

حل مسئله پخش بار بهینه در شرایط نرمال و اضطراری با استفاده از الگوریتم ترکیبی گروه ذرات و نلدر مید (PSO-NM)

محمود جورابیان^۱ احسان افزalan^۲

۱ - استاد دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - ایران

mjoorabian@scu.ac.ir

۲ - دانش آموخته - کارشناس ارشد مهندسی برق - گرایش قدرت

Ehsan.afzalan@gmail.com

چکیده: در این مقاله به منظور حل مسئله پخش بار بهینه (OPF)، از الگوریتم ترکیبی گروه ذرات (PSO) و نلدر - مید (Nelder-Mead) برای تنظیم بهینه متغیرهای کنترلی پخش بار بهینه استفاده شده است. هدف از ترکیب دو الگوریتم گروه ذرات و نلدر - مید یافتن روشی می باشد که علاوه بر داشتن مزیت های دو الگوریتم فوق، عیب و نقص های این دو الگوریتم را نداشته باشد. قدرت بالا در جستجو و وابستگی زیاد عملکرد به انتخاب اولیه نقاط از مزایا و معایب الگوریتم نلدر - مید می باشد. همچنین از مزایا و معایب الگوریتم گروه ذرات می توان به یافتن بهترین جواب و سرعت پایین در رسیدن به همگرایی اشاره کرد. بنابراین با ترکیب این دو الگوریتم، می توان به روش هوشمندی دست یافت که علاوه بر عدم وابستگی به انتخاب اولیه نقاط، دارای قدرت و سرعت بالایی در همگرایی می باشد. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد IEEE bus - ۳۰ با در نظر گرفتن اهداف حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها، اصلاح پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ در شرایط عادی و اضطراری بررسی شده است. توابع هزینه مورد استفاده در این مطالعه بصورت چند جمله ای درجه دوم تکه ای ناهموار و غیرمحدب می باشند. نتایج شبیه سازی با استفاده از الگوریتم مذکور با نتایج حاصل از سایر الگوریتم های تکاملی ارائه شده در مقالات سال های اخیر مقایسه شده است که نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم PSO-NM در حل مسئله پخش بار بهینه می باشد.

کلمات کلیدی: پخش بار بهینه (OPF)، پایداری ولتاژ، الگوریتم ترکیبی گروه ذرات و نلدر مید (PSO-NM)، بهبود پروفیل ولتاژ، تابع هزینه ناهموار، کاهش هزینه سوخت.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۳/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸

نام نویسنده ی مسئول: محمود جورابیان

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - اهواز - دانشگاه شهید چمران - دانشکده ی مهندسی - گروه برق

بهره‌برداری اقتصادی یکی از مسائل اساسی در سیستم‌های قدرت می‌باشد. پخش بار بهینه یکی از ابزارهای مهم برای سطوح برنامه‌ریزی می‌باشد. هدف اصلی پخش بار بهینه بدست آوردن مقادیر مربوط به پارامترهای بهینه سیستم قدرت جهت عملکرد ایمن و اقتصادی سیستم قدرت می‌باشد [۱]. در این راستا هزینه تولیدی نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن قیود واقعی سیستم حداقل می‌شود [۲].

جهت حل مسئله پخش بار بهینه تا کنون روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. پخش بار بهینه یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی با قیود استاتیکی است که با توسعه تکنیک‌های بهینه‌سازی عددی و روش‌های محاسباتی در مطالعات سیستم قدرت مورد توجه واقع شده است. تکنیک‌های کلاسیک حل مسئله پخش بار بهینه، شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی درجه دوم، نقطه درونی و روش نیوتن می‌باشند، که در مراجع [۳-۵] به این روشها پرداخته شده است. با توجه به اینکه پخش بار بهینه یک مسئله بهینه‌سازی به شدت غیرخطی و چند قیدی می‌باشد، لذا بیش از یک نقطه بهینه محلی برای حل پخش بار بهینه بدست می‌آید. همچنین با توجه به عدم وجود معیاری برای انتخاب یک مینیمم محلی به عنوان مینیمم سراسری، تعیین مینیمم سراسری با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک مبتنی بر مشتق و شیب خط مناسب نمی‌باشند.

پخش بار بهینه یک مسئله با تابع هدف محدب (غیر محدب)، ناصاف و مشتق‌ناپذیر می‌باشد و این امر سبب بسط و پیشرفت روش‌های بهینه‌سازی جهت غلبه بر این مشکلات شده است. اخیراً به منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های کلاسیک از روش‌های هوشمند تکاملی جهت حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است. طیف گسترده‌ای از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری همچون الگوریتم برنامه‌ریزی تکاملی (EP) [۶]، برنامه‌ریزی تکاملی بهبودیافته (IEP) [۷]، الگوریتم ژنتیک بهبودیافته [۸] سردشدن تدریجی (SA) [۹] جستجوی تابو (TS) [۱۰]، الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) [۱۱، ۱۲] و الگوریتم تکاملی تفاضلی بهبودیافته (MDE) [۱۳] و جغرافیای زیستی (BBO) [۱۴] نیز در حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده‌اند.

اخیراً یک تکنیک محاسباتی با عنوان گروه ذرات (PSO) معرفی شده است [۱۵] و [۱۶] که می‌توان از آن به منظور حل بسیاری از مسائل سیستم قدرت از قبیل توزیع توان راکتیو [۱۷] و پخش

بار بهینه [۱۵] استفاده می‌شود. در این مقاله جهت حل مسئله پخش بار بهینه از روش ترکیبی مبتنی بر گروه ذرات و نلدر - مید جهت حداقل نمودن تابع هزینه استفاده شده است. هدف از ترکیب این دو روش، استفاده از مزایا و اجتناب از معایب این دو روش می‌باشد [۱۸]. روش نلدر - مید یکی از روش‌های موثر در یافتن مینیمم محلی است اما این روش به شدت به نقاط اولیه وابسته است [۱۹]. همچنین الگوریتم گروه ذرات متعلق به دسته‌ای از روش‌های جستجوی سراسری می‌باشد اما برای رسیدن به همگرایی لازم نیاز به محاسبات طولانی دارد. در این راستا با ترکیب این دو روش، از مزیت جستجوی سراسری الگوریتم ذرات و همگرایی روش نلدر - مید به صورت همزمان استفاده می‌شود [۱۸]. در این مقاله از الگوریتم PSO-NM جهت حل مسئله پخش بار بهینه با چندین تابع هدف متفاوت استفاده شده است.

در این مقاله در بخش دوم به بیان فرمولاسیون مسئله پخش بار بهینه پرداخته شده است. در این بخش قیود مسئله و همچنین حدود متغیرهای کنترلی و حدود متغیرهای حالت بیان شده است. در بخش سوم الگوریتم ترکیبی PSO-NM بررسی شده است. در این بخش ابتدا مروری بر الگوریتم گروه ذرات صورت گرفته است و سپس الگوریتم نلدر - مید به طور کامل برای یک مسئله بهینه‌سازی با دو متغیر بیان شده است. نهایتاً در انتهای این بخش ترکیب این دو الگوریتم و نحوه پیاده‌سازی آن بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم بررسی شده‌اند. در این راستا توابع هدف همچون حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها، اصلاح پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ هم در شرایط نرمال و هم در شرایط وقوع پیشامد و نیز با در نظر گرفتن توابع هزینه ناهموار و غیر محدب در پنج زیر بخش جداگانه توضیح داده شده است. سرانجام، نتیجه‌گیری در بخش پنجم بیان شده است که نتایج شبیه‌سازی کارآیی مناسب الگوریتم پیشنهاد شده PSO-NM نسبت به سایر الگوریتم‌ها را در یافتن حل بهینه پخش بار بهینه سیستم‌های قدرت نشان می‌دهد.

۲- فرمول‌بندی مسئله و معرفی تابع هدف

پخش بار بهینه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مقید کلی به صورت زیر فرمول بندی می‌شود [۱۳]

$$\min F(x,u)$$

$$\text{subject to} : \begin{cases} g(x,u) = 0 \\ h^{\min} \leq h(x,u) \leq h^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

بطوریکه در روابط مذکور، u مجموعه متغیرهای کنترل پذیر، x متغیرهای مستقل که متغیرهای حالت نامیده می شوند. در رابطه (۱) تابع هدف $F(x,u)$ اسکالر، تساویها $g(x,u)$ معادلات مرسوم پخش بار و نامساویها $h(x,u)$ حدود فیزیکی روی متغیرهای کنترل پذیر و متغیرهای حالت را نشان می دهند. بطور کلی متغیرهای کنترل پذیر در سیستم قدرت توان اکتیو خروجی ژنراتورها به جز باس مرجع، دامنه ولتاژ باسهای تنظیم ولتاژ، تپ ترانسفورماتورهای قابل تنظیم، شیفت دهندههای فاز، جبران سازهی توان راکتیو و بارهای داخل و خارج شونده به شبکه می باشند. همچنین متغیرهای حالت در سیستم قدرت دامنه ولتاژ در باسهای بار، اندازه فاز ولتاژ در هر باس، میزان توان عبوری از خطوط، توان راکتیو خروجی ژنراتورها و توان اکتیو خروجی باس مرجع می باشد.

ب- دامنه ولتاژها در هر باسهای تنظیم ولتاژ

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i=1, \dots, G_N \quad (5)$$

که در این رابطه، V_i^{\min}, V_i^{\max} ماکزیمم و مینیمم ولتاژ ژنراتورها است.

ج- تپ ترانسفورماتورها

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max}, i=1, \dots, T_N \quad (6)$$

که در این رابطه، T_i^{\min}, T_i^{\max} ماکزیمم و مینیمم تپ ترانسفورماتورها است. T_N تعداد تپ ترانسفورماتورهای سیستم می باشد.

ح- منابع تزریق توان راکتیو

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max}, i=1, \dots, C_N \quad (7)$$

C_N تعداد منابع تزریق توان راکتیو سیستم می باشد. همچنین متغیرهای P_{Gi}, Q_{Gi}, V_i, T_i و Q_{ci} متغیرهای پیوسته می باشند.

۲-۱-۲-۲-۲-۲ حدود متغیرهای حالت :

الف- خروجی توان راکتیو ژنراتورها

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, i=1, \dots, G_N \quad (8)$$

ماکزیمم و مینیمم توان راکتیو خروجی $Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$ ژنراتورها می باشد.

ب- تولید توان اکتیو باس مرجع:

$$P_{G1}^{\min} \leq P_{G1} \leq P_{G1}^{\max} \quad (9)$$

ماکزیمم و مینیمم توان اکتیو خروجی باس مرجع $P_{G1}^{\min}, P_{G1}^{\max}$ ج- دامنه ولتاژها باسهای بار:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i=1, \dots, N_L \quad (10)$$

که در این رابطه، V_i^{\min}, V_i^{\max} ماکزیمم و مینیمم ولتاژ باسهای بار است. N_L تعداد باسهای بار سیستم می باشد.

ح- حد حرارتی خطوط انتقال

۱-۲-۱-۲-۱-۲ قیود مسئله پخش بار بهینه
در مسئله پیشنهادی، دو نوع قید مساوی و نامساوی در نظر گرفته می شود.

۲-۱-۲-۱-۲-۱-۲ قیود مساوی

قیود تامین توان اکتیو و راکتیو هر شین مربوط به پخش بار به صورت روابط خطی زیر بیان می شود:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (11)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (12)$$

که $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di}$ توان اکتیو و راکتیو ژنراتور و بار در باس i ، $|Y_{ij}|$ و θ_{ij} عنصر ij ماتریس ادمیتانس و $V_i < \delta_i$ دامنه و فاز ولتاژ شین در باس i می باشد.

۲-۱-۲-۱-۲-۲ قیود نامساوی

این قیود محدودیت های امنیتی و کاری سیستم قدرت را تأمین می کنند که به صورت زیر بیان می شود :

۲-۱-۲-۱-۲-۱-۲-۱-۲ حدود متغیرهای کنترلی

الف- خروجی توان اکتیو ژنراتورها

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i=1, \dots, G_N \quad (13)$$

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{\max}, i = 1, \dots, L_N \quad (11)$$

که S_{Li}^{\max} ، حد حرارتی خطوط انتقال می‌باشد. L_N تعداد باس‌های بار سیستم می‌باشد.

۳- الگوریتم ترکیبی PSO-NM

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)

ایده اصلی روش PSO از حرکت ذرات هجومی همچون کلاغ‌ها و ماهی‌ها به‌دست آمده است؛ به عنوان مثال در هنگام حرکت یک دسته کلاغ، یک کلاغ دارای بهترین موقعیت (سرگروه) می‌باشد و سایر کلاغ‌ها با توجه به موقعیت فعلی خود و کلاغ‌های مجاور سعی به نزدیک شدن به سرگروه و بهبود موقعیت خود را دارند [۲۰-۲۱]، عملکرد روش PSO نیز به همین صورت می‌باشد. به این معنی که دسته‌ای از ذرات (متغیرهای مسئله بهینه‌سازی) در محیط جست‌وجو پخش می‌شوند. در این حالت برخی از ذرات موقعیت بهتری نسبت به سایر ذرات دارند یعنی دارای تابع هزینه با مقدار بهتری می‌باشند. سپس سایر ذرات بر اساس رفتار ذرات هجومی، سعی می‌کنند تا به ذرات با موقعیت مطلوب (با تابع هزینه بهتر)، نزدیک شوند. از طرفی دیگر موقعیت سردسته نیز در حال تغییر است در نتیجه کل سیستم به سمت نقاط بهینه حرکت می‌کند.

تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود آن ذره و تجربه ذرات همسایه انجام می‌شود و در واقع هر ذره از برتری و یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین کل گروه آگاه است و با توجه به این موارد موقعیت خود را تغییر می‌دهد. برای شبیه‌سازی رفتار ذرات هجومی پارامترهای زیر تعریف می‌شود [۲۰].

الف) توده ذرات: n ذره که در ابتدا به‌صورت اتفاقی جایابی می‌گردند و تابع را به سمت جواب بهینه رهنمون می‌سازند. همچنین هر ذره به‌نوبه خود به‌صورت تصادفی در توده حرکت می‌نماید. این توده ذرات به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$pop(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} \quad (12)$$

ب) P_{best} : این پارامتر، بیانگر بهترین موقعیتی است که هر ذره در طول اجرای الگوریتم کسب کرده است.

ج) G_{best} : این متغیر بهترین موقعیتی را که کل ذرات در طول اجرای الگوریتم کسب کرده‌اند، نشان می‌دهد.

د) پارامتر شناخت فردی (Φ_1): این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت P_{best} بهترین موقعیتی که تاکنون کسب کرده حرکت کند.

ه) پارامتر شناخت اجتماعی (Φ_2): این ضریب باعث می‌شود که ذره به سمت G_{best} بهترین موقعیتی که تاکنون کل ذرات کسب کرده‌اند حرکت کند.

و) ضریب لختی یا انقباض (W): این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و کلی در الگوریتم می‌شود.

ز) لغزش (V): این پارامتر، تغییر موقعیت ذره در محیط جستجو را نشان می‌دهد.

موقعیت ذره در لحظه بعد، با استفاده از دو پارامتر P_{best} و G_{best} به دست می‌آید. سومین عامل موثر در موقعیت آینده ذره هم سرعت قبلی ذره است. این سه عامل در کل، موقعیت آینده ذره را تشکیل می‌دهند. به عبارت دیگر:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_{ij}(t+1) \quad (13)$$

در این رابطه $V_{ij}(t)$ سرعت ذره i ام که دارای بعد m می‌باشد در لحظه t می‌باشد. مقدار سرعت (نرخ تغییر موقعیت از لحظه t تا لحظه $t+1$ برای i ام ذره می‌باشد) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{ij}(t+1) = wV_{ij}(t) + \Phi_1 rand(p_{best,ij} - X_{ij}) + \Phi_2 rand(G_{best,ij} - X_{ij}) \quad (14)$$

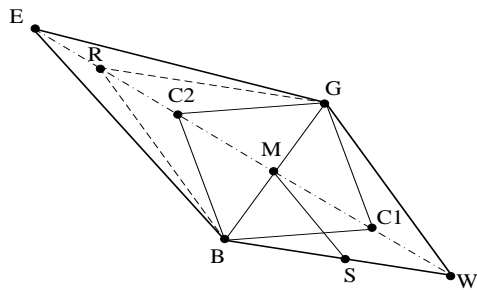
که مقدار V_{ij} بین V_{ij}^{\min} و V_{ij}^{\max} قرار دارد. در این رابطه (Φ_1) ضریبی است که رسیدن به بهترین نقطه را تضمین می‌نماید. از طرفی (Φ_2) نیز ضریب مربوط به رسیدن بهترین نقطه عمومی ذرات می‌باشد. همچنین w وزن اینرسی برای سرعت‌گیری ذرات می‌باشد، که می‌بایست در بازه [۰ و ۱] قرار گیرد.

انتخاب مناسب وزن اینرسی w یک تعادل بین شناسایی محلی و کلی را فراهم می‌کند. بنابراین، در این مقاله برای افزایش محیط جستجو، w را بطور خطی از مقدار 0.9 تا 0.4 در طول اجرا کاهش می‌دهیم، تا در زمان لازم الگوریتم PSO سرعت بگیرد و در نزدیکی جواب بهینه به‌کندی مسیر را ادامه دهد. عموماً وزن اینرسی w مطابق معادله زیر بیان می‌شود:

$$w^{t+1} = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \times t \quad (15)$$

که در این رابطه t_{\max} : ماکزیمم تعداد تکرار و t : شماره تکرار جاری می‌باشد.

در این الگوریتم، بهترین نقطه‌ای که یک ذره تا کنون کسب کرده است از رابطه زیر به‌دست می‌آید:



شکل (۱): الگوریتم Nelder-Mead

الف- تعیین مثلث اولیه BGW : بهینه سازی تابع $f(x, y)$ به عنوان هدف مسئله در نظر گرفته می شود. در روش بهینه سازی Nelder-Mead، الگوریتم با سه نقطه اولیه آغاز می گردد. این سه نقطه $V_k = (x_k, y_k) \quad k = 1, 2, 3$ ، یک مثلث را تشکیل می دهند. سپس مقدار تابع $Z_k = f(x_k, y_k)$ در هر سه نقطه به دست می آید. حال اگر $Z_1 < Z_2 < Z_3$ باشد آنگاه $B = (x_1, y_1)$ و $G = (x_2, y_2)$ و $W = (x_3, y_3)$ نام گذاری می گردد.

ب- تعیین نقطه میانی ناحیه مناسب: در این قسمت، نقطه میانی M از پاره خط واصل بین B و G به دست می آید که:

$$M = \left(\frac{B+G}{2} \right) = \left(\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2} \right) \quad (17)$$

ج- عمل بازتاب با استفاده از نقطه R : نقطه R با استفاده از عمل بازتاب بر روی ضلع \overline{BG} طبق رابطه زیر به دست می آید.

$$R = M + (M - W) = 2M - W \quad (18)$$

ج- عمل انبساط با استفاده از نقطه E : اگر مقدار تابع در نقطه R نسبت به مقدار تابع در نقطه W کوچکتر باشد، جهت صحیحی برای مینیمم کردن به دست آمده است. در این حالت از مثلث انبساط یافته BGE استفاده می شود که نقطه E از رابطه زیر به دست می آید.

$$E = M + \eta(M - W) \quad (19)$$

که η ضریب انبساط می باشد و دارای مقداری بزرگتر از یک می باشد. اگر مقدار تابع در نقطه E کمتر از مقدار تابع در نقطه R باشد، آنگاه نقطه بهتری نسبت به نقطه R پیدا شده است.

پ- عمل انقباض با استفاده از نقطه C : اگر مقدار تابع در R و W یکسان باشد، باید نقطه دیگری به دست آید. در این حالت، دو نقطه میانی C_1 و C_2 در نظر گرفته شده و مقدار تابع در این دو نقطه به دست می آید.

$$C_1, C_2 = M \pm k(M - W) \quad (20)$$

$$P_{best,i} = \begin{cases} P_{best,i} & \text{if } F_{cost}(X_i) \geq F_{cost}(P_{best,i}) \\ X_i & \text{if } F_{cost}(X_i) < F_{cost}(P_{best,i}) \end{cases} \quad (16)$$

در حالت کلی اگر $\Phi_2 \gg \Phi_1$ باشد، ذرات به سمت G_{best} (یعنی موقعیت بهینه کلی) کشیده می شوند. حال اگر $\Phi_2 \ll \Phi_1$ باشد آنگاه ذرات به سمت P_{best} (یعنی موقعیت بهینه محلی) کشیده می شوند در این صورت برای داشتن حالت میانگین باید $\Phi_2 = \Phi_1$ باشد. در این حالت، تمایل به رسیدن به G_{best} و P_{best} به یک میزان خواهد شد. اگر (Φ_1) و (Φ_2) مقادیر بزرگی باشند در این صورت، سرعت رسیدن به نقطه بهینه زیاد می شود، ولی دقت محاسبه نقطه بهینه کم می باشد و احتمال به وجود آمدن نوسان در محاسبه نقاط بهینه در این الگوریتم زیاد می گردد. از طرفی اگر مقدار (Φ_1) و (Φ_2) کوچک باشد دقت نقطه اندازه گیری شده، بالا بوده ولی سرعت رسیدن به آن نقطه کم می شود. از طرف دیگر در حالت کلی می توان گفت که برای (Φ_1) و (Φ_2) باید شرط $\Phi_1 + \Phi_2 \geq 4$ برقرار باشد. معمولاً $\Phi_1 + \Phi_2 = 2.05$ قرار می دهند تا این شرط و شرط سرعت برآورده شود.

در مورد ضریب انقباض نیز باید ذکر کرد که این ضریب باعث رسیدن به مقدار بهینه می شود. چون مقادیر کوچک w باعث ایجاد جابه جایی های کند نقاط می شود، لذا حوزه جستجو کوچک می شود. همچنین مقادیر بزرگ w نیز باعث ایجاد جابه جایی هایی با دامنه های بزرگ می شود. در نتیجه حوزه جستجو بزرگ می شود. اگر $w=0$ باشد توده ذرات با دقت زیادی به نقطه نهایی می رسد و اگر $w \approx 1$ باشد توده به آرامی به نقطه نهایی می رسد.

۲-۳- الگوریتم نلدنر-مید (NM)

یک روش ساده جهت یافتن یک مینیمم محلی از یک تابع چند متغیره توسط Nelder و Mead ابداع شده است [۱۸، ۱۹، ۲۲]. روش Nelder-Mead برای مقایسه مقادیر تابع هدف در $n+1$ راس جهت حل مسئله بهینه سازی n بعدی استفاده می شود. در هر مرحله یک راس جدید ایجاد می گردد. سپس اگر راس جدید نسبت به رئوس قبلی دارای مقدار تابع هدف کمتری باشد، این راس جدید با بدترین راس در مرحله قبل جایگزین می شود. روش Nelder-Mead برای مسئله با ۲ متغیر یک الگوی جستجو می باشد که مقادیر تابع هدف را در ۳ راس مثلث با هم مقایسه می کند. روش جستجوی مستقیم Nelder-Mead برای مینیمم سازی یک تابع غیر خطی در فضای ۲ بعدی در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای اعمال الگوریتم ترکیبی فوق بر روی مسئله پخش بار بهینه مراحل زیر طی می‌گردد:

۱- در این مرحله اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله پخش بار بهینه و پارامترهای الگوریتم ترکیبی PSO-NM تعیین می‌شوند.

۲- در این مرحله مسئله بهینه‌سازی همراه با قیود به یک مسئله بهینه‌سازی بی‌قید تبدیل می‌شود. این عمل با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود:

$$\min F(x, u) + \sum_{j=1}^{N_{eq}} K_j (g(x, u) - 0)^2 + \Gamma \quad (22)$$

$$\Gamma_i = \begin{cases} U_i (h - h_{lim})^2 & \text{if violated} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

در این رابطه h_{lim} حد مازیمم و h مینیمم می‌باشد.

۳- جمعیت اولیه بصورت رندوم تولید می‌شود. معمولاً تعداد جمعیت اولیه $3N+1$ انتخاب می‌گردد. جمعیت اولیه بفرم زیر است:

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_{3N+1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

که:

$$X_i = \{P_1, \dots, P_{G_N}, V_1, \dots, V_{G_N}, T_1, \dots, T_N, Q_{c1}, \dots, Q_{cN}\}$$

و N تعداد جمعیت اولیه می‌باشد.

۴- محاسبه تابع هدف برای هر یک از اعضای جمعیت اولیه.

۵- مرتب کردن نزولی ذرات بر حسب مقدار تابع هدف به این صورت که ذره دارای کمترین مقدار تابع هدف در بالاترین رده می‌گیرد.

۶- انتخاب $N+1$ ذره اول در لیست بدست آمده از روش (۵) و اعمال آن به الگوریتم نلدر-مید و تعیین مقدار تابع هدف.

۷- اعمال $2N$ ذره باقیمانده از جمعیت اولیه به الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و تعیین مقدار تابع هدف.

۸- ترکیب نتایج حاصل از PSO و NM و بهترین جواب بدست آمده انتخاب می‌گردد.

۹- خارج شدن از الگوریتم در صورت برآورده شدن معیار انتخاب شده، در غیر اینصورت بازگشت به مرحله ۵.

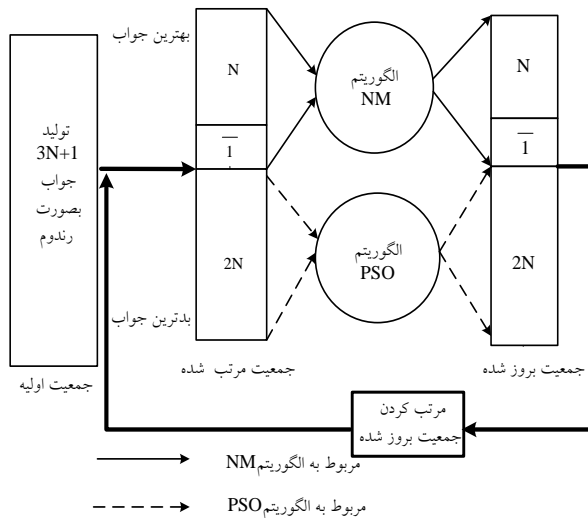
که k ضریب انقباض با مقداری کوچکتر از یک می‌باشد. هر کدام از نقاط C_1 و C_2 که دارای مقدار تابع کمتری باشد آن نقطه C نامگذاری می‌شود.

ث- حرکت به سمت کوچک شدن (انقباض): اگر مقدار تابع در نقطه C از مقدار تابع در نقطه W کوچکتر نباشد، نقاط G و W باید نسبت به نقطه B کوچک شوند، بنابراین نقطه G با نقطه M و نقطه W با نقطه S جایگزین می‌شود.

$$S = \left(\frac{B+W}{2} \right) = \left(\frac{x_1+x_3}{2}, \frac{y_1+y_3}{2} \right) \quad (21)$$

۳-۳- الگوریتم ترکیبی بهینه‌سازی گروه ذرات با نلدر-مید (PSO-NM)

هدف از ترکیب دو الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و الگوریتم نلدر-مید بدست آوردن الگوریتمی است که علاوه بر اینکه دارای مزیت‌های دو الگوریتم فوق است، عیب و نقص‌های دو الگوریتم در آن وجود نداشته باشد. الگوریتم نلدر-مید با وجود قدرت بالایش در فضای جستجو، تا حدود زیادی عملکردش به انتخاب اولیه نقاط وابسته است. الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات هم با وجود قدرت بالایش در بدست آوردن بهترین جواب، دارای سرعت پایینی است. ولی با ترکیب این دو الگوریتم، می‌توان به الگوریتمی رسید که علاوه بر قدرت و سرعت بالایش در همگرایی، به انتخاب اولیه نقاط وابسته نیست. نحوه ترکیب دو الگوریتم فوق در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۹-۱۸].

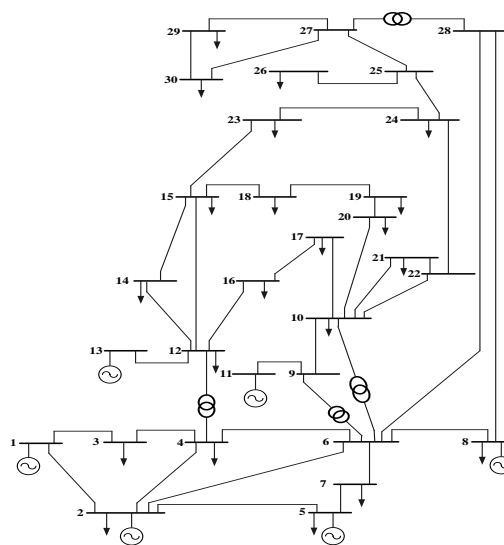


شکل (۲): ترکیب الگوریتم PSO با NM

۴- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله پخش بار بهینه در شبکه تست IEEE 30-bus استاندارد که دیاگرام تک خطی آن مطابق شکل (۳) می‌باشد، بکار گرفته شده است. اطلاعات شبکه، حداقل و حداکثر مجاز متغیرهای کنترلی در مرجع [۱۱] موجود می‌باشد.

شبکه مورد مطالعه دارای شش ژنراتور در باس‌های ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۱، ۱۳ و چهار ترانسفورماتور با تپ‌های قابل تنظیم در خطوط ۴-۱۲، ۶-۱۰، ۶-۹ و ۲۸-۲۷ می‌باشد. همچنین باس‌های ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۹ جهت نصب منابع توان راکتیو در نظر گرفته شده‌اند. به طور کلی ۲۴ متغیر کنترلی باید توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شود. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی چندین حالت، با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف آورده شده است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای الگوریتم پیشنهادی PSO-NM در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۳): دیاگرام تک خطی شبکه تست IEEE 30-bus

جدول (۱): مقادیر پارامترهای اصلی الگوریتم در شبیه‌سازی

$N=24$	$t=200$	$\Phi_1=1.05$	$\Phi_2=1.05$
$W^{max}=0.8$	$W^{min}=0.4$	$K=0.5$	$\eta=2$

۴-۱- حالت اول: حداقل نمودن هزینه سوخت

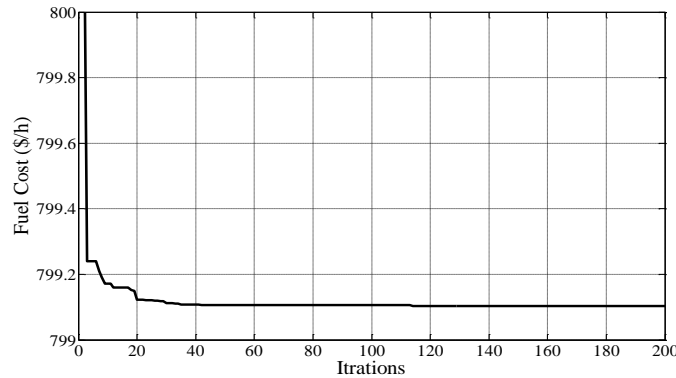
در سیستم‌های قدرت عملی، یک واحد تولیدی از منابع سوخت فسیلی همچون زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت استفاده می‌کند. همچنین می‌توان هزینه سوخت این واحدها را به شکل تابع درجه دوم در نظر گرفت [۱۱، ۱۵]. تابع هدف یا تابع هزینه ژنراتورها در رابطه (۲۵) نشان داده شده است.

$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه آمین ژنراتور را نشان می‌دهد که مقادیر آن در مراجع [۱۱، ۱۵] قابل مشاهده است. به منظور نشان دادن توانایی الگوریتم PSO-NM در یافتن جواب بهینه کلی، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM و الگوریتم تکاملی تفاضلی اصلاح شده MDE [۱۲]، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته Improved GA [۸]، الگوریتم گروه ذرات PSO [۱۵]، الگوریتم تکاملی تفاضلی DE [۱۱]، و جغرافیای زیستی BBO [۱۳] و روش شیب method Gradient [۱۳] در جدول (۲) مقایسه شده است. همچنین مقدار بهینه متغیرهای کنترلی بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی برحسب پریونیت همراه با دیگر روش‌های هوشمند در جدول (۲) بررسی شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن شرایط یکسان از قبیل تعداد و حدود متغیرهای کنترلی، شرایط اولیه و سایر اطلاعات شبکه مورد مطالعه، الگوریتم PSO-NM عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های ذکر شده دارد. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی $(\$/h) 799/1030$ بدست آمده است و این درحالی است که بهترین مقدار بدست آمده با استفاده از روش گزارش شده جغرافیای زیستی $(\$/h) 799/1116$ می‌باشد که بخوبی کارایی الگوریتم PSO-NM در حل مسئله پخش بار بهینه نشان داده شده است. نمودار همگرایی حداقل نمودن تابع هدف یا مجموع هزینه سوخت ژنراتورها در شکل (۴) آورده شده است. لذا، این شکل دقت و سرعت بالای الگوریتم PSO-NM را در رسیدن به جواب بهینه نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت اول

Control Variable (Pu)	Case study 1						
	PSO-NM	BBO [13]	DE [11]	PSO [15]	Improved GA[8]	MDE [12]	Gradient method[13]
P ₁	1.77015	1.770177	1.762592	1.7696	1.77594	1.75974	1.87219
P ₂	0.48641	0.486410	0.485602	0.4898	0.48722	0.48884	0.53781
P ₅	0.21239	0.212390	0.213402	0.2130	0.21454	0.21510	0.16955
P ₈	0.21136	0.211360	0.220553	0.2119	0.20954	0.22240	0.11288
P ₁₁	0.11944	0.119440	0.117785	0.1197	0.11768	0.12251	0.11287
P ₁₃	0.12054	0.120540	0.120217	0.1200	0.12052	0.12000	0.13355
V ₁	1.1000	1.1000	1.0999	1.0855	1.081	1.0500	1.10
V ₂	1.0876	1.0876	1.0890	1.0653	1.063	1.0382	1.08
V ₅	1.0614	1.0614	1.0659	1.0333	1.034	1.0113	1.03
V ₈	1.0695	1.0695	1.0697	1.0386	1.038	1.0191	1.04
V ₁₁	1.0982	1.0982	1.965	1.0848	1.10	1.0951	1.08
V ₁₃	1.0998	1.0998	1.996	1.0512	1.055	1.0837	1.08
T ₁₁	1.050	1.05	1.0429	1.233	1.0	0.9866	1.072
T ₁₂	0.900	0.90	0.9176	0.9557	0.975	0.9714	1.070
T ₁₅	0.990	0.99	1.0190	0.9724	0.975	0.9972	1.032
T ₃₆	0.970	0.97	0.9836	0.9728	1.0	0.9413	1.068
Q _{c10}	0.050	0.05	0.045453	0.0335	0.001	NA	0.00692
Q _{c12}	0.050	0.05	0.044158	0.0220	0.007	NA	0.00046
Q _{c15}	0.050	0.05	0.041734	0.0198	0.019	NA	0.00285
Q _{c17}	0.050	0.05	0.025171	0.0315	0.024	NA	0.0287
Q _{c20}	0.050	0.05	0.20916	0.0454	0.015	NA	0.00208
Q _{c21}	0.050	0.05	0.041990	0.0381	0.022	NA	0.00
Q _{c23}	0.040	0.04	0.025527	0.0398	0.047	NA	0.0033
Q _{c24}	0.050	0.05	0.043812	0.0500	0.047	NA	0.00938
Q _{c29}	0.030	0.03	0.027503	0.02510	0.024	NA	0.00269
Fuel Cost (\$/h)	799.1030	799.1116	799.2891	800.41	800.805	802.376	804.853
Power Loss (MW)	8.642	8.63	8.629	-	-	9.459	10.486



شکل (۴): نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت اول

قسمت دوم به منظور بهبود پروفیل ولتاژ به تابع هدف اضافه شده است که بصورت حداقل نمودن انحراف ولتاژ باس‌های بار از مقدار مرجع ۱ پریونیت منظور می‌شود. لذا تابع هدف در نظر گرفته شده از رابطه (۲۶) پیروی می‌کند.

$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + w \sum_{j=1}^{N_L} |V_j - 1.0| \quad (26)$$

۲-۴- حالت دوم: حداقل نمودن هزینه سوخت به‌مراه بهبود پروفیل ولتاژ

در صورتیکه در حل مسئله OPF تنها حداقل کردن هزینه سوخت ژنراتورها مدنظر قرار گیرد این احتمال وجود دارد که حل بهینه بدست آمده پروفیل ولتاژ مناسبی را نتیجه ندهد، بنابراین در این بخش تابع هدف در نظر گرفته شده دارای دو قسمت می‌باشد، قسمت اول مربوط به هزینه سوخت ژنراتورها و



در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است. در رابطه مذکور، w ضریب وزنی بوده که تعادل بین دو تابع هدف را برقرار می‌سازد و از غلبه کردن یک تابع هدف بر دیگری جلوگیری می‌کند. در این مقاله w با توجه به مرجع [۱۳] برابر ۱۰۰ انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های

DE و PSO، BBO مقایسه شده است. هزینه سوخت ژنراتورها و انحراف ولتاژ با آنها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۸۰۳/۸۶۱۵ و (pu) ۰/۰۹۷۶۴ بدست آمده است که بهترین هزینه سوخت ژنراتورها و انحراف ولتاژ با آنها را که با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۸۰۴/۹۹۸۲ و (pu) ۰/۱۰۲۰ می‌باشد را به ترتیب بمیزان ۰/۱۴۱٪ و ۴/۲۷٪ کاهش داده است.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت دوم

Control Variable (Pu)	Case Study 2			
	PSO-NM	BBO [13]	PSO[15]	DE [11]
P_1	1.76082	1.734298	1.7368	1.831277
P_2	0.49302	0.4906	0.4910	0.474435
P_5	0.21995	0.2177	0.2181	0.187281
P_8	0.21650	0.2327	0.2330	0.161515
P_{11}	0.12234	0.1384	0.1388	0.118855
P_{13}	0.12015	0.1198	0.1200	0.165050
V_1	1.0389	1.0272	0.0142	1.0490
V_2	1.0230	1.0088	1.0022	1.0335
V_5	1.0074	1.0145	1.0170	1.0117
V_8	1.0111	1.0092	1.0100	1.0043
V_{11}	1.0389	1.0510	1.0506	1.0432
V_{13}	0.9878	1.0170	1.0175	0.9931
T_{11}	1.0560	1.0722	1.0702	1.0439
T_{12}	0.9000	0.9000	0.9000	0.9230
T_{15}	0.9478	1.0000	0.9954	0.09345
T_{36}	0.9703	0.9708	0.9703	0.9616
Q_{c10}	0.0345	0.4140	0.0403	0.036479
Q_{c12}	0.04864	0.03550	0.0369	0.003806
Q_{c15}	0.0500	0.05000	0.0500	0.040931
Q_{c17}	0.0000	0.00000	0.0000	0.029372
Q_{c20}	0.0500	0.05000	0.0500	0.047958
Q_{c21}	0.0500	0.05000	0.0500	0.044684
Q_{c23}	0.0500	0.05000	0.0500	0.038162
Q_{c24}	0.0499	0.04900	0.0500	0.042009
Q_{c29}	0.02583	0.02650	0.0259	0.012597
Fuel cost (\$/h)	803.8615	804.9982	806.38a	805.2619
Power loss (MW)	9.882	9.95	NA	10.4412
Voltage deviation (pu)	0.09764	0.1020	0.0891	0.1357

از اطلاعات پخش بار معمولی، برای کلیه باس‌های بار شبکه محاسبه می‌شود [۲۳]. به این شاخص در محدوده صفر (حالت بی باری) و یک (حالت وقوع ناپایداری ولتاژ) قرار دارد که برای کلیه باس‌های بار شبکه محاسبه می‌شود. جهت محاسبه شاخص L از اطلاعات شبکه و ولتاژهای بدست آمده از برنامه پخش بار استفاده می‌گردد. جهت محاسبه شاخص L برای یک سیستم قدرت داریم:

$$I_{bus} = Y_{bus} \times V_{bus} \quad (27)$$

با جداسازی باس‌های PQ و PV معادله (۲۷) را می‌توان به شکل روابط (۲۸) و (۲۹) باز نویسی نمود.

۳-۴- حالت سوم

حداقل نمودن هزینه سوخت به‌همراه بهبود پایداری ولتاژ

۳-۴-۱- در شرایط نرمال

قرار داشتن ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز کاری در شرایط عملکرد نرمال شبکه و هم چنین بعد از وقوع پیشامد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور افزایش پایداری ولتاژ می‌توان از شاخص L استفاده نمود، در این حالت متغیرهای کنترلی شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که حداکثر شاخص L برای باس‌های بار شبکه حداقل گردد و بدین ترتیب محدوده پایداری ولتاژ افزایش می‌یابد. شاخص L یک کمیت عددی بوده که با استفاده

$$F = \sum_{i=1}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + w L_{max} \quad (32)$$

که در آن w رابطه ضریب وزنی بوده و مطابق با مرجع [۱۱،۱۳] برابر ۶۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های BBO، PSO و DE مقایسه شده است. هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش پیشنهادی ($\$/h$) ۸۰۴/۱۱۳۷ و (pu) ۰/۱۰۵۱ بدست آمده است. که بهترین هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L را که با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO ($\$/h$) ۸۰۵/۷۲۵۲ و (pu) ۰/۱۱۰۴ می‌باشد را به ترتیب بمیزان ۲۰٪ و ۴/۸۰٪ کاهش داده است. که کارایی الگوریتم PSO-NM را در مینیمم کردن تابع هدف را نشان می‌دهد. نمودار همگرایی تابع مجموع هزینه سوخت ژنراتورها در شکل (۵) نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (28)$$

در روابط بالا I_L, V_L ولتاژها و جریان‌های باس‌های P_Q و V_G, I_G ولتاژها و جریان‌های باس‌های P_V می‌باشند. نهایتاً شاخص L به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$L_j = \left| I - \sum_{i=1}^{G_N} \gamma_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad j = 1, 2, \dots, N_L \quad (29)$$

که γ_{ji} به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$\gamma_{ji} = -[Y_1]^j \times [Y_2] \quad (30)$$

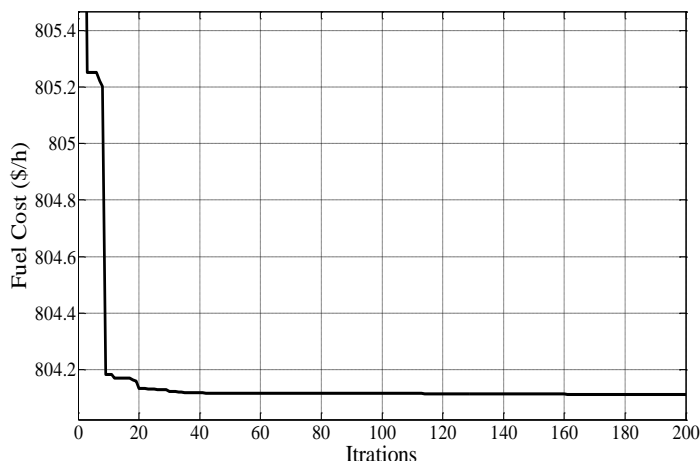
پارامتر L_{max} مقدار حداکثر شاخص L می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$L_{max} = \max(L_j) \quad j = 1, 2, \dots, N_L \quad (31)$$

جهت افزایش پایداری ولتاژ و دور کردن نقطه کار از نقطه فروپاشی ولتاژ (POC) معادله (۳۱) به معادله (۲۵) اضافه می‌گردد. در این حالت تابع هدف به صورت رابطه (۳۲) تعریف می‌گردد.

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی مربوط حالت سوم

Control Variable (Pu)	Case Study 3(normal)				Case Study 3(contingent)	
	PSO-NM	BBO [13]	DE [11]	PSO[15]	PSO-NM	DE [11]
P ₁	1.680	1.752686	1.716553	1.7553	1.70047	1.8556
P ₂	0.4581	0.48265	0.489937	0.4798	0.45873	0.3857
P ₅	0.2000	0.21375	0.222895	0.2092	0.21148	0.1835
P ₈	0.3500	0.19817	0.210117	0.2450	0.33994	0.2612
P ₁₁	0.1115	0.1354	0.173254	0.1151	0.10028	0.1010
P ₁₃	0.1200	0.15411	0.124386	0.1200	0.12130	0.1578
V ₁	1.075	1.0669	1.0777	1.0891	1.09762	1.0954
V ₂	1.061	1.0390	1.0668	1.0693	1.09272	1.0894
V ₅	1.043	1.0157	1.0828	1.0464	1.08198	1.0876
V ₈	1.045	0.9886	1.0875	1.0465	1.06228	1.0996
V ₁₁	1.10	1.0880	1.0597	1.0277	1.08418	1.0961
V ₁₃	1.088	1.0018	1.0191	1.0294	1.09836	1.0551
T ₁₁	0.900	0.9900	0.9032	0.9694	0.94030	0.9684
T ₁₂	1.100	1.1000	0.9656	0.9238	0.90073	1.0226
T ₁₅	0.900	1.1000	0.9181	0.9467	0.94997	0.9373
T ₃₆	0.909	0.9000	0.9147	0.9820	0.92938	0.9147
Q _{c10}	0.050	0.05000	0.017913	0.0162	0.04996	3.4580
Q _{c12}	0.050	0.05000	0.045849	0.0424	0.03263	1.0405
Q _{c15}	0.050	0.05000	0.019791	0.0256	0.04994	3.8668
Q _{c17}	0.040	0.05000	0.011993	0.0465	0.00064	0.8019
Q _{c20}	0.050	0.05000	0.043640	0.0348	0.04956	2.3140
Q _{c21}	0.000	0.04000	0.048026	0.0500	0.04956	4.3131
Q _{c23}	0.050	0.05000	0.022490	0.0488	0.04990	4.5468
Q _{c24}	0.050	0.05000	0.012199	0.0500	0.00070	1.1061
Q _{c29}	0.000	0.05000	0.008939	0.0500	0.00004	1.8337
Fuel cost (\$/h)	804.1137	805.7252	807.5272	801.16	807.5284	810.2661
power loss(MW)	8.638	10.21	10.3142	NA	9.823	10.3142
maximum L-index (pu)	0.1051	0.1104	0.1219	0.1246	0.1279	0.1347



شکل (۵): نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت سوم

استفاده کند، لذا تابع هزینه سوخت این واحدها به شکل توابع درجه دوم تکه‌ای بیان می‌شود. در این شرایط با یک مسئله

بهینه‌سازی غیرمحدب روبرو هستیم که تعداد زیادی نقطه مینیمم محلی دارد. بنابراین حل پخش بار بهینه با استفاده از تکنیک‌های کلاسیک در این شرایط با محدودیت‌های زیادی روبرو می‌باشد [۱۱]. در این مقاله، هزینه سوخت ژنراتورهای موجود در باس‌های ۱ و ۲ به صورت تکه‌ای ناهموار مطابق رابطه (۳۳) و توابع هزینه سایر ژنراتورها به شکل یک تابع درجه دوم مطابق رابطه (۲۵) در نظر گرفته شده است.

$$f_i = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_{Gi} + c_{i1}P_{Gi}^2 & P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_{Gi} + c_{i2}P_{Gi}^2 & P_{Gi,1}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,2} \\ \vdots \\ a_{ik} + b_{ik}P_{Gi} + c_{ik}P_{Gi}^2 & P_{Gi,k-1}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (33)$$

ضرایب a_{ik} ، b_{ik} و c_{ik} ضرایب هزینه i امین ژنراتور برای k امین نوع سوخت را نشان می‌دهند. تابع هدف حداقل نمودن هزینه سوخت به صورت تکه‌ای ناهموار به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$F = \sum_{i=1}^2 a_{ik} + b_{ik}P_{Gi} + c_{ik}P_{Gi}^2 + \sum_{i=3}^{G_N} a_i + b_iP_{Gi} + c_iP_{Gi}^2 \quad (34)$$

ضرایب هزینه ژنراتور باس‌های ۱ و ۲ (G_1, G_2) مطابق جدول (۵) در نظر گرفته شده است [۱۱]. همچنین ضرایب a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه $i \in [3, 6]$ امین ژنراتور را نشان می‌دهد که همانند حالت شبیه‌سازی اول در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲- در شرایط وقوع پیشامد

در این حالت خارج شدن خط ۶-۲ به عنوان وقوع یک پیشامد در شبکه در نظر گرفته شده است [۸، ۱۱]. حفظ پایداری ولتاژ در این حالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد لذا جهت بالابردن پایداری ولتاژ، تابع هدف در این حالت نیز مطابق با رابطه (۳۲) در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین در این حالت ضرایب هزینه سوخت همانند حالت اول در نظر گرفته شده است.

مجموع هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش پیشنهادی ($\$/h$) ۸۰۷/۵۲۸۴ و (pu) ۰/۱۲۷۹ بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد سیستم در این حالت با توجه به شاخص L از پایداری مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج این روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش تکاملی تفاضلی DE مقایسه شده است. در این راستا با توجه به جدول (۴) مقدار مجموع هزینه سوخت ژنراتورها و مقدار حداکثر شاخص L با استفاده از روش تکاملی تفاضلی ($\$/h$) ۸۱۰/۲۶۶۱ و (pu) ۰/۱۳۴۷ می‌باشد که این مقادیر به ترتیب بمیزان ۰/۳۳٪ و ۵/۰۴٪ توسط روش پیشنهادی کاهش داده شده است.

۴-۴- حالت چهارم: حداقل نمودن تابع هزینه سوخت

به صورت تکه‌ای ناهموار

در سیستم‌های قدرت عملی، یک واحد تولیدی ممکن است از منابع سوخت متفاوتی همچون زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت

استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۶۴۷/۷۴۳۷ می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش PSO در مرجع [۱۵] (\$/h) ۶۴۷/۶۹ گزارش شده است اما با توجه به پارامترهای گزارش شده در صورتی که شین (۱) به عنوان شین مرجع در نظر گرفته شده باشد هزینه سوخت ژنراتورها ۷۳۳/۳۱۱۱ می‌باشد و در صورتی که شین (۵) به عنوان شین مرجع در نظر گرفته شده باشد هزینه سوخت ژنراتورها ۶۴۷/۸۳۰۱ می‌باشد [۱۳]. بنابراین مقدار مجموع هزینه سوخت گزارش شده صحیح و قابل استناد نمی‌باشد. همچنین نمودار همگرایی تابع مجموع هزینه سوخت ژنراتورها در شکل (۶) نشان داده شده است.

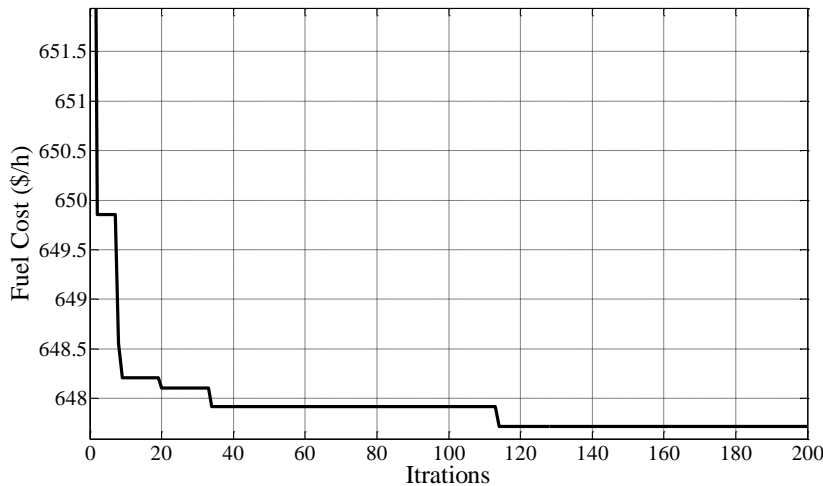
جدول (۵): ضرایب تابع هزینه ژنراتور واحدهای ۱ و ۲

	From To		Cost Coefficients		
	MW	MW	a	b	c
G1	50	140	55.0	0.70	0.0050
	140	200	82.5	1.05	0.0075
	20	55	40.0	0.30	0.0100
G2	55	80	80.0	0.60	0.0200

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های PSO، BBO، MDE و DE مقایسه شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۶۴۷/۷۱۸ بدست آمده است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های PSO، BBO، MDE و DE مقایسه شده است. بهترین مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به حالت چهارم

Control Variable (Pu)	Case Study 4				
	PSO-NM	BBO [13]	PSO[15]	MDE [12]	DE [11]
P ₁	1.4000	1.40000	1.40000	1.40000	1.399830
P ₂	0.54999	0.55000	0.5500	0.55000	0.548249
P ₅	0.24117	0.241257	0.2415	0.24000	0.257889
P ₈	0.34999	0.35000	0.3500	0.348331	0.348331
P ₁₁	0.18224	0.18660	0.1851	0.18044	0.172469
P ₁₃	0.18115	0.17681	0.1779	0.18462	0.183565
V ₁	1.050	1.0500	1.0500	1.0500	1.421
V ₂	1.0406	1.0396	1.0412	1.0400	1.0364
V ₅	1.0152	1.0133	1.0170	1.0139	1.0080
V ₈	1.0263	1.0225	1.282	1.0259	1.0070
V ₁₁	1.0990	1.0722	1.0910	1.940	1.0402
V ₁₃	1.1000	1.0866	1.0876	1.0773	1.0204
T ₁₁	1.0119	1.0060	1.0192	0.9714	0.9984
T ₁₂	0.9001	0.9000	0.9573	1.0046	0.9880
T ₁₅	0.9715	0.9645	1.120	0.9902	1.0674
T ₃₆	0.9296	0.9305	0.9503	0.9494	0.9307
Fuel cost (\$/h)	647.718	647.7437	647.69	647.846	650.8224
Loss (MW)	7.058	7.06	-	7.095	7.6333
maximum L-index (pu)	-	-	-	-	-



شکل (۶): نمودار همگرایی تابع هدف برای حالت پنجم

است. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از روش‌های BBO و MDE مقایسه شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش جغرافیای زیستی BBO (\$/h) ۹۱۹/۷۶۴۷ می‌باشد که این مقدار ب میزان ۰/۲۵٪ توسط روش پیشنهادی کاهش یافته است.

جدول (۸): نتایج شبیه‌سازی مربوط به حالت پنجم

Control Variable (Pu)	Case Study 7		
	PSO-NM	BBO [13]	MDE [12]
P ₁	1.98210	1.9999	1.97426
P ₂	0.5198	0.37812	0.52037
P ₅	0.1500	0.20251	0.15000
P ₈	0.1000	0.14375	0.10000
P ₁₁	0.1000	0.10035	0.10001
P ₁₃	0.1200	0.12001	0.12000
V ₁	1.05	1.500	1.0371
V ₂	1.0326	1.0358	1.0130
V ₅	0.9500	1.0086	0.9648
V ₈	0.9500	1.0137	1.0320
V ₁₁	0.950	1.0958	1.0982
V ₁₃	1.100	1.0814	1.0890
T ₁₁	1.0924	1.0308	1.0969
T ₁₂	0.9000	0.691443	1.0909
T ₁₅	0.9279	0.99142	1.0991
T ₃₆	0.9000	0.93864	1.0021
Fuel Cost(\$/h)	917.4226	919.7647	930.793
Loss(MW)	13.792	12.18	13.064

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور حل مسئله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قیود استاتیکی شامل ولتاژ باس‌ها، توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها، تپ ترانسفورماتورها، ظرفیت تجهیزات توان راکتیو و توان عبوری از خطوط، از الگوریتم ترکیبی PSO-NM استفاده شده است، بطوریکه نتایج بدست آمده از اعمال پخش بار بهینه بر روی شبکه ۳۰-bus IEEE کارایی الگوریتم مذکور را

۴-۵ حالت پنجم: تابع هزینه درجه دوم بامولفه سینوسی

به منظور نشان دادن تاثیر باز و بستن شیر مخازن سوخت یک مولفه سینوسی نیز به تابع هزینه رابطه (۲۵) اضافه شده است، لذا هزینه سوخت واحد تولیدی i ام از رابطه (۳۵) پیروی می‌کند.

$$f_i = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin(e_i (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))| \quad (35)$$

ضرایب a_i, b_i, c_i, d_i و e_i ضرایب هزینه i امین واحد تولیدی می‌باشند. هزینه سوخت واحدهای تولیدی اول و دوم (G_1, G_2) به شکل رابطه (۳۵) با ضرایب هزینه موجود در جدول (۷) و هزینه سوخت سایر ژنراتورها مطابق حالت اول در نظر گرفته شده است. همچنین از منابع تزریق توان راکتیو نیز صرف‌نظر شده است. بنابراین تابع هدف به صورت رابطه (۳۶) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۷): ضرایب هزینه ژنراتورهای اول و دوم در حالت پنجم

Bus	P _{Gi} ^{min}	P _{Gi} ^{max}	Q _{Gi} ^{min}	Q _{Gi} ^{max}	Cost coefficients				
					a	b	c	d	e
1	50	200	-20	200	150	2	0.0016	50	0.0630
2	20	80	-20	100	25	2.25	0.0100	40	0.0980

$$F = \sum_{i=1}^2 a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + |d_i \sin(e_i (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}))|$$

$$+ \sum_{i=3}^{G_N} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (36)$$

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی PSO-NM در جدول (۸) نشان داده شده است. مجموع هزینه سوخت ژنراتورها با استفاده از روش پیشنهادی (\$/h) ۹۱۷/۴۲۲۶ بدست آمده

- [11] Abou ElEla, A. A., Abido, M. A., Optimal power flow using differential evolution algorithm, *Electr. power Syst. Res.*, Vol. 80, No. 7, pp. 878-885, 2010.
- [12] Abou ElEla, A. A., Abido, Spea, S. R., Differential Evolution Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch, *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 30, No. 7, pp. 878-885, 2010.
- [13] Sayah, S., Zehar, K., Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with Non-smooth cost functions, *Int. J. Energy Convers. Manage.* Vol. 49, No. 11, pp.3036-3042, 2008.
- [14] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P. K., Application of Biogeography-Based Optimization to Solve Different Optimal Power Flow Problems, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 1, pp. 70-60, 2011.
- [15] Abido, M. A., Optimal power flow using particle swarm optimization, *proc. Int. J. Electr. power Energy Syst.*, Vol. 24, No. 7, pp. 563-571, 2002.
- [16] M. Aghashabani, J. Milimonfared, A. Kashefi Kaviani, M. Ahabani "A Neural Network-PSO Based Control for Brushless DC Motors for Minimizing Commutation Torque Ripple", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 7, No. 2, 2010.
- [17] Onate Yumbla, P. E., Ramirez, J. M., Coello Coello, C. A., Optimal power flow subject to security constraints solved with a particle swarm optimization, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 23, No. 1, pp. 33-40, 2008.
- [18] Zahara, E., Yi-Tung, K., Hybrid Nelder-Mead simplex search and particle swarm optimization for constrained engineering design problems, *Expert Systems with Applications* Vol. 36, No. 1, pp. 3880-3886, 2009.
- [19] Shu-Kai, S. F., Yun-Chia, L., Zahara, E., genetic algorithm and a particle swarm optimizer hybridized with Nelder-Mead simplex search, *Computers & Industrial Engineering* Vol. 50, No. 4, pp. 401-425, 2006.
- [20] Park, J. B., Lee, K. S., Shin, J. R., Lee, K. Y., A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 20, No. 1, pp.34-42,2005.
- [21] Kennedy, J., Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE Int. Conference on Neural Networks*, Vol. 4, No. 1, pp. 1942-1948, 1995.
- [22] Afzalan E, Joorabian M. Emission, reserve and economic load dispatch problem with non-smooth and non-convex cost functions using epsilon-multi-objective genetic algorithm variable. *Int. J. Elect Power Energy Syst*, 52:55-67, 2013.
- [23] Kessel, P., Glavitsch, H.: 'Estimating the Voltage stability of a power system', *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 1, No. 3, pp. 346-354, 1986.

در حل مسئله پخش بار بهینه با وجود توابع هزینه تکه‌ای ناهموار و غیرمحدب نشان می‌دهد. در پروسه بهینه‌سازی، متغیرهای کنترلی شبکه به‌گونه‌ای تنظیم شدند که اهدافی همچون مجموع هزینه سوخت ژنراتورها، انحراف ولتاژ از مقدار مرجع حداقل گردد و پایداری ولتاژ شبکه هم در شرایط نرمال و هم در شرایط اضطراری افزایش یابد. مقایسه نتایج الگوریتم-PSO با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی برتری این الگوریتم را در یافتن جواب بهینه کلی مسائل غیرمحدب نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Zhang, X. P., Petoussis, S.G., Godfrey, K.R., Nonlinear interior-point optimal power flow method based on a current mismatch formulation, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, No. 6 pp. 795-805, 2005.
- [2] AlRashidi, M. R., El-Hawary, M. E., Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Solving the Discrete OPF Problem Considering the Valve Loading Effects, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, No. 4, pp. 2030-2038, 2007.
- [3] Wu, F. F., Gross, G., Luini, J. F., Look, P. M., A Two-Stage Approach to Solving Large-Scale Optimal Power Flows, in *Proc. IEEE Power Industry Computer Applications Conf* 1979.
- [4] Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., Adapa, R., A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993. Part I: Non-Linear and Quadratic Programming Approaches, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 14, No. 1, pp. 96-104, 1999.
- [5] Momoh, J. A., El-Hawary, M. E., Adapa, R., A Review of Selected Optimal Power Flow Literature, Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 105-111, 1999.
- [6] Yuryevich, J., Wong, K. P., Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow algorithms, *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol.14, No.4, pp.1245-1250, 1999.
- [7] Ongsakul, W., Tantimaporn, T., Optimal Power Flow by Improved Evolutionary Programming, *Elect. Power Comp. Syst.*, Vol. 34, No. 1, pp.79-95, 2006.
- [8] Lai, L.L., Ma, J.T., Improved genetic algorithms for optimal power flow Under both Normal and contingent operation states, *Int. J. Electr. power Energy Syst.*, Vol. 19, No. 5, pp. 287-292, 1997.
- [9] Roa-Sepulveda, C. A., Pavez-Lazo, B. J., A Solution to Optimal Power Flow Using Simulated Annealing, *Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 25, No. 1, pp. 47-57, 2003.
- [10] Abido, M. A., Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm, *Elect. Power Comp. Syst.*, Vol. 30, No. 5, pp.469-483,2002.