبار  $i$  در حالت اولیه و حالت بحرانی هستند.

$J_L$  مجموعه باس های بار هستند. برای یک سیستم پایدار  $SM$  باید بین صفر و یک باشد.  $SM$  منفی یعنی این که سیستم قادر به تامین تقاضای MVA اولیه مشخص نیست و سیستم در معرض فروپاشی ولتاژ است. در مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو، کاهش خطر فروپاشی ولتاژ بمعنی ماکزیمم کردن  $SM$  با نصب منابع توان راکتیو می‌باشد. برای نوشتن این مساله به صورت مینیمم سازی، تابع زیر را به عنوان تابع هدف در نظر می‌گیریم:

جدول ۸: مقایسه نتایج قبل و بعد از برنامه‌ریزی (با تغییر تب ترانسفورماتور).

تابع هدف	قبل از برنامه‌ریزی	بعد از برنامه‌ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (kW)	۳۹/۴۰۱۲	۲۶/۹۵۸۶	۳۱/۵۸
هزینه تلفات توان (NT\$)	۱۳۰۴۹۶۸۵۲۴	۸۹۲۸۶۹۵۹۳	۳۱/۵۸
هزینه نصب منابع جدید (NT\$)	-----	۵۶۳۵۰۰	.....
هزینه کل شبکه (NT\$)	۱۳۰۴۹۶۸۵۲۳	۸۹۲۴۳۰۹۳	۳۱/۵۴



شکل ۳: نمودار ولتاژ باسها در قبل و بعد از برنامه‌ریزی.

++- نمودار ولتاژ باس ها قبل از برنامه‌ریزی  
 \*- نمودار ولتاژ باس ها بعد از برنامه‌ریزی در حالتیکه TCUL جزء متغیرهای کنترلی در نظر گرفته نشده اند.  
 0- نمودار ولتاژ باس ها بعد از برنامه‌ریزی در حالتیکه TCUL جزء متغیرهای کنترلی در نظر گرفته شده اند

ملاحظه می‌شود گرچه با در نظر گرفتن تب ترانسفورماتورهای TCUL جزء متغیرهای کنترلی، نیاز به تعداد بانک خازنی کمتری می‌باشد، اما شکل (۳) نشان می‌دهد که بعد از برنامه‌ریزی توان راکتیو، تعداد بسیاری از باسها به حدود ماکزیمم ولتاژ خود نزدیک شده اند و پروفیل ولتاژ نسبت به حالت قبل مطلوب نمی‌باشد.

برای جلوگیری از وقوع چنین وضعیتی می‌توان بیشترین میزان تغییرات ولتاژ سیستم از یک مقدار مبنا (ایده آل) را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته و در برنامه‌ریزی



$$MIN F = MIN(m_1 * f_1 + m_2 * f_2 + m_3 * f_3) \quad (14)$$

### فرایند تحلیل سلسله مراتبی

همانطوریکه ملاحظه شد در بررسی مساله برنامه ریزی توان راکتیو چند منظوره از استراتژی جمع وزن دار توابع استفاده شد تا تابع هدف چند منظوره به تابع هدف تک منظوره تبدیل شود. در تعیین ضرایب وزنی از روش های مختلفی مانند روش دستیابی به هدف<sup>۱۲</sup> و روش فازی در مساله برنامه ریزی توان راکتیو استفاده شده است [۱۳]. یکی از کارآمدترین تکنیکها برای وزن دهی توابع هدف چندگانه، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است که برای اولین بار توسط توماس الساعی در سال ۱۹۸۰ مطرح و در طول بیست سال گذشته از سوی محافل علمی نیز همواره مورد توجه بوده است [۸، ۱۴]. در این مقاله برای وزن دهی این توابع از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده می کنیم.

برای وزن دهی چندین حالت ممکن را در نظر می گیریم. در هر حالت تصمیم گیرنده اهمیت توابع را نسبت به یکدیگر با توجه به جدول (۹) تعیین می کند. این جدول میزان اهمیت عبارات زبانی را به مقادیر عددی تبدیل می کند. ضرایب وزنی تابع هدف چند منظوره مطابق آنچه در مراجع [۱۵، ۱۶] توصیف شده است، بدست می آیند.

جدول ۹: درجه اهمیت عبارات زبانی.

درجه اهمیت	تعاریف
۹	اهمیت مطلق
۷	اهمیت خیلی قوی
۵	اهمیت قوی
۳	اهمیت ضعیف
۱	اهمیت یکسان
۲ و ۴ و ۶ و ۸	اهمیت بین فواصل فوق

$$f_2 = 1 - SM = \frac{\sum_{j \in J_L} S_j^{initial}}{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}} \quad (9)$$

برای محاسبه  $S_j^{limit}$  از پخش بار استفاده می کنیم که در این روش با افزایش پی در پی توان های مصرفی باسبارها پخش بار انجام داده تا جایی که دیگر نتوان پاسخی پیدا کرد، نقطه بحرانی بدست می آید و مقدار  $\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}$  محاسبه می شود.

### ب- معیار مینیمم کردن حداکثر انحرافات ولتاژ

**سیستم:** برای جلوگیری از رسیدن ولتاژ باسها به حدود ماکزیمم خود، بیشترین میزان انحرافات ولتاژ سیستم از یک مقدار مبنا (ایده آل) را به عنوان تابع هدف در نظر می گیریم که مقدار ایده آل برای ولتاژ باسها معمولاً  $1 \text{ p.u.}$  در نظر گرفته می شود. حداکثر انحرافات ولتاژ باسها از مقدار ایده آل را می توان بصورت زیر نشان داد:

$$f_3 = \text{Max}_j \frac{|V_j - V_j^{spec}|}{V_j^{spec}} \quad (10)$$

پس مساله برنامه ریزی به یک مساله بهینه سازی چند منظوره با توابع هدف زیر تبدیل می شود:

### ۱- مینیمم کردن هزینه نصب و سرمایه گذاری منابع جدید و هزینه تلفات

$$f_1 = \sum_{i \in \Omega_c} (d_i + S_{ci} q_{ci} + S_{ri} q_{ri}) + k_e \sum_{j=1}^{n_t} D_j P_{loss,j} \quad (11)$$

### ۲- ماکزیمم کردن SM (یا مینیمم کردن SM-1)

$$f_2 = 1 - SM = \frac{\sum_{j \in J_L} S_j^{initial}}{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}} \quad (12)$$

### ۳- مینیمم کردن حداکثر تغییرات ولتاژ باسها

$$f_3 = \text{Max}_j \frac{|V_j - V_j^{spec}|}{V_j^{spec}} \quad (13)$$

اگر  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  به ترتیب ضرایب وزنی توابع هدف  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  باشند تابع هدف مساله بصورت زیر در می آید.

جدول ۱۰: نتایج برنامه ریزی چند منظوره بر روی شبکه ۱۴ باسه اصلاح شده IEEE.

حالت ششم	حالت پنجم	حالت چهارم	حالت سوم	حالت دوم	حالت اول	اهمیت نسبی
یکسان (۱)	$f_2$ خیلی قوی تر از $f_1$ (۱/۷)	$f_2$ کاملا مهمتر از $f_1$ (۱/۹)	$f_2$ کمی مهمتر از $f_1$ (۱/۳)	یکسان (۱)	قوی (۵)	اهمیت $f_1$ نسبت به $f_2$
$f_3$ خیلی قوی تراز $f_1$ (۱/۷)	$f_3$ قوی تر از $f_1$ (۱/۵)	$f_3$ کاملا مهمتر از $f_1$ (۱/۹)	$f_3$ کمی مهمتر از $f_1$ (۱/۳)	ما بین خیلی قوی و کاملا مهمتر (۸)	کاملا مهمتر (۹)	اهمیت $f_1$ نسبت به $f_3$
$f_3$ خیلی قوی تراز $f_3$ (۱/۷)	ما بین اهمیت یکسان و کمی مهمتر (۲)	یکسان (۱)	یکسان (۱)	ما بین خیلی قوی و کاملا مهمتر (۸)	خیلی قوی (۷)	اهمیت $f_3$ نسبت به $f_3$
۰/۱۴۲۹	۰/۰۷۵۴	۰/۰۵۲۶	۰/۱۴۳	۰/۴۷۱	۰/۶۱۳	$m_1$
۰/۱۴۲۹	۰/۵۶۱۴	۰/۴۷۳۷	۰/۴۲۹	۰/۴۷۱	۰/۳۳۵	$m_2$
۰/۷۷۷۸	۰/۳۶۵	۰/۴۷۳۷	۰/۴۲۹	۰/۰۵۸۸	۰/۰۵۱۲	$m_3$
$9/16 * 10^8$	$9/3 * 10^8$	$9/18 * 10^8$	$9/18 * 10^8$	$9/0.49 * 10^8$	$8/9 * 10^8$	مقدار هزینه (NTS) (f1)
۰/۷۰۹۳	۰/۶۹۱۷	۰/۷۰۳۷	۰/۷۰۳۷	۰/۷۰۵۷	۰/۷۴۲۷	حد امنیت سیستم (f2)
۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۹۸	۰/۰۳۵۹	۰/۰۳۵۹	۰/۰۶۲۵	۰/۰۸۷۹	حداکثر انحرافات ولتاژ (pu) (f3)

ردیف های ۷ و ۸ و ۹ مقادیر بهینه توابع در هر یک از حالتها را نشان می دهند. حالتها به شرح زیر می باشد:

**حالت اول:** فرض کرده ایم که در برنامه ریزی چند منظوره هدف اصلی ما کاهش هزینه باشد و توابع حد امنیت و تغییرات ولتاژ در رتبه های بعدی اهمیت باشند. یعنی این که هدف ما بهبود حدامنیت و تغییرات ولتاژ باشد، اما از نظر هزینه در محدودیت باشیم و می خواهیم حتی الامکان کمترین هزینه را داشته باشیم. همچنین فرض کرده ایم کاهش تغییرات ولتاژ برایمان خیلی مهم

**نتایج شبیه سازی مربوط به تابع هدف چند منظوره**

مساله برنامه ریزی با تابع هدف چند منظوره بر روی شبکه ۱۴ باسه برای شش حالت مختلف زیر با روش کلونی مورچه و وزن دهی سلسله مراتبی انجام شده و نتایج در جدول (۱۰) آمده است.

اعداد مندرج در ردیف های ۱ و ۲ و ۳ جدول (۱۰) مقدار عددی اهمیت دو تابع نسبت به هم را نشان می دهد. ردیف های ۴ و ۵ و ۶ ضرایب  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  که بر اساس روش مجموع سطری محاسبه شده اند را نشان می دهد.

مشاهده می شود که در این حالت مقدار این تابع نسبت به حالات قبل بهبود یافته است.

**حالت ششم:** فرض بر این است که برای تصمیم گیرنده دو تابع اول چندان مهم نباشند و بهبود حداکثر انحراف ولتاژ هدف اصلی تصمیم گیرنده باشد (البته این حالت ممکن است چندان معقول نباشد). در این حالت مشاهده می شود که حداکثر انحراف ولتاژ نسبت به کلیه حالات بهبود یافته است.

### نتیجه گیری

در این مقاله از روش کلونی مورچه شتاب یافته برای حل مساله برنامه ریزی توان راکتیو در سیستم قدرت استفاده شده است. در روش به کار گرفته شده از مدل واقعی سیستم قدرت استفاده شده لذا به خطی سازی نیازی نمی باشد. با انتخاب مناسب پارامترهای مربوط به روش، الگوریتم به جواب بهینه همگرا خواهد شد. همچنین در این مقاله از امکانات موجود منابع توان راکتیو (که غالباً از آنها صرفنظر می شود) به بهترین نحو در برنامه ریزی توان راکتیو استفاده شده است. بعلاوه در این مقاله از یک تابع چند منظوره که شامل کاهش هزینه های نصب و تلفات، افزایش حد امنیت سیستم و حداقل کردن انحرافات ولتاژ می باشد، استفاده شده است که این توابع با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن دهی شده اند.

نیست و در این شرایط حتی الامکان می خواهیم حدامنیت سیستم را بهبود ببخشیم.

**حالت دوم:** فرض ما بر این است که برای تصمیم گیرنده، کاهش هزینه و افزایش حد امنیت سیستم از اهمیت یکسانی برخوردار باشند و تابع سوم نسبت به دو تابع دیگر از اهمیت چندانی برخوردار نباشد. در این حالت مشاهده می شود که ضریب تابع اول نسبت به حالت اول کمتر شده است و در نتیجه مقدار هزینه در این حالت نسبت به حالت اول افزایش یافته است. در این حالت مشاهده می شود که ضرایب دو تابع دیگر نسبت به حالت اول افزایش یافته اند و در نتیجه مقدار این توابع بهبود یافته اند.

**حالت سوم:** مساله را از دید دیگری بررسی کرده ایم. یعنی در این حالت فرض کرده ایم که ما هزینه کافی برای برنامه ریزی را داریم و در برنامه ریزی هزینه برای ما مهم نیست و هدف بهبود دو تابع دیگر می باشد. در این حالت با مشاهده جدول مشخص می شود که مقدار هزینه در این حالت نسبت به حالت قبل افزایش یافته است، ولی در عوض مقدار دو تابع دیگر بهبود یافته اند.

**حالت چهارم:** همان حالت سوم را در نظر گرفته ایم ولی با این تفاوت که در این حالت اهمیت تابع هزینه را باز هم کمتر کرده ایم ولی مشاهده می شود که علیرغم این که ضرایب تغییر کمی کرده اند، نتایج همان نتایج مرحله قبل می باشد.

**حالت پنجم:** فرض بر این است که برای تصمیم گیرنده بهبود حد امنیت سیستم در درجه اول اهمیت باشد.

### مراجع

- 1 - Hsiao, Y. Y., et al. (1993). "A new approach for optimal VAR source planning in large scale electric power systems." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, PP. 988-996.
- 2 - Chen, Y. L., Liu, C. C. (1994). "Interactive fuzzy satisfying method for optimal multi-objective VAR planning in power systems." *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 6.
- 3 - Dong, Z. Y., et al. (1998). "Advanced reactive power planning by a genetic algorithm." *International Conference on Power system Technology*, Powercon 98, Vol. 2, PP. 973-977.
- 4 - Chen, Y. L., Ke, Y. L. (2004). "Multi objective VAR planning for large scale power systems using projected based two layer simulated annealing algorithms." *IEE Proc. Genr. Transm. Distrib.*, Vol. 151, No. 4, PP. 555-560
- 5 - Pires, D. F., et. al. (2005). "A multi objective model for VAR planning in radial distribution networks based on tabu search." *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 20, No. 2, PP. 1089-1094.

- 6 - Annaluru, R., Das, S. Panwa, A. (2004). "Multi level ant colony algorithm for optimal placement of capacitors in distribution systems." *Congress of Evolutionary Computation, CEC 2004*, Vol. 2, 19-23 June, PP. 1932-1937.
  - 7 - Phoomvuthisarn, S., Chusanapiputt, Nualhong, D. (2004). "Diversity control approach to ant colony optimization for unit commitment problem.." *Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering, Tencon 2004, IEEE Region Conf.*, Vol. C, PP. 488-491.
  - 8 - Hong, Y. Y., Lin, C. C. (1992). "A heuristic and algorithmic approach to VAR planning." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, PP. 505-512.
  - 9 - Taillard, E. D., et al. (2001). "Invited review adaptive memory programming: a unified view of meta heuristics." *European Journal of Operational Research 135*, PP. 1-16.
  - 10 - LI, Y.(2003). "An accelerated ant colony algorithm for complex nonlinear system optimization." *Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Houston, Texas. October 5-, PP. 709-713.
  - 11 - Hsiao, Y. T., et al. (1994). "A computer package for optimal multi-objective VAR planning in large scale power systems." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, PP. 668-676.
  - 12 - Obadina, O. O., Berg, G. J. (1988). "Determination of voltage stability limit in multi machine power systems." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, PP. 1545-1554.
  - 13 - Chen, L., Liu C. C. (1994) "Multi objective VAR planning using the goal attainment method." *IEEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, PP. 227-232.
  - 14 - Satty, T. L. (1980). *The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York McGraw Hill.
- ۱۵ - قدسی پور، س. ح. "فرایند تحلیل سلسله مراتبی." کتاب، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر، تهران، (۱۳۸۱).
- ۱۶ - عرب پور، ا. "برنامه ریزی توان راکتیو در سیستم های قدرت با استفاده از روش کلونی مورچه بهبود یافته." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۴).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Accelerated Ant Colony
- 2 - Analytical Hierarchy Process
- 3 - Simulated Annealing
- 4 - Evolutionary Strategy
- 5 - Evolutionary Programming
- 6 - Tabu Search
- 7 - Capacitor Placement
- 8 - Unit Commitment
- 9 - Heavy Load Oriented Bus
- 10 - Colormi
- 11 - Pheromone
- 12 - Goal Attainment