



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 13, No. 3, 2022  
Research Paper

## Dynamic Economic/Emission Dispatch with Probability Model of Wind Power with Modified Virus Colony Search Algorithm

Mahdi Noshyar<sup>1</sup>, Ali Ghasemi-Marzbali<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate professor Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup> Assistant professor- Department of Electrical and Biomedical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

### Abstract:

This paper deals with the dynamic economic and emission dispatch during a day as an important challenge in engineering. On the other hand, renewable energy provides an undeniable contribution to the energy supply. Therefore, to create an efficient model, the probability wind energy models have been proposed. In principle, this problem has several limitations and to bring it to reality, practical and nonlinear constraints such as power balance, ramp rate, prohibited zone, non-smooth cost function, and production constraints have been considered. Since these functions i.e. emission, cost, and wind models are conflicting in nature, to solve this problem, a multi-objective virus colony search algorithm (VCS) based on Pareto theory has been proposed. To improve the performance of the virus colony search algorithm, the chaos theory has been employed that eliminates the weakness of the standard algorithm, i.e. the speed of convergence and increased number of iterations of the algorithm to achieve the optimal solution. Chaos theory refers to the nature of complex systems with unpredictable behavior. Using the stochastic properties of chaos system, Chaos theory can improve the quality of population distribution in search space and enhance algorithm convergence function. The fuzzy decision function is also used to select the best solution from the set of solutions. The proposed model and method are applied to different systems and in some cases are compared with other methods in the articles. The results show an improvement in the performance of the proposed algorithm. The results also show that the presence of renewable resources has reduced production costs and thus increased network security.

**Keywords:** probability model of wind power, dynamic economic/emission dispatch, virus colony search, multi-objective optimization, nonlinear constraints.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2021.120104.1305>

## توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک

### الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس

مهدی نوشیار<sup>۱\*</sup>، علی قاسمی مرزبالی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه محقق اردبیلی- اردبیل - ایران

nooshyar@uma.ac.ir

۲- استادیار- گروه مهندسی برق و پزشکی - دانشگاه علوم و فنون مازندران- بابل - ایران

ali.ghasemi@ustmb.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، به مدل‌سازی بهینه دینامیکی توان و آلودگی در طول یک شبانه‌روز به‌عنوان یک چالش مهم در مهندسی پرداخته شده است. همچنین، در سیستم قدرت امروزی، انرژی‌های تجدیدپذیر، سهم انکارناپذیری را در تأمین انرژی ارائه می‌کنند؛ از این رو، برای ایجاد یک مدل کارآمد، علاوه بر در نظر گرفتن توابع هزینه و آلودگی، مدل‌سازی احتمالاتی انرژی باد پیشنهاد شده است. اصولاً چنین مسئله‌ای دارای محدودیت‌های متعددی است و به‌منظور سوق دادن آن به واقعیت، قیود عملی و غیرخطی مانند تعادل توان، نرخ شیب، مناطق ممنوعه، تابع هزینه ناصاف و محدودیت‌های تولید لحاظ شده‌اند. با توجه به اینکه این توابع از نظر ماهیت با یکدیگر در تضادند، برای حل این مسئله، الگوریتم چندهدفه کلونی جستجوی ویروس مبتنی بر تئوری پارتو ارائه شده است. برای بهبود عملکرد الگوریتم جستجوی کلونی ویروس از نظریه آشوب بهره گرفته شده است که ضعف الگوریتم استاندارد، یعنی سرعت همگرایی و افزایش تعداد تکرار اجرای الگوریتم را برای رسیدن به جواب بهینه برطرف می‌کند. تئوری آشوب به ماهیت سیستم‌های پیچیده با رفتار پیش‌بینی‌ناپذیر و الگوبرداری با استفاده از توابع یا ارتباط رفتار آشفته برای الگوریتم به یک پارامتر اشاره دارد. با استفاده از ویژگی‌های تصادفی و پیمایشی سیستم‌های آشفته، استراتژی آشوب می‌تواند کیفیت توزیع جمعیت را در فضای جستجو بهبود دهد و کارایی همگرایی الگوریتم را ارتقا بخشد. همچنین، برای انتخاب بهترین جواب از بین مجموعه جواب‌ها از تابع تصمیم‌گیری فازی استفاده شده است. مدل و روش پیشنهادی روی سیستم‌های مختلف، اعمال و در مواردی با سایر روش‌های موجود در مقالات مقایسه شده است. نتایج نشان از بهبود عملکرد الگوریتم پیشنهادی دارد. همچنین، نتایج نشان دادند حضور منابع تجدیدپذیر کاهش هزینه‌ها، تولید و در نتیجه، افزایش امنیت شبکه را به همراه داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی احتمالاتی توان باد، پخش دینامیکی توان و آلودگی، الگوریتم کلونی ویروس، بهینه‌سازی

چندهدفه، قیود غیرخطی

### ۱- مقدمه

منابع تولید انرژی به حساب می‌آیند؛ ولی رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و تقاضا برای این کالا سبب شده است پیچیدگی شبکه‌های سراسری برق نیز افزوده شود. امروزه یکی از مهم‌ترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، توزیع بهینه بار بین واحدهای تولید انرژی از نوع حرارتی یا تجدیدپذیر است؛ به نحوی که کمترین هزینه را برای نیروگاه‌ها به همراه داشته باشد. در بیشتر سیستم‌های قدرت به‌هم پیوسته امروزی، نیروگاه‌های حرارتی، قسمت عمده‌ای از توان موردنیاز را تولید می‌کنند. یک معیار مهم در

در هر کشوری، سیستم‌های قدرت الکتریکی مهم‌ترین

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

نام نویسنده مسئول: مهدی نوشیار

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - دانشگاه محقق

اردبیلی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پشتوانه اقتصادی و سیاسی کشورها به میزان بهره‌وری آنها از منابع فسیلی بستگی دارد و تهی شدن منابع فسیلی یا حتی میل به این سمت، نه تنها تهدیدی بر اقتصاد کشورها دارد، نگرانی عمده‌ای را برای نظام اقتصادی سایر ملل موجب می‌شود. با پیشرفت علوم و فناوری‌های مربوط به استفاده از منابع انرژی تجدیدشونده در جهان، نیاز به تحقیق‌های فراوان در این ارتباط و افزایش سقف منابع انرژی تجدیدشونده در سبد انرژی کشور وجود دارد [۴]. براساس مرور مقالات انجام شده، مقالات منتشر شده در دو دسته روش‌های مبتنی بر روش‌های ریاضی و هوش بهینه‌سازی تقسیم شده‌اند. در دسته نخست، به موارد زیر اشاره می‌شود: مسئله پخش بهینه آلودگی با در نظر گرفتن حل خطی مسئله، یکی از روش‌های موجود است که در مرجع [۵] داده شده است. مشکل این راه‌حل در نظر گرفتن حل خطی مسئله و ایجاد خطای زیاد تطابق نداشتن مسئله با واقعیت است. همچنین، به دلیل غیرخطی بودن ذاتی مسئله، حل روش‌هایی چون روش لامبدا و گرادینان ناکارآمد خواهد بود. در مراجع [۶] حل مسئله در حالت خطی با در نظر گرفتن مجموع تابع هدف چندمنظوره با وزن‌دهی براساس پارامتر انجام شده است. مشکل این روش در حل خطی و مدت‌زمان اجرای برنامه است. از دیگر معایب این روش، ناتوانی معیار پارامتر به‌کاررفته برای یافتن جواب بهینه در حل مسئله پخش بار به‌صورت تابع نامنظم است [۷]. بیشتر روش‌های ریاضی تکراری‌اند که با اینکه جواب نسبتاً دقیقی برای مسئله را به دست می‌دهند، محدودیت‌های بسیاری در کاربردهای عملی دارند؛ از جمله اینکه باید مشخصه نرخ افزایش حرارتی واحدها پیوسته باشد. همچنین، در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا با اینکه با این قبیل محدودیت‌ها مواجه نیستند، با افزایش تعداد واحدها زمان و حافظه موردنیاز برای حل مسئله به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۸]؛ اما در دسته دوم مبتنی بر پایه الگوریتم‌های هوشمند علاوه بر مواجه نبودن با محدودیت‌های ذکر شده، زمان و ابعاد حل مسئله تقریباً به‌صورت خطی با تعداد واحدها افزایش می‌یابد که با وجود رایانه‌های امروزی انتخابی صحیح برای حل مسائل عملی توزیع اقتصادی بار به نظر می‌رسند. در مرجع [۹] به الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات براساس

عملکرد سیستم قدرت برای پاسخگویی تقاضای بار، حداقل کردن هزینه سوخت با استفاده از ترکیب بهینه به مدار قرار دادن واحدهای مختلف است و نیز در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته تولیدکننده‌ها سعی در حداکثر کردن سود خود و مصرف‌کننده‌ها سعی در حداقل کردن هزینه خرید توان دارند. استراتژی‌های گوناگونی برای حداقل کردن هزینه واحدهای تولید انرژی الکتریکی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی پیشنهاد شده‌اند. توزیع اقتصادی بار و مشارکت واحدها جزء بهترین راه‌حل‌ها برای تأمین برق با کیفیت است. توزیع بهینه یا اقتصادی بار در واقع تخصیص تولید بین واحدهای فعال است؛ به نحوی که هم‌زمان با تأمین تقاضای بار، حدود تولید، نرخ‌های افزایشی یا کاهش‌ی واحدها، نواحی کار ممنوع و سایر محدودیت‌های نیروگاهها در نظر گرفته شده‌اند و با لحاظ تلفات شبکه انتقال، هزینه کل تولید در هر بازه زمانی و برای شرایط بار پیش‌بینی شده حداقل شده است [۱]. با در نظر گرفتن توزیع بهینه توان برای یک دوره شبانه‌روز به طبع قیود مختلفی از جمله نرخ شیب افزایشی و کاهش‌ی، محدوده تولید، مناطق ممنوعه، حداکثر توان انتقالی و غیره به مسئله بهینه‌سازی اضافه خواهند شد. همچنین، یکی دیگر از نکات مهم در تولید واحدهای حرارتی، بحث میزان آلودگی‌های محیطی است [۲]. آلودگی‌های محیط‌زیستی در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای خطرناکی چون مونواکسید و دی‌اکسید کربن یکی از مسائل مهم در صنعت برق امروزی است؛ بنابراین، در ادامه توسعه مدل توزیع بهینه دینامیکی توان، مدل‌سازی آلودگی در تحقیقات پیشنهاد شده است؛ در نتیجه این عمل، دو تابع هدف به‌صورت غیرخطی وجود دارد که در ذات باهم متفاوت‌اند. در این زمینه، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. همچنین، آلودگی محیط‌زیست در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی و شتاب فزاینده در جهت به پایان بردن منابع انرژی، دو بحران بزرگی‌اند که بشر امروزه با آنها روبه‌روست [۳]. تحولات جهانی در زمینه توجه به حفظ محیط‌زیست و فناپذیر بودن منابع فسیلی، گرایش به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را سرعت می‌بخشد و روبه‌روز توجه بیشتری را به خود معطوف می‌کند. بدیهی است امروزه

شرح زیرند:

الف) مدل‌سازی چندهدفه الگوریتم کلونی جستجوی ویروس بر مبنای معیار پارتو و توسعه توانایی جستجو با تئوری آشوب و بهره‌گیری از تئوری تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب بهترین جواب؛

ب) مدل‌سازی پخش بار دینامیکی توان با در نظر گرفتن آلودگی و منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت؛

ج) ارزیابی مدل و الگوریتم پیشنهادی در سناریوهای مختلف و مقایسه با سایر روش‌های موجود در مقالات.

در ادامه، در بخش دوم، به مدل‌سازی دینامیکی توان، آلودگی و انرژی باد پرداخته شده است. بخش سوم به مدل‌سازی الگوریتم چندهدفه پیشنهادی اختصاص یافته است. در بخش چهارم، نحوه اجرای الگوریتم بر مسئله پخش دینامیکی توان و در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی بررسی شده‌اند. در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری شده است.

## ۲- مدل‌سازی پخش بار دینامیکی توان،

### آلودگی با حضور منابع باد

#### ۲-۱- پخش دینامیکی توان با تابع هزینه ناصاف

هدف اولیه توزیع اقتصادی توان، به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید است. مسئله پخش بار اقتصادی، مقدار بار را برای نیروگاهها به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاههای فعال در شبکه است؛ بنابراین، مسئله پخش بار اقتصادی با تابع هدف زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\min \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_g} F_{i,t}(P_{i,t}) \quad (1)$$

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. تابع هزینه

سیستم خودشناختی برای تعیین بهینه جواب در توزیع اقتصادی بار و آلودگی پرداخته شده است. در این مرجع، علاوه بر اینکه مدل‌سازی از الگوریتم پیشنهادی ارائه شده، اثر امنیت شبکه هم بر توزیع اقتصادی بار در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۰] به مدل‌سازی تأثیر انرژی باد بر توزیع اقتصادی توان و آلودگی پرداخته شده است. در این مدل از روش‌های احتمالاتی برای مدل‌سازی انرژی باد استفاده شده است. در مرجع [۱۱] با روش مبتنی بر منطقه جستجوی قابل اعتماد به حل مسئله توزیع دینامیکی توان و آلودگی پرداخته شده است. در مرجع [۱۲] از مدل خودتطبیقی جستجوی هارمونی برای حل مسئله مدنظر استفاده شده است. درحقیقت در این الگوریتم توسعه‌یافته، ضرایب کنترلی به صورت خودتنظیم‌یافته با تکرارهای برنامه تنظیم می‌شوند. همچنین، برای افزایش جستجوی محلی و نهایی، نظریه آشوب بر مبنای لجستیک به کار رفته است. در [۱۳] 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 مختلف، اعمال و نتایج حاصل با سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. در مرجع [۱۴] از روش مبتنی بر منطقه جستجوی قابل اعتماد به حل مسئله توزیع دینامیکی توان و آلودگی پرداخته شده است. در این روش، علاوه بر توسعه الگوریتم پیشنهادی براساس جستجوی کلی، اثر سیستم ذخیره انرژی در مسئله بهینه‌سازی دینامیکی توان بررسی شده است. یکی از نقاط ضعف روش‌های پیشین، قرارگرفتن در نقاط محلی و نبود جستجوگر کلی قوی در این الگوریتم‌ها است. با در نظر گرفتن مدل احتمالاتی برای انرژی باد، به طبع مدل پیچیده‌تر و مشکل‌تری نسبت به سایر مدل‌های کلاسیک خواهیم داشت که برای حل این مشکل، الگوریتم توانمند جستجوی کلونی ویروس، یکی از قابل‌اعتمادترین روش‌های بهینه‌سازی خواهد بود که در این مقاله به آن پرداخته شده است [۱۵]. روش پیشنهادی، یک روش بسیار جدید برای سال ۲۰۱۶ بوده که در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی عملکرد سریع‌تر و بهتری داشته است. مطابق مروری بر مقالات منتشرشده، جنبه‌های متمایز و شاخص این مقاله به

مقیدکننده به تابع هزینه، یکی دیگر از چالش‌های مهندسی است. به مفهومی ساده‌تر، توزیع بهینه آلودگی همانند توزیع بهینه توان است و هدف نهایی، کاهش آلودگی تولید شده است. در این تابع، هدف کم کردن آلودگی‌های محیط‌زیست مانند اکسید سولفور و اکسید نیتروژن براساس تابع‌نمایی زیر است [۱۴]:

$$E(P_{i,G}) = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{i,G_i} + \gamma_i P_{i,G_i}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{i,G_i}) \quad (۴)$$

که  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب تابع آلودگی برای آمین ژنراتور است.

### ۲-۳- مدل احتمالاتی توان تولیدی از انرژی باد

با استفاده از انرژی باد به‌عنوان یک منبع انرژی در درازمدت، دو برابر مصرف انرژی الکتریکی فعلی جهان تأمین می‌شود. توربین‌های بادی، انرژی موجود در باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. باد یک منبع متغیر است که انرژی آن ذخیره نمی‌شود؛ بنابراین، توربین‌های بادی باید در همان زمان، بهره‌برداری شوند [۱۰]. اصولاً برای تخمین میزان تولید توان بادی از تابع pdf استفاده می‌شود که براساس تابع weibull تابع چگالی احتمال براساس سرعت باد ( $v$ ) و دو پارامتر تخمینی  $c$  و  $k$  به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (۵)$$

$$k = (\sigma/v_m)^{-1.086}, c = v_m \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)^{-1} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق،  $v_m$  و  $\sigma$  به ترتیب سرعت باد و انحراف استانداردند. همان‌گونه که بیان شد انرژی باد به سرعت و مکان آن بستگی دارد که برای یک ساعت خاص به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_i \\ w_r \times \frac{v - v_i}{v_r - v_i} & v_i \leq v \leq v_r \\ w_r & v_r \leq v \leq v_0 \\ 0 & v_0 \leq v \end{cases} \quad (۷)$$

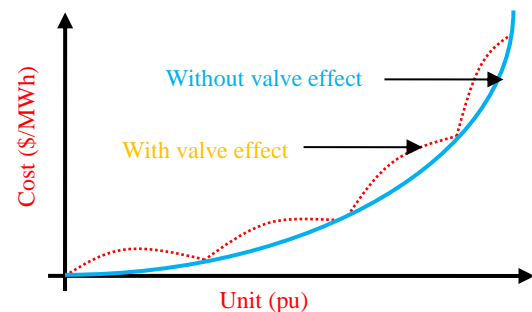
$F_{i,t}(P_{i,t})$  معمولاً به‌صورت معادله درجه دوم پیوسته زیر بیان می‌شود:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (۲)$$

در رابطه فوق، ضرایب  $a_i, b_i$  و  $c_i$  ضرایب هزینه  $i$  امین ژنراتورند. با افزودن بخش سینوسی به تابع هزینه فوق، تابع درجه‌دو 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 می‌شوند:

$$F_{i,t}(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 + |e_i \sin(f_i (P_{i,t}^{\min} - P_{i,t}))| \quad (۳)$$

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.



شکل ۱- تأثیر شیر ورودی بر تابع هزینه، خط پیوسته معادله درجه‌دو و نقطه چین تأثیر شیر ورودی بر تابع هزینه

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.

### ۲-۲- تابع هزینه آلودگی تابع‌نمایی

تعیین تابع هدف خروجی و هزینه برای میزان آلودگی منتشر شده و اعمال آن به‌عنوان یک تابع هدف مجزا و

$$C_{p,w_i} = k_{p,w_i} (w_{ij,av} - w_{ij}) \quad (11)$$

$$= k_{p,w_i} \int_{w_i}^{w_{ij}} (w - w_{ij}) f_w(w) dw$$

که در رابطه فوق،  $k_{p,w_i}$  ضریب هزینه جریمه برای تولید بیش از حد  $i$ th منبع تولید توان بادی،  $w_{ij,av}$  مقدار واقعی یا در دسترس توان باد فعلی برای  $i$ th منبع تولید توان بادی و  $w_{ij}$  نرخ خروجی توان از  $i$ th منبع تولید توان بادی است. به صورت مشابه، بخش سوم ضریب هزینه جریمه برای مواقعی که مقدار توان باد فعلی از مقدار برنامه‌ریزی شده کمتر باشد، برابر است با [۱۰]:

$$C_{r,w_i} = k_{r,w_i} (-w_{ij,av} + w_{ij}) \quad (12)$$

$$= k_{r,w_i} \int_0^{w_i} (-w + w_{ij}) f_w(w) dw$$

در رابطه فوق،  $k_{r,w_i}$  ضریب هزینه جریمه برای موقعی است که توان فعلی برای  $i$ th منبع تولید توان بادی از مقدار برنامه‌ریزی شده کمتر باشد.

## ۲-۴- قیود اعمال بر مسئله پخش دینامیکی توان، آلودگی با حضور منابع بادی

• توازن تولید و مصرف در سیستم مجموع توان تولیدشده کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم، برابر باشد.

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,t} + P_{w,t} - P_{D,t} - P_{loss,t}) = 0 \quad (13)$$

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

$$P_{loss,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N B_{ij} P_{i,t} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_{i,t} + B_{00} \quad (14)$$

• حدود تولید

در یک سیستم قدرت هر واحد تولیدی به دلایلی فنی

که با توسعه تابع چگالی احتمال براساس توابع تبدیل خواهیم داشت:

$$f_w(w) = \begin{cases} \frac{kl(1+\rho l)^{k-1} v_i^k}{c^k} & 0 < w \leq w_r \\ \frac{\exp(-(\frac{1+\rho l}{c} w_i)^k)}{c} & 0 < w \leq w_r \\ 1 - \exp(-v_i/c)^k + \exp(-v_0/c)^k & w = 0 \\ \frac{\exp(-v_r/c)^k - \exp(-v_0/c)^k}{c} & w = w_r \end{cases} \quad (8)$$

که در رابطه فوق،  $\rho = w/w_r$  و  $l = (v_r - v_i)/v_i$  می‌باشند.  $v_i, w_r, v_r$  می‌باشند.  $v_0$  به ترتیب نرخ سرعت باد، نرخ توان باد، سرعت قطع داخلی و سرعت قطع خارجی می‌باشند. به عبارتی دیگر، سرعت قطع، سرعتی است که اگر مقدار فعلی از آن حد کمتر یا بالاتر شود آنگاه سیستم به صورت خروجی صفر یا مقدار ثابت عمل می‌نماید. در نهایت بر اساس هزینه تولید، تابع هزینه برای عملکرد انرژی باد به صورت زیر فرموله می‌شود [۱۰]:

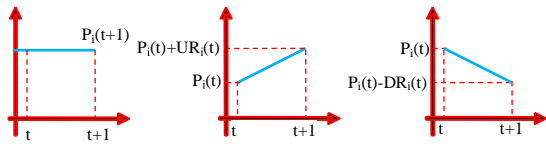
$$PW_{cost}(w_{ij}) = C_{w_i}(w_{ij}) + C_{p,w_i}(w_{ij,av} - w_{ij}) + C_{r,w_i}(w_{ij} - w_{ij,av}) \quad (9)$$

که در تابع فوق،  $w_{ij}$  خروجی برنامه‌ریزی شده برای  $i$ th تولیدکننده بادی در زمان  $j$  است.  $C_{p,w_i}$  و  $C_{r,w_i}$  به عنوان ضرایب وزنی در تخمین بالایی و پایینی در میزان خروجی انرژی باد است. همان‌گونه رابطه فوق نشان می‌دهد، هزینه تولید انرژی باد از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول هزینه تولید توان از انرژی باد بر اساس پروفیل باد است که بر اساس تابع چگالی احتمال  $f_w(w)$  و ضریب هزینه  $i$ th سیستم بادی، می‌تواند به صورت زیر فرموله شود [۱۰]:

$$C_{w_i}(w_{ij}) = d_i f_w(w) w_{ij} \quad (10)$$

بخش دوم هزینه جریمه برای عدم استفاده از تمام توان باد موجود است که معمولاً به صورت نمودار خطی بر اساس تفاوت بین مقدار واقعی و مقدار توان برنامه‌ریزی شده به دست می‌آید [۱۰]:

۶۰ توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس



شکل ۳- به ترتیب از راست به چپ، تغییرات نرخ کاهشی و افزایشی و حالت پایدار برای واحدهای تولیدی

• مناطق ممنوع

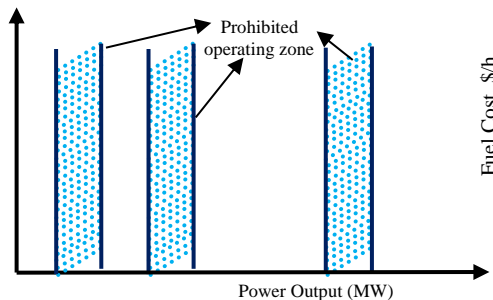
نیروگاهها به دلایل فنی نمی توانند در برخی از نواحی مابین حداقل و حداکثر تولید خودشان توان تولید کنند. این نواحی مناطق ممنوع، نامیده و به صورت  $[P_{i,j}^L, P_{i,j}^U]$  مشخص می شوند. به عبارتی دیگر، برخی از ژنراتورها مناطق اجرایی خاصی دارند که ناشی از محدودیت های فیزیکی مؤلفه های ژنراتور، سوپاپ بخار، ارتعاش در شفت و غیره هستند. این مناطق موجب ایجاد ناپیوستگی در منحنی سوخت ژنراتورها مطابق با شکل ۴ می شوند. وجود این ناپیوستگی ها در منحنی سوخت ژنراتور  $i$  ام به صورت قیود زیر در مسئله DEED در نظر گرفته می شود:

$$P_{i,t} \in \begin{cases} P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,1}^L \\ P_{i,t,j-1}^U \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,j}^L, \quad j = 2, 3, \dots, Z_i \\ P_{i,t,Z_i}^U \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

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

• محدودیت های قابلیت اطمینان و امنیت شبکه

سایر محدودیت های ناشی از معیارهای قابلیت اطمینان و امنیت شبکه نیز به عنوان محدودیت های فنی مسئله توزیع بار اقتصادی در نظر گرفته می شوند. در بیشتر موارد، این محدودیت ها در سایر مطالعات یا برنامه ریزی ها در نظر گرفته می شوند و توزیع اقتصادی بار بدون منظور کردن این محدودیت ها حل می شوند.

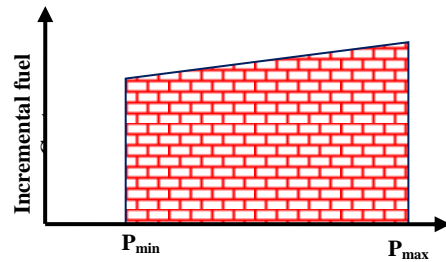


شکل ۴- مناطق ممنوعه برای واحد تولیدی

می تواند در یک رنج مناسبی توان تولید کند؛ زیرا اگر از 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 می شود.

$$P_{i,t}^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\max} \quad (15)$$

در رابطه های فوق، مقدار کمینه توان اکتیو و  $P_{i,t}^{\max}$  مقدار حد بالا برای هر واحد نیروگاهی است. حدود فوق، علاوه بر اینکه ناشی از محدودیت های فنی هر واحدند، باعث می شوند واحد با هزینه کمتر، بیش از حد حداکثر توان مجاز خود و واحد با هزینه بیشتر، کمتر از حد مجاز خود تولید نداشته باشد. شکل ۲ حداقل و حداکثر تولید را نشان می دهد:



شکل ۲- محدوده تولید برای واحد  $i$  ام

• نرخ های افزایشی و کاهشی

به دلایل فنی، نیروگاههای حرارتی نمی توانند به صورت آنی توان خود را افزایش یا کاهش دهند و این افزایش یا کاهش با آهنگی همراه است که با قیود زیر داده می شود:

$$P_i^{\min}(t) \leq P(t)_i \leq P_i^{\max}(t) \quad (16)$$

که  $P_i^{\min}(t) = \max(P_i(t-1) - RDR_i, P_i^{\min})$  و  $RDR_i$

نرخ کاهشی نیروگاه و  $P_i^{\max}(t) = \min(P_i(t-1) + RUR_i, P_i^{\max})$

و  $RUR_i$  نرخ افزایشی نیروگاه است. به منظور اعمال محدودیت های فوق

لازم است وضعیت تولید اولیه هر نیروگاه معلوم باشد. شکل

۳ این محدودیت را نشان می دهد.

شود، ادامه می‌یابد. این رفتار با گام‌های زیر مدل می‌شود:  
گام اول: به‌روزرسانی Hpop با رابطه:

$$H_{pop_i^g} = X_{mean}^g + \sigma_i^g \times N_i(0, C^g) \quad (19)$$

که  $N_i(0, C^g)$  توزیع نرمال با میانگین 0 و ماتریس کوواریانس  $C^g$  با ابعاد  $D \times D$ ، g تکرار فعلی برنامه، D بعد مسئله و  $\sigma_i^g > 0$  است.  $X_{mean}^g$  با مقدار اولیه زیر بیان می‌شود:

$$X_{mean}^0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{pop_i} \quad (20)$$

گام دوم: بهترین بردار  $\gamma$  از بخش قبلی، انتخاب و به‌عنوان بردار والدین با مرکزیت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$X_{mean}^{g+1} = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{\gamma} \omega_i V_{pop_i^{best}} | \omega_i \quad (21)$$

$$= \ln(\gamma + 1) / \left( \sum_{j=1}^{\gamma} (\ln(\gamma + 1) - \ln(j)) \right)$$

که  $\gamma = [N / 2]$  و  $w_i$  ضریب ترکیب و اندیس i نشان‌دهنده بهترین جواب در مجموعه جواب است. بر اساس این، دو مسیر حرکت تکاملی مطابق با روابط زیر خواهیم داشت:

$$P_{\sigma}^{g+1} = (1 - C_{\sigma}) P_{\sigma}^g + \sqrt{C_{\sigma} (2 - C_{\sigma})} \gamma_{\omega} \frac{1}{\sigma^g} (C^g)^{-\frac{1}{2}} (X_{mean}^{g+1} - X_{mean}^g) \quad (22)$$

$$P_C^{g+1} = (1 - C_C) P_C^g + h_{\sigma} \sqrt{C_C (2 - C_C)} \gamma_{\omega} \frac{1}{\sigma^g} (X_{mean}^{g+1} - X_{mean}^g) \quad (23)$$

که  $\gamma_w^{-1} = \sum_{i=1}^{\gamma} w_i^2 \cdot (C^g)^{-0.5}$  متقارن، مثبت و برقرارکننده شرط  $(C^g)^{-0.5} (C^g)^{-0.5} = (C^g)^{-1}$  است.

گام سوم: به‌روزرسانی اندازه  $\sigma^{g+1}$  و ماتریس کوواریانس  $C^{g+1}$  با:

$$\sigma^{g+1} = \sigma^g \times \exp\left(\frac{C_{\sigma}}{d_{\sigma}} \left(\frac{\|P_{\sigma}^{g+1}\|}{E|N(0,1)|} - 1\right)\right) \quad (24)$$

### ۳- الگوریتم چندهدفه کلونی جستجوی

#### ویروس

#### ۳-۱- مفاهیم اولیه

الگوریتم کلونی ویروس (VCS)، روش مبتنی بر جمعیت ویروس‌ها و سلول‌های میزبان است که براساس دو رفتار ویروس در آلوده کردن سلول میزبان و انتشار یا بازتولید بنیان‌گذاری شده است. با توجه به اینکه هدف این مقاله، ارائه یک مدل توسعه‌یافته است، خوانندگان می‌توانند به مرجع [۱۵] برای توضیحات بیشتر رجوع کنند.

#### ۳-۲- تطبیق‌سازی با مدل‌های ریاضی

الگوریتم جستجوی ویروس شامل سه استراتژی است: (۱) روش پیاده‌روی گوسین برای مدل‌کردن انتشار ویروس؛ (۲) روش ماتریس کوواریانس CMA-ES برای مدل‌کردن آسیب‌دیدگی سلول میزبان و (۳) استراتژی تکامل برای مقابله سیستم ایمنی با ویروس. در این الگوریتم، از دو پارامتر کلونی ویروس Vpop و کلونی سلول‌های میزبان Hpop استفاده می‌شوند.

#### ۳-۱- انتشار ویروس

روش پیاده‌روی گوسی یک روش مناسب برای مدل‌کردن این رفتار و دوری‌گزیدن از جواب بهینه محلی است که با رابطه زیر فرموله می‌شود:

$$V_{pop_i} = \text{Gaussian}(G_{best}^g, \tau) + (r_1 G_{best}^g - r_2 V_{pop_i}) \quad (18)$$

I شاخص انتخاب تصادفی از مجموعه  $\{1, 2, \dots, N\}$  است که N تعداد کل جمعیت است.  $G_{best}^g$  بهترین جواب تولیدشده در تکرار g و  $r_1$  و  $r_2$  دو متغیر تصادفی بین ۰ و ۱ هستند.  $V_{pop_i}$  بیان‌کننده i امین مکان از کل جمعیت  $V_{pop_i}$  است.

#### ۳-۲- تأثیرپذیری سلول میزبان

هنگامی که یک سلول آلوده می‌شود، ساختمان داخلی آن با ویروس، تخریب و تا زمانی که به مرگ سلول منجر



۶۲ توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس

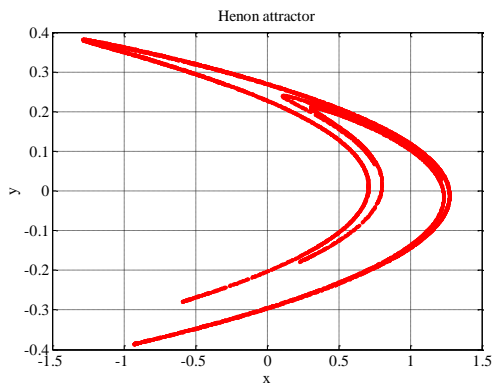
$$x_{ij} = low_{ij} + rand \times (up_{ij} - low_{ij}) \quad (29)$$

### ۳-۴- تئوری آشوب

یکی از مباحث تقریباً نوپا از نظر توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مفهوم آشوب است که افق درک ما نسبت به هستی را بسیار توسعه می‌دهد. درحقیقت، نظریه آشوب نوعی الگو منظم از یک قاعده بی‌نظم است. طبق توضیحات هیلز، نظریه آشوب اینگونه بیان می‌شود: بی‌نظمی و آشوب، نوعی بی‌نظمی منظم یا نظم در بی‌نظمی است؛ بی‌نظم از آن رو که نتایج آن پیش‌بینی‌ناپذیر است و نظم بدان سبب که از نوعی قطعیت برخوردار است [۱۶]. در این مقاله، از مدل هنون<sup>۱</sup> مطابق رابطه زیر استفاده شده است:

$$\begin{cases} x_{k+1} = a(1-x_k^2) + by_k \\ y_{k+1} = x_k \end{cases}, (x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2 \quad (30)$$

که در این رابطه،  $a$  و  $b$  دو مقدار مثبت‌اند. تابع توزیع از رابطه فوق به این دو پارامتر بستگی دارد. شکل ۵ نحوه تغییرات سیگنال براساس دو پارامتر  $a=0.3$  و  $b=1.4$  را نشان می‌دهد. شایان ذکر است شکل ۶ نشان می‌دهد سیستم‌های قطعی به ایجاد رفتارهای آشفته قادرند. مطابق رابطه (۳۰)، رفتارهای بی‌نظم در شکل مشاهده می‌شود؛ با این حال، باید توجه داشت مقدار اولیه ممکن است تأثیرات مهمی بر الگوی نوسان برخی از الگوهای آشفته داشته باشد. اپراتورهای آشوب، اکتشاف را بهبود می‌بخشند. شکل ۷ نحوه اعمال جستجوی مبتنی بر تئوری آشوب را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات الگو نکاشت تابع هنون

$$C^{g+1} = (1 - C_1 - C_\gamma) C^g + C_1 P_C^{g+1} (P_C^{g+1})^T + C_\gamma \sum_{i=1}^{\gamma} w_i \frac{(V_{pop_i}^{best} - X_{mean}^g) (V_{pop_i}^{best} - X_{mean}^g)^T}{\sigma^g} \cdot \frac{(V_{pop_i}^{best} - X_{mean}^g) (V_{pop_i}^{best} - X_{mean}^g)^T}{\sigma^g} \quad (25)$$

که  $d_\sigma = 1 + C_\sigma + 2 \max\{0, (\sqrt{\gamma_w} - 1 / \sqrt{N-1}) - 1\}$  معمولاً نزدیک به ۱ و  $C_\gamma$  است که  $C_\gamma$  مطابق با رابطه زیر عمل می‌کند:

$$C_1 = \frac{1}{\gamma_w} \left( (1 - \frac{1}{\gamma_w}) \min\{1, \frac{2\gamma_w - 1}{(N+2)^2 + \gamma_w}\} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{2}{(N + \sqrt{2})^2} \right), \quad C_\gamma = (\gamma_w - 1) C_1 \quad (26)$$

که  $0 \leq C_\gamma \leq 1$  نرخ به‌روزرسانی برای ماتریس کوواریانس  $C$  است.

### ۳-۳- عملکرد سیستم ایمنی

گام‌های زیر برای این حرکت تکاملی پیگیری می‌شوند: گام اول: محاسبه معیار عملکردی  $Pr$  برای جمعیت  $V_{pop}$  براساس تابع هدف سیستم مطالعه‌شده:

$$Pr_{rank(i)} = \frac{N - i + 1}{N} \quad (27)$$

که  $N$  تعداد کل جمعیت  $V_{pop}$  و  $rank(i)$  میانگین تابع هدف از  $i^{th}$  جمعیت  $V_{pop}$  است.

گام دوم: رشد کردن هر جمعیت به صورت انفرادی از میان جمعیت  $V_{pop}$  با رابطه:

$$\begin{cases} V_{pop_{i,j}}^* = V_{pop_{k,j}} - \\ \quad rand \cdot (V_{pop_{h,j}} - V_{pop_{i,j}}), \text{ if } r > Pr_{rank(i)} \\ V_{pop_{i,j}}^* = V_{pop_{i,j}}, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

که اندیس‌های  $k, i, h$  به صورت تصادفی از مجموعه  $[1, 2, 3, \dots, N]$  انتخاب می‌شوند؛ به گونه‌ای که  $r$  و  $rand \in [1, 2, 3, \dots, d]$  و  $i \neq h \neq k$  است. عددهای تصادفی بین ۰ و ۱ هستند. همچنین، اگر جوابی از محدوده مسئله خارج شوند، مجدد براساس محدوده بالا  $low_{ij}$  و پایین  $up_{ij}$  خود تولید می‌شود:

$$\begin{aligned} & A \subseteq X_f \text{ نامغلوب خوانده می شود، اگر و تنها اگر} \\ \exists_a \in A : X \text{ p } a \end{aligned} \quad (32)$$

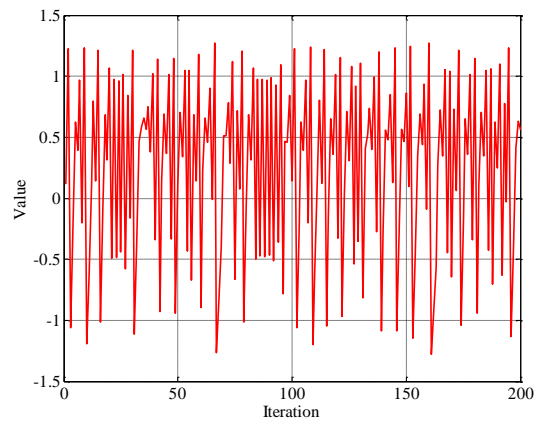
$X_f$  بهینه پارتو است، اگر و تنها اگر نسبت به  $X_f$  نامغلوب باشد؛ بنابراین، می توان بردار تصمیم  $X$  را بهینه دانست؛ از این نظر که نمی توان هیچ یک از اهداف آن را بهبود داد، بدون آنکه مقدار هدف دیگر آن را بدتر کرد. به چنین جوابی، بهینه پارتو یا ناپست<sup>۴</sup> نیز گفته می شود. این نقاط نسبت به یکدیگر بی تفاوت اند. فرق اساسی میان مسئله تک هدفه و چندهدفه در اینجا مشخص می شود. مسائل چندهدفه به یک جواب بهینه واحد محدود نیستند؛ بلکه در آنها مجموعه ای از جواب های بهینه وجود دارد. هیچ کدام از جواب ها را نمی توان بر جواب دیگر برتر دانست؛ مگر آنکه ترجیحات تصمیم گیر تعریف شده باشد. مجموعه تمام جواب های بهینه پارتو در یک مسئله چندهدفه مجموعه بهینه پارتو و بردارهای هدف متناظر با آن لبه یا جبهه بهینه پارتو<sup>۵</sup> نامیده می شوند. مجموعه همه بردارهای تصمیم نامغلوب در مجموعه  $A$  به صورت زیر فرض می شود:

$$P(A) = \{a \in A \mid a \text{ is Non-dominated } A\} \quad (33)$$

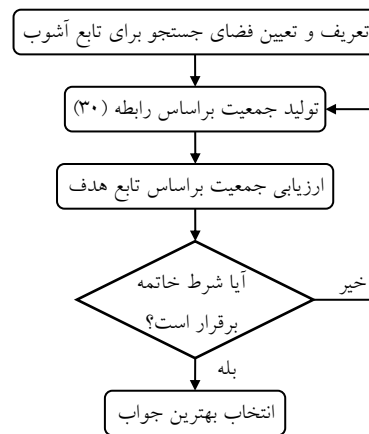
مجموعه  $P(A)$  با توجه به  $A$  مجموعه نامغلوب<sup>۶</sup> است و مجموعه بردارهای متناظر  $F(P(A))$  نیز لبه نامغلوب<sup>۷</sup> آن است. به علاوه مجموعه  $X_p = P(X_f)$  مجموعه بهینه پارتو و  $Y_p = F(X_p)$  جبهه بهینه پارتو تعریف می شود. به عبارت دیگر، وقتی مجموعه  $A$  برابر با مجموعه جواب های شدنی  $X_f$  باشد، آنگاه مجموعه  $P(A)$  جبهه بهینه پارتو را تولید می کند. نقطه ایدئال<sup>۸</sup> نقطه ای است که در آن مقادیر همه توابع هدف کمینه باشد. بدیهی است معمولاً نقطه ایدئال در ناحیه شدنی از فضای هدف وجود ندارد. نقطه پاد ایدئال<sup>۹</sup> نیز نقطه ای است که در آن مقادیر همه توابع هدف بیشینه باشد.

### ۳-۶- ترکیب منطق فازی با الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، تابع تصمیم گیری فازی با تابع عضویتی ( $\mu_c$ ) معرفی شده است که بتوان مقدار دقیقی متغیرها در آن جایگذاری شود. اگر تصمیم گیرنده به طور کامل از میزان



شکل ۶- تجسم نقشه های بی نظم تابع هنون



شکل ۷- نحوه جستجوی در فضای تئوری آشوب

### ۳-۵- الگوریتم چندهدفه

همان طور که اشاره شد برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه به مفهوم بهینگی ویژه ای نیاز است. براساس مفهوم غلبه یا چیرگی پارتو به صورت زیر معیار بهینگی در یک مسئله چندهدفه تعریف می شود [۱۷]:

$$X_1 \text{ p } X_2 \Leftrightarrow (\forall_i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(X_1) \leq f_i(X_2)) \wedge (\exists_i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(X_1) < f_i(X_2)) \quad (31)$$

برای دو بردار تصمیم  $X_1$  و  $X_2$ ، بردار  $X_1$  بردار  $X_2$  را مغلوب می کند، اگر و فقط اگر دو شرط برقرار باشد؛ نخست اینکه  $X_1$  در همه اهداف، بدتر از  $X_2$  نباشد<sup>۱۰</sup> و دوم اینکه  $X_1$  در حداقل یک هدف، مطلقاً بهتر از  $X_2$  باشد؛ یعنی:

همچنین، بردار تصمیم  $X \in X_f$  نسبت به مجموعه

واحدها پیوسته باشد. درحقیقت باید گام‌های زیر برای حل مسئله پیگیری شوند:

گام اول: تنظیم پارامترهای اولیه الگوریتم پیشنهادی از جمله تعداد جمعیت و تعداد تکرار برنامه و فراخوانی اطلاعات سیستم مطالعه شده و قراردادن محدودیت‌های وارده بر سیستم. در این مرحله، جواب‌های اولیه باید در محدودیت‌های مدنظر قرار داده شوند تا جستجوی بهتری برای الگوریتم ایجاد کند.

گام دوم: محاسبه برازندگی جواب‌های اولیه و مرتب‌کردن آنها براساس حداقل‌سازی تابع هزینه مطالعه شده.

گام سوم: انتخاب بهترین جواب از مجموعه جواب پارتو به کمک تئوری فازی و ذخیره‌سازی آن در حافظه به منظور ارتقای نسل‌های بعدی.

گام چهارم: ارتقای جواب‌ها براساس تقابل بین ویروس و سلول میزبان و محاسبه برازندگی و انتخاب بهترین آنها.

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.

گام ششم: ارتقای جواب‌ها براساس توسعه ویروس‌ها برای مقابله با سیستم ایمنی بدن و انجام عملیات مشابه به گام چهارم.

گام هفتم: اعمال سیستم آشوب برای تولید مجموعه جواب‌های جدید.

گام هشتم: جایگزین کردن بدترین مجموعه جواب به دست آمده با جواب‌های تصادفی جدید و استفاده از عملگر پیشنهادی برای ارتقای جستجوی کلی.

گام نهم: آیا شرط خاتمه تکمیل شده است؛ اگر بله، خروج از برنامه و نمایش دادن اطلاعات، در غیر این صورت، رفتن به گام سوم.

به منظور ارائه دیدگاه بهتر برای خواننده، شکل ۸ روند نمای روش مدنظر را نشان می‌دهد.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی و آنالیز الگوریتم

در این بخش، نتایج به دست آمده از پخش بار دینامیکی

هزینه کل سوخت راضی باشد،  $\mu_c = 1$  می‌شود و در نقطه مقابل، اگر  $\mu_c = 0$  باشد، نشان‌دهنده این نکته است که تصمیم‌گیرنده به طور کامل ناراضی است؛ بنابراین، مقدار تابع عضویت نشان‌دهنده میزان وقف‌پذیری شاخص اقتصادی است. به سبب ماهیت غیردقیق و نامشخص تصمیم و قضاوت برای تصمیم‌گیرنده‌ها، تابع هدف مربوطه، راه‌حلی non-dominated دارد. مجموعه  $f_i(P_{gi})$  به وسیله تابع عضویت  $\mu_i(P_{gi})$  بیان شده که فرمول آن به صورت زیر است:

$$\mu_i = (f_i^{\max} - f_i) / (f_i^{\max} - f_i^{\min}) \quad (34)$$

که  $f_i^{\min}$  و  $f_i^{\max}$  به ترتیب حد بالایی و حد پایینی تابع هدف نام هستند:

$$FDM_i = \begin{cases} 0 & \mu_i \leq 0 \\ \mu_i & 0 < \mu_i < 1 \\ 1 & \mu_i \geq 1 \end{cases} \quad (35)$$

به ترتیب، عضویت نرمالیزه  $FDM^k$  تابع برای هر  $k$  راه‌حل Non-Dominated به صورت زیر است:

$$FDM^k = \sum_{i=1}^2 FDM_i^k / \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^2 FDM_i^j \quad (36)$$

بهترین حالت برای راه‌حل مسئله پخش بار اقتصادی این است که در ابتدا ماکزیمم مقدار  $FDM^k$  را برای تابع تصمیم‌گیری فازی در نظر بگیریم (که  $M$  تعداد کل راه‌حل‌های Non-Dominated است) سپس همه راه‌حل‌ها به ترتیب مقدار به صورت نزولی مرتب می‌شوند و تصمیم‌گیرنده با توجه به مقدار تابع عضویت در شرایط عملیاتی واقعی، بهترین راه‌حل را در بین راه‌حل‌های Non-Dominated بر طبق لیست حق تقدم انتخاب می‌کند.

## ۶- اعمال الگوریتم پیشنهادی بر مسئله

هدف اصلی توزیع دینامیکی توان، برنامه‌ریزی تولید واحدهای تولید انرژی الکتریکی است؛ به نحوی که بار مورد نیاز شبکه، تأمین و هزینه‌های اقتصادی این تولید نیز کمینه شوند؛ اما محدودیت‌های بسیاری در کاربردهای عملی وجود دارند که نحوه فرمول‌بندی و حل مسئله کمی پیچیده می‌شود؛ از جمله باید مشخصه نرخ افزایش حرارتی

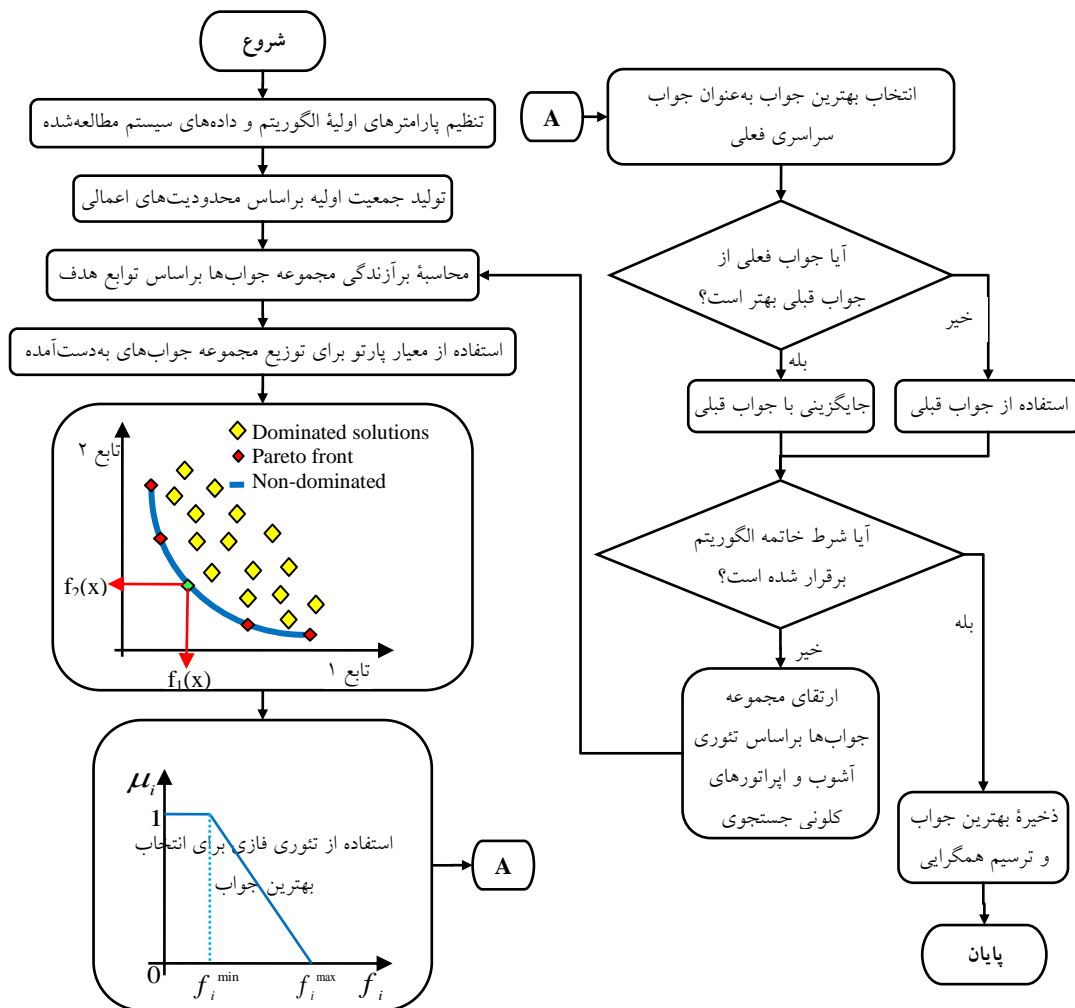
با توجه به مقالات مختلف منتشر شده در این زمینه، در این مقاله، دو سیستم موجود در مقالات برای این منظور انتخاب شده است. سیستم اول، سیستم ۵ ماشینه با اطلاعات موجود در جدول ۱ الی ۲ است. سیستم شماره دو، سیستم بزرگ ده ماشینه با اطلاعات موجود در جداول ۳ الی ۴ است. جدول ۵ میزان بار تقاضا شده در هر ساعت را نشان می‌دهد.

توان ارائه شده‌اند. سه سناریو به منظور ایجاد تحلیل جامع در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای کنترلی این الگوریتم از جمله تعداد جمعیت،  $\lambda$ ،  $\sigma$ ، تعداد تکرار به ترتیب برابر با ۲۵، ۰/۳ و ۱۵۰ هستند.

### ۵-۱- سناریو اول: پخش دینامیکی توان بدون حضور آلودگی و منابع تجدیدپذیر

جدول ۱- ضرایب ماتریس تلفات (B) برای سیستم ۵ ماشینه

0:000049	0:000014	0:000015	0:000015	0:000020
0:000014	0:000045	0:000016	0:000020	0:000018
0:000015	0:000016	0:000039	0:000010	0:000012
0:000015	0:000020	0:000010	0:000040	0:000014
0:000020	0:000018	0:000012	0:000014	0:000035



شکل ۸: نحوه اعمال الگوریتم پیشنهادی برای مسئله پخش بار اقتصادی

جدول ۲- ضرایب تابع هزینه ناصاف و قیود سیستم ۵ ماشینه

Unit	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$e_i$	$f_i$
1	0.008	2	25	100	0.042
2	0.003	1.8	60	140	0.04
3	0.0012	2.1	100	160	0.038
4	0.001	2	120	180	0.037
5	0.0015	1.8	40	200	0.035

Unit	$P_{min}$	$P_{max}$	UR	DR	POZs
1	10	75	30	30	[25 30], [55 60]
2	20	125	30	30	[45 50], [80 90]
3	30	175	40	40	[60 70], [125 140]
4	40	250	50	50	[95 110], [160 180]
5	50	300	50	50	[85 100], [175 200]

جدول ۳- ضرایب ماتریس تلفات (B) برای سیستم ۱۰ ماشینه

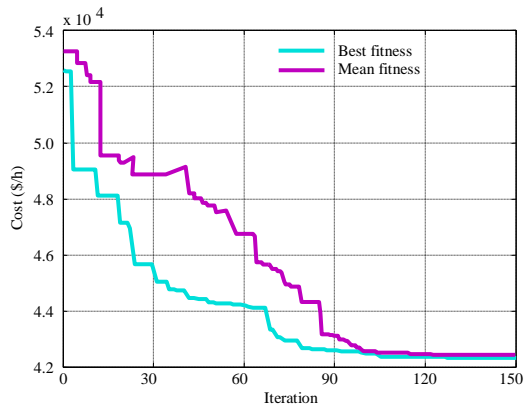
8.7	0.43	-4.61	0.36	0.32	-0.66	0.96	-1.6	0.8	-0.1
0.43	8.3	-0.97	0.22	0.75	-0.28	5.04	1.7	0.54	7.2
-4.61	-0.97	9	-2	0.63	3	1.7	-4.3	3.1	-2
0.36	0.22	-2	5.3	0.47	2.62	-1.96	2.1	0.67	1.8
0.32	0.75	0.63	0.47	8.6	-0.8	0.37	0.72	-0.9	0.69
-0.66	-0.28	3	2.62	-0.8	11.8	-4.9	0.3	3	-3
0.96	5.04	1.7	-1.96	0.37	-4.9	8.24	-0.9	5.9	-0.6
-1.6	1.7	-4.3	2.1	0.72	0.3	-0.9	1.2	-0.96	0.56
0.8	0.54	3.1	0.67	-0.9	3	5.9	-0.96	0.93	-0.3
-0.1	7.2	-2	1.8	0.69	-3	-0.6	0.56	-0.3	0.99

جدول ۴- ضرایب تابع هزینه ناصاف و قیود سیستم ۱۰ ماشینه

Unit	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$e_i$	$f_i$	$P_{min}$	$P_{max}$	UR	DR
1	0.00043	21.6	958.2	450	0.041	150	470	80	80
2	0.00063	21.05	1313.6	600	0.036	135	460	80	80
3	0.00039	20.81	604.97	320	0.028	73	340	80	80
4	0.0007	23.9	471.6	260	0.052	60	300	50	50
5	0.00079	21.62	480.29	280	0.063	73	243	50	50
6	0.00056	17.87	601.75	310	0.048	57	160	50	50
7	0.00211	16.51	502.7	300	0.086	20	130	30	30
8	0.0048	23.23	639.4	340	0.082	47	120	30	30
9	0.10908	19.58	455.6	270	0.098	20	80	30	30
10	0.00951	22.54	692.4	380	0.094	55	55	30	30

جدول ۵- میزان بار تقاضاشده برای طول یک شبانه‌روز

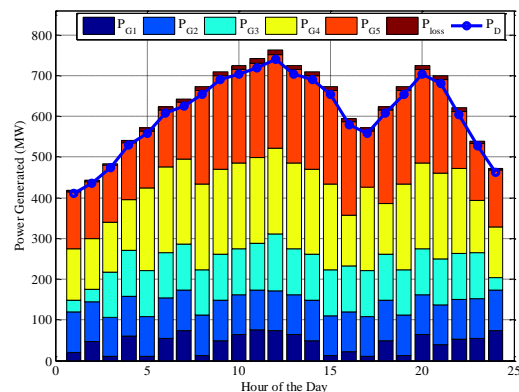
Hour	5 units	10 units	Hour	5 units	10 units
1	410	1036	13	704	2072
2	435	1110	14	690	1924
3	475	1258	15	654	1776
4	530	1406	16	580	1554
5	558	1480	17	558	1480
6	608	1628	18	608	1628
7	626	1702	19	654	1776
8	654	1776	20	704	2072
9	690	1924	21	680	1924
10	704	2072	22	605	1628
11	720	2146	23	527	1332
12	740	2220	24	463	1184



شکل ۱۰- روند همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۵ ماشینه

اگرچه به‌صراحت می‌توان دریافت روش پیشنهادی عملکرد بهتری دارد، ولی روش HPSTCO نتوانست قیود مسئله را به‌صورت صحیح برقرار سازد؛ برای مثال، در روش HPSTCO مقدار واحد تولید اول در ساعت ۶ برابر با ۵۷/۳۳۸۹ مگاوات است؛ در حالی که مطابق قید مناطق ممنوعه از جدول ۲ مشخص است نباید در محدوده ۵۵ الی ۶۰ تولیدی وجود داشته باشد. با وجود این، مقدار تلفات محاسبه‌شده با روش HPSTCO برابر با ۱۹۴/۳۲ مگاوات است که روش پیشنهادی مقدار تلفات ۱۹۳/۹۴ مگاوات را به ثبت رسانده است. این نشان می‌دهد روش پیشنهادی، هم از نظر هزینه تمام‌شده و هم تلفات عملکرد بهتری داشته است. همان‌گونه که بیان شد یکی از مهم‌ترین قیدهای این

شکل ۹ نتایج تخصیص یافته برای واحدهای نیروگاهی و شکل ۱۰ نتیجه همگرایی را بعد از ۱۵۰ تکرار نشان می‌دهد. در جدول ۶ مقایسه کاملی بین الگوریتم پیشنهادی و سایر روش‌های موجود در این زمینه شده است.

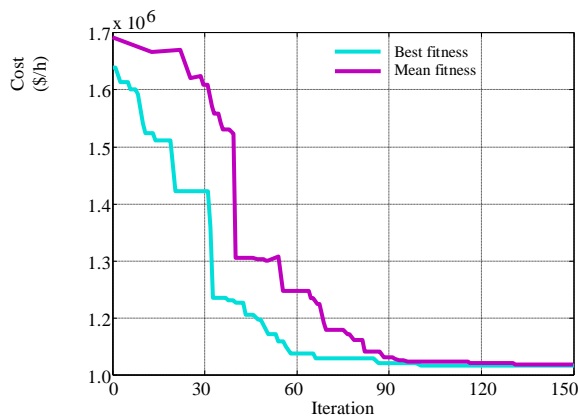


شکل ۹- نتایج خروجی بهینه برای سیستم ۵ ماشینه

به‌منظور کاهش تعداد مراجع در این مقاله، تمامی روش‌های ارائه‌شده در جدول ۶ از مراجع [۱۸-۲۱] در دسترس‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف، بهترین نتیجه برای مقالات پیشین با روش HPSTCO بوده و برابر با ۴۲۱۵۱/۳۳ دلار است؛ در حالی که روش پیشنهادی این مقاله توانست مقدار ۴۲۱۳۰/۳۸ دلار را به دست آورد.

۶۸ توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس

به صورت مشابه، شکل ۱۲ نتایج بهینه به دست آمده را برای سیستم ۱۰ ماشین نشان می دهد. شکل ۱۳ نحوه همگرایی الگوریتم پیشنهادی را بعد از ۱۵۰ تکرار نشان می دهد. همچنین، این شکل، مقدار میانگین شایستگی جواب ها را در طول بهینه سازی نشان می دهد. از روی شکل می توان دریافت الگوریتم توسعه یافته توانسته است مقدار میانگین کل جمعیت را به سمت همگرایی میل دهد؛ به این معنی که میانگین کل شایستگی و بهترین جواب توانسته است از تکرار تقریبی ۹۵ به بعد بر هم تطابق یابد. همچنین، این شکل بیان کننده انحراف معیار کمتر جمعیت از جواب بهینه است. جدول ۷ نتایج مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی و سایر روش های موجود در مقاله [۲۱] است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، استفاده از روش پیشنهادی بهبود چشمگیری در پاسخ های مسئله ایجاد کرده است. همچنین، نزدیک بودن مقدار عددی برای میانگین و کمینه نشان از مقاوم بودن و انحراف کمتر الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله توزیع دینامیکی توان دارد. با توجه به جدول ۷، روش پیشنهادی در مقایسه با بهترین روش HPSTCO بهتر بوده است.



شکل ۱۳- همگرایی الگوریتم پیشنهادی برای سیستم ۱۰ ماشین

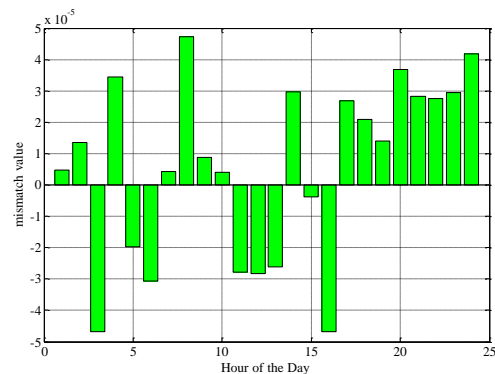
مسئله، تعادل بین تولید و مصرف است. برای این منظور از معیار زیر استفاده می شود:

جدول ۶- نتیجه مقایسه بین الگوریتم های مختلف در سیستم ۵ ماشین

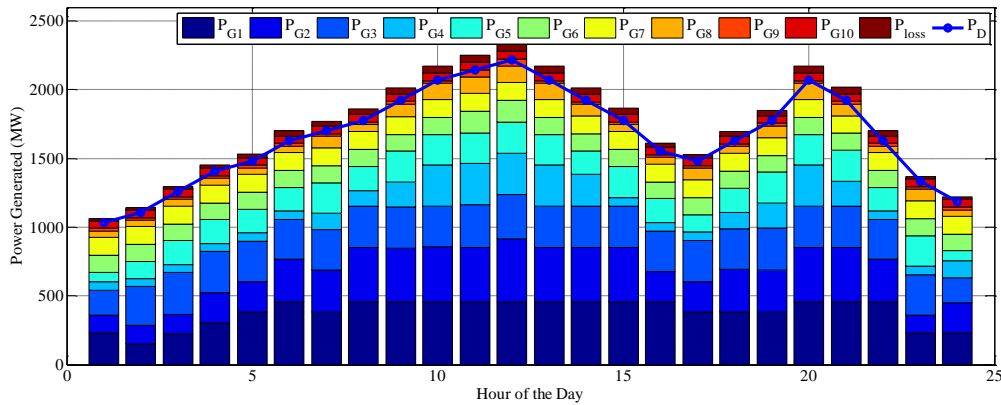
Method	Minimum cost (\$)	Average cost (\$)	Maximum cost (\$)
SA [18]	47356	NA	NA
APSO [18]	44678	NA	NA
AIS [18]	44385.43	44758.84	45553.7
PSO [18]	44253.24	45657.06	46402.5
ABC [18]	44045.83	44064.73	44218.6
TVAC-IPSO [18]	43136.56	43185.66	43302.2
MSL [18]	49216.81	NA	NA
ICA [13]	43117.05	43144.47	43209.53
HIGA [18]	43125.37	43162.24	43259.3
IWO [19]	43219.39	43323.83	43419.21
CMIWO [19]	43136.78	43208.23	43353.17
MGDE [20]	43184.46	43280.85	43461.79
HPSTCO [21]	42151.33	NA	NA
Proposed	42130.37	42336.82	43148.63

$$mismatch = \sum p_{output} - P_D - P_{loss} \quad (37)$$

همان گونه که از رابطه مشخص است هرچه قدر میزان این اختلاف به سمت صفر میل کند، نشان از برقراری بهتر قید توازن دارد. شکل ۱۱ نتیجه محاسبه این معیار را نشان می دهد. با توجه به شکل، روش پیشنهادی توانست تا حد پذیرفتنی این قید را برقرار سازد.



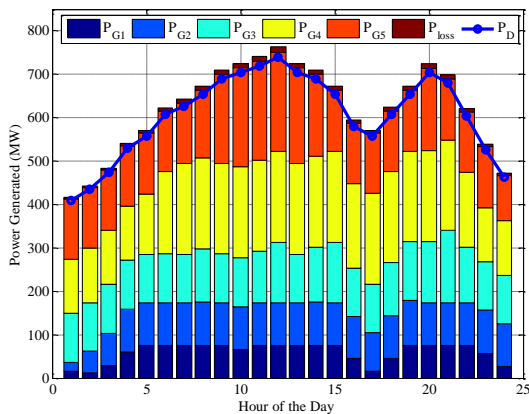
شکل ۱۱- نتیجه معیار mismatch برای سیستم ۵ ماشین



شکل ۱۲- نتایج خروجی بهینه برای سیستم ۱۰ ماشین

جدول ۷- نتیجه مقایسه بین الگوریتم‌های مختلف در سیستم ۱۰ ماشین

Method	MVMO-SH[21]	Hybrid EP-SQP[21]	LDISS-2 [21]
Min cost (\$/day)	1036260.00	1035748.00	1039083.00
Ave cost (\$/day)	NA	NA	1041091.00
Max cost (\$/day)	NA	NA	1042630.00
Method	HIGA [21]	BBO SB[21]	MILP-IPM[21]
Min cost (\$/day)	1041087.80	1038362.01	1040676.00
Ave cost (\$/day)	1042980.14	1039968.77	NA
Max cost (\$/day)	1044926.65	1041538.96	NA
Method	HPSTCO [21]	ICA [13]	Proposed
Min cost (\$/day)	1035730.20	1040758.42	1034127.71
Ave cost (\$/day)	1036236.63	1041664.62	1036142.89
Max cost (\$/day)	1036987.34	1043173.55	1037702.43



شکل ۱۴- نتایج خروجی بهینه برای سیستم ۵ ماشین

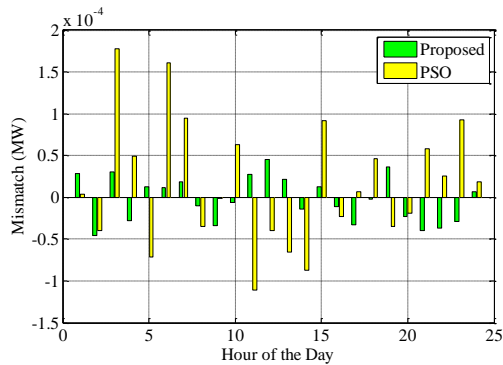
### ۵-۲- سناریو دوم: پخش دینامیکی توان با در نظر گرفتن تابع آلودگی

در این قسمت، دو تابع هزینه و آلودگی، دو تابع در بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. سیستم مطالعه‌شده، سیستم ۵ ماشین است. اطلاعات این سیستم در مرجع [۲۲] دریافت شدنی است. شکل ۱۴ نتیجه بهینه توان خروجی واحدهای نیروگاهی را به همراه میزان آلودگی و هزینه هر ساعت نشان می‌دهد. شکل ۱۵ نتیجه توزیع بهینه پارتو را نشان می‌دهد. شکل ۱۶ میزان هزینه تولیدی و آلودگی منتشرشده را برای هر ساعت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مقدار ماکزیمم و مینیمم برای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرجع [۲۲-۲۳] در جدول ۸ آمده‌اند. با توجه به جدول ۸، روش پیشنهادی کارآمدتر و سریع‌تر بوده است.

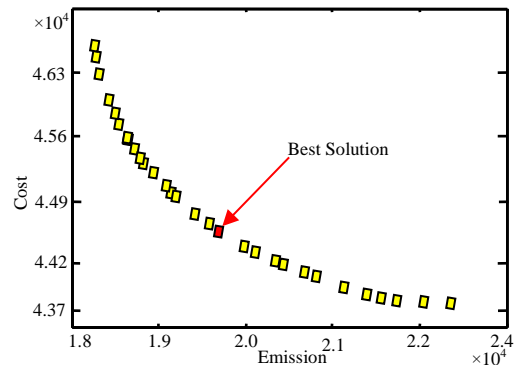


۷۰ توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس

مناسب تری برقرار کرده است.



شکل ۱۷- تغییرات mismatch برای سیستم ۵ ماشین



شکل ۱۵- نحوه توزیع همگرایی پارتو برای سیستم ۵ ماشین با در نظر گرفتن آلودگی

### ۵-۳- سناریو سوم: پخش دینامیکی توان با در

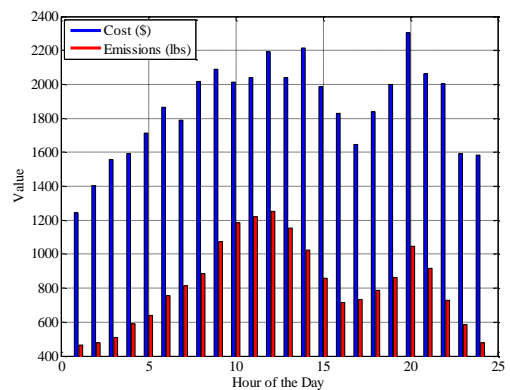
#### نظر گرفتن تابع آلودگی و انرژی باد

در این قسمت، به دلیل نبود روش مشابه برای حل توزیع اقتصادی توان با در نظر گرفتن انرژی باد براساس توابع معرفی شده در بخش دوم، سیستم ۱۰ ماشین در قسمت ۵-۲ انتخاب شده است. در این سیستم، دو واحد نیروگاهی مبتنی بر انرژی بادی در جایگاه ۹ و ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات این منابع از مراجع [۱۰، ۲۴-۲۵] دریافت شدنی است. توزیع بهینه برای واحدهای نیروگاهی با حضور منابع تجدیدپذیر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. جدول ۹ مقایسه بین روش‌های NSGA-II، SPEA و MOPSO را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده، روش پیشنهادی توانست نتایج بهتری به دست بیاورد. از نظر مقایسه عددی، روش پیشنهادی توانست در مقایسه با بهترین جواب از NSGA-II، مقدار ۱۴۳/۱۳۶ دلار کمتر به دست بیاورد. از نظر آلودگی، روش پیشنهادی در مقایسه با بهترین روش SPEA توانست به میزان ۵/۲۲ مقدار کمتری را به دست بیاورد.

جدول ۹- مقایسه هزینه سوخت و آلودگی به دست آمده برای

طول یک شبانه با روش‌های مختلف

Method	Cost (\$)	Emission (lb)
NSGA-II	2843489.421	424702.76
SPEA	2844205.762	424619.38
MOPSO	2843847.635	424621.52
Proposed	2843346.285	424614.16



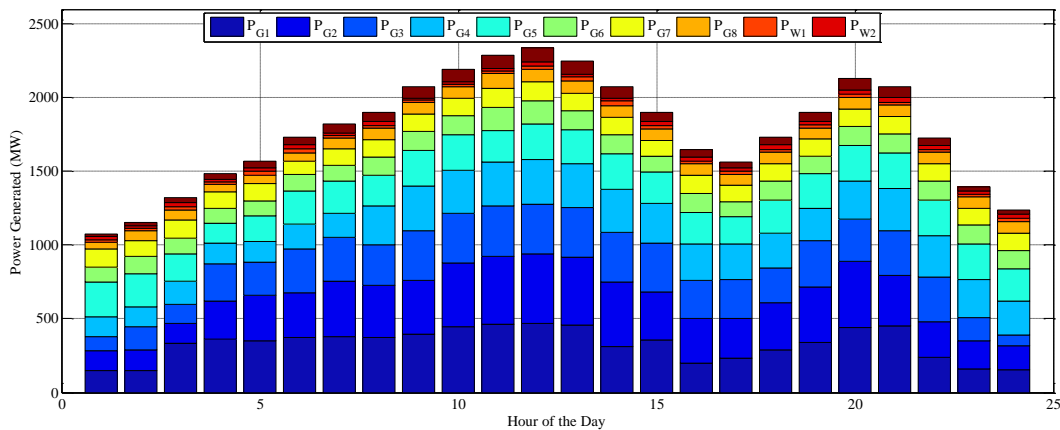
شکل ۱۶- تغییرات ساعتی هزینه تولیدی و میزان آلودگی منتشر شده

جدول ۸- نتیجه مقایسه بین روش پیشنهادی و روش‌های موجود در مرجع [۲۲-۲۳] برای سیستم ۵ ماشین با در نظر گرفتن آلودگی

Method	Cost (\$)	Emission (lb)
PS [23]	47911	18927
PSO [22]	50893	20163
Proposed	44619	19764

مطابق جدول فوق، الگوریتم پیشنهادی از نظر هزینه، عملکرد بسیار بهتری داشته است؛ اما از نظر میزان آلودگی، نتوانست جواب بهتری نسبت به PS پیدا کند. شکل ۱۷ برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی با بهترین روش از جدول ۸ یعنی PSO براساس معیار mismatch ارائه می‌شود.

مطابق این شکل، مشخص است الگوریتم پیشنهادی توانسته است به بهترین شکل جواب بهینه را پیدا کند؛ به نحوی که قید تعادل توان تولیدی و مصرفی را به صورت



شکل ۱۸- خروجی بهینه به دست آمده از واحدهای نیروگاهی به کمک روش پیشنهادی با حضور مولدهای بادی

## ۶- نتیجه گیری

این مقاله، مدت زمان با در نظر گرفتن مقدار میانگین برای سناریوهای مختلف، بین ۲ الی ۳ دقیقه بوده است که عملکرد مناسبی برای این موضوع نشان می دهد. در کارهای آتی می توان حضور مدیریت بار و خودروهای الکتریکی را در نظر گرفت و اثربخشی آنها را در تابع هزینه و آلودگی بررسی کرد.

در این مقاله، مسئله توزیع اقتصادی توان در طول ۲۴ ساعت شبانه روز به صورت یک مسئله بهینه سازی با الگوریتم چندهدفه توسعه یافته جستجوی ویروس مبتنی بر تئوری آشوب حل شده است. به منظور اعمال قیود واقعی، تابع ناصاف سینوسی با در نظر گرفتن درجه شیر ورودی و قیدهایی همانند نرخ افزایش/کاهش تولید، مناطق ممنوعه تولید نیروگاهها، حداکثر و حداقل توان واحدهای تولیدی در مسئله بهینه سازی منظور شده است. همچنین، وجود مولدهای بادی با در نظر گرفتن میزان سرعت باد در طول یک شبانه روز و میزان آلودگی منتشر شده از منابع تولید فسیلی (حرارتی) در مسئله توزیع دینامیکی بار در نظر گرفته شده است.

## مراجع

- [1] Davoodi, E., Babaei, E. (2019), "A modified imperialist competitive algorithm for combined heat and power dispatch," Computational Intelligence in Electrical Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 1-18, 2019.
- [2] Golestani Mehr, B., Lashkar Ara, A., "Economic Dispatch of Thermal Units considering Valve-point Effect using Learning Backtracking Search Optimization Algorithm," Computational Intelligence in Electrical Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 17-30, 2018.
- [3] Ali Bulbul S. M., Moumita P., Provas K. R., Tandra P., "Opposition-based krill herd algorithm applied to economic load dispatch problem," Ain Shams Engineering Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 423-440, 2018.
- [4] Aghay Kaboli S. H., Alqallaf A. H K., "Solving non-convex economic load dispatch problem via artificial cooperative search algorithm," Expert Systems with Applications, In press, 2019.
- [5] Yang L, Fraga ES, Papageorgiou LG., "Mathematical programming formulations for non-smooth and non-convex electricity dispatch problems". Electric Power Systems Research, Vol. 95, pp. 302-308, 2013.
- [6] Bishwajit D., Shyamal K. R., Biplab B., "Solving multi-objective economic emission dispatch of a renewable integrated microgrid using latest bio-inspired algorithms," Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 22, No.

مدل پیشنهادی در سه سناریو مختلف بدون (و با) حضور منابع تجدیدپذیر و آلودگی بررسی و ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده در تابع هزینه نهایی نشان می دهند روش پیشنهادی توانسته است عملکردی پذیرفتنی ارائه دهد. همچنین، همگرایی مناسب این الگوریتم نشان می دهد می توان در زمان پذیرفته شده، به جواب مناسب دست یافت. همچنین، حضور منابع تجدیدپذیر نشان می دهد آلودگی ایجاد شده و هزینه تمام شده به صورت چشمگیری کاهش یافته اند. براساس معیار پارتو، مشخص شد الگوریتم مدنظر می تواند توزیع یکنواختی ایجاد کند تا طراح بتواند براساس هدف مدنظر خود بهترین جواب را انتخاب کند. یکی از نکات مهم در پخش بار، بررسی مدت زمان شبیه است که در

- point effects”. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 32, No. 5, pp. 805-829, 2020.
- [20] Zou D, Li S, Kong X, Ouyang H, Li Z. “Solving the dynamic economic dispatch by a memory-based global differential evolution and a repair technique of constraint handling”. *Energy*, Vol. 147, pp. 59–80, 2018.
- [21] Santra D., Mukherjee A., Sarker k., Mondal S. “Dynamic economic dispatch using hybrid metaheuristics,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-30, 2020.
- [22] Basu, M., “Particle swarm optimization based goal-attainment method for dynamic economic emission dispatch,” *Electric Power Components and Systems*, Vol. 34, No. 9, pp. 1015-1025, 2006.
- [23] Alsumait J.S., Qasem M., Sykulski J.K., Al-Othman A.K., “An improved pattern search based algorithm to solve the dynamic economic dispatch problem with valve-point effect,” *Energy Convers. Manage.* vol. 51, pp. 2062–2067, 2010.
- [24] Basu M., “Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II,” *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 30, pp. 140–149, 2008.
- [25] Eladany M. M., Daoud A. A., ElDesouky A. A., Sallam A.A., “Stochastic multiobjective wind/PV/nonconvex thermal dynamic economic emission dispatch using particle swarm technique,” *Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems conference*, Alexandria University, Egypt, 2012.
- [7] Huijun L., Yungang L., Fengzhong L., Yanjun S., “A multiobjective hybrid bat algorithm for combined economic/emission dispatch,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 101, pp. 103-115, 2018.
- [8] Mostafa K., Lei D., Shicong M., Bing Z., “Double weighted particle swarm optimization to non-convex wind penetrated emission/economic dispatch and multiple fuel option systems,” *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 1021-1037, 2018.
- [9] Mohammadian M., Lorestani A., Ardehali M. M., “Optimization of single and multi-areas economic dispatch problems based on evolutionary particle swarm optimization algorithm,” *Energy*, Vol. 161, pp. 710-724, 2018.
- [10] Xian L, Wilsun X. “Minimum Emission Dispatch Constrained by Stochastic Wind Power Availability and Cost”. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 1705-1713, 2010.
- [11] Hamid R., Kazemi-Rahbar M. H., Behrooz V., Hasan R., “Solution of combined economic and emission dispatch problem using a novel chaotic improved harmony search algorithm,” *Journal of Computational Design and Engineering*, In press, 2018.
- [12] Ehab E. E., “Modified harmony search algorithm for combined economic emission dispatch of microgrid incorporating renewable sources,” *Energy*, vol. 159, pp. 496-507, 2018.
- [13] Mohammadi-ivatloo B, Rabiee A, Soroudi A, Ehsan M. “Imperialist competitive algorithm for solving non-convex dynamic economic power dispatch”. *Energy*, vol. 44, pp. 228-240, 2012.
- [14] El-sobky B, Abo-elnaga Y. “Multi-objective economic emission load dispatch problem with trust-region strategy”. *Electric Power Systems Research*, Vol. 108, pp. 254-259, 2014.
- [15] Mu D. L, Hui Z, Xing W. W, Tong H. “A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search”. *Advances in Engineering Software*, Vol. 92, pp. 65-88, 2016.
- [16] Arena P., Caponetto R., Fortuna L., Rizzo A., and La Rosa M., “Self-organization in nonrecurrent complex systems,” *International J. of Bifurcation and Chaos*, Vol. 10, No. 5, pp. 1115-1125, 2000.
- [17] Jayasena K. P. N., Li L., Abd Elaziz M., Xiong S., “Multi-objective Energy Efficient Resource Allocation Using Virus Colony Search (VCS) Algorithm,” in 2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems, pp. 766-773, 2018.
- [18] Mohammadi-Ivatloo B., Rabiee A., Soroudi A. “Nonconvex Dynamic Economic Power Dispatch Problems Solution Using Hybrid Immune-Genetic Algorithm”. *IEEE systems journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 777-785, 2013.
- [19] Zheng, Z., Li, J., & Han, Y. “An improved invasive weed optimization algorithm for solving dynamic economic dispatch problems with valve-

### فهرست علام اختصاری

VCS	Virus colony search
PSO	Particle swarm optimization
NSGA-II	Nondominated Sorting Genetic Algorithm II
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
MOPSO	Multi Objective PSO
PS	Pattern Search
HPSTCO	Hybrid PSO and Termite Colony Optimization
ICA	Imperialist Competitive Algorithm
MILP-IPM	Hybrid Mixed-Integer Linear Programming and Interior Point Method
BBOSB	Hybrid Biogeography-based Optimization with Brain Storm Optimization
HIGA	Hybrid Immune-Genetic Algorithm
SQP	Sequential Quadratic Programming
LDISS-2	Hybrid algorithm of low-discrepancy sequences, improved shuffled frog leaping algorithm and SQP
MVMO-SH	Hybrid mean variance mapping optimization
EP	Evolutionary Programming
MGDE	Memory-Based Global Differential Evolution
CMIWO	Improved Invasive Weed Optimization Algorithm
IWO	Invasive Weed Optimization
ABC	Artificial Bee Colony
APSO	Adaptive PSO
SA	Simulated Annealing
AIS	Artificial Immune System
TVAC-IPSO	Time-varying acceleration coefficients improved PSO

---

<sup>1</sup> Henon

<sup>2</sup>  $X_1$  dominates  $X_2$

<sup>3</sup>  $X_1$  is no worse than  $X_2$  (in all objectives)

<sup>4</sup> Non-Inferior

<sup>5</sup> Pareto-Optimal Front (Surface)

<sup>6</sup> Non-dominated Set

<sup>7</sup> Non-dominated Fronts

<sup>8</sup> Ideal Point (Utopian Solution)

<sup>9</sup> Anti Ideal Point (Nadir Point)

۷۴ توزیع بهینه دینامیکی توان و آلودگی با تأثیرپذیری از مدل احتمالاتی انرژی باد به کمک الگوریتم توسعه یافته کلونی جستجوی ویروس