

Economic Dispatch of Thermal Units considering Valve-point Effect using Learning Backtracking Search Optimization Algorithm

B. Golestani Mehr 1, A. Lashkar Ara Mohamare 2

¹ Dept. of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

² Dept. of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract:

The production of electric energy for power systems with the goal of minimizing the total production cost for existing active units in the power network is one of the most important issues of modern systems. In other words, the purpose of economic dispatching is proper and optimized planning for production units, by taking into account the existing nonlinear factors and limitations in the power network and manufacturing units. The issue of economic dispatch is a challenging, non-linear, and non-convex optimization problem, which due to its intricate characteristics, heuristic algorithms are utilized as the resolution. In this paper, the issue of economic dispatch has become an optimization issue considering non-linear constraints and it has been solved using learning backtracking search algorithm (LBSA). The proposed algorithm is hybrid of backtracking search algorithm (BSA) and teaching-learning based optimization (TLBO). In order to evaluate the efficiency of the proposed algorithm, two test systems are used as case studies and the obtained results are compared to that of other algorithms in the literature. Based on numerical results, the LBSA algorithm is capable of offering better solutions and, in some cases, solutions identical to other reported methods regarding the fuel cost.

Keywords: Economic Dispatch, Non-convex Optimization, Learning Backtracking Search Algorithm (LBSA), Valve-point Effect.

پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی بهنام گلستانی مهر^۱، افشین لشکرآرا محمره^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق قدرت- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - دزفول - ایران

Beh.golestan.mehr@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی برق قدرت- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - دزفول - ایران

Lashkarara@alumni.iust.ac.ir

چکیده: یکی از مهم‌ترین موضوع‌های سیستم‌های مدرن امروزی، تولید انرژی الکتریکی برای سیستم‌های قدرت به منظور بهینه‌کردن هزینه تولیدی برای واحدهای فعال موجود در شبکه قدرت است. پخش بار اقتصادی^۱ برنامه‌ریزی مناسب برای واحدهای تولیدی است که محدودیت‌های غیرخطی شبکه قدرت و واحدهای تولیدی را در نظر می‌گیرد. پخش بار اقتصادی، مسئله بهینه‌سازی غیرخطی، غیرمحدب و چالش‌برانگیز است که برای حل آن، با توجه به مشخصات پیچیده موجود در مسئله، از الگوریتم‌های ابتکاری استفاده می‌شود. در این مقاله مسئله پخش بار اقتصادی با محدودیت‌های غیرخطی، به مسئله بهینه‌سازی تبدیل شده است و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA)، به حل آن پرداخته می‌شود. الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از الگوریتم ردیابی بازگشتی (BSA) و الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO) است. برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی از دو سیستم تست به‌عنوان مطالعات موردی استفاده شد و نتایج حاصل از این روش، تجزیه و تحلیل و با نتایج دیگر الگوریتم‌های موجود در مقالات مقایسه شده‌اند. این نتایج، کارایی و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پخش بار اقتصادی، بهینه‌سازی غیرمحدب، الگوریتم یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA)، اثر شیر بخار

۱- مقدمه

استفاده از آنها پژوهشگران را در پی کشف روش‌هایی برای بهینه‌کردن استفاده از این سوخت‌های فسیلی واداشت [۱]. در ابتدا هزینه سوخت، متغیر اصلی در توزیع اقتصادی در نظر گرفته می‌شد و با گسترش قوانین زیست‌محیطی، انتشار آلاینده‌ها بخشی از هزینه برای توزیع اقتصادی شد. سپس توزیع اقتصادی، مشکل چندمنظوره برای به حداقل رساندن هزینه و انتشار آلاینده‌ها شد [۲].

در دهه‌های اخیر یکی از مهم‌ترین منابع تولید برق، مربوط به واحدهای حرارتی بوده است. منابع اصلی تأمین این نیروگاه‌ها استفاده از سوخت‌های فسیلی است؛ اما با توجه به فناپذیری و همچنین میزان آلاینده‌گی و هزینه زیاد

هزینه تولید، به‌ویژه در نیروگاه‌های حرارتی، بیش‌ازحد است؛ بنابراین برنامه‌ریزی مناسب خروجی واحدهای نیروگاهی به صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی کمک چشمگیری می‌کند [۳]. بهره‌برداری مناسب از سیستم قدرت، برای برگشت سود سرمایه‌گذاری، بسیار مهم است و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷

نام نویسنده مسئول: افشین لشکر آرا محمره

نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - کوی آزادگان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - گروه برق

شود. برای بهبود عملکرد همگرایی و گسترش دامنه استفاده از آن، با الگوریتم آموزش و یادگیری^{۱۷} (TLBO) [۱۶] ترکیب شد و الگوریتم جدیدی به نام الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی^{۱۸} (LBSA) [۱۷] به دست آمد که اساس بهینه‌سازی در این مقاله است.

در دنیای امروز و در مراکز تولید، پخش بار اقتصادی، مهم‌ترین هدف توزیع انرژی بوده است و نقش مهمی در عملکرد اقتصادی سیستم قدرت دارد. در صنعت، زمانی که ژنراتورهای دارای بارهای مختلف، به هم پیوسته شوند، ظرفیت تولیدی آنها بسیار بزرگ‌تر از بارها می‌شود؛ به همین دلیل، اختصاص دادن بار برای ژنراتورها می‌تواند متنوع شود و به سبب اینکه کاهش هزینه تولید برق مهم است، تقسیم بار اقتصادی، مدنظر قرار می‌گیرد.

هزینه سوخت، بیشتر هزینه تولید در نیروگاه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. سایر هزینه‌ها مانند هزینه کار، تعمیر و نگهداری، عوامل اقتصادی‌اند؛ در نتیجه، متخصصان توزیع انرژی باید کنترل تولید نیروگاه‌ها را برای کم کردن هزینه به دست گیرند که در این صورت مسئله پخش بار اقتصادی به عنوان مسئله بهینه‌سازی، شامل تابع هدف و قیود، بیان می‌شود [۳،۲].

در این مقاله برای حل مسئله پخش بار اقتصادی برای اولین بار از الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) استفاده شد. ابتدا به بیان مسئله پخش بار اقتصادی و فرمول‌بندی آن پرداخته و در ادامه، الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) و شیوه کار آن بررسی شده است. سپس با استفاده از این الگوریتم مسئله پخش بار اقتصادی، برای سیستم‌های آزمایشی ذکر شده، حل شده است و نتایج حاصل، تحلیل و بررسی و با نتایج حاصل از سایر الگوریتم‌ها، مقایسه و نتیجه‌گیری شده‌اند.

۲- فرمول‌بندی مسئله

۲-۱- توصیف مسئله پخش بار

پخش بار اقتصادی در مراکز مدرن کنترل انرژی و به منظور تعیین توان بهینه واحدهای تولیدی، یکی از مسائل

هزینه‌هایی که ارگان‌های دولتی تعیین می‌کنند و همچنین اهمیت صرفه‌جویی در سوخت و هزینه آن، شرکت‌های برق را برای به دست آوردن حداکثر بازدهی ممکن، وادار می‌کند [۴].

این مقاله به دنبال کم کردن هزینه سوخت تولید نیروگاه‌های حرارتی با استفاده از مسئله توزیع اقتصادی است. در سال‌های گذشته، تکنیک‌های بهینه‌سازی زیادی برای پخش بار اقتصادی استفاده شده‌اند. در برخی از این تکنیک‌ها از روش‌های بهینه‌سازی متعارف مانند روش تکرار لامبدا^۱، روش نقطه پایه و عوامل مشارکتی^۲ و روش گرادیان^۳ استفاده شده است [۶،۵،۱]. روش‌های ذکر شده در ماهیت منحنی هزینه محدودیت‌هایی دارند. علاوه بر این، با توجه به وجود چند مینیمم نسبی در تابع هدف، مسائل نوسانی به وجود می‌آیند که زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارند. برنامه‌نویسی پویا هیچ شرطی بر منحنی هزینه تحمیل نمی‌کند؛ اما مشکل، چندبعدی بودن تابع هزینه است که اعمال این روش‌ها به سیستم‌های بزرگ، به زمان محاسباتی بیشتری منجر می‌شود [۳].

در دهه گذشته متدهای ابتکاری بسیاری با استفاده از هوش مصنوعی برای حل مشکل پیچیده توزیع نیرو به کار رفته است؛ از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک^۴ (GA) [۷]، انتشار ذرات^۵ [۲]، کلونی زنبور عسل^۶ (ABC) [۹،۸]، ازدحام ذرات^۷ (PSO) [۱۰]، کرم شب‌تاب^۸ (FA) [۱۱]، کلونی مورچه‌ها^۹ (ACO) [۱۲]، خفشابی^{۱۰} [۱۳]. برای بهبود کارایی جستجوی این متدها، تعدادی الگوریتم تغییر داده شده که از مدل اصلی آنها مشتق شده‌اند نیز پیشنهاد شده است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک بهبودیافته^{۱۱} [۱۴]، روش تکامل یافته ازدحام ذرات^{۱۲} (θPSO) [۳]، کلونی زنبور عسل مصنوعی بهبود یافته^{۱۳} [۴] را شامل می‌شوند. این تکنیک‌های مدرن با محدودیت‌هایی در فرم منحنی هزینه مواجه نیستند؛ اما پارامترهای وابسته زیادی دارند که باید به درستی تعیین شوند.

الگوریتم جستجوی عقب‌گرد یا ردیابی بازگشتی^{۱۴} (BSA) [۱۵]، الگوریتم تکاملی^{۱۵} (EA) است که برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. ساختار این الگوریتم ساده است و تنها یک پارامتر کنترلی دارد که باید تعیین

$$\text{Minimize } F_{cost} = \sum_{i=1}^m (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (2)$$

در این رابطه F_{cost} هزینه سوخت کل نیروگاه، a_i ، b_i و c_i ضرایب مربوط به هزینه واحد نیروگاهی i ام و m تعداد نیروگاه‌های سوخت فسیلی موجود در شبکه است. در تحلیل پخش بار اقتصادی، با ایجاد تغییر در توان تولیدی هر یک از نیروگاه‌ها، باید روشی را انتخاب کرد که تابع هزینه ارائه شده به صورت رابطه (۲) مینیمم شود [۱۹].

۲-۳- تابع هدف با اثر شیر بخار

مجموع هزینه تولید معمولاً با همان تابع درجه دوم از توان خروجی واحد تولیدی تقریب زده می‌شود. از طرفی معمولاً در پخش بار اقتصادی تابع هزینه دارای نقاط زانویی مشتق‌ناپذیر است [۱۹] که به دلیل در نظر گرفتن بارگذاری شیر ورودی [۴]، تابع هزینه نیروگاه را به صورت حاصل جمع تابع هزینه درجه ۲ و قدر مطلق تابع سینوسی در نظر می‌گیرند.

در این مقاله، مدل والتر-شب [۲۰] برای نشان دادن این خاصیت‌ها استفاده می‌شود؛ بنابراین، تابع هزینه اصلاح و تابع سینوسی تصحیح شده در تابع درجه دوم گنجانده می‌شوند. با توجه به این اثر، تابع هدف توزیع اقتصادی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی محدود به صورت رابطه ریاضی (۳) توصیف می‌شود.

$$F_{cost} = \sum_{i=1}^m F_i(P_i) \quad (3)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \alpha \left| g_i \sin(h_i(P_i - p_i^{min})) \right| \quad (4)$$

که g_i و h_i ضرایب مربوط به اثر شیر بخار ژنراتورها هستند. اگر بارگذاری نقطه درجه یا شیر ورودی در نظر گرفته شود و به دنبال آن، واحد تولیدی تابع هزینه‌ای غیرصاف (غیریکنواخت) داشته باشد؛ α برابر با یک و در غیر این صورت α برابر صفر و تابع هزینه این واحد صاف (یکنواخت) است [۳].

مهم در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. با توجه به بازه زمانی، دو نوع پخش بار اقتصادی معرفی می‌شود: پخش بار اقتصادی استاتیکی که در آن برای یک میزان بار مشخص و در یک بازه زمانی، مسئله را به صورت بهینه حل می‌کند و پخش بار اقتصادی دینامیکی که مسئله را برای میزان بارهای مختلف و در چندین بازه زمانی بررسی می‌کند. بدیهی است فرایند محاسبات در پخش بار دینامیکی، پیچیده‌تر از حالت استاتیکی است؛ اما نتایج محاسبات آن تطابق بیشتری با نیازهای واقعی سیستم قدرت دارد [۱۸]. پخش بار اقتصادی دینامیکی، مسئله بهینه‌سازی برای تعیین برنامه زمان‌بندی توان خروجی واقعی واحدهای تولید، با در نظر گرفتن تعادل توان واقعی با بار مصرفی و همچنین محدودیت‌های خروجی ژنراتورها است.

تورم سالانه و افزایش قیمت مواد سوختی باعث می‌شود همواره به بهره‌برداری مناسب از سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی توجه شود [۱]. هدف از توزیع اقتصادی، به حداقل رساندن مجموع هزینه تولید سیستم قدرت در یک بازه زمانی تعریف شده (معمولاً ۱ ساعت) است؛ در حالی که محدودیت‌های عملیاتی سیستم قدرت رعایت شود؛ بنابراین، می‌توان این هزینه را به صورت ریاضی، مانند یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف و دو محدودیت (معادله و نامعادله) فرمول‌بندی کرد [۳].

۲-۲- تابع هدف بدون اثر شیر بخار

عامل اصلی در توزیع اقتصادی بار، تابع هزینه ژنراتورها است و هزینه‌های دیگر به صورت درصد ثابتی از هزینه سوخت در نظر گرفته می‌شوند. بدیهی است تابع هزینه، تنها برای نیروگاه‌های حرارتی مفهوم دارد.

معمولاً تابع هزینه سوخت برای مشخص کردن توان تولیدی در یک نیروگاه را با تقریب مناسب، با تابع درجه ۲ مشخص می‌شود؛ در نتیجه، برای تولید انرژی الکتریکی (P_i) در نیروگاه i ام، هزینه‌ای به دست می‌آید که با F_i مشخص می‌کند. واضح است که هزینه کل سیستم، برابر با مجموع هزینه‌های همه واحدها است. در این صورت، مسئله توزیع اقتصادی بار به صورت رابطه (۱) تعریف خواهد شد:

$$F_{cost} = F_1 + F_2 + \dots + F_m \quad (1)$$

۲-۴- محدودیت‌های معادله (تساوی)

محدودیت‌هایی مانند تعادل توان یا محدودیت تقاضا را با عنوان محدودیت‌های معادله (تساوی) مشخص می‌کنند؛ به این صورت که مجموع توان تولیدی سیستم $(\sum_{i=1}^m P_i)$ باید مانند رابطه (۵) با حاصل جمع بارهای کل سیستم (P_{Load}) و تلفات (P_{Loss}) برابر باشد [۳].

$$\sum_{i=1}^m P_i - P_{Load} - P_{Loss} = 0 \quad (5)$$

در این رابطه، تلفات خطوط به‌وسیله تابعی از توان حقیقی و ماتریس ضرایب B که فرمول تلفات Korn هستند، با استفاده از معادله (۶) به دست می‌آید.

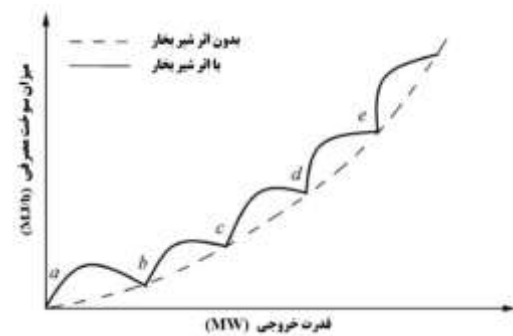
$$P_L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^m B_{0i} P_i + B_{00} \quad (6)$$

که در آن پارامترهای B_{ij} ضرایب اتلاف نام دارند. این رابطه را به‌صورت برداری با رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$P_L = P^T B P + B_0^T P + B_{00} \quad (7)$$

ضرایب اتلاف را با ماتریس متقارن B نشان داده و B_{00} بردار ستونی و B_{00} ثابت اسکالر این ضرایب است [۲۱].

شکل (۱) تابع هزینه واحد حرارتی را با اثر شیر بخار و بدون اثر آن نشان می‌دهد.



شکل (۱): تابع هزینه واحد حرارتی [۴]

۲-۵- محدودیت‌های نامعادله (نامساوی)

محدودیت‌های نامعادله یا نامساوی شامل محدودیت ظرفیت تولید، محدودیت سرعت تولید، میزان‌های افزایشی کاهشی، منطقه عملیاتی ممنوع، محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه و ... است.

محدودیت ظرفیت تولید: قدرت خروجی هر ژنراتور

باید بین محدوده خودش باشد؛ یعنی از ظرفی نباید بیشتر از مقدار نامی و از طرف دیگر، نباید کمتر از مقداری باشد که برای بهره‌برداری مناسب دیگ بخار لازم است؛ بنابراین، خروجی توان حقیقی هر ژنراتور، باید بین حد بالا و پایین مانند رابطه (۸) باشد.

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

که P_i^{min} و P_i^{max} کمترین و بیشترین تولید واحد i ام هستند. این حدود، علاوه بر اینکه ناشی از محدودیت‌های فنی هر واحد است، باعث می‌شوند واحدهای با هزینه کمتر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحدهای با هزینه بیشتر، کمتر از حد مجاز خود تولید نداشته باشند [۱۸].

محدودیت سرعت تولید: یکی از فرض‌های غیرعملی

ساده‌سازی مسئله در بسیاری از پژوهش‌های قبلی، تنظیمات توان خروجی هم‌زمان است؛ اما در شرایط عملی، در خروجی واحد تولید، محدودیت دامنه (اندازه) تغییرات وجود دارد؛ بنابراین، خروجی ژنراتور باید بین حد بالا و پایین اندازه تغییرات باشد. اعمال این کران‌ها محدودیت عملکرد ژنراتور را به‌صورت رابطه (۹) اصلاح می‌کند.

$$\max(P_i^{min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \leq \min_{P_i \in A_{at}}(P_i^{min}, P_i^0 - DR_i) \quad (9)$$

که P_i^0 توان خروجی قبلی واحد i ام و DR_i میزان کاهشی i^9 واحد است [۳].

میزان‌های افزایشی کاهشی: نیروگاه‌های حرارتی به

دلایل فنی نباید به‌صورت آنی توان خود را تغییر دهند و این افزایش یا کاهش باید با شیب ملایمی همراه باشد. به عبارت دیگر، هر نیروگاه محدودیت‌هایی در شیب تغییرات توان تولیدی خود دارد که تجاوز از این محدودیت‌ها ایجاد خسارت به روتور و افزایش هزینه عملکرد را باعث می‌شود. در شرایط واقعی تغییر تولید در هر ساعت از شبانه روز نسبت به ساعت قبل محدودیت‌هایی دارد؛ یعنی محدودیت حداکثر افزایش و یا حداقل تولید در تحلیل سیستم، وارد و به شرایط واقعی نزدیک‌تر خواهد شد. این شرایط با رابطه (۱۰) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} P_{im} - P_{i(m-1)} &\leq UR_i \\ P_{i(m-1)} - P_{im} &\leq DR_i \end{aligned} \quad (10)$$

مقداردهی اولیه: جمعیت اولیه (P) و تاریخچه جمعیت ($oldP$) با توجه به رابطه‌های (۱۲) مقداردهی می‌شوند که U توزیع یکنواخت است و low_j و up_j مرزهای پایین و بالای متغیرها بوده‌اند و i فرد i ام جمعیت است.

$$\begin{aligned} P_{i,j} &\sim U(low_j, up_j) \\ oldP_{i,j} &\sim U(low_j, up_j) \end{aligned} \quad (12)$$

گزینش ۱: در هر تکرار، تاریخچه جمعیت ($oldP$) با توجه به رابطه (۱۳) معرفی می‌شود.

$$\begin{aligned} oldP &= \begin{cases} P & \text{if } (a < b \mid a, b \sim U(0,1)) \\ oldP & \text{otherwise} \end{cases} \\ oldP_{i,j} &:= \text{permuting}(oldP) \end{aligned} \quad (13)$$

جهش: فرم اولیه جمعیت آزمایشی با عملیات جهش از رابطه (۱۴) و با استفاده از مزیت تجربیات نسل‌های قبلی و استفاده از ماتریس جستجوی جهت‌دار F تولید می‌شود. مقدار مشترک F برابر با $3 \cdot randn$ است.

$$M = P + F \cdot (oldP - P) \quad (14)$$

ترکیب: ماتریسی با داده‌های صحیح باینری (نگاشت)، مسیرهای ترکیب‌شده الگوریتم را با رابطه (۱۵) هدایت می‌کند؛ به طوری که افرادی با برازش بهتر برای تکامل افراد جامعه هدف استفاده می‌شوند.

$$V_{i,j} = \begin{cases} P_{i,j} & \text{if } map_{i,j} = 1 \\ M_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

گزینش ۲: جمعیت نسل بعدی با توجه به مکانیسم گزینش حریمانه تولید می‌شود. طبق رابطه (۱۶) اگر برازش V_i نسبت به P_i کوچک‌تر باشد، P_i جایگزین V_i می‌شود.

$$P_i^{next} = \begin{cases} V_i & \text{if } f(V_i) \leq f(P_i) \\ P_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

۳-۲- مراحل اصلی TLBO

الگوریتم TLBO نیز مبتنی بر جمعیت است که آموزش و یادگیری را تقلید می‌کند. دو مرحله اصلی آن عبارت‌اند از: مراحل آموزش‌دهنده و یادگیرنده. در الگوریتم پیشنهادی LBSA از این دو مرحله استفاده شده است. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۶] بیان شده است.

مرحله آموزش‌دهنده: آموزش‌دهنده دانش خود را برای همه یادگیرنده‌ها مانند رابطه (۱۷) در گروه توزیع می‌کند.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + rand(\cdot) \times (X_{teacher} - T_F X_{mean}) \quad (17)$$

که در آن UR_i و DR_i حداکثر افزایش و کاهش تولید نسبت به ساعت قبل نیروگاه i ام، n تعداد نیروگاه‌ها و m ساعتی از شبانه‌روز هستند [۱۹].

منطقه عملیاتی ممنوعه: مناطق عملیاتی (کاری) ممنوعه ژنراتور مناطقی از توان خروجی‌اند که در آن، کارکرد ژنراتور با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و یا ناپایداری محدود شده است. به سبب دشواری تعیین مناطق دقیق ممنوعه، معمولاً از کار در چنین مناطقی ممانعت به عمل می‌آید [۲۲]. مناطق عملیاتی مناسب واحد تولید در توزیع اقتصادی با رابطه‌های (۱۱) به دست می‌آیند.

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l & i = 1, 2, \dots, m \\ P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,j}^l & j = 2, 3, \dots, n_i \\ P_{i,n_i}^u \leq P_i \leq P_i^{max} & \end{cases} \quad (11)$$

که $P_{i,j}^u$ و $P_{i,k}^l$ به ترتیب مرزهای پایین و بالای مناطق ممنوعه، m تعداد واحدهایی که در منطقه ممنوعه‌اند و n_i شماره واحد i ام در منطقه ممنوعه است [۳].

محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه: معیار قابلیت اطمینان و امنیت شبکه که محدودیت‌های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی‌اند، در حل مسئله پخش بار اقتصادی گنجانده نمی‌شوند و بیشتر موارد، این محدودیت‌ها در سایر مطالعات یا برنامه‌ریزی‌ها در نظر گرفته و توزیع اقتصادی بار بدون این محدودیت‌ها حل می‌شود.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA)

دباوچن (Debaochen) و همکارانش، اولین بار در سال ۲۰۱۷ الگوریتم LBSA را برای حل مسائل ریاضی معرفی کردند که یک الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی بر اساس جمعیت است و با استفاده از ترکیب دو روش بهینه‌سازی ردیابی بازگشتی (BSA) و آموزش و یادگیری (TLBO) ساخته شده است.

۳-۱- BSA بنیادی

BSA الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است. پنج مرحله از BSA به شرح زیرند و جزئیات بیشتر آن در مرجع [۱۵] بیان شده است.

پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و با استفاده از الگوریتم ...

$P_{k,j}$ از جامعه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و $M_{i,j}$ بعد از عملگر جهش به کار می‌رود. آموزش‌دهنده و بدترین فرد، بهترین و بدترین موقعیت از نسل حاضرند.

۴- روش حل مسئله پخش بار اقتصادی با

استفاده از LBSA

اجرای الگوریتم LBSA برای حل مسئله پخش بار اقتصادی نشان داده شده در شکل (۲) مراحل زیر را شامل می‌شود:

مقداردهی اولیه الگوریتم: در این مرحله تعداد جمعیت (PopSize) برابر با ۵۰ نفر در نظر گرفته می‌شود. بُعد مسئله (DimSize)، تعداد ژنراتورهای سیستم مطالعه شده است و همچنین شمارنده تکرار الگوریتم معرفی می‌شود.

مقداردهی اولیه مسئله: حداقل و حداکثر توان ژنراتورها (P_{max} , P_{min}), ضرایب تابع هزینه (a_i , b_i و c_i) و ضرایب اثر شیر بخار (h_i و g_i), مقداردهی می‌شوند.

تولید تصادفی جمعیت اولیه (Pop) و تاریخچه جمعیت (OldPop): به صورت تصادفی با اعدادی بین حداقل و حداکثر توان ژنراتورها ساخته می‌شود.

محاسبه اولیه: با توجه به روابط پخش بار اقتصادی حداکثر بار به دست آمده، هزینه و تلفات، محاسبه و به صورت ماتریس ذخیره می‌شود.

همان‌طور که در فلوچارت مشخص است مراحل انتخاب ۱، جهش، ترکیب و انتخاب ۲ با توجه به روابط ارائه شده انجام می‌شوند. پارامترهای کنترل‌کننده مربوط به الگوریتم در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم LBSA

پارامتر	مقدار تنظیم شده
iteration	۵۰
N	۵۰
map	ماتریسی با ابعاد $N \cdot D$ و اعداد صفر و یک که مسیرهای ترکیب الگوریتم را هدایت می‌کند
T_F	ضریب آموزش برای هدایت مقدار میانگین که به صورت ابتکاری روی ۱ یا ۲ تنظیم می‌شود

که $X_{old,i}$ و $X_{new,i}$ موقعیت‌های جدید و قبلی یادگیرنده i و $rand(\bullet)$ عددی تصادفی در بازه $[0,1]$ است. ضریب آموزش T_F , مقدار میانگین را برای تغییر داده شدن تعیین می‌کند و به صورت ابتکاری روی ۱ یا ۲ تنظیم می‌شود که با احتمال برابر با رابطه (۱۸) بیان می‌شود.

$$T_F = rand[1 + rand(0,1)\{2 - 1\}] \quad (18)$$

مرحله یادگیرنده: در هر تکرار، یادگیرنده k ام به صورت تصادفی، هدف یادگیری، یادگیرنده i ام انتخاب می‌شود. روش یادگیری، یادگیرنده i ام به صورت ریاضی با رابطه (۱۹) بیان می‌شود.

$$X_{new,i} = \begin{cases} X_{old,i} + rand(\cdot)(X_{old,i} - X_{old,k}) & \text{if } f(X_{old,i}) < f(X_{old,k}) \\ X_{old,i} + rand(\cdot)(X_{old,k} - X_{old,i}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

که $X_{new,i}$, موقعیت جدید فرد i ام است و $X_{old,i}$ و $X_{old,k}$, موقعیت‌های پیشین i ام و k ام یادگیرنده‌ها هستند. علاوه بر این، اگر برازش $X_{new,i}$ نسبت به $X_{old,i}$ بهتر باشد، $X_{new,i}$ پذیرفته می‌شود.

۳-۳- عملیات جهش در LBSA

برای بهبود توانایی الگوریتم LBSA، هدایت‌کننده‌ای، یادگیری بهترین فرد را در فرآیند جهش الگوریتم با رابطه (۲۰) معرفی می‌کند.

$$M = P + F \cdot (0.5 * (oldP - P) + 0.5 * rand(\cdot) * (Teacher - P)) \quad (20)$$

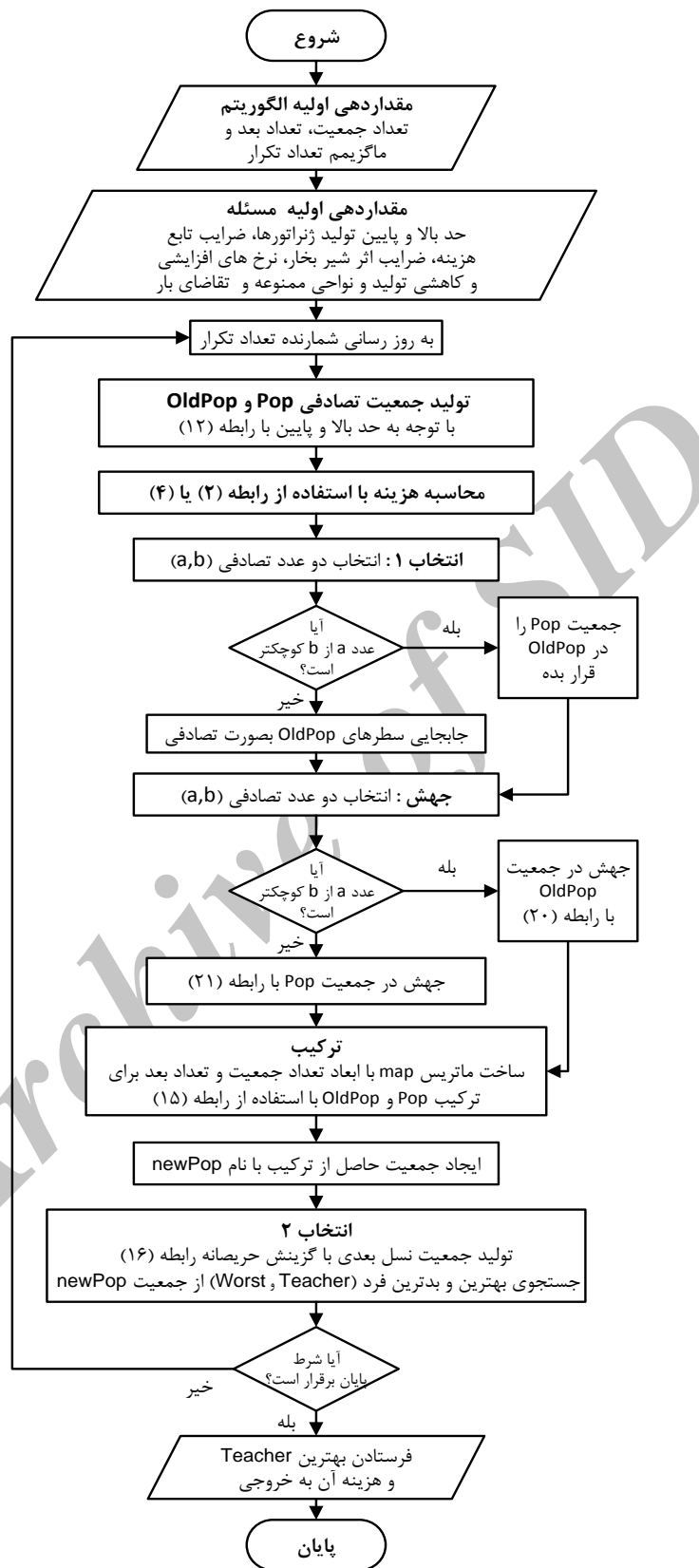
عملیات جهش اصلاح شده به صورت رابطه (۲۱) خلاصه می‌شود:

اگر فرد i ام نسبت به فرد k ام بهتر باشد

$$M_{i,j} = P_{i,j} + rand * (P_{i,j} - P_{k,j}) + rand * (Teacher_{1,j} - P_{i,j}) - rand * (Worst_{1,j} - P_{i,j})$$

در غیر این صورت

$$M_{i,j} = P_{i,j} + rand * (P_{k,j} - P_{i,j}) + rand * (Teacher_{1,j} - P_{i,j}) - rand * (Worst_{1,j} - P_{i,j}) \quad (21)$$



شکل (۲): فلوچارت اجرای LBSA برای پخش بار اقتصادی

جدول (۳): میزان افزایشی، کاهشی و نواحی ممنوع * [۱۳،۲۲]

Unit	P_i^0	URi	DRi	Prohibited Zones
۱	۴۴۰	۸۰	۱۲۰	[۲۱۰ ۲۴۰] [۳۵۰ ۳۸۰]
۲	۱۷۰	۵۰	۹۰	[۹۰ ۱۱۰] [۱۴۰ ۱۶۰]
۳	۲۰۰	۶۵	۱۰۰	[۱۵۰ ۱۷۰] [۲۱۰ ۲۴۰]
۴	۱۵۰	۵۰	۹۰	[۸۰ ۹۰] [۱۱۰ ۱۱۵]
۵	۱۹۰	۵۰	۹۰	[۹۰ ۱۱۰] [۱۴۰ ۱۵۰]
۶	۱۱۰	۵۰	۹۰	[۷۵ ۸۵] [۱۰۰ ۱۰۵]

* در جدول‌های (۲ و ۳) توان بر حسب (MW)، ضریب a_i بر حسب $(\$/MW^2)$ ، b_i بر حسب $(\$/MW)$ و c_i بر حسب (\$) است.

شبیه‌سازی برای سیستم ۶ واحد با استفاده از الگوریتم پیشنهادی LBSA انجام شد. نتایج عددی این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴) دیده می‌شود. این نتایج با روش بهینه‌سازی θ -PSO [۳]، الگوریتم بهبودیافته کلونی زنبورعسل (IABC) [۴] و الگوریتم خفش بی‌نظم (Bat.A) [۱۳] مقایسه شد که در جدول (۴) آورده شده‌اند. در شکل (۴) نیز توان تلف‌شده و هزینه نهایی سیستم مطالعه‌شده در این الگوریتم‌ها مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف روی سیستم مورد مطالعه اول (۶ واحد) *

Unit	θ PSO [3]	IABC [4]	Bat.A [13]	LBSA
P1	۴۴۷۳۵۵	۴۴۰۶۵۷	۴۴۷/۴۱۸	۴۵۱/۷۷۱
P2	۱۷۳/۲۵۷	۱۸۶/۶۶۷	۱۷۲/۸۲۵	۱۶۳/۸۹۹
P3	۲۶۳/۳۸۴	۲۵۴/۱۰۱	۲۶۴/۰۷۵	۲۷۰/۷۱۹
P4	۱۳۹/۰۴۴	۱۲۵/۱۶۱	۱۳۹/۲۴۶	۱۱۷/۲۵۸
P5	۱۶۵/۳۳۱	۱۵۳/۱۴۱	۱۶۵/۶۵۲	۱۷۲/۳۸۴
P6	۸۷/۰۵۹	۱۰۳/۴۵۸	۸۹/۷۶۵	۸۷/۱۶۰
P_T	۱۲۷۵/۴۳	۱۲۶۳/۱۸	۱۲۷۸/۹۸	۱۲۶۳/۱۹۴
P_L	۱۲/۴۴۲۹	۰/۱۸	۱۵/۹۸۴	۰/۱۹۴۴
Min Cost	۱۵۴۴۲/۹	۱۵۲۵۷/۶	۱۵۴۵۰/۲	۱۵۲۸۰/۲
Mean Cost	۱۵۴۴۲/۹	۱۵۲۹۹/۳	۱۵۴۵۴/۷	۱۵۲۹۰/۸
Max Cost	۱۵۴۴۲/۹	۱۵۳۹۸/۷	۱۵۵۱۸/۶	۱۵۳۰۷/۵
Time (S)	۵/۴۴۲۹	۰/۰۴۳۸	۰/۷۰۴	۰/۵۰

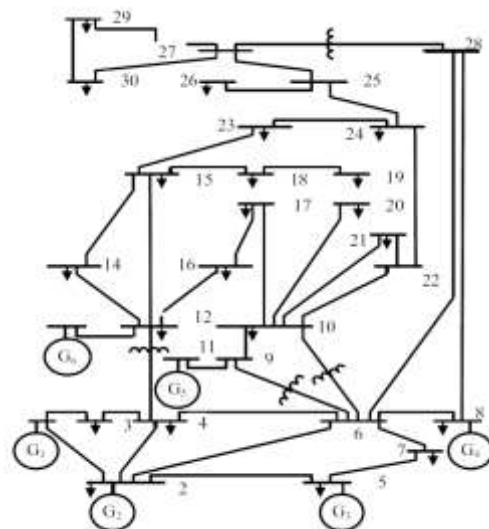
* در این جدول هزینه‌ها بر حسب $(\$/h)$ ، همه توان‌ها بر حسب (MW) و زمان بر حسب Second است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی امکان‌پذیری و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، حل مسئله پخش بار اقتصادی، روی سیستم آزمایشی ۶ واحد و سیستم IEEE 30-BUS اصلاح و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف در MATLAB R2014a اجرا شده است.

۵-۱- سیستم مطالعه‌شده اول

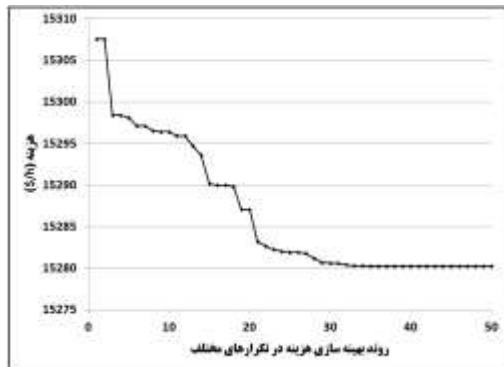
سیستم شامل ۳۰ شین، ۴۶ خط انتقال و ۶ واحد تولید حرارتی است که کل تقاضای بار سیستم برابر با ۱۲۶۳ مگاوات است. ضرایب تابع هزینه، حدود واحدهای تولیدی، میزان‌های افزایشی و کاهشی و نواحی ممنوعه سیستم در جداول (۳،۲) و شیوه اتصال شبکه و دیاگرام تک‌خطی برای این سیستم در شکل (۳) نشان داده شده‌اند [۱۳،۲۲].



شکل (۳): دیاگرام تک‌خطی سیستم ۶ نیروگاهی [۴]

جدول (۲): ضرایب هزینه و حدود واحدها * [۱۳،۲۲]

Unit	P_{min}	P_{max}	a_i	b_i	c_i
۱	۱۰۰	۵۰۰	۰/۰۰۷۰	۷/۰	۲۴۰
۲	۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۹۵	۱۰/۰	۲۰۰
۳	۸۰	۳۰۰	۰/۰۰۹۰	۸/۵	۲۲۰
۴	۵۰	۱۵۰	۰/۰۰۹۰	۱۱/۰	۲۰۰
۵	۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۸۰	۱۱/۵	۲۲۰
۶	۵۰	۱۲۰	۰/۰۰۷۵	۱۲/۰	۱۹۰



شکل (۵): روند بهینه‌سازی هزینه در تکرارهای مختلف برای سیستم مطالعه‌شده اول

۵-۲- سیستم مطالعه‌شده دوم

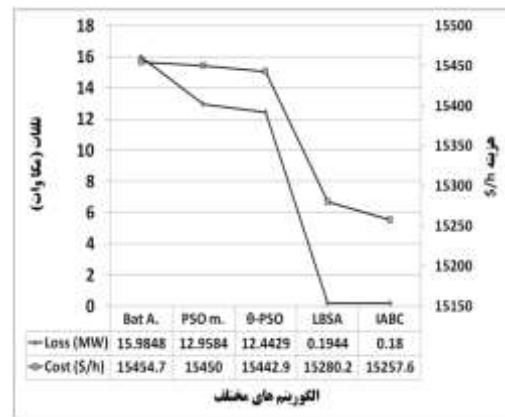
سیستم مطالعه‌شده دوم، سیستم IEEE 30-BUS اصلاح‌شده است که ژنراتورهای آن شامل سه واحد سوخت زغالی، دو واحد سوخت گازی، یک واحد سوخت نفتی و دو واحد توربین بادی است. ضرایب تابع هزینه و حدود واحدهای تولیدی سیستم در جدول (۵) مشخص است [۲۳،۲]. شیوه اتصال و دیاگرام تک‌خطی سیستم مطالعه‌شده دوم نیز در شکل (۶) نشان داده شده است [۲۳].

شبیه‌سازی این سیستم بدون در نظر گرفتن ژنراتورهای بادی، برای تقاضای بارهای ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ مگاوات با محدودیت شیر بخار انجام شده است که بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده در جدول (۶) آورده شده‌اند.

در شکل (۷) روند بهینه‌سازی در تکرارهای مختلف برای این مورد مطالعه نشان داده شده است که با توجه به جواب به‌دست‌آمده روند صحیح بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

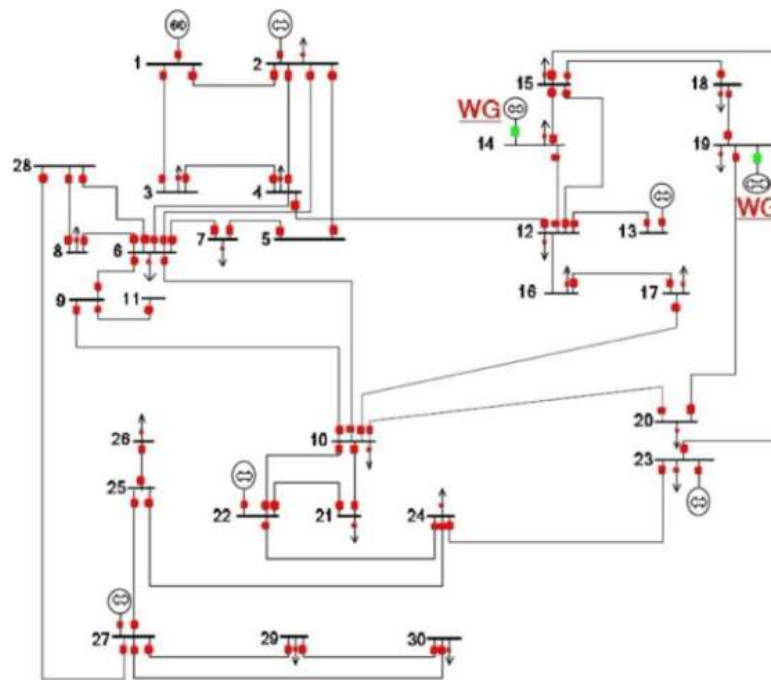
نتایج به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی با روش‌های بهینه‌سازی انتشار ذرات^{۲۰} (DPO)، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی^{۲۱} (GABC) و الگوریتم ذرات کوانتومی الهام‌بخش^{۲۲} (QPSO) که همین سیستم را مطالعه کرده [۲]، مقایسه شده‌اند. روش DPO بدون اثر شیر بخار و روش‌های GABC و QPSO با در نظر گرفتن اثر شیر بخار، شبیه‌سازی شده‌اند.

با توجه به شکل (۴) و جدول (۴)، هزینه نهایی در روش LBSA نسبت به روش Bat Algorithm در حدود ۱۷۴ واحد، کاهش و نسبت به الگوریتم θ PSO در حدود ۱۶۲ واحد کاهش داشته است؛ اما نسبت به روش IABC حدود ۲۲ واحد افزایش داشته است. همچنین مقدار تلفات نهایی برای الگوریتم LBSA در مقایسه با بهترین جواب از سایر الگوریتم‌های مربوط به الگوریتم IABC و مقدار آن ۰/۱۸ مگاوات است؛ حدود ۰/۱۴۴ واحد افزایش داشته است. گفتنی است در تعداد دفعات شبیه‌سازی، همواره تلفات در روش LBSA، کمتر از یک واحد به‌دست‌آمده است که یکی از مزیت‌های الگوریتم پیشنهادی خواهد بود. با توجه به جدول (۴)، زمان لازم برای به نتیجه رسیدن نهایی در الگوریتم پیشنهادی، کمتر از یک ثانیه است که بعد از روش IABC در رتبه دوم قرار دارد. روند بهینه‌سازی این سیستم در شکل (۵) نشان داده شده است که روند صحیح بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند روش پیشنهادی برای این مطالعه‌شده، روش کارآمد و سریعی است و جواب‌هایی درخور مقایسه با سایر الگوریتم‌های مشابه به دست می‌آورد.

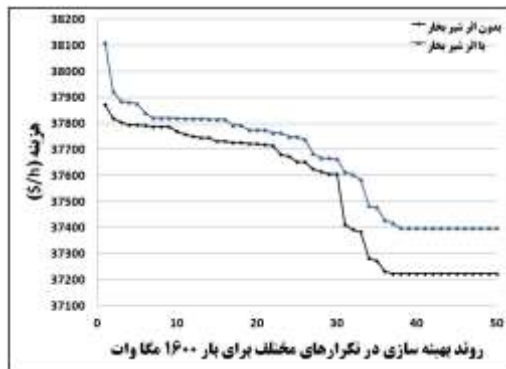


شکل (۴): نمودار مقایسه‌ای هزینه نهایی و توان تلف‌شده بین الگوریتم‌های مختلف روی سیستم مطالعه‌شده اول

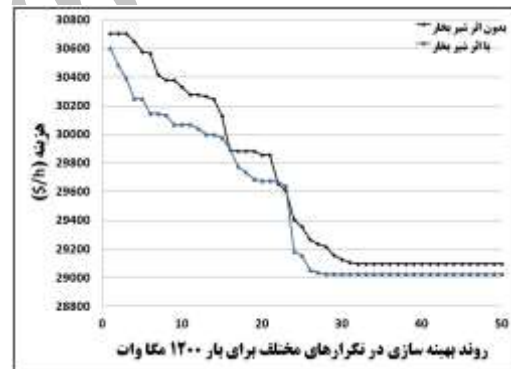
پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و با استفاده از الگوریتم ...



شکل (۶): دیاگرام تک‌خطی و شیوه اتصال سیستم 30-BUS IEEE اصلاح شده [۲۳]



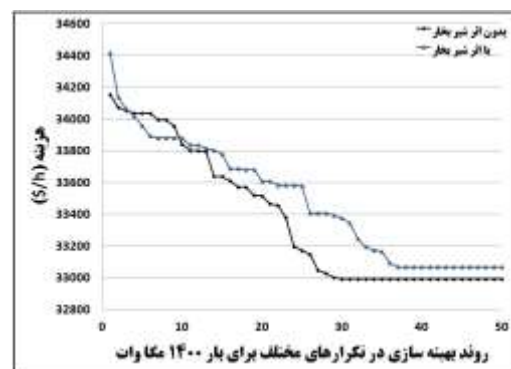
(ج)



(الف)

شکل (۷): روند بهینه‌سازی هزینه در تکرارهای مختلف برای سیستم مطالعه‌شده دوم در دو حالت با و بدون اثر شیر بخار در بارهای (الف) ۱۲۰۰ مگاوات (ب) ۱۴۰۰ مگاوات (ج) ۱۶۰۰ مگاوات

بار ۱۲۰۰ مگاوات: جدول (۷) نتایج شبیه‌سازی را در بار درخواستی ۱۲۰۰ مگاوات نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن اثر شیر بخار، هزینه در الگوریتم پیشنهادی، نسبت به الگوریتم GABC و QPSO در حدود ۵۲ و ۴۶ واحد کاهش داشته است. بدون اثر شیر بخار نیز در حدود ۶۲ واحد کاهش نسبت به الگوریتم DPO وجود دارد.



(ب)

بار ۱۶۰۰ مگاوات: با توجه به جدول (۹)، نتیجه می‌گیریم در بار درخواستی ۱۶۰۰ مگاوات، نیز الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها به دست آورده است.

بررسی شبیه‌سازی از نظر زمان محاسبات فقط با روش DPO مقایسه می‌شود؛ زیرا اطلاعاتی دربارهٔ زمان شبیه‌سازی برای الگوریتم GABC و QPSO در منبع [۲] که از اطلاعات آن استفاده شده، موجود نبوده است.

با توجه به زمان انجام شبیه‌سازی در همه حالت‌ها، با در نظر گرفتن اثر شیر بخار یا بدون این اثر و در بارهای ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۶۰۰ مگاوات با توجه به جدول‌های (۵)، (۶) و (۷) مشخص است که عملکرد الگوریتم پیشنهادی از نظر زمانی در حدود ۱ ثانیه بهتر از روش DPO بوده است.

در این شبیه‌سازی توان تلف‌شده در حالتی که اثر شیر بخار در نظر گرفته شده، برای هر دو الگوریتم GABC و QPSO مقدار صفر به دست آمده است و در حالتی که اثر شیر بخار در نظر گرفته نشده، در الگوریتم DPO مقدار ۰/۳۵ مگاوات است که در هر دو حالت در روش LBSA نسبت به الگوریتم‌های مقایسه‌شده با اینکه افزایش را نشان می‌دهد، این افزایش کمتر از ۴ واحد است.

بار ۱۴۰۰ مگاوات: جدول (۸) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی را در بار درخواستی ۱۴۰۰ مگاوات نشان می‌دهد. در اینجا نیز الگوریتم پیشنهادی نتایج بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها به دست آورده است.

جدول (۵): ضرایب هزینه و حدود واحدهای تولیدی سیستم IEEE 30-BUS اصلاح شده [۲۰۲۳]

Unit (BUS)	Type	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/MW ²)	b_i (\$/MM)	c_i (\$)	g_i (\$)	h_i (\$)
G ۱ (۰۱)	Coal	۲۰	۱۱۰	۰/۰۰۲۰	۱۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۰/۰۸
G ۲ (۰۲)	Coal	۲۰	۱۰۰	۰/۰۰۲۵	۱۵	۲۵۰۰	۳۰۰	۰/۰۴
G ۳ (۱۳)	Coal	۱۲۰	۶۰۰	۰/۰۰۱۸	۹	۶۰۰۰	۴۰۰	۰/۰۴
G ۴ (۲۲)	Gas	۱۱۰	۵۲۰	۰/۰۰۳۱۵	۱۸	۹۲۳/۴	۱۵۰	۰/۰۶
G ۵ (۲۳)	Gas	۱۱۰	۵۰۰	۰/۰۰۳۲	۲۰	۹۵۰	۱۰۰	۰/۰۸
G ۶ (۲۷)	Oil	۴۰	۲۰۰	۰/۰۰۳۴۳۲	۲۳/۴	۱۲۴/۸	۸۰	۰/۱۰
G ۷ (۱۴)	Wind	۰	۹۰	۰	۰	۰	۰	۰
G ۸ (۱۹)	Wind	۰	۶۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول (۶): نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی الگوریتم LBSA روی سیستم مطالعه شدهٔ دوم (IEEE 30-BUS اصلاح شده)

Unit	بدون اثر شیر بخار			با در نظر گرفتن اثر شیر بخار		
	۱۲۰۰ MW	۱۴۰۰ MW	۱۶۰۰ MW	۱۲۰۰ MW	۱۴۰۰ MW	۱۶۰۰ MW
P _۱ (MW)	۱۰۷/۲۵۹۷	۱۰۹/۵۴۳۸	۱۰۸/۰۶۱۳	۱۰۷/۲۲۸۳	۱۰۹/۰۸۷۶	۱۰۶/۰۹۰۳
P _۲ (MW)	۹۴/۵۸۵۰	۹۸/۵۱۷۵	۹۸/۲۹۸۹	۹۴/۷۵۴۱	۹۹/۵۱۹۸	۹۸/۴۶۷۳
P _۳ (MW)	۵۹۸/۸۴۹۰	۵۹۸/۵۰۴۹	۵۹۹/۷۰۳۹	۵۹۹/۴۵۱۵	۵۹۷/۸۶۰۴	۵۹۸/۴۱۸۵
P _۴ (MW)	۲۲۷/۱۹۲۸	۴۰۵/۲۷۴۸	۴۸۴/۱۹۳۳	۲۴۸/۱۴۱۶	۴۳۲/۱۱۵۴	۴۸۵/۶۳۵۵
P _۵ (MW)	۱۲۴/۷۶۱۴	۱۴۵/۱۴۰۷	۲۶۳/۱۰۹۱	۱۱۲/۳۵۲۵	۱۱۷/۷۸۶۳	۲۶۷/۷۶۴۹
P _۶ (MW)	۴۹/۱۱۶۵	۴۴/۹۲۶۲	۴۸/۳۴۷۷	۴۰/۷۶۹۴	۴۴/۲۰۰۳	۴۵/۸۱۹۲
Total Power (MW)	۱۲۰۱/۷۶۴۵	۱۴۰۱/۹۰۷۹	۱۶۰۱/۷۱۴۲	۱۲۰۳/۶۹۷۵	۱۴۰۰/۵۶۹۸	۱۶۰۲/۱۹۵۶
$\sum P_i - P_D$ (MW)	۱/۷۶۴۵	۱/۹۰۷۹	۱/۷۱۴۲	۳/۶۹۷۵	۰/۵۶۹۸	۲/۱۹۵۶
Min Cost (\$/h)	۲۹۰۲۴/۸۱۱۲	۳۲۹۹۱/۷۳۴۲	۳۷۲۲۲/۵۴۳۰	۲۹۰۹۵/۹۰۷۸	۳۳۰۶۶/۹۹۶۵	۳۷۳۹۴/۹۱۱۲
CPU Time (S)	۱۱/۷۷	۱۰/۵۹	۱۱/۹۲	۳۵/۶۲	۴۴/۸۵	۱۱/۶۰

پخش بار اقتصادی نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و با استفاده از الگوریتم ...

جدول (۷): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف روی سیستم مطالعه‌شده دوم برای بار 1200MW

Unit	بدون اثر شیر بخار		با در نظر گرفتن اثر شیر بخار		
	DPO [۲]	LBSA	QPSO [۲]	GABC [۲]	LBSA
P1 (MW)	۱۰۲/۱۲	۱۰۷/۲۵۹۷	۱۰۷/۷۳	۹۸/۶۵	۱۰۷/۲۲۸۳
P2 (MW)	۹۶/۲۶	۹۴/۵۸۵۰	۹۹/۹۲	۹۹/۸۹	۹۴/۷۵۴۱
P3 (MW)	۵۹۶/۹۷	۵۹۸/۸۴۹۰	۵۸۲/۵۴	۵۹۲/۱۴	۵۹۹/۴۵۱۵
P4 (MW)	۱۹۳/۷۱	۲۲۷/۱۹۲۸	۲۵۹/۰۳	۲۵۹/۳۲	۲۴۸/۱۴۱۶
P5 (MW)	۱۷۰/۹۸	۱۲۴/۷۶۱۴	۱۱۰/۴۲	۱۱۰	۱۱۲/۳۲۲۵
P6 (MW)	۴۰/۳۱	۴۹/۱۱۶۵	۴۰/۳۶	۴۰	۴۰/۷۶۹۴
Total P. (MW)	۱۲۰۰/۳۵	۱۲۰۱/۷۶۴۵	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۳/۶۹۷۵
$\sum P_i - P_D$ (MW)	۰/۳۵	۱/۷۶۴۵	۰	۰	۳/۶۹۷۵
Min Cost (\$/h)	۲۹۰۸۶۷۹	۲۹۰۲۴/۸۱۱۲	۲۹۵۵۵/۷۲	۲۹۱۴۷/۰۰	۲۹۰۹۵/۹۰۷۸
CPU Time (S)	۱۱/۷۹۴	۱۱/۷۷	-	-	۳۵/۶۲

جدول (۸): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف روی سیستم مطالعه‌شده دوم برای بار 1400MW

Unit	بدون اثر شیر بخار		با در نظر گرفتن اثر شیر بخار		
	DPO [۲]	LBSA	QPSO [۲]	GABC [۲]	LBSA
P1 (MW)	۱۰۸/۹۹	۱۰۹/۵۴۳۸	۱۰۸/۶۰	۹۹/۰۹	۱۰۹/۰۸۷۶
P2 (MW)	۹۹/۶۱	۹۸/۵۱۷۵	۹۹/۶۳	۹۸/۷۶	۹۹/۵۱۹۸
P3 (MW)	۵۹۷/۹۶	۵۹۸/۵۰۴۹	۵۸۸/۷۳	۵۹۱/۴۶	۵۹۷/۸۶۰۴
P4 (MW)	۳۲۲/۶۵	۴۰۵/۲۷۴۸	۴۱۶/۱۶	۴۱۹/۲۴	۴۳۲/۱۱۵۴
P5 (MW)	۲۲۸/۹۵	۱۴۵/۱۴۰۷	۱۴۶/۸۶	۱۵۱/۴۵	۱۱۷/۷۸۶۳
P6 (MW)	۴۱/۸۸	۴۴/۹۲۶۲	۴۰/۰۱	۴۰	۴۴/۲۰۰۳
Total P. (MW)	۱۴۰۰/۰۴	۱۴۰۱/۹۰۷۹	۱۳۹۹/۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۰/۵۶۹۸
$\sum P_i - P_D$ (MW)	۰/۰۴	۱/۹۰۷۹	-۰/۰۱	۰	۰/۵۶۹۸
Min Cost (\$/h)	۳۳۰۲۲/۹۰	۳۲۹۹۱/۷۳۴۲	۳۳۶۸۶/۸۰	۳۳۱۸۷/۰۰	۳۳۰۶۶/۹۹۶۵
CPU Time (S)	۱۲/۰۸۹	۱۰/۵۹	-	-	۴۴/۸۵

جدول (۹): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف روی سیستم مطالعه‌شده دوم برای بار 1600MW

Unit	بدون اثر شیر بخار		با در نظر گرفتن اثر شیر بخار		
	DPO [۲]	LBSA	QPSO [۲]	GABC [۲]	LBSA
P1 (MW)	۱۰۹/۹۸	۱۰۸/۰۶۱۳	۱۰۹/۹۴	۱۱۰/۰۰	۱۰۶/۰۹۰۳
P2 (MW)	۹۷/۲۷	۹۸/۲۹۸۹	۹۹/۳۴	۱۱۰/۰۰	۹۸/۴۶۷۳
P3 (MW)	۵۹۹/۴۸	۵۹۹/۷۰۳۹	۵۷۸/۷۸	۵۹۹/۹۳	۵۹۸/۴۱۸۵
P4 (MW)	۴۲۸/۷۲	۴۸۴/۱۹۳۳	۵۰۹/۳۴	۴۷۷/۱۱	۴۸۵/۶۳۵۵
P5 (MW)	۲۹۱/۲۱	۲۶۳/۱۰۹۱	۲۵۹/۷۲	۲۷۲/۹۶	۲۶۷/۷۶۴۹
P6 (MW)	۷۲/۷۲	۴۸/۳۴۷۷	۴۲/۸۸	۴۰/۰۰	۴۵/۸۱۹۲
Total P. (MW)	۱۵۹۹/۳۸	۱۶۰۱/۷۱۴۲	۱۶۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۲/۱۹۵۶
$\sum P_i - P_D$ (MW)	-۰/۶۲	۱/۷۱۴۲	۰	۰	۲/۱۹۵۶
Min Cost (\$/h)	۳۷۲۵۳/۱۳	۳۷۲۲۲/۵۴۳۰	۳۷۸۴۱/۸۸	۳۷۵۰۲/۰۰	۳۷۳۹۴/۹۱۱۲
Mean Cost (\$/h)	-	۳۷۶۹۷/۲۹۹۱	-	-	۳۷۷۹۹/۷۸۰
Max Cost (\$/h)	-	۳۷۸۷۱/۵۴۷۰	-	-	۳۸۱۱۰/۲۲۷۰
CPU Time (S)	۱۱/۹۷۶	۱۱/۹۲	-	-	۱۱/۶۰

۶- نتیجه گیری

الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت و الگوریتم‌های فراابتکاری، در سال‌های اخیر به کانونی در محاسبات بهینه‌سازی تبدیل شده‌اند. این مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید، به نام الگوریتم بهینه‌سازی یادگیری ردیابی بازگشتی (LBSA) را مطرح کرده است و به کمک آن، مسئلهٔ پخش بار اقتصادی برای سیستم‌های ۶ واحد و 30-BUS IEEE اصلاح‌شده، با محدودیت‌های مشخص، حل شده است تا کارایی الگوریتم را بررسی و عملکردش را با تکنیک‌های به‌تازگی چاپ‌شده، آزمایش و بررسی کند.

در حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نشان داده است و هزینهٔ نهایی و تلفات توان به‌دست‌آمده از این روش، نسبت به روش‌های مشابه، بهتر، سریع‌تر و پذیرفتنی بوده است؛ اما الگوریتم پیشنهادی معایبی نیز دارد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، مشاهده می‌شود تعداد تکرارهای الگوریتم پیشنهادی، روند منظمی ندارند. به نظر می‌رسد دلیل این مشکل، انتخاب‌های تصادفی جمعیت اولیه مربوط به الگوریتم است. زمانی که جمعیت تصادفی اولیه مناسب باشد، بهینه‌سازی با تعداد تکرارهای کم و در زمان کوتاهی به نتیجه می‌رسد. زمانی که جمعیت اولیه مناسب نباشد با اینکه جواب پذیرفتنی به دست می‌آید، گاهی با تعداد تکرارهای زیاد نیز جواب بهینه‌تری به دست نمی‌آید. اما به‌طورکلی با توجه به نتایج شبیه‌سازی و آماری موجود در این پژوهش، برای حل مسئله پخش بار اقتصادی، الگوریتم LBSA، نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها ارائه می‌دهد.

مراجع

- [4] Ghasemi Marzbali A, Seyd Shenava SJ, Bazyar R, Abedi Niya O, Yosefi A, GholamAli Tabar H, "Economic load dispatch solution using improved ABC procedure Considering nonlinear Constraints" ,Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, Vol. 1, No 1, pp. 1-9, 2012.
- [5] Chen CL, Wang SC, "Branch and bound scheduling for thermal generating units", IEEE Trans Energy Convers, Vol. 8, No. 2, pp. 184-189, 1993.
- [6] Lee KY, Park YM, Ortiz JL, "Fuel cost minimization for both real and reactive power dispatches", IEE Proc C Gener Transm Distrib, Vol. 131, No. 3, pp. 85-93, 1984.
- [7] Chiang C-L, "Genetic-based algorithm for power economic load dispatch", IET Gener Trans Distrib, Vol. 1, No. 2, pp. 261-269, 2007.
- [8] Basu M, "Artificial bee colony optimization for multi-area economic dispatch", Int J Electr Power Energy Syst, Vol. 49, pp. 181-187, 2013.
- [9] Hemamalini S, Simon SP, "Artificial bee colony algorithm for economic load dispatch problem with non-smooth cost functions", Electric Power Compon Syst, Vol. 38, No. 7, pp. 786-803, 2010.
- [10] Kennedy J, Eberhart R, "Particle swarm optimization", Proceedings of the IEEE international conference neural networks, pp. 1942-8, 1995.
- [11] Yang X-S, Hosseini SSS, Gandomi AH, "Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect", Appl Soft Comput, Vol. 12, No. 3, pp. 1180-1186, 2012.
- [12] Pothiya S, Ngamroo I, Kongprawechnon W, "Ant colony optimisation foreconomic dispatch problem with non-smooth cost functions", Int J Electr Power Energy Syst, Vol. 32, No. 5, pp. 478-87, 2010.
- [13] B.R. Adarsh, T. Raghunathan, T. Jayabarathi, Xin-She Yang, "Economic dispatch using chaotic bat algorithm", Energy, Vol. 96, pp. 666-75, 2016.
- [14] Chiang C-L, "Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels", IEEE Trans Power Syst, Vol. 20, No. 4, pp. 1690-1699, 2005.
- [15] Civicioglu P, "Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems", Appl. Math. Comput, Vol. 219, No. 15, pp. 8121-8144, 2013.
- [16] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia DP, "Teaching learning based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems", Inf. Sci, Vol. 183, No. 1, pp. 1-15, 2012.
- [17] Debao Chen, Feng Zou, Renquan Lu, Peng Wang, "Learning backtracking search optimisation algorithm and its application", Information Sciences, Vol. 376, pp. 71-94, 2017.
- [18] H. Amiri, A.R. Hatami, A. Deihimi, "Solving Bid-based Environmental-Dynamic Economic Dispatch Using a Hybrid Algorithm Based on Bacterial Foraging and Differential Evolution Algorithm", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 1-14, September 2016.
- [19] R. Hooshmand, M. Parastegari, "Application of PSO Algorithm in Economic and Emission Dispatch
- [1] Wood AJ, Wollenberg BF, "Power generation, operation and control", New York: John Wiley & Sons Press, 1984.
- [2] Li Han, Carlos E. Romero, Zheng Yao, "Economic dispatch optimization algorithm based on particle diffusion", Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 1251-1260, 2015.
- [3] Hosseinnezhad, Babaei, "Economic load dispatch using Theta-PSO", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 49, pp. 160-169, 2013.

- effects", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 13-26, Spring 2014.
- [22] Gaing ZL, "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints", IEEE Trans Power Syst, Vol. 18, No. 3, pp. 1187-1195, 2003.
- [23] Yao F, Dong ZY, Meng K, Xu Z, Iu HH, Wong KP, "Quantum-inspired particle swarm optimization for power system operations considering wind power uncertainty and carbon tax in Australia", IEEE Trans Ind Inform, Vol. 8, No. 4, pp. 880-888, 2012.
- with Non-Smooth Cost Functions by Considering Transmission Losses and System Constraints", Journal of Electrical and Computer Engineering of Iran, Vol. 6, No. 3, pp. 191-198, 2008.
- [20] Walters DC, Sheble GB, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading", IEEE Trans Power Syst, Vol. 8, No. 3, pp. 1325-1332, 1993.
- [21] E. Afzalan, M. Jorabian, "A hybrid Bacterial Foraging Optimization Algorithm and sequential quadratic programming method for dynamic economic dispatch considering the valve-point

¹ Economic Dispatching

² Lambda iteration method

³ Base point and Participation factors method

⁴ The Gradient method

⁵ Genetic Algorithm

⁶ Particle Diffusion

⁷ Artificial Bee Colony Optimization

⁸ Particle Swarm Optimization

⁹ Firefly Algorithm

¹⁰ Ant Colony Optimisation

¹¹ Chaotic Bat Algorithm

¹² Improved Genetic Algorithm

¹³ Teta-Particle Swarm Optimization

¹⁴ Improved Artificial Bee Colony Optimization

¹⁵ Backtracking Search Algorithm

¹⁶ Evolutionary Algorithms (EA)

¹⁷ Teaching-Learning Based Optimization (TLBO)

¹⁸ Learning Backtracking Search Algorithm (LBSA)

¹⁹ Up-Ramp And Ramp-Down Limits

²⁰ Diffusion Particle Optimization

²¹ Gbest Guided Artificial Bee Colony Algorithm

²² Quantum-Inspired Particle Swarm Optimization