

<https://dorl.net/dor/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 Afroozeh¹, Ph.D. Student, Hamidreza Abdolmohammadi^{1,2}, Assistant Professor, Mohammad-Esmaeil Nazari², Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering- Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran

²Electrical 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, March 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/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 کامپیوتر- دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان

mahdiafrozeh@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 هزینه‌های 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 آلاینده‌ها، ارائه شده است. با توجه به ماهیت تصادفی سرعت باد توان تولیدی توسط توربین‌های 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 به صورت 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 به منظور 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 آلاینده‌های زیست‌محیطی^۱ واحدهای حرارتی، توجه‌ها به سمت کاهش هزینه و آلاینده‌های افزایش پیدا کرده است. ارائه برنامه دقیق مشارکت واحدها یکی از روش‌های کاهش هزینه و آلاینده‌ها است [۱]. از سویی استفاده از منابع تجدیدپذیر راه‌کار دیگری 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، روش‌های 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]، بهینه‌سازی 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 عدم قطعیت‌ها صرف‌نظر کرده‌اند. عدم قطعیت بخش غیرقابل چشم‌پوشی در مطالعه سیستم‌های قدرت است به طوری که 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 عدم قطعیت‌ها، 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] عدم قطعیت در توان تولیدی مزرعه بادی و در مرجع [۲۵]، عدم قطعیت 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 آلاینده‌ها در نظر گرفته شده است. در تعریف تابع اصلی، هزینه بهره‌برداری از مزرعه بادی به صورت 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-زیست‌محیطی 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 برنامه‌ریزی تصادفی عدد صحیح پویا دوگانه^{۱۶} (SDDIP)، باینری سینوس کسینوس^{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 مراجع‌ها

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

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 این صورت، 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 می‌دهد.

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:

$$P(t) = \begin{cases} 0 & v(t) < v_i \text{ and } v(t) > v_o \\ P_r \frac{(v - v_i)}{(v_r - v_i)} & v_i \leq v(t) \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v(t) \leq v_o \end{cases} \quad (1)$$

که v سرعت فعلی باد در (متر بر ثانیه)، v_i ، v_o و v_r به ترتیب 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]:

$$F_V(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad [v > 0] \quad (2)$$

$$F_V(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

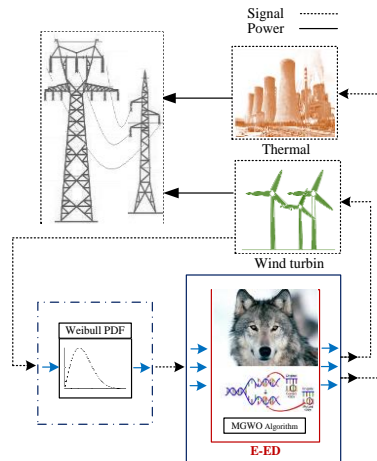
رابطه (۲) تابع توزیع تجمعی و رابطه (۳) تابع توزیع احتمال^{۲۱} (PDF) است. در این رابطه‌ها k ضریب شکل در یک مکان مشخص (بدون بعد) و c ضریب مقیاس در یک مکان مشخص (متر بر ثانیه) است. با استفاده از رابطه‌های فوق، احتمال سناریوی $w=0$ و $w=w_r$ به شرح زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$P_r \{w = 0\} = F_V(v_i) + (1 - F_V(v_o)) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \quad (4)$$

$$P_r \{w = w_r\} = F_V(v_o) + (F_V(v_r)) = \exp\left(-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{v_o}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$

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

$$f_w(w) = \frac{klv_i}{w_r c} \left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{(1+\rho l)v_i}{c}\right)^k\right)^{k-1} \quad (6)$$



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.

$$FC_{total} = \sum_{s=1}^{N_k} \pi_k \left(\left(\sum_{j=1}^{N_w} C_{dir,j}(W_j) \right) + \left(\sum_{j=1}^{N_w} C_{ov,j}(W_{ov}) \right) + \left(\sum_{j=1}^{N_w} C_{un,j}(W_{un}) \right) \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_t} C_{th,i}(p_{g,i}) \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_t} C_{emi,i}(p_{g,i}) \right) \quad (7)$$

که N_w و N_t به ترتیب 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 بهره‌برداری از مزرعه بادی دارند. $C_{un,j}$ به ترتیب هزینه‌های تخمین بیشتر و کمتر از حد و هزینه‌های مستقیم توربین بادی زام هستند. $C_{dr,j}$ هم هزینه مستقیم انرژی باد را نشان می‌دهد. هزینه‌های سوخت و آلودگی واحدهای حرارتی به ترتیب $C_{th,j}$ و $C_{emi,j}$ هستند.

۱-۲-۱- هزینه مستقیم انرژی باد

بخش اول تابع هزینه مستقیم انرژی باد را نشان می‌دهد که به عنوان 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]:

$$C_{dir,j}(w_j) = d_i w_i \quad (8)$$

که d_i ضریب هزینه مستقیم برای ژنراتور بادی زام است.

۱-۲-۲- 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]:

$$C_{ov,j}(W_{ov}) = C_{ov,j} \times [A + B + C] \quad (9)$$

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

$$A = W_j \times \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{V_{i,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) + \exp\left(-\left(\frac{V_{o,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) \right] \quad (10)$$

$$B = \left(\frac{W_{r,j} V_{i,j}}{(v_{r,j} - v_{i,j})} + w_j\right) \times \left[\exp\left(-\left(\frac{V_{i,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{l,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) \right] \quad (11)$$

$$C = \left(\frac{W_{r,j} c_j}{(v_{r,j} - v_{i,j})}\right) \times \left\{ \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{l,j}/c_j)^{k_j}\right] - \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{i,j}/c_j)^{k_j}\right] \right\} \quad (12)$$

که $C_{ov,j}$ ضریب تخمین بیش از حد ژنراتور توان بادی زام 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]:

$$C_{un,j}(W_{un}) = C_{un,j} \times [E + F + G] \quad (13)$$

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

$$E = (W_{r,j} - W_j) \times \left[\exp\left(-\left(\frac{V_{r,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{o,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) \right] \quad (14)$$

$$F = \left(\frac{W_{r,j} V_{i,j}}{(v_{r,j} - v_{i,j})} + w_j\right) \times \left[\exp\left(-\left(\frac{V_{r,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) - \exp\left(-\left(\frac{V_{l,j}}{c_j}\right)^{k_j}\right) \right] \quad (15)$$

$$G = \left(\frac{W_{r,j} c_j}{(v_{r,j} - v_{i,j})}\right) \times \left\{ \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{l,j}/c_j)^{k_j}\right] - \Gamma\left[1 + 1/k_j, (v_{r,j}/c_j)^{k_j}\right] \right\} \quad (16)$$

۴-۱-۲- هزینه واحد حرارتی

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

$$FC = \sum_{i=1}^{N_i} C_{th,i}(P_{g,i}) = \sum_{i=1}^{N_i} (a_i P_{g,i}^2 + b_i P_{g,i} + C) \quad (17)$$

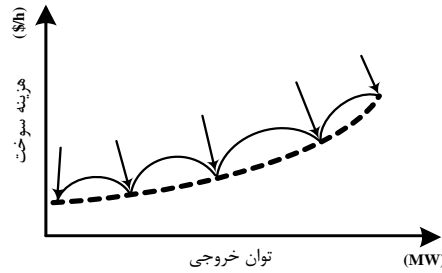
با افزایش بار در واحدهای حرارتی سنتی جهت کنترل توان خروجی، اغلب چند دریچه بخار وجود دارد که باز کردن پی‌درپی شیرهای ورودی توربین باعث ریپل‌ها و یا نقاط غیرقابل تشخیص در مدل هزینه تولید می‌شود. این اثر با تابع سینوسی به صورت رابطه (۱۸) مدل‌سازی شده است. شکل (۲)، تأثیر دریچه‌های شیر بخار بر منحنی هزینه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

$$FC = \sum_{i=1}^{N_i} (a_i P_{g,i}^2 + b_i P_{g,i} + c_i + |d_i \sin(e_i \times (P_{g,i}^{\min} - P_{g,i}))|) \quad (18)$$

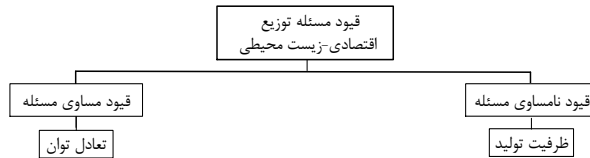
که $P_{g,i}$ توان خروجی واحد حرارتی نام و a_i ، b_i و c_i ضرایب مربوط به واحد نام هستند و d_i ضرایب ژنراتور i منعکس شده از بارگذاری شیر بخار است.

۵-۱-۲- هزینه آلاینده‌گی

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

$$EC = \sum_{i=1}^{N_t} e f_i (f_i + g_i P_{g,i} + h_i P_{g,i}^2) C_{tax} \quad (19)$$

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

$$EC = \sum_{i=1}^{N_t} (10^{-2} \times (\alpha_i + \beta_i P_{g,i} + \gamma_i P_{g,i}^2) + c_i \exp(\lambda_i P_{g,i})) \quad (20)$$

که $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ و λ_i ضرایب آلودگی واحد حرارتی نام هستند.

۲-۲- محدودیت‌های 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

تعداد 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:

$$\sum_{j=1}^{N_w} w_j + \sum_{i=1}^{N_t} P_{g,i} = P_{demand} + P_{loss} \quad (21)$$

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

$$P_{Loss} = B_{oo} + \sum_{j=1}^{N_g} B_{jo} P_j + \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} P_i B_{ij} P_j \quad (22)$$

که در آن، B_{oo}, B_{jo}, B_{ij} ضرایب تلفاتی هستند. این ضرایب به ترتیب مطابق روابط (۲۳) الی (۲۹) قابل محاسبه هستند. P_{di} و Q_{di} توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی، $|V_i|$ و δ_i به ترتیب دامنه و ولتاژ فاز شین نام 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.

$$B_{oo} = \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_B} P_{di} B_{ij} P_{dj} \quad (23)$$

$$B_{io} = \sum_{i=1}^{N_B} (B_{ij} + B_{ji}) P_{dj}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_g) \quad (24)$$

$$B_{ij} = \frac{R_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)}{|V_i| |V_j| \cos \varphi_i \cos \varphi_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N_B) \quad (25)$$

$$\theta_i = \delta_i - \varphi_i \quad (26)$$

$$\varphi_i = \tan^{-1}(\theta_i / P_i) \quad (27)$$

$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (i = 1, 2, \dots, N_g) \quad (28)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} \quad (i = 1, 2, \dots, N_g) \quad (29)$$

۲-۲-۲- محدودیت های نامساوی

قیود نامساوی حداقل و حداکثر توان تولید شده توسط نیروگاه های حرارتی و بادی را به شرح زیر نشان می دهد [۳۰]:

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_t \quad (30)$$

$$0 \leq w_j \leq w_{r,j} \quad i = 1, 2, \dots, Nw \quad (31)$$

در معادله (۳۱)، $w_{r,i}$ توان نامی توربین بادی زام 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. گرگ های خاکستری معمولاً ترجیح می دهند که به صورت گروهی زندگی کنند. اندازه گروه به طور متوسط بین ۵ الی ۱۲ است. رهبران گروه یک نر و یک ماده هستند که آلفا نامیده می شوند. آلفا عمدتاً مسئول تصمیم گیری درباره شکار، محل خواب، زمان بیدار شدن و غیره است. تصمیم های آلفا به گروه دستور داده می شود. دومین سطح در سلسله مراتب گرگ های خاکستری بتا است. بتاها گرگ های تابع هستند که به آلفاها در تصمیم گیری یا سایر کارهای گروه کمک می کنند. گرگ بتا باید به آلفا احترام بگذارد اما به گرگ های پایین تر دستور می دهد. پایین ترین رتبه مربوط به گرگ خاکستری یا امگا است. فاز اصلی شکار گرگ خاکستری از سه بخش جستجو، دویدن و نزدیک شدن به شکار، تعقیب کردن، محاصره کردن، خسته کردن شکار تا زمانی که از حرکت بایستد و در نهایت حمله به سمت طعمه تقسیم بندی می شود. به منظور ایجاد مدل ریاضی رفتار محاصره کردن، معادلات زیر پیشنهاد می شوند [۳۱]:

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (32)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (33)$$

که در آن t تکرار جریان را نشان می دهد، A و C ضرایب بردارها هستند. X_p موقعیت بردار طعمه و X موقعیت بردار گرگ خاکستری را نشان می دهد. بردارهای A و C به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\bar{A} = 2\bar{\alpha} \cdot \bar{r}_1 - \bar{\alpha} \quad (34)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2 \quad (35)$$

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 می شود. 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 موقعیت هایشان در طول موقعیت بهترین عامل جستجو می کند. رابطه های زیر در این زمینه پیشنهاد شده است [۳۱]:

$$\bar{D}_\alpha = \left| \bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X} \right|, \bar{D}_\beta = \left| \bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X} \right|, \bar{D}_\delta = \left| \bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X} \right| \quad (36)$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\alpha), \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot (\bar{D}_\beta), \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot (\bar{D}_\delta) \quad (37)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (38)$$

در مدل‌سازی ریاضی در زمان نزدیک شدن به طعمه مقدار α کاهش داده می‌شود و در نتیجه 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. زمانی که مقدار تصادفی A بین $[-1, 1]$ 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 $[0, 2]$ است. این مولفه وزن‌های مختلفی برای طعمه ارائه می‌کند تا به‌طور تصادفی اثر طعمه در تشخیص فاصله را بر اهمیت $(C > 1)$ یا بی‌اهمیت $(C < 1)$ نشان دهد. این به GWO کمک می‌کند تا رفتار تصادفی بیشتری در سراسر بهینه‌سازی 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].

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}(t) + M_f \times r \times (\text{Max}_{\text{val}} - \text{Min}_{\text{val}}) \quad (39)$$

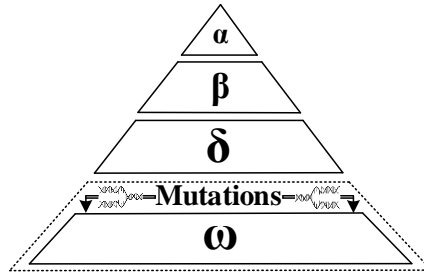
که در رابطه فوق، r عددی تصادفی با توزیع نرمال، Max_{val} و Min_{val} به ترتیب محدودیت‌های بالا و پایین متغیر و M_f نرخ جهش هستند. اما بایستی این نکته را یادآور شد که ضریب جهش در الگوریتم اصلاح شده گرگ خاکستری ثابت نخواهد بود و در هر تکرار متغیر است. انتخاب ضرایب بزرگتر در تکرارهای اول و همچنین ضرایب 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.

$$M_f = M_f^{\text{initial}} \left(\frac{\text{ite}^{\text{max}} - \text{ite}}{\text{ite}^{\text{max}}} \right) \quad (40)$$

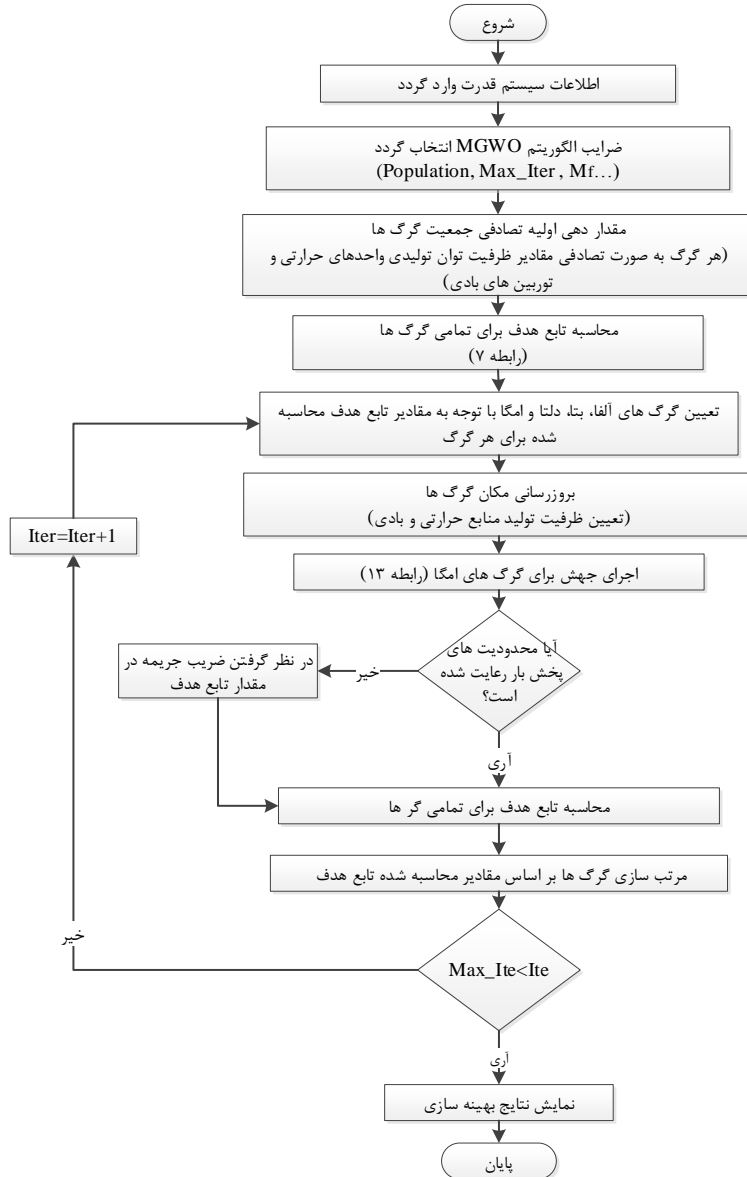
که در رابطه (۴۰)، M_f^{initial} مقدار فرض اولیه ضریب جهش و ite^{max} حداکثر تعداد تکرار و ite نیز شماره تکرار الگوریتم را نشان می‌دهند. برای تصدیق عملکرد الگوریتم پیشنهادی، بهینه‌سازی‌ها بر روی سیستم‌های تست انجام شد، که نتایج گواه بر دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در این مقاله است. اما به دلیل محدودیت 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 شبیه‌سازی

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 آلاینده‌های 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، آلاینده‌گی زیست-محیطی ایجاد شده توسط واحدهای حرارتی، نیز در نظر گرفته شده است. تابع در نظر گرفته شده برای محاسبه آلاینده‌گی 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، پخش بار اقتصادی با صرف نظر از آلاینده‌گی و در صورت عدم حضور مزرعه بادی انجام شده است. در سناریو دوم، پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلاینده‌گی توسط الگوریتم پیشنهادی MGWO در سیستم قدرت با ۴۰ واحد حرارتی و بدون مزرعه بادی انجام شده است. در نهایت در سناریو سوم، پخش بار اقتصادی در حضور مزرعه بادی و با در نظر گرفتن آلاینده‌گی 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

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

۱-۴- 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 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. میانگین، 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.

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

در بخش دوم شبیه‌سازها، تابع آلاینده‌گی به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده که باید الگوریتم، به نحوی توان تولیدی واحدها را تعیین کند، که آلاینده‌گی 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 آلاینده‌گی برای الگوریتم MGWO حاصل شده است. میزان آلاینده‌گی سیستم زمانی که از الگوریتم‌های EMA [۳۲]، GSA [۳۲]، FPA [۳۳] و GWO استفاده شود، به-ترتیب برابر با ۲۰۴۹۶۰ تن، ۲۱۰۹۳۰ تن، ۲۰۸۴۶۰ تن و ۲۱۲۴۸۲ تن محاسبه شده است، در حالی که میزان آلاینده‌گی 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 حالی که 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 آلاینده‌گی بوده نه هزینه بهره‌برداری، که میزان آلاینده‌گی زیست‌محیطی در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی MGWO کمتر از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری به‌دست آمده است.

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

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

Table (3): Optimization results in the first scenario

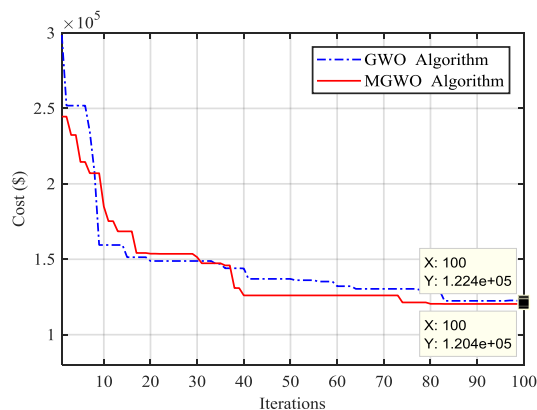
جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی در سناریو اول

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

Table (4): Optimization results in the first scenario

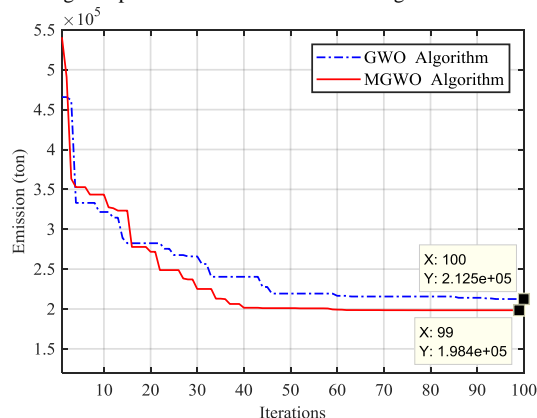
جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی در سناریو اول

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]	۱۲۱۴۲۲/۴	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 پخش بار 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

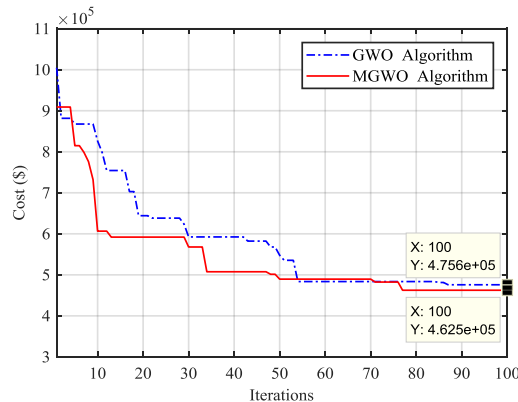
جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی در سناریو دوم

MGWO	GWO	FPA [33]	GSA [32]	EMA [32]	واحد
۱۱۸/۳۳۱۸	۱۱۰/۹۵۱۴	۴۳/۴۰۵	۱۱۳/۹۹۸۹	۱۱۳/۹۷۸	۱
۱۱۳/۷۹۶۲	۱۱۳/۴۸۶۵	۱۱۳/۹۵	۱۱۳/۹۸۹۶	۱۱۳/۷۹۵	۲
۱۱۸/۸۹۲۷	۱۱۹/۰۱۹۲	۱۰۵/۸۶	۱۱۹/۹۹۹۵	۱۱۹/۶۸۷	۳
۱۶۸/۷۵۰۹	۱۵۱/۱۰۲۸	۱۶۹/۶۵	۱۷۹/۷۸۵۷	۱۶۳/۹۸	۴
۹۵/۰۸۲۰۴	۹۶/۶۱۴۸۶	۹۶/۶۵۹	۹۷	۹۶/۹۸۷	۵
۱۲۲/۸۱۵۰	۱۱۵/۱۲۱۶	۱۳۹/۰۲	۱۳۹/۰۱۲۸	۱۲۸/۳۵۴	۶
۳۰۰/۷۵۳۲	۳۱۴/۶۳۱۳	۲۷۳/۲۸	۲۹۹/۹۸۸۵	۲۹۶/۵۸۲	۷
۲۷۲/۸۱۴۴	۲۹۱/۴۵۴۲	۲۸۵/۱۷	۳۰۰	۲۷۹/۱۴۱	۸
۲۸۸/۵۳۵۶	۲۴۵/۱۱۲۵	۲۴۱/۹۶	۲۹۶/۲۰۲۵	۲۹۲/۲۷۷	۹
۱۲۲/۱۹۵۷	۱۴۴/۰۵۷	۱۳۱/۲۶	۱۳۰/۳۸۵	۱۳۰/۰۰۳	۱۰
۲۶۴/۵۴۸۵	۲۱۳/۶۴۴۴	۳۱۲/۱۳	۲۴۵/۴۷۷۵	۲۵۳/۵۲۹	۱۱
۲۰۹/۶۰۶۰	۲۱۴	۳۶۲/۵۸	۳۱۸/۲۱۰۱	۲۲۴/۴۴۴	۱۲
۴۳۴/۹۱۳۵	۴۳۸/۱۰۳۴	۳۴۶/۲۴	۳۹۴/۶۲۵۷	۴۱۹/۵۲۷	۱۳
۴۱۰/۰۳۶۵	۴۰۵/۲۵۰۶	۳۰۶/۰۶	۳۹۵/۲۰۱۶	۴۱۹/۰۲۱۲	۱۴
۴۴۵/۷۷۸۷	۴۳۸/۰۱۵۸	۳۵۸/۷۸	۳۰۶/۰۰۴	۴۲۴/۱۷۹	۱۵
۴۳۳/۳۷۲۳	۴۲۵/۶۲۷۴	۲۶۰/۶۸	۳۹۵/۱۰۰۵	۴۲۰/۰۴۱۵	۱۶
۴۹۳/۰۶۹۳	۵۰۱/۳۲۶۱	۴۱۵/۱۹	۴۸۹/۲۵۶۹	۴۸۴/۹۴۱۶	۱۷
۴۷۵/۴۸۲۶	۴۹۷/۳۸۵۱	۴۲۳/۹۴	۴۸۸/۷۵۹۸	۴۷۸/۶۴۵	۱۸
۴۵۶/۳۹۴۳	۴۵۷/۵۳۵	۵۴۹/۱۲	۴۹۹/۲۳۲	۴۵۵/۷۴۷	۱۹
۴۰۴/۸۶۹۴	۳۹۷/۸۰۷۵	۴۹۶/۷	۴۵۵/۲۸۲۱	۴۱۵/۱۱۲۹	۲۰
۴۵۵/۴۴۸۰	۴۶۳/۶۳۱۹	۵۳۹/۱۷	۴۳۳/۴۵۲	۴۴۶/۸۷۸	۲۱
۴۵۶/۰۵۱۵۳	۴۲۸/۸۵۱۸	۵۴۶/۴۶	۴۳۳/۸۱۲۵	۴۵۱/۴۳۱۲	۲۲
۴۲۶/۸۴۲۲	۴۲۳/۶۸۴۸	۵۴۰/۰۶	۴۴۵/۵۱۳۶	۴۲۴/۷۳۱۱	۲۳
۴۴۷/۰۵۲۰	۴۴۷/۳۴۸۴	۵۱۴/۵	۴۵۲/۰۵۴۷	۴۲۹/۵۴۹۴	۲۴
۴۶۳/۶۱۸۲۲	۴۶۱/۳۵۳۲	۴۵۳/۴۶	۴۹۲/۸۸۶۴	۴۶۴/۳۰۶۳	۲۵
۴۵۱/۰۸۲۱	۴۴۱/۷۱۷	۵۱۷/۳۱	۴۳۳/۳۶۹۵	۴۴۴/۳۱۸۳	۲۶
۱۰/۸۵۳۵	۱۰/۷۱۴۱۸	۱۴/۸۸۱	۱۰/۰۰۲۶	۱۰/۴۰۶۱	۲۷
۱۰/۲۱۰۷	۱۰/۰۲۲۰۲	۱۸/۷۹	۱۰/۰۲۴۶	۱۰/۱۵۰۹	۲۸
۱۰/۱۵۰۵	۹/۹۹۲۶۴۸	۲۶/۶۱۱	۱۰/۰۱۲۵	۱۰/۰۷۱۵	۲۹
۱۰۲/۶۴۵۵	۱۰۱/۳۲۸	۵۹/۵۸۱	۹۶/۹۱۲۵	۹۶/۹۹۲۵	۳۰
۱۸۵/۵۷۷۰	۱۸۴/۸۱۲۵	۱۸۳/۴۸	۱۸۹/۹۶۸۹	۱۸۸/۰۱۱۲	۳۱
۱۸۹/۹۲۵۸	۱۸۵/۷۴۳۴	۱۸۳/۳۹	۱۷۵	۱۸۹/۹۰۴	۳۲
۱۹۳/۶۵۸۲	۱۹۷/۶۳۷۸	۱۸۹/۰۲	۱۸۹/۰۱۸۱	۱۸۹/۸۷۷۱	۳۳
۱۸۶/۷۲۷۴	۱۹۰/۹۷۴۶	۱۹۸/۷۳	۲۰۰	۱۹۹/۹۹۴	۳۴
۱۹۴/۷۹۶۳	۱۹۴/۷۰۷۴	۱۹۸/۷۷	۲۰۰	۱۹۹/۹۹۸	۳۵
۲۰۰/۰۴۸۹	۱۹۹/۹۴۱۵	۱۸۲/۲۳	۱۹۹/۹۹۷۸	۱۹۹/۹۶۱	۳۶
۱۰۵/۷۹۲۴	۱۰۴/۹۴۱	۳۹/۶۷۳	۱۰۹/۹۹۶۹	۱۰۹/۸۲۷	۳۷
۱۱۱/۶۹۱۲	۱۲۳/۹۷۱	۸۱/۵۹۶	۱۰۹/۰۱۲۶	۱۰۹/۷۴۲	۳۸
۱۱۲/۸۶۱۰	۱۴۲/۱۲۸	۴۲/۹۶	۱۰۹/۴۵۶	۱۰۹/۸۱۳	۳۹
۴۷۹/۷۳۵۸	۴۶۰/۵۸۷۷	۵۳۷/۱۷	۴۲۱/۹۹۸۷	۴۸۴/۰۴۵	۴۰
۱/۲۳۷۵۳	۱/۲۴۷۰۳	۱/۲۳۱۷	۱/۲۵۷۸	۱/۲۳۱۱۲	هزینه $\times 10^5$
۱/۹۸۴۳۱	۲/۱۲۴۸۲	۲/۰۸۴۶	۲/۱۰۹۳	۲/۰۴۹۶	آلایندگی $\times 10^5$

Table (6): Optimization results in scenario three

جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی در سناریو سوم

MGWO	GWO	GAEPSO [34]	PSO [34]	EMA [32]	واحد
۱۱۰/۱۷۷۳	۱۱۱/۷۴۳۲	۱۱۰/۳۳۴۶	۱۱۴	۱۱۳/۹۹۷۸	۱
۱۱۶/۷۹۶۵	۱۱۶/۱۵۶۲	۱۰۸/۰۶۵۹	۱۰۶/۲۳۵۶	۱۱۴	۲
۱۱۸/۵۲۲۱	۱۱۷/۰۱۰۹	۱۲۲/۲۲۶۸	۱۱۸/۲۵۶۴	۱۱۹/۹۸۷۸	۳
۱۷۳/۵۹۹۲	۱۷۲/۷۶۹۲	۱۸۳/۵۶۳۸	۱۸۲/۶۶۳۴	۱۶۸/۰۶۹۱	۴
۹۸/۴۳۴۰	۹۶/۴۸۷۲۵	۹۷	۹۷	۹۶/۹۹۹۸	۵
۱۲۹/۲۵۲۲	۱۲۶/۹۱۶۸	۱۲۱/۲۶۶۳	۱۰۲/۱۹۸۷	۱۲۳/۵۱۲۱	۶
۲۸۲/۸۱۴۱	۲۸۹/۲۰۶۳	۲۸۹/۳۳۸۶	۱۳۴/۰۵۳۱	۲۹۸/۶۴۸۸	۷
۲۸۶/۰۳۰۲	۲۹۲/۷۰۵۹	۲۹۱/۰۲۴۸	۲۹۲/۲۲۵۶	۲۹۵/۳۲۲۲	۸
۲۸۱/۷۶۹۲	۲۸۲/۸۳۲۸	۲۶۸/۱۸۳۲	۲۹۰/۱۱۶۵	۲۹۴/۹۱۸۵	۹
۱۲۶/۹۳۲۱	۱۲۴/۱۹۸۴	۱۸۵/۰۳۶۲	۱۳۳/۸۹۴۱	۱۳۰	۱۰
۳۰۵/۰۱۸۰	۳۰۱/۰۲۶۱	۲۲۶/۵۵۴۷	۱۰۱/۲۳۶۸	۲۹۷/۳۴۳	۱۱
۲۹۹/۶۰۹۱	۲۹۷/۴۲۵۴	۳۰۰/۰۳۶۲	۱۵۴/۷۲۸۹	۲۹۶/۵۱۶۷	۱۲
۴۲۲/۳۰۷۲	۴۲۹/۲۰۰۱	۳۶۲/۸۵۶۶	۳۰۸/۲۱۶۶	۴۳۱/۰۴۰۱	۱۳
۴۱۲/۹۷۲۶	۴۰۳/۲۰۳۱	۴۲۲/۰۶۹۵	۳۶۸/۳۳۲۵	۴۲۰/۴۳۵۳	۱۴
۴۴۹/۸۷۹۱	۴۳۹/۸۲۹۶	۴۵۲/۱۸۳۶	۳۷۱/۲۲۱۵	۴۲۱/۰۵۸۴	۱۵
۴۲۴/۸۷۸۱	۴۱۷/۹۶۰۷	۴۱۱/۶۶۴۲	۳۸۱/۲۶۸۱	۴۲۱/۱۵۹۳	۱۶
۴۴۱/۴۹۳۸	۴۴۴/۸۱۰۳	۴۵۶/۰۲۸۱	۴۱۶/۲۶۷۸	۴۳۷/۱۶۷۶	۱۷
۴۳۰/۶۵۴۱	۴۳۵/۷۰۲۲	۴۲۶/۳۳۷۷	۴۸۲/۹۶۵۵	۴۳۷/۱۴۲۵	۱۸
۴۴۳/۸۵۸۵	۴۴۷/۱۶۱۹	۴۶۸/۹۵۳۴	۵۰۶/۲۲۰۱	۴۳۵/۶۲۸۳	۱۹
۴۵۶/۴۹۵۵	۴۵۵/۳۷۸۱	۵۰۱/۵۳۷۸	۵۱۶/۲۴۶۴	۴۳۶/۱۲۹	۲۰
۴۲۸/۸۵۱۵	۴۲۹/۸۶۱۹	۴۲۴/۲۸۳۵	۵۰۲/۷۷۱۹	۴۳۶/۱۴۴۹	۲۱
۴۶۱/۳۹۳۹	۴۵۶/۷۴۲۵	۴۵۶/۷۸۷۲	۴۳۵/۴۷۴۱	۴۳۵/۶۸۱۴	۲۲
۴۲۰/۶۲۶۵	۴۲۵/۸۳۶۵	۳۶۹/۰۳۶۵	۴۸۲/۱۲۶۴	۴۳۶/۰۸۹۶	۲۳
۴۶۱/۹۳۰۶	۴۵۴/۸۵۶۶	۴۳۶/۶۱۰۲	۵۳۸/۰۵۳۶	۴۳۶/۲۶۴	۲۴
۴۲۳/۶۵۵۷	۴۲۷/۶۴۹۵	۳۴۳/۲۲۵۱	۵۴۵/۰۰۸۹	۴۳۶/۳۵۶۴	۲۵
۴۲۷/۱۹۳۵	۴۲۰/۵۳۸۸	۴۰۷/۸۳۶۲	۴۲۶/۲۲۷۸	۴۳۶/۲۶۰۸	۲۶
۲۶/۸۲۳۳	۲۶/۶۴۸۰۷	۱۰۰/۲۸۳۵	۱۲۱/۲۲۳۸	۲۵/۴۳۰۶	۲۷
۲۵/۲۹۸۵	۲۵/۴۵۸۴۴	۱۰۴/۲۲۴۹	۱۲۶/۰۳۴۳	۲۵/۲۲۰۲	۲۸
۲۶/۱۲۴۵	۲۶/۴۹۵۷۷	۱۲۴/۹۳۶۵	۱۰۶/۲۲۶۸	۲۵/۶۱۲۵	۲۹
۱۰۳/۱۰۵۵	۱۰۰/۹۹۰۴	۶۷/۰۸۳۶	۹۶/۰۸۹۲	۹۶/۹۹۸۹	۳۰
۱۷۱/۵۳۴۲	۱۷۵/۲۹۷۸	۱۲۶/۲۳۶۴	۱۷۲/۰۰۸۶	۱۷۱/۲۴۹۱	۳۱
۱۶۴/۱۴۵۰	۱۶۶/۴۳۹۵	۱۷۵/۲۲۲۸	۱۸۱/۶۱۴۷	۱۷۱/۲۲۱۴	۳۲
۱۶۷/۱۳۰۸	۱۶۷/۰۲۰۵	۱۶۸/۰۸۳۴	۱۷۰/۱۲۴۳	۱۷۱/۲۶۱۴	۳۳
۲۰۶/۳۰۴۹	۲۰۵/۶۴۵۴	۱۵۲/۷۵۲۵	۱۹۱/۳۸۴۳	۱۹۹/۹۹۹۷	۳۴
۱۹۲/۴۰۳۵	۱۹۱/۸۹۳	۱۶۰/۳۳۱۵	۱۸۹/۵۳۷۱	۱۹۹/۹۹۷۴	۳۵
۲۰۰/۶۹۵۷	۱۹۸/۷۷۱۱	۱۷۶/۶۲۵۷	۱۷۲/۰۰۳۴	۲۰۰	۳۶
۱۰۲/۵۰۲۲	۱۰۲/۵۴۵۹	۹۳/۰۶۳۸	۹۷/۶۲۰۶	۱۰۰/۱۴۸۳	۳۷
۱۰۴/۱۶۱۷	۱۰۴/۲۱۷۹	۸۶/۱۷۴۳	۹۴/۴۸۳۳	۱۰۰/۰۳۴۹	۳۸
۹۴/۷۸۸۶	۹۶/۳۱۸۳۴	۱۰۴/۲۲۶۳	۸۶/۰۸۵۳	۹۹/۸۴۷۴	۳۹
۴۱۲/۳۱۶۴	۴۱۸/۴۸۵۶	۴۸۹/۰۲۶۴	۴۶۲/۲۲۶۴	۴۳۴/۶۳۸۵	۴۰
۳۹/۶۲۱۶	۳۹/۹۰۹۶۴	۵۳/۶۲۷۵	۴۶/۰۴۶۸	۴۰/۴۸۷۱۴	بادی ۱
۳۲/۸۲۷۹	۳۲/۶۲۹۹۵	۷۶/۰۷۴۲	۸۰/۰۴۶۸	۳۱/۹۷۷۱	بادی ۲
۱۴۳۲۴۵	۱۴۷۱۲۸	۱۴۶۰۳۵	۱۴۲۰۶۸	۱۴۴۳۵۶	هزینه سوخت
۱/۷۱۳۹۱	۱/۷۹۶۷۱	۱/۷۲۲۶۸	۱/۷۸۴۳۲	۱/۷۲۵۹۵	آلاینده‌گی ^{۱۰^۵}
۴/۶۲۴۶۸	۴/۷۵۵۶۹	۴/۶۷۴۰۲	۴/۷۴۹۳۴	۴/۶۶۳۳۲	هزینه ^{۱۰^۵}



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 GAPEPSO به‌دست آمده است. هزینه کلی در صورت انجام بهینه‌سازی توسط الگوریتم EMA برابر با ۴۶۶۳۳۲ دلار، الگوریتم PSO برابر با ۴۷۴۹۳۴ دلار، الگوریتم GAPEPSO 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، پخش بار اقتصادی با صرف نظر از آلاینده‌گی و عدم حضور مزرعه بادی، انجام گرفت. سناریو دوم نیز بدون حضور مزرعه بادی، پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن آلاینده‌گی صورت پذیرفت.

در سناریو سوم، پخش بار اقتصادی در حضور مزرعه بادی در سیستم قدرت با لحاظ نمودن آلاینده‌گی 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 آلاینده‌گی 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 عدم قطعیت‌های بار و منابع تجدیدپذیر انجام داد.

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 Dehbalae, 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 advanced 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 (doi: 10.1001.1.22519246.-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 algorithm 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).

زیر نویس ها

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