JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 14/ No. 56/ Winter 2023
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

20.1001.1.23223871.1402.14.56.4.4

Research Article

Apply a Mutation in Gray Wolf Optimization Algorithm to Solve the Economic-Environmental Dispatch Problem of Integrated Power Plants Including Thermal and Wind

Mahdi Afroozeh[1], *Ph.D. Student*, Hamidreza Abdolmohammadi[1,2], *Assistant Professor*, Mohammad-Esmaeil Nazari[2], *Assistant Professor*

[1]Department of Electrical Engineering- Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran
[2]Electrical and Computer Engineering Group- Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran
mahdiafroozeh@iaukhomein.ac.ir, abdolmohammadi@iut.ac.ir, menazari@iut.ac.ir

Abstract
In this paper, a dynamic mutant version of the gray wolf optimization algorithm (MGWO) is proposed to solve the economic-environmental dispatch (E-ED) problem of a standard 40-unit power system with two wind farms. Thus, a comprehensive objective function of operating costs is presented, which is a combination of wind energy costs, over-estimated penalty costs, under-estimated penalty costs, thermal unit costs and emission costs. Due to the random nature of wind speed, the power generated by wind turbines is unpredictable. Therefore, the Weibull probability distribution function has been used to model the wind farm power in this paper. The cost of operating a wind farm is considered probabilistic so that low-probability wind scenarios have less effect on the total operation cost. The simulations are performed in the form of three section and the optimization results are compared with several meta-heuristic algorithm results for validation. The results of the optimizations in all three scenarios and its comparison with other algorithms confirm the better performance and higher accuracy of the proposed MGWO algorithm than the original version of the gray wolf algorithm (GWO) as well as other algorithms.

Keywords: economic environmental dispatch, mutant gray wolf optimization algorithm, steam valve effect, wind farms

Received: 21 April 2022
Revised: 30 May 2022
Accepted: 4 July 2022

Corresponding Author: Dr. Hamidreza Abdolmohammadi

Citation: M. Afroozeh, H.R. Abdolmohammadi, M.E. Nazari, "Apply a mutation in gray wolf optimization algorithm to solve the economic-environmental dispatch problem of integrated power plants including thermal and wind", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 56, pp. 59-76, January 2023 (in Persian).

20.1001.1.23223871.1402.14.56.4.4

مقاله پژوهشی

ایجاد یک جهش در الگوریتم گرگ خاکستری برای حل مسئله توزیع اقتصادی-زیست‌محیطی نیروگاه‌های ادغام شامل حرارتی و بادی

مهدی افروزه[۱]، دانشجوی دکتری، حمیدرضا عبدالمحمدی[۱،۲]، استادیار، محمد اسماعیل نظری[۲]، استادیار

۱- گروه مهندسی برق- واحد خمین، دانشگاه آزاد اسلامی، خمین، ایران

۲- گروه مهندسی برق و کا مپیوتر- دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان

mahdiafroozeh@iaukhomein.ac.ir, abdolmohammadi@iut.ac.ir, menazari@iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله نسخه جهش یافته دینامیکی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای حل مسئله پخش بار اقتصادی-زیست‌محیطی سیستم قدرت استاندارد ۴۰ واحدی به همراه دو مزرعه بادی پیشنهاد شده است. لذا تابع هدفی جامع از هزینه-های بهره‌برداری که ترکیبی از هزینه‌های مستقیم انرژی باد، هزینه جریمه تخمین بیش از حد، هزینه جریمه تخمین کمتر از حد، هزینه واحد حرارتی و هزینه آلایندگی، ارائه شده است. با توجه به ماهیت تصادفی سرعت باد توان تولیدی توسط توربین-های بادی غیرقابل پیش‌بینی است، بنابراین از تابع توزیع احتمال ویبول برای مدل‌سازی توان مزرعه‌های باد در این مقاله استفاده شده است. هزینه بهره‌برداری مزرعه بادی به‌صورت احتمالاتی در نظر گرفته شده است تا سناریوهای باد با احتمال پایین تاثیر کمتری در هزینه نهایی داشته باشند. شبیه‌سازی‌ها در قالب سه بخش انجام شده است و به‌منظور اعتبارسنجی با مرجع‌های دیگر مورد مقایسه واقع شده است. نتایج حاصل شده از بهینه‌سازی‌ها در هر سه سناریو و مقایسه آن با الگوریتم‌های هوشمند تائیدی بر عملکرد بهتر و دقت بالاتر الگوریتم پیشنهادی نسبت به نسخه اصلی الگوریتم گرگ خاکستری و همچنین سایر الگوریتم‌ها دارد.

کلمات کلیدی: اثر شیر بخار، توزیع اقتصادی زیست‌محیطی، الگوریتم گرگ خاکستری جهش یافته، مزرعه‌های بادی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۳/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا عبدالمحمدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: خمین- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین- دانشکده فنی مهندسی- گروه برق

۱- مقدمه

با رشد فزاینده تقاضای انرژی الکتریکی و هم‌چنین افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و آلایندگی‌های زیست‌محیطی[۱] واحدهای حرارتی، توجه‌ها به سمت کاهش هزینه و آلایندگی افزایش پیدا کرده است. ارائه برنامه دقیق مشارکت واحدها یکی از روش-های کاهش هزینه و آلایندگی است [۱]. از سویی استفاده از منابع تجدیدپذیر راه‌کاردیگری برای تامین برق ارزان و پاک در سیستم‌های قدرت است. حضور گسترده منابع تجدیدپذیر مانند مزرعه‌های باد[۲] می‌تواند در مطالعه برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولید توان در سیستم‌های قدرت تاثیر مستقیم داشته باشد [۲]. در ادامه برخی از مقاله‌های منتشر شده در زمینه برنامه‌ریزی مشارکت واحدها را می‌توان به شش دسته روش‌های سنتی، روش‌های ابتکاری، روش‌های هوش مصنوعی، روش-های تصادفی، روش‌های کنترل تخمینی[۳] و دیگر روش‌های تئوری تقسیم کرد [۳]. روش‌های سنتی مورد استفاده در برنامه مشارکت واحدهای[۴] (UC) تولید توان شامل روش‌های برنامه‌ریزی خطی[۵] (MILP) [۴]، برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط [۵]، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط [۶]، روش‌های قانونمند برنامه‌ریزی دینامیکی[۶] [۷] هستند. در مرجع [۸] برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط یکی از رویکردهای اصلی مورد استفاده برای حل مسئله تعهد واحد است که با توجه به پیچیدگی محاسباتی، مسئله با حضور متغیرات باینری بیان می‌شود که هدف آرام‌سازی متغیرهای دوتایی[۷] است. در مرجع [۹] تمرکز بر بهبود عملکرد محاسباتی برای حل مسئله UC مبتنی بر سود قطعی بوده که برای دستیابی به این هدف، یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویا کارآمد با فرمول‌های برنامه خطی پیشنهاد شده است. از طرفی در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های فرا-ابتکاری همچون الگوریتم‌های هوشمندی از قبیل الگوریتم‌های ژنتیک[۸] [۱۰]، بهینه سازی ازدحام ذرات[۹] (PSO) [۱۱]، تکامل تفاضلی باینری[۱۰] (BDE) [۱۲] و سایر الگوریتم‌ها مثل الگوریتم نهنگ[۱۱] و الگوریتم سینوس-کسینوس[۱۲] [۱۳-۱۵] با هدف برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۱۶] یک نسخه بهبود یافته از یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر ژنتیک ارائه گردیده تا این روش با توصیف دقیق‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر به حل مسئله بپردازد. اما ضعف مقاله‌هایی که اشاره شده‌اند، آن است که در مطالعه از عدم‌قطعیت‌ها صرف‌نظر کرده‌اند. عدم‌قطعیت بخش غیرقابل چشم‌پوشی در مطالعه سیستم‌های قدرت است به‌طوری‌که صرف‌نظر از آن باعث کاهش دقت مطالعه می‌شود. در مرجع [۱۷]، عدم قطعیت بار، در مرجع [۱۸]، عدم قطعیت بازار و در مرجع [۱۹] عدم قطعیت میزان رزرو چرخان[۱۳] در نظر گرفته شده است. برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولیدپراکنده تجدیدپذیر با ضریب نفوذپذیر بالا، می‌تواند تحت تاثیر این منابع قرار گیرد. در صورت حضور منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی با ضریب نفوذپذیری بالا، به دلیل ماهیت تصادفی توان تولیدی این منابع و عدم‌قطعیت‌ها، پیچیدگی مسئله UC افزایش پیدا کرده است. در این شرایط پیشنهاد شده که از روش‌های احتمالاتی مانند کاهش سناریو [۲۰]، چارچوب سناریو احتمالی [۲۱] برای حل مسئله UC استفاده شود. در مرجع‌های [۲۲]، [۲۳] و [۲۴] عدم‌قطعیت در توان تولیدی مزرعه بادی و در مرجع [۲۵]، عدم‌قطعیت در توان مزرعه خورشیدی در مطالعه UC در نظر گرفته شده است. در این مقاله یک مدل جامع و دقیق از یک سیستم برای توزیع اقتصادی-زیست‌محیطی[۱۴] (EE-D) از ادغام واحد حرارتی سنتی با نیروگاه بادی ارائه شده است. در مدل EE-D پیشنهادی، تأثیر شیر بخار واحدهای حرارتی و همچنین هزینه انتشار آلایندگی در نظر گرفته شده است. در تعریف تابع اصلی، هزینه بهره‌برداری از مزرعه بادی به‌صورت احتمالی در نظر گرفته شده تا این هزینه بهره‌برداری با توجه به احتمال وقوع در مقدار نهایی تابع هدف، بصورت تاثیرگذار قرار گیرد.

همچنین الگوریتم بهینه‌سازی جهش یافته گرگ خاکستری[۱۵] برای حل مسئله توزیع اقتصادی-زیست محیطی ارائه شده است. در مسئله EE-D، محدودیت‌هایی در نظر گرفته شده تا پاسخ پیشنهادی را به واقعیت نزدیک کند. ایده‌های اصلی این مقاله به شرح زیر هستند:

- پیشنهاد الگوریتم اصلاح شده گرگ خاکستری با ضرایب دینامیکی.
- در نظر گرفتن تابعی احتمالی برای هزینه مزرعه بادی در تابع هدف مسئله توزیع اقتصادی بار.

در جدول (۱) مروری بر تعدادی از مقاله‌ها و روش حل آن‌ها علاوه بر روش‌های فوق مانند برنامه ریزی تصادفی عدد صحیح پویا دوگانه[۱۶] (SDDIP)، باینری سینوس‌کسینوس[۱۷] (BSC) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه تقویت شده[۱۸] (EMOPSO) انجام شده است.

Table (1): A review of references

جدول (۱): مروری بر مرجع‌ها

ایده اصلی تحقیق	عدم-قطعیت	آلایندگی	واحد تولید توان		روش بهینه‌سازی	مرجع
			واحد بادی	واحد حرارتی		
یک رابطه تطبیقی ابتکاری برای حل مسئله				■	MILP	[۴]
به‌کارگیری تکنیک خطی‌سازی بر اساس تنظیم صحیح پارامترها				■	Piecewise linearization	[۵]
یک مدل بهبود یافته بر اساس اصلاح محدودیت‌های سلسله مراتبی و شاخص نوسان			■	■	Improved MILP	[۶]
یک رابطه مبتنی بر برنامه‌نویسی پویا برای انطباق و تجزیه مرحله‌ای	■			■	SDDIP algorithm	[۷]
بررسی و مقایسه تاثیر متغیرهای باینری به‌همراه آرایش مختلف				■	MILP	[۸]
یک الگوریتم کارآمد با فرمول‌بندی جدید به نام پیش‌بینی حالت به‌همراه استراتژی خطی، جهت محاسبه زمان و تعداد حالت‌ها				■	MILP and Backward DP	[۹]
ادغام الگوریتم ژنتیک کدگذاری شده باینری و روش خوشه‌بندی جهت جلوگیری از به‌دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی				■	GA algorithm-based clustering	[۱۰]
تعیین تابع هزینه تولید برای هر واحد تولیدی با استفاده از روش برآورد حداقل مربعات				■	PSO algorithm	[۱۱]
الگوریتم BDE را به‌عنوان یک اپراتور جستجوی سراسری جهت پیاده‌سازی یک استراتژی جهش جدید				■	Memetic BDE algorithm	[۱۲]
تابع انتقال سیگموئید برای به روز رسانی موقعیت نهنگ‌ها				■	Novel BWO Algorithm	[۱۳]
تابع تبدیل سیگموئیدی اصلاح شده برای نگاشت باینری فضای جستجوی با ارزش واقعی				■	BSC algorithm	[۱۴]
طرح کدگذاری واقعی در الگوریتم گرگ خاکستری به‌منظور رسیدگی به محدودیت‌های عملیاتی			■	■	GWO algorithm	[۱۵]
بهبود الگوریتم به کمک مولدهای کروموزوم، جهش و عملگر، در یک طرح نمونه‌گیری مونت کارلو، برای مسئله ED			■	■	Improved genetic algorithm	[۱۶]
روش چگالی هسته غیر پارامتری، برای نشان دادن عدم‌قطعیت-های ترکیبی	■	■	■	■	RL-MOPSO algorithm	[۱۷]
به‌کارگیری مفهوم جدید برای قیمت‌گذاری در شرایط عدم قطعیت	■			■	Robust	[۱۸]
تعیین برنامه منطبق با کنترل فرکانس اولیه پس از هر احتمال و عدم‌قطعیت رزرو چرخان	■			■	MINLP	[۱۹]
نوع جدیدی از روش هایپرپلان پشتیبان برای مسائل بهینه‌سازی کامپیوتر با عدد صحیح مختلط	■		■	■	Novel MIP	[۲۰]
یک چارچوب مبتنی بر سناریو احتمالی برای مقادیر سناریوهای محتمل انرژی باد		■	■	■	EMOPSO algorithm	[۲۱]
مدل مقاوم دو مرحله‌ای به روش تجزیه بندرز	■		■	■	Two-stage Robust-Bender's decomposition	[۲۲]
معرفی الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله مشارکت واحدها و مقایسه نتایج آن‌ها	■	■	■	■	h-Heuristic	[۲۳]
استفاده ترکیبی از سناریوها برای مقابله با عدم‌قطعیت‌های منابع مختلف به کمک تابع توزیع نرمال و بهره‌گیری از مونت کارلو	■		■	■	Improved genetic algorithm	[۲۴]
بیان روش احتمالی حاشیه اطمینان برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت	■		■	■	DE algorithm	[۲۵]

ادامه مقاله به این شرح است: در بخش دوم فرمول ریاضی مسئله EE-D ارائه شده است. تابع هدف و محدودیت‌ها به‌طور کامل در این بخش شرح داده شده است. روش گام به گام الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی جهش یافته گرگ خاکستری در بخش سوم شرح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در سه سناریو مختلف و بحث‌ها در بخش چهارم آمده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش پنجم بیان شده است.

۲- شرح مسئله

برای انجام یک توزیع اقتصادی-زیست‌محیطی دقیق، تابع هدف و محدودیت‌ها باید با دقت انتخاب شوند. در غیر این‌صورت، نتایج به‌دست آمده از EE-D چندان قابل اعتماد نخواهد بود. در این بخش، اجزای تابع هدف و محدودیت‌ها با جزئیات معرفی می‌شوند. شکل (۱) دیاگرام فرمول‌بندی مسئله را نشان می دهد.

۲-۱- تابع هدف

در سیستم قدرت در نظر گرفته شده، از واحدهای حرارتی مرسوم و توربین بادی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. واحدهای حرارتی مرسوم با یک تابع درجه دو به راحتی مدل‌سازی می‌شوند، ولی در مورد توربین بادی به علت طبیعت تصادفی باد و وابستگی توان خروجی این مولدها به سرعت باد، کار بهره‌بردار شبکه برای تخمین سرعت باد و مشارکت آنها در مطالعه پخش بار با مشکل مواجه می‌شود. در نتیجه به دلیل ماهیت تصادفی سرعت باد، توان تولید شده توسط یک توربین بادی در سرعت‌های مختلف باد متغیر است، که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases} P(t)=0 & v(t)<v_i \text{ and } v(t)>v_o \\ P(t)=P_r\dfrac{(v-v_i)}{(v_r-v_i)} & v_i\le v(t)\le v_r \\ P(t)=P_r & v_r\le v(t)\le v_o \end{cases} \quad (۱)$$

که v سرعت فعلی باد در (متر بر ثانیه)، v_i ، v_o و v_r به‌ترتیب سرعت قطع پایین، سرعت قطع بالا و سرعت نامی باد است، P(t) توان خروجی توربین (مگاوات) و P_r توان نامی توربین است. به‌منظور استفاده از توربین بادی در مسئله پخش بار اقتصادی و به دلیل یک ویژگی تصادفی انرژی باد، توابع توزیع تجمعی[۱۹] و توزیع احتمالی ویبول[۲۰] برای مدل‌سازی سرعت باد استفاده می‌شود که به شرح زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$F_V(v)=1-\exp\left[-(\frac{v}{c})^k\right] \quad , \quad [v>0] \quad (۲)$$

$$F_V(v)=\frac{k}{c}(\frac{v}{c})^{k-1}1-\exp\left[-(\frac{v}{c})^k\right] \quad (۳)$$

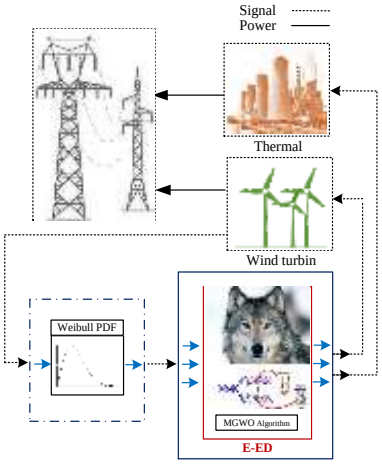
رابطه (۲) تابع توزیع تجمعی و رابطه (۳) تابع توزیع احتمال[۲۱] (PDF) است. در این رابطه‌ها k ضریب شکل در یک مکان مشخص (بدون بعد) و c ضریب مقیاس در یک مکان مشخص (متر بر ثانیه) است. با استفاده از رابطه‌های فوق، احتمال سناریوی w=0 و $w=w_r$ به شرح زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$P_r\{w=0\}=F_V(v_i)+(1-F_V(v_o))=1-\exp(-(\frac{v_o}{c})^k) \quad (۴)$$

$$P_r\{w=w_r\}=F_V(v_o)+(F_V(v_r))=\exp(-(\frac{v_r}{c})^k)-\exp(-(\frac{v_o}{c})^k) \quad (۵)$$

تابع توزیع احتمالی ویبول، متغیر تصادفی توان خروجی توربین بادی در حوزه پیوسته را تعیین می‌کند:

$$f_w(w)=\frac{klv_i}{w_rc}(\frac{(1+\rho l)v_i}{c})^{k-1}\exp(-(\frac{(1+\rho l)v_i}{c})^k)^{k-1} \quad (۶)$$



شکل (۱): دیاگرام فرمول‌بندی مسئله

Figure (1): Problem Formulation Diagram

بنابراین، تابع هدف پیشنهادی برای حل مسئله توزیع اقتصادی-زیست‌محیطی می‌تواند به عنوان معادله (۷) فرموله شود. این تابع شامل پنج بخش است.

$$FC_{total}=\sum_{s=1}^{N_\kappa}\pi_\kappa\left(\left(\sum_{j=1}^{N_w}C_{dir,j}(W_j)\right)+\left(\sum_{j=1}^{N_w}C_{ov,j}(W_{ov})\right)+\left(\sum_{j=1}^{N_w}C_{un,j}(W_{un})\right)\right)+\left(\sum_{i=1}^{N_t}C_{th,i}(p_{g,i})\right)+\left(\sum_{i=1}^{N_t}C_{emi,i}(p_{g,i})\right) \quad (۷)$$

که N_t و N_w به‌ترتیب تعداد واحدهای حرارتی و تعداد توربین‌های بادی است. همچنین N_s تعداد نمونه‌های در نظر گرفته شده برای سرعت باد و π_k احتمال وقوع آن نمونه است که با توجه به منحنی ویبول در نظر گرفته شده برای مزرعه بادی تعیین می‌شود. ضریب π_k برای نمونه‌های محتمل، بزرگ‌تر و برای نمونه‌های انتخاب با احتمال کم، کوچک‌تر است. در نتیجه سناریوهای با احتمال پایین، تاثیر کمتری در مقدار نهایی هزینه بهره‌بردرای از مزرعه بادی دارند. $C_{ov,j}$ و $C_{un,j}$ به‌ترتیب هزینه-های تخمین بیشتر و کمتر از حد و هزینه‌های مستقیم توربین بادی jام هستند. $C_{dr,j}$ هم هزینه مستقیم انرژی باد را نشان می‌دهد. هزینه‌های سوخت و آلودگی واحدهای حرارتی به‌ترتیب $C_{th,j}$ و $C_{emi,j}$ هستند.

۱-۱-۲- هزینه مستقیم انرژی باد

بخش اول تابع هزینه مستقیم انرژی باد را نشان می‌دهد که به‌عنوان اپراتور غیرتولیدی شناخته می‌شود و هنگامی که اپراتور مالک مزرعه بادی است، در نظر گرفته نمی‌شود. اگر سیستم‌های تبدیل انرژی باد، مالک داشته باشند، براساس توافق‌نامه‌های خاص قراردادی، تولید باد هزینه‌ای دارد که به شرح زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$C_{dir,j}(w_j)=d_i w_i \quad (۸)$$

که d_i ضریب هزینه مستقیم برای ژنراتور بادی jام است.

۲-۱-۲- هزینه جریمه تخمین بیش از حد

بخش دوم تابع هزینه جریمه تخمین بیش از حد را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر اپراتور هنگامی که توان بادی برنامه‌ریزی شده بیش از توان واقعی باشد، توان اضافی را خریداری می‌کند و تابع هزینه جریمه تخمین بیش از حد را پرداخت می‌کند، که به شرح زیر است [۲۷]:

$$C_{ov,j}(W_{ov})=C_{ov,j}\times[A+B+C] \quad (۹)$$

که مقادیر A، B و C توسط رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) به‌دست می‌آیند.

$$A = W_j \times \left[1 - \exp(-(\frac{v_{i,j}}{c_j})^{kj}) + \exp(-(\frac{v_{o,j}}{c_j})^{kj}) \right] \quad (۱۰)$$

$$B = (\frac{w_{r,j} v_{i,j}}{(v_{r,j} - v_{i,j})} + w_j) \times \left[\exp(-(\frac{v_{i,j}}{c_j})^{kj}) - \exp(-(\frac{v_{1,j}}{c_j})^{kj}) \right] \quad (۱۱)$$

$$C = (\frac{w_{r,j} c_j}{(v_{r,j} - v_{i,j})}) \times \left\{ \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{1,j}/c_j)^{kj}\right] - \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{i,j}/c_j)^{kj}\right] \right\} \quad (۱۲)$$

که $C_{ov,j}$ ضریب تخمین بیش از حد ژنراتور توان بادی jام هستند.

۳-۱-۲- هزینه جریمه تخمین کمتر از حد

بخش سوم تابع هزینه جریمه تخمین کمتر از حد را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر وقتی توان برنامه‌ریزی شده کمتر از توان واقعی باد است، اپراتور باید هزینه تولیدکننده را پرداخت کند. تابع هزینه جریمه تخمین کمتر از حد به شرح زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$C_{un,j}(W_{un}) = C_{un,j} \times [E + F + G] \quad (۱۳)$$

که مقادیر E، F و G توسط رابطه‌های (۱۴) تا (۱۶) به‌دست می‌آیند.

$$E = (W_{r,j} - W_j) \times \left[\exp(-(\frac{v_{r,j}}{c_j})^{kj}) - \exp(-(\frac{v_{o,j}}{c_j})^{kj}) \right] \quad (۱۴)$$

$$F = (\frac{w_{r,j} v_{i,j}}{(v_{r,j} - v_{i,j})} + w_j) \times \left[\exp(-(\frac{v_{r,j}}{c_j})^{kj}) - \exp(-(\frac{v_{1,j}}{c_j})^{kj}) \right] \quad (۱۵)$$

$$G = (\frac{w_{r,j} c_{i,j}}{(v_{r,j} - v_{i,j})}) \times \left\{ \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{1,j}/c_j)^{kj}\right] - \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{r,j}/c_j)^{kj}\right] \right\} \quad (۱۶)$$

۴-۱-۲- هزینه واحد حرارتی

بخش چهارم تابع هزینه واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$FC = \sum_{i=1}^{N_t} C_{th,i}(P_{g,i}) = \sum_{i=1}^{N_t} (a_i P_{g,i}^2 + b_i P_{g,i} + C) \quad (۱۷)$$

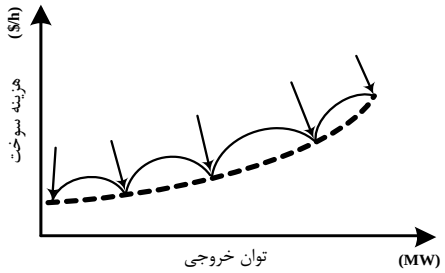
با افزایش بار در واحدهای حرارتی سنتی جهت کنترل توان خروجی، اغلب چند دریچه بخار وجود دارد که باز کردن پی‌درپی شیرهای ورودی توربین باعث ریپل‌ها و یا نقاط غیرقابل تشخیص در مدل هزینه تولید می‌شود. این اثر با تابع سینوسی به‌صورت رابطه (۱۸) مدل‌سازی شده است. شکل (۲)، تأثیر دریچه های شیر بخار بر منحنی هزینه سوخت را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن اثر شیر بخار در واحدهای حرارتی، می‌توان تابع هزینه را به‌صورت زیر بیان کرد [۲۸]:

$$FC = \sum_{i=1}^{N_t} (a_i P_{g,i}^2 + b_i P_{g,i} + c_i + \left| d_i \sin(e_i \times (P_{g,i}^{min} - P_{g,i})) \right|) \quad (۱۸)$$

که $P_{g,i}$ توان خروجی واحد حرارتی iام و a_i، b_i و c_i ضرایب مربوط به واحد iام هستند و d_i ضرایب ژنراتور i منعکس شده از بارگذاری شیر بخار است.

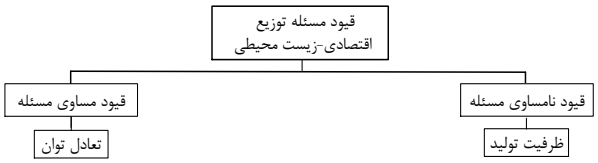
۵-۱-۲- هزینه آلایندگی

بخش آخر کل آلودگی کربن واحدهای حرارتی را نشان می‌دهد. هزینه کل آلودگی برای سیستم شش واحدی به شرح زیر بیان می‌شود [۲۸]:



شکل (۲): منحنی هزینه سوخت برای ژنراتورهای دارای پنج شیر بخار

Figure (2): Fuel cost curve for generators with five steam valves



شکل (۳): محدودیت‌های مسئله EE-D

Figure (3): EE-D problem constraints

$$EC=\sum_{i=1}^{N_t} ef_i(f_i+g_iP_{g,i}+h_iP_{g,i}^2)C_{tax} \tag{۱۹}$$

هزینه کل آلودگی برای یک سیستم ۴۰ واحدی به شرح زیر بیان می‌شود:

$$EC=\sum_{i=1}^{N_t}(10^{-2}\times(\alpha_i+\beta_iP_{g,i}+\gamma_iP_{g,i}^2)+\varsigma_i\exp(\lambda_iP_{g,i})) \tag{۲۰}$$

که α_i، β_i، γ_i، ζ_i و λ_i ضرایب آلودگی واحد حرارتی iام هستند.

۲-۲- محدودیت های مسئله EE-D

قیود بهره‌برداری مهمترین قسمت برای مسئله EE-D است. محدودیت‌های اصلی مسئله EE-D در این مقاله به دو قسمت قیود مساوی و نامساوی تقسیم شده که در شکل (۳) طبقه‌بندی شده است.

۲-۲-۱- محدودیت‌های مساوی

تعادل توان، که در قیود در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد که مجموع توان تولید شده توسط نیروگاه‌های حرارتی و بادی باید برابر با تلفات انتقال به علاوه تقاضای بار سیستم قدرت باشد. معادله تعادل توان به شرح زیر است:

$$\sum_{j=1}^{N_w} w_j+\sum_{i=1}^{N_t} P_{g,i}=P_{demand}+P_{loss} \tag{۲۱}$$

در رابطه (۲۱)، P_{loss} تلفات بوده که به کمک رابطه کرون مطابق رابطه (۲۲) قابل محاسبه است [۲۹].

$$P_{Loss}=B_{oo}+\sum_{j=1}^{N_g} B_{jo}P_j+\sum_{i=1}^{N_g}\sum_{j=1}^{N_g} P_iB_{ij}P_j \tag{۲۲}$$

که در آن، B_{ij}، B_{jo} و B_{oo} ضرایب تلفاتی هستند. این ضرایب به‌ترتیب مطابق روابط (۲۳) الی (۲۹) قابل محاسبه هستند. P_{di} و Q_{di} توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی، $|Vi|$ و δi به‌ترتیب دامنه و ولتاژ فاز شین iام هستند، که با پخش بار به روش نیوتن-رافسون هم قابل محاسبه هستند. N_B تعداد شین‌ها و R_{ij} قسمت حقیقی ماتریس امپدانس سیستم است.

$$B_{oo}=\sum_{i=1}^{N_B}\sum_{j=1}^{N_B} P_{di}B_{ij}P_{dj} \tag{۲۳}$$

$$B_{io} = \sum_{i=1}^{N_B} (B_{ij} + B_{ji}) P_{dj}, \quad (i = 1, 2, ..., N_g) \tag{۲۴}$$

$$B_{ij} = \frac{R_{ij}}{|V_i||V_j|} \frac{\cos(\theta_i - \theta_j)}{\cos\varphi_i \cos\varphi_j} \quad (i, j = 1, 2, ..., N_B) \tag{۲۵}$$

$$\theta_i = \delta_i - \varphi_i \tag{۲۶}$$

$$\varphi_i = tg^{-1}(\theta_i / P_i) \tag{۲۷}$$

$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (i = 1, 2, ..., N_g) \tag{۲۸}$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} \quad (i = 1, 2, ..., N_g) \tag{۲۹}$$

۲-۲-۲- محدودیت های نامساوی

قیود نامساوی حداقل و حداکثر توان تولید شده توسط نیروگاه‌های حرارتی و بادی را به شرح زیر نشان می‌دهد [۳۰]:

$$P_{g,i}^{min}(i) \le P_{g,i} \le P_{g,i}^{max} \qquad i = 1, 2, ..., N_t \tag{۳۰}$$

$$0 \le w_j \le w_{r,j} \qquad i = 1, 2, ..., Nw \tag{۳۱}$$

در معادله (۳۱)، $w_{r,i}$ توان نامی توربین بادی jام است و حداقل توان تولید شده توسط یک توربین بادی صفر است.

۳- الگوریتم جهش یافته گرگ خاکستری

در این مقاله نسخه جهش یافته الگوریتم گرگ خاکستری پیشنهاد شده است. گرگ‌های خاکستری معمولا ترجیح می‌دهند که به‌صورت گروهی زندگی کنند. اندازه گروه به‌طور متوسط بین ۵ الی ۱۲ است. رهبران گروه یک نر و یک ماده هستند که آلفا نامیده می‌شوند. آلفا عمدتاً مسئول تصمیم‌گیری درباره شکار، محل خواب، زمان بیدار شدن و غیره است. تصمیم‌های آلفا به گروه دستور داده می‌شود. دومین سطح در سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری بتا است. بتاها گرگ‌های تابع هستند که به آلفاها در تصمیم گیری یا سایر کارهای گروه کمک می‌کنند. گرگ بتا باید به آلفا احترام بگذارد اما به گرگ‌های پایین‌تر دستور می‌دهد. پایین‌ترین رتبه مربوط به گرگ خاکستری یا امگا است. فاز اصلی شکار گرگ خاکستری از سه بخش جستجو، دویدن و نزدیک شدن به شکار، تعقیب‌کردن، محاصره‌کردن، خسته‌کردن شکار تا زمانی‌که از حرکت بایستد و در نهایت حمله به سمت طعمه تقسیم‌بندی می‌شود. به‌منظور ایجاد مدل ریاضی رفتار محاصره‌کردن، معادلات زیر پیشنهاد می‌شوند [۳۱]:

$$\vec{D} = \left| \vec{C}.\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \tag{۳۲}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D} \tag{۳۳}$$

که در آن t تکرار جریان را نشان می‌دهد، A و C ضرایب بردارها هستند. Xp موقعیت بردار طعمه و X موقعیت بردار گرگ خاکستری را نشان می‌دهد. بردارهای A و C به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{\alpha}.\vec{r}_1 - \vec{\alpha} \tag{۳۴}$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r}_2 \tag{۳۵}$$

که در آن مولفه α کاهش خطی از ۲ تا ۰ در طول دوره تکرار است، r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در محدوده صفر و یک هستند. شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می‌شود. بتا و دلتا هم ممکن است گاهی اوقات در شکار شرکت کنند. بنابراین، سه راه حل بهتر اول را ذخیره کرده و عوامل دیگر جستجو را مجبور به بروزرسانی موقعیت‌هایشان در طول موقعیت بهترین عامل جستجو می‌کند. رابطه‌های زیر در این زمینه پیشنهاد شده است [۳۱]:

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1.\vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_2.\vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3.\vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \tag{۳۶}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1.(\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2.(\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3.(\vec{D}_\delta) \tag{۳۷}$$

$$\vec{X}(t+1)=\frac{\vec{X}_1+\vec{X}_2+\vec{X}_3}{3} \quad (۳۸)$$

در مدل‌سازی ریاضی در زمان نزدیک شدن به طعمه مقدار α کاهش داده می‌شود و درنتیجه بازه نوسان A کاهش می‌یابد. به بیان دیگر A، یک مقدار تصادفی در محدوده [a, a-] است که در آن a از ۲ تا ۰ در طول دوره تکرار کاهش می‌یابد. زمانی‌که مقدار تصادفی A بین [۱,۱-] است، موقعیت بعدی عامل جستجو در هر موقعیتی بین موقعیت فعلی و موقعیت شکار خواهد بود. گرگ‌های خاکستری برای جستجوی طعمه از هم دور می‌شوند و برای شکار طعمه به هم نزدیک می‌شوند. یکی دیگر از مولفه‌های GWO که جستجو و شناسایی می‌کند C است. بردار C شامل مقادیر تصادفی [۰،۲] است. این مولفه وزن‌های مختلفی برای طعمه ارائه می‌کند تا به‌طور تصادفی اثر طعمه در تشخیص فاصله را پر اهمیت (C>1) یا بی‌اهمیت (C<1) نشان دهد. این به GWO کمک می‌کند تا رفتار تصادفی بیشتری در سراسر بهینه سازی نشان دهد و از بهینه محلی دوری کند. در نسخه اصلاح شده پیشنهادی، جهش ژنتیکی برای گرگ‌های امگا در نظر گرفته شده است. این طرح الگو برداری شده از جهش‌های ژنتیکی در الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و یا الگوریتم ژنتیک می‌باشد که تا به حال برای الگوریتم گرگ خاکستری مورد استفاده قرار نگرفته است. مکان گرگ‌های امگا توسط رابطه (۳۹)، بروزرسانی می‌شوند [۳۱].

$$\vec{X}(t+1)=\vec{X}(t)+M_f\times r\times(Max_{val}-Min_{val}) \quad (۳۹)$$

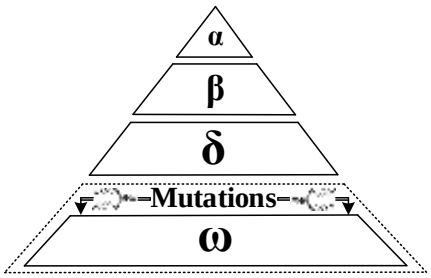
که در رابطه فوق، r عددی تصادفی با توزیع نرمال، Max_{val} و Min_{val} به ترتیب محدودیت‌های بالا و پایین متغییر و M_f نرخ جهش هستند. اما بایستی این نکته را یادآور شد که ضریب جهش در الگوریتم اصلاح شده گرگ خاکستری ثابت نخواهد بود و در هر تکرار متغییر است. انتخاب ضرایب بزرگتر در تکرارهای اول و همچین ضرایب کوچک‌تر در تکرارهای انتهایی الگوریتم، می‌تواند شرایط جستجوی جامع و دقیق در فضای جستجو ایجاد کند که علاوه بر افزایش دقت الگوریتم ارائه شده، سبب جلوگیری از بدام افتادن در نقاط بهینه محلی الگوریتم نیز خواهد شد. نحوه بروزرسانی مقدار M_f در هر تکرار به صورت رابطه (۴۰)، است.

$$M_f=M_f^{initial}\left(\frac{ite^{max}-ite}{ite^{max}}\right) \quad (۴۰)$$

که در رابطه (۴۰)، $M_{f,initial}$ مقدار فرض اولیه ضریب جهش و ite^{max} حداکثر تعداد تکرار و ite نیز شماره تکرار الگوریتم را نشان می‌دهند. برای تصدیق عملکرد الگوریتم پیشنهادی، بهینه‌سازی‌ها بر روی سیستم‌های تست انجام شد، که نتایج گواه بر دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در این مقاله است. اما به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله، از آوردن نتایج بر روی توابع تست استاندارد خودداری شده است. در شکل (۵)، روند نمای الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری نشان داده شده است.

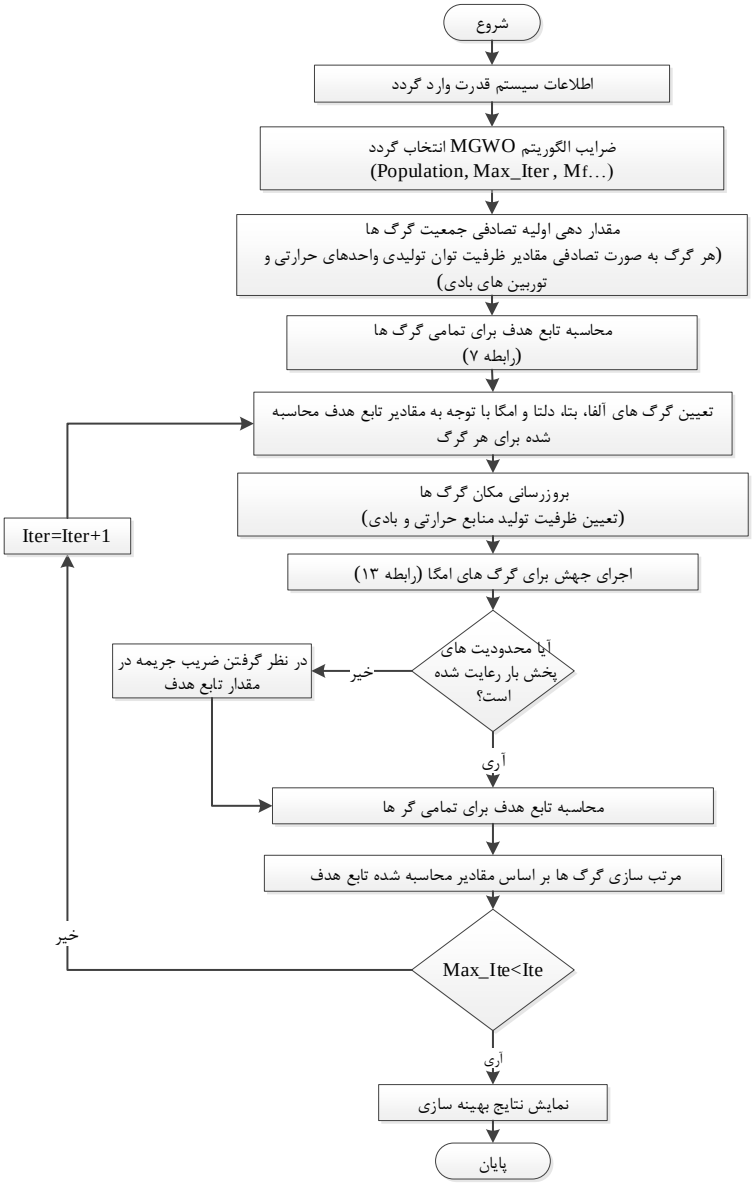
۴- نتایج و بحث شبیه سازی

در این مقاله، EE-D بر روی یک سیستم قدرت با ۴۰ واحد حرارتی به همراه دو مزرعه بادی انجام شده است. سیستم قدرت مورد مطالعه یک سیستم استاندارد است که در آن ظرفیت و مکان مزارع بادی از پیش تعیین شده است. به دلیل محدودیت تعداد صفحات مقاله، ضرایب هزینه و آلایندگی واحدهای حرارتی در مقاله آورده نشده است، که می‌توان این اطلاعات را در مرجع [۳۲] مشاهده کرد. لازم به ذکر است که برای واحدهای حرارتی اثر شیر بخار نیز در نظر گرفته شده است. بخش سینوسی در تابع هزینه مرتبه دوم هر واحد، مربوط به اثر شیر بخار است. همچنین در تابع هدف پیشنهادی، آلایندگی زیست-محیطی ایجاد شده توسط واحدهای حرارتی، نیز در نظر گرفته شده است. تابع در نظر گرفته شده برای محاسبه آلایندگی مرتبه دوم غیر خطی است. فرض شده که در سیستم قدرت مورد مطالعه دو مزرعه بادی با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات نیز متصل هستند. اطلاعات مزرعه‌های بادی مورد نظر در جدول (۲) آمده است. بنابراین شبیه‌سازی‌ها در قالب سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته است، که در سناریو اول، پخش‌بار اقتصادی با صرف‌نظر از آلایندگی و در صورت عدم حضور مزرعه بادی انجام شده است. در سناریو دوم، پخش‌بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلایندگی توسط الگوریتم پیشنهادی MGWO در سیستم قدرت با ۴۰ واحد حرارتی و بدون مزرعه بادی انجام شده است. در نهایت در سناریو سوم، پخش‌بار اقتصادی در حضور مزرعه بادی و با در نظر گرفتن آلایندگی در سیستم قدرت انجام شده است.



شکل (۴): دسته‌بندی گرگ‌های خاکستری

Figure (4): Classification of gray wolves



شکل (۵): روند نمای الگوریتم MGWO برای حل مسئله EE-D

Figure (5): View process of MGWO algorithm to solve EE-D problem

Table (2): Wind farm information

جدول (۲): اطلاعات مزارع بادی

مزرعه	vo (m/s)	vi (m/s)	vr (m/s)	d	vo (m/s)	k	C	w_{min} (MW)	w_{max} (MW)	Cov,j
مزرعه ۱	۴۵	۵	۱۵	۱۲۰	۴۵	۲/۲	۱۵	۱۰	۱۰۰	۳۱۰
مزرعه ۲	۴۵	۵	۱۵	۱۵۰	۴۵	۲/۲	۱۵	۱۰	۱۰۰	۳۱۰

۴-۱- بخش اول (بدون توجه به هزینه انتشار و عدم حضور مزرعه بادی)

در سناریو اول، حل مسئله پخش بار اقتصادی یک سیستم قدرت با ۴۰ واحد حرارتی با میزان بار مصرفی ۱۰۵۰۰ مگاوات و صرف‌نظر از حضور مزرعه بادی توسط الگوریتم گرگ خاکستری جهش یافته انجام شده است. پس از انجام بهینه‌سازی، روند همگرایی الگوریتم‌های GWO و MGWO در تکرارهای مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. مقدار نهایی تابع هدف پس از ۷۳ تکرار، در صورت انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم MGWO در سناریو اول، برابر با ۱۲۰۳۸۷ دلار محاسبه شده است. الگوریتم GWO نیز پس از ۸۳ تکرار به مقدار ۱۲۲۴۲۷ دلار همگرا و نتایج بهینه‌سازی در جدول (۳) آمده است. لازم به ذکر است که علاوه بر نتایج الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری جهش یافته (MGWO)، نتایج الگوریتم بازار مبادله[۲۲] (EMA) [۳۲]، الگوریتم جغرافیای زیستی[۲۳] (BBO) [۳۲]، الگوریتم گرده افشانی گل[۲۴] (FPA) [۳۳] و الگوریتم گرگ خاکستری نیز در جدول آمده است. بهترین پاسخ در حل مسئله پخش بار اقتصادی برای الگوریتم پیشنهادی جهش یافته گرگ خاکستری بوده، و برابر با ۱۲۰۳۸۷ دلار محاسبه شده است. مقدار هزینه به‌دست آمده در صورت استفاده از الگوریتم EMA برابر با ۱۲۰۸۴۵ دلار، الگوریتم BBO برابر با ۱۲۱۴۲۶ دلار، الگوریتم FPA برابر با ۱۲۱۰۷۴ دلار و در نهایت الگوریتم GWO برابر با ۱۲۲۴۲۷ دلار به‌دست آمده است. در ادامه در جدول (۴)، مقادیر بهترین پاسخ، بدترین پاسخ، میانگین پاسخ‌ها و همچنین زمان اجرای شبیه‌سازی اجراهای مختلف چند الگوریتم بهینه‌سازی که در مرجع [۳۲] مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند، آمده است. بمیانگین، بهترین و بدترین پاسخ به‌دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری جهش یافته، کمتر از سایر روش‌های بهینه‌سازی به‌دست آمده است، که این امر نشان از دقت بالای الگوریتم دارد. زمان شبیه‌سازی الگوریتم نسبت به الگوریتم EMA بیشتر است، اما زمان اجرا آنقدر زیاد نیست که در حل مسئله پخش بار اقتصادی خللی وارد کند.

۴-۲- بخش دوم (با در نظر گرفتن هزینه انتشار و عدم حضور مزرعه بادی)

در بخش دوم شبیه‌سازها، تابع آلایندگی به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده که باید الگوریتم، به نحوی توان تولیدی واحدها را تعیین کند، که آلایندگی حداقل شود. میزان بار شبکه نیز برابر برابر با ۱۰۵۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. مانند بخش قبل، از حضور مزرعه بادی صرف‌نظر شده و بهینه‌سازی توسط الگوریتم گرگ خاکستری جهش یافته انجام شده و مقایسه‌ای بین نتایج آن با چند الگوریتم دیگر انجام گرفته است. روند همگرایی الگوریتم‌های گرگ خاکستری و نسخه جهش یافته آن در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار نهایی تابع هدف در سناریو دوم پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم MGWO برابر با ۱۹۸۴۳۱ تن تخمین زده شده است. الگوریتم MGWO پس از ۶۰ تکرار به همگرایی کامل رسیده است. الگوریتم GWO پس از ۸۶ تکرار به مقدار ۲۱۲۴۸۲ تن همگرا شده است. در جدول (۵)، مقادیر بهینه توان تولیدی واحدهای حرارتی پس از انجام بهینه‌سازی آمده است. در این سناریو نیز مانند سناریو قبل، کمترین مقدار آلایندگی برای الگوریتم MGWO حاصل شده است. میزان آلایندگی سیستم زمانی‌که از الگوریتم‌های EMA [۳۲]، GSA [۳۲]، FPA [۳۳] و GWO استفاده شود، به‌ترتیب برابر با ۲۰۴۹۶۰ تن، ۲۱۰۹۳۰ تن، ۲۰۸۴۶۰ تن و ۲۱۲۴۸۲ تن محاسبه شده است، در حالی‌که میزان آلایندگی در صورت به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی MGWO برابر با ۱۹۸۴۸۲ تن محاسبه شده است. هزینه سیستم در صورت بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های EMA، GSA، FPA و GWO به‌ترتیب برابر با ۱۲۳۱۱۲ دلار، ۱۲۵۷۸۰ دلار، ۱۲۳۱۷۰ دلار و ۱۲۴۷۰۳ دلار محاسبه شده است در حالی‌که هزینه سیستم در صورت حل مسئله پخش بار اقتصادی توسط الگوریتم MGWO برابر با ۱۲۳۷۵۳ دلار محاسبه شده است. هزینه بهره‌برداری در صورت به‌کارگیری الگوریتم MGWO کمی بیشتر از الگوریتم‌های EMA و FPA حاصل شده است. زیرا در این سناریو، هدف کاهش آلایندگی بوده نه هزینه بهره‌برداری، که میزان آلایندگی زیست‌محیطی در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی MGWO کمتر از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به‌دست آمده است.

۴-۳- بخش سه (با در نظر گرفتن هزینه انتشار و حضور مزرعه بادی)

در بخش نهایی مطالعه و شبیه‌سازی‌های انجام شده، پخش‌بار اقتصادی در سیستم قدرت در حضور دو مزرعه بادی تکرار شده است.

Table (3): Optimization results in the first scenario

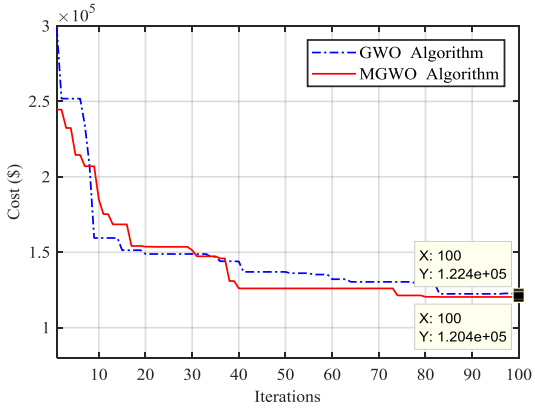
جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی در سناریو اول

واحد	EMA [32]	BBO [32]	FPA [33]	GWO	MGWO
۱	۱۰۸/۳۳۲	۱۱۰/۰۴۶۵	۷۲/۴۸۱	۱۱۳/۲۱۴۶	۱۰۶/۴۶۳۶
۲	۱۱۲/۹۰۳	۱۱۱/۵۹۱۵	۱۰۳/۰۳۱۴	۱۱۳/۰۱۳۲	۱۱۶/۲۶۳۴
۳	۱۱۰/۴۳۰۸	۹۷/۶۰۰۷	۸۳/۲۷۲۶	۱۱۹/۶۷۰۲	۱۰۶/۶۶۱۵
۴	۱۵۷/۶۹۸	۱۷۹/۷۰۹۵	۱۸۲/۳۱۰۶	۸۱/۸۹۳	۱۵۴/۶۷۵۴
۵	۹۶/۴۸۷۱	۸۸/۳۰۶	۷۶/۱۶۶۹	۹۵/۷۲۰۵	۹۱/۷۸۹۵
۶	۱۳۹/۴۱۶	۱۳۹/۹۹۹۲	۱۲۶/۱۳۴۶	۱۳۹/۲۰۹	۱۴۰/۴۰۸۸
۷	۲۹۰/۰۲۷۷	۲۵۹/۶۳۱۳	۲۵۸/۸۴۵۲	۲۹۹/۱۲۷	۲۸۳/۳۴۰۰
۸	۲۹۹/۰۴۶۴	۲۸۴/۷۳۶۶	۲۹۷/۱۶۳۶	۲۸۷/۴۹۱	۲۹۳/۹۱۵۵
۹	۲۷۵/۳۲۴۷	۲۸۴/۷۸۰۱	۳۹۰/۸۸۹۹	۲۹۲/۳۱۶	۲۸۹/۷۴۵۹
۱۰	۱۳۰	۱۳۰/۲۴۸۴	۲۷۴/۸۲۳۲	۲۷۹/۲۷۳	۱۳۱/۹۷۷۱
۱۱	۹۴	۱۶۸/۸۴۶۱	۳۵۶/۹۸۰۶	۱۶۹/۷۶۶	۹۶/۶۶۹۹
۱۲	۱۵۵/۱۲۰۱	۱۶۸/۸۴۶۱	۱۲۴/۴۰۵۴	۹۴/۳۴۴	۱۵۹/۸۹۸۵
۱۳	۱۲۵	۲۱۴/۷۰۳۸	۴۹۳/۳۷۶۴	۲۱۴/۳۰۱۲	۱۲۳/۲۸۴۰۶
۱۴	۳۲۱/۲۳۷۸	۳۰۴/۵۸۹۴	۳۴۴/۹۰۲۹	۳۰۴/۲۴۳۵	۳۳۲/۴۷۵۴
۱۵	۲۹۷/۳۹۳۱	۳۹۴/۲۷۶۱	۳۷۲/۳۸۶۴	۳۰۴/۵۷۷	۲۹۲/۶۸۲۱
۱۶	۴۸۱/۹۳۵۶	۳۹۴/۲۴۰۹	۳۴۵/۴۶۲۴	۳۰۴/۸۴۳۸	۴۷۶/۶۷۹۴
۱۷	۴۹۳/۷۸۰۹	۴۸۹/۲۹۱۹	۴۲۲/۶۳۷۸	۴۸۹/۲۶۰۴	۵۱۴/۱۳۰۰
۱۸	۴۸۹/۹۲۷۳	۴۸۹/۴۱۸۸	۴۳۴/۴۰۶۵	۴۹۱/۳۳۶	۴۷۳/۵۱۳۴
۱۹	۵۱۱/۴۷۴۴	۵۱۱/۲۹۹۷	۴۶۱/۳۱۰۷	۵۱۰/۸۸	۵۰۰/۵۹۷۱۷
۲۰	۵۱۳/۰۰۵	۵۱۱/۳۰۷۳	۴۳۴/۳۸۲۸	۵۱۱/۴۴۷	۵۴۲/۰۶۲۹۲
۲۱	۵۲۳/۶۲۱	۵۲۳/۴۱۷	۵۴۵/۲۸۴۶	۵۲۴/۸۱۴	۵۱۱/۳۵۵۶
۲۲	۵۲۵/۱۲۶۳	۵۲۳/۲۷۹۵	۴۹۰/۳۵۷۲	۵۲۴/۷۷۵	۴۹۴/۷۸۴۹
۲۳	۵۴۹/۴۱۴۴	۵۲۳/۳۷۹۳	۵۰۶/۰۶۳۹	۵۲۵/۵۶۳	۵۳۸/۰۲۵۰
۲۴	۵۲۶/۹۴۵۸	۵۲۳/۳۲۲۵	۴۶۷/۳۱۰۹	۵۲۲/۷۱۲	۵۲۱/۵۹۰۸
۲۵	۵۴۳/۶۵۷۲	۵۲۳/۳۶۶۱	۴۸۸/۱۲۰۳	۵۰۳/۲۱۱	۵۵۳/۸۸۰۲
۲۶	۵۲۴/۶۱۲	۵۲۳/۴۳۶۲	۴۸۶/۹۰۱۹	۵۲۴/۱۹۹	۵۱۶/۶۲۱۰
۲۷	۱۰/۷۳۸۸	۱۰/۰۵۳۱	۱۶/۸۰۰۲	۱۰/۰۸۲	۱۱/۲۸۴۵
۲۸	۱۰/۴۷۴۲	۱۰/۰۱۱۳	۳۹/۳۴۷۵	۱۰/۶۶۳	۱۰/۰۱۲۴۹
۲۹	۱۰/۸۴۱۷	۱۰/۰۰۳	۲۳/۶۳۵۸	۱۰/۴۱۸	۱۱/۱۷۸
۳۰	۹۳/۸۵۳۱۴	۸۸/۴۷۷۵	۸۶/۳۲۹۵	۹۴/۲۴۴	۹۷/۰۱۹۶۴
۳۱	۱۷۹/۳۷۸۵	۱۸۹/۹۹۸۳	۱۶۵/۹۹۲۴	۱۸۹/۳۷۷	۱۸۰/۶۱۸۵
۳۲	۱۸۸/۸۷۷۹	۱۸۹/۹۸۸۱	۱۷۴/۵۷۰۷	۱۸۹/۷۹۶	۱۸۹/۵۸۸۷
۳۳	۱۸۹/۴۱۶۸	۱۸۹/۸۶۶۳	۱۸۴/۰۵۷	۱۸۹/۸۱۳	۱۹۸/۷۱۶۴
۳۴	۱۶۲/۴۲۳۷	۱۶۴/۸۰۵۴	۱۹۳/۶۶۶۸	۱۹۷/۴۴۶۸	۱۶۰/۹۴۵۷
۳۵	۱۹۸/۰۳۸۲	۱۶۵/۱۲۶۷	۱۹۱/۶۱۵۲	۲۰۰/۳۳۵۶	۱۹۹/۰۷۹۷
۳۶	۱۸۹/۵۰۹۷	۱۶۵/۷۶۹۵	۱۹۶/۱۷۶۳	۱۹۹/۳۴۵۵	۱۸۸/۸۲۱۸
۳۷	۱۰۹/۶۲۱۳	۱۰۹/۹۰۵۹	۹۰/۰۱۰۱	۱۰۸/۴۵۳	۱۱۴/۴۵۴۷
۳۸	۱۰۹/۲۸۹۳	۱۰۹/۹۹۷۱	۳۷/۵۴۲۱	۱۱۱/۱۳۴	۱۱۱/۰۶۷۰
۳۹	۱۰۹/۱۶۰۷	۱۰۹/۹۶۹۵	۸۹/۴۲۳۹	۱۱۰/۴۶۷	۱۱۵/۶۰۹۶
۴۰	۵۳۴/۷۱۲۴	۵۱۱/۲۷۹۴	۴۷۱/۴۴۰۵	۵۱۳/۴۵۹۳	۵۴۳/۴۶۴۲
هزینه×$۱۰^{۵}$	۱/۲۰۸۴۵۳	۱/۲۱۴۲۶۰	۱/۲۱۰۷۴	۱/۲۲۴۲۷	۱/۲۰۳۸۷۰

Table (4): Optimization results in the first scenario

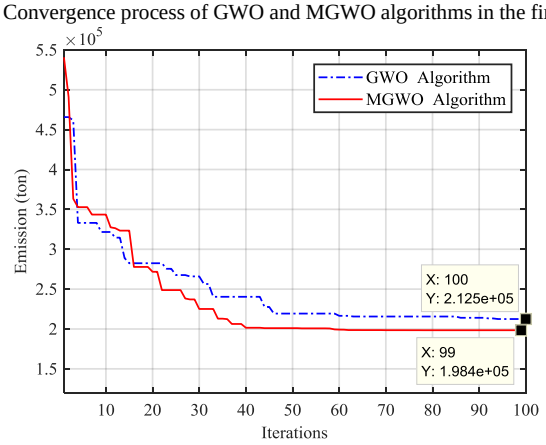
جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی در سناریو اول

روش	بهترین پاسخ (دلار)	بدترین پاسخ (دلار)	میانگین پاسخ‌ها (دلار)	زمان (ثانیه)
NPSO-LSR [32]	۱۲۱۶۶۴/۴	۱۲۲۲۰۹/۳	۱۲۲۹۸۱/۶	۱۶/۸۱
DE [32]	۱۲۱۴۱۶/۳	۱۲۱۴۲۲/۷	۱۲۱۴۳۱/۵	NA
CDEMD [32]	۱۲۱۴۲۳/۴	۱۲۱۵۲۶/۷	۱۲۱۶۹۷	۴۴/۳
HMAPSO [32]	۱۲۱۵۸۶/۹	۱۲۱۵۸۶/۹	۱۲۱۵۸۶/۹	NA
FAPSO-NM [32]	۱۲۱۴۱۸/۳	۱۲۱۴۱۸/۸	۱۲۱۴۱۹/۸	۴۰
EMA [32]	۱۲۰۸۴۵/۳	۱۲۱۴۲۲/۱	۱۲۱۵۱۲/۴	۵/۱
GWO	۱۲۲۴۲۷/۱	۱۲۲۹۸۶/۱	۱۲۲۶۹۲/۳	۴/۸
MGWO	۱۲۰۳۸۷	۱۳۰۶۸۲/۸	۱۲۰۵۹۲/۱	۱۴/۳



شکل (۶): روند همگرایی الگوریتم‌های GWO و MGWO در سناریو اول

Figure (6): Convergence process of GWO and MGWO algorithms in the first scenario



شکل (۷): روند همگرایی الگوریتم‌های GWO و MGWO در سناریو دوم

Figure (7): Convergence process of GWO and MGWO algorithms in the second scenario

روند همگرایی الگوریتم‌های GWO و MGWO برای حل مسئله پخش‌بار اقتصادی در سناریو سوم، در شکل (۸) نشان داده شده است.

در سناریو سوم، الگوریتم MGWO پس از ۷۸ تکرار به مقدار نهایی ۴۶۲۴۶۸ دلار و الگوریتم GWO پس از ۸۸ تکرار به مقدار ۴۷۵۵۶۹ دلار همگرا شده است. در جدول (۶)، مقادیر بهینه توان تولیدی واحدهای حرارتی و توان تولیدی دو مزرعه بادی پس از انجام بهینه‌سازی قرار داده شده است. همچنین نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های EMA [۳۲]، PSO [۳۴] و توسعه یافته شتاب گرانشی-ازدحام ذرات[۲۵] (GAEPSO) [۳۴] نیز در این جدول آورده شد.

Table (5): Optimization results in the second scenario

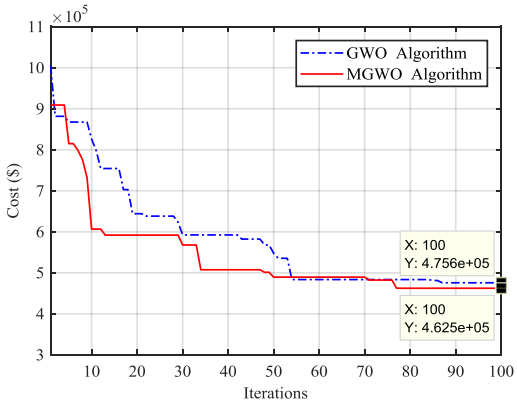
جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی در سناریو دوم

واحد	EMA [32]	GSA [32]	FPA [33]	GWO	MGWO
۱	۱۱۳/۹۷۸	۱۱۳/۹۹۸۹	۴۳/۴۰۵	۱۱۰/۹۵۱۴	۱۱۸/۲۳۱۸
۲	۱۱۳/۷۹۵	۱۱۳/۹۸۹۶	۱۱۳/۹۵	۱۱۳/۴۸۶۵	۱۱۳/۷۹۶۲
۳	۱۱۹/۶۸۷	۱۱۹/۹۹۹۵	۱۰۵/۸۶	۱۱۹/۰۱۹۲	۱۱۸/۸۹۲۷
۴	۱۶۳/۹۸	۱۷۹/۷۸۵۷	۱۶۹/۶۵	۱۵۱/۱۰۲۸	۱۶۸/۷۵۰۹
۵	۹۶/۹۸۷	۹۷	۹۶/۶۵۹	۹۶/۶۱۴۸۶	۹۵/۰۸۲۰۴
۶	۱۲۸/۳۵۴	۱۳۹/۰۱۲۸	۱۳۹/۰۲	۱۱۵/۱۲۱۶	۱۲۲/۸۱۵۰
۷	۲۹۶/۵۸۲	۲۹۹/۹۸۸۵	۲۷۳/۲۸	۳۱۴/۶۳۱۳	۳۰۰/۷۵۳۲
۸	۲۷۹/۱۴۱	۳۰۰	۲۸۵/۱۷	۲۹۱/۴۵۴۲	۲۷۲/۸۱۴۴
۹	۲۹۲/۲۷۷	۲۹۶/۲۰۲۵	۲۴۱/۹۶	۲۴۵/۱۱۲۵	۲۸۸/۵۳۵۶
۱۰	۱۳۰/۰۰۳	۱۳۰/۳۸۵	۱۳۱/۲۶	۱۴۴/۰۵۷	۱۲۲/۱۹۵۷
۱۱	۲۵۳/۵۲۹	۲۴۵/۴۷۷۵	۳۱۲/۱۳	۲۱۳/۶۴۴۴	۲۶۴/۵۴۸۵
۱۲	۲۲۴/۴۴۴	۳۱۸/۲۱۰۱	۳۶۲/۵۸	۲۱۴	۲۰۹/۶۰۶۰
۱۳	۴۱۹/۵۲۷	۳۹۴/۶۲۵۷	۳۴۶/۲۴	۴۳۸/۱۰۳۴	۴۳۴/۹۱۳۵
۱۴	۴۱۹/۰۲۱۲	۳۹۵/۲۰۱۶	۳۰۶/۰۶	۴۰۵/۲۵۰۶	۴۱۰/۰۳۶۵
۱۵	۴۲۴/۱۷۹	۳۰۶/۰۰۴	۳۵۸/۷۸	۴۳۸/۰۱۵۸	۴۴۵/۷۷۸۷
۱۶	۴۲۰/۰۴۱۵	۳۹۵/۱۰۰۵	۲۶۰/۶۸	۴۲۵/۶۲۷۴	۴۳۳/۳۷۲۳
۱۷	۴۸۴/۹۴۱۶	۴۸۹/۲۵۶۹	۴۱۵/۱۹	۵۰۱/۳۲۶۱	۴۹۲/۰۶۹۳
۱۸	۴۷۸/۶۴۵	۴۸۸/۷۵۹۸	۴۲۳/۹۴	۴۹۷/۳۸۵۱	۴۷۵/۴۸۲۶
۱۹	۴۵۵/۷۴۷	۴۹۹/۲۳۲	۵۴۹/۱۲	۴۵۷/۵۳۵	۴۵۶/۳۹۴۳
۲۰	۴۱۵/۱۱۲۹	۴۵۵/۲۸۲۱	۴۹۶/۷	۳۹۷/۸۰۷۵	۴۰۴/۸۶۹۴
۲۱	۴۴۶/۸۷۸	۴۳۳/۴۵۲	۵۳۹/۱۷	۴۶۳/۶۳۱۹	۴۵۵/۴۴۸۰
۲۲	۴۵۱/۴۳۱۲	۴۳۳/۸۱۲۵	۵۴۶/۴۶	۴۲۸/۸۵۱۸	۴۵۶/۰۵۱۵۳
۲۳	۴۲۴/۷۳۱۱	۴۴۵/۵۱۳۶	۵۴۰/۰۶	۴۲۳/۶۸۴۸	۴۲۶/۸۴۲۲
۲۴	۴۲۹/۵۴۹۴	۴۵۲/۰۵۴۷	۵۱۴/۵	۴۴۷/۳۴۸۴	۴۴۷/۰۵۲۰
۲۵	۴۶۴/۳۰۶۳	۴۹۲/۸۸۶۴	۴۵۳/۴۶	۴۶۱/۳۵۳۲	۴۶۳/۶۱۸۲۲
۲۶	۴۴۴/۳۱۸۳	۴۳۳/۳۶۹۵	۵۱۷/۳۱	۴۴۱/۷۱۷	۴۵۱/۰۸۲۱
۲۷	۱۰/۴۰۶۱	۱۰/۰۰۲۶	۱۴/۸۸۱	۱۰/۷۱۴۱۸	۱۰/۸۵۳۵
۲۸	۱۰/۱۵۰۹	۱۰/۰۲۴۶	۱۸/۷۹	۱۰/۰۲۲۰۲	۱۰/۲۱۰۷
۲۹	۱۰/۰۷۱۵	۱۰/۰۱۲۵	۲۶/۶۱۱	۹/۹۹۲۶۴۸	۱۰/۱۵۰۵
۳۰	۹۶/۹۹۲۵	۹۶/۹۱۲۵	۵۹/۵۸۱	۱۰۱/۳۲۸	۱۰۲/۶۴۵۵
۳۱	۱۸۸/۰۱۱۲	۱۸۹/۹۶۸۹	۱۸۳/۴۸	۱۸۴/۸۱۲۵	۱۸۵/۵۷۷۰
۳۲	۱۸۹/۹۰۴	۱۷۵	۱۸۳/۳۹	۱۸۵/۷۴۳۴	۱۸۹/۹۲۵۸
۳۳	۱۸۹/۸۷۷۱	۱۸۹/۰۱۸۱	۱۸۹/۰۲	۱۹۷/۶۳۷۸	۱۹۳/۶۵۸۲
۳۴	۱۹۹/۹۹۴	۲۰۰	۱۹۸/۷۳	۱۹۰/۹۷۴۶	۱۸۶/۷۲۷۴
۳۵	۱۹۹/۹۹۸	۲۰۰	۱۹۸/۷۷	۱۹۴/۷۰۷۴	۱۹۴/۷۹۶۳
۳۶	۱۹۹/۹۶۱	۱۹۹/۹۹۷۸	۱۸۲/۲۳	۱۹۹/۹۴۱۵	۲۰۰/۰۴۸۹
۳۷	۱۰۹/۸۲۷	۱۰۹/۹۹۶۹	۳۹/۶۷۳	۱۰۴/۹۴۱	۱۰۵/۷۹۲۴
۳۸	۱۰۹/۷۴۲	۱۰۹/۰۱۲۶	۸۱/۵۹۶	۱۲۳/۹۷۱	۱۱۱/۶۹۱۲
۳۹	۱۰۹/۸۱۳	۱۰۹/۴۵۶	۴۲/۹۶	۱۴۲/۱۲۸	۱۱۲/۸۶۱۰
۴۰	۴۸۴/۰۴۵	۴۲۱/۹۹۸۷	۵۳۷/۱۷	۴۶۰/۵۸۷۷	۴۷۹/۷۳۵۸
هزینه×$۱۰^{۵}$	۱/۲۳۱۱۲	۱/۲۵۷۸	۱/۲۳۱۷	۱/۲۴۷۰۳	۱/۲۳۷۵۳
آلایندگی×$۱۰^{۵}$	۲/۰۴۹۶	۲/۱۰۹۳	۲/۰۸۴۶	۲/۱۲۴۸۲	۱/۹۸۴۳۱

Table (6): Optimization results in scenario three

جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی در سناریو سوم

واحد	EMA [32]	PSO [34]	GAEPSO [34]	GWO	MGWO
۱	۱۱۳/۹۹۷۸	۱۱۴	۱۱۰/۳۳۴۶	۱۱۱/۷۴۳۲	۱۱۰/۱۷۷۳
۲	۱۱۴	۱۰۶/۲۳۵۶	۱۰۸/۰۶۵۹	۱۱۶/۱۵۶۲	۱۱۶/۷۹۶۵
۳	۱۱۹/۹۸۷۸	۱۱۸/۲۵۶۴	۱۲۲/۲۲۶۸	۱۱۷/۰۱۰۹	۱۱۸/۵۲۲۱
۴	۱۶۸/۰۶۹۱	۱۸۲/۶۶۳۴	۱۸۳/۵۶۳۸	۱۷۲/۷۶۹۲	۱۷۳/۵۹۹۲
۵	۹۶/۹۹۹۸	۹۷	۹۷	۹۶/۴۸۷۲۵	۹۸/۴۳۴۰
۶	۱۲۳/۵۱۲۱	۱۰۲/۱۹۸۷	۱۲۱/۲۶۶۳	۱۲۶/۹۱۶۸	۱۲۹/۲۵۲۲
۷	۲۹۸/۶۴۸۸	۱۳۴/۰۵۳۱	۲۸۹/۳۳۸۶	۲۸۹/۲۰۶۳	۲۸۲/۸۱۴۱
۸	۲۹۵/۳۲۲۲	۲۹۲/۲۲۵۶	۲۹۱/۰۲۴۸	۲۹۲/۷۰۵۹	۲۸۶/۰۳۰۲
۹	۲۹۴/۹۱۸۵	۲۹۰/۱۱۶۵	۲۶۸/۱۸۳۲	۲۸۲/۸۳۲۸	۲۸۱/۷۶۹۲
۱۰	۱۳۰	۱۳۳/۸۹۴۱	۱۸۵/۰۳۶۲	۱۲۴/۱۹۸۴	۱۲۶/۹۳۲۱
۱۱	۲۹۷/۳۴۳	۱۰۱/۲۳۶۸	۲۲۶/۵۵۴۷	۳۰۱/۰۲۶۱	۳۰۵/۰۱۸۰
۱۲	۲۹۶/۵۱۶۷	۱۵۴/۷۲۸۹	۳۰۰/۰۳۶۲	۲۹۷/۴۲۵۴	۲۹۹/۶۰۹۱
۱۳	۴۳۱/۰۴۰۱	۳۰۸/۲۱۶۶	۳۶۲/۸۵۶۶	۴۲۹/۲۰۰۱	۴۲۲/۳۰۷۲
۱۴	۴۲۰/۴۳۵۳	۳۶۸/۳۳۲۵	۴۲۲/۰۶۹۵	۴۰۳/۲۰۳۱	۴۱۲/۹۷۲۶
۱۵	۴۲۱/۰۵۸۴	۳۷۱/۲۲۱۵	۴۵۲/۱۸۳۶	۴۳۹/۸۲۹۶	۴۴۹/۸۷۹۱
۱۶	۴۲۱/۱۵۹۳	۳۸۱/۲۶۸۱	۴۱۱/۶۶۴۲	۴۱۷/۹۶۰۷	۴۲۴/۸۷۸۱
۱۷	۴۳۷/۱۶۷۶	۴۱۶/۲۶۷۸	۴۵۶/۰۲۸۱	۴۴۴/۸۱۰۳	۴۴۱/۴۹۳۸
۱۸	۴۳۷/۱۴۲۵	۴۸۲/۹۶۵۵	۴۲۶/۳۳۷۷	۴۳۵/۷۰۲۲	۴۳۰/۶۵۴۱
۱۹	۴۳۵/۶۲۸۳	۵۰۶/۲۲۰۱	۴۶۸/۹۵۳۴	۴۴۷/۱۶۱۹	۴۴۳/۸۵۸۵
۲۰	۴۳۶/۱۲۹	۵۱۶/۲۴۶۴	۵۰۱/۵۳۷۸	۴۵۵/۳۷۸۱	۴۵۶/۴۹۵۵
۲۱	۴۳۶/۱۴۴۹	۵۰۲/۷۷۱۹	۴۲۴/۲۸۳۵	۴۲۹/۸۶۱۹	۴۲۸/۸۵۱۵
۲۲	۴۳۵/۶۸۱۴	۴۳۵/۴۷۴۱	۴۵۶/۷۸۷۲	۴۵۶/۷۴۲۵	۴۶۱/۳۹۳۹
۲۳	۴۳۶/۰۸۹۶	۴۸۲/۱۲۶۴	۳۶۹/۰۳۶۵	۴۲۵/۸۳۶۵	۴۲۰/۶۲۶۵
۲۴	۴۳۶/۲۶۴	۵۳۸/۰۵۳۶	۴۳۶/۶۱۰۲	۴۵۴/۸۵۶۶	۴۶۱/۹۳۰۶
۲۵	۴۳۶/۳۵۶۴	۵۴۵/۰۰۸۹	۳۴۳/۲۲۵۱	۴۲۷/۶۴۹۵	۴۲۳/۶۵۵۷
۲۶	۴۳۶/۲۶۰۸	۴۲۶/۲۲۷۸	۴۰۷/۸۳۶۲	۴۲۰/۵۳۸۸	۴۲۷/۱۹۳۵
۲۷	۲۵/۴۳۰۶	۱۲۱/۲۲۳۸	۱۰۰/۲۸۳۵	۲۶/۶۴۸۰۷	۲۶/۸۲۳۳
۲۸	۲۵/۲۲۰۲	۱۲۶/۰۳۴۳	۱۰۴/۲۲۴۹	۲۵/۴۵۸۴۴	۲۵/۲۹۸۵
۲۹	۲۵/۶۱۲۵	۱۰۶/۲۲۶۸	۱۲۴/۹۳۶۵	۲۶/۴۹۵۷۷	۲۶/۱۲۴۵
۳۰	۹۶/۹۹۸۹	۹۶/۰۸۹۲	۶۷/۰۸۳۶	۱۰۰/۹۹۰۴	۱۰۳/۱۰۵۵
۳۱	۱۷۱/۲۴۹۱	۱۷۲/۰۰۸۶	۱۲۶/۲۳۶۴	۱۷۵/۲۹۷۸	۱۷۱/۵۳۴۲
۳۲	۱۷۱/۲۲۱۴	۱۸۱/۶۱۴۷	۱۷۵/۲۲۳۸	۱۶۶/۴۳۹۵	۱۶۴/۱۴۵۰
۳۳	۱۷۱/۲۶۱۴	۱۷۰/۱۲۴۳	۱۶۸/۰۸۳۴	۱۶۷/۰۲۰۵	۱۶۷/۱۳۰۸
۳۴	۱۹۹/۹۹۹۷	۱۹۱/۳۸۴۳	۱۵۲/۷۵۲۵	۲۰۵/۶۴۵۴	۲۰۶/۳۰۴۹
۳۵	۱۹۹/۹۹۷۴	۱۸۹/۵۳۷۱	۱۶۰/۳۳۱۵	۱۹۱/۸۹۳	۱۹۲/۴۰۳۵
۳۶	۲۰۰	۱۷۲/۰۰۳۴	۱۷۶/۶۲۵۷	۱۹۸/۷۷۱۱	۲۰۰/۶۹۵۷
۳۷	۱۰۰/۱۴۸۳	۹۷/۶۲۰۶	۹۳/۰۶۳۸	۱۰۲/۵۴۵۹	۱۰۲/۵۰۲۲
۳۸	۱۰۰/۰۳۴۹	۹۴/۴۸۳۳	۸۶/۱۷۴۳	۱۰۴/۲۱۷۹	۱۰۴/۱۶۱۷
۳۹	۹۹/۸۴۷۴	۸۶/۰۸۵۳	۱۰۴/۲۲۶۳	۹۶/۳۱۸۳۴	۹۴/۷۸۸۶
۴۰	۴۳۴/۶۳۸۵	۴۶۲/۲۲۶۴	۴۸۹/۰۲۶۴	۴۱۸/۴۸۵۶	۴۱۲/۳۱۶۴
بادی ۱	۴۰/۴۸۷۱۴	۴۶/۰۴۶۸	۵۳/۶۲۷۵	۳۹/۹۰۹۶۴	۳۹/۶۲۱۶
بادی ۲	۳۱/۹۷۷۱	۸۰/۰۴۶۸	۷۶/۰۷۴۲	۳۲/۶۲۹۹۵	۳۲/۸۲۷۹
هزینه سوخت	۱۴۴۳۵۶	۱۴۲۰۶۸	۱۴۶۰۳۵	۱۴۷۱۲۸	۱۴۳۲۴۵
آلایندگی×$۱۰^{۵}$	۱/۷۲۵۹۵	۱/۷۸۴۳۲	۱/۷۲۲۶۸	۱/۷۹۶۷۱	۱/۷۱۳۹۱
هزینه×$۱۰^{۵}$	۴/۶۶۳۳۲	۴/۷۴۹۳۴	۴/۶۷۴۰۲	۴/۷۵۵۶۹	۴/۶۲۴۶۸



شکل (۸): روند همگرایی الگوریتم‌های GWO و MGWO در سناریو سوم

Figure (8): Convergence process of GWO and MGWO algorithms in the third scenario

هزینه کلی سیستم در سناریو سوم، پس از انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم MGWO برابر با ۴۶۲۴۶۸ دلار تخمین زده شد، که کمتر از نتایج الگوریتم‌های EMA، PSO و GAEPSO به‌دست آمده است. هزینه کلی در صورت انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم EMA برابر با ۴۶۶۳۳۲ دلار، الگوریتم PSO برابر با ۴۷۴۹۳۴ دلار، الگوریتم GAEPSO برابر با ۴۶۷۴۰۲ دلار و در صورت بهینه‌سازی توسط GWO برابر با ۴۷۵۵۶۹ دلار به‌دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه مشارکت واحدها در سیستم قدرت استاندارد با ۴۰ واحد حرارتی و دو مزرعه بادی توسط الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری جهش یافته انجام شده است. در فرمول‌بندی ارائه شده برای مسئله توزیع اقتصادی بار، هزینه بهره‌برداری از مزرعه بادی به‌صورت احتمالی در نظر گرفته شده است. ارائه مدل احتمال پیشنهادی، برای هزینه مزرعه بادی سبب خواهد شد، سناریوهایی از توان بادی، که احتمال وقوع آن‌ها کم است، تاثیر کمتری در مقدار نهایی تابع هدف داشته و سناریوهای محتمل‌تر، نقش بیشتری را ایفا کنند. توزیع اقتصادی بار در سه سناریو انجام شد که در سناریو اول، پخش‌بار اقتصادی با صرف‌نظر از آلایندگی و عدم حضور مزرعه بادی، انجام گرفت. سناریو دوم نیز بدون حضور مزرعه بادی، پخش‌بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلایندگی صورت پذیرفت.

در سناریو سوم، پخش‌بار اقتصادی در حضور مزرعه بادی در سیستم قدرت با لحاظ نمودن آلایندگی انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی گرگ خاکستری جهش یافته در هر سه سناریو، نشان از برتری و دقت بالاتر این الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری دارد. همچنین نتایج سناریو دوم نشان داد زمانی که تابع آلایندگی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شود، هزینه‌های بهره‌برداری افزایش پیدا خواهد کرد. برای مطالعه آتی نیز می‌توان مسئله پخش بار اقتصادی-زیست‌محیطی را با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های بار و منابع تجدیدپذیر انجام داد.

Refrences

مراجع

[1] K.V. Santos, E.C. Finardi, "Piecewise linear approximations for hydropower production function applied on the hydrothermal unit commitment problem", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 135, Article Number: 107464, Feb. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107464).

[2] M.J. Abdollahi, M. Moazzami, "Day-ahead coordination of vehicle-to-grid operation and wind power in security constraints unit commitment (SCUC)", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 6, no. 22, pp. 49-56, Sep. 2015 (dor: 20.1001.1.23223871.1394.6.22.5.1).

[3] L. Montero, A. Bello, J. Reneses, "A review on the unit commitment problem: Approaches, techniques, and resolution methods", Energies, vol. 15, no. 4, Article Number: 1296, Feb. 2022 (doi: 10.3390/en15041296).

[4] B. Knueven, J. Ostrowski, J.P. Watson, "A novel matching formulation for startup costs in unit commitment", Mathematical Programming Computation, vol. 12, no. 2, pp. 225-248, Jun. 2020 (doi: 10.1007/s12532-020-00176-5).

[5] M.R. Gholami Dehbalaee, G.H. Shaeisi, M. Valizadeh, "A novel exclusive binary search algorithm to solve the nonlinear economic dispatch problem", Journal of Energy Management and Technology, vol. 4, no. 3, pp. 48-56, Sep. 2020 (doi:10.22109/jemt.2020.207784.1207).

[6] B. Fu, C. Ouyang, C. Li, J. Wang, E. Gul, "An improved mixed integer linear programming approach based on symmetry diminishing for unit commitment of hybrid power system", Energies, vol. 12, no. 5, Article Number: 833, Mar. 2019 (doi: 10.3390/en12050833).

[7] J. Zou, S. Ahmed, X.A. Sun, "Multistage stochastic unit commitment using stochastic dual dynamic integer programming", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 34, no. 3, pp. 1814-1823, Nov. 2018 (doi: 10.1109-/TPWRS.2018.2880996).

[8] J. Alemany, L. Kasprzyk, F. Magnago, "Effects of binary variables in mixed integer linear programming based unit commitment in large-scale electricity markets", Electric Power Systems Research, vol. 160, pp. 429-438, July. 2018 (doi: 10.1016/j.epsr.2018.03.019).

[9] D. Putz, D. Schwabeneder, H. Auer, B. Fina, "A comparison between mixed-integer linear programming and dynamic programming with state prediction as novelty for solving unit commitment", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 125, Article Number: 106426, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepe-s.2020.106426).

[10] M.A. El-Shorbagy, A.A. Mousa, M. Farag, "Solving nonlinear single-unit commitment problem by genetic algorithm-based clustering technique", Review of Computer Engineering Research, vol. 4, no. 1, pp. 11-29, Mar. 2017 (doi: 10.18488/journal.76.2017.41.11.29).

[11] B.O. Anyaka, J.F. Manirakiza, K.C. Chike, P.A. Okoro, "Optimal unit commitment of a power plant using particle swarm optimization approach", International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 1135-1141, April. 2020 (doi: 10.11591/ijece.v10i2.pp1135-1141).

[12] J.S. Dhaliwal, J.S. Dhillon, "Profit based unit commitment using memetic binary differential evolution algorithm", Applied Soft Computing, vol. 81, Article Number: 105502, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.asoc.20-19.105502).

[13] V. Kumar, D. Kumar, "Binary whale optimization algorithm and its application to unit commitment problem", Neural Computing and Applications, vol. 32, no. 7, pp. 2095-2123, April. 2020 (doi: 10.1007/s-00521-018-3796-3).

[14] K.S. Reddy, L.K. Panwar, B.K. Panigrahi, R. Kumar, "A new binary variant of sine–cosine algorithm: development and application to solve profit-based unit commitment problem", Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 43, no. 8, pp. 4041-4056, Aug. 2018 (doi: 10.1007/s13369-017-2790-x).

[15] S.S. Sakthi, R.K. Santhi, N.M. Krishnan, S. Ganesan, S. Subramanian, "Wind integrated thermal unit commitment solution using grey wolf optimizer", International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 7, no. 5, pp. 2088-8708, Oct. 2017 (doi: 10.11591/ijece.v7i5.pp2309-2320).

[16] R. Ponciroli, N.E. Stauff, J. Ramsey, F. Ganda, R.B. Vilim, "An improved genetic algorithm approach to the unit commitment/economic dispatch problem", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 35, no. 5, pp. 4005-4013, April. 2020 (doi: 10.1109/TPWRS.2020.2986710).

[17] M. Zhou, B. Wang, T. Li, J. Watada, "A data-driven approach for multi-objective unit commitment under hybrid uncertainties", Energy, vol. 164, pp. 722-733, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.09.008).

[18] H. Ye, Y. Ge, M. Shahidehpour, Z. Li, "Uncertainty marginal price, transmission reserve, and day-ahead market clearing with robust unit commitment", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 1782-1795, July 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2595621).

[19] M. Rouholamini, M. Rashidinejad, A. Abdollahi, H. Ghasemnejad, "Frequency reserve within unit commitment considering spinning reserve uncertainty", International Journal of Energy Engineering, vol. 2, no. 4, pp. 177-183, Feb. 2012 (doi: 10.5923/j.ijee.20120204.10).

[20] W.V. Ackooij, E.C. Finardi, G.M. Ramalho, "An exact solution method for the hydrothermal unit commitment under wind power uncertainty with joint probability constraints", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 33, no. 6, pp. 6487-6500, June 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2018.2848594).

[21] Y. Zhang, K. Liu, X. Liao, L. Qin, X. An, "Stochastic dynamic economic emission dispatch with unit commitment problem considering wind power integration", International Trans. on Electrical Energy Systems, vol. 28, no. 1, Article Number: e2472, Jan. 2018 (doi: 10.1002/etep.2472).

[22] M. Isuru, M. Hotz, H.B. Gooi, W. Utschick, "Network-constrained thermal unit commitment for hybrid AC/DC transmission grids under wind power uncertainty", Applied Energy, vol. 258, Article Number: 114031, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114031).

[23] B. Dey, B. Bhattacharyya, S. Raj, R. Babu, "Economic emission dispatch on unit commitment-based microgrid system considering wind and load uncertainty using hybrid MGWOSCACSA", Journal of

Electrical Systems and Information Technology, vol. 7, no. 1, pp. 1-26, Dec. 2020 (doi: 10.1186/s43067-020-00023-6).
[24] K.H. Jo, M.K. Kim, "Improved genetic algorithm-based unit commitment considering uncertainty integration method", Energies, vol. 11, no. 6, Article Number: 1387, May. 2018 (doi: 10.3390/en11061387).
[25] S. Abedi, G.H. Riahy, S.H. Hosseinian, A. Alimardani, "Risk-constrained unit commitment of power system incorporating PV and wind farms", International Scholarly Research Notices, vol. 2011, Article Number: 309496, Sept. 2011 (doi: 10.5402/2011/309496).
[26] K. Sundar, H. Nagarajan, L. Roald, S. Misra, R. Bent, D. Bienstock, "Chance-constrained unit commitment with N-1 security and wind uncertainty", IEEE Trans. on Control of Network Systems, vol. 6, no. 3, pp. 1062-1074, May. 2019 (doi: 10.1109/TCNS.2019.2919210).
[27] C. Wang, X. Li, Y. Zhang, Y. Dong, X. Dong, M. Wang, "Two stage unit commitment considering multiple correlations of wind power forecast errors", IET Renewable Power Generation, vol. 15, no. 3, pp. 574-585, Feb. 2021 (doi: 10.1049/rpg2.12037).
[28] J. Olamaei, M.E. Nazari, S. Bahravar, "Economic environmental unit commitment for integrated CCHP-thermal-heat only system with considerations for valve-point effect based on a heuristic optimization algorithm", Energy, vol. 159, pp. 737-750, Sept. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2018.06.117).
[29] M. Neyestani, M. Hatami, S. Hesari, "Combined heat and power economic dispatch problem using advance-d modified particle swarm optimization", Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 11, no. 1, Article Number: 015302, Jan. 2019 (doi: 10.1063/1.5048833).
[30] M.E. Nazari, M.M, Ardehali, "Optimal scheduling of coordinated wind-pumped storage-thermal system considering environmental emission based on GA based heuristic optimization algorithm", International Journal of Smart Electrical Engineering, vol. 6, no. 04, pp. 135-142, Dec. 2017 (dor: 20.1001.1.22519246.-2017.06.04.2.9).
[31] X.Q. Zhang, Z.F. Ming, "An optimized grey wolf optimizer based on a mutation operator and eliminating-reconstructing mechanism and its application", Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, vol. 18, no. 11, pp. 1705-1719, Nov. 2017 (doi: 10.1631/FITEE.1601555).
[32] M.T. Hagh, S.M.S. Kalajahi, N. Ghorbani, "Solution to economic emission dispatch problem including wind farms using exchange market algorithm method", Applied Soft Computing, vol. 88, Article Number: 106044, Mar. 2020 (doi: 10.1016/j.asoc.2019.106044).
[33] A.Y. Abdelaziz, E.S. Ali, S.M. Abd Elazim, "Implementation of flower pollination algorithm for solving economic load dispatch and combined economic emission dispatch problems in power systems", Energy, vol. 101, pp. 506-518, April. 2016 (doi: 10.1016/j.energy.2016.02.041).
[34] S. Jiang, Z. Ji, Y. Wang, "A novel gravitational acceleration enhanced particle swarm optimization algor-ithm for wind–thermal economic emission dispatch problem considering wind power availability", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 73, pp. 1035-1050, Dec. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.06.014).

زیرنویس‌ها

1. Emission environmental
2. Wind farm
3. Estimation control methods
4. Unit commitment
5. Mixed-integer linear programming
6. Dynamic programming
7. Binary variables
8. Genetic algorithms
9. Particle swarm algorithm
10. Binary differential evolution algorithm
11. Binary whale optimization algorithm
12. sine–cosine algorithm
13. Uncertainty spinning reservation
14. Economic-environmental distribution
15. Mutant gray wolf optimization algorithm
16. Stochastic dual dynamic integer programming
17. Binary sine–cosine algorithm
18. Enhanced multiobjective PSO
19. Cumulative distribution function
20. Probable distribution weibull
21. Probability density function
22. Exchange market algorithm
23. Biogeography-based optimization
24. Flower pollination algorithm
25. Gravitational acceleration enhanced PSO