

## **Optimal Reactive Power Dispatch in Power Networks utilizing a Combined Method of Average Fuzzy Clustering Algorithm and Opposition-based Gravitational Search Algorithm**

**A. Shokati Poursani<sup>1</sup>, A. Dehestani Kolagar<sup>2</sup>, P. Rabbanifar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Dept. of Electrical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran

### **Abstract:**

Reactive power management is essential for transferring real power and supporting power network security. Therefore, it is important to present a correct and possible method for pricing of reactive power in electricity markets. Optimization and reactive power dispatch is performed by solving continuous variables problems (i.e., generator busbars voltages), discrete variables such as transformer tap-changers, and the size of the parallel switching capacitors in power systems. In this paper, optimization of reactive power dispatch has been performed with combined method of average fuzzy of clustering algorithm and opposition-based gravitational search algorithm. Moreover, in line with the aim of minimizing the power loss, total voltage deviation and improving voltage stability criteria have been carried out. Also, the potential of the proposed method and their effectiveness for solving reactive power dispatch optimization problems in power systems have shown in this study. Optimization results show that the combined method of average fuzzy clustering algorithm and opposition-based gravitational search algorithm have improved parameters such as convergence time, voltage stability criteria, absolute value of total voltage deviation, and the total loss of the transmission lines.

**Keywords:** Optimal Reactive Power Dispatch, Gravitational Search Algorithm, Opposition-based Learning, Combined Method of Average Fuzzy Clustering Algorithm and Opposition-based Gravitational Search Algorithm.

## پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های قدرت به روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد

اشکان شوکتی پورثانی<sup>۱</sup>، آرش دهستانی کلاگر<sup>۲</sup>، پیام ربانی‌فر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی تهران غرب - تهران - ایران

ashkan.asp@gmail.com

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر - تهران - ایران

a\_dehestani@mut.ac.ir

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز - تهران - ایران

Prabbanifar@gmail.com

**چکیده:** مدیریت توان راکتیو، امری ضروری برای انتقال توان حقیقی و تأمین امنیت شبکه قدرت است؛ از این رو، در بازار برق ارائه روش صحیح و ممکن برای قیمت‌دهی توان راکتیو اهمیت دارد. توان راکتیو در شبکه‌های انتقال، بیشتر با تلفات انتقال، ظرفیت انتقال و پایداری ولتاژ مرتبط است که اساسی‌ترین مسائلند. بهینه‌سازی و پخش توان راکتیو در سیستم‌های قدرت، با حل مسئله متغیرهای پیوسته مانند ولتاژ شین‌های ژنراتور و متغیرهای گسسته مانند تپ ترانسفورماتورها و اندازه خازن‌های موازی سوئیچ‌شونده انجام می‌شود. در این مقاله، بهینه‌سازی پخش توان راکتیو بر سیستم ۳۰ شینه و ۱۱۸ شینه IEEE با استفاده از طراحی کنترل‌کننده‌ها با الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و روش ترکیبی الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و مقایسه خروجی‌ها و نتایج آنها انجام شده است. همچنین پتانسیل روش پیشنهادی و اثربخشی آن برای حل مسائل بهینه‌سازی پخش توان راکتیو سیستم‌های قدرت نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهند روش ترکیبی الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد، پارامترهایی مانند زمان همگرایی، شاخص ثبات ولتاژ و قدر مطلق انحراف ولتاژ را بهبود می‌بخشند و میزان تلفات کل خط انتقال را کاهش می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** پخش بهینه توان راکتیو، الگوریتم جستجوی گرانشی، یادگیری بر پایه تضاد، روش ترکیبی الگوریتم فازی

میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد

### ۱- مقدمه

امروزه با افزایش روزافزون مصرف توان، سیستم‌های قدرت، بارگذاری سنگین تری نسبت به گذشته قرار داشته‌اند؛ اما افزایش ظرفیت‌های تولید و انتقال به علت قیود محیطی و منابع، محدود شده است. گسترش یافتن و پیچیده‌تر شدن شبکه‌های قدرت و تحولاتی چون تجدید ساختار و خصوصی‌سازی در صنعت برق موجب شده است سیستم‌های قدرت به سمت بهره‌برداری اقتصادی و رقابتی شدن تولید سوق پیدا کنند و بدین ترتیب، مسئله پخش توان راکتیو، یکی از زمینه‌های مهم در مطالعه

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

نام نویسنده مسئول: آرش دهستانی کلاگر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی

مالک‌اشتر - گروه مهندسی برق

بهینه‌سازی توان راکتیو به کمک الگوریتم فازی، کلونی زنبور عسل [۱۶-۱۷] و الگوریتم تکامل دیفرانسیل [۱۷]، ترکیب الگوریتم کلونی زنبور عسل و تکامل دیفرانسیل [۱۸] به دست می‌آید که در آن، پارامترهای ساختار و شرایط بار شبکه انتقال برای پیدا کردن راه حل مطلوب پخش بهینه توان راکتیو استفاده می‌شوند [۱۹]. روش‌های پیشنهادی در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی توان راکتیو در جهت هماهنگی منابع راکتیو موجود (از جمله خازن‌های موازی و تنظیمات تپ ترانسفورماتورهای تنظیم شده که به کاهش تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری اقتصادی از سیستم منجر خواهد شد) استفاده شده است. همچنین برای حل مسائل بهینه‌سازی پخش توان راکتیو، این روش‌ها برای غلبه بر معایب الگوریتم‌های سنتی به کار گرفته شده‌اند. در این مقاله، پخش توان با استفاده از طراحی کنترل‌کننده‌ها با الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و روش ترکیبی الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد روی سیستم ۳۰ شینه و ۱۱۸ شینه IEEE انجام شده و با مقایسه پتانسیل روش پیشنهادی و اثربخشی آن برای حل مسائل بهینه‌سازی پخش توان راکتیو سیستم‌های قدرت نشان داده شده است.

## ۲- تعریف مسئله

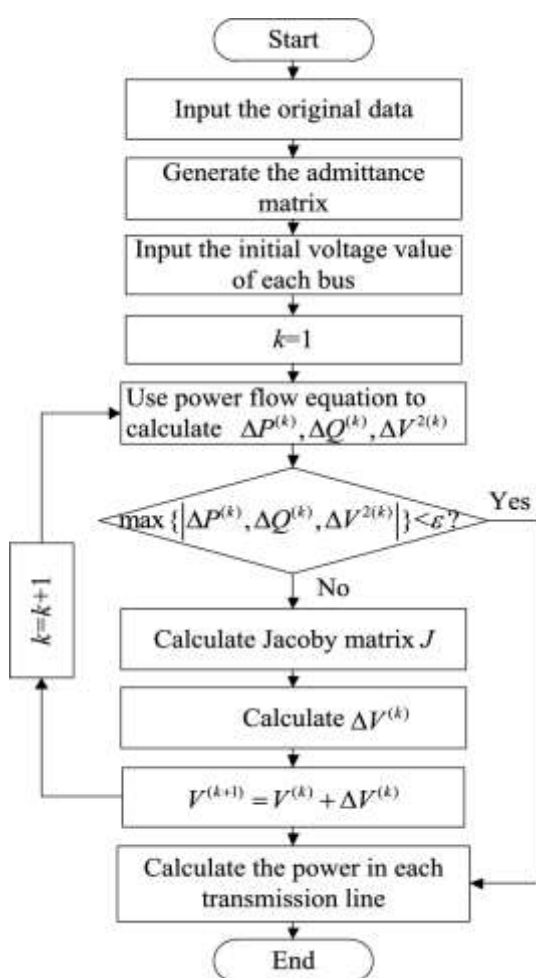
در سیستم‌های قدرت، هدف اصلی از پخش بهینه توان راکتیو (ORPD)<sup>۲</sup>، شناسایی تنظیمات بهینه متغیرهای کنترل است. از اهداف مهم توزیع بهینه توان راکتیو، کمینه‌سازی تابع هدف داده شده به صورت اتلاف خط انتقال کل ( $ploss$ ) (و یا قدر مطلق انحراف ولتاژ کل (TVD) یا بهبود شاخص ثبات ولتاژ (VSI) است؛ البته تا زمانی که الزامات و محدودیت‌های سیستم در نظر گرفته شود.

### ۱-۲ کمینه‌سازی اتلاف توان اکتیو

با تأمین توان راکتیو در محل مصرف مشترکان، جریان عبوری از خط کاهش و در نتیجه تلفات خط کاهش می‌یابد. همچنین با داشتن طول دوره مطالعه شده، میزان کاهش تلفات انرژی نیز محاسبه می‌شود. کاهش تلفات در زمان پیک بار شبکه منفعت درخور توجهی به همراه دارد و با

سیستم‌های قدرت است. هدف اصلی از بهینه‌سازی پخش توان راکتیو برای شناسایی تنظیمات بهینه متغیرهای کنترل، کمینه‌سازی تلفات خط انتقال کل، قدر مطلق انحراف ولتاژ کل (TVD)<sup>۱</sup> و نیز بهبود شاخص ولتاژ (VSI) تا زمان در نظر گرفتن رضایت و محدودیت‌های سیستم است. با توجه به اینکه تحقیق صورت گرفته از الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد (OGSA)<sup>۲</sup>، برای حل مسائل بهینه‌سازی پخش توان راکتیو در سیستم‌های قدرت استفاده شده است [۱]، الگوریتم جستجوی گرانشی [۲] با رویکرد در نظرگیری همزمان ورودی داده همراه با قرینه ورودی داده به همراه الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد [۳] روی سیستم استاندارد ۳۰ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است. مروری بر روش‌های استفاده شده در گذشته و مقایسه نتایج به دست آمده با دیگر روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی و نتایج بهینه‌سازی مربوطه نشان می‌دهد این الگوریتم پارامترهای پاسخ زمانی را بهبود می‌بخشد و شاخص ثبات ولتاژ، قدر مطلق انحراف ولتاژ و میزان تلفات خط انتقال کل را کاهش می‌دهد [۴-۶]. در حالت کلی برنامه‌ریزی توان راکتیو دو مسئله محلی‌یابی و بهره‌برداری را شامل می‌شود. مسئله محلی‌یابی، تعیین نوع، اندازه و محل منابع جدید توان راکتیو در سیستم است [۷]؛ در حالی که مسئله بهره‌برداری بر تنظیم بهینه منابع موجود توان راکتیو در شبکه تأکید دارد. ولتاژ شینای کنترل شده، تپ ترانسفورماتورهای با قابلیت تغییر تپ در زیر بار و اندازه خازن‌های موازی، پارامترهایی هستند که لازم است در مسئله توزیع توان راکتیو تنظیم شوند [۸-۱۰]. در حل مسئله پخش توان راکتیو فرض بر این است که پخش بار اقتصادی صورت گرفته است [۱۱] و میزان تولید توان حقیقی با هر ژنراتور مشخص است. اگر مسئله پخش توان اقتصادی در نظر گرفته شود، با بزرگ‌تر شدن سیستم قدرت، فضای جواب مسئله به سرعت، بزرگ و پیچیده می‌شود. در گذشته نیز، روش‌هایی مبتنی بر هوش محاسباتی مانند الگوریتم ژنتیک [۱۲] و نیز پخش بهینه توان راکتیو با یک استراتژی هدف جدید با استفاده از چندین هدف [۱۳]، برای پیدا کردن راه حل مطلوب پخش توان راکتیو با توجه به محدودیت‌های عملیاتی ژنراتور ارائه شده‌اند.

مجموع تعداد شین‌ها و  $N_0$  مجموع شین‌ها به جز شین مرجع (اسلک) است. در مجموع، این معادلات غیرخطی است که با استفاده از روش نیوتون - رافسون حل می‌شوند که در شکل (۱) روندنمای پخش بار به روش نیوتن رافسون آورده شده است.



شکل (۱): فلوچارت پخش بار به روش نیوتن رافسون [۲۲-۲۳]

### ۲-۱-۲ محدودیت ظرفیت ژنراتور

محدودیت ظرفیت ژنراتور برای تولید و ثبات ولتاژ خروجی ژنراتور و ولتاژ شینه مقید به حدود ولتاژ، قیود زیر را شامل می‌شوند؛ تا جایی که از محدوده‌های مشخص شده با  $Q_{G_i}^{\min}$ ،  $Q_{G_i}^{\max}$  و  $V_i^{\min}$  و  $V_i^{\max}$  فراتر نروند.

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad i \in N_G \quad (۴)$$

$$Q_{C_i}^{\min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i}^{\max} \quad i \in N_C \quad (۵)$$

کاهش تلفات در پیک بار نیروگاه‌ها توان تولیدی ژنراتورها کاهش می‌یابد در نتیجه، به تولید کمتر نیاز می‌شود؛ ضمن اینکه با افزایش مشترکان، احداث نیروگاه‌های جدید به تعویق می‌افتد و در هزینه صرفه‌جویی می‌شود. هدف از بهینه‌سازی توان راکتیو، کمینه‌سازی اتلاف توان اکتیو در شبکه‌های انتقال است.

### ۱-۱-۲ محدودیت‌های برابری

کل تولید برق می‌باید ضمن برآورده کردن تقاضای کل بار، تلفات توان اکتیو را در خطوط انتقال نیز پوشش دهد. محدودیت‌های برابری اکتیو و توان راکتیو در هر شین به شرح زیر تعریف می‌شود.

$$\text{minimize } P_{\text{loss}} = f(x_1, x_2) = \sum_{K \in N_E} g_K (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (۱)$$

$$P_{G_i} - P_{D_i} = V_i \sum_{j \in N_i} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad i \in N_0 \quad (۲)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} = V_i \sum_{j \in N_i} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad i \in N_{PQ} \quad (۳)$$

در روابط (۱)، (۲) و (۳)،  $f(x_1, x_2)$  تابع عملکرد تلفات توان اکتیو شبکه انتقال را نشان می‌دهد،  $x_1$  مجموعه بردار کنترل  $[V_G, T_K, Q_C]^T$  و  $x_2$  بردار متغیر وابسته است. بردار  $V_G$  بردار ولتاژ ژنراتور به جز ولتاژ شین مرجع است، بردار  $T_K$  بردار تپ ترانسفورماتور (عدد صحیح)،  $Q_C$  بردار خازن‌های موازی (عدد صحیح) و  $V_i$  بردار ولتاژ شین بار،  $N_E$  تعداد شاخه‌های شبکه،  $i \in N_B$  و  $K = (i, j)$  و  $j \in N_i$  رسانایی شاخه  $k$  است،  $\theta_{ij}$  اختلاف زاویه ولتاژ بین شین‌های  $i$  و  $j$ ؛ و  $P_{G_i}$  توان اکتیو تزریقی ژنراتور در شین  $i$  است. همچنین توان اکتیو درخواستی در شین  $i$ ؛ و  $V_i$  ولتاژ شینه نام است.  $G_{ij}$  نیز رسانایی انتقالی یعنی قسمت حقیقی ادمیتانس و  $B_{ij}$  سوسپتانس یعنی قسمت موهومی ادمیتانس بین شینه‌های  $i$  و  $j$  هستند.  $Q_{G_i}$  توان راکتیو تزریقی ژنراتور در شین نام و  $Q_{D_i}$  توان راکتیو درخواستی در شین  $i$  است. همچنین تعداد شینه‌های PQ است که شینه‌هایی با توان اکتیو و راکتیو متغیرهای معلوم و جریان و ولتاژ متغیرهای مجهول است و  $N_B$  نیز

## ۲-۲ کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل

کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل مشخصات ولتاژ را بهبود می‌دهد و موجب ایمن‌تر شدن عملکرد سیستم قدرت می‌شود. این تابع هدف به شرح رابطه (۹) است که تعداد شین‌های بار سیستم قدرت و  $V_i^{ref}$  مقدار مطلوب ولتاژ تأمین شین است که برابر ۱/۰ پریونیت در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{minimize TVD} = \sum_{i \in N_l} |V_i - V_i^{ref}| \quad (9)$$

## ۳-۲ بهبود شاخص ثبات ولتاژ

پایداری ولتاژ، توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ شین به‌طور مداوم در مقدار مطلوب آن در شرایط بهره‌برداری نامی است. مسئله پایداری ولتاژ ارتباط تنگاتنگی با توان راکتیو سیستم دارد و تأمین آن با کمینه‌سازی شاخص ثبات ولتاژ (L) با هدف بهبود آن و دور نگه داشتن سیستم از نقطه فروپاشی ولتاژ، انجام می‌گیرد. شاخص ثبات ولتاژ را به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$L = \min(L_{\max}) = \min(\max(L_k)) \quad (10)$$

where... $k = 1, 2, \dots, N_L$

که در آن  $L_k$  نشان‌دهنده ولتاژ پایداری (شاخص L) از گره  $k$  است و به‌صورت رابطه (۱۱) ارائه می‌شود.

$$L_k = \left| 1 - \sum_{i \in N_G} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \angle \{\alpha_{ij} + (\delta_i - \delta_j)\} \right| \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)،  $F_{ji}$  مؤلفه‌های ماتریس به‌دست‌آمده با وارون‌سازی جزئی  $Y_{Bus}$  است و به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$F_{ji} = -[Y_{jj}]^{-1} [Y_{ji}] \quad (12)$$

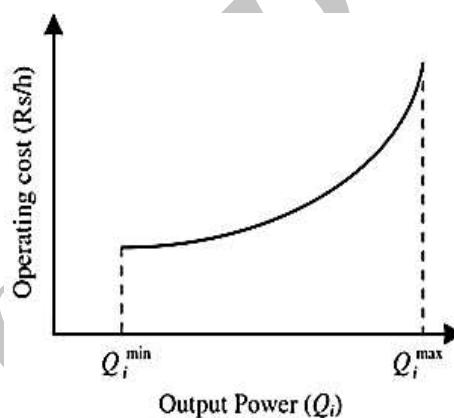
که در آن:

$$[Y_{ij}] = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 \\ y_3 & y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{PQ} \\ v_{PV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{PQ} \\ I_{PV} \end{bmatrix} \quad (13)$$

و  $v_{PQ}$  و  $v_{PV}$  ولتاژ شینای PQ و PV،  $I_{PQ}$  و  $I_{PV}$  نیز جریان شین PV و PQ است. همچنین، در رابطه (۱۱)  $\alpha_{ij}$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N_B \quad (6)$$

در رابطه‌های (۴) و (۵) و (۶)، تعداد شینه‌هایی است که منبع توان راکتیو بانک خازنی  $Q_{Gi}$  روی آنها نصب شده است.  $N_G$  تعداد شینی است که به توان راکتیو ژنراتور متصل شده است. در نهایت،  $N_T$  تعداد شینه‌هایی است که ترانسفورماتور به آنها متصل شده است. همچنین در شکل (۲) منحنی محدودیت ظرفیت ژنراتور نیز آورده شده است. در این منحنی، هزینه بهره‌برداری برحسب محدوده مجاز توان راکتیو ژنراتور نمایش داده شده است.



شکل (۲): منحنی محدودیت ظرفیت ژنراتور [۲۱]

## ۳-۱-۲ محدودیت جریان خط

به سبب اینکه خطوط انتقال، محدودیت ظرفیت عبور جریان دارند، در زمان ناپایداری، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های سیستم همین مسئله است و در این رابطه پخش توان راکتیو، روش حل طبق (۷) پیشنهاد می‌دهد که در این رابطه،  $S_l$  میزان شارش توان در انشعاب  $l$  و علامت "max" نشان‌دهنده حد بالا، به معنای حداکثر مقدار مجاز این کمیت است.

$$S_l \leq S_l^{\max} \quad l \in N_l \quad (7)$$

## ۴-۱-۲ محدودیت تنظیمات تپ ترانسفورماتور

حد بالا و حد پایین برای تنظیمات تپ ترانسفورماتور طبق رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود.

$$T_k^{\min} \leq T_k \leq T_k^{\max} \quad k \in N_T \quad (8)$$

$$x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \text{ for } i = 1, 2, \dots, N_p \quad (14)$$

که در آن،  $x_i^d$  موقعیت جرم  $i$ ام در بُعد  $d$ ام؛ و  $n$  نیز بُعد فضای جستجو است. جرم هر عامل بعد از محاسبه برازندگی جمعیت جاری محاسبه می‌شود که نحوه محاسبه آن در روابط (۱۵) و (۱۶) آورده شده است.

$$m_i = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (15)$$

$$m_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{i=1}^{N_p} m_i(t)} \quad (16)$$

در روابط فوق،  $m_i(t)$  و  $fit_i(t)$ ، به ترتیب معرف جرم و مقدار برازندگی عامل  $i$ ام در مرحله  $t$  است و برای مسئله حداقل سازی،  $worst(t)$  و  $best(t)$  نیز با روابط (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شوند.

$$best(t) = \min_{i \in \{1, \dots, N_p\}} fit_i(t) \quad (17)$$

$$worst(t) = \max_{i \in \{1, \dots, N_p\}} fit_i(t) \quad (18)$$

نیروی کل اعمال شده بر یک عامل از طرف مجموعه‌ای از اجرام سنگین تر باید بر پایه قانون گرانش، طبق رابطه (۱۹) در نظر گرفته شود. در ادامه مقدار شتاب، طبق قانون حرکت، از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود. پس از آن، سرعت آتی یک عامل، طبق رابطه (۲۱) به صورت حاصل جمع کسری از سرعت فعلی آن و میزان شتاب آن محاسبه می‌شود. در نهایت، موقعیت بعدی عامل با رابطه (۲۲) به دست می‌آید.

$$F_i^n(t) = \sum_{j \in kbest, j \neq i}^{N_p} rand_j \times G(t) \times \frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} \times (x_j^n(t) - x_i^n(t)) \quad (19)$$

$$a_i^n(t) = \frac{F_i^n(t)}{M_i(t)} = \sum_{j \in kbest, j \neq i}^{N_p} rand_j \times G(t) \times \frac{M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} \times (x_j^n(t) - x_i^n(t)) \quad (20)$$

$$v_i^n(t+1) = rand_i \times v_i^n(t) + a_i^n(t) \quad (21)$$

$$x_i^n(t+1) = x_i^n(t) + v_i^n(t+1) \quad (22)$$

زاویه فاز جمله  $F_{ij}$  است و  $\delta_j$  و  $\delta_i$  نیز به ترتیب زاویه فاز ولتاژ شین‌های آم و زام است.

### ۳- بهینه‌سازی به روش ترکیبی فازی میانگین

#### – الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد

با بزرگ شدن مسایل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ، روش‌های کلاسیک کارایی لازم را نداشتند و از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی به جای جستجوی همه جانبه فضای مسئله استفاده می‌شود. در ادامه ترکیب منطق فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد برای بهینه‌سازی توان راکتیو و چگونگی عملکرد آن تشریح می‌شود.

#### ۱- الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد

معمولاً وقتی هیچ اطلاعی از راه‌حل نباشد، همیشه الگوریتم با یک جمعیت اولیه تصادفی آغاز می‌شود. واضح است زمان محاسبات الگوریتم مستقیماً به فاصله حدس زده شده از نقطه بهینه بستگی دارد. برای بهبود انتخاب، به طور همزمان قرینه نقطه‌ای، جواب اولیه حدس زده شده در نظر گرفته شد. با این عمل یکی از دو انتخاب (حدس اولیه و یا قرینه آن)، جواب اولیه نزدیک‌تر به جواب بهینه در نظر گرفته می‌شود و از آن نقطه شروع می‌شود. در واقع طبق نظریه احتمالات در ۵۰ درصد شرایط، حدس اولیه دورتر از قرینه آن نسبت به جواب بهینه است. شروع از نقطه قرینه سبب افزایش سرعت همگرایی الگوریتم می‌شود. الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم اکتشافی است که با الهام از قانون گرانشی و حرکتی نیوتن به دست آمده است.

در این الگوریتم، عامل‌ها، اشیاء و عملکرد آنها، جرم‌ها در نظر گرفته می‌شود. تمام این اشیاء با نیروی جاذبه به سمت یکدیگر کشیده می‌شوند و این نیروها به حرکت عمومی تمام اشیاء به سمت اشیاء با جرم سنگین‌تر منجر می‌شوند. برای توصیف این الگوریتم یک سیستم با تعداد جرم  $N_p$ ، در نظر گرفته می‌شود که مکان جرم  $i$ ام به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

مرحله ۱۲: رفتن به مرحله ۵ تا زمانی که معیار توقف برقرار شود.

### ۲-۳ روش ترکیبی فازی - الگوریتم جستجوی

#### گرانشی بر پایه تضاد

در این روش، تابع هدف در فضای فازی میانگین ایجاد می‌شود. سپس اطلاعات ورودی به‌عنوان داده‌های ورودی به تابع هدف وارد می‌شوند. با استفاده از الگوریتم فازی و با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها و قیود تابع هدف، محاسبات خود را انجام می‌دهند و خروجی به‌دست آمده در فضای الگوریتم فازی با توجه به منطق فازی، بهترین خروجی را به مرحله بعد راهنمایی می‌کنند. خروجی‌ها وارد الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد می‌شوند و به‌صورت خودکار بهینه‌سازی داده‌های عددی خروجی الگوریتم فازی را انجام می‌دهند. روش مشارکتی از الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد، برای بهینه‌سازی پارامترهای خاص سیستم فازی و یا پیش پردازش داده و استخراج قوانین فازی از داده‌ها استفاده می‌کند. الگوریتم جستجوی گرانشی، پارامترهای خروجی الگوریتم فازی را می‌خواند و از روش بر پایه تضاد، حدهای پایین و بالای هر متغیر را مشخص می‌کند. مقداردهی اولیه مبتنی بر جمعیت ( $P_0$ ) و مقداردهی اولیه جمعیت بر پایه تضاد ( $OP_0$ ) و همچنین انتخاب  $N_p$  مناسب از مجموعه  $\{P_0, OP_0\}$  به‌عنوان جمعیت اولیه ( $P_0$ )، ارزیابی مناسب و ادامه روند نقطه‌یابی بهینه به‌صورت دقیق انجام می‌شوند و خروجی‌های بهینه‌سازی شده با سرعت و دقت زیادی به دست می‌آیند.

### ۴- نتایج بهینه‌سازی پخش توان راکتیو

مسئله کنترل توان راکتیو به‌صورت سه هدف کمینه‌سازی اتلاف توان اکتیو، کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل و بهبود شاخص ثبات ولتاژ روی سیستم ۳۰ شین IEEE بررسی می‌شود.

#### ۴-۱ معرفی و توصیف سیستم ۳۰ شین IEEE

در این پژوهش برای به دست آوردن داده‌های اولیه و ورودی، سیستم ۳۰ شین به‌عنوان سیستم نمونه (۱) به‌طور

در روابط فوق،  $rand_i$  و  $rand_j$  دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0,1]$ ، و  $\epsilon$  نیز دارای مقدار ناچیزی است. همچنین،  $R_{ij}(t)$  فاصله اقلیدسی بین عامل‌های  $i$ ام و  $j$ ام، و  $K_{best}$  نیز مجموعه اولین  $k$  عامل با بهترین برازندگی و بیشترین جرم است که تابعی از زمان است. به این صورت که در ابتدا  $K_0$  در نظر گرفته می‌شود و با گذر زمان کاهش می‌یابد. در این مقاله، در ابتدا  $K_0$  برابر با  $N_p$  گرفته می‌شود و به‌طور خطی تا رسیدن به ۱ کاهش می‌یابد. ثابت گرانش  $G(t)$  مقدار اولیه  $G_0(t)$  را به خود می‌گیرد و طبق رابطه (۲۳) با زمان کاهش خواهد یافت.

$$G(t) = G_0 \times e^{-\left(\frac{iter}{iter.max}\right)} \quad (23)$$

مقدار ۱۰۰ را برای  $G_0$  و مقدار ۱۰ را برای  $\tau$  در نظر گرفته می‌شود و همچنین  $iter$  و  $iter.max$  نیز به‌ترتیب شماره تکرار فعلی و تعداد کل تکرارها هستند.

الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد به شرح زیر است: مرحله ۱: خواندن پارامترهای سیستم قدرت و نیز پارامترهای حاصل از الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و سپس تعیین کردن حدهای پایین و بالای هر متغیر. مرحله ۲: مقداردهی اولیه مبتنی بر جمعیت ( $P_0$ ).

مرحله ۳: مقداردهی اولیه جمعیت بر پایه تضاد ( $OP_0$ ).

مرحله ۴: انتخاب تعداد  $N_p$  عضو از مناسب‌ترین اعضای مجموعه  $\{P_0, OP_0\}$ ، به‌عنوان جمعیت اولیه  $P_0$ .

مرحله ۵: ارزیابی برازندگی عامل‌ها با استفاده از تابع هدف مسئله، بر پایه نتایج حاصل از پخش بار به روش نیوتن - رافسون.

مرحله ۶: به‌روزرسانی  $M_i(t)$  براساس (۱۵) و (۱۶)،  $best(t)$  براساس (۱۷) و  $worst(t)$  براساس (۱۸) و درنهایت  $G(t)$  براساس (۲۳)، برای  $i = 1, 2, 3, \dots, N_p$ .

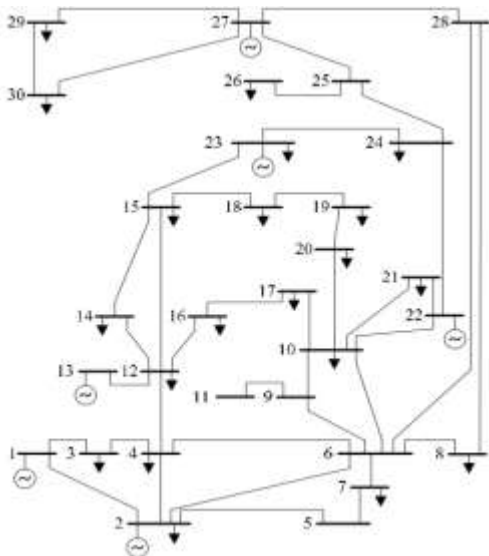
مرحله ۷: محاسبه کل نیروها در جهات مختلف با استفاده از (۱۹).

مرحله ۸: محاسبه شتاب با استفاده از (۲۰) و محاسبه سرعت با استفاده از (۲۱).

مرحله ۹: به‌روزرسانی موقعیت عامل‌ها با به‌کارگیری (۲۲)

مرحله ۱۰: بررسی کردن محدودیت‌های مسئله.

مرحله ۱۱: جهش نسل بر پایه تضاد.



شکل (۳): سیستم ۳۰ شین IEEE

#### ۴-۲ معرفی و توصیف سیستم ۱۱۸ شین IEEE

در این پژوهش برای به دست آوردن داده‌های اولیه و ورودی، سیستم ۱۱۸ شین به‌عنوان سیستم نمونه شماره ۲ به‌طور استاندارد، از نرم‌افزار Matlab نسخه R2016b و نرم‌افزار جانبی Matpower نسخه ۴٫۱ و سخت‌افزار رایانه ۲٫۸۳ GHz، استفاده شده است. ورودی‌های سیستم ۱۱۸ شین به پخش بار نیوتن رافسون استخراج شده‌اند. در این سیستم شین شماره ۶۹ شین مرجع در نظر گرفته شده است. جدول (۲) اطلاعات مربوط به سیستم ۱۱۸ شین IEEE را نشان می‌دهد.

جدول (۲): شرح تست سیستم ۱۱۸ شین IEEE

تعداد	شرح اطلاعات
۱۱۸	تعداد شین ( $N_B$ )
۵۴	تعداد ژنراتور ( $N_G$ )
۹	تعداد ترانسفورماتور ( $N_T$ )
۱۴	تعداد شنت ( $N_Q$ )
۹۹	تعداد بار
۱۸۶	تعداد شاخه ( $N_E$ )
۲۳۶	محدودیت‌های برابر
۵۷۲	محدودیت‌های نابرابر
۷۷	متغیرهای کنترل
۲۱	متغیرهای گسسته
$0.9 < T < 1.1$	تپ ترانسفورماتور
$-0.05 < Q_C < 0$	متغیر بانک‌های خازنی
۱۳۲/۴۵۰۰	تلفات کل (مگا وات)
۱/۴۳۹۳۳۷	انحراف ولتاژ (پریونیت)

استاندارد، از نرم‌افزار Matlab نسخه R2016b و نرم‌افزار جانبی Matpower نسخه ۴٫۱ و سخت‌افزار رایانه ۲٫۸۳ GHz، استفاده شده است. ورودی‌های سیستم ۳۰ شین به روش پخش بار نیوتن رافسون استخراج شده است. در این سیستم شین شماره ۱، شین مرجع در نظر گرفته شده است. جدول (۱) اطلاعات مربوط به سیستم ۳۰ شین IEEE را نشان می‌دهد.

جدول (۱): شرح تست سیستم ۳۰ شین IEEE

تعداد	شرح اطلاعات
۳۰	تعداد شین ( $N_B$ )
۶	تعداد ژنراتور ( $N_G$ )
۴	تعداد ترانسفورماتور ( $N_T$ )
۹	تعداد شنت ( $N_Q$ )
۲۰	تعداد بار
۴۱	تعداد شاخه ( $N_E$ )
۶۰	محدودیت‌های برابر
۱۲۵	محدودیت‌های نابرابر
۱۹	متغیرهای کنترل
۶	متغیرهای گسسته
$0.9 < T < 1.1$	تپ ترانسفورماتور
$0 < Q_C < 0.05$	متغیر بانک‌های خازنی
۵/۶۶۰	تلفات کل (مگا وات)
۰/۵۸۲۱۷	انحراف ولتاژ (پریونیت)

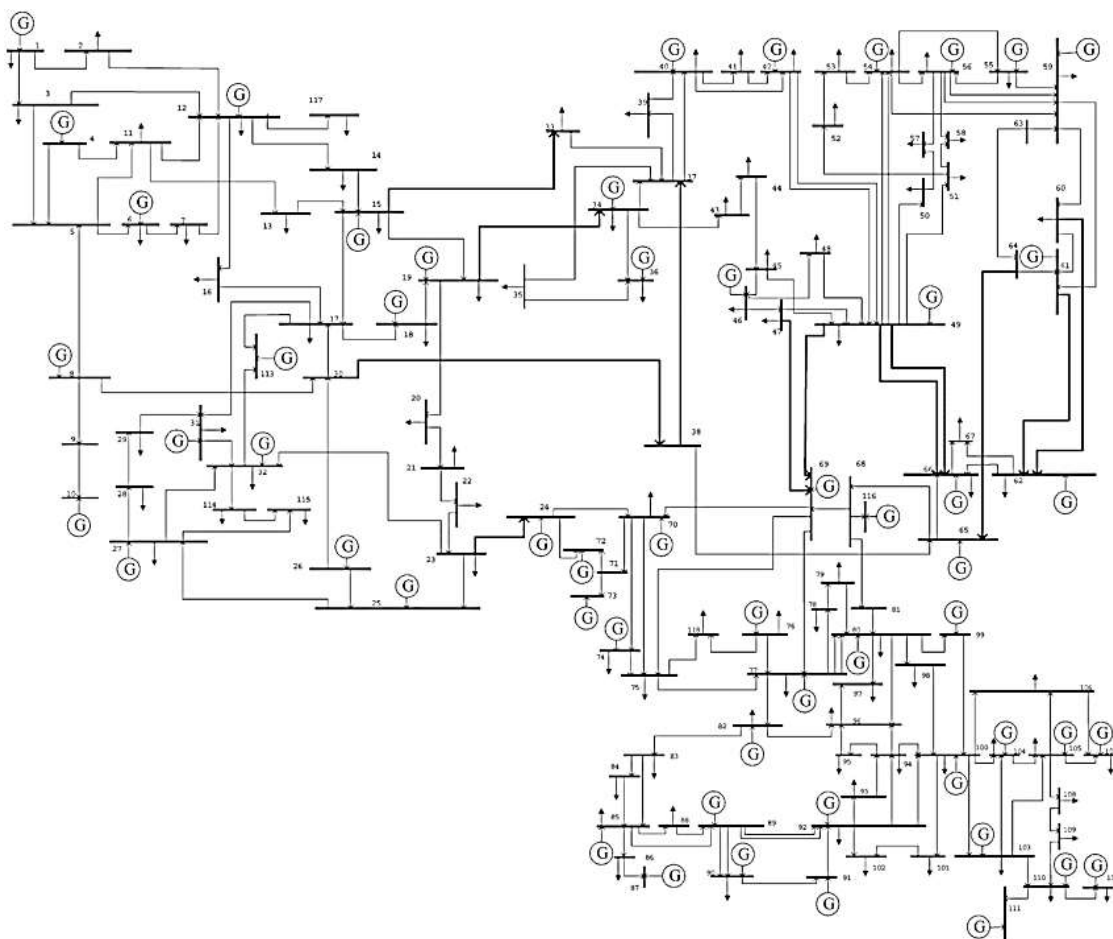
کمترین دامنه ولتاژ در شین ۸ با ۰/۹۶۱ پریونیت و بیشترین دامنه ولتاژ در شین ۱ با ۱/۰۰۰ پریونیت است و کمترین زاویه ولتاژ در شین ۱۹ با ۳/۹۵- درجه و بیشترین زاویه ولتاژ در شین ۱۳ با ۱/۴۸ درجه و بیشترین تلفات توان اکتیو در خط بین شینای ۲ و ۶ با ۰/۲۹ کیلو وات است و بیشترین تلفات توان راکتیو در خط بین شینای ۱۲ و ۱۳ با ۲/۱۰ کیلو وار است. تقاضای کل توان اکتیو سیستم ۲/۴۴۲ کیلو وات و تقاضای کل توان راکتیو سیستم ۸/۹۸ کیلو وار است. شکل (۳) سیستم ۳۰ شین IEEE را نشان می‌دهد.



پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های قدرت به روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جستجوی گرانشی ...

وات و بیشترین تلفات توان راکتیو در خط بین شینای ۹ و ۱۰ با ۵۹/۲۲ کیلو وار است. تقاضای کل توان راکتیو سیستم ۱۳۲/۸۷۰ کیلو وات و تقاضای کل توان راکتیو سیستم IEEE ۷۸۳/۸۳ کیلو وار است. شکل (۴) سیستم ۱۱۸ شین IEEE را نشان می‌دهد.

کمترین دامنه ولتاژ در شین ۷۶ با ۰/۹۴۳ پریونیت و بیشترین دامنه ولتاژ در شین ۱۰ با ۱/۰۵۰ پریونیت است و کمترین زاویه ولتاژ در شین ۴۱ با ۷/۰۵ درجه و بیشترین زاویه ولتاژ در شین ۸۹ با ۳۹/۷۵ درجه و بیشترین تلفات توان راکتیو بار در خط بین شینای ۲۷ و ۲۵ با ۶/۴۰ کیلو



شکل (۴): سیستم ۱۱۸ شین IEEE

پایه تضاد به دست آمده است، مقایسه نتایج بهینه‌سازی توان راکتیو، انجام و درباره آن بحث قرار می‌شود.

#### ۱-۳-۴ مقایسه نتایج حداقل سازی تلفات کل

##### برای سیستم ۳۰ شین IEEE

در ابتدا نتایج مربوط به تلفات کل خط انتقال، حاصل از سه روش بررسی می‌شوند. این نتایج در جدول (۳) آورده شده‌اند. همچنین، مقایسه مقادیر بهینه متغیرهای کنترل

#### ۳-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی توان راکتیو با الگوریتم‌های GSA, OGSA و روش ترکیبی (FUZZY Mean C-OGSA)

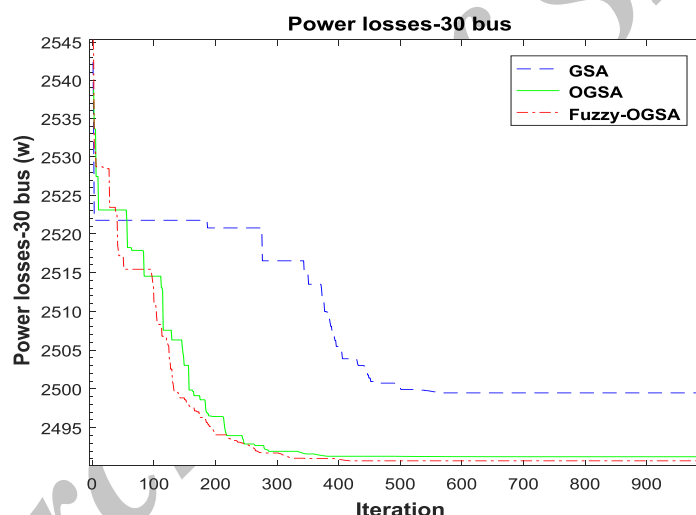
با توجه به سه تابع هدفی که در مسئله پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های ۳۰ و ۱۱۸ شین IEEE استفاده شده و نتایجی که با روش‌های الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و ترکیبی از الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر

پایه تضاد از نظر زمان همگرایی، نتایج بهتری را نسبت به روش های دیگر داشته است. نتایج عددی نشان می دهند روش ترکیبی ارائه شده بهتر از روش های دیگر، حداقل سازی تلفات خط را انجام می دهد.

جدول (۳): مقایسه نتایج حداقل سازی تلفات کل در سیستم ۳۰

شین IEEE		
الگوریتم مورد استفاده	تلفات (مگاوات)	زمان (ثانیه)
GSA	۲/۴۹۵۱	۹/۰۷۹۲
OGSA	۲/۴۹۴۵	۷/۸۰۸۱
FUZZY Mean C-OGSA	۲/۴۹۳۷	۵/۹۰۱۵

به دست آمده از سه روش در سیستم ۳۰ شین IEEE، در جدول (۴) آورده شده است. شکل (۵) نیز پروفایل همگرایی تلفات کل خط انتقال در سیستم ۳۰ شین IEEE را با استفاده از روش های ذکر شده نشان می دهد؛ به طوری که ملاحظه می شود حداقل تلفات از برابر با ۲/۴۹۳۷ مگاوات است که حاصل از روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد است و به ترتیب ۰/۰۵۶٪ و ۰/۰۳۲٪ از نتایج حاصل از روش های GSA و OGSA کمتر است. همچنین کمترین دامنه ولتاژ در شین ۸ با مقدار ۰/۹۶۱ پریونیت و بیشترین دامنه ولتاژ در شین ۱ با مقدار ۱/۰۰ پریونیت است. همچنین روش ترکیبی الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر



شکل (۵): مقایسه منحنی همگرایی با هدف حداقل سازی تلفات کل برای سیستم قدرت ۳۰ شین IEEE

نتایج بهینه سازی توان راکتیو با هدف کمینه سازی انحراف ولتاژ کل در سیستم ۳۰ شین با روش های ذکر شده، روش ترکیبی الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد از نظر زمان همگرایی کوتاه ترند و نتایج خروجی نسبت به روش های دیگر، انحراف ولتاژ کمتری را به دست آورده اند.

## ۲-۳-۴ مقایسه نتایج حداقل سازی انحراف ولتاژ

### کل برای سیستم ۳۰ شین IEEE

نتایج حاصل از سه روش یاد شده، با هدف کمینه سازی انحراف ولتاژ کل در جدول (۵) آورده شده اند. همچنین مقادیر بهینه متغیرهای کنترل حاصل از سه روش مذکور در سیستم ۳۰ شین IEEE، در جدول (۶) نشان داده شده اند و در شکل (۴) مشاهده می شود.

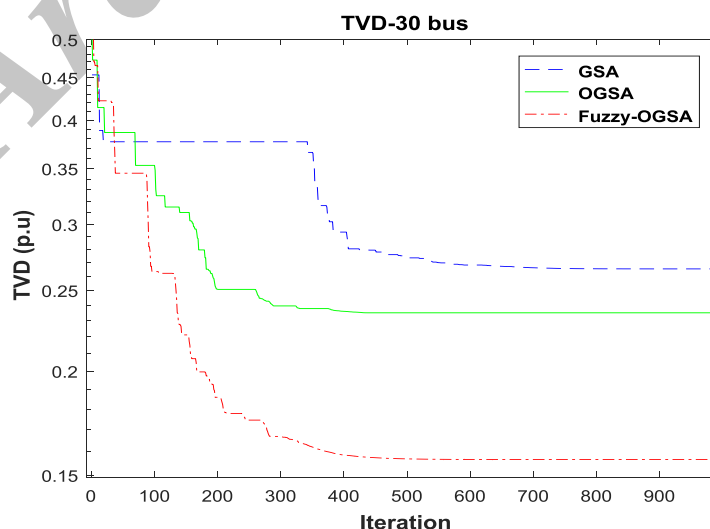
پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های قدرت به روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جستجوی گرانشی ...

جدول (۴): مقایسه نتایج شبیه‌سازی با هدف حداقل‌سازی تلفات کل در سیستم ۳۰ شین IEEE با الگوریتم‌های GSA و OGSA و ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور (پریونیت)		بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور (پریونیت)		بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور (پریونیت)	
۰/۰۳۲۰	QC-10			۱/۶۵۳۷۹۰	QC-10			۴/۹۹۹۸	QC-10		
۰/۰۲۴۰	QC-12			۴/۳۷۲۲۶۱	QC-12			۴/۹۸۷	QC-12		
۰/۰۱۶۷	QC-15	۰/۹۶۶۱	V1	۰/۱۱۹۹۵۷	QC-15	۰/۹۶۲۶	V1	۴/۹۹۰۶	QC-15	۰/۹۷۴۲	V1
۰/۰۵۰۱	QC-17	۰/۹۶۷۱	V2	۲/۰۸۷۶۱۷	QC-17	۰/۹۶۲۰	V2	۴/۹۹۷	QC-17	۰/۹۷۳۲	V2
۰/۰۳۳۱	QC-20	۰/۹۷۱۰	V3	۰/۳۵۷۷۲۹	QC-20	۰/۹۶۴۱	V3	۴/۹۹۰۱	QC-20	۰/۹۷۹۷	V3
۰/۰۴۰۱	QC-21	۰/۹۶۷۸	V6	۰/۲۶۰۲۵۴	QC-21	۰/۹۷۵۴	V6	۴/۹۹۴۶	QC-21	۰/۹۸۰۱	V6
۰/۰۲۶۸	QC-23	۰/۹۶۱۰	V8	۰/۰۰۰۰	QC-23	۰/۹۸۴۰	V8	۳/۸۷۵۳	QC-23	۰/۹۶۹۷	V8
۰/۰۵۰۱	QC-24	۰/۹۷۲۸	V9	۱/۳۸۳۹۵۶	QC-24	۰/۹۷۷۷۲	V9	۴/۹۸۶۷	QC-24	۰/۹۶۴۵	V9
۰/۰۱۹۵	QC-29	۰/۹۶۹۱	V12	۰/۰۰۰۳۱۱	QC-29	۰/۹۷۴۴	V12	۲/۹۰۹۸	QC-29	۰/۹۶۷۱	V12
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۱/۰۱۴۳	T4-T12	۱/۰۵۶۵	T6-T9	۱/۰۹۵۹۰۹	T4-T12	۱/۰۹۸۴۵۰	T6-T9	۰/۹۸۲۴۴	T4-T12	۱/۰۴۳۵	T6-T9
۱/۰۱۸۷	T27-T28	۰/۹۰۷۹	T6-T10	۱/۰۵۹۳۳۹	T27-T28	۰/۹۸۲۴۸۱	T6-T10	۰/۹۶۹۱۸	T27-T28	۰/۹۰۱۱۷	T6-T10

جدول (۵): مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۰ شین IEEE با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ

الگوریتم استفاده شده	انحراف ولتاژ (پریونیت)	زمان (ثانیه)
GSA	۰/۲۵۳۹	۷/۹۷۷۹
OGSA	۰/۲۰۹۱	۶/۸۶۱۰
FUZZY Main C-OGSA	۰/۱۸۵۶	۵/۱۸۵۶



شکل (۶): مقایسه منحنی همگرایی با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ کل برای سیستم قدرت ۳۰ شین IEEE

جدول (۶): مقایسه نتایج شبیه‌سازی با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ در سیستم ۳۰ شین IEEE با الگوریتم‌های GSA و OGSA و ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک‌خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور		بانک‌خازن (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور		بانک‌خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور	
۰/۰۲۴۵	QC-10			۰/۰۰۰۰۰۰	QC-10			۴/۹۴۲۰	QC-10		
۱۰/۰۱۷۵۱	QC-12		(پریونیت)	۰/۴۷۳۵۱۲	QC-12			۱/۰۸۸۵	QC-12		(پریونیت)
۰/۰۲۸۱	QC-15	۰/۹۸۲۳	V1	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-15	۰/۹۹۹۲	V1	۴/۹۹۸۵	QC-15	۰/۹۹۹۵	V1
۰/۰۴۰۱	QC-17	۰/۹۹۱۱	V2	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-17	۰/۹۸۵۶	V2	۰/۲۳۹۳	QC-17	۰/۹۹۳۵	V2
۰/۰۰۰۰	QC-20	۰/۹۹۹۳	V3	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-20	۰/۹۹۰۱	V3	۴/۹۹۵۸	QC-20	۰/۹۸۷۵	V3
۰/۰۲۷۸	QC-21	۰/۹۶۹۴	V6	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-21	۰/۹۹۱۳	V6	۴/۹۰۷۵	QC-21	۰/۹۸۸۱	V6
۰/۰۳۸۵	QC-23	۰/۹۹۳۸	V8	۴/۹۹۹۸۳۴	QC-23	۰/۹۸۹۸	V8	۴/۹۸۶۳	QC-23	۰/۹۹۶۳	V8
۰/۰۲۴۷	QC-24	۰/۹۹۷۶	V9	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-24	۰/۹۹۸۲	V9	۴/۹۶۶۳	QC-24	۰/۹۹۳۹	V9
۰/۰۰۰۰	QC-29	۰/۹۹۹۱	V12	۰/۰۰۰۰۰۰	QC-29	۰/۹۹۴۲	V12	۲/۲۳۲۵	QC-29	۰/۹۹۳۴	V12
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۱/۰۷۶۲	T4-T12	۰/۹۹۰۸	T6-T9	۱/۰۵۰۵۹۹	T4-T12	۰/۹۰۰۰۰۰	T6-T9	۱/۰۱۱۴	T4-T12	۱/۰۲۶۵	T6-T9
۱/۰۱۱۷	T27-T28	۰/۰۶۲۴	T6-T10	۰/۹۶۱۹۹۹	T27-T28	۱/۱۰۰۰۰۰	T6-T10	۰/۹۶۳۵	T27-T28	۰/۹۰۳۸	T6-T10

سیستم ۳۰ شین با روش‌های ذکر شده، روش مبتنی بر ترکیب الگوریتم فزای میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد از نظر زمان همگرایی، کوتاه‌تر است و نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر به دست می‌آیند.

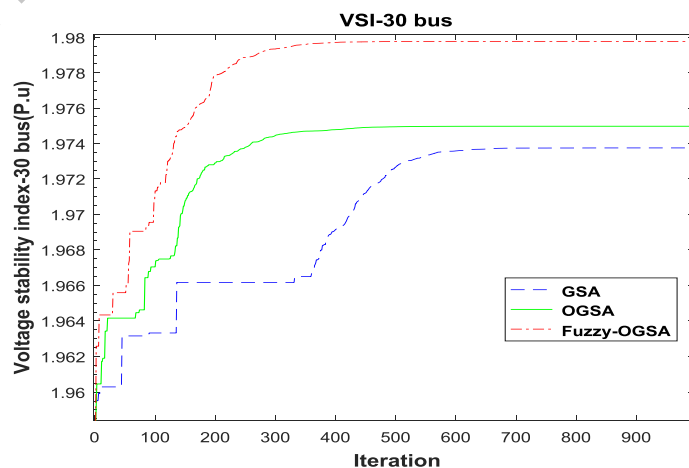
جدول (۷): مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۰ شین IEEE با هدف بهبود شاخص ثبات ولتاژ

الگوریتم استفاده شده	شاخص ولتاژ (پریونیت)	زمان (ثانیه)
GSA	۱/۹۷۲۳	۸۷۶۶۲
OGSA	۱/۹۷۸۲	۷/۵۳۸۹
FUZZY Main C-OGSA	۱/۹۸۰۲	۵/۶۹۸۰

### ۳-۱-۳-۴ مقایسه نتایج بهبود شاخص ثبات ولتاژ برای سیستم ۳۰ شین IEEE

در این بخش، مقایسه مقادیر بهینه شاخص پایداری ولتاژ، حاصل از سه روش بررسی می‌شود. جدول (۷) مقادیر بهینه شاخص ثبات ولتاژ، حاصل از به‌کارگیری سه روش مذکور در سیستم ۳۰ شین IEEE را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر بهینه متغیرهای کنترل به دست آمده از سه روش فوق نیز در جدول (۸) نشان داده شده‌اند.

در شکل (۷) مشاهده می‌شود که در مسئله بهینه‌سازی توان راکتیو با هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ کل در



شکل (۷): مقایسه منحنی همگرایی بهبود شاخص ثبات ولتاژ برای سیستم قدرت ۳۰ شین IEEE

پخش بهینه توان راکتیو در سیستم‌های قدرت به روش ترکیبی منطق فازی و الگوریتم جستجوی گرانشی ...

جدول (۸): مقایسه نتایج با هدف بهبود شاخص ثبات ولتاژ در سیستم ۳۰ شین IEEE با الگوریتم‌های GSA و OGSA و ترکیبی

(FUZZY Main C-OGSA)

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور		بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور		بانک خازنی (پریونیت)		ولتاژ ژنراتور	
۰/۰۰۲۱	QC-10			۵/۰۰۰۰۰	QC-10			۰/۶۸۵۴	QC-10		
۰/۰۲۶۵۸	QC-12		(پریونیت)	۵/۰۰۰۰۰	QC-12		(پریونیت)	۴/۷۱۶۳	QC-12		(پریونیت)
۰/۰۰۰۰	QC-15	۰/۹۸۵۶	V1	۵/۰۰۰۰۰	QC-15	۰/۹۸۴۱	V1	۴/۴۹۳۱	QC-15	۰/۹۹۴۴	V1
۰/۰۰۰۴	QC-17	۰/۹۸۷۵	V2	۵/۰۰۰۰۰	QC-17	۰/۹۸۶۶	V2	۴/۵۱۰۰	QC-17	۰/۹۸۳۹	V2
۰/۰۰۰۰	QC-20	۰/۹۹۱۲	V3	۵/۰۰۰۰۰	QC-20	۰/۹۸۴۳	V3	۴/۴۷۶۶	QC-20	۰/۹۷۷۶	V3
۰/۰۰۰۰	QC-21	۰/۹۸۹۶	V6	۵/۰۰۰۰۰	QC-21	۰/۹۸۳۶	V6	۴/۶۰۷۵	QC-21	۰/۹۹۵۶	V6
۰/۰۰۰۰	QC-23	۰/۹۸۷۸	V8	۵/۰۰۰۰۰	QC-23	۰/۹۸۵۲	V8	۳/۸۸۰۶	QC-23	۰/۹۸۰۵	V8
۰/۰۰۰۹	QC-24	۰/۹۸۵۹	V9	۵/۰۰۰۰۰	QC-24	۰/۹۹۰۳	V9	۳/۸۸۰۶	QC-24	۰/۹۷۷۷	V9
۰/۰۰۰۱	QC-29	۰/۹۸۷۸	V12	۵/۰۰۰۰۰	QC-29	۰/۹۸۳۶	V12	۳/۲۵۴۱	QC-29	۰/۹۷۷۶	V12
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۰/۹۵۳۴	T4-T12	۰/۹۷۲۸	T6-T9	۰/۹۰۰۰۰	T4-T12	۰/۹۰۰۰۰	T6-T9	۰/۹۰۰۲	T4-T12	۰/۹۰۳۸	T6-T9
۰/۹۵۰۱	T27-T28	۰/۹۰۰۰۰	T6-T10	۱/۰۱۹۵۳۸	T27-T28	۰/۹۰۰۰۰	T6-T10	۰/۹۳۶۰	T27-T28	۰/۹۰۲۹	T6-T10

ترکیب الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد از نظر زمان همگرایی و نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر به دست آمده‌اند.

جدول (۹): مقایسه نتایج حداقل سازی تلفات کل در سیستم

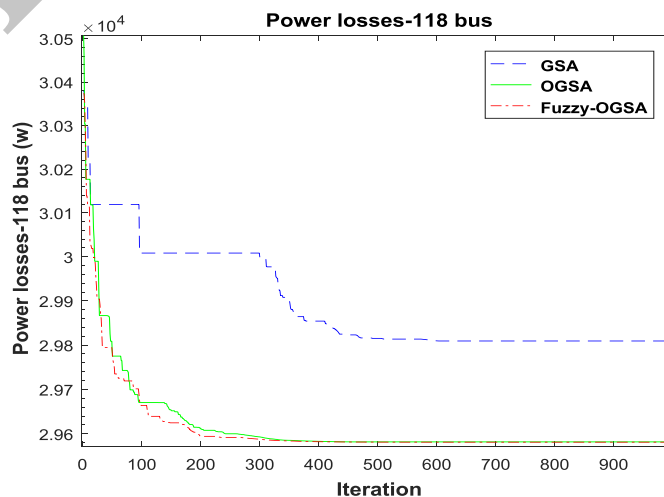
۱۱۸ شین IEEE

الگوریتم استفاده شده	تلفات (مگاوات)	زمان (ثانیه)
GSA	۲۹/۷۶۵	۱۴/۹۹۰۷
OGSA	۲۹/۷۴۴	۱۲/۸۹۲۰
FUZZY Mean C-OGSA	۲۹/۵۹۰	۹/۷۴۳۹

۱-۲-۳-۴ مقایسه نتایج حداقل سازی تلفات کل

برای سیستم ۱۱۸ شین IEEE

روش‌های پیشنهادی برای کمینه‌سازی تلفات خط انتقال کل در سیستم ۱۱۸ شین، تابع هدف بوده است. مقایسه مقادیر بهینه نتایج به دست آمده تلفات خط انتقال کل حاصل از سه روش بررسی می‌شود و در جدول (۹) و مقایسه مقادیر بهینه از متغیرهای کنترل به دست آمده از سه روش در سیستم ۱۱۸ شین IEEE در جدول (۱۰) نشان داده شده است و در شکل (۸) مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی توان راکتیو با هدف کمینه‌سازی تلفات خط انتقال کل در سیستم ۱۱۸ شین با روش‌های ذکر شده، روش



شکل (۸): منحنی همگرایی با هدف حداقل سازی تلفات برای سیستم قدرت ۱۱۸ شین

جدول (۱۰): مقایسه نتایج شبیه‌سازی با هدف حداقل‌سازی تلفات کل در سیستم ۱۱۸ شین با الگوریتم‌های GSA و OGSA و ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)			
۰/۰۵۰۹	QC-74	-۰/۳۳۱۹	QC-5	۹/۷۲	QC-74	۰/۰۰	QC-5	۰/۵۴۷۱	QC-74	۰/۰۰۰۰	QC-5
۰/۱۱۰۴	QC-79	۰/۰۴۸۰	QC-34	۱۴/۲۵	QC-79	۷/۴۶	QC-34	۱۴/۸۵۳۲	QC-79	۱۱/۷۱۳۵	QC-34
۰/۰۹۶۵	QC-82	-۰/۲۴۹۰	QC-37	۱۷/۴۹	QC-82	۰/۰۰	QC-37	۱۹/۴۲۷۰	QC-82	۰/۰۰۰۰	QC-37
۰/۰۲۶۳	QC-83	۰/۰۳۲۸	QC-44	۴/۲۸	QC-83	۶/۰۷	QC-44	۶/۹۸۲۴	QC-83	۹/۸۹۳۲	QC-44
۰/۰۴۴۲	QC-105	۰/۰۳۸۳	QC-45	۱۲/۰۴	QC-105	۳/۳۳	QC-45	۹/۰۲۹۱	QC-105	۲/۴۱۶۹	QC-45
۰/۰۰۸۵	QC-107	۰/۰۵۴۵	QC-46	۲/۳۶	QC-107	۶/۵۱	QC-46	۴/۹۹۳۶	QC-107	۲/۸۵۴۶	QC-46
۰/۰۱۴۴	QC-110	۰/۰۱۸۱	QC-48	۲/۹۴	QC-110	۴/۴۷	QC-48	۲/۲۰۸۶	QC-110	۲/۸۵۴۶	QC-48
ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)			
۰/۹۷۴۴	V8	۰/۹۸۹۹	V1	۰/۹۵۱۱	V8	۰/۹۴۶۲	V1	۰/۹۸۱۲	V8	۰/۹۸۸۱	V1
۰/۹۴۳۰	V9	۱/۰۰۵۲	V2	۰/۹۴۷۷	V9	۰/۹۶۴۵	V2	۰/۹۶۰۵	V9	۰/۹۴۵۲	V2
		۰/۹۷۰۹	V3			۰/۹۶۹۴	V3			۰/۹۴۷۸	V3
۱/۰۰۷۳	V12	۰/۹۷۳۲	V6	۰/۹۷۸۹	V12	۰/۹۸۵۶	V6	۰/۹۹۸۵	V12	۰/۹۶۲۱	V6
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۰/۹۹۵۶	T95	۰/۹۵۶۸	T8	۰/۹۴۹۳	T95	۱/۰۶۵۹	T8	۱/۰۰۷۴	T95	۱/۰۰۴۵	T8
۰/۹۸۸۲	T102	۱/۰۴۰۹	T32	۰/۹۹۷۵	T102	۰/۹۵۳۴	T32	۱/۰۶۱۱	T102	۱/۰۶۰۹	T32
۰/۹۲۵۱	T107	۰/۹۹۶۳	T36	۰/۹۸۸۷	T107	۰/۹۳۲۸	T36	۰/۹۳۰۷	T107	۱/۰۰۸	T36
۱/۰۶۶۱	T127	۰/۹۷۷۵	T51	۰/۹۸۰۱	T127	۱/۰۸۸۴	T51	۰/۹۵۷۸	T127	۱/۰۰۹۳	T51
		۰/۹۵۶۰	T93			۱/۰۵۷۹	T93			۰/۹۹۲۲	T93

زمان همگرایی و نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر به دست آمده‌اند.

جدول (۱۱): نتایج سیستم ۱۱۸ شین با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ

الگوریتم مورد استفاده	انحراف ولتاژ (پریونیت)	زمان (ثانیه)
GSA	۰/۶۱۵۷	۹/۴۳۳۸
OGSA	۰/۵۸۹۵	۸/۱۱۳۱
FUZZY Main C-OGSA	۰/۴۹۶۸	۶/۱۳۲۰

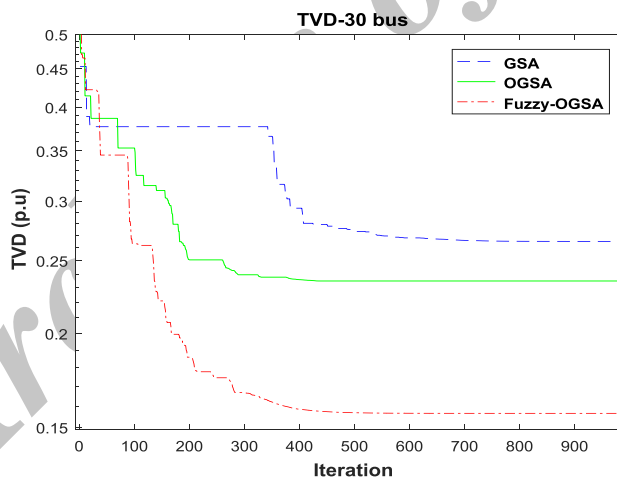
## ۲-۳-۴ مقایسه نتایج حداقل‌سازی انحراف ولتاژ

### کل برای سیستم ۱۱۸ شین IEEE

روش‌های پیشنهادی برای کمینه‌سازی انحراف ولتاژ از شبکه توان در سیستم ۱۱۸ شین به کار برده شده و تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. جدول (۱۱) و مقایسه مقادیر بهینه از متغیرهای کنترل به دست آمده از سه روش در سیستم ۱۱۸ شین IEEE در جدول (۱۲) نشان داده شده است و در شکل (۹) مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی توان راکتیو با هدف کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل در سیستم ۱۱۸ شین با روش‌های ذکر شده، روش ترکیب الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد از نظر

جدول (۱۲): مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیستم ۱۱۸ شین IEEE با هدف حداقل سازی انحراف ولتاژ

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)			
۰/۰۸۸۳	QC-74	-۰/۲۴۰۳	QC-5	۰/۷۵۹۲	QC-74	-۰/۰۵۶۸	QC-5	۰/۶۱۳۲	QC-74	۰/۰۰۰۰	QC-5
۰/۱۲۱۸	QC-79	۰/۰۳۷۱	QC-34	۰/۲۴۵۶	QC-79	۰/۰۱۴۶	QC-34	۰/۵۹۲۳	QC-79	۰/۰۶۳۹	QC-34
۰/۰۳۸۰	QC-82	-۰/۰۴۳۷	QC-37	۰/۳۴۸۹	QC-82	۰/۰۰	QC-37	۰/۴۵۴۴	QC-82	۰/۰۰۰۰	QC-37
۰/۰۶۲۷	QC-83	۰/۰۳۷۵	QC-44	۰/۶۲۵۸	QC-83	۰/۱۶۰۷	QC-44	۰/۶۳۲۵	QC-83	۰/۳۰۷۸	QC-44
۰/۰۸۳۰	QC-105	۰/۰۴۰۰	QC-45	۰/۸۴۵۵	QC-105	۰/۴۶۳۳	QC-45	۰/۹۵۱۳	QC-105	۰/۶۴۲۸	QC-45
۰/۰۴۵۹	QC-107	۰/۰۷۴۹	QC-46	۰/۱۶۰۲	QC-107	۰/۸۶۳۱	QC-46	۰/۰۴۲۶	QC-107	۰/۹۴۶۲	QC-46
۰/۰۲۲۱	QC-110	۰/۰۷۹۶	QC-48	۰/۴۶۴۴	QC-110	۰/۷۵۴۷	QC-48	۰/۵۳۱۹	QC-110	۰/۸۰۹۲	QC-48
ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)			
۰/۹۸۰۴	V8	۰/۹۹۶۹	V1	۱/۰۰۰۰	V8	۰/۹۹۲۸	V1	۱/۰۱۷۹	V8	۰/۹۹۲۷	V1
۰/۹۹۶۷	V9	۱/۰۰۰۲	V2	۰/۹۹۲۹	V9	۰/۹۸۸۳	V2	۱/۰۱۱۶	V9	۱/۰۰۰۹	V2
۰/۹۹۲۳	V12	۰/۹۸۸۹	V3	۰/۹۹۵۰	V12	۱/۰۰۰۰	V3	۱/۰۰۰۰	V12	۱/۰۰۰۸	V3
		۱/۰۰۰۲	V6			۰/۹۹۸۷	V6			۱/۰۰۲۲	V6
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۱/۰۳۳۰	T95	۰/۹۸۵۲	T8	۱/۰۳۰۷	T95	۱/۰۰۰۰	T8	۱/۰۳۲۶	T95	۱/۰۱۱۲	T8
۱/۰۱۳۱	T102	۱/۰۳۸۱	T32	۰/۹۶۷۰	T102	۰/۹۹۸۴	T32	۰/۹۴۴۳	T102	۱/۰۹۰۶	T32
۰/۹۷۹۵	T107	۰/۹۵۶۴	T36	۰/۹۸۸۷	T107	۰/۹۸۲۶	T36	۰/۹۰۶۷	T107	۱/۰۰۳۳	T36
۰/۹۹۷۳	T127	۰/۹۹۱۷	T51	۰/۹۸۶۱	T127	۰/۹۹۸۲	T51	۰/۹۶۷۳	T127	۱/۰۰۰۰	T51
		۰/۹۶۴۱	T93			۰/۹۷۲۵	T93			۱/۰۰۸۰	T93



شکل (۹): مقایسه منحنی همگرایی با هدف حداقل سازی انحراف ولتاژ کل برای سیستم قدرت ۱۱۸ شین IEEE

به دست آمده از سه روش در سیستم ۱۱۸ شین IEEE در جدول (۱۴) نشان داده شده است و در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی بهینه‌سازی توان راکتیو با هدف بهبود شاخص پایداری ولتاژ کل در سیستم ۱۱۸ شین با روش‌های ذکر شده، روش ترکیب الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد از نظر زمان همگرایی و نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر به دست آمده‌اند.

### ۳-۲-۳-۴ مقایسه نتایج بهبود شاخص ثبات ولتاژ

#### برای سیستم ۱۱۸ شین IEEE

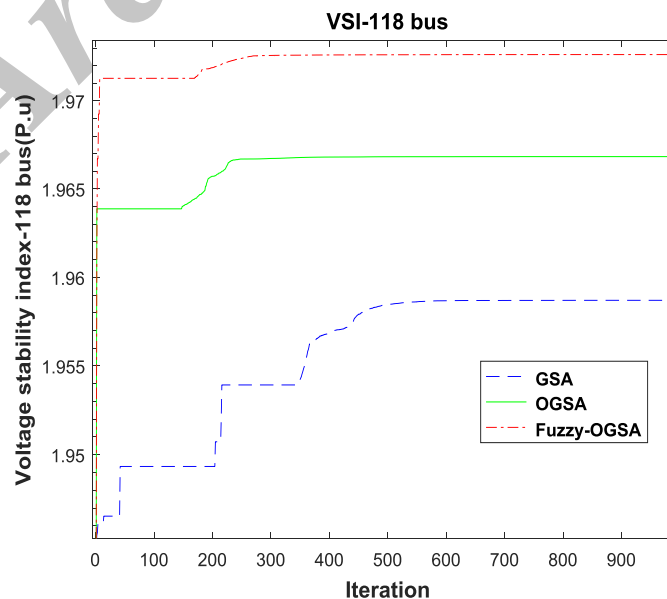
روش‌های پیشنهادی برای بهبود شاخص پایداری ولتاژ کل در سیستم ۱۱۸ شین به کار برده شده و تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. مقایسه مقادیر بهینه نتایج به دست آمده شاخص پایداری ولتاژ حاصل از سه روش بررسی می‌شود و در جدول (۱۳) و مقایسه مقادیر بهینه از متغیرهای کنترل

جدول (۱۳): مقایسه نتایج با هدف بهبود شاخص ثبات ولتاژ در سیستم ۱۱۸ شین IEEE با الگوریتم های GSA و OGSA و ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)

الگوریتم ترکیبی (FUZZY Main C-OGSA)				الگوریتم OGSA				الگوریتم GSA			
بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)				بانک خازنی (پریونیت)			
۰/۱۰۷۸	QC-74	-۰/۳۰۷۱	QC-5	۰/۲۱۷۶	QC-74	-۰/۵۲۶۱	QC-5	۰/۳۲۴۵	QC-74	-۰/۲۲۱۳	QC-5
۰/۱۳۶۱	QC-79	۰/۰۱۶۵	QC-34	۰/۱۳۴۲	QC-79	۰/۰۳۵۱	QC-34	۰/۱۵۳۶	QC-79	۰/۰۳۶۲	QC-34
۰/۱۳۹۱	QC-82	-۰/۱۸۹۱	QC-37	۰/۱۲۷۵	QC-82	-۰/۲۱۴۶	QC-37	۰/۱۱۶۱	QC-82	-۰/۲۸۳۱	QC-37
۰/۰۴۳۴	QC-83	۰/۰۸۱۴	QC-44	۰/۰۲۸۷	QC-83	۰/۰۵۴۲	QC-44	۰/۰۱۳۳	QC-83	۰/۰۸۷۹	QC-44
۰/۰۹۹۱	QC-105	۰/۰۷۷۷	QC-45	۰/۰۸۵۲	QC-105	۰/۰۶۵۴	QC-45	۰/۰۷۹۲	QC-105	۰/۰۹۷۷	QC-45
۰/۰۵۲۰	QC-107	۰/۰۴۵۴	QC-46	۰/۰۹۷۲	QC-107	۰/۰۳۴۸	QC-46	۰/۱۲۲۰	QC-107	۰/۰۱۳۷	QC-46
۰/۰۱۶۴	QC-110	۰/۰۰۴۲	QC-48	۰/۰۳۸۲	QC-110	۰/۰۰۱۱	QC-48	۰/۰۴۳۸	QC-110	۰/۰۹۹۸۲	QC-48
ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)				ولتاژ ژنراتور (پریونیت)			
۰/۹۸۸۷	V8	۱/۰۱۸۹	V1	۰/۹۷۲۷	V8	۰/۹۹۷۲	V1	۰/۹۸۷۳	V8	۰/۹۸۹۹	V1
۱/۰۲۳۴	V9	۰/۹۹۸۶	V2	۰/۹۷۹۳	V9	۰/۹۸۹۶	V2	۰/۹۹۷۹	V9	۰/۹۸۰۱	V2
		۰/۹۹۵۱	V3			۰/۹۷۰۷	V3			۰/۹۸۱۳	V3
۱/۰۱۹۴	V12	۰/۹۷۵۶	V6	۱/۰۲۰۱	V12	۱/۰۰۳۳	V6	۰/۹۶۷۱	V12	۰/۹۷۴۶	V6
موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور				موقعیت تپ ترانسفورماتور			
۰/۹۱۲۱	T95	۰/۹۶۲۱	T8	۰/۹۲۳۳	T95	۰/۸۶۵۶	T8	۰/۹۴۶۱	T95	۰/۸۶۲۷	T8
۰/۰۶۳۷	T102	۱/۰۷۴۹	T32	۰/۰۹۷۱	T102	۱/۰۵۳۴	T32	۰/۱۲۳۹	T102	۱/۰۱۶۹	T32
۰/۹۰۴۹	T107	۱/۰۱۴۹	T36	۰/۹۱۸۸	T107	۱/۰۳۷۸	T36	۰/۹۳۱۷	T107	۱/۰۶۲۱	T36
۰/۹۸۴۸	T127	۰/۹۹۱۰	T51	۰/۹۶۰۱	T127	۰/۹۸۸۴	T51	۰/۹۵۴۴	T127	۰/۹۶۲۰	T51
		۱/۰۸۷۱	T93			۱/۰۵۴۹	T93			۱/۰۱۷۷	T93

جدول (۱۴): مقایسه نتایج شبیه سازی سیستم ۱۱۸ شین IEEE با هدف بهبود شاخص ثبات ولتاژ

الگوریتم مورداستفاده	شاخص ولتاژ (پریونیت)	زمان (ثانیه)
GSA	۱/۹۶۷۰	۶۳۲۴۷
OGSA	۱/۹۷۰۷	۵/۴۳۹۳
FUZZY Main C-OGSA	۱/۹۷۵۱	۴/۱۱۱۱



شکل (۱۰): مقایسه منحنی همگرایی بهبود شاخص ثبات ولتاژ برای سیستم قدرت ۱۱۸ شین IEEE



## ۵- نتیجه گیری

این پژوهش به مسئله پخش بهینه توان راکتیو، با در نظرگیری توابع هدف مختلف و با استفاده از روش‌های هوشمند و فرا ابتکاری پرداخته است. با توجه به محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، به دلیل مسائل حرارتی سیم‌پیچ‌ها و این واقعیت که ژنراتورهای موجود در شبکه به تنهایی نمی‌توانند در ساعات پربار، تمام توان راکتیو مورد نیاز سیستم را تأمین کنند، مسئله پخش بهینه توان راکتیو اهمیت پیدا می‌کند. در این راستا، در مقاله حاضر اهداف مختلفی شامل حداقل سازی اتلاف توان اکتیو، حداقل سازی انحراف ولتاژ کل و بهبود شاخص ثبات ولتاژ، به تفکیک مدنظر قرار گرفته‌اند. همچنین بهینه‌سازی پخش توان راکتیو نیز به کمک سه روش مختلف شامل الگوریتم جستجوی گرانشی، الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد و ترکیب الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد، روی سیستم‌های مطالعاتی ۳۰ شینه و ۱۱۸ شینه IEEE انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به وضوح نشان می‌دهند در روش ترکیبی، شاخص زمانی مربوط به همگرایی، بهبود و میزان جهش نیز کاهش یافته است. همچنین حاشیه‌های پایداری سیستم نیز افزایش یافته که به نوبه خود به آزادسازی بخشی از ظرفیت شبکه انتقال و در نتیجه استفاده اقتصادی‌تر از شبکه قدرت منجر خواهد شد. و نیز نشان داده شده است بازدهی و مقادیر بهینه حاصل از روش ترکیبی نسبت به دیگر روش‌ها کیفیت بهتری دارند؛ بنابراین روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم فازی میانگین و الگوریتم جستجوی گرانشی بر پایه تضاد، الگوریتم بسیار مناسب و کارآمد برای حل برخی از دیگر مسائل بهینه‌سازی مهندسی پیچیده است.

## مراجع

- Algorithm," in Systems Journal, IEEE, Vol. 7, No. 4, pp. 742-753, Dec. 2013.
- [3] S. Rahnamayan, H. R. Tizhoosh, M. M. A. Salama, "Opposition-Based Differential Evolution. Evolutionary Computation", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 12, No. 1, pp. 64-79, 2006.
- [4] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp.12-19, 2011.
- [5] A. A. A. Esmine, G. Lambert-Torres, AC. Z. De Souza, "A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 859-866, 2005.
- [6] Ali Ghasemi., Khalil Valipour., Akbar Tohidi. "Multi objective optimal reactive power dispatch using a new multi objective strategy," in Electrical Power and Energy Systems, Vol. 57, pp. 318-334, May. 2014.
- [7] Yuancheng Li., Yiliang Wang., Bin Li., "A hybrid artificial bee colony assisted differential evolution algorithm for optimal reactive power flow," in Electrical Power and Energy Systems, Vol. 52, pp. 25-33, Nov. 2013.
- [8] S. Granville, "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 136-146, 1994.
- [9] P. Subbaraj, P. N. Rajnarayanan, "Optimal Reactive Power Dispatch Using Self-adaptive Real Coded Genetic Algorithm", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 2, pp. 374-381, 2009.
- [10] M. Tripathy, S. Mishra, "Bacteria Foraging-Based Solution to Optimize Both Real Power Loss and Voltage Stability Limit", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 240-248, 2007.
- [11] B. Zhao, C. X. Guo, Y. J. Cao, "A Multiagent-Based Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Reactive Power Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 1070-1078, 2005.
- [12] Biplab Bhattacharyya., Saurav Raj. "PSO based bio inspired algorithms for reactive power planning," in Electrical Power and Energy Systems, Vol. 74, pp. 396-402, Jan. 2016.
- [13] A. J. Urdaneta, J. F. Gomez, E. Sorrentino, L. Flores, r. Diaz, "A hybrid genetic algorithm for optimal reactive power planning based upon successive linear programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1292-1298, 1999.
- [14] A. H. Khazali, M. Kalantar, "Optimal Reactive Power Dispatch Based on Harmony Search Algorithm", International Journal of Electrical
- [1] Binod Shaw., V.Mukherjee., S.P.Ghoshal. "Solution of reactive power dispatch of power systems by an opposition-based gravitational search algorithm," in Electrical Power and Energy Systems, Vol. 55, pp. 29-40, Feb. 2014.
- [2] Niknam, T., Narimani, M.R., Azizipanah-Abarghooee, R., Bahmani-Firouzi, B., "Multiobjective Optimal Reactive Power Dispatch and Voltage Control: A New Opposition-Based Self-Adaptive Modified Gravitational Search

- Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 3, pp. 684-692, 2011.
- [15] S. Sarafrazi, H. Nezamabadi-pour, "Facing the Classification of Binary Problems With a GSA-SVM Hybrid System", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 57, No. 1-2, pp. 270-278, 2013.
- [16] T. Niknam, "An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm Based on PSO and HBMO Algorithms for Multi-Objective Distribution Feeder Reconfiguration", *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 8, pp. 2074-2082, 2009.
- [17] A. R. Bhowmik, A.K. Chakraborty, "Solution of Optimal Power Flow Using Nondominated Sorting Multi Objective Gravitational Search Algorithm", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 62, pp. 323-334, 2014.
- [18] H. Zhang, Y. Zou, X. Yan "A Hybrid Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm for Burdening Optimization of Copper Strip Production", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 6, pp. 2578-2591, 2012.
- [19] A. Ghasemi, "A Fuzzified Multi Objective Interactive Honey Bee Mating Optimization for Environmental/Economic Power Dispatch with Valve Point Effect", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 49, pp. 308-321, 2013.
- [20] D. Karaboga, B. Basturk, "A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm", *Journal of Global Optimization*, Vol. 39, No. 3, pp. 459-471, 2007.
- [21] M. Varadarajan, K. S. Swarup, "Network Loss Minimization with Voltage Security Using Differential Evolution", *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 5, pp. 815-823, 2008.
- [22] E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, M. R. Narimani, "A Novel Fuzzy Adaptive Configuration of Particle Swarm Optimization to Solve Large-Scale Optimal Reactive Power Dispatch", *Applied Soft Computing*, Vol. 53, pp. 441-456, 2017.
- [23] M. Basu, "Quasi-Operational Differential Evolution for Optimal Reactive Power Dispatch", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 78, pp. 29-40, 2016.

---

<sup>1</sup> Total Voltage Deviation

<sup>2</sup> Voltage Stability Index

<sup>3</sup> Optimal Gravitational Search Algorithm

<sup>4</sup> Optimal Reactive Power Dispatch