



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Planning the Production Power of Thermal, Wind and Solar Units Using the Sine Cosine Algorithm

Majid Khalili <sup>a</sup>, Javad Nikoukar <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> PhD Student, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Saveh branch, Saveh, Iran

<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Saveh branch, Saveh, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 16 February 2023

Revised: 01 May 2023

Accepted: 03 September 2023

### Keywords:

Optimal Dispatch,  
Sine Cosine Algorithm,  
Optimization,  
Renewable Energy  
Sources.

## ABSTRACT

Dynamic production power planning to meet hourly load demand is one of the important issues in production management and operation of power systems. In this article, the problem of optimal load dispatch considering transmission network losses, considerations and practical limitations of thermal power plants such as increasing and decreasing ramp rates, prohibited production areas, steam valve effect with the combination of renewable resources including wind farms and solar units has been raised.

Renewable energy sources have reduced environmental pollution due to the non-use of fossil fuels, but these sources have uncertainty and random nature in production. On the other hand, wind and solar sources are considered to be part of fast start-up sources and thermal sources are considered to be part of slow start-up thermal sources. Considering the mentioned cases together complicates the problem of optimal load distribution, in this article, a new method based on the sine-cosine algorithm is used to determine the contribution of different production sources in the load supply.

To solve this problem, which has non-convex cost functions, a new method based on the sine-cosine algorithm has been used. In order to evaluation the effectiveness of the proposed method, simulation results and numerical studies on a sample system including 6 thermal units, 5 wind units and 13 solar units have been implemented and compared with other metaheuristic algorithms. The results of numerical studies show the superiority of the proposed method over other methods while having the appropriate speed and accuracy.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.29942.2408>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

\* Corresponding author.

E-mail address: [Javad.Nikoukar@iaiu.ac.ir](mailto:Javad.Nikoukar@iaiu.ac.ir)

## How to cite this article:

Nikoukar, J., & Khalili, M. (2024). Planning the production power of thermal, wind and solar units using the sine cosine algorithm. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(76), 257-271. doi: 10.22075/jme.2023.29942.2408

# برنامه ریزی توان تولیدی واحدهای حرارتی، بادی، خورشیدی با استفاده از الگوریتم سینوس کسینوس

مجید خلیلی<sup>۱</sup>، جواد نیکوکار<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
توزیع بهینه، الگوریتم سینوس کسینوس، بهینه سازی، منابع انرژی تجدیدپذیر.	برنامه ریزی توان تولیدی واحدها جهت تامین تقاضای بار ساعتی، یکی از مسائل مهم در مدیریت تولید و بهره برداری از سیستم های قدرت می باشد. در این مقاله، مسئله توزیع بهینه بار با در نظر گرفتن تلفات شبکه انتقال، ملاحظات و محدودیت های عملی نیروگاه های حرارتی از قبیل نرخ افزایشی و کاهش تولید، نواحی ممنوعه تولید، اثر شیر بخار با ترکیب منابع تجدیدپذیر شامل مزارع بادی و واحدهای خورشیدی مطرح شده است. منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل عدم استفاده از سوخت های سوختی باعث کاهش آلودگی های زیست محیطی شده اما این منابع، دارای عدم قطعیت و ماهیت تصادفی در تولید می باشند. از طرف دیگر، منابع بادی و خورشیدی جزء منابع راه اندازی سریع و منابع حرارتی جزء منابع حرارتی راه اندازی کند محسوب می شوند. در نظر گرفتن موارد ذکر شده به صورت توأم، مساله توزیع بهینه بار را پیچیده می نماید که در این مقاله برای تعیین میزان مشارکت منابع تولیدی مختلف در تامین بار، از روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم سینوس کسینوس، استفاده شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی و مطالعات عددی روی یک سیستم نمونه شامل ۶ واحد حرارتی، ۵ واحد بادی و ۱۳ واحد خورشیدی پیاده سازی شده و با دیگر روش های هوشمند مقایسه شده است. نتایج مطالعات عددی ضمن داشتن سرعت و دقت مناسب، برتری روش پیشنهادی را نسبت به سایر روشها نشان می دهد.
DOI: <a href="https://doi.org/10.22075/jme.2023.29942.2408">https://doi.org/10.22075/jme.2023.29942.2408</a>	

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

## ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

امکان پذیر نمی باشد. در [۲-۳] برای حل مسئله توزیع بهینه بار از روشهای برنامه ریزی خطی و غیر خطی استفاده شده است. برنامه ریزی خطی سرعت پاسخ دهی مناسبی دارد اما این روش به دلیل استفاده از مدل تکه ای منجر به دستیابی به جواب بهینه نمی شود. در برنامه ریزی غیر خطی نیز مشکل پیچیدگی و عدم همگرایی وجود دارد. در [۴] از برنامه ریزی پویا برای حل اینگونه مسائل استفاده شده است که معمولاً در سیستم های بزرگ و ترکیبی پاسخ مناسب در

توزیع اقتصادی بار، یکی از مسائل مهم در بهره برداری بهینه از سیستم های قدرت می باشد. تابع هدف در توزیع بهینه بار، حداقل نمودن هزینه های تولید توان در واحدهای مختلف با رعایت قیود حاکم بر نیروگاه ها و سیستم می باشد [۱]. با توجه به ماهیت غیر خطی تابع هدف و قیود بهره برداری حل این مسئله در سیستم هایی که از منابع تولید مختلف استفاده می کنند با روش های مرسوم ریاضی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Javad.Nikoukar@iau.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

۲. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه

استناد به این مقاله:

که سرعت باد بین  $(v_{Rj})$  و  $(v_{COj})$  باشد، خروجی برابر با تولید توان نامی است. توان خروجی مولد بادی به صورت (۱) بیان می‌شود [۱۱]:

$$P_{Wj}(t) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq V_j(t) \leq V_{Clj} \\ P_{WRj} (A_j + B_j V_j(t) + C_j V_j^2(t)) & ; V_{Clj} \leq V_j(t) < V_{Rj} \\ P_{WRj} & ; V_{Rj} \leq V_j(t) \leq V_{COj} \\ 0 & ; V_j(t) \geq V_{COj} \end{cases} \quad (1)$$

که

$$A_j = \frac{1}{(V_{Clj} - V_{Rj})^2} \left\{ V_{Clj}(V_{Clj} + V_{Rj}) - 4V_{Clj}V_{Rj} \left( \frac{V_{Clj} + V_{Rj}}{2V_{Rj}} \right)^3 \right\}$$

$$B_j = \frac{1}{(V_{Clj} - V_{Rj})^2} \left\{ 4(V_{Clj} + V_{Rj}) \left( \frac{V_{Clj} + V_{Rj}}{2V_{Rj}} \right)^3 - (3V_{Clj} + V_{Rj}) \right\}$$

$$C_j = \frac{1}{(V_{Clj} - V_{Rj})^2} \left\{ 2 - 4 \left( \frac{V_{Clj} + V_{Rj}}{2V_{Rj}} \right)^3 \right\}$$

$P_{Wj}(t)$  توان اکتیو خروجی  $J$  امین واحد بادی در زمان  $t$  است.  $P_{WRj}$  توان نامی نیروگاه  $J$  ام،  $V_{Clj}$ ،  $V_{Rj}$ ،  $V_{COj}$ ، به ترتیب سرعت‌های قطع، نامی و برش باد نیروگاه  $J$  (واحد مایل در ساعت یا مایل در ثانیه) و  $N_w$  تعداد نیروگاه‌ها می‌باشند. تابع هزینه تولید به طور مستقیم با توان خروجی واحد بادی متناسب است. هزینه تولید،  $F_{P_w}(t)$  به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$F_w(t) = \sum_{i=1}^{N_w} (C_{wj} \times P_{wj}(t)) \quad (2)$$

که  $C_{wj}$  ضریب بهره‌برداری انرژی الکتریکی بادی است. انرژی خورشیدی یکی دیگر از منابع پاک انرژی تجدیدپذیر است. در حال حاضر روند استفاده از انرژی خورشیدی در بخش تولید برق رو به افزایش است و تنها محدودیت انرژی خورشیدی عدم قطعیت آن و رفتار تصادفی تابش خورشیدی از یک زمان به زمان دیگر است. انرژی خورشیدی یکی از پر کاربردترین منابع توان در سال‌های اخیر بوده است که به شرایط آب و هوایی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر بستگی دارد. عملکرد آرایه PV توسط یک مدل تحلیلی ارائه شده در [۱۲-۱۳] پیش‌بینی

زمان معقول در خروجی دریافت نمی‌شود. روش چند جمله‌ای لاگرانژ نیز بر پایه مشتق‌پذیر بودن تابع هدف بنا نهاده شده است و در بهره‌برداری عملی واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن اثر شیر بخار و تولیدات بادی و حرارتی عملاً ناتوان می‌باشد.

بدین جهت برای رهایی از این مشکلات در سالهای اخیر بیشتر محققان روی روشهای هوشمند متمرکز شده‌اند. از جمله روشهای فراابتکاری و هوشمند برای حل مسئله توزیع بهینه بار می‌توان به الگوریتم ژنتیک [۵]، ازدحام ذرات [۶]، سخت‌کاری فولاد [۷]، اجتماع مورچگان [۸]، برنامه‌ریزی تکاملی [۹] و الگوریتم جهش قورباغه [۱۰] اشاره نمود که هر یک دقت و سرعت پاسخ‌دهی متفاوتی دارند.

در این مقاله، از الگوریتم سینوس کسینوس<sup>۲</sup> برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن توابع هزینه و آلاینده‌های زیست محیطی به همراه محدودیت‌های مختلف واحدهای تولیدی و در نظر گرفتن تلفات سیستم استفاده شده است. به منظور نمایش کارآیی، روش پیشنهادی روی یک سیستم نمونه دارای منابع حرارتی، خورشیدی و بادی پیاده‌سازی شده و نتایج مطالعات عددی با چندین روش دیگر مقایسه می‌شود.

## ۲- فرمول‌بندی مسئله

این بخش به فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی تولید توان دوهدفه پویای یک سیستم قدرت ترکیبی شامل واحدهای تولیدی حرارتی، بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن هزینه بهره‌برداری انواع واحدها و اثرات زیست‌محیطی واحدهای حرارتی اختصاص داده شده است. این مسئله برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری تولید توان حرارتی با ادغام هزینه‌های تولید برق بادی و برق خورشیدی شکل گرفته است. توان بادی یک منبع پاک از انرژی‌های تجدیدپذیر است. اساساً، نیروی باد به عنوان یک عنصر اصلی در بخش تولید برق استفاده می‌شود. تنها محدودیت نیروی باد عدم قطعیت و تغییر آن در زمان‌های مختلف است. پارامترهای معمول مورد استفاده در سیستم تبدیل توان بادی عبارتند از: سرعت‌های برش، قطع و نامی، وقتی سرعت باد کمتر از سرعت قطع  $(v_{Clj})$  یا بالاتر از سرعت برش  $(v_{COj})$  باشد، توان تولید نخواهد شد. زمانی که سرعت بین سرعت قطع و سرعت نامی باشد، تولید تابع خطی از توان نامی است. زمانی

<sup>2</sup> Sine Cosine Algorithm (SCA)

بادی و  $P_S = [P_{S1} \ P_{S2} \ \dots \ P_{SN_S}]^T$  توان تولیدی واحدهای خورشیدی می‌باشند. معمولاً هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی با یک تابع درجه دوم بر حسب توان اکتیو تولیدی بیان می‌شوند. با در نظر گرفتن اثر شیرهای بخار در منحنی نرخ حرارتی، هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$F_T(P_T(t)) = \sum_{i=1}^{N_{Th}} (a_i P_{Ti}^2(t) + b_i P_{Ti}(t) + c_i + |e_i \sin\{f_i(P_{Ti}(t) - P_{Ti}^{min})\}|) \quad (\$/h) \quad (6)$$

که  $a_i$  (\$/MW<sup>2</sup>h)،  $b_i$  (\$/MWh)،  $c_i$  (\$/h)،  $e_i$  (\$/h) و  $f_i$  (rad/MW) ضرایب بهره‌برداری ژنراتور  $i$  ام می‌باشند.  $N_{Th}$  تعداد واحدهای حرارتی،  $P_{Ti}$  توان واحد حرارتی  $P_{Ti}^{max}$  و  $P_{Ti}^{min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل توان واحد حرارتی  $i$  ام می‌باشند.

در این مسئله، ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری، واحدهای حرارتی مشارکت‌کننده، آلاینده‌های گازی مانند CO<sub>2</sub>، NO<sub>x</sub> و SO<sub>2</sub> را آزاد می‌کنند. میزان انتشار آلاینده‌های منتشر شده توسط واحدهای حرارتی را می‌توان توسط رابطه (۷) محاسبه نمود [۱۸].

$$F_{TE}(P_T(t)) = \sum_{i=1}^{N_{Th}} (\alpha_i P_{Ti}^2(t) + \beta_i P_{Ti}(t) + \gamma_i + \delta_i e^{\lambda_i P_{Ti}(t)}) \quad (\text{Kg/h}) \quad (7)$$

که  $\alpha_i$  (Kg/MW<sup>2</sup>h)،  $\beta_i$  (Kg/MWh)،  $\gamma_i$  (Kg/h)،  $\delta_i$  (Kg/h) و  $\lambda_i$  (MW<sup>-1</sup>) ضرایب آلودگی ژنراتور  $i$  ام می‌باشند.

## ۲-۲ قیود سیستمی

محدودیت‌های اعمال شده برای مسئله توزیع بهینه بار به شرح زیر توضیح داده می‌شوند [۲۲-۱۹].

### الف- قید توازن تولید و مصرف

کل توان تولیدی حرارتی، بادی و خورشیدی باید تقاضای بار و تلفات شبکه انتقال را به شرح رابطه (۸) برآورده نمایند.

$$\sum_{i=1}^{N_T} P_{Ti}(t) + \sum_{j=1}^{N_W} P_{Wj}(t) + \sum_{j=1}^{N_S} P_{Sj}(t) = P_D(t) + P_L(t) \quad (\forall t \in [1, T]) \quad (8)$$

که  $P_L$  (MW) تلفات اکتیو شبکه انتقال و  $P_D$  (MW) تقاضای کل بار می‌باشند.

تلفات انتقال به عنوان یک فاکتور مهم بر توزیع بهینه بار در یک سیستم قدرت به هم پیوسته می‌باشد که در آن انرژی

شده است. به همین ترتیب، در [۱۴-۱۵] تخمین مدل PV برای اجزای تشعشع خورشیدی برای یک مکان انتخابی و برای سطوح شیب‌دار و افقی تحلیل شده است. در [۱۶-۱۷] تولید توان در یک نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی با روش ارائه شده در قسمت زیر فرمول‌بندی و محاسبه می‌شود. تولید توان از نیروگاه خورشیدی در زمان  $t$  را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان نمود:

$$P_{Sj}(t) = P_{Rj} \left( 1 + \sigma_j (T_{Cj}(t) - T_R) \right) \frac{S(t)}{1000} \quad (3)$$

که  $P_{Rj}$  توان نامی،  $T_{Cj}(t)$  دمای محیط در طول زمان  $t$  برای  $j$  امین واحد خورشیدی  $T_R$ ، دمای مرجع سلول (۲۵) درجه سانتیگراد)،  $\sigma_j = -4.7 \times 10^{-3}$  ضریب دما و  $S(t)$  تابش تصادفی خورشیدی است.

هزینه بهره‌برداری واحد خورشیدی تابع خطی توان تولیدی است و به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$F_S(t) = \sum_{j=1}^{N_S} (C_{Sj} P_{Sj}(t)) \quad (4)$$

## ۲-۱- برنامه‌ریزی توان تولیدی با در نظر گرفتن واحدهای حرارتی، بادی و خورشیدی

مسئله برنامه‌ریزی توان تولیدی دوهدفه پویا، هزینه کلی بهره‌برداری سیستم‌های تولید توان حرارتی، بادی و خورشیدی و انتشار آلاینده‌های ناشی از واحدهای حرارتی را به حداقل می‌رساند تا تقاضای بار و تلفات توان انتقال در سیستم و سایر قیود بهره‌برداری را در طی ۲۴ ساعت برآورده کند. محدودیت‌های اصلی مورد بررسی، شامل محدودیت ظرفیت ژنراتورها، اجتناب از مناطق بهره‌برداری ممنوعه، محدودیت‌های نرخ شیب واحدها و در نظر گرفتن عملکرد شیرهای کنترلی واحدهای حرارتی می‌باشند. تابع هزینه بهره‌برداری کل به عنوان مجموع هزینه واحدهای حرارتی، بادی و خورشیدی به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$F_{TWS}(t) = \sum_{t=1}^T (F_T(P_T(t)) + F_W(P_W(t)) + F_S(P_S(t))) \quad (\$) \quad (5)$$

که  $P_T = [P_{T1} \ P_{T2} \ \dots \ P_{TN_{Th}}]^T$  توان واحدهای حرارتی،  $P_W = [P_{W1} \ P_{W2} \ \dots \ P_{WN_W}]^T$  بردار توان تولیدی

پیوستگی تامین بار، طبق رابطه (۱۳) نباید از ضریب  $\psi$  بیشتر شود.

$$\sum_{j=1}^{N_W} P_{Wj}(t) + \sum_{j=1}^{N_S} P_{Sj}(t) \leq \psi P_D(t) \quad (\forall t \in [1, T]) \quad (13)$$

در روابط (۱۴) و (۱۵) محدودیت توان‌های تولیدی بادی و خورشیدی آورده شده است.

$$0 \leq P_{Wj}(t) \leq P_{Wj}^{max} \quad (\forall i \in [1, N_W], t \in [1, T]) \quad (14)$$

$$0 \leq P_{Sj}(t) \leq P_{Sj}^{max} \quad (\forall i \in [1, N_S], t \in [1, T]) \quad (15)$$

الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توان تولیدی واحدهای مختلف  $P_i$  ( $i \in [1, N]$ ) برای به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری ارائه شده توسط معادله (۵) و انتشار آلاینده‌ها توسط معادله (۷) با رعایت محدودیت‌های ارائه شده توسط روابط (۸) تا (۱۵) استفاده می‌شود.

### ۳- الگوریتم سینوس کسینوس

الگوریتم SCA یک الگوریتم فرا ابتکاری است که توسط سید علی میرجلیلی در سال ۲۰۱۶ در [۲۴] معرفی شد. به طور کلی، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، فرآیند بهینه‌سازی را با مجموعه راه‌حل‌های تصادفی شروع می‌کنند. این مجموعه تصادفی، بارها و بارها توسط یک تابع هدف ارزیابی می‌شود و توسط مجموعه‌ای از قوانین که هسته روش بهینه‌سازی است، بهبود می‌یابد. از آنجا که تکنیک‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت به طور تصادفی به دنبال بهینه‌سازی مسائل بهینه‌سازی هستند، هیچ تضمینی برای یافتن راه‌حل در یک دوره واحد وجود ندارد. با این وجود، با تعداد کافی راه‌حل‌های تصادفی و مراحل بهینه‌سازی (تکرار)، احتمال یافتن بهینه سراسری افزایش می‌یابد. صرف نظر از تفاوت بین الگوریتم‌ها در زمینه بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، معمولاً تقسیم فرآیند بهینه‌سازی در دو مرحله است:

مرحله اکتشاف<sup>۴</sup>

مرحله بهره‌برداری<sup>۵</sup>

یک الگوریتم بهینه‌سازی در مرحله اکتشاف، راه‌حل‌های تصادفی را با میزان بالایی از تصادف ترکیب می‌کند تا

الکتریکی باید در فواصل طولانی منتقل شود. مجموع تلفات انتقال توان به صورت تابع درجه دوم توان خروجی ژنراتورها طبق رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$P_L(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i(t) B_{ij} P_j(t) + \sum_{i=1}^N B_{io} P_i(t) + B_{oo} \quad (\forall t \in [1, T]) \quad (9)$$

که  $B_{oo} (MW)$ ،  $B_{io} (MW^{-1})$  و  $B_{ij} (MW^{-1})$  ضرایب تلفات انتقال،  $P_i = [P_T \quad ; \quad P_W \quad ; \quad P_S]^T$  بردار توان‌های اکتیو تولیدی توسط واحدهای حرارتی، بادی و خورشیدی و  $N = N_T + N_W + N_S$  نیز تعداد واحدهای مشارکت کننده در تامین بار می‌باشند.

### ب- محدودیت واحدهای حرارتی

توان اکتیو تولیدی هر واحد حرارتی باید محدودیت‌های زیر را برآورده نماید.

$$P_{Ti}^{min} \leq P_{Ti}(t) \leq P_{Ti}^{max} \quad (\forall i \in [1, N_T], t \in [1, T]) \quad (10)$$

### ج- محدودیت نرخ شیب

در عمل، دامنه بهره‌برداری واحدهای تولید حرارتی توسط محدودیت‌های نرخ شیب آنها محدود می‌شود [۲۳]. قیود مربوطه به شرح زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\max(P_{Ti}^{min}, P_{Ti}(t-1) - DR_i) \leq P_{Ti}(t) \leq \min(P_{Ti}^{max}, P_{Ti}(t-1) + UR_i) \quad (\forall i \in [1, N_T], t \in [1, T]) \quad (11)$$

### د- مناطق بهره‌برداری ممنوعه<sup>۳</sup>

در بهره‌برداری عملی واحدهای حرارتی، شیرهای بخار یا ارتعاش در یاتاقان شفت، مناطق بهره‌برداری ممنوعه را به شرح رابطه (۱۲) می‌سازند:

$$P_{Ti}(t) = \begin{cases} P_{Ti}^{min} \leq P_{Ti}(t) \leq P_{Ti,1}^l \\ P_{Ti,k-1}^u \leq P_{Ti}(t) \leq P_{Ti,k}^l \quad (\forall k \in [1, N_{zi}], i \in [1, N_T], t \in [1, T]) \\ P_{Ti,N_{zi}}^u \leq P_{Ti}(t) \leq P_i^{max} \end{cases} \quad (12)$$

به ترتیب کران‌های بالاتر و پایین‌تر از  $J$  زمین POZ برای واحد حرارتی  $i$ -ام و  $N_{zi}$  تعداد POZ حرارتی  $i$ -ام، می‌باشند.

به دلیل عدم قطعیت ناشی از تولید توان بادی و خورشیدی، سهم تامین بار توسط این واحدها معمولاً، با توجه به لزوم

<sup>5</sup> Exploitation Phase

<sup>3</sup> Prohibited Operating Zones (POZ)

<sup>4</sup> Exploration Phase

کسینوس در معادله ۱۶ تغییر می‌کند.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

برای صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی، مسئله توزیع بار اقتصادی دوهدفه پویا بر روی یک سیستم نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقاله یک سیستم نمونه با در نظر گرفتن تلفات انتقال، بارگذاری شیرهای کنترل، محدودیت‌های سرعت شیب و تولید برق بادی و خورشیدی هماهنگ شده با POZ در نظر گرفته می‌شود. هدف از الگوریتم پیشنهادی، حل مسئله توزیع اقتصادی پویا با اهداف دوگانه در بازه زمانی ۲۴ ساعته، برای ۶ واحد حرارتی (ماکزیمم توان تولیدی ۱۴۷۰ مگاوات)، ۵ واحد بادی و ۱۳ واحد خورشیدی (ماکزیمم تولید ۳۵۰ مگاوات) با لحاظ قیود موازنه توان، قیود توان تولیدی، نرخ شیب، مناطق بهره برداری ممنوعه، تلفات انتقال و آلودگی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز مرتبط با واحدهای حرارتی در جدول ۱ آورده شده است، ضرایب تلفات انتقال از مرجع [۲۵] استفاده شده است. بار مصرفی روزانه که باید توسط واحدهای تولیدی برآورده شود در جدول ۲ مشخص شده است و ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده نیز ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. پارامترهای تولید برق خورشیدی و مساحت آرایه‌های خورشیدی در جداول ۳ و ۴، همچنین سرعت باد در طی ۲۴ ساعت در جدول ۵ آورده شده است.

مناطق امیدوارکننده فضای جستجو را پیدا کند. در مرحله بهره‌برداری، با این حال، تغییرات تدریجی در راه‌حل‌های تصادفی رخ می‌دهد و تغییرات تصادفی به طور قابل توجهی کمتر از مراحل موجود در اکتشاف هستند. در الگوریتم SCA، معادلات به روزرسانی موقعیت زیر برای هر دو مرحله پیشنهاد شده است:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \sin(r_2) |r_3 P_i^t - X_i^t| ; r_4 < 0.5 \\ X_i^t + r_1 \cos(r_2) |r_3 P_i^t - X_i^t| ; r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

که در آن  $X_i^t$  موقعیت فعلی در بعد  $i$  و تکرار  $t$  می‌باشد و  $r_1, r_2, r_3$  عددهای تصادفی هستند و  $X_i^{t+1}$  موقعیت جدید را نشان می‌دهد و  $r_4$  نیز یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌شود.

همانطور که معادلات فوق نشان می‌دهد، چهار پارامتر اصلی در SCA وجود دارد:  $r_1, r_2, r_3$  و  $r_4$ . پارامتر  $r_1$  مناطق موقعیت بعدی (یا جهت حرکت) را که می‌تواند در فضای بین جواب و مقصد یا خارج از آن باشد، دیکته می‌کند. پارامتر  $r_2$  تعریف می‌کند که حرکت تا چه اندازه باید به سمت مقصد یا خارج باشد. پارامتر  $r_3$  به منظور تأکید تصادفی ( $r_3 > 1$ ) یا کم اهمیت ( $r_3 < 1$ ) در تعیین فاصله، وزن مخصوصی را برای مقصد به شما می‌دهد. سرانجام، پارامتر  $r_4$  به طور مساوی بین اجزای سینوسی و

جدول ۱ مشخصات واحدهای حرارتی سیستم نمونه

Unit $i$	$P_{Ti}^{min}$ (MW)	$P_{Ti}^{max}$ (MW)	$a_i$ (\$/MW <sup>2</sup> h)	$b_i$ (\$/MWh)	$c_i$ (\$/h)	UR (MW/h)	DR (MW/h)	$\alpha_i$ (Kg/MW <sup>2</sup> h)	$\beta_i$ (Kg/MWh)	$\gamma_i$ (Kg/h)
1	100.0	500.0	0.0070	7.0	240.0	80.0	120.0	0.00419	0.32767	13.8593
2	50.0	200.0	0.0095	10.0	200.0	50.0	90.0	0.00419	0.32767	13.8593
3	80.0	300.0	0.0090	8.50	220.0	65.0	100.0	0.00683	0.54551	40.2669
4	50.0	150.0	0.0090	11.0	200.0	50.0	90.0	0.00683	0.54551	40.2669
5	50.0	200.0	0.0080	10.5	220.0	50.0	90.0	0.00461	0.51116	42.8955
6	50.0	120.0	0.0075	12.0	190.0	50.0	90.0	0.00461	0.51116	42.8955

جدول ۲ تقاضای ساعتی بار در سیستم نمونه

t (h)	$P_D$ (MW)	t (h)	$P_D$ (MW)
1	955	13	1190
2	942	14	1251
3	953	15	1263
4	930	16	1250
5	935	17	1221
6	963	18	1202
7	989	19	1159
8	1023	20	1092
9	1126	21	1023
10	1150	22	984
11	1201	23	975
12	1235	24	960

جدول ۳ مشخصات واحدهای خورشیدی سیستم نمونه

Unit j	Direct cost coefficient $C_{Sj}$ (\$/kWh)	Rated Power, $P_R$ (MW)	Area of PV array $A_{pvj}$ (m <sup>2</sup> )
1	0.22	20	18032.61
2	0.22	20	18032.61
3	0.22	20	18032.61
4	0.23	25	22540.76
5	0.23	25	22540.76
6	0.23	25	22540.76
7	0.24	25	22540.76
8	0.24	30	27048.91
9	0.25	30	27048.91
10	0.25	30	27048.91
11	0.25	30	27048.91
12	0.26	35	31557.06
13	0.27	35	31557.06

جدول ۴ درجه حرارت و میزان تابش ۲۴ ساعته سیستم نمونه

Time t	Incident Solar Radiation, $S_t$ (W/m <sup>2</sup> )	Temperature $T_{cj}(t)$ (°C)	Time t	Incident Solar Radiation $S_t$ (W/m <sup>2</sup> )	Temperature $T_{cj}(t)$ (°C)
1:00	0	30	13:00	1013.5	37
2:00	0	29	14:00	848.2	37
3:00	0	28	15:00	726.7	37
4:00	5.4	28	16:00	654	38
5:00	0	28	17:00	392.9	38
6:00	101	28	18:00	215.1	37
7:00	253.7	29	19:00	38.5	35
8:00	541.2	31	20:00	0	34
9:00	530.4	33	21:00	0	34
10:00	793.9	34	22:00	0	33
11:00	1078	35	23:00	0	32
12:00	1125.6	36	0:00	0	31

جدول ۵ سرعت باد در طول ۲۴ ساعت برای پنج واحدی بادی سیستم نمونه

Time t	سرعت باد واحدها (m/s)					Time t	سرعت باد واحدها (m/s)				
	$V_1(t)$	$V_2(t)$	$V_3(t)$	$V_4(t)$	$V_5(t)$		$V_1(t)$	$V_2(t)$	$V_3(t)$	$V_4(t)$	$V_5(t)$
1	5.788	8.284	6.367	6.946	9.112	13	7.035	10.202	7.739	8.442	11.222
2	5.358	8.149	5.894	6.43	8.964	14	6.414	8.966	7.055	7.697	9.863
3	5.829	9.446	6.412	6.995	10.391	15	6.165	8.213	6.782	7.398	9.034
4	7.193	9.134	7.912	8.632	10.047	16	7.591	8.127	8.35	9.109	8.94
5	7.989	8.284	8.788	9.587	9.112	17	7.063	9.836	7.769	8.476	10.82
6	7.559	7.19	8.315	9.071	7.909	18	7.25	6.826	7.975	8.7	7.509
7	7.25	6.826	7.975	8.7	7.509	19	7.559	7.19	8.315	9.071	7.909
8	7.063	9.836	7.769	8.476	10.82	20	7.989	8.284	8.788	9.587	9.112
9	7.591	8.127	8.35	9.109	8.94	21	7.193	9.134	7.912	8.632	10.047
10	6.165	8.213	6.782	7.398	9.034	22	5.829	9.446	6.412	6.995	10.391
11	6.414	8.966	7.055	7.697	9.863	23	5.358	8.149	5.894	6.43	8.964
12	7.035	10.202	7.739	8.442	11.222	24	5.788	8.284	6.367	6.946	9.112

محدودیت های اقتصادی و انتشار آلودگی را برآورده می- کند، حل می‌شود. میزان مشارکت واحدهای خورشیدی در تامین بار در جداول ۶ و ۷ و سهم واحدهای بادی در تامین بار در جدول ۸ آمده است.

روش پیشنهادی با استفاده از نرم افزار MATLAB برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار دو هدفه بر روی سیستم نمونه توسط یک کامپیوتر شخصی با مشخصات ۱۰۰ گیگاهرتز Intel Core i5 با رم ۸ گیگابایتی پیاده‌سازی شده است. توزیع بار پویا دو هدفه با استفاده از SCA که



جدول ۶ سهم واحدهای خورشیدی ۱ تا ۶ در تامین بار در طی ساعات ۱۰ تا ۱۵

Time, t	مشارکت واحدها $U_{S1} \dots U_{S13}$	(MW) توان تولیدی خورشیدی					
		$P_{S1}$	$P_{S2}$	$P_{S3}$	$P_{S4}$	$P_{S5}$	$P_{S6}$
10	0111111111111	0	20.68705	20.68705	20.68705	24.82446	24.82446
11	1001001111111	22.57332	0	0	28.21665	0	0
12	1010100111111	23.67587	0	29.59484	0	35.51381	0
13	1011101110111	21.41323	0	26.76653	26.76653	32.11984	0
14	0111011111111	0	22.40096	22.40096	22.40096	0	26.88116
15	1111111111111	15.35372	19.19215	19.19215	19.19215	23.03058	23.03058

جدول ۷ سهم واحدهای خورشیدی ۷ تا ۱۳ در تامین بار در طی ساعات ۱۰ تا ۱۵

Time, t	(MW) توان تولیدی خورشیدی							$P_s = \sum P_{Si}$ (MW)	$0.3P_{Dt}$ (MW)
	$P_{S7}$	$P_{S8}$	$P_{S9}$	$P_{S10}$	$P_{S11}$	$P_{S12}$	$P_{S13}$		
10	28.96187	28.96187	33.09928	33.09928	33.09928	33.09928	33.09928	335.1302	345.0
11	39.50331	39.50331	45.14664	45.14664	45.14664	45.14664	45.14664	355.5298	360.3
12	0	41.43277	47.35174	47.35174	47.35174	47.35174	47.35174	366.976	370.5
13	37.47315	37.47315	42.82645	0	42.82645	42.82645	42.82645	353.3182	357.0
14	31.36135	31.36135	35.84154	35.84154	35.84154	35.84154	35.84154	336.0145	375.3
15	26.86901	26.86901	30.70744	30.70744	30.70744	30.70744	30.70744	326.2665	378.9

جدول ۸ سهم واحدهای بادی در تامین بار در طی ۱۸ ساعت

Time, t	Wind Generation (MW)					$P_W = \sum P_{Wi}$ (MW)
	$P_{W1}$	$P_{W2}$	$P_{W3}$	$P_{W4}$	$P_{W5}$	
1	15.57893	27.82928	17.675	20.22149	33.74208	115.0468
2	14.31375	26.95257	15.92898	17.93023	32.61759	107.7431
3	15.71254	36.38793	17.85677	20.45767	44.68591	135.1008
4	21.44488	33.91174	25.47269	30.20215	41.52638	152.5578
5	25.94522	27.82928	31.31867	37.54988	33.74208	156.3851
6	23.4084	21.42953	28.03405	33.42762	25.45444	131.754
7	21.73884	19.65672	25.85871	30.68481	23.12955	121.0686
8	20.79077	39.66708	24.61628	29.11832	48.84893	163.0414
9	23.58863	26.81202	28.2668	33.71899	32.43801	144.8245
16	23.58863	26.81202	28.2668	33.71899	32.43801	144.8245
17	20.79077	39.66708	24.61628	29.11832	48.84893	163.0414
18	21.73884	19.65672	25.85871	30.68481	23.12955	121.0686
19	23.4084	21.42953	28.03405	33.42762	25.45444	131.754
20	25.94522	27.82928	31.31867	37.54988	33.74208	156.3851
21	21.44488	33.91174	25.47269	30.20215	41.52638	152.5578
22	15.71254	36.38793	17.85677	20.45767	44.68591	135.1008
23	14.31375	26.95257	15.92898	17.93023	32.61759	107.7431
24	15.57893	27.82928	17.675	20.22149	33.74208	115.0468

مختلف به همراه هزینه‌های انتشار آلودگی در طول ۲۴ ساعت نشان داده شده است.

در جدول ۹ نتایج اجرای برنامه توزیع بهینه بار با در نظر گرفتن سهم واحدهای حرارتی، خورشیدی و بادی به همراه تلفات سیستم و در جدول ۱۰ هزینه تولید واحدهای

جدول ۹ برنامه‌ریزی توان تولیدی واحدهای حرارتی، خورشیدی و بادی به همراه تلفات سیستم در طول ۲۴ ساعت

Time Interval (h)	$P_{T1}$ (MW)	$P_{T2}$ (MW)	$P_{T3}$ (MW)	$P_{T4}$ (MW)	$P_{T5}$ (MW)	$P_{T6}$ (MW)	$P_S$ (MW)	$P_W$ (MW)	$P_{Loss}$ (MW)
1	161.5056	117.5374	145.7692	126.3069	175.836	120	0	115.0468	7.0019
2	161.471	117.055	143.3756	125.5456	173.7046	119.9999	0	107.7431	6.8950
3	156.0651	112.0026	143.2382	123.5421	169.7176	120	0	135.1008	6.6664
4	142.1707	110.3891	133.3105	120.0056	157.6095	120	0	152.5578	6.0433
5	141.2525	110.0205	134.4971	120.0352	158.9216	119.9762	0	156.3851	6.0881
6	158.915	116.6252	143.2183	126.5651	172.7609	120	0	131.754	6.8385
7	168.9543	124.2151	149.9298	132.5777	179.5592	120	0	121.0686	7.3047
8	167.1428	121.7019	149.91	130.042	178.3818	120	0	163.0414	7.2198
9	192.8335	160.0337	170.046	147.4266	199.7267	119.9994	0	144.8245	8.8904
10	156.2084	110.6834	142.1685	122.3703	170.099	120	335.1302	0	6.6599
11	163.823	118.1541	145.4821	129.4118	175.619	120	355.5298	0	7.0197
12	169.5252	123.7988	149.964	132.235	179.8184	119.998	366.976	0	7.3153
13	161	116.9511	146.2772	126.9479	172.3764	120	353.3182	0	6.8710
14	183.7162	136.4785	149.9777	140.2096	192.6708	120	336.0145	0	8.0674
15	182.6738	139.605	170.0466	140.3231	192.367	120	326.2665	0	8.2819
16	252.5151	189.605	203.3999	150	200	120	0	144.8245	10.3445
17	240.0659	173.6061	184.0149	150	200	120	0	163.0414	9.7283
18	240.0174	187.6411	193.2913	150	200	120	0	121.0686	10.0184
19	209.9791	173.068	183.5788	150	200	119.9993	0	131.7540	9.3793
20	182.3961	137.1227	170.0305	140.9148	193.4563	119.9976	0	156.3851	8.3031
21	168.9713	125.4891	149.9511	132.0885	181.3243	120	0	152.5578	7.3821
22	164.2908	117.3058	146.6031	129.3917	178.4417	120	0	135.1008	7.1339
23	168.9692	123.9666	149.9032	132.3215	179.392	120	0	107.7431	7.2956
24	161.5941	118.0615	147.4726	129.0989	175.753	119.9978	0	115.0468	7.0248

جدول ۱۰ هزینه تامین بار و میزان آلودگی در طول ۲۴ ساعت

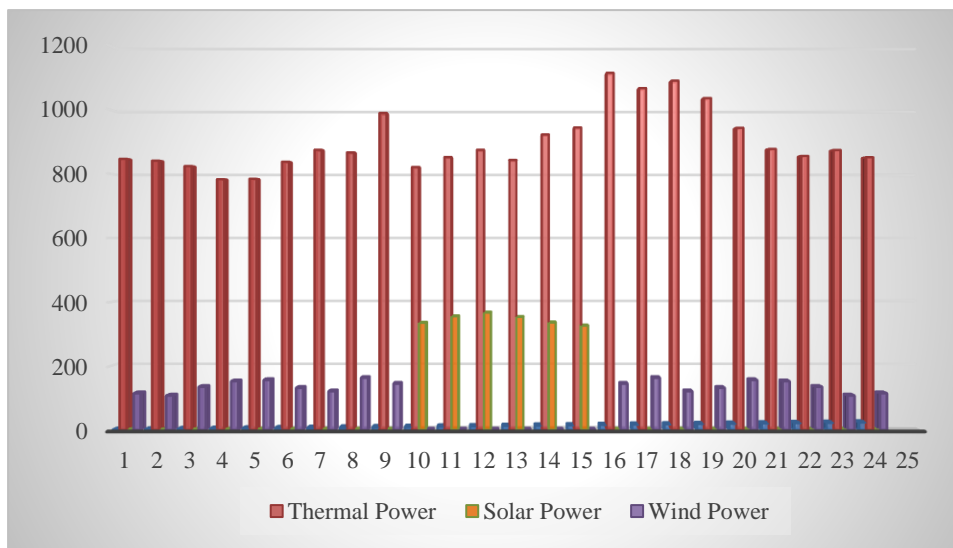
Time Interval (h)	$P_D$ (MW)	$\sum P_i$ (MW)	$F_{TE}$ (Kg/h)	$F_{TC}$ (\$/h)	$F_S$ (\$/h)	$F_W$ (\$/h)	$F_{TWS}$ (\$/h)
1	955	962.0019	616.0225	10494.6000	0.0	638.6609	16086.52
2	942	948.8948	608.6717	10423.3700	0.0	600.1143	15917.63
3	953	959.6664	586.4196	10231.1200	0.0	762.1555	15708.51
4	930	936.0432	533.1008	9770.7230	0.0	840.6337	14897.87
5	935	941.0882	534.0334	9788.1200	0.0	841.3672	14923.49
6	963	969.8385	603.7935	10393.7500	0.0	701.7505	15950.43
7	989	996.3047	655.7263	10825.7900	0.0	644.1115	16742.41
8	1023	1030.2199	644.6328	10728.0000	0.0	908.9116	16820.22
9	1126	1134.8904	832.3858	12210.9500	0.0	781.7788	19685.70
10	1150	1156.6598	582.5629	10194.1700	87837.21	0.0	102715.60
11	1201	1208.0198	623.8257	10558.8700	95202.98	0.0	110777.80
12	1235	1242.3154	656.0681	10825.2300	97307.82	0.0	113408.30
13	1190	1196.8708	612.1158	10450.9600	92398.08	0.0	107770.90
14	1251	1259.0673	725.7158	11398.5200	88663.02	0.0	105896.80
15	1263	1271.282	761.1045	11653.8100	84867.67	0.0	102641.30
16	1250	1260.3445	1087.3860	13643.2700	0.0000	781.7788	23168.41
17	1221	1230.7283	987.3038	13065.6500	0.0000	908.9116	21913.18
18	1202	1212.0184	1031.8780	13364.0100	0.0000	644.1115	22305.15
19	1159	1168.3792	918.8956	12747.9400	0.0000	701.7505	20838.27
20	1092	1100.3031	759.0616	11642.3900	0.0000	841.3672	18587.15
21	1023	1030.3821	658.9552	10859.0400	0.0000	840.6337	16998.14
22	984	991.1339	628.2721	10602.6800	0.0000	762.1555	16416.59
23	975	982.2956	654.8575	10816.9000	0.0000	600.1143	16682.53
24	960	967.0247	622.5969	10556.8100	0.0000	638.6609	16201.59
Total		26154.4057	26155.7729	16925.3859	257229.0002	546276.78	13438.968

h = 8.04071 \$/kg

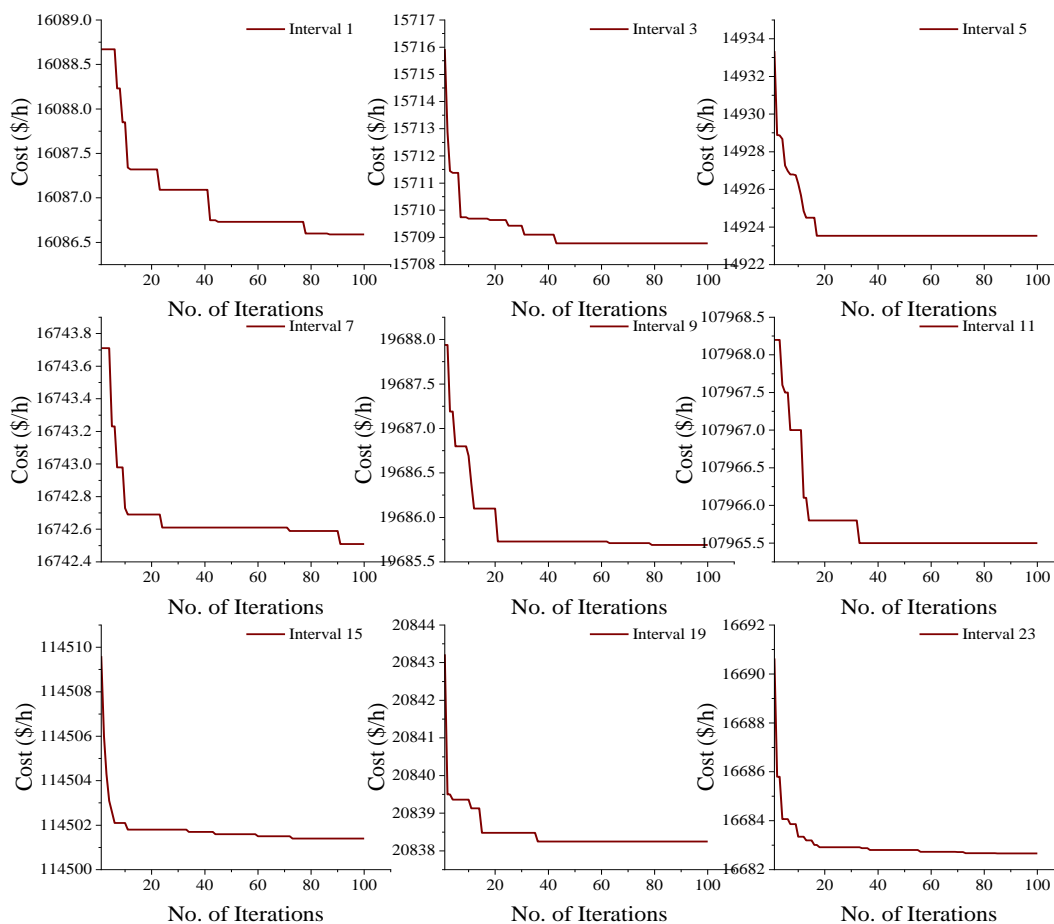
در شکل (۱) نمودار میله‌ای سهم واحدهای تولیدی مختلف در طول یک شبانه روز نشان داده شده است و همچنین نمودارهای همگرایی تابع هدف برای سیستم نمونه در فواصل زمانی مختلف به طور نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است.

در جدول ۱۱ متغیرهای خروجی شامل هزینه‌ها، تلفات و آلودگی سیستم نمونه، حاصل از شبیه‌سازی به طور خلاصه آمده است.

در شکل (۱) نمودار میله‌ای سهم واحدهای تولیدی مختلف در طول یک شبانه روز نشان داده شده است و همچنین نمودارهای همگرایی تابع هدف برای سیستم نمونه در فواصل زمانی مختلف به طور نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱ سهم واحدهای تولیدی مختلف در طول یک شبانه روز



شکل ۲ نمودارهای همگرایی تابع هدف برای سیستم نمونه برای فواصل مختلف

جدول ۱۱ متغیرهای خروجی شامل هزینه‌ها، تلفات و آلودگی سیستم نمونه

سیستم تست	متغیرهای خروجی
۹۶۳۰۵۴.۴۹۰۰	بهترین هزینه کل (\$)
۹۶۳۰۵۴.۹۰۰	هزینه متوسط کل (\$)
۹۶۳۰۵۹.۳۰۰	بدترین هزینه کل (\$)
۲۶۷۲۲۹.۰۰۲	هزینه کل واحدهای حرارتی (\$)
۱۳۴۳۸.۹۶۸۰	هزینه کل واحدهای خورشیدی (\$)
۵۴۶۲۷۶.۷۸۰۰	هزینه کل واحدهای بادی (\$)
۱۸۳.۷۷۳۳	تلفات انتقال (MW)
۱۶۹۲۵.۳۸۵۹	آلودگی (Kg)

در جدول ۱۲ جهت صحت‌سنجی و اعتبار سنجی روش پیشنهادی با چندین روش فراابتکاری دیگر مقایسه شده است.

جدول ۱۲ مقایسه نتایج بدست آمده با روشهای دیگر

روش	بهترین پاسخ	متوسط	بدترین پاسخ	زمان (شبه سازی)
GA	963056.4510	963058.2300	963062.5210	142.0
PSO	963055.8710	963058.9451	963061.2010	3.4
SLFA	963055.0120	963058.1033	963060.4400	2.9
SCA	963054.4900	963056.9000	963059.3000	1.7

## ۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی از یک سیستم نمونه، استفاده و نتایج عددی به دست آمده ارائه شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم سینوس کسینوس با دیگر روش‌ها، گویای برتری روش پیشنهادی از نظر دقت و سرعت نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. نتایج به دست آمده در سیستم‌های متشکل از واحدهای حرارتی با محدودیت‌های عملی و واحدهای خورشیدی و بادی نشان می‌دهد که روش ارائه شده ابزار مناسبی برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار در سیستم‌های قدرت می‌باشد.

در این مقاله، مسئله توزیع بهینه بار با در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی در حضور واحدهای حرارتی، خورشیدی و بادی با توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری و فیزیکی ارائه گردید. توان تولیدی منابع تجدیدپذیر مورد استفاده برای تامین بار، در هر ساعت به درصد معینی از تقاضای بار محدود در نظر گرفته شد تا عدم قطعیت تابش خورشید و سرعت باد برای تامین منابع برطرف شود.

## مراجع

- [1] R. Singh, P.N. Narang, and H. Garg. "A novel TVAC-PSO based mutation strategies algorithm for generation scheduling of pumped storage hydrothermal system incorporating solar units." *Energy* 142. (2018): 822-837.
- [2] R. Jabr, A. Coonick, and B.J. Cory. "A homogeneous linear programming algorithm for the security constrained economic dispatch problem." *IEEE Transactions on Power Systems* 15. no. 3 (2000): 930-936.
- [3] A. Victoire, and A.E. Jeyakumar. "Hybrid PSO-SQP for economic dispatch with valve-point effect." *Electric Power Systems Research* 71. no. 1 (2004): 51-59.

- [4] J. Kim. and K.K. Kim. "Dynamic programming for scalable just-in-time economic dispatch with non-convex constraints and anytime participation." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 123. no. 5 (2020): 1-13.
- [5] A.A. Haghrah, M. Nekoui, M.N. Heris, and B. Mohammadi-ivatloo. "An improved real-coded genetic algorithm with random walk based mutation for solving combined heat and power economic dispatch." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 12 (2020): 8561–8584.
- [6] M. Gholamghasemi, E. Akbari, M.B. Asadpoor, and M. Ghasemi. "A new solution to the non-convex economic load dispatch problems using phasor particle swarm optimization." *Applied Soft Computing Journal* 79 (2019). 111–124.
- [7] C. Panigrahi, R. Chakrabarti, and M. Basu. "Simulated Annealing Technique for Dynamic Economic Dispatch." *Electric Power Components and Systems* 34. no. 5 (2017): 577-586.
- [8] S. Pothiya, I. Ngamroo, and W. Kongprawechnon. "Ant colony optimization for economic dispatch problem with non-smooth cost functions." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 32. no. 5 (2010): 478-487.
- [9] D. Zou, S. Li, X. Kong, and H. Ouyang. "Solving the dynamic economic dispatch by a memory-based global differential evolution and a repair technique of constraint handling." *Energy* 147 (2018): 59-80.
- [10] S. Momen, J. Nikoukar, and M. Gandomkar. "Multi-objective optimization of energy consumption in microgrids considering CHPs and renewables using improved shuffled frog leaping algorithm." *Journal of Electrical Engineering & Technology*. (2022): 1-17.
- [11] A. Abid, T.N. Malik, F. Abid, and I.A. Sajjad. "Dynamic economic dispatch incorporating photovoltaic and wind generation using hybrid FPA with SQP." *IETE Journal of Research* 66, no. 2 (2020): 204-213.
- [12] J. Nikoukar. "Unit commitment considering the emergency demand response programs and interruptible/curtailable loads." *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* 26. no. 2 (2018): 1069-1080.
- [13] M. El-hameed, and A. El-Fergany. "Water cycle algorithm-based economic dispatcher for sequential and simultaneous objectives including practical constraints." *Applied Soft Computing Journal* 58. (2017): 145–154.
- [14] V.B. Vommi, and R. Vemula. "A very optimistic method of minimization for unconstrained methods". *Information Science*. (2018): 255-274.
- [15] S. Padhi, B.P. Panigrahi, and D. Dash. "Assessment of Dynamic Economic and Emission Dispatch Problem using WOA in networked grids with photovoltaic power injection." *Transactions of the Indian National Academy of Engineering* 5, no. 4 (2020): 675-696.
- [16] Z. Ullah, S. Wang, J. Radosavljevic, and J. Lai. " A solution to the optimal power flow problem considering WT and PV generation." *IEEE Access*. 7 (2019): 46763-46772.
- [17] S.A. Mousavi Maleki, H. Hizam, and C. Gomes. "Estimation of hourly daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models Re-visited." *Energies* 10. no. 1 (2017): 1-28.
- [18] S. Tan, X. Wang, and C. Jiang. "Optimal scheduling of hydro-pv-wind hybrid system considering CHP and BESS coordination." *Applied Sciences* 9. no. 5 (2019): 1-18.
- [19] Y. Yin, T. Liu, and C. He. "Day-ahead stochastic coordinated scheduling for thermal-hydro-wind-photovoltaic systems." *Energy* 187 (2019): 1-12.
- [20] M. Basu. "Dynamic economic dispatch incorporating renewable energy sources and pumped hydro energy storage." *Soft Computing* 24 (2019): 4829-4840.
- [21] S. Pan, J. Jian, and L. Yang. "A hybrid MILP and IPM approach for dynamic economic dispatch with valve-point effect." *Electric Power Energy System* 97 (2018): 290-298.
- [22] S. Pan, J. Jian, and L. Yang. "A full mixed-integer linear programming formulation for economic dispatch with valve-point effects, transmission loss and prohibited operating zones." *Electric Power Systems Research* 180 (2020): 1045-1056.
- [23] C. Shilaja, and K. Ravi. "Optimization of emission/economic dispatch using Euclidean affine flower pollination algorithm (eFPA) and binary FPA (BFPA) in solar photo voltaic generation." *Renewable Energy* 107 (2017): 550-566.

- [24] S.A. Mirjalilia. "SCA: A Sine cosine algorithm for solving optimization problems." *Knowledge-Based Systems* 96 (2016): 120-133.
- [25] Z.L. Gaing. "Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints." *IEEE Transactions on Power Systems* 18. no. 3 (2003): 1187-1195.