

## توزیع اقتصادی دینامیکی توان در سیستم قدرت با الگوریتم توسعه یافته جستجوی هارمونی

مهدی نوشیار<sup>۱</sup>، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - nooshyar@uma.ac.ir

**چکیده:** تأمین تقاضای انرژی برای مشترکین با در نظر گرفتن حداقل هزینه تولید، از مهم‌ترین چالش‌های موجود در تحقیقات اخیر است. به عبارتی دیگر، تأمین توان با حداقل نمودن هزینه‌های تولید و برقراری قیدهای وارد بر آن هست. به دلیل ماهیت غیرخطی و پیچیدگی ذاتی موجود در این مسئله، حل آن با روش‌های ریاضی مستلزم محاسبات زیاد خواهد بود. به همین دلیل در این مقاله ابتدا به مدل‌سازی مسئله توزیع اقتصادی دینامیکی توان برای طول یک شبانه‌روز (۲۴ ساعت) با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی از جمله، نرخ شیب افزایشی-کاهشی، تابع هزینه ناصاف با در نظر گرفتن اثر شیر ورودی، حداکثر و حداقل توان، مناطق ممنوعه تولید و غیره پرداخته شده است و سپس به کمک الگوریتم بهبود یافته جستجوی هارمونی حل شده است. به منظور ارتقای الگوریتم جستجوی هارمونی، در روش پیشنهادی از نظریه آشوب و عملگر تقاطع به اصلاح جستجوی محلی و کلی بهره گرفته شده است. در نهایت، کارایی روش پیشنهادی بر سیستم‌های استاندارد موجود سایر مقالات اعمال و نتایج حاصل از آن با روش‌های موجود مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی، نشان از کارایی قابل قبول روش پیشنهادی در حل مسئله غیرخطی پیشنهادی مانند توزیع دینامیکی توان دارد. همچنین، نتایج به دست آمده از الگوریتم بهبود یافته جستجوی هارمونی بر روی توابع آزمون استاندارد نشان از بهبود جستجوی محلی و نهایی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهبود یافته جستجوی هارمونی، قیدهای غیرخطی، تابع هزینه نامحدوب، بهینه‌سازی، مسئله توزیع دینامیکی توان.

## Dynamic Economic Dispatch in Power System by Modified Harmony Search Algorithm

M. Nooshyar<sup>1</sup>, Associate Professor

1- Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: nooshyar@uma.ac.ir

**Abstract:** Supply of energy with minimum production cost as view of consumer's payment is the most important challenge in recent researches. In other words, power supply during a day (24h) in the least costs, while satisfy the power system constraints is main aim of this paper. Since the dynamic economic dispatch (DED) had inherent nonlinearity therefore it makes a quite complexity inherent for the mathematical methods to solve it as view of computational burden. In this regard, we models dynamic economic load dispatch during a day with available constrains such as valve point effect, power system bound, ramp-rate constraints and etc and propose a new Modified Harmony Search Algorithm (MHSA) to solve it. In the proposed algorithm employ Chaos theory and local/global operators to improve search ability of original harmony search algorithm. At last, the proposed method assesses on available standard test systems compare to other existing methods. The results of the proposed method show acceptable performance in solving of nonlinear problem such as dynamic economic dispatch (DED). Also, the obtained results of the improved harmony search algorithm from test function show acceptable improvement in local search and global parts.

**Key words:** Modified harmony search algorithm, nonlinear constrains, valve point, optimization, DED problem.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۶ و ۱۳۹۵/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۴

نام نویسنده مسئول: مهدی نوشیار

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - انتهای خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی و مهندسی.

## ۱- مقدمه

و غیرخطی پیشنهاد شده است. برنامه‌ریزی خطی سریع و قابل اطمینان است؛ اما این روش توابع هزینه را به صورت تکه‌ای تقریب می‌زند. بنابراین، نمی‌توان از بهینه بودن جواب خروجی آن مطمئن بود. در برنامه‌ریزی غیرخطی نیز مشکل پیچیدگی و همگرایی وجود دارد. برنامه‌ریزی پویا در [۷] برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار پیشنهاد شده است. این روش اگرچه قادر به حل یک سری مسائل توزیع اقتصادی بار خواهد بود، در مسائل با ابعاد بزرگ قادر به حل نیست و یا به زمان زیادی برای رسیدن به جواب نیازمند است. روش‌هایی از قبیل روش لاگرانژ نیز معرفی شده‌اند که پایه کار آن‌ها بر اساس مشتق‌گیری است [۸]. این روش‌ها برای در نظر گرفتن قیود عملی نیروگاه‌ها از قبیل نرخ افزایشی، ناحیه‌های ممنوعه و اثر شیر بخار به دلیل ماهیت مشتق ناپذیری آن‌ها، ناتوان هستند. به طور کلی، ماهیت ریاضی مدل مسئله باعث شده است که روش‌های تحلیلی ریاضی نتوانند قادر به حل این مسائل باشند.

دسته دوم در حقیقت یک راه‌حل برای غلبه بر این مشکل بوده که شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. با استفاده از این الگوریتم‌ها علاوه بر دستیابی به جواب بهینه، زمان و ابعاد حل مسئله تقریباً به صورت خطی با تعداد واحدها افزایش می‌یابد که با وجود رایانه‌های امروزی، انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار است. در [۹]، از یک الگوریتم بهینه‌سازی توسعه‌یافته مبتنی بر آموزش معلم و دانش‌آموز برای حل مسئله توزیع اقتصادی توان استفاده شده است. در این روش علاوه بر توسعه الگوریتم پیشنهادی بر اساس جستجوی کلی اثر سیستم ذخیره انرژی در مسئله بهینه دینامیکی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در [۱۰]، به انجام تجزیه و تحلیل دینامیکی توان و برای حل مشکل اقتصادی بار با استفاده از توزیع بهینه توان ( $OPF^1$ ) از بارهای مختلف در چهار سطح واقعی استفاده شده است. علاوه بر این، اثر سیستم ادوات فکت ( $IPFC$ ) در نظر گرفته شده است. همچنین یک روش برای تعیین مکان بهینه  $IPFC$  بر اساس شاخص ثبات خط ( $LSI$ ) نیز ارائه شده است. اثر محدودیت نرخ سطح شیب‌دار و اثر بارهای دینامیکی در هزینه سوخت و تلفات سیستم انتقال نیز اعمال شده است. در نهایت از الگوریتم بهبودیافته خفاش به حل آن پرداخته شده است. در [۱۱] از یک الگوریتم بهبودیافته تکامل تفاضلی ( $IDE^2$ ) برای حل مسئله توزیع اقتصادی توان ( $ELD$ ) با در نظر گرفتن اثر شیر ورودی استفاده شده است. در این روش بهبودیافته از سه مدل ارتقا مطابق با توضیحات زیر بهره گرفته شده است: ابتدا، دو اپراتور جهش برای تولید بردار استفاده می‌شود. دوم، نرخ تقاطع نسل‌ها به صورت پویا به روزرسانی و آموزش می‌یابد و سوم، یک جمعیت تصادفی برای بازیابی الگوریتم و غلبه بر همگرایی زودرس ارائه می‌شود.

در [۱۲] از الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسئله توزیع اقتصادی توان برای طول یک شبانه‌روز با در نظر گرفتن قیود مختلف و تابع هزینه ناصاف استفاده شده است. روش پیشنهادی بر سیستم‌های

توزیع اقتصادی برق، یکی از مسائل مهم در مدیریت تولید و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. شبکه‌های توزیع برق آخرین زنجیره از سیستم‌های قدرت برای تحویل انرژی از محل تولید به محل مصرف است. بهره‌برداری بهینه از این شبکه‌ها باعث افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم و نیز کاهش قابل توجه تلفات سیستم خواهد شد. شبکه توزیع رابط بین مصرف‌کننده (خانگی، صنعتی، اداری، تجاری، کشاورزی) و سیستم انتقال و ولتاژ فشارقوی هست. سطح ولتاژ در شبکه‌های توزیع پایین است و در نتیجه اندازه جریان زیاد بوده، به همین دلیل تلفات اهمی در شبکه‌های توزیع به مراتب مهم‌تر از شبکه‌های انتقال است [۱]. توزیع اقتصادی برق، در واقع زمان‌بندی خروجی واحدهای تولیدی تخصیص داده شده است تا تقاضای بار با کم‌ترین هزینه عملیاتی ممکن عملی شده و در عین حال محدودیت واحدها و قیود برابری و نابرابری ارضا شود. مهم‌ترین هدف توزیع اقتصادی برق، کمینه کردن هزینه کلی تولید توان حقیقی (هزینه تولید) در پست‌های مختلف است در عین حال که بارها و تلفات مسیره‌های انتقال نیز تأمین شوند [۲]؛ بنابراین، توزیع اقتصادی برق یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در عملکرد سیستم قدرت باید حل شود. از آن‌جا که مشخصات ورودی-خروجی واحدهای مدرن به علت بارگذاری درجه  $valve-point$ ، اثرات سوخت‌های چندگانه و سایر قیود، به شدت غیرخطی است، لذا برای یک پاسخ بهتر از جستجوی پیوسته استفاده می‌شود [۳].

مسئله توزیع بهینه توان می‌تواند در بخش اصلی زیر تقسیم‌بندی شود:

الف) توزیع بهینه استاتیکی توان

ب) توزیع بهینه دینامیکی توان (۲۴ ساعت)

در دسته اول یا همان پخش بار استاتیکی به حل مسئله موردنظر در یک ساعت یا زمان خاص می‌پردازد در حالی که در دسته دوم به طول یک دوره زمانی معمولاً یک شبانه‌روز می‌پردازد. در نتیجه این عمل، فرمول‌بندی و پیچیدگی در حالت دینامیکی بیش‌تر از حالت استاتیکی خواهد بود و در عین حال تطبیق آن به واقعیت بیش‌تر است [۴]. در پخش بار دینامیکی، اپراتورهای نیروگاه‌ها سعی می‌کنند گرادیان‌های دما و فشار درون بویلر و توربین را در حدود ایمن نگاه دارند تا از کاهش عمر تجهیزات جلوگیری نمایند. این قید مکانیکی حدی روی نرخ افزایش یا کاهش توان الکتریکی خروجی تحمیل می‌نماید. این قید حد نرخ شیب نامیده می‌شود که مسئله دینامیکی را از مدل استاتیکی متمایز سازد [۵].

برای حل مسئله دینامیکی توان تا به حال روش‌های متعددی ارائه شده است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به دو زیر گروه اصلی تقسیم نمود.

از دسته اول می‌توان به روش تکرار لامبدا، روش نقطه بهینه، ضرایب مشارکت و روش گرادیان اشاره نمود. در [۶] برنامه‌ریزی خطی

در روش پیشنهادی برای بهبود عملکرد جستجوی محلی از نظریه آشوب برای بهبود جستجوی محلی و عملگر تقاطع پیشنهادی برای بهبود جستجوی کلی بهره گرفته‌ایم. ارزیابی به‌وسیله انحراف معیار، مقاوم بودن الگوریتم توسعه‌یافته پیشنهادی را نشان می‌دهد. براساس توضیحات داده شده، نکات برجسته مقاله می‌تواند در موارد زیر دسته‌بندی شود:

الف) مدل‌سازی توزیع بهینه دینامیکی توان برای طول یک شبانه‌روز با در نظر گرفتن قیود غیرخطی وارد بر سیستم و تابع هزینه ناصاف سینوسی

ب) بهبود الگوریتم جستجوی هارمونی بر اساس ضرایب متغیر زمانی که همگرایی الگوریتم و کنترل‌پذیری آن را افزایش می‌دهد  
ج) ارائه یک مدل اپراتور تقاطع نسل برای ارتقا جواب‌های فعلی در جهت بهبود جستجوی کلی الگوریتم استاندارد و ترکیب با تئوری آشوب برای بهبود جستجوی محلی در فضای محدودشده براساس قیود مسئله

د) اعمال روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های مختلف و بررسی و آنالیز آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های موجود در مقالات  
در ادامه مقاله در بخش‌های زیر پی‌گیری می‌شود:  
بخش دوم به مدل‌سازی و بخش سوم به الگوریتم بهبودیافته پیشنهادی اختصاص یافته است. بخش چهارم به نحوه اعمال روش پیشنهادی و بخش پنجم شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه شده است. نهایتاً بخش آخر شامل نتیجه‌گیری و پیشنهادها است.

## ۲- مدل‌سازی پخش دینامیکی توان

توزیع اقتصادی توان، روشی با بیش‌ترین کارآمدی، کم‌ترین هزینه و بهره‌برداری قابل‌اطمینان یک سیستم قدرت را به‌وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسئله پخش بار اقتصادی، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به‌منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می‌کنند، ارائه می‌شود. بنابراین مسئله پخش بار اقتصادی می‌تواند با تابع هدف زیر بیان شود [۲]:

$$\min \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{i=1}^{N_g} F_{i,t}(P_{i,t}) + k_{l,t} \left( \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} - P_{D,t} - P_{loss,t} \right)^2 \right) \quad (1)$$

که  $F_{i,t}(P_{i,t})$  هزینه سوخت  $i$  امین نیروگاه در ساعت  $t$   $N_g$  تعداد ژنراتورهای در حال بهره‌برداری سیستم و  $P_{i,t}$  توان خروجی  $i$  امین ژنراتور در ساعت  $t$  است.  $P_{D,t}$  تقاضای بار و  $P_{loss,t}$  تلفات شبکه انتقال است. تابع هزینه  $F_{i,t}(P_{i,t})$  معمولاً به‌صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می‌شود:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (2)$$

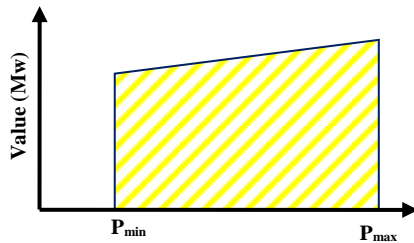
مختلف اعمال و نتایج حاصل با سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. در [۱۳]، مسئله DEED<sup>\*</sup> به‌صورت ترکیبی با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP<sup>o</sup>) جهت کمینه کردن هم‌زمان هزینه سوخت و آلودگی و مشخص کردن مبلغ تشویقی بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. EDRP یکی از انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تشویق است که در آن به مشترکین مبلغی به‌عنوان تشویق پرداخت می‌شود تا مصرف خود را طی ساعات پیک بار کاهش داده یا به ساعات کم‌باری انتقال دهند. ترکیب مسائل DEED و EDRP یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی پیچیده است که روش‌های معمول قادر به حل آن نیستند. در این مقاله، مسئله فوق توسط چهار الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت حل شده و مدل پیشنهادی روی یک سیستم ده واحدی و برای یک بازه زمانی ۲۴ ساعته پیاده‌سازی شده است.

اما باوجود روش‌های ارائه‌شده نیاز برای ارائه روشی مطمئن‌تر با جستجوی محلی و کلی بهتر به‌دلیل قیود غیرخطی مسئله مورد مطالعه، همچنان وجود دارد. الگوریتم جستجوی هماهنگی یک روش فراابتکاری جدید تکاملی بر مبنای فرایند موزیک است که با نسلی از بردارهای حل در قالب حافظه الگوریتم شروع به جستجوی فضای حل مسئله می‌کند و بر اساس رویکرد احتمالی به سمت فضاهای بهینه حرکت می‌کند [۱۴]. سادگی در پیاده‌سازی و نتایج موفقیت‌آمیز آن در سایر مقالات دلیل انتخاب الگوریتم کلونی مصنوعی زنبورعسل در این مقاله شده است.

در این مقاله برای بهبود عملکرد آن در سیستم‌های غیرخطی، روش بهبودیافته الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل مسئله توزیع دینامیکی توان برای طول یک شبانه‌روز ارائه شده است که در آن، ملاحظات و محدودیت‌های عملی مختلف سیستم و نیروگاه‌ها از قبیل اثر شیر بخار، نواحی ممنوعه، نرخ کاهش و افزایش تولیدی نیروگاه‌ها و نیز تلفات شبکه انتقال لحاظ شده است. به‌منظور نمایش و بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از چند سیستم نمونه با داده‌های قابل دسترس بهره گرفته شده است. نتایج مطالعات عددی و مقایسه آن با سایر روش‌ها، گویای برتری روش پیشنهادی برای حل مسئله دینامیکی توان است. در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی مشابه، روش جستجوی هارمونی دارای مزایای کلیدی زیر است [۱۵]:

- این روش برخلاف بسیاری از روش‌های سنتی نیازی به مشتق‌گیری ندارد.
- دارای حساسیت کم‌تری نسبت به ماهیت تابع هدف است، یعنی تحذب یا پیوستگی دارد.
- برخلاف بسیاری دیگر از روش‌های محاسبات تکاملی، به تنظیم پارامترهای کم‌تری نیاز دارد.
- دارای قابلیت فرار از حداقل محلی است.
- به‌آسانی با عملیات ابتدایی ریاضی و منطقی پیاده‌سازی و برنامه‌ریزی می‌شود.

ناشی از محدودیت‌های فنی هر واحد می‌باشند، باعث می‌شوند تا واحد با هزینه کم‌تر، بیش از حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیش‌تر، کم‌تر از حد مجاز خود تولید نداشته باشد. شکل ۲ حداکثر و حداقل تولید را نشان می‌دهد:



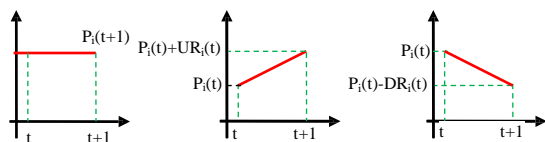
شکل ۲: محدوده تولید برای واحد  $i$  ام

• نرخ‌های افزایشی و کاهششی

به دلایل فنی نیروگاه‌های حرارتی نمی‌توانند به صورت آنی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش یا کاهش با آهنگی همراه است که با قیود زیر داده می‌شود:

$$P_i^{\min}(t) \leq P(t)_i \leq P_i^{\max}(t) \quad (7)$$

که  $RDR_i$  نرخ کاهششی و  $P_i^{\min}(t) = \max(P_i(t-1) - RDR_i, P_i^{\min})$  نیروگاه و  $P_i^{\max}(t) = \min(P_i(t-1) + RUR_i, P_i^{\max})$  نرخ افزایششی نیروگاه است. به منظور اعمال محدودیت‌های فوق لازم است تا وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد. شکل ۳ این محدودیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳: به ترتیب از راست به چپ، تغییرات نرخ کاهششی و افزایششی و

حالت پایدار برای واحدهای تولیدی

• مناطق ممنوع

نیروگاه‌ها به دلایل فنی نمی‌توانند در برخی از نواحی مابین حداقل و حداکثر تولید خودشان، توان تولید کنند. این نواحی به عنوان مناطق ممنوع نامیده می‌شوند و به صورت  $[P_{i,j}^L, P_{i,j}^U]$  مشخص می‌شوند. به عبارتی دیگر، برخی از ژنراتورها مناطق اجرایی خاصی دارند که ناشی از محدودیت‌های فیزیکی مؤلفه‌های ژنراتور، سوپاپ بخار، ارتعاش در شفت و غیره هستند. این مناطق موجب ایجاد ناپیوستگی در منحنی سوخت ژنراتورها مطابق با شکل ۴ می‌شوند. وجود این ناپیوستگی‌ها در منحنی سوخت ژنراتور  $i$  ام به صورت قیود زیر در مسأله DED در نظر گرفته می‌شود:

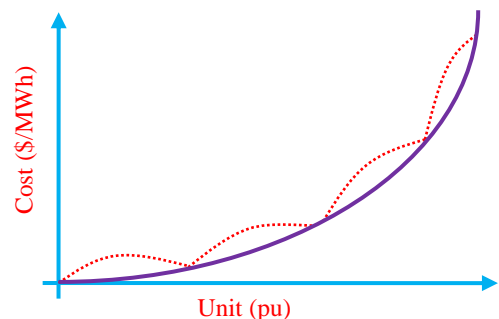
$$P_{i,t} \in \begin{cases} P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^L \\ P_{i,t}^U \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^L, \quad j = 2, 3, \dots, Z_i \\ P_{i,t}^U \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

که  $Z_i$  تعداد مناطق ممنوع واحد  $i$  ام است.

در رابطه فوق ضرایب  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب هزینه  $i$  امین ژنراتور هستند. با افزودن بخش سینوسی به تابع هزینه فوق، تابع درجه دو دارای سطح ناصاف خواهد شد. این موضوع باعث پیچیده‌تر شدن تابع هدف نهایی می‌شود. برای در نظر گرفتن اثرات موقعیت شیر، توابع سینوسی به شکل زیر وارد تابع هدف می‌شود:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |e_i \sin(f_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t}))| \quad (3)$$

که ضرایب  $e_i$  و  $f_i$  ضرایب موقعیت شیر  $i$  امین ژنراتور بوده که در نتیجه آن تابع هزینه در فرمول (۱) به یک تابع مرکب چندجمله‌ای و غیر محدب مطابق با شکل ۱ تبدیل می‌شود. این شکل تغییرات تابع هزینه را برای واحد نیروگاهی نشان می‌دهد. علاوه بر اثرات موقعیت شیر، هر نوع هزینه دیگر، همچون هزینه‌های تعمیر و نگهداری یا آلودگی را می‌توان به تابع هزینه افزود. تابع هدف حاصل مقید به محدودیت‌های زیر فرمول‌بندی مسئله پخش بار اقتصادی را نتیجه خواهد داد:



شکل ۱: تأثیر شیر ورودی بر تابع هزینه، خط پیوسته معادله درجه دو و

نقطه چین تأثیر شیر ورودی بر تابع هزینه

• توازن تولید و مصرف در سیستم

مجموع توان تولیدشده توسط کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم برابر باشد.

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} - P_{D,t} - P_{loss,t} = 0 \quad (4)$$

تلفات شبکه انتقال،  $P_{loss,t}$ ، به ساختار فیزیکی شبکه و مقدار تولید بستگی دارد و از محاسبات پخش بار یا ضرایب تلفات  $B$  با رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{loss,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ij} P_{i,t} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_{i,t} + B_{00} \quad (5)$$

• حدود تولید

در یک سیستم قدرت هر واحد تولیدی به دلایلی فنی می‌تواند در یک رنج مناسبی تولید کند چرا که اگر از آن محدوده خود خارج شود به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود. به طوری که برای هر واحد تولیدی حداقل و حداکثر توان اکتیو تعریف می‌شود.

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (6)$$

که در رابطه‌های فوق  $P_{i,t}^{\min}$  مقدار کمینه توان اکتیو و  $P_{i,t}^{\max}$  مقدار حد بالایی برای هر واحد نیروگاهی است. حدود فوق، علاوه بر این که

ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت فرمول زیر مشخص می‌شود:

$$\text{Minimize } f(x), x_i \in X_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

در این قسمت مقدار پارامترهای زیر مشخص می‌شوند:

اندازه حافظه هارمونی (تعداد بردارهای حل در حافظه HMS) برآمد حافظه هارمونی (HMCR) برآمد صدای کناری مجاور (PAR) و مقیاس تمام.

• تولید حافظه هارمونی اولیه

قسمت دوم الگوریتم، ایجاد و شکل‌دهی حافظه هارمونی است که طبق ماتریس رابطه زیر است:

$$HM = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & f(x^2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

در این قسمت ماتریس حافظه نشان داده به صورت تصادفی با بردارهای مولد حل و تابع عملکرد واقعی  $f(x)$  ساخته می‌شود که نقش حافظه را برعهده خواهد داشت.

• ساخت هارمونی جدید

این قسمت مهم‌ترین بخش یک الگوریتم جستجوی هارمونی به‌شمار می‌رود. زیرا ایجاد تغییرات در هارمونی‌های موجود در حافظه در این قسمت انجام می‌گیرد. با توجه به رابطه (۱۰) برآمد حافظه هارمونی (HMCR) مشخص می‌نماید که ساخت هارمونی جدید تا چه میزان از داخل حافظه هارمونی استفاده نماید و (1-HMCR) نشان‌دهنده احتمال ایجاد تصادفی هارمونی جدید است.

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{HMCR} \\ x'_i \in x_i & (1 - \text{HMCR}) \end{cases} \quad (12)$$

به‌عنوان مثال یک HMCR برابر ۰.۹۵ یعنی الگوریتم جستجوی هارمونی ارزش‌های هارمونی جدید را به احتمال ۰.۹۵ از ارزش‌های ذخیره‌شده در حافظه هارمونی انتخاب خواهد کرد و به احتمال ۰.۰۵ تصادفی تولید خواهد نمود. وقتی یک ارزش از داخل حافظه انتخاب می‌شود بسته به احتمال PAR ممکن است دچار تغییر گردد که احتمال این تغییر با اضافه کردن مقداری صحیح به مقدار ارزش انجام می‌پذیرد. در روابط زیر  $bw$  فاصله اختیاری برای پهنای بررسی و  $rand()$  اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ است.

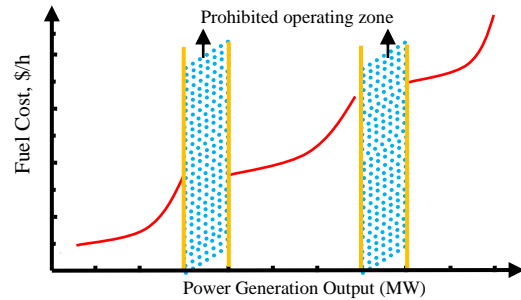
$$R_i^{new} \leftarrow R_i^{new} \pm rand() \times bw \quad (13)$$

$$f(x) = \begin{cases} YES & w.p \text{ PAR} \\ NO & w.p (1 - PAR) \end{cases} \quad (14)$$

• به‌روزرسانی حافظه هارمونی

در این قسمت اگر هارمونی جدید بهتر از بدترین عضو حافظه هارمونی باشد هارمونی جدید در حافظه قرار می‌گیرد و بدترین هارمونی موجود در حافظه حذف می‌شود.

• بررسی شرط پایان



شکل ۴: مناطق ممنوعه برای واحد تولیدی

• محدودیت‌های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه

سایر محدودیت‌های ناشی از معیارهای قابلیت اطمینان و امنیت شبکه را نیز می‌توان به‌عنوان محدودیت‌های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی در نظر گرفت. در غالب موارد، این محدودیت‌ها در سایر مطالعات یا برنامه‌ریزی‌ها در نظر گرفته می‌شوند و توزیع اقتصادی بار بدون منظور نمودن این محدودیت‌ها حل می‌شود.

### ۳- الگوریتم جستجوی هارمونی

#### ۳-۱- الگوریتم استاندارد

موسیقی‌دان‌ها با توجه به ابزاری که برای ساخت موسیقی در اختیار دارند ابتدا به صورت تصادفی اقدام به نواختن موسیقی با ابزارهای موجود می‌نمایند. این هارمونی درون حافظه موسیقی‌دان نگه‌داری می‌شود و در قسمت بعدی موسیقی‌دان با توجه به هارمونی‌های موجود در حافظه خود اقدام به نواختن موسیقی جدید که نسبت به قبلی تغییراتی دارد می‌نمایند. زمانی که موسیقی‌دان صدایی را فی‌البداهه می‌سازد معمولاً از یکی از سه قانون زیر پیروی می‌نماید: نواختن یکی از صداهایی که در حافظه‌اش دارد، نواختن صدای مجاور و نزدیک صدایی که در حافظه‌اش دارد و نواختن صدایی تصادفی از درجه صداهای متحمل [۱۴]. فرض کنید یک جاز سه‌قلو از یک ساکسیفون، ویولن و گیتار تشکیل شده است. مقدار مشخصی از صداها (زیری و بمی) قابل توجیه در حافظه هر موسیقی‌دان وجود دارد. ساکسیفونیست و ویولونیست و گیتاریست است. اگر ساکسیفونیست به‌طور تصادفی (Sol) و گیتاریست (DO) و ویولونیست (Si) بنوازد، هارمونی موجود (Sol Si Do) یک هارمونی جدید را به‌وجود می‌آورد و اگر هارمونی جدید بهتر از هارمونی موجود در حافظه باشد هارمونی جدید در حافظه قرار می‌گیرد و هارمونی قبلی از حافظه حذف می‌شود. این پردازش تا زمانی که به یک هارمونی بی‌نظیر برسد ادامه خواهد داشت. مسئله با توجه به ساختار الگوریتم جستجوی هارمونی فرمول‌بندی گشته و ساختار پاسخ مسئله به شکل هارمونی در نظر گرفته می‌شود. سپس الگوریتم اقدام به ساخت هارمونی به‌صورت تصادفی با رعایت شرایط امکان‌پذیری نموده و درون حافظه هارمونی قرار می‌دهد. در ادامه جریان کاری یک الگوریتم جستجوی هارمونی به‌صورت کامل توضیح داده خواهد شد.

• مقداردهی مسئله بهینه‌سازی و مشخصات الگوریتم

برنامه تنظیم می‌شوند. با این عمل جستجوی کلی به صورت قابل توجهی بهبود بخشیده می‌شود. از سویی دیگر، به منظور فائق آمدن بر مشکلات قرار گرفتن در نقاط محلی و توسعه قرارگیری نقاط در فضای جستجو از عملگر زیر پیشنهاد شده است:

$$\begin{aligned} & \text{for } i=1:N \\ & \quad \text{penalty}_i = \text{abs}(x_i^{\text{best}} - x_i^{\text{worst}}); \\ & \quad x_i^{\text{New}} = x_i^{\text{best}} \pm \text{penalty}_i; \\ & \quad \text{if } \text{rand} \leq T \quad (20) \\ & \quad \quad x_i^{\text{New}} = x_i^{\text{min}} + \text{rand} \times (x_i^{\text{max}} - x_i^{\text{min}}); \\ & \quad \text{end} \\ & \text{end} \end{aligned}$$

همان گونه که معادله فوق نشان می‌دهد به کمک بهترین و بدترین جواب‌های هر جمعیت می‌توان جستجوی کلی الگوریتم و رها جستن از نقاط محلی را بهبود بخشید.

#### ۴- اعمال الگوریتم پیشنهادی بر مسئله پخش بار دینامیکی

هدف اصلی توزیع اقتصادی بار، برنامه‌ریزی تولید واحدهای تولید انرژی الکتریکی است به نحوی که بار مورد نیاز شبکه تأمین و هزینه‌های اقتصادی این تولید نیز کمینه شود، اما محدودیت‌های بسیاری در کاربردهای عملی وجود دارد که نحوه فرمول‌بندی و حل مسئله کمی پیچیده می‌شود، از جمله باید مشخصه نرخ افزایش حرارتی واحدها پیوسته باشد؛ بنابراین، در این قسمت نحوه حل مسئله توزیع اقتصادی توان به کمک الگوریتم پیشنهادی بیان می‌شود. در حقیقت برای حل مسئله گام‌های زیر باید پی‌گیری شود:

**گام اول:** تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم پیشنهادی از جمله تعداد جمعیت و تعداد تکرار برنامه و فراخوانی اطلاعات سیستم مورد مطالعه و قرار دادن محدودیت‌های وارده بر سیستم. در این مرحله جواب‌های اولیه باید در محدودیت‌های مورد نظر قرار داده شوند تا جستجوی بهتری برای الگوریتم ایجاد نماید.

**گام دوم:** محاسبه برازندگی جواب‌های اولیه و مرتب نمودن آن‌ها بر اساس حداقل‌سازی تابع هزینه مورد مطالعه.

**گام سوم:** انتخاب بهترین جواب از مجموعه جواب موجود و ذخیره‌سازی آن در حافظه به منظور ارتقا نسل‌های بعدی.

**گام چهارم:** ارتقا جواب‌ها بر اساس معادله (۱۶) و محاسبه برازندگی آن‌ها و انتخاب بهترین جواب.

**گام پنجم:** مقایسه بهترین جواب با جواب ذخیره شده در حافظه. اگر این جواب از جواب موجد در حافظه بهتر باشد جای‌گزین آن می‌شود وگرنه همان قبلی در حافظه قرار می‌گیرد.

در این قسمت شرط پایان اجرای الگوریتم بررسی می‌شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی تعداد تکرار است.

#### ۳-۲- الگوریتم بهبودیافته

به منظور بهبود جستجوی محلی در الگوریتم پیشنهادی از نظریه آشوب بهره گرفته‌ایم. یکی از ایده‌های جدید در حل مسائل پیچیده با توابع غیرخطی استفاده از روش جستجوی آشوبناک در روش‌های هوشمند به منظور افزایش قابلیت‌های الگوریتم هوشمند است. روش آشوبناک یک روش مبتنی بر توابع غیرخطی و غیرمحدب است که امروزه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی روش‌های آشوبناک انجام گرفته در مقالات منتشر شده و روش آشوبناک پیشنهادی در حل مسئله پیش‌بینی قیمت برق پرداخته می‌شود. مدل انجام گرفته شده در زیر قابل پی‌گیری است:

$$c_{i+1}^j = \begin{cases} 2c_i^j, & \text{if } 0 < c_i^j \leq \frac{1}{2} \\ 2(1-c_i^j), & \text{if } \frac{1}{2} < c_i^j \leq 1 \end{cases}, j = 1, 2, \dots, N_g \quad (15)$$

که در معادله فوق،  $c$  معرف ذرات آشوب در بعد  $z$  ام و تکرار  $i$  ام است.  $N_g$  تعداد متغیر برای بهینه‌سازی تعریف می‌شود. به عبارتی ضرایب آشوبناک متناسب با محدوده تعیین شده و تعداد متغیر ( $N_g$ )، تولید می‌شوند.

$$\begin{aligned} X_{cls}^0 &= [X_{cls,0}^1, X_{cls,0}^2, \dots, X_{cls,0}^{N_g}]_{1 \times N_g} \\ cx_0 &= [cx_0^1, cx_0^2, \dots, cx_0^{N_g}] \\ cx_0^j &= \frac{X_{cls,0}^j - P_{j,\min}}{P_{j,\max} - P_{j,\min}}, j = 1, 2, \dots, N_g \end{aligned} \quad (16)$$

برای این معادله خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} X_{cls}^i &= [X_{cls,i}^1, X_{cls,i}^2, \dots, X_{cls,i}^{N_g}]_{1 \times N_g} \\ x_{cls,i}^j &= cx_{i-1}^j \times (P_{j,\max} - P_{j,\min}) + P_{j,\min} \\ i &= 1, 2, \dots, N_{chaos}, j = 1, 2, \dots, N_g \end{aligned} \quad (17)$$

در رابطه بالا  $X_{cls}^0$  مکان به دست آمده اولیه برای متغیر آشوب است.  $P_{j,\max}$  و  $P_{j,\min}$  به ترتیب مقدار پایین و بالایی برای متغیر آشوبناک است.  $N_{chaos}$  تعداد متغیرهای آشوبناک است. یکی از نقاط ضعف دیگر برای الگوریتم جستجوی هارمونی عدم وابستگی آن به پارامتر  $bw$  و  $PAR$  است. در این قسمت برای بهبود جستجوی کلی الگوریتم از دو عملگر پیشنهادی زیر بهره گرفته‌ایم:

$$PAR_i = PAR_{\min} + \frac{i}{H} (PAR_{\max} - PAR_{\min}) \quad (18)$$

$$bw_i = bw_{\max} \times e^{-i \times \frac{\ln(\frac{bw_{\min}}{bw_{\max}})}{H}} \quad (19)$$

که در رابطه فوق،  $PAR_{\min}$  و  $PAR_{\max}$  حد بالایی و پایینی می‌باشند. همچنین پارامترهای  $H$  و  $i$  به ترتیب تعداد کل تکرارها و تکرار فعلی می‌باشند. به تعارف فوق، ضرایب به صورت خودتطبیقی و با تکرارهای

۵- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۵-۱- تحلیل الگوریتم پیشنهادی (تابع Michalewicz function)

در ابتدا به‌منظور نشان دادن قابلیت الگوریتم پیشنهادی در توابع آزمون استاندارد، مقایسه‌ای با الگوریتم استاندارد جستجوی هارمونی، اجتماع ذرات و ژنتیک انجام گرفته است. تابع آزمون موردنظر در حقیقت از چندین نظر برتری دارد، اولاً دارای نقاط محلی فراوانی است و فواصل بین آن‌ها به‌صورت قابل توجهی زیاد است از سویی دیگر با وجود دره‌ها و قله‌های فراوان، قسمت‌های صاف هم دارد که جستجوی الگوریتم را به‌مراتب سخت‌تر می‌نماید.

گام ششم: ارتقا جواب‌ها بر اساس معادله آشوب (۱۵) و انجام

عملیات مشابه به گام چهارم.

گام هفتم: جای‌گزین کردن بدترین مجموعه جواب به‌دست آمده

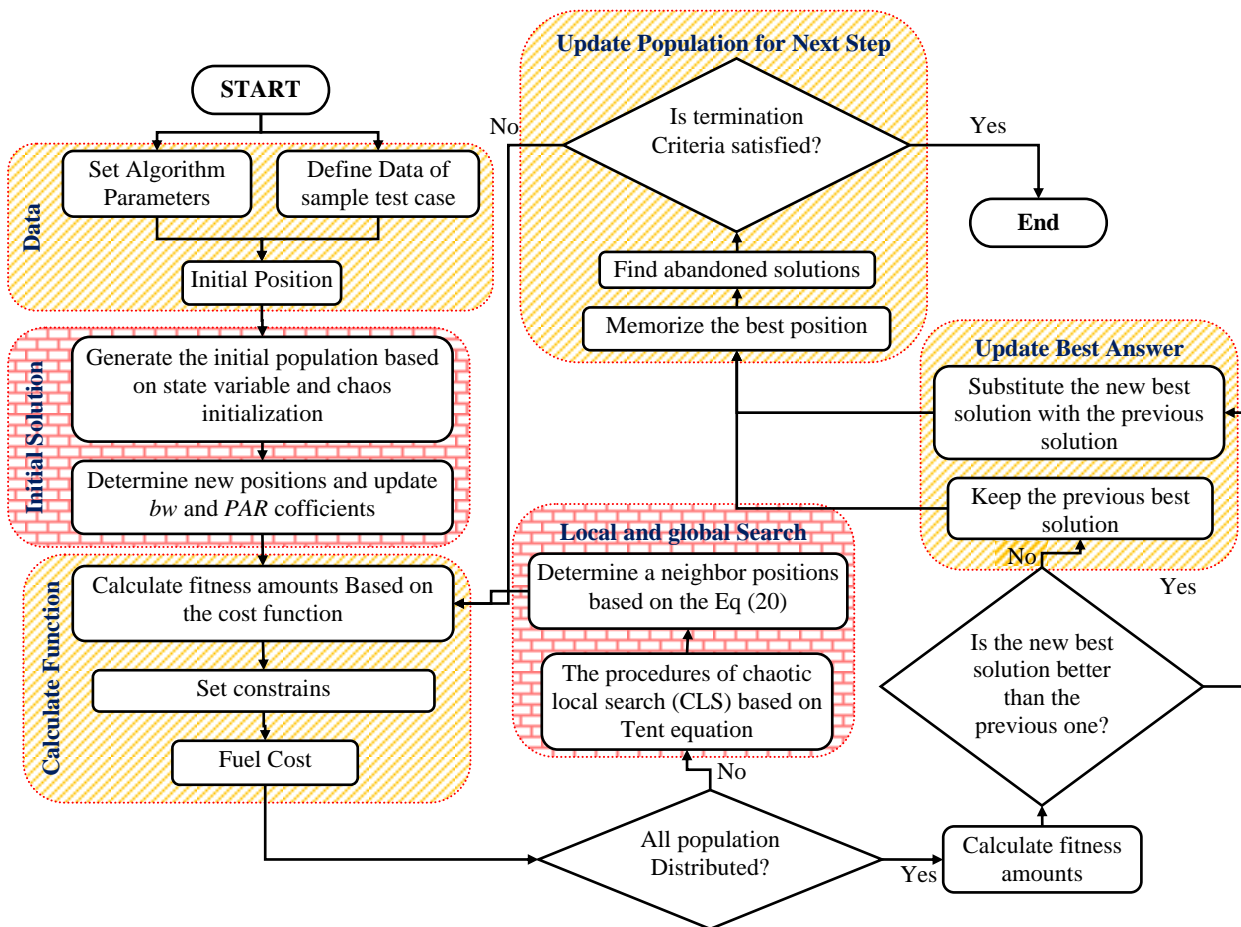
با جواب‌های تصادفی جدید و استفاده از عملگر پیشنهادی (۲۰) برای ارتقای جستجوی کلی.

گام هشتم: آیا شرط خاتمه تکمیل شده است، اگر بله خروج از

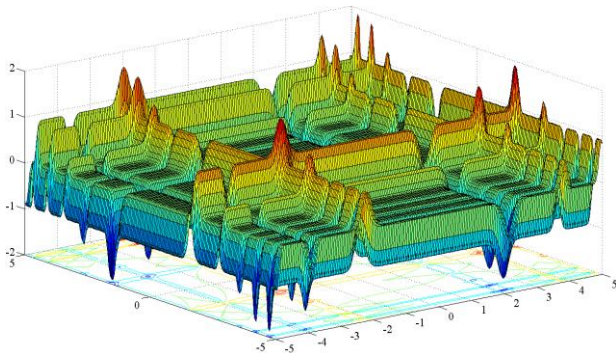
برنامه و نمایش دادن اطلاعات و در غیر این صورت رفتن به گام سوم.

در شکل ۵ نحوه اعمال الگوریتم برای مسئله موردنظر نشان داده

شده است.



شکل ۵: نحوه اعمال الگوریتم پیشنهادی برای مسئله پخش بار اقتصادی، پیشنهادهای مقاله با رنگ قرمز (آجرنما) مشخص شده‌اند



شکل ۶: نمایش سه وجهی تابع آزمون استاندارد

به‌منظور بررسی بهتر کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با سایر

روش‌ها، محدوده بزرگ‌تری را انتخاب نموده‌ایم. این تابع به‌صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$f(x) = -\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \left( \sin\left(\frac{i \times x_i^2}{\pi}\right) \right)^{2m} \quad (21)$$

$$m = 10, i = 1, \dots, n, -50 \leq x_i \leq 50$$

در شکل ۶ تصویر سه وجهی با وضوح بیشتر در محدوده کوچک‌تر

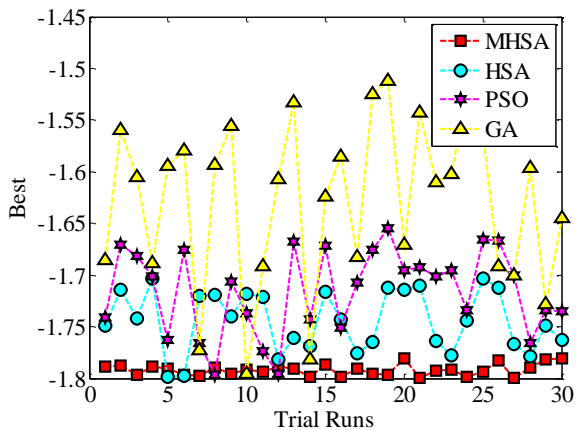
(۵، -۵) نشان داده شده است.

به منظور مقایسه بهتر، بهترین ضرایب از سایر مقالات استخراج شده است و تنها تعداد جمعیت اولیه یکسان برای آن‌ها در نظر گرفته‌ایم. شکل ۷ همگرایی الگوریتم‌های پیشنهادی بعد از ۱۰ اجرا

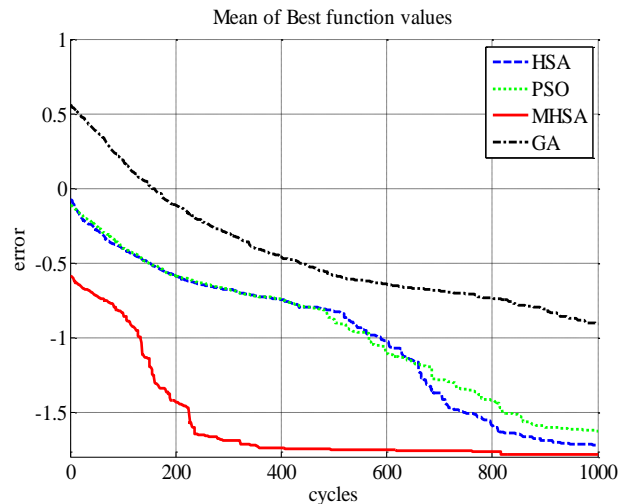
جدول ۱: نتایج به دست آمده برای سیستم ۱۰ واحدی در دوره ۲۴ ساعته

Hour	P <sub>1</sub> (Mw)	P <sub>2</sub> (Mw)	P <sub>3</sub> (Mw)	P <sub>4</sub> (Mw)	P <sub>5</sub> (Mw)	P <sub>6</sub> (Mw)	P <sub>7</sub> (Mw)	P <sub>8</sub> (Mw)	P <sub>9</sub> (Mw)	P <sub>10</sub> (Mw)	P <sub>loss</sub>	Cost (\$/Mwh) ×10 <sup>4</sup>	Mismatch (Mw) ×10 <sup>-12</sup>
۱	۳۰۲/۸۲	۱۳۵/۵۲	۱۵۶/۱	۶۰/۰۱	۷۳/۳	۵۷/۰	۱۲۹/۲۴	۴۷/۰۱	۲۰	۵۵	۱۲/۱۳	۲/۷۸	۰/۰
۲	۳۰۳/۳۲	۱۳۵/۳۴	۱۸۱/۰۱	۶۰/۰۱	۷۲/۸۵	۱۰۶/۰۵	۱۲۹/۴۲	۴۷/۰	۲۰	۵۵	۱۲/۸۰	۳/۰۱	۰/۰
۳	۳۰۳/۴۷	۲۱۴/۹۸	۱۸۴/۷۶	۶۰/۰	۱۲۱/۳۴	۱۲۱/۷۸	۱۲۹/۵۴	۴۷/۱۳	۲۰	۵۵	۱۹/۴۷	۳/۳۲	۰/۲۳
۴	۳۸۰	۲۲۳/۰۷	۲۶۴/۴۳	۶۰/۲۳	۷۳/۸۶	۱۲۲/۵۸	۱۲۹/۸	۷۷/۰۳	۲۰	۵۵	۲۲/۰۲	۳/۶۷	۰/۰
۵	۳۸۰	۲۲۸/۰۹	۳۰۹/۸۸	۶۰/۰	۱۲۲/۹۳	۱۲۶/۸۳	۱۲۹/۵۹	۴۷/۶۸	۲۰	۵۵	۲۵/۲۵	۳/۸۰	۰/۰
۶	۳۸۰/۱۴	۳۰۸/۱۷	۲۹۹/۶۲	۶۰/۰۵	۱۷۲/۹۱	۱۲۴/۶۴	۱۲۹/۷۹	۷۷/۶۸	۲۰	۵۵	۳۱/۴۷	۴/۱۲	۰/۲۳
۷	۴۵۶/۰۲	۳۰۹/۴۹	۲۹۱/۶۷	۶۰/۰۴	۱۷۲/۴۴	۱۲۲/۴۱	۱۲۹/۵۴	۸۵/۳۶	۲۰/۰۳	۵۵	۳۴/۸۶	۴/۲۶	۰/۰
۸	۴۵۶/۰۳	۳۰۹/۳۴	۲۸۶/۴۴	۶۰/۰	۲۲۲/۴۱	۱۲۲/۱۴	۱۲۹/۵۴	۸۵/۱	۵۰/۰	۵۵	۳۸/۵۱	۴/۴۶	۰/۰
۹	۴۵۶/۱۵	۳۸۹/۷۹	۲۹۷/۳۵	۱۰۹/۹۶	۲۲۲/۴۸	۱۲۲/۵۳	۱۲۹/۶	۸۹/۱۴	۵۲/۰	۵۵	۴۵/۹۷	۴/۸۱	۰/۰
۱۰	۴۶۰/۲۴	۳۹۶/۷۲	۳۳۹/۹۳	۱۳۵/۶۶	۲۲۳/۷۲	۱۵۹/۹۷	۱۲۹/۶۳	۱۱۹/۱۲	۵۲/۰۱	۵۵	۴۸/۴۸	۵/۱۹	۰/۰
۱۱	۴۵۶/۸۵	۴۵۹/۸۱	۳۰۸/۹۷	۱۸۱/۳۴	۲۲۲/۴۴	۱۵۹/۷۸	۱۲۹/۵۸	۱۲۰/۰	۵۲/۱۴	۵۵	۵۵/۱۰	۵/۳۶	۰/۰
۱۲	۴۵۶/۰۵	۴۶۰/۰	۳۳۳/۳۷	۲۳۱/۶۹	۲۲۲/۴۹	۱۵۹/۷	۱۲۹/۶۹	۱۲۰/۰	۵۲/۰۱	۵۵	۵۶/۶۰	۵/۵۶	۰/۴۵
۱۳	۴۵۶/۰۱	۳۹۶/۸	۳۱۴/۲۵	۱۸۱/۶۹	۲۲۲/۴۲	۱۴۴/۲۹	۱۲۹/۶۳	۱۱۹/۸۹	۵۲/۰۲	۵۵	۴۸/۲۹	۵/۱۶	۰/۰
۱۴	۴۵۶/۸۵	۳۱۶/۹۲	۳۲۹/۶۳	۱۷۸/۶۵	۲۲۲/۶۲	۱۲۲/۷۶	۱۲۹/۶۱	۸۹/۹۴	۲۲/۰۲	۵۵	۳۹/۸۵	۴/۸۳	۰/۰
۱۵	۳۷۹/۵۵	۳۹۶/۹۷	۲۹۲/۸۶	۱۲۸/۶۵	۱۷۲/۷	۱۲۲/۴۷	۱۲۹/۶۶	۷۸/۱۴	۲۰	۵۵	۳۹/۳۱	۴/۴۷	۰/۴۵
۱۶	۳۰۳/۳۵	۳۱۶/۵۶	۲۹۷/۸۱	۸۸/۱۵	۱۷۲/۸۵	۱۲۲/۶	۱۲۹/۵۴	۴۸/۱۴	۲۰	۵۵	۳۰/۰۸	۳/۹۸	۰/۰
۱۷	۳۰۳/۲۶	۳۱۳/۸۳	۳۰۱/۳۶	۶۰/۱۴	۱۲۳/۶۵	۱۲۶/۱۴	۱۲۹/۶	۴۷/۰۲	۲۰	۵۵	۲۸/۱۱	۳/۷۸	۰/۰
۱۸	۳۷۹/۹۲	۳۹۳/۷۸	۲۹۷/۴۵	۶۰/۰۸	۱۲۲/۹۱	۱۲۲/۳۲	۱۲۹/۵۳	۴۷/۰	۲۰/۰۱	۵۵	۳۷/۰۳	۴/۰۹	۰/۰
۱۹	۳۷۹/۹۹	۴۵۹/۹۹	۳۱۷/۸۲	۷۰/۳۳	۱۷۲/۷۱	۱۲۳/۴۳	۱۲۹/۶۵	۴۷/۰۷	۲۰/۰۱	۵۵	۴۵/۵۷	۴/۴۹	۰/۰
۲۰	۴۵۶/۸۵	۴۶۰/۰	۳۴۰/۰	۱۲۰/۶۴	۲۲۲/۵۱	۱۶۰/۰	۱۳۰/۰	۷۷/۰	۵۰/۰	۵۵	۵۴/۸۴	۵/۳۱	۰/۰
۲۱	۳۸۱/۹۲	۳۹۶/۵۳	۳۳۹/۶۷	۱۳۲/۵۳	۲۲۲/۶۶	۱۶۰/۰	۱۲۹/۹۴	۸۵/۷۴	۲۰/۰۱	۵۵	۴۳/۷۷	۴/۸۲	۰/۲۳
۲۲	۳۰۳/۲۶	۳۹۶/۶۸	۲۶۴/۳۶	۱۱۰/۴۵	۱۷۲/۷۶	۱۲۲/۶	۱۲۹/۴۷	۵۵/۳۹	۲۰/۰۳	۵۵	۳۵/۸۸	۴/۱۷	۰/۰
۲۳	۲۲۶/۷۵	۳۱۴/۶۳	۱۸۵/۰	۶۰/۳۶	۱۷۲/۷۱	۱۲۱/۶۱	۱۲۸/۸۳	۴۷/۱۱	۲۰	۵۵	۲۵/۳۹	۳/۴۷	۰/۲۳
۲۴	۲۲۵/۴۹	۳۰۹/۹۵	۱۷۳/۴۲	۶۰/۴۲	۱۲۳/۶۷	۷۱/۹۲	۹۸/۱۲	۴۷/۰	۲۰/۰۱	۵۵	۲۰/۷۷	۳/۲۱	۰/۲۳
Result	Total cost: ۱۰۱۸۱۴۱/۸۹						Total power loss: ۸۵۳/۶۱						

همچنین شکل ۸ نحوه توزیع جواب نهایی به دست آمده از ۳۰ اجرای مختلف با روش‌های پیشنهادی بر روی تابع آزمون استاندارد را نشان می‌دهد.



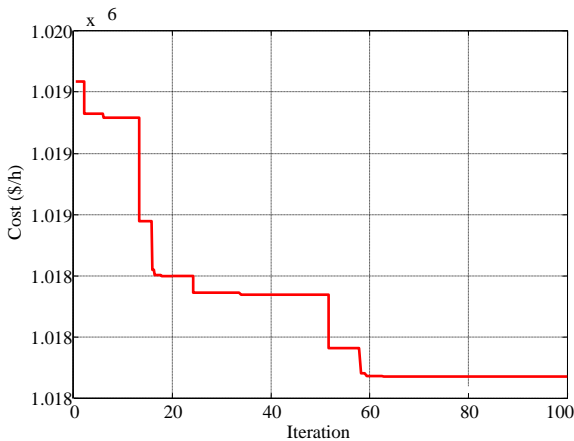
شکل ۸: بهترین مقدار به دست آمده از ۳۰ اجرای مختلف برای تابع آزمون استاندارد



شکل ۷: همگرایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل تابع آزمون پیشنهادی



در این رابطه،  $fit_{other}$  نشان دهنده مقدار عددی به دست آمده از سایر روش‌ها و  $fit_{proposed}$  مقدار عددی روش پیشنهادی است که در نهایت درصد بهبود در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۱۱ مشاهده می‌نمایید استفاده از روش پیشنهادی بهبود قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های مسئله ایجاد کرده است. همچنین مقدار میانگین و کمینه به صورت قابل ملاحظه‌ای نزدیک بوده که نشان از مقاوم بودن و انحراف کم‌تر الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله توزیع دینامیکی توان دارد.



شکل ۱۰: روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۱۰ ماشینه

جدول ۲: مقایسه بین روش پیشنهادی و سایر روش‌های موجود برای

سیستم ۱۰ ماشینه

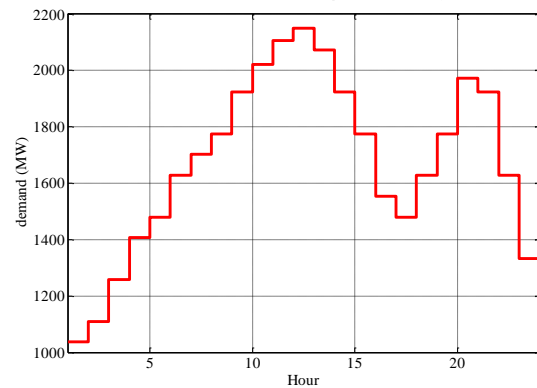
Method	Cost (\$/h)			CPU time (min)
	Min	Mean	Max	
DE [17]	$1/0.20 \times 10^6$	---	---	۱۱/۲۵
EP [17]	$1/0.49 \times 10^6$	---	---	۴۲/۴۹
EP-SQP [17]	$1/0.32 \times 10^6$	$1/0.36 \times 10^6$	---	۲۰/۵۱
MDE [17]	$1/0.32 \times 10^6$	$1/0.34 \times 10^6$	---	---
MHEP-SQP [17]	$1/0.29 \times 10^6$	$1/0.31 \times 10^6$	---	۲۱/۲۳
ICPSO [17]	$1/0.19 \times 10^6$	$1/0.20 \times 10^6$	$1/0.5 \times 10^6$	۰/۴۶۷
PSO-SQP [17]	$1/0.27 \times 10^6$	$1/0.29 \times 10^6$	$1/0.34 \times 10^6$	۱۶/۳۷
DGPSO [17]	$1/0.29 \times 10^6$	$1/0.30 \times 10^6$	---	۱۵/۳۹
IPSO [17]	$1/0.24 \times 10^6$	$1/0.27 \times 10^6$	---	۰/۰۶
HDE [17]	$1/0.31 \times 10^6$	---	---	---
IDE [17]	$1/0.26 \times 10^6$	---	---	---
ABC [17]	$1/0.22 \times 10^6$	$1/0.23 \times 10^6$	$1/0.24 \times 10^6$	۲/۶۰۲۹
CMAES [17]	$1/0.24 \times 10^6$	$1/0.26 \times 10^6$	$1/0.33 \times 10^6$	۰/۶۳
AIS [17]	$1/0.22 \times 10^6$	$1/0.23 \times 10^6$	$1/0.25 \times 10^6$	۱۹/۰۱
HHS [17]	$1/0.22 \times 10^6$	---	---	۱۲/۲۳۳
AIS-SQP [17]	$1/0.30 \times 10^6$	---	---	---
CS-DE [17]	$1/0.23 \times 10^6$	$1/0.26 \times 10^6$	$1/0.28 \times 10^6$	۰/۲۴
CDE [17]	$1/0.19 \times 10^6$	$1/0.21 \times 10^6$	$1/0.23 \times 10^6$	۰/۳۲
TVAC-IPSO [17]	$1/0.182 \times 10^6$	$1/0.19 \times 10^6$	$1/0.21 \times 10^6$	۲/۸
Proposed	$1/0.181 \times 10^6$	$1/0.19 \times 10^6$	$1/0.19 \times 10^6$	۰/۴۳

\* «—» نشان دهنده این است که در مقاله مقدار آن اعلام نشده و یا قابل محاسبه نیست.

نزدیکی جواب‌های به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی نشان از مقاوم بودن و کارایی بالای آن دارد. همچنین نشان می‌دهد روش پیشنهادی دارای انحراف معیار کوچک‌تری است.

### ۵-۲- سیستم ۱۰ نیروگاهی

اولین سیستم مورد مطالعه یک سیستم ده نیروگاهی است که عموماً در تمامی تحقیقات به عنوان اساس کار در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات این سیستم مورد مطالعه از [۱۶] قابل دریافت است. شکل ۹ میزان تقاضای انرژی برای ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. این سیستم شامل مناطق ممنوعه، نرخ افزایشی-کاهشی، محدودیت بالا و پایین واحدهای تولیدی و تابع ناصاف برای هزینه تولید برق است. به همین دلیل این سیستم مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته است.



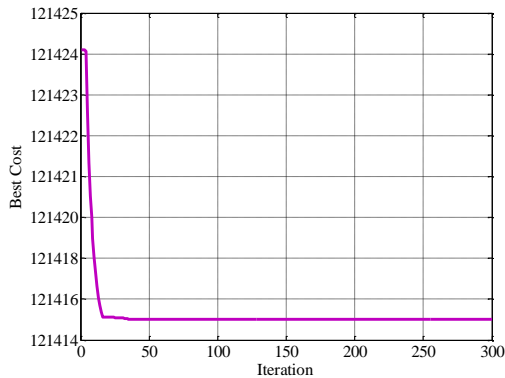
شکل ۹: تغییرات توان درخواستی برای طول یک شبانه‌روز در سیستم

۱۰ ماشینه

جدول ۱ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برای سیستم ده‌ماشینه را در طول یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. سه ستون آخر به ترتیب تلفات هر ساعت، هزینه تولید آن ساعت و میزان اختلاف توان را نشان می‌دهد. برای محاسبه اختلاف توان از قید تساوی بین تولید و مصرف استفاده شده است وجود مقدار عددی کم‌تر نشان از کارایی بهتر الگوریتم در یافتن جواب بهینه با وجود قیود تحمیل شده بر سیستم دارد. همان‌گونه نشان داده شده است می‌توان تمامی معیار مورد نظر را صفر در نظر گرفته چراکه تمامی اعداد این ستون ضریبی از  $10^{-12}$  می‌باشند. شکل ۱۰ همگرایی الگوریتم مورد نظر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از همگرایی نشان داده شده است الگوریتم می‌تواند در تکرار قابل قبولی به مقدار بهینه همگرا شود که نشان از قابلیت مناسب جستجوی محلی و نهایی دارد. جدول ۲ مقایسه‌ای برای روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود در مقالات است. برای راحتی خواننده، مقایسه این مقاله در مقایسه با مقاله [۱۷] انجام گرفته است. به عبارتی دیگر روش‌های معرفی شده در جدول ۲ در مرجع [۱۷] ارجاع داده شده‌اند. همان‌گونه از نتایج کاملاً مشهود است روش پیشنهادی مقدار عددی بهتری داشته است. از طرفی برای نشان دادن میزان بهبود جواب نهایی به دست آمده از روش پیشنهادی، فرمول زیر ارائه شده است:

$$improv = \frac{fit_{other} - fit_{proposed}}{fit_{other}} \times 100 \quad (22)$$

برای سیستم مورد مطالعه بهترین مقادیر به دست آمده برای واحدهای تولیدی در جدول ۳ داده شده است. شکل ۱۳ همگرایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با سایر روش‌ها مقایسه کاملی با سایر روش‌های موجود در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور دسترسی آسان‌تر خواننده، کلیه این روش‌ها از مرجع [۱۸] قابل دسترسی است.

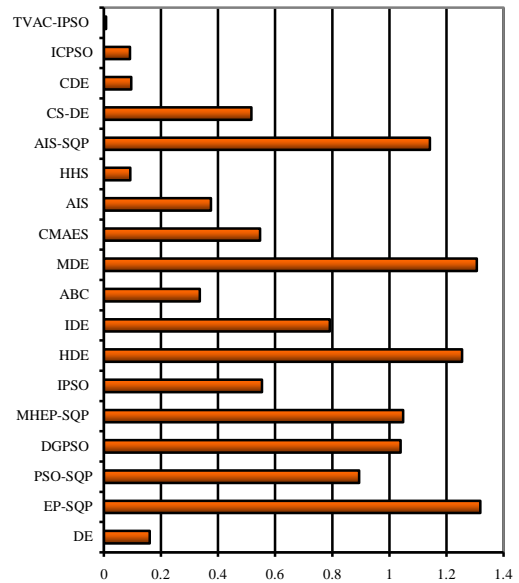


شکل ۱۳: همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

جدول ۳: نتایج به دست آمده برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

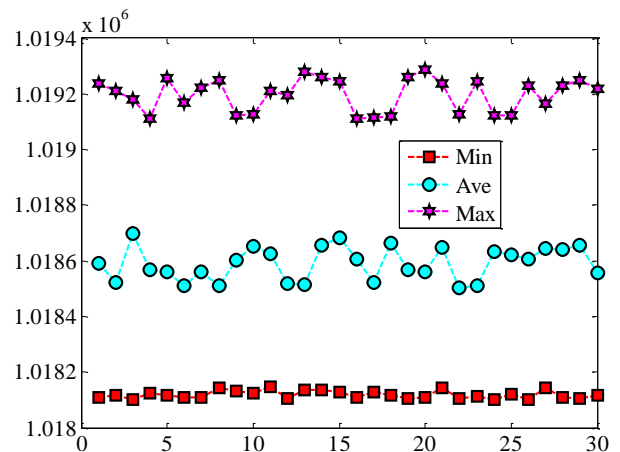
Unit	P <sub>G1</sub>	P <sub>G2</sub>	P <sub>G3</sub>	P <sub>G4</sub>	P <sub>G5</sub>
Value(Mw)	۸۷/۸۱	۱۷۹/۷۲	۹۷/۴۱	۱۱۰/۸۱	۱۱۰/۸۱
Unit	P <sub>G6</sub>	P <sub>G7</sub>	P <sub>G8</sub>	P <sub>G9</sub>	P <sub>G10</sub>
Value(Mw)	۱۳۰/۰	۲۸۴/۶۸	۲۸۴/۶	۲۵۹/۶	۱۴۰/۰
Unit	P <sub>G11</sub>	P <sub>G12</sub>	P <sub>G13</sub>	P <sub>G14</sub>	P <sub>G15</sub>
Value(Mw)	۳۰۴/۵۲	۳۹۴/۲۸	۲۱۴/۷۶	۱۶۸/۸	۱۶۸/۸
Unit	P <sub>G16</sub>	P <sub>G17</sub>	P <sub>G18</sub>	P <sub>G19</sub>	P <sub>G20</sub>
Value(Mw)	۵۱۱/۲۸	۵۱۱/۲۸	۴۸۹/۲۸	۴۸۹/۲۸	۳۹۴/۲۸
Unit	P <sub>G21</sub>	P <sub>G22</sub>	P <sub>G23</sub>	P <sub>G24</sub>	P <sub>G25</sub>
Value(Mw)	۵۲۳/۲۸	۵۲۳/۲۸	۵۲۳/۲۸	۵۲۳/۲۸	۵۲۳/۲۸
Unit	P <sub>G26</sub>	P <sub>G27</sub>	P <sub>G28</sub>	P <sub>G29</sub>	P <sub>G30</sub>
Value(Mw)	۹۲/۷۱	۱۰/۰	۱۰/۰	۱۰/۰	۵۲۳/۲۸
Unit	P <sub>G31</sub>	P <sub>G32</sub>	P <sub>G33</sub>	P <sub>G34</sub>	P <sub>G35</sub>
Value(Mw)	۱۶۴/۸	۱۶۴/۸	۱۹۰/۰	۱۹۰/۰	۱۹۰/۰
Unit	P <sub>G36</sub>	P <sub>G37</sub>	P <sub>G38</sub>	P <sub>G39</sub>	P <sub>G40</sub>
Value(Mw)	۵۱۱/۲۹	۱۱۰/۰	۱۱۰/۰	۱۱۰/۰	۱۶۴/۸

جدول ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در پیدا کردن پاسخ بهینه از سایر روش‌های ذکر شده موفق‌تر بوده است. تولید در بعضی از واحدها در مقدار مرزی قرار دارد و هزینه کل تولید به دست آمده در این روش از سایر روش‌ها کم‌تر است. زمان اجرای روش به الگوریتم، ساختار رایانه مورد استفاده و کارایی کد نویسی برنامه دارد. در عین حال اجراهای متعدد روش پیشنهاد شده، نشان‌دهنده زمان اجرای قابل مقایسه با سایر روش‌ها (در حدود چند ثانیه) است. همچنین میانگین و انحراف معیار پاسخ‌های به دست آمده در اجراهای متعدد برنامه، در حد قابل قبولی بوده و کارایی روش را برای استفاده‌های بعدی نشان می‌دهد. با توجه به زمان اندک لازم برای اجرای الگوریتم، می‌توان از آن برای توزیع بار اقتصادی که بر مبنای پیش‌بینی بار و معمولاً در بازه‌های چندین دقیقه‌ای یا ساعتی انجام می‌یابد، استفاده کرد. شکل ۱۴ نتیجه ۳۰ اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. انحراف



شکل ۱۱: میزان بهبود مقدار هزینه نهایی برای الگوریتم پیشنهادی و سایر روش‌های ارائه شده در مقالات

شکل ۱۲ نتیجه ۳۰ اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. انحراف معیار مناسب با وجود افزایش تعداد واحدهای نیروگاهی (تعداد متغیرها) از ویژگی‌های بارز روش پیشنهادی است.

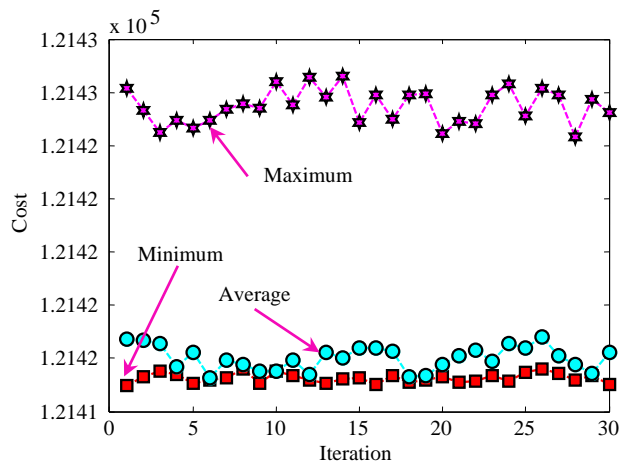


شکل ۱۲: نتیجه اجرای ۳۰ بار برنامه بخش بار برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

### ۵-۳- مقایسه عملکرد سیستم در یک ساعت

در این قسمت عملکرد سیستم برای یک ساعت مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عبارتی دیگر، فرمول‌بندی برای این سناریو کاملاً مشابه قبلی است ولی با این تفاوت که به جای ۲۴ ساعت برای یک ساعت در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه آن محدودیت‌های نرخ افزایش و کاهش معنی نخواهند داشت. در حقیقت در این قسمت عملکرد الگوریتم بر روی یک سیستم مقیاس بزرگ تا تابع هزینه ناصاف بررسی می‌شود. به عبارتی دیگر، به منظور نشان دادن الگوریتم بر روی یک سیستم مقیاس بزرگ با واحدهای تولیدی مختلف با در نظر گرفتن اثر شیر ورودی، سیستم ۴۰ نیروگاهی از مرجع [۱۸] انتخاب شده است.

به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می‌کنند، ارائه می‌شود. تکنیک‌های بهینه‌سازی کلاسیک مثل روش‌های جستجوی مستقیم و گرادبان قادر نیستند پاسخ بهینه کلی را به دست دهند، همچنین سایر الگوریتم‌های تکاملی تنها یک پاسخ تا حدودی خوب را فراهم می‌کنند. ولی ارائه الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته جستجوی هارمونی قادر است بهینه‌سازی را تحقق بخشد. برای نشان دادن توانمندی الگوریتم ارائه‌شده، این روش بر روی سیستم‌های آزمون قدرت مختلف اعمال و نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم در یافتن پاسخ کلی نسبت به هم‌تاهای خود بسیار صحیح و قوی‌تر است. نتایج حاصل از توزیع اقتصادی بار نشان‌دهنده این است که الگوریتم پیشنهادی دارای کارایی بیش‌تر در مواجهه‌شدن با مسائل پیچیده‌تر بوده است. در تابع هدف ارائه‌شده، هم‌زمان با کمینه‌سازی هزینه تولید به حداقل کردن تلفات شبکه انتقال نیز توجه شده است و روش ارائه‌شده در یافتن نقطه بهینه نزدیک به نقطه بهینه کلی موفق‌تر بوده است.



شکل ۱۴: نتیجه اجرای ۳۰ بار برنامه پخش بار برای سیستم ۴۰ نیروگاهی، مقدار بیشینه، کمینه و میانگین

### مراجع

- [1] F. Zaman, S. M. Elsayed, T. Ray and R. A. Sarker, "Configuring two-algorithm-based evolutionary approach for solving dynamic economic dispatch problems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 53, pp. 105-125, 2016.
- [2] M. Basu, "Quasi-oppositional group search optimization for multi-area dynamic economic dispatch," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 356-367, 2016.
- [3] A. Kavousi-Fard and A. Khosravi, "An intelligent  $\theta$ -Modified Bat Algorithm to solve the non-convex economic dispatch problem considering practical constraints," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 189-196, 2016.
- [4] A. Meng, H. Hu, H. Yin, X. Peng and Z. Guo, "Crisscross optimization algorithm for large-scale dynamic economic dispatch problem with valve-point effects," *Energy*, vol. 93, pp. 2175-2190, 2015.

معیار مناسب با وجود افزایش تعداد واحدهای نیروگاهی (تعداد متغیرها) از ویژگی‌های بارز روش پیشنهادی است. به‌عبارتی دیگر، به منظور بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده نسبت به تغییر ضریب هزینه سوخت، نتایج هزینه تولیدی نیروگاه‌ها در شبکه ۴۰ نیروگاهی با زای اجرای مختلف محاسبه شده و نتایج به دست آمده در شکل ۱۳ ارائه شده است.

### جدول ۴: مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود در مقالات

#### برای سیستم ۴۰ نیروگاهی

Methods	Best Cost (\$/h)	Average Cost (\$/h)	Worst Cost (\$/h)
HGPSO	۱۲۴۷۹۷/۱۳	۱۲۶۸۵۵/۷۰	---
SPSO	۱۲۴۳۵۰/۴۰	۱۲۶۰۷۴/۴۰	---
PSO	۱۲۳۹۳۰/۴۵	۱۲۴۱۵۴/۴۹	---
CEP	۱۲۳۴۸۸/۲۹	۱۲۴۷۹۳/۴۸	۱۲۶۹۰۲/۸۹
HGAPSO	۱۲۲۷۸۰/۰۰	۱۲۴۵۷۵/۷۰	---
FEP	۱۲۲۶۷۹/۷۱	۱۲۴۱۱۹/۳۷	۱۲۷۲۴۵/۵۹
MFEP	۱۲۲۶۴۷/۵۷	۱۲۳۴۸۹/۷۴	۱۲۴۳۵۶/۴۷
IFEP	۱۲۲۶۲۴/۳۵	۱۲۳۳۸۲/۰۰	۱۲۵۷۴۰/۶۳
TM	۱۲۲۴۷۷/۷۸	۱۲۳۰۷۸/۲۱	۱۲۴۶۹۳/۸۱
EP-SQP	۱۲۲۳۲۳/۹۷	۱۲۲۳۷۹/۶۳	---
MPSO	۱۲۲۲۵۲/۲۶	---	---
ESO	۱۲۲۱۲۲/۱۶	۱۲۲۵۵۸/۴۵	۱۲۳۱۴۳/۰۷
HPSOM	۱۲۲۱۱۲/۴۰	۱۲۴۳۵۰/۸۷	---
PSO-SQP	۱۲۲۰۹۴/۶۷	۱۲۲۲۴۵/۲۵	---
PSO-LRS	۱۲۲۰۳۵/۷۹	۱۲۲۵۵۸/۴۵	۱۲۳۴۶۱/۶۷
Improved GA	۱۲۱۹۱۵/۹۳	۱۲۲۸۱۱/۴۱	۱۲۳۳۳۴/۰۰
HPSOWM	۱۲۱۹۱۵/۳۰	۱۲۲۸۴۴/۴۰	---
IGAMU	۱۲۱۸۱۹/۲۵	---	---
HDE	۱۲۱۸۱۳/۲۶	۱۲۲۷۰۵/۶۶	---
DEC(2)-SQP(1)	۱۲۱۷۴۱/۹۷	۱۲۲۲۹۵/۱۲	۱۲۲۸۳۹/۲۹
PSO	۱۲۱۷۳۵/۴۷	۱۲۲۴۱۳/۹۱	۱۲۳۴۶۷/۴۰
APSO(1)	۱۲۱۷۰۴/۷۳	۱۲۲۲۲۱/۳۶	۱۲۲۹۹۵/۰۹
ST-HDE	۱۲۱۶۹۸/۵۱	۱۲۲۳۰۴/۳۰	---
NPSO-LRS	۱۲۱۶۶۴/۴۳	۱۲۲۲۰۹/۳۱	۱۲۲۹۸۱/۵۹
APSO(2)	۱۲۱۶۶۳/۵۲	۱۲۲۱۵۳/۶۷	۱۲۲۹۱۲/۳۹
SOHPSO	۱۲۱۵۰۱/۱۴	۱۲۱۸۵۳/۵۷	۱۲۲۴۴۶/۳۰
BBO	۱۲۱۴۷۹/۵۰	۱۲۱۵۱۲/۰۶	۱۲۱۶۸۸/۶۶
BF	۱۲۱۴۲۳/۶۳	۱۲۱۸۱۴/۹۴	---
GA-PS-SQP	۱۲۱۴۵۸/۰۰	۱۲۲۰۳۹/۰۰	---
PS	۱۲۱۴۱۵/۱۴	۱۲۲۳۲۲/۶۵	۱۲۵۴۸۶/۲۹
FA	۱۲۱۴۱۵/۰۵	۱۲۱۴۱۶/۵۷	۱۲۱۴۲۴/۵۶
MHSA	۱۲۱۴۱۴/۹۵	۱۲۱۴۱۵/۳۲	۱۲۱۴۲۴/۳۷

### ۶- نتیجه‌گیری

توزیع دینامیکی توان در طول یک شبانه‌روز و یا یک ساعت، روشی با بیش‌ترین کارآمدی، کم‌ترین هزینه و بهره‌برداری قابل‌اطمینان یک سیستم قدرت را به‌وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسئله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها

- non-convex dynamic economic power dispatch,” *Energy*, vol. 44, pp. 228-240, 2012.
- [۱۳] ف. محمدی، ح. عبدی و ا. دهنوی، «حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۳۴۳-۳۵۶، ۱۳۹۵.
- [14] M-Y. Cheng, D. Prayogo, Y-W. Wu and M. M. Lukito, “A Hybrid Harmony Search algorithm for discrete sizing optimization of truss structure,” *Automation in Construction*, vol. 69, pp. 21-33, 2016.
- [15] M. A. Al-Betar, M. A. Awadallah, A. T. Khader and A. L. Bolaji, “Tournament-based harmony search algorithm for non-convex economic load dispatch problem,” *Applied Soft Computing*, vol. 47, pp. 449-459, 2016.
- [16] A. Pathom, K. Hiroyuki and T. Eiichi, “A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 17, no. 2, pp. 411-416, 2002.
- [17] B. Mohammadi-ivatloo, A. Rabiee and M. Ehsan, “Time-varying acceleration coefficients IPSO for solving dynamic economic dispatch with non-smooth cost function,” *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 175-183, 2012.
- [18] X.S. Yang, S. S. Sadat Hosseini and A. H. Gandomi, “Firefly Algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect,” *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 1180-1186, 2012.
- [5] A. Meng, J. Li and H. Yin, “An efficient crisscross optimization solution to large-scale non-convex economic load dispatch with multiple fuel types and valve-point effects,” *Energy*, vol. 113, pp. 1147-1161, 2016.
- [6] L. Z. Xiong and J.D. Glover, “A Zoom Feature for a Programming Solution to Economic Dispatch Including Transmission Losses,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 7, no. 2, pp. 544-50, 1992.
- [7] X. Yan and V.H. Quintana, “An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security-Constrained Economic Dispatch,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol.12, no. 2, pp. 803-810, 1997.
- [8] G.C. Contaxis, C. Delkis and G. Kerres, “Decoupled Optimal Load Flow using Linear or Quadratic Programming,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 1, no. 2, pp 1-7, 1986.
- [9] T. Niknam, R. Azizipanah-Abarghooee and J. Aghaei, “A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 28, no. 2, pp. 749-763, 2013.
- [10] Y.N. Vijay Kumar, S. Sivanagaraju and C. V. Suresh, “Analyzing the effect of dynamic loads on economic dispatch in the presence of interline power flow controller using modified BAT algorithm,” *Electrical Systems and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 45-67, 2016.
- [11] D. Zou, S. Li, G-G Wang, Z. Li and H. Ouyang, “An improved differential evolution algorithm for the economic load dispatch problems with or without valve-point effects,” *Applied Energy*, vol. 181, pp. 375-390, 2016.
- [12] B. Mohammadi-ivatloo, A. Rabiee, A. Soroudi and M. Ehsan, “Imperialist competitive algorithm for solving

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Optimal load flow  
<sup>2</sup> Interline Power Flow Controller  
<sup>3</sup> Improved differential evolutionary  
<sup>4</sup> Dynamic economic emission dispatch  
<sup>5</sup> Emergency Demand Response Program