

حل مسأله توزیع اقتصادی بار نامحذب با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید جهش

قورباغه‌ها

احسان بی‌جامی^۱، اکبر ابراهیمی^۲، جواد عسکری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

e.bijami@ec.iut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

ebrahimi@cc.iut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

j-askari@cc.iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله روش مؤثری برای حل مسأله توزیع اقتصادی بار نامحذب بر اساس نسخه جدیدی از الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته (SFL) ارائه شده است. مسأله توزیع اقتصادی بار در شرایط واقعی، محدود به قیود مساوی و نامساوی مختلفی است که معمولاً آن را به مسأله‌ای ناهموار و نامحذب تبدیل و یافتن بهینه فرامحلی با استفاده از روش‌های ریاضی کلاسیک را دچار مشکل می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی مقاله، به منظور بهبود جستجوی محلی در ممپلکس‌ها و نیز تسریع همگرایی الگوریتم، روش جدیدی برای پرش راه حل‌های بدتر به سمت راه حل‌های بهتر پیشنهاد شده است. همچنین به جای تولید تصادفی قورباغه‌ها، از عملگر ژنتیکی جهش برای تولید قورباغه‌های جدید استفاده شده است. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، مسأله توزیع اقتصادی بار واقعی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، روش SFL مرسوم و نیز یک نسخه بهبود یافته آن، پیشنهاد شده توسط محققان دیگر، شبیه سازی و در سه سیستم قدرت نمونه متفاوت اجرا و نتایج آنها مقایسه و بررسی شده است. همچنین، این نتایج با جواب‌های چند روش دیگر مانند الگوریتم ژنتیک و برخی الگوریتم‌های ممپلکس مشابه، گزارش شده در چند مرجع دیگر، مقایسه شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با روش‌های مذکور، روش پیشنهادی مقاله از عملکرد بهتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته، توزیع اقتصادی بار، توابع هزینه ناهموار.

۱- مقدمه

محدودیت‌های مساوی و نامساوی سیستم نیز رعایت گردند [۱]. مسأله ELD در ساده‌ترین شکل خود با توابع هزینه هموار پیوسته درجه دو و قید معادله‌ای برابری تولید و مصرف تعریف می‌شود. روش حل کلاسیک مسأله، روش لاگرانژ و تکنیک‌های مبتنی بر آن، مانند روش تکرار لامبداست [۱]. تعیین سهم بهینه واحدهای مختلف در محدوده مجاز مربوطه با بررسی و اعمال شرایط Kuhn-Tucker در نقطه بهینه انجام می‌شود.

مسأله ELD واقعی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مساوی و نامساوی بیشتری، همچون قیود تغییرات شیب ژنراتور^۱، مناطق اجرایی ممنوعه^۲، تأثیر بارگذاری شیرهای

مسأله توزیع اقتصادی بار^۱ (ELD) یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است که هدف آن یافتن سهم بهینه خروجی توان واحدهای روشن در هر ترکیب تولید است، به گونه‌ای که ضمن حفظ توانایی شبکه در تأمین تقاضای بار مورد نیاز با کمترین هزینه اجرایی،

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۴/۲۷

نام نویسنده مسئول : اکبر ابراهیمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی

اصفهان - دانشکده برق و کامپیوتر

شیرهای بخار در سیستم‌های مورد مطالعه این مقاله مد نظر قرار گرفته است. در [۹] الگوریتم تکاملی به منظور حل مسأله ELD در سیستم‌هایی با محدودیت شیب ژنراتورها و اثر بار گذاری شیرهای بخار به کار رفته است. با وجود استفاده از روش‌های مختلف در حل مسأله ELD نامحدب، به علت پیچیدگی بالا، وجود قیود مختلف و توابع هزینه غیر محدب در مسأله ELD و عدم دستیابی روش‌های مذکور به پاسخ بهینه مطلق، هنوز هم روش‌های بهینه‌سازی جدید مورد توجه هستند.

در این مقاله، با در نظر گرفتن طبیعت مسأله توزیع اقتصادی بار واقعی (غیرخطی بودن، فضای جستجوی گسترده، توابع هزینه ناهموار و مقید بودن به قیود مختلف) اصلاحاتی در الگوریتم مرسوم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته^{۱۸} (SFL) صورت گرفته و یک الگوریتم بهبود یافته ترکیبی جدید^{۱۹} (NHSFL) پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی مقاله روش جدیدی برای انجام جستجوی محلی در مپلکس‌ها^{۲۰} ارائه شده است. همچنین برای بهبود جستجوی محلی و تسریع همگرایی الگوریتم، به جای تولید تصادفی قورباغه جدید، از عملگر ژنتیکی جهش برای تولید قورباغه جدید استفاده شده است.

برای بررسی کارایی و قابلیت روش پیشنهادی در حل مسأله ELD ناهموار و نامحدب، از سه سیستم آزمون متفاوت، که هر یک دارای محدودیت‌ها و قیود مختلفی هستند، استفاده شده است. از جمله قیود اعمال شده به سیستم‌های مورد مطالعه می‌توان به محدودیت تغییرات شیب ژنراتورها، وجود نواحی اجرایی ممنوعه، اثر بارگذاری شیرهای بخار و چندگانه بودن سوخت مصرفی ژنراتورها اشاره نمود. به منظور ارزیابی و مقایسه روش پیشنهادی، علاوه بر الگوریتم NHSFL، الگوریتم SFL مرسوم و نیز یک نسخه بهبود داده شده آن (ارائه شده در [۱۸])، شبیه‌سازی و در سیستم‌های تست مورد مطالعه اجرا شده‌اند. همچنین، نتایج حاصل از این روش‌ها با نتایج گزارش شده در مقالات [۱۳-۱۵] و [۳] مقایسه و بررسی شده است.

در بخش دوم این مقاله، پس از معرفی کلی و مختصر الگوریتم مرسوم SFL، اصلاحات انجام شده بر روی این الگوریتم توصیف و روش پیشنهادی NHSFL ارائه

بخار^۴، چندگانگی سوخت^۵ در واحدهای تولیدی و ...، به یک مسأله بهینه‌سازی ناهموار^۶ یا نامحدب^۷ تبدیل می‌شود. در نتیجه، یافتن مینیمم فرامحلی^۸ برای این مسأله با روش‌های کلاسیک به راحتی امکانپذیر نیست.

امروزه با بزرگ شدن ابعاد مسائل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ و عدم پاسخگویی روش‌های کلاسیک، استفاده از الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری و جستجوی تصادفی فضای مسأله به جای جستجوی همه جانبه آن، رشد چشمگیری داشته است [۲]. الگوریتم‌های جستجوی شهودی یا ابتکاری الگوریتم‌هایی هستند که با الهام از فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیک در طبیعت به وجود آمده‌اند.

تاکنون الگوریتم‌های ابتکاری متنوعی برای حل مسأله ELD واقعی با در نظر گرفتن قیود مختلف و توابع هزینه نامحدب استفاده شده‌اند. در این میان، می‌توان به الگوریتم‌های ممتیک^۳، الگوریتم وراثتی^{۱۱} [۴-۶]، شبیه‌سازی ذوب فلزات^{۱۱} [۷]، جستجوی ناحیه ممنوعه^{۱۲} [۸]، برنامه‌ریزی تکاملی^{۱۳} [۹، ۱۰]، بهینه‌سازی اجتماع مورچگان^{۱۴} [۱۱]، تکامل تفاضلی^{۱۵} [۱۲]، بهینه‌سازی اجتماع ذرات^{۱۶} [۱۳-۱۵] و شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۱۷} [۱۶، ۱۷] اشاره نمود.

برای مثال، در [۵] از الگوریتم وراثتی بهبود یافته برای حل مسأله ELD در سیستم‌های دارای مناطق اجرایی ممنوعه استفاده شده است. در [۶]، همانند [۵]، از الگوریتم وراثتی بهبود یافته برای حل مسأله ELD استفاده شده است؛ با این تفاوت که در [۶]، تأثیرات بارگذاری شیرهای بخار و چندگانه بودن سوخت ژنراتورها در سیستم‌های مورد مطالعه مد نظر قرار گرفته است.

نویسندگان مقاله در [۷]، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم وراثتی و شبیه‌سازی ذوب فلزات برای حل مسأله ELD، با در نظر گرفتن اثر بارگذاری شیرهای بخار پیشنهاد کردند. در [۸]، از روش جستجوی ممنوعه بهبود یافته برای حل مسأله توزیع اقتصادی بار که دارای چندین مینیمم محلی است، استفاده شده است. در روش ارائه شده، الگوریتم شبیه‌سازی ذوب فلزات با الگوریتم جستجوی ساده ممنوعه ترکیب شده است. همچنین، اثر بارگذاری

می‌شود. بخش سوم به مدل سازی ریاضی مسأله توزیع اقتصادی بار و بیان تابع هدف و قیود مسأله اختصاص یافته است. در بخش چهارم سیستم های مورد مطالعه معرفی و نتایج حاصل از شبیه سازی ها و مطالعات عددی بر روی این سیستم های نمونه، در بخش پنجم ارائه شده است. سرانجام، بخش ششم به نتیجه گیری نهایی مقاله اختصاص یافته است.

۲- معرفی الگوریتم SFL و NHSFL

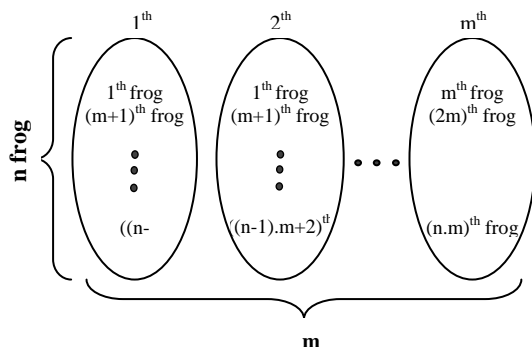
الگوریتم جستجوی جهش قورباغه های به هم آمیخته یا به طور خلاصه الگوریتم جهش قورباغه‌ها، یک الگوریتم جستجوی فرا ابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت اولیه از خانواده الگوریتم های ممتیک است که از تکامل طبیعی گروهی از قورباغه ها زمانی که به دنبال محل با بیشترین ذخیره غذایی در دسترس می گردند، الهام گرفته است [۱۹].

الگوریتم SFL نخستین بار توسط یوسف و لنزی^{۲۱} در سال ۲۰۰۳ برای تعیین اندازه بهینه لوله‌های جدید در توسعه شبکه آب شهری استفاده شده [۱۹]. از آن پس، SFL به عنوان یک روش بهینه سازی کارآمد مورد توجه محققان در زمینه های مختلف قرار گرفت [۲۰، ۲۱]. اخیراً استفاده از روش های بهینه سازی مبتنی بر SFL کاربردهای موفقیت آمیزی در زمینه تحلیل سیستم های قدرت، از جمله مسأله طراحی پایدار سازهای سیستم قدرت [۲۲]، مسأله برنامه ریزی توسعه تولید [۲۳] و برنامه ریزی به مدار آوردن واحدها [۲۴] داشته است. از ویژگی های این الگوریتم، توانایی حل مسائل غیرخطی، مسائل پیچیده و با ابعاد بزرگ و سرعت مناسب در همگرایی آن است.

۲-۱- روند کار الگوریتم SFL

در ابتدا جمعیت اولیه ای شامل N جواب شدنی مسأله $P = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ ، به صورت تصادفی و در فضای ممکن Ω تولید می شود. در یک مسأله S بعدی (S تعداد متغیرها)، موقعیت قورباغه (پاسخ) i ام در فضای جستجو به عنوان یک راه حل قابل قبول در مسأله بهینه سازی در نظر گرفته می شود و آن را به صورت بردار

در مرحله بعدی، قورباغه ها با توجه به مقادیر شایستگی شان، به صورت نزولی مرتب می شوند. سپس در مرحله بعد، راه حل ها به m زیرگروه مساوی تقسیم می شوند که به هر یک از این زیرگروه ها یک ممپلکس گفته می شود. در هر ممپلکس n راه حل مسأله قرار می گیرد ($n = N/m$)؛ به این صورت که نخستین راه حل (راه حل بالاترین مقدار شایستگی) در ممپلکس اول قرار می گیرد، دومین راه حل در ممپلکس دوم، و m امین راه حل در ممپلکس m ام، سپس مجدداً $(m+1)$ امین راه حل در ممپلکس اول قرار می گیرد. این روند تا توزیع تمامی قورباغه ها ادامه می یابد. در شکل (۱) روند توزیع قورباغه ها در ممپلکس ها نشان داده شده است.



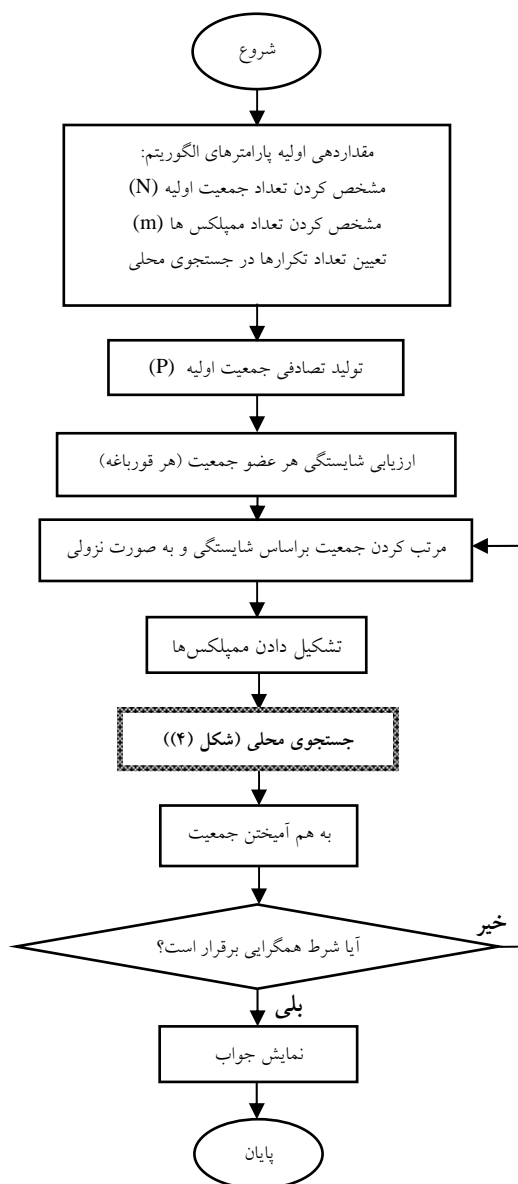
شکل (۱): روند شکل گیری ممپلکس ها.

روال جستجوی محلی الگوریتم SFL شبیه به الگوریتم PSO است و صرفاً به منظور بهبود بدترین راه حل (نه همه راه حل ها) در هر ممپلکس انجام می گیرد. ابتدا در هر کدام از ممپلکس ها قورباغه های با بدترین و بهترین میزان شایستگی مشخص و بترتیب با X_w و X_b نشان داده می شوند. همچنین، راه حلی که دارای بهترین مقدار شایستگی در میان کل جمعیت است نیز مشخص و با X_g نمایش داده می شود.

در ادامه، در طی فرآیند تکامل ممپلکس ها، در هر ممپلکس یا زیرگروه، موقعیت بدترین راه حل (X_w) به سمت موقعیت بهترین راه حل (X_b) بروز رسانی می شود.

۲-۲- معایب الگوریتم SFL

در الگوریتم‌های تکاملی که بر پایه جمعیت هستند عمدتاً دو جنبه مهم کاوش^{۲۳} و بهره‌وری^{۲۴} باید مورد توجه قرار گیرد. کاوش به جستجوی فضای جستجو می‌پردازد و بهره‌وری قادر به پیدا کردن بهینه حول بهترین جواب است [1]. نکته مهم برای داشتن عملکرد مناسب در مسائل مختلف بهینه‌سازی مصالحه میان کاوش و بهره‌وری است. الگوریتم SFL ممکن است در برخی از مسائل بهینه‌سازی قادر به یافتن بهینه مطلق نباشد و به رکود و افتادن در بهینه محلی^{۲۵} دچار شود. رکود الگوریتم SFL ممکن است به علل زیر باشد.



شکل (۲): فلوجارت جستجوی عمومی الگوریتم SFL [۱۸].

موقعیت جدید راه حل بدتر با استفاده از قانون پرش قورباغه به صورت زیر به دست می‌آید [19]:

$$\text{Position change (D)} = r \times (X_b - X_w) \quad (1)$$

$$X_w(\text{new}) = X_w + D, (\|D\| < D_{\max}) \quad (2)$$

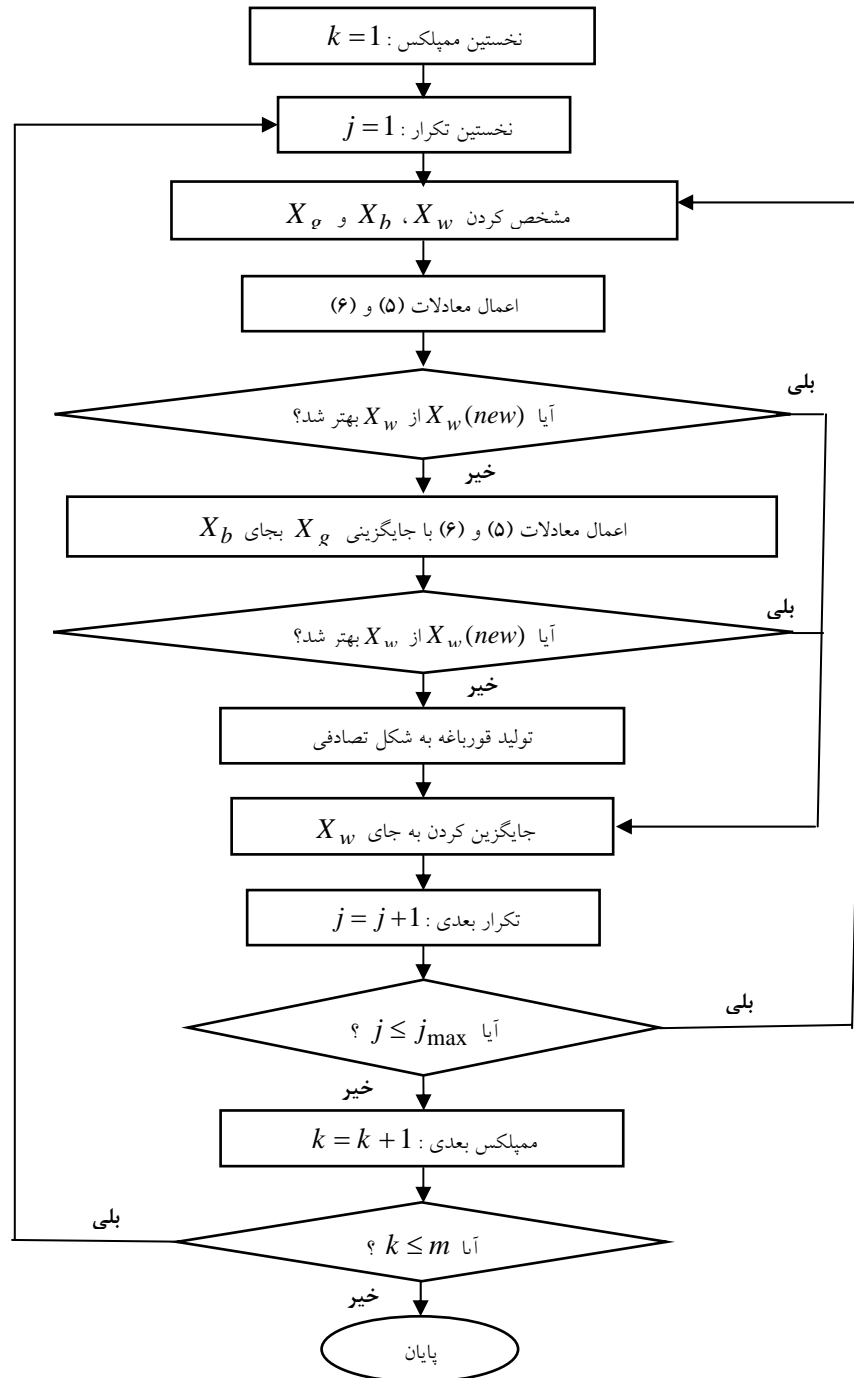
در روابطه فوق، r یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک است و D_{\max} حداکثر مقدار تغییرات مجاز در موقعیت قورباغه در یک پرش است.

چنانچه این تغییر موقعیت جوابی با شایستگی بهتر تولید کرد، این جواب جایگزین X_w می‌گردد. در غیر این صورت، محاسبات انجام شده با استفاده از روابط (۱) و (۲) و با جایگزینی بهینه فرامحلی X_g به جای بهینه محلی X_b تکرار می‌شوند. در صورتی که باز هم بهبودی در جواب حاصل نگردد، X_w حذف و یک راه حل جدید به صورت تصادفی جایگزین آن می‌گردد. این سیر تکاملی برای تعداد گام‌های تکاملی ممتیک (تعداد تکرارهای جستجوی محلی)، که از قبل مشخص شده‌است، در هر ممپلکس تکرار می‌شود.

پس از اتمام فرآیند جستجوی محلی در ممپلکس‌ها، تمامی اعضای جمعیت به هم آمیخته^{۲۲} شده، بر اساس ارزش شایستگی آنها مجدداً به صورت نزولی مرتب می‌شوند. سپس دوباره به چند زیر مجموعه تقسیم شده، روند گفته شده تکرار می‌شود. تکامل جمعیت در ممپلکس‌ها (فرآیند جستجوی محلی) و ترکیب دوباره کل جمعیت تا جایی ادامه می‌یابد که شرط توقف الگوریتم (اتمام تعداد تکرارها یا رسیدن به یک درصد خطای از پیش تعیین شده) برآورده گردد. در این صورت، الگوریتم SFL خاتمه یافته، جواب با بهترین مقدار شایستگی به عنوان بهترین جواب پیدا شده گزارش می‌شود. به منظور درک بهتر، فلوجارت الگوریتم SFL و نحوه انجام محاسبات در فرآیند جستجوی محلی، بترتیب در شکل‌های (۲) و (۳)، نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، J_{\max} نشان دهنده تعداد تکرارها در فرآیند جستجوی محلی است.

مسأله باعث محدود شدن فضای جستجو در جستجوی محلی شده، علاوه بر کند شدن روند همگرایی الگوریتم، می‌تواند گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی را نیز موجب شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای بهبود الگوریتم SFL مرسوم و رفع معایب فوق در مقالات گوناگون [۱۸، ۲۳، ۲۵، ۲۷] ارائه شده است.

در الگوریتم SFL موقعیت بدترین راه حل با توجه به قانون پرش در روابط (۱) و (۲) مشخص می‌گردد. این نحوه پرش باعث تغییر موقعیت قورباغه بدتر تنها در یک خط مستقیم (فضای دو بعدی) نسبت به قورباغه بهتر می‌گردد و باعث می‌شود که فضاهای اطراف قورباغه بهتر که در آنها شانس بیشتری برای رسیدن به جواب‌های با شایستگی بیشتر وجود دارد، مورد کاوش قرار نگیرند. این



شکل (۳): فلوچارت جستجوی محلی الگوریتم SFL [۱۸].

۲-۳- الگوریتم پیشنهادی NHSFL

در الگوریتم پیشنهادی روش جدیدی برای انجام جستجوی محلی در ممپلکس‌ها ارائه شده است. همچنین برای بهبود جستجوی محلی و تسریع همگرایی الگوریتم، به جای تولید تصادفی قورباغه‌ها، از عملگر ژنتیکی جهش برای تولید قورباغه‌های جدید استفاده شده است.

در روش ارائه شده قانون پرش قورباغه و فرآیند یادگیری قورباغه بدتر از قورباغه بهتر در یک ممپلکس، با استفاده از فاصله مینکوفسکی^{۲۶} تک تک اعضای آن ممپلکس از بدترین عضو همان ممپلکس، بعلاوه اختلاف بدترین عضو هر ممپلکس، از بهترین عضو کل جمعیت بیان می‌شود. قانون پرش پیشنهادی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D(i) = rand \times c_1 \times M(X(i), X_w) + c_2 \times (X_g - X_w) + W \quad (۳)$$

که در آن $X(i)$ و X_w به ترتیب، عضو i ام هستند. همچنین $rand$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ و ۱ است. پارامتر c_1 ضریب یادگیری بدترین راه حل (X_w) در یک ممپلکس از بقیه راه حل‌های همان ممپلکس ($X(i)$) نام دارد که مقداری بین ۱ و ۲ دارد. پارامتر c_2 نیز، ضریب یادگیری بدترین راه حل از بهترین راه حل در کل جمعیت (X_g) است که یک عدد تصادفی در بازه ۰ و ۲ است. همچنین $M(X(i), X_w)$ بیانگر فاصله مینکوفسکی بین راه حل i ام از بدترین راه حل است. فاصله مینکوفسکی برای دو متغیر X و Y به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M(X, Y) = p \sqrt[p]{\sum_{j=1}^L |x_j - y_j|} \quad (۴)$$

که در آن $X = (x_1, x_2, \dots, x_L)$ و $Y = (y_1, y_2, \dots, y_L)$ هستند. همچنین W در رابطه (۳) به صورت زیر تعریف می‌شود [19].

$$W = [r_1 W_{1,max}, r_2 W_{2,max}, \dots, r_S W_{S,max}]^T \quad (۵)$$

که r_i ($1 \leq i \leq S$) یک عدد تصادفی بین -۱ و ۱ است. $W_{i,max}$ ($1 \leq i \leq S$) بیشترین درک اجازه داده شده و عدم قطعیت در i امین پس از فضای جستجوست که با توجه به رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$W_{max} = [W_{1,max}, W_{2,max}, \dots, W_{S,max}]^T \quad (۶)$$

همان طور که از رابطه (۳) پیداست، یادگیری راه حل بدتر فقط نسبت به راه حل بهتر در یک ممپلکس انجام نمی‌شود، بلکه فرآیند یادگیری قورباغه بدتر نسبت به همه قورباغه‌های ممپلکس و نیز نسبت به بهترین قورباغه در کل جمعیت انجام می‌شود. قانون پرش جدید به علت استفاده از ایده همه قورباغه‌های یک ممپلکس و جستجوی محلی در جهات مختلف، از افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، خصوصاً در مسائل پیچیده با ابعاد بالا، جلوگیری می‌کند. همچنین، به علت استفاده از ایده بهترین قورباغه جمعیت در تکامل و یادگیری بدترین قورباغه در یک ممپلکس، سرعت همگرایی الگوریتم و رسیدن آن به پاسخ بهینه افزایش چشمگیری می‌یابد. از طرفی، استفاده از فاصله مینکوفسکی دو قورباغه، به جای اختلاف دو قورباغه در قانون پرش ارائه شده، موجب قویتر شدن و افزایش دقت جستجوی محلی حول قورباغه بدتر شده است. اکنون با توجه به قانون پرش جدید، موقعیت جدید قورباغه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X_w(new) = X_w(old) + D(i) \quad (۷)$$

چنانچه این تغییر موقعیت، قورباغه ای با شایستگی بیشتر تولید کرد، قورباغه به دست آمده جایگزین قورباغه بدتر می‌شود. در غیر این صورت X_g جایگزین $X(i)$ در رابطه (۳) می‌شود. مجدداً اگر این تغییر موقعیت قورباغه بهتری تولید کرد، قورباغه به دست آمده جایگزین قورباغه بدتر می‌شود و اگر باز هم بهبودی در میزان شایستگی قورباغه بدتر دیده نشد، لازم است قورباغه ای تولید و جایگزین این قورباغه شود. در الگوریتم مرسوم SFL این قورباغه به صورت تصادفی تولید می‌شود.

دچار رکود شده است، می‌شود [۱۸].

$$X_i^{new} = \begin{cases} X_i + D & \text{if } \|D\| \leq D_{max} \\ X_i + \frac{D}{\sqrt{D^T D}} & \text{if } \|D\| > D_{max} \end{cases} \quad (10)$$

این روند تا رسیدن به معیار همگرایی مورد نظر ادامه پیدا می‌کند.

۳- مدل ریاضی مسأله توزیع اقتصادی بار

۳-۱- مسأله توزیع اقتصادی بار با توابع هزینه

محدب

در مسأله ELD ساده، تابع هزینه هر ژنراتور به صورت تقریبی با استفاده از یک تابع درجه دو مدل سازی می‌شود. هدف اولیه در مسأله ELD مشخص کردن ترکیب بهینه خروجی توان تمام واحدهای تولیدی است؛ به طوری که ضمن حفظ توانایی شبکه در تأمین تقاضای بار پیش‌بینی شده با کمترین هزینه، سایر اهداف و قیود مورد نظر نیز برآورده گردند. بنابراین، می‌توان مسأله ELD را به صورت یک مسأله مینیمم سازی با تابع هدف رابطه (۱۱) بیان نمود [۲۸]:

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (11)$$

که در آن F کل هزینه تولید بر حسب $(\$/hr)$ ، F_i تابع هزینه سوخت ژنراتور i ام، N_G تعداد کل ژنراتورهای متصل به شبکه، P_{Gi} خروجی توان حقیقی ژنراتور i ام و a_i ، b_i و c_i ضرایب هزینه سوخت ژنراتور i ام هستند. از طرفی، قید تساوی برای برآورده کردن تقاضای بار مورد نیاز، به صورت زیر داده می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = P_{load} + P_{loss} \quad (12)$$

که P_{load} بار کل مورد نیاز مصرف کننده‌ها بر حسب (MW) و P_{loss} تلفات کل شبکه است که می‌تواند با رابطه تلفات ماتریس B و به صورت زیر محاسبه گردد:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NG} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{NG} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (13)$$

حذف برخی جواب‌ها (قورباغه‌ها) و جایگزینی آنها با جواب‌های تصادفی (به ویژه در تکرارهای نهایی الگوریتم) باعث می‌شود تا پتانسیل بالقوه آن جواب‌ها برای رسیدن به بهینه مطلق از بین برود و نیز کیفیت جمعیت از نظر میزان شایستگی عناصر جمعیت کاهش یابد. برای جلوگیری از این اتفاق، از عملگر ژنتیکی جهش برای تولید راه حل (قورباغه) جدید و جایگزینی آن به جای بدترین راه حل استفاده می‌کنیم. برای اعمال جهش روی راه حل بدتر از توزیع کوشی^{۲۷} استفاده می‌کنیم؛ بدین صورت که هر بعد در راه حل با احتمال $1/S$ (که S تعداد ابعاد است) با تابع زیر جهش می‌یابد و به طور متوسط یک بعد از بردار جواب تغییر می‌کند:

$$f(x) = \frac{a}{\pi x^2 + a^2}, \quad a = 0.2 \quad (8)$$

از آنجا که محدوده جواب‌ها به (X^l, X^h) محدود است (که در هر بعد می‌تواند متفاوت باشد) در صورتی که عددی بزرگتر از X^h بدست آید، به $X^h \times K$ و اگر کوچکتر از X^l باشد، به $X^l \times K$ برگردانده می‌شود که K یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است.

با توجه به روند الگوریتم، می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم پس از مدتی دچار رکود می‌گردد، چون یادگیری قورباغه بدتر از بهترین‌ها متوقف می‌شود. بنابراین، به حرکت دوباره قورباغه‌ها در جهت دیگر در فضای جستجو نیاز است. برای این منظور، پس از آنکه یادگیری قورباغه بدتر از بهترین قورباغه در کل فضای جستجو پایان یافت، از رابطه (۹) برای پرش قورباغه‌ها استفاده می‌کنیم:

$$D(i) = rand \times c_1 \times M(X_g, X(i)) + W \quad (9)$$

استفاده از رابطه (۹) موجب حرکت جواب‌ها در سایر نقاط و جهات فضای جستجو و افزایش بهره‌وری الگوریتم می‌شود. اکنون این پرش به X_i اضافه و راه حل جدید با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. اگر جواب تولیدی جدید (X_i^{new}) دارای شایستگی بیشتری نسبت به جواب i ام (X_i) بود، راه حل تولید شده جایگزین راه حلی که

حل مسأله توزیع اقتصادی بار نامحدوب با استفاده از الگوریتم ترکیبی جدید جهش قورباغه‌ها

همان طور که مشاهده می شود، برای تولید توان در زمان t ام نیاز به تولید زمان $t-1$ ام است. این مقدار معمولاً با P_{Gi}^0 نشان داده می شود. در نتیجه رابطه (۱۷) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\max(P_{Gi \min}, P_{Gi}^0 - DR_i) \leq P_{Gi} \leq \min(P_{Gi \max}, P_{Gi}^0 + UR_i) \quad (18)$$

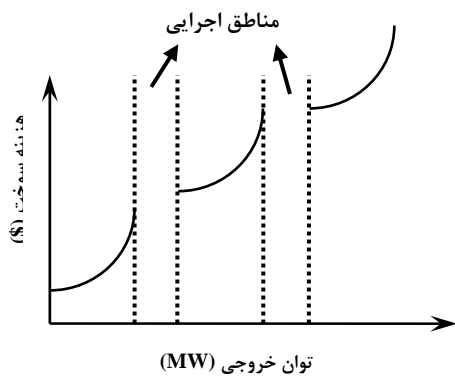
$$i = 1, 2, \dots, N_G$$

که در آن P_{Gi}^0 نقطه اجرایی قبلی ژنراتور i ام است. (ب) مناطق اجرایی ممنوعه: برخی از ژنراتورها مناطق اجرایی خاصی دارند که ناشی از محدودیت های فیزیکی مؤلفه های ژنراتور هستند [۷، ۱۳، ۲۹]. این مناطق موجب ایجاد ناپیوستگی در منحنی سوخت ژنراتورها (شکل (۴)) می شوند. وجود این ناپیوستگی ها در منحنی سوخت ژنراتورها به صورت قیود رابطه (۱۹) در مسأله ELD نظر گرفته می شود.

$$P_{Gi} \in \begin{cases} P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{LBl} \\ P_{Gi}^{UBk-1} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{LBk} & k = 2, 3, \dots, N_{PZi} \\ P_{Gi}^{UBk} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & k = N_{PZi} \end{cases} \quad (19)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_{GPZ}$$

که P_{Gi}^{UBk} و P_{Gi}^{LBk} به ترتیب کران های پایین و بالای منطقه اجرایی ممنوعه k ام از ژنراتور i ام (MW)، N_{PZi} تعداد مناطق ممنوعه ژنراتور i ام و N_{GPZ} تعداد ژنراتورها با مناطق اجرایی ممنوعه است.



شکل (۴): منحنی ورودی - خروجی با مناطق اجرایی ممنوعه [۱۳].

(ج) اثر بارگذاری شیر: معمولاً در واحدهای حرارتی از چندین شیر بخار در توربین برای کنترل توان خروجی ژنراتورها استفاده می شود [۳]. باز شدن شیر بخار موجب افزایش غیرمنتظره در تلفات و به وجود آمدن ریپل در

ضرایب B_{ij} ، B_{0i} و B_{00} ، ضرایب فرمول تلفات هستند که ثابت در نظر گرفته می شوند. همچنین، محدودیت نامساوی مسأله هم محدودیت تولید ژنراتورها است که با رابطه زیر بیان می شود:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (14)$$

که در آن $P_{Gi \min}$ و $P_{Gi \max}$ به ترتیب مینیمم و ماکزیمم محدودیت های توان تولیدی ژنراتور i ام هستند.

۳-۲- مسأله توزیع اقتصادی بار با توابع هزینه نامحدوب در عمل به علت وجود قیودی همچون نرخ تغییر توان تولیدی ژنراتورها (تغییرات شیب ژنراتورها)، وجود مناطق اجرایی ممنوعه برای واحدهای تولیدی، تأثیر بارگذاری شیرها و تنوع سوخت مورد استفاده در نیروگاه ها، مسأله ELD واقعی تبدیل به یک مسأله بهینه سازی مقید با توابع هزینه ناهموار، فضای جستجوی گسترده نامحدوب و دارای چندین مینیمم می شود که یافتن مینیمم محلی برای آن کار ساده ای نیست. محدودیت ها در مسأله ELD واقعی به صورت زیر هستند.

(الف) محدودیت تغییرات شیب ژنراتور: در عمل به علت وجود محدودیت های ترمودینامیک و مکانیکی بویلر و توربین، هر ژنراتور می تواند در یک زمان مشخص میزان خاصی افزایش یا کاهش تولید داشته باشد. این مطلب با استفاده از روابط زیر بیان می شود [۷، ۸]:

$$P_i(t) - P_i(t-1) \leq UR_i \quad (15)$$

چنانچه افزایش تولید مورد نیاز باشد:

چنانچه کاهش تولید مورد نیاز باشد:

$$P_i(t-1) - P_i(t) \leq DR_i \quad (16)$$

در روابط فوق، UR_i و DR_i به ترتیب، محدوده بالایی ژنراتور i ام و محدوده پایینی ژنراتور i ام هستند. با اعمال روابط فوق در رابطه (۱۴)، قید محدودیت های اجرایی توان حقیقی ژنراتورها به صورت معادله (۱۷) در می آید.

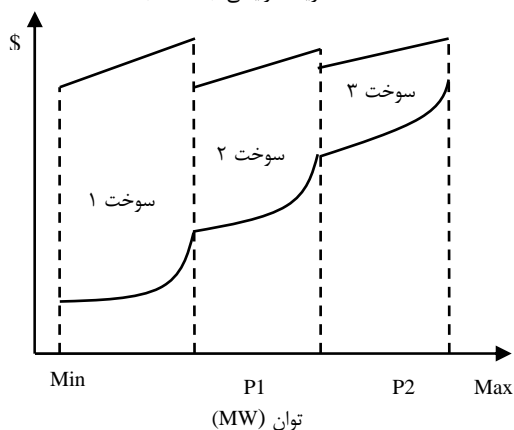
$$\max(P_{Gi \min}, P_{Gi}(t-1) - DR_i) \leq P_{Gi}(t) \leq \min(P_{Gi \max}, P_{Gi}(t-1) + UR_i) \quad (17)$$

بنابراین، برای یک سیستم قدرت با N_G ژنراتور و N_F سوخت متفاوت برای هر واحد تولیدی، تابع هزینه هر ژنراتور با در نظر گرفتن تأثیر بارگذاری شیر به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود:

$$F_i(P_{Gi}) = a_{ik} P_{Gi}^2 + b_{ik} P_{Gi} + c_{ik} + |e_i \sin(f_{ik}(P_{Gi \min} - P_{Gi}))| \quad (22)$$

if $P_{Gi,k}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,k}^{\max}$
for $j=1,2,\dots,N_G \quad k=1,2,\dots,N_F$

هزینه افزایشی (\$/MW)



شکل (۶): تابع هزینه سوخت از واحد تولید حرارتی که چندین سوخت متفاوت استفاده می‌کند [۱۳]

۴- سیستم‌های مورد مطالعه

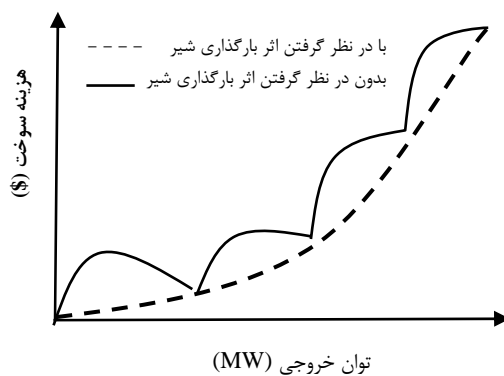
به منظور ارزیابی الگوریتم NHSFL پیشنهادی و همچنین مقایسه با الگوریتم SFL معمولی و الگوریتم SFL بهبود یافته ارائه شده با عنوان MSFL در [۱۸]، از سه سیستم تست نمونه استفاده شده است. مشخصات سیستم‌های تست مورد استفاده از [۶،۱۴،۱۵] گرفته شده است. مراجع دیگری همچون [۳،۱۳] نیز از آنها برای آزمایش روش پیشنهادی خود بهره گرفته‌اند.

سیستم شش ژنراتوری: این سیستم شامل شش ژنراتور حرارتی با محدودیت‌های تغییرات شیب و مناطق اجرایی ممنوعه است. تمامی ژنراتورها دارای محدودیت تغییرات شیب و مناطق اجرایی ممنوعه هستند. اطلاعات ورودی این سیستم، شامل مینیمم و ماکزیمم مقدار تولید، ضرایب هزینه

منحنی ورودی-خروجی و در نتیجه ناهمواری تابع هزینه می‌شود. شکل (۵) تأثیر بارگذاری شیر بر منحنی ورودی-خروجی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن اثر بارگذاری شیر، تابع هزینه هر ژنراتور به شکل رابطه (۲۰) در می‌آید [۷،۱۳،۳۰].

$$F_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + |e_i \sin(f_i(P_{Gi \min} - P_{Gi}))| \quad (20)$$

که f_i و e_i ضرایب ژنراتور i ام برای نشان دادن تأثیر بارگذاری شیر هستند. مفهوم اولیه اثر بارگذاری شیر و توابع هزینه مربوط به آن در [۳۰] ارائه شده است.



شکل (۵): منحنی ورودی-خروجی تحت تأثیر بارگذاری شیر [۱۳]

(د) چندگانگی سوخت: استفاده از چندین سوخت متفاوت در واحدهای تولیدی باعث به وجود آمدن منحنی‌های هزینه چندگانه می‌شود که لزوماً موازی یا پیوسته نیستند. در این صورت، از یک تابع هزینه مرتبه دوم تکه‌ای برای مدل‌سازی منحنی ورودی-خروجی ژنراتور با چندین سوخت متفاوت استفاده می‌شود. برای یک سیستم قدرت با N_G ژنراتور و N_F سوخت متفاوت برای هر واحد تولیدی، تابع هزینه هر ژنراتور به صورت رابطه (۲۱) است. همچنین، شکل (۶) منحنی توابع هزینه سوخت آن را نشان می‌دهد [۲،۱۳،۳۱].

$$F_i(P_{Gi}) = a_{ik} P_{Gi}^2 + b_{ik} P_{Gi} + c_{ik} \quad (21)$$

if $P_{Gi,k}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,k}^{\max}$ for $i=1,2,\dots,N_G$
 $k=1,2,\dots,N_F$

و میزان تولید هر ژنراتور و مقادیر مورد نیاز در توزیع اقتصادی بار مربوط به این سیستم در [۶] داده شده است.

۵- اجرای الگوریتم پیشنهادی و نتایج شبیه سازی

به منظور ارزیابی عملکرد و کارایی الگوریتم پیشنهادی NHSFL، نتایج به دست آمده از آن، با نتایج حاصل از اعمال الگوریتم SFL مرسوم و الگوریتم بهبود یافته MSFL به مسأله، مقایسه شده است. همچنین، نتایج فوق با نتایج بدست آمده از الگوریتم های GA و PSO [۱۴،۱۵]، الگوریتم های ممتیک SVMA، FVMA [۳] و روش های MPSO و GCPSO گزارش شده در [۱۳] مقایسه شده اند. کلیه شبیه سازی ها در محیط برنامه نویسی نرم افزار MATLAB و با استفاده از یک رایانه با پردازشگر 2.53MHz Core2Duo و حافظه 4GB انجام شده است. شایان ذکر است که، تعداد اعضای جمعیت و تعداد تکرار الگوریتم های اعمال شده به مسأله، با آنچه در مقالات قبلی گزارش شده است، یکسان در نظر گرفته شده‌اند تا بتوان نتایج را در شرایطی برابر با یکدیگر مقایسه کرد. پیاده سازی روش های SFL، MSFL و NHSFL برای حل مسأله ELD در سیستم های مورد مطالعه به صورت زیر است:

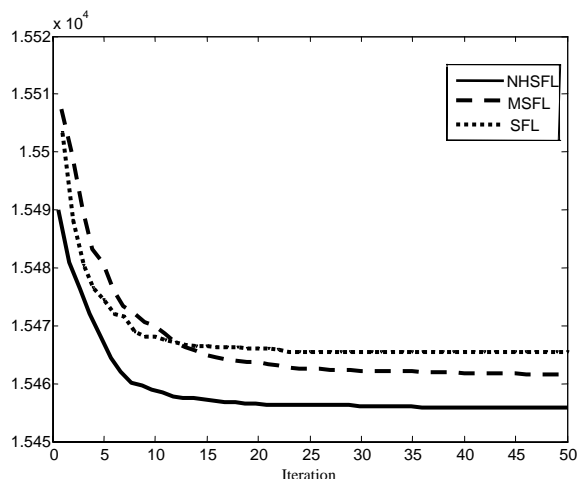
همان طور که اشاره شد، هدف از بهینه سازی، یافتن بهترین تولید برای ژنراتورهاست. بنابراین، در سیستم تست شش ژنراتوری، هر عضو از جمعیت در پیاده سازی هر یک از الگوریتم های فوق به صورت بردار $[P_{G1}, P_{G2}, P_{G3}, P_{G4}, P_{G5}, P_{G6}]$ در نظر گرفته می‌شود. تعداد اعضای جمعیت، مشابه مراجع [۳] و [۱۳،۱۵]، ۲۰ عضو و نیز تعداد تکرارها که شرط توقف الگوریتم است، ۵۰ در نظر گرفته شده است. در الگوریتم های SFL، ابتدا قورباغه‌ها به شکل تصادفی تولید و سپس با تابع هدف تعریف شده در (۱۱) و با در نظر گرفتن قیود مساوی و نامساوی (۱۲) - (۱۹) ارزیابی می‌شوند. باید توجه داشت، از آنجا که سیستم شش ژنراتوری دارای محدودیت‌های

و ضرایب مربوط به محدودیت شیب مربوط به هر ژنراتور و نیز میزان تولید در ساعت قبلی که مربوط به محدودیت شیب می‌شود، در [۱۴] ارائه شده است. همچنین، تلفات شبکه با استفاده از رابطه ماتریس B محاسبه شده است. در مرجع [۱۲]، نحوه محاسبه ضرایب B توضیح داده شده است. تقاضای بار مورد نیاز این سیستم ۱۲۶۳ MW است و بهترین هزینه ای که تاکنون برای این سیستم گزارش شده است $\$ / h 15443 / 0925$ است [۱۳].

سیستم پانزده ژنراتوری: این سیستم شامل پانزده ژنراتور حرارتی با محدودیت‌های تغییرات شیب و مناطق اجرایی ممنوعه می‌باشد. تمامی ژنراتورها دارای محدودیت تغییرات شیب می‌باشند. در این سیستم فقط چهار واحد تولیدی دارای مناطق اجرایی ممنوعه می‌باشند، واحدهای حرارتی ۲، ۵ و ۶ هر کدام دارای سه منطقه ممنوعه و واحد حرارتی دوازدهم دارای دو منطقه ممنوعه می‌باشد. اطلاعات ورودی این سیستم، شامل مینیمم و ماکزیمم مقدار تولید، ضرایب هزینه و ضرایب مربوط به محدودیت شیب مربوط به هر ژنراتور و نیز میزان تولید در ساعت قبلی که مربوط به محدودیت شیب می‌شود در [۱۵] ارائه شده است. همانند سیستم قبل، تلفات شبکه با استفاده از رابطه ماتریس B محاسبه شده است. تقاضای بار مورد نیاز این سیستم ۲۶۳۰ MW است و بهترین هزینه ای که تاکنون برای این سیستم گزارش شده است $\$ / h 32738 / 41$ می‌باشد [۱۳]. این سیستم نسبت به سیستم ۶ ژنراتوری فضای جستجوی گسترده تر و مینیمم های محلی بیشتری دارد. لذا با استفاده از این سیستم، توانایی الگوریتم پیشنهاد شده در سیستم های بزرگتر که پیچیدگی بیشتری دارند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیستم ۱۰ ژنراتوری: این سیستم شامل ۱۰ ژنراتور حرارتی است که بر خلاف دو سیستم قبل محدودیت‌های شیب ژنراتورها و مناطق اجرایی ممنوعه را ندارد ولی در عوض دارای محدودیت‌های چندگانگی سوخت و اثر بارگذاری شیر بخار می‌باشد [۱۴]. تقاضای بار مورد نیاز این سیستم ۲۷۰۰ MW است و بهترین نتیجه‌ای که تاکنون برای آن گزارش شده $\$ / h 624,1273$ است. ضرایب هزینه

ترسیم شده‌است. همان طور که از مشخصه های همگرایی پیداست، روش پیشنهادی NHSFL روند همگرایی بهتر و سریعتری نسبت به MSFL و به ویژه SFL مرسوم داشته است.



شکل (۷): مشخصه های همگرایی الگوریتم ها در سیستم تست اول.

تعداد اعضای جمعیت در سیستم مورد مطالعه دوم، ۱۰۰ عضو و تعداد تکرار الگوریتم‌ها برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین، پارامترهای الگوریتم‌های SFL، MSFL و NHSFL مطابق با جدول (۱) است؛ با این تفاوت که تعداد تکرارهای الگوریتم در جستجوی محلی در آن ۱۰ است. در این سیستم نیز مشابه سیستم شش ژنراتوری از تابع هزینه (۱۱) و قیود (۱۲)–(۱۹) استفاده شده است. جداول (۴) و (۵) به ترتیب نتایج حاصل از الگوریتم های اعمال شده و گزارش شده در سایر مقالات و مناطق اجرایی ممنوعه و محدودیت های تولید را نشان می‌دهند. این جداول نشان می‌دهند که بهترین نتایج به دست آمده مربوط به NHSFL است و نتایج بدست آمده محدودیت‌های مسئله را ارضا کرده، در مناطق مجاز تولید قرار دارند. همچنین، نمودار همگرایی الگوریتم‌ها در ۵۰ بار اجرای مستقل در یافتن مینیمم هزینه در شکل (۸) نشان داده شده است.

تغییرات شیب ژنراتورها و نواحی اجرایی ممنوعه است، قیود (۱۸) و (۱۹) لحاظ شده اند.

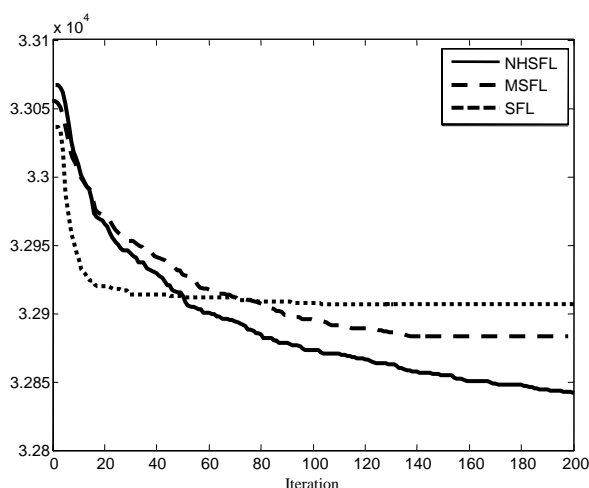
از آنجایی که انتخاب پارامترهای الگوریتم‌های SFL، MSFL و NHSFL تأثیر درخور توجهی بر کیفیت جواب به دست آمده دارد، قبل از حل مسئله آزمایش‌های متعددی بر روی سیستم های گوناگون انجام گرفته و با توجه به نتایج به دست آمده مقادیر مناسب برای تعداد ممپلکس‌ها، تعداد تکرارهای محلی (J_{max}) و مقادیر D_{max} و C_1 به دست آمده است. مقادیر انتخاب شده برای الگوریتم‌های SFL و NHSFL در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای انتخابی برای الگوریتم‌های SFL و NHSFL

NHSFL			پارامترها
الگوریتم			
NHSFL	MSFL	SFL	
۱۰	۱۰	۱۰	تعداد ممپلکس‌ها (m)
۵	۵	۵	J_{max}
inf.	inf.	inf.	D_{max}
۱/۳	-	-	C_1

به علت خاصیت تصادفی الگوریتم های اعمال شده و به منظور انجام مقایسه بهتر، هر کدام از این الگوریتم‌ها ۵۰ مرتبه به صورت مستقل اجرا و بهترین جواب از میان جواب‌های به دست آمده انتخاب شده است. جواب های بدست آمده از روش های مطرح شده و نیز نتایج گزارش شده در سایر مراجع در جدول (۲) آورده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عملکرد و دقت الگوریتم NHSFL بهتر از SFL مرسوم و MSFL است.

همچنین، جدول (۳) مناطق اجرایی ممنوعه، محدودیت‌های تولید و نتایج به دست آمده با روش های فوق را نشان می‌دهد. همان گونه که پیداست، نتایج به دست آمده محدودیت‌های مسئله را ارضا می‌کنند و در مناطق مجاز تولید قرار دارند. به منظور مقایسه عملکرد و نحوه همگرایی الگوریتم‌ها، مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در یافتن مینیمم هزینه، در شکل (۷) رسم شده‌است. این مشخصه برای میانگین ۵۰ مرتبه اجرای مستقل الگوریتم‌ها



شکل (۸): مشخصه های همگرایی الگوریتم ها در سیستم تست دوم.

اعضای جمعیت و تعداد تکرارها در سایر روش های گزارش شده است. برای سیستم مورد مطالعه سوم با ۱۰ ژنراتور، بهترین توان های خروجی که از الگوریتم های SFL، MSFL و NHSFL نتیجه شده، در جدول (۶) آورده شده اند. شایان ذکر است که نتایج بدست آمده قیود بهره برداری را ارضا کرده‌اند.

همان طور که قبلا بیان شد، سیستم تست سوم دارای محدودیت‌های چندگانگی سوخت و اثر بارگذاری شیر بخار است. لذا تابع هدف به فرم رابطه (۲۲) و با در نظر گرفتن قیود تساوی و نامساوی (۱۲)–(۱۴) استفاده می شود. همچنین، تعداد اعضای جمعیت و تعداد تکرارها به ترتیب ۳۰ عضو و ۲۰۰ تکرار در نظر گرفته شده که برابر تعداد

جدول (۲): مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم ها برای سیستم تست شش ژنراتوری.

unit	NHSFL	MSFL	SFL	GCPSO [13]	MPSO [13]	RGA [3]	FVMA [3]	SVMA [3]	PSO [14]	GA [14]
P1(MW)	۴۴۶,۷۲۱۰	۴۴۲,۱۰۴۴	۴۳۲,۳۹۴۶	۴۴۴,۸۸۸۱	۴۴۶,۴۸۶۹	۴۳۷,۴۰۴۸	۴۵۰,۸۱۸۵۹	۴۴۱,۱۰۸۶۴	۴۴۷,۴۹۷	۴۷۴,۸۰۶۶
P2(MW)	۱۷۵,۷۷۷۴	۱۸۰,۵۳۸۰	۱۸۶,۴۶۵۷	۱۶۸,۱۴۵۵	۱۶۸,۶۶۱۲	۱۶۷,۸۳۲۸	۱۷۵,۹۱۸۵۶	۱۷۳,۲۹۲۷	۱۷۳,۳۲۲۱	۱۷۸,۶۳۶۳
P3(MW)	۲۶۴,۶۱۱۸	۲۶۱,۴۵۵۲	۲۶۲,۷۶۲۶	۲۶۵	۲۶۵	۲۶۱,۱۲۰۵	۲۵۷,۵۳۴۳۴	۲۶۰,۰۱۱۹۴	۲۶۳,۴۷۴۵	۲۶۲,۲۰۸۹
P4(MW)	۱۴۰,۱۸۵۷	۱۳۶,۱۶۲۱	۱۳۷,۹۲۹۰	۱۲۹,۴۷۵۱	۱۳۹,۴۹۲۷	۱۳۹,۷۸۶۵	۱۴۳,۲۵۱۷۳	۱۴۱,۳۷۴۸۱۴	۱۳۹,۰۵۹۴	۱۳۴,۲۸۲۶
P5(MW)	۱۶۰,۹۳۴۳	۱۶۹,۹۱۹۲	۱۷۰,۸۱۴۱	۱۷۳,۰۲۹۹	۱۶۴,۰۰۳۶	۱۷۴,۷۶۴۴	۱۶۱,۶۵۷۲۸	۱۶۷,۰۷۶۶۷	۱۶۵,۴۷۶۱	۱۵۱,۹۰۳۹
P6(MW)	۸۷,۱۰۰۲	۸۵,۳۳۳۱	۸۵,۰۶۷۱	۹۵,۰۴۳۵	۹۱,۷۴۶	۹۴,۵۵۳۶	۸۶,۱۲۵۸۹	۹۲,۴۷۴۴۱	۸۷,۱۲۸	۷۴,۱۸۱۲
Total generation (MW)	۱۲۷۵,۳۳۰۷	۱۲۷۵,۵۰۲۳	۱۲۷۵,۴۳۳۳	۱۲۷۵,۵۸۲۳	۱۲۷۵,۳۹۱	۱۲۷۵,۴۶۲۵	۱۲۷۵,۳۰۶۴	۱۲۷۵,۳۳۹۲۴	۱۲۷۶,۰۱	۱۲۷۶,۰۳
Loss(MW)	۱۲,۳۳۲۰	۱۲,۴۷۵۰	۱۲,۴۳۳۴	۱۲,۶۴۱۱	۱۲,۳۷۳۶	۱۲,۴۷۱۸۳	۱۲,۲۷۵۰۸	۱۲,۳۴۸۶۷	۱۲,۹۵۸۴	۱۳,۰۲۱۷
Cost(\$/h)	۱۵۴۴۲,۶۶۷۴	۱۵۴۴۳,۸۰۴۷	۱۵۴۴۵,۸۵۲۵	۱۵۴۴۳,۹۷	۱۵۴۴۳,۰۹۲۵	۱۵۴۴۴,۷۷۲	۱۵۴۴۳,۶۰۲۵	۱۵۴۴۳,۰۲۷۷	۱۵۴۵۰	۱۵۴۵۹
Time for 50 run (sec)	۵۳,۶۶۶۳	۴۶,۵۳۵۷	۴۴۳,۱۳۳۲	-	-	-	-	-	-	-

جدول (۳): قرار داشتن نتایج به دست آمده در بین محدودیت های تولید و مناطق مجاز در سیستم تست شش ژنراتوری.

Unit	محدودیت های تولید		مناطق ممنوعه تولید		مقادیر بدست آمده از الگوریتم ها		
	Pmin	Pmax	Zone 1 (MW)	Zone 2 (MW)	NHSFL	MSFL	SFL
1	۱۰۰	۵۰۰	[۲۱۰-۲۴۰]	[۳۵۰-۳۸۰]	۴۴۶,۷۲۱۰	۴۴۲,۱۰۴۴	۴۳۲,۳۹۴۶
2	۵۰	۲۰۰	[۹۰-۱۱۰]	[۱۴۰-۱۶۰]	۱۷۵,۷۷۷۴	۱۸۰,۵۲۸۰	۱۸۶,۴۶۵۷
3	۸۰	۳۰۰	[۱۵۰-۱۷۰]	[۲۱۰-۲۴۰]	۲۶۴,۶۱۱۸	۲۶۱,۴۵۵۲	۲۶۲,۷۶۲۶
4	۵۰	۱۵۰	[۸۰-۹۰]	[۱۱۰-۱۲۰]	۱۴۰,۱۸۵۷	۱۳۶,۱۶۲۱	۱۳۷,۹۲۹۰
5	۵۰	۲۰۰	[۹۰-۱۱۰]	[۱۴۰-۱۵۰]	۱۶۰,۹۳۴۳	۱۶۹,۹۱۹۲	۱۷۰,۸۱۴۱
6	۵۰	۱۲۰	[۷۵-۸۵]	[۱۰۰-۱۰۵]	۸۷,۱۰۰۲	۸۵,۳۲۳۱	۸۵,۰۶۷۱

جدول (۴): مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم ها برای سیستم تست پانزده ژنراتوری.

units	NHSFL	MSFL	SFL	GCP SO [13]	MPSO [13]	RG A [3]	FVMA [3]	SVMA [3]	GA [18]	PSO ([18])
P1 (MW)	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۴۹,۸۹۲۵	۴۵۵	۴۵۳,۴۲۵۴	۴۴۹,۴۱۶۷	۴۵۱,۷۶۶۶	۴۱۵,۳۱۰۸	۴۳۹,۱۱۶۲
P2 (MW)	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰	۳۶۶,۹۹۰۶	۳۸۰	۳۶۶,۵۰۵۹	۳۷۶,۰۸۵۵	۳۴۸,۴۳۷۷	۳۵۹,۷۲۰۶	۴۰۷,۹۷۲۷
P3 (MW)	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۱۹,۴۶۷۵	۱۲۸,۴۹۲۱	۱۲۸,۴۶۳۶	۱۰۴,۴۲۵	۱۱۹,۶۳۲۴
P4 (MW)	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۱۸,۹۶۸۸	۱۲۹,۳۵۴۱	۱۲۸,۹۹۷۲	۷۴,۹۸۵۳	۱۲۹,۹۹۲۵
P5 (MW)	۱۶۸,۳۵۶۸	۱۶۸,۰۷۸۵	۱۵۰,۳۶۰۷	۱۷۰	۱۷۰	۱۶۶,۲۰۶۴	۱۵۹,۱۶۴۱	۱۶۱,۵۹۰۱	۳۸۰,۲۸۴۴	۱۵۱,۰۶۸۱
P6 (MW)	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰	۴۵۸,۴۳۶۷	۴۵۵,۰۲۳۷	۴۵۷,۴۶۴۴	۴۲۶,۷۹۰۲	۴۵۹,۹۹۷۸
P7 (MW)	۴۲۹,۷۸۰۴	۴۲۹,۰۳۵۴	۴۳۰	۴۳۰	۴۳۰	۴۲۵,۶۳۳۱	۴۲۷,۲۰۹	۴۲۵,۷۵۲۱	۳۴۱,۳۱۶۴	۴۲۵,۵۶۰۱
P8 (MW)	۹۳,۱۴۳۴	۷۲,۲۱۳۹	۶۰	۷۵,۸۸۴۶	۹۲,۷۲۷۸	۱۱۶,۲۷۹	۹۶,۹۷۰۸	۱۳۷,۰۲۰۷	۱۲۴,۷۸۶۷	۹۸,۵۶۹۹
P9 (MW)	۳۹,۱۶۴۹	۸۷,۲۶۲۵	۷۵,۱۷۶۱	۵۰,۲۲۶۸	۴۳,۰۲۸۲	۸۹,۷۴۸۶	۵۱,۱۷۶۲	۷۵,۰۰۰۴	۱۳۳,۱۴۴۵	۱۱۳,۴۹۳۶
P10 (MW)	۱۵۸,۶۶۸۲	۱۲۰,۳۰۰۸	۱۵۶,۲۴۹۲	۱۶۰	۱۴۰,۱۹۳۸	۱۱۴,۹۵۳۷	۱۵۸,۲۸۷۸	۱۳۰,۸۸۶۸	۸۹,۲۵۶۷	۱۰۱,۱۱۴۲
P11 (MW)	۷۹,۷۰۲۷	۸۰	۷۹,۷۰۲۱	۸۰	۸۰	۷۷,۶۹۳	۶۷,۲۹۷۶	۷۰,۵۹۸۲	۶۰,۰۵۷۲	۳۳,۹۱۱۶
P12 (MW)	۸۰	۸۰	۸۰	۷۷,۸۷۰۶	۸۰	۷۱,۳۴۵	۷۰,۹۰۴۹	۷۷,۶۰۳۸	۴۹,۹۹۹۸	۷۹,۹۵۸۳
P13 (MW)	۲۵	۲۵	۲۵,۲۲۶۵	۲۵	۲۷,۶۴۰۳	۲۸,۱۱۱۳	۲۶,۴۷۶۶	۳۰,۲۸۳۱	۳۸,۷۷۱۳	۲۵,۰۰۴۲
P14 (MW)	۱۵	۲۸,۱۹۱۵	۳۴,۳۳۷۴	۱۵,۸۳۱۲	۲۰,۷۶۱۰	۲۸,۷۵۳۵	۲۹,۸۰۷۱	۲۰,۷۳۴۸	۴۱,۹۴۲۵	۴۱,۴۱۴
P15 (MW)	۱۷,۱۴۴۵	۱۵	۱۵	۳۹,۶۶۱۴	۲۲,۲۷۲۴	۲۶,۲۹۵۹	۳۷,۷۸۰۹	۱۹,۵۸۸۶	۲۲,۶۴۴۵	۳۵,۶۱۴
Total Generation (MW)	۲۶۶۰,۹۶۱۱	۲۶۶۰,۸۲۸	۲۶۶۱,۰۵۲۱	۲۶۶۱,۳۵۸۰	۲۶۶۱,۶۲۳۵	۲۶۶۱,۸۲۳۸	۲۶۶۳,۴۴۷۱	۲۶۶۴,۱۸۸۱	۲۶۶۸,۴	۲۲۶۲,۴
Loss (MW)	۳۰,۹۶۱۱	۲۹,۹۳۷۴	۳۱,۰۵۲۲	۳۰,۸۶۵۹	۲۹,۹۸۷۰	۳۱,۹۱۹۲	۳۲,۱۳۷۹	۳۳,۵۰۰۵	۳۸,۱۷۸۲	۳۲,۴۳۰۶
Cost (\$/h)	۳۲۷۱۲,۰۳۷۷	۳۲۷۲۳,۲۲۳۳	۳۲۷۴۴,۷۳۹۲	۳۲۷۶۴,۴۶۱۶	۳۲۷۳۸,۴۱۷۷	۳۲۸۳۹,۲۶۶۱	۳۲۸۲۴,۵۹۸۶	۳۲۸۳۰,۱۹۲۹	۳۳۱۱۳	۳۲۸۵۸
Time for 50 run (sec)	۱۳۶۵,۶۶۸۹	۱۵۷۸,۸۷۹۵	۱۴۹۸,۷۵۶۴	-	-	-	-	-	-	-

جدول (۵): قرار داشتن نتایج به دست آمده در بین محدودیت های تولید و مناطق مجاز در سیستم تست پانزده ژنراتوری.

Unit	محدودیت های تولید		مناطق ممنوعه			مقادیر بهینه بدست آمده از الگوریتم ها		
	Pmin	Pmax	Zone 1 (MW)	Zone 2 (MW)	Zone 3 (MW)	NHSFL	MSFL	SFL
2	۱۵۰	۴۵۵	[۱۸۵-۲۲۵]	[۳۰۵-۳۳۵]	[۴۲۰-۴۵۰]	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰
5	۱۵۰	۴۷۰	[۱۸۰-۲۰۰]	[۳۰۵-۳۳۵]	[۳۹۰-۴۲۰]	۱۶۸,۳۵۶۸	۱۶۸,۰۷۸۵	۱۵۰,۳۶۰۷
6	۱۳۵	۴۶۰	[۲۳۰-۲۵۵]	[۳۶۵-۳۹۵]	[۴۳۰-۴۵۵]	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰
12	۲۰	۸۰	[۳۰-۴۰]	[۵۵-۶۵]	-	۷۹,۷۰۲۷	۸۰	۷۹,۷۰۲۱

جدول (۶): مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم ها برای سیستم تست ده ژنراتوری.

unit	NHSFL	MSFL	SFL	GCPISO [13]	MPSO [13]	RGA [3]	FVMA [3]	SVMA [3]	IGA_MU [14]	NPSO-LRS [14]
P1 (MW)	۲۲۰,۶۰۶۱	۴۴۶,۷۲۱۰	۲۳۰,۶۴۴۶	۲۱۹,۲۳۰۳	۲۲۵,۶۴۶۹	۲۰۳,۹۳۵۰۸	۲۱۲,۱۱۲۹۷	۲۲۵,۷۹۴۵	۲۱۹,۱۲۶۱	۲۲۳,۳۳۵۲
P2 (MW)	۲۱۰,۱۷۴۱	۲۱۴,۵۶۳۲۲	۲۲۹,۷۷۰۳	۲۱۱,۹۹۷۲	۲۱۲,۵۳۵۱	۲۲۰,۹۸۸۰۸	۲۱۲,۶۸۴۳۷	۲۱۴,۵۶۳۲۲	۲۱۱,۱۶۴۵	۲۱۲,۱۹۵۷
P3 (MW)	۲۷۶,۳۵۶۱	۲۸۰,۲۱۷۳۳	۲۹۹,۵۰۵۹	۲۶۶,۶۴۵۶	۲۷۸,۷۱۰۹	۳۱۵,۵۷۵۵۵	۲۷۹,۵۱۳۸۱	۲۸۰,۲۱۷۳۳	۲۸۰,۶۵۷۲	۲۷۶,۲۱۶۷
P4 (MW)	۲۴۱,۷۰۱۹	۲۴۴,۶۱۵۵۲	۲۳۷,۳۳۶۵	۲۴۳,۰۳۲۴	۲۴۴,۱۹۵۱	۲۵۲,۲۷۵۵۳	۲۴۱,۶۵۴۷۲	۲۴۴,۶۱۵۵۲	۲۳۸,۴۷۷	۲۳۹,۴۱۸۷
P5 (MW)	۲۷۹,۵۷۸۴	۲۹۶,۰۹۳۹۹	۲۷۸,۶۲۳۵	۲۸۷,۷۵۴۲	۲۸۵,۲۰۲۹	۲۸۹,۰۳۹۸۷	۲۷۹,۹۵۶۲۹	۲۹۶,۰۹۳۹۹	۲۷۶,۴۱۷۹	۲۷۴,۶۴۷
P6 (MW)	۲۳۶,۵۷۰۴	۲۳۳,۸۶۳۹۱	۲۳۲,۷۶۴۶	۲۳۵,۳۹۰۱	۲۳۲,۷۸۳۹	۲۴۱,۲۳۲۹	۲۴۳,۰۲۵۲۷	۲۳۳,۸۶۳۹۱	۲۴۰,۴۶۷۲	۲۳۹,۷۹۷۴
P7 (MW)	۲۹۳,۴۳۵۷	۲۸۶,۲۰۱۱۴	۲۸۶,۱۸۳۹	۲۷۸,۹۹۴۲	۲۸۵,۵۲۱۷	۲۷۴,۱۱۵۷۸	۲۹۰,۱۷۱۸۳	۲۸۶,۲۰۱۱۴	۲۸۷,۷۳۹۹	۲۸۵,۵۳۸۸
P8 (MW)	۲۴۱,۱۶۴۴	۲۴۲,۵۸۱۲۷۴	۲۳۹,۶۳۱۴	۲۴۰,۰۷۱۳	۲۴۱,۰۴۱۹	۲۴۴,۸۷۱۳۸	۲۳۷,۳۶۲	۲۴۲,۵۸۱۲۷۴	۲۴۰,۷۶۱۴	۲۴۰,۶۳۲۳
P9 (MW)	۴۲۴,۴۷۷۱	۴۱۶,۹۶۳۵۱	۳۸۶,۳۵۰۷	۴۳۳,۸۷۲۹	۴۲۰,۰۸۶۳	۳۸۵,۶۶۲۵۹	۴۳۶,۵۷۴۴۱	۴۱۶,۹۶۳۵۱	۴۲۹,۳۳۷	۴۲۹,۲۶۳۷
P10 (MW)	۲۷۵,۹۲۵۵	۲۵۹,۱۲۷۷۱	۲۷۹,۲۸۳۶	۲۸۳,۰۳۹۵	۲۷۴,۳۴۵۴	۲۷۳,۱۵۶۴۲	۲۶۶,۹۷۱۱	۲۵۹,۱۲۷۷۱	۲۷۵,۸۵۱۸	۲۷۸,۹۵۴۱
Total generation (MW)	۲۷۰۰	۲۷۰۰,۰۲۳۶	۲۷۰۰,۰۹۵۳	۲۷۰۰,۰۲۸۱	۲۷۰۰,۰۷۰۶	۲۷۰۰,۸۳۲	۲۷۰۰,۰۲۶۸	۲۷۰۰,۰۲۳۶	۲۷۰۰	۲۷۰۰
Cost (\$/h)	۶۲۴,۰۵۹۹	۶۲۵,۳۸۲۸	۶۲۸,۳۵۰۶	۶۲۵,۱۰۷۸	۶۲۴,۱۲۸۵	۶۲۹,۷۶۹۸	۶۲۴,۴۱۱۹	۶۲۵,۳۸۲۸	۶۲۴,۵۱۷۸	۶۲۴,۱۲۷۳
Time for 50 run(sec)	۱۸۷۶,۳۴۴۳	۲۱۶۴,۷۶۵۸	۱۹۵۴,۷۶۳۸	-	-	-	-	-	-	-

مستقل الگوریتم‌ها در جدول (۷) آورده شده است. همان‌طور که از جدول (۷) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی، در هر سه سیستم تست، دارای میانگین مقادیر و انحراف معیار بهتری نسبت به دو روش SFL مرسوم و MSFL است، که این امر پایداری الگوریتم NHSFL را در رسیدن به جواب‌های نزدیک به هم در اجراهای مستقل الگوریتم نشان می‌دهد.

در جدول (۶)، دو ستون آخر نتایج به دست آمده با یک GA بهبود یافته با بروز رسانی افزاینده (IGA_MU) و NPSO-LRS گزارش شده در [۱۴] را نشان می‌دهند. اطلاعات موجود در جدول (۶) نشان می‌دهد که الگوریتم NHSFL در پیدا کردن پاسخ بهینه بهتر عمل کرده است. به منظور ارزیابی بهتر عملکرد الگوریتم پیشنهادی NHSFL، میانگین مقادیر و انحراف معیار استاندارد از مقدار شایستگی برای نتایج به دست آمده در ۵۰ بار اجرای

جدول (۷): میانگین مقادیر و انحراف معیار استاندارد از مقدار شایستگی در ۵۰ بار اجرای مستقل الگوریتم‌ها.

الگوریتم	سیستم تست ۱		سیستم تست ۲		سیستم تست ۳	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
SFL	۱۵۴۵۰,۱۲	۴,۶۱	۳۲۷۲۹,۳۲	۱۸,۸۷	۶۳۶,۸۹۰۱	۴,۴۷
MSFL	۱۵۴۴۷,۹۰	۴,۱۸	۳۲۷۲۶,۰۳	۱۵,۲۱	۶۲۷,۵۳۲۵	۳,۲۱
NHSFL	۱۵۴۴۳,۶۰	۳,۹۸	۳۲۷۱۵,۰۳	۱۲,۵۳	۶۲۶,۴۵۱۵	۲,۷۳

مراجع

- [1] Wood, J., and Wollenberg, B. F., "Power Generation, Operation, and Control", 2nd ed, Wiley, 1996.
- [] نظام آبادی پور، حسین، الگوریتم وراثتی مفاهیم پایه و مباحث پیشرفته، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۹.
- [] نیستانی م، مغفوری فرسنگی م، نظام آبادی پور ح. "الگوریتم ممتیک برای توزیع اقتصادی بار با توابع هزینه نامحدوب"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۷، شش ۳، ۲۳۳-۲۴۲، ۱۳۸۸.
- [4] Chen, P. H., and Chang, H. C., "Large-scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, No. 4, 1995.
- [5] Orero, S. O., and Irving, M. R., "Economic Dispatch of Generators with Prohibited Operating Zones, A Genetic Algorithm Approach", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., Vol. 143, No. 6, pp.1996.
- [6] Chiang, C. L., "Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels",

۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای حل مسأله توزیع اقتصادی بار با فضای جستجوی نامحدوب با ارائه نسخه جدیدی از الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته پیشنهاد شد. به منظور بهبود فرآیند جستجوی محلی و تسریع همگرایی الگوریتم مرسوم SFL، قانون جدید پرش قورباغه و نیز استفاده از عملگر ژنتیکی جهش برای تولید قورباغه جدید پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حل مسأله توزیع اقتصادی بار واقعی، دو نوع از مسأله ELD ناهموار: ELD با محدودیت‌های تغییرات شیب و مناطق اجرایی ممنوعه و ELD با ترکیب تأثیر بارگذاری شیر و چندگانگی سوخت در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج روش‌های گزارش شده در مقالات دیگر مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی مقاله عملکرد بهتری در یافتن جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه برای سیستم‌های مورد مطالعه، در مقایسه با روش‌های مذکور، دارد.

- [18] Huynh, T. H., "A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Tuning of Multivariable PID Controllers", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT, 2008.
- [19] Eusuff, M., and Lansey, K., "Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm," Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 129, No. 2, pp. 210–25, 2003.
- [20] Amiri, B., Fathian, M., Maroosi, A., "Application of Shuffled Frog Leaping Algorithm on Clustering", Applied Mathematics and Computation, 2007.
- [21] Huynh, T. H., Nguyen, D. H., "Fuzzy Controller Design Using A New Shuffled Frog Leaping Algorithm, 2007.
- [22] Bijami, E., Askari, J., and Farsangi, M. M., "Power System Stabilizers Design by Using Shuffled Frog Leaping," Technical and Physical Problems of Power Engineering Conference, 2010.
- [] [جدید الاسلام م.، بی جامی الف.، ابراهیمی الف. برنامه ریزی توسعه تولید با استفاده از الگوریتم اصلاح شده SFL، نشریه سیستم های هوشمند در مهندسی برق، سال ۲، شش ۱، ۲۷-۴۴، ۱۳۹۰.
- [24] Ebrahimi, J., Hosseinian, S. H., Gharehpetian, G. B., "Unit Commitment Problem Solution Using Shuffled Frog Leaping Algorithm", IEEE Transaction on power systems, 2010.
- [25] Zhang, X., Hu, X., Gui, G., Wang, Y., Niu Y., "An Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm with Cognitive Behavior", Proceeding of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.
- [26] Li, Y., Zhou, J., Yang, J., Liu, L., Qin, H., Yang, L., "The Chaos-based Shuffled Frog Leaping Algorithm and Its Application", Fourth International Conference on Natural Computation, 2008.
- [27] Zhang, X., Hu, X., Gui, G., Wang, Y., Niu Y., "An Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm with Cognitive Behavior", Proceeding of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.
- [28] Ramanathan, R., "Emission Constrained Economic Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No.4, 1994.
- [29] Lee, F. N., Breipohl, A. M., "Reserve Constrained Economic Dispatch with Prohibited Operating Zones", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 246-254, 1993.
- [7] Wong, K. P., and Wong, Y. W., "Genetic and Genetic/Simulated-Annealing Approaches to Economic Dispatch," Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., Vol. 141, No. 5, pp. 507–513, 1994.
- [8] Lin, W. M., Cheng, F. S., and Tsay, M. T., "An Improved Tabu Search For Economic Dispatch with Multiple Minima", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 17, No. 1, 2002.
- [9] Sinha, N., Chakrabarti, R., and Chattopadhyay, P. K., "Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch," IEEE Trans. Evol. Comput., Vol. 7, No. 1, pp. 83–94, 2003.
- [10] Joned, A. M. A. A., Musirin, I., Titik Khawa, A. R., "Solving Dynamic Economic Dispatch Using Evolutionary Programming", in Proc. IEEE, Power and Energy Conference, pp. 144 – 149, 2006.
- [11] Hou, Y. H., Wu, Y. W., Lu, L. J., Xiong, X. Y., "Generalized Ant Colony Optimization for Economic Dispatch of Power Systems", Proc. IEEE PowerCon, pp. 225 – 229, 2002.
- [12] Wang, S. K., Chiou, J. P., Liu, C. W., "Non-Smooth/Non-Convex Economic Dispatch by A Novel Hybrid Differential Evolution Algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 5, pp. 793 – 803, 2007.
- [13] Neyestani, M., Farsangi, M. M., Nezamabadi-pour, H., "A Modified Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions," Eng. Appl. Artif. Intel., Vol. 23, No. 7, pp. 1121–1126, 2010.
- [14] Selvakumar, A. I., Thanushkodi, K., "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 1, pp. 42–51, 2007.
- [15] Gaing, Z. L., "Particle Swarm Optimization to Solving The Economic Dispatch Considering The Generator Constraints," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 18, No. 3, pp. 1187–1195, 2003.
- [16] Park, J. H., Kim, Y. S., Eom, I. K., and Lee, K. Y., "Economic Load Dispatch For Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 8, No. 3, pp. 1030–1038, 1993.
- [17] Lee, K. Y., Sode-Yome, A., and Park, J. H., "Adaptive Hopfield Neural Network for Economic Load Dispatch," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 2, pp. 519–526, 1998.

- [31] Lin, C. E., Viviani, G. L., "Hierarchical economic Dispatch For Piecewise Quadratic Cost Function", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 6, pp. 1170-1175, 1984.
- [30] IEEE Committee Report, "Present Practices in the Economic Operation of Power Systems", IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90., pp. 1768-1775, 1971.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Economic Load Dispatch
 - ² Ramp Rate
 - ³ Prohibited Zone
 - ⁴ Valve Point
 - ⁵ Multifuel
 - ⁶ Nonconvex
 - ⁷ Nonsmooth
 - ⁸ Global Optimum
 - ⁹ Memetic Algorithm (MA)
 - ¹⁰ Genetic Algorithm (GA)
 - ¹¹ Simulated Annealing (SA)
 - ¹² Tabu Search (TA)
 - ¹³ Evolutionary Programming (EP)
 - ¹⁴ Ant Colony Optimization (ACO)
 - ¹⁵ Differential Evolutionary (ED)
 - ¹⁶ Partial Swarm Optimization (PSO)
 - ¹⁷ Artificial Neural Network (ANN)
 - ¹⁸ Shuffled Frog Leaping (SFL)
 - ¹⁹ New Hybrid Shuffled Frog Leaping (NHSFL)
 - ²⁰ Memplex
 - ²¹ Eusuff and Lansey
 - ²² Shuffled
 - ²³ Exploration
 - ²⁴ Exploitation
 - ²⁵ Local Optimum
 - ²⁶ Minkowsky distance
 - ²⁷ Cauchy

