Research Paper

Optimization of Energy Generation from Hydropower Dams using New Intelligent Methods

Saeid Akbarifard[1, *], Mohamad Zounemat-Kermani[2], Mohamad Reza Madadi[3]

[1] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
[2] Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[2] Research and Technology Institute of Plant Production, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
[3] Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

10.22125/IWE.2024.406481.1734

Received:
January 13, 2024
Accepted:
April 17, 2024
Available online:
June 29, 2024

Keywords:
Evolutionary algorithms; Optimal Operation; Jiroft hydropower dam; Energy generation.

Abstract

Given the fact that hydropower energy is the third largest source of electricity generation and also the most important renewable energy producer in the world, the optimal use of the huge and expensive source of water is essential. In this research, the new optimization algorithms of manta ray foraging optimization based on the dynamic fitness distance balance (dFDB-MRFO), artificial rabbits optimization (ARO), equilibrium optimizer (EO), homonuclear molecules optimization (HMO), mud ring algorithm (MRA), and wild horse optimizer (WHO), compared to the well-known genetic algorithm (GA), have been used for optimization of the hydropower energy generation of the Jiroft Dam located in the Halilrood basin (south of Iran) for the long-term period of 19 years. For this purpose, a model was developed for the optimal hydropower energy operation of Jiroft Dam. The objective function in the mentioned model was defined as minimizing the ratio of produced energy to the installed power plant capacity. The results showed that the operation scenarios resulting from the dFDB-MRFO, ARO, EO, HMO, MRA, WHO and GA algorithms were capable to generate hydropower energy of 1482.43, 1476.49, 1468.30, 1474.64, 1430.44, 1480.91 and 1403.65 GWh during the statistical period, respectively. Also, the best objective function values for the dFDB-MRFO, ARO, EO, HMO, MRA, WHO and GA algorithms were obtained as 8.10, 8.92, 10.04, 9.18, 15.66, 8.31 and 19.26, respectively. The obtained results indicate the high performance of the new dFDB-MRFO and WHO algorithms in comparison with the other studied algorithms in the optimal operation of hydropower dams. The operation scenarios resulting from the new dFDB-MRFO and WHO algorithms were able to produce energy at the rate of 96.41 and 96.31% of the total capacity of the Jiroft Dam power plant during the study period.

1. Introduction

The optimal operation of dam reservoirs is one of the most complex engineering problems. Regarding its high complexity, the efficiency of classical optimization methods is failed to solve such complex problem.

[*] **Corresponding Author:** Saeid Akbarifard
Address: Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.
Email : s.akbarifard@kgut.ac.ir
Tel: 03431623357

In the last few decades, extensive efforts have been made to present more suitable optimization methods such as evolutionary algorithms. These algorithms, which are inspired by nature, have been developed in numerous theoretical and applied studies and have been used in many scientific branches in recent years.

2. Materials and Methods

In this research, five new optimization algorithms of Manta ray foraging optimization with Dynamic fitness distance balance (dFDB-MRFO), artificial rabbits' optimization (ARO), equilibrium optimizer (EO), homonuclear molecules optimization (HMO), mud ring algorithm (MRA), and wild horse optimizer (WHO) have been used for optimal operation of the Jiroft hydropower dam located in the Halilrood basin (south of Iran) for the long-term period of 19 years. Such evolutionary algorithms were used to optimize the energy generation of Jiroft Dam This is the first use of such new algorithms in the field of optimal opertaion of hydropower dams.

3. Results

The results showed that the operation scenarios resulting from the dFDB-MRFO, ARO, EO, HMO, MRA, WHO and GA algorithms were capable to generate hydropower energy of 1482.43, 1476.49, 1468.30, 1474.64, 1430.44, 1480.91 and 1403.65 GWh during the statistical period, respectively. Also, the best objective function values for the dFDB-MRFO, ARO, EO, HMO, MRA, WHO and GA algorithms were obtained as 8.10, 8.92, 10.04, 9.18, 15.66, 8.31 and 19.26, respectively.

4. Discussion and Conclusion

From the results, it was found that the new dFDB-MRFO and WHO algorithms in comparison with the other studied algorithms have the highest performance in the optimal operation of hydropower energy generation. In such a way that the operation scenarios resulting from the new dFDB-MRFO and WHO algorithms were able to produce energy at the rate of 96.41 and 96.31% of the total capacity of the Jiroft Dam power plant during the statistical period under investigation

5. Six important references

1) Azizipour, M., Ghalenoei, V., Afshar, M. H., & Solis, S. S. (2016). Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm. Water resources management, 30(11), 3995-4009.
2) Desuky, A. S., Cifci, M. A., Kausar, S., Hussain, S., & El Bakrawy, L. M. (2022). Mud Ring Algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving mathematical and engineering challenges. IEEE Access, 10, 50448-50466.
3) Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. (2020). Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. Knowledge-Based Systems, 191, 105190.
4) Kahraman, H. T., Bakir, H., Duman, S., Katı, M., Aras, S., & Guvenc, U. (2022). Dynamic FDB selection method and its application: modeling and optimizing of directional overcurrent relays coordination. Applied Intelligence, 1-36.
5) Mahdavi-Meymand, A., & Zounemat-Kermani, M. (2022). Homonuclear Molecules Optimization (HMO) meta-heuristic algorithm. Knowledge-Based Systems, 258, 110032.
6) Sharifi, M. R., Akbarifard, S., Madadi, M. R., Qaderi, K., & Akbarifard, H. (2022). Optimization of hydropower energy generation by 14 robust evolutionary algorithms. Scientific Reports, 12(1), 7739.

Conflict of Interest
Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments
We are grateful to the financial support provided by the Iran National Science Foundation (INSF) and the Research and Technology Institute of Plant Production of Shahid Bahonar University of Kerman for carrying out the project with number 4005881.

بهینه‌سازی تولید انرژی از سدهای برق‌آبی با استفاده از روش‌های هوشمند جدید

سعید اکبری فرد[۱*]، محمد ذونعمت کرمانی[۲]، محمدرضا مددی[۳]

تاریخ ارسال:۱۴۰۲/۱۰/۲۳
تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۰۱/۲۹

مقاله پژوهشی

چکیده

با توجه به این که انرژی برق‌آبی به عنوان سومین منبع تولید برق و انرژی تجدیدپذیر در جهان به شمار می‌آید، ضرورت استفاده بهینه از منبع عظیم و ارزشمند آب که هر روزه شاهد کاهش چشمگیر آن می‌باشیم، بیش از پیش احساس می‌گردد. در این پژوهش از الگوریتم‌های جدید بهینه‌سازی جستجوی غذای سفره ماهی دیو مبتنی بر برازش-فاصله-توازن پویا (dFDB-MRFO)، بهینه‌سازی خرگوش‌های مصنوعی (ARO)، بهینه‌سازی تعادل (EO)، بهینه‌سازی مولکول‌های جورهسته (HMO)، حلقه گل (MRA) و بهینه‌سازی اسب‌های وحشی (WHO) در مقایسه با الگوریتم مشهور ژنتیک (GA)، به منظور بهینه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی سد مخزنی جیرفت واقع در حوضه آبریز هلیل رود (جنوب شرق ایران)، برای یک دوره بلند مدت (۱۹ ساله) استفاده شده است. به این منظور مدلی برای بهینه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی از سد جیرفت توسعه داده شد. تابع هدف در مدل مذکور به صورت کمینه‌سازی نسبت انرژی تولیدی به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف گردید. نتایج نشان داد که سناریوهای بهره‌برداری حاصل از الگوریتم‌های dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب قادر به تولید انرژی به میزان ۱۴۸۲/۴۳، ۱۴۷۶/۴۹، ۱۴۶۸/۳۰، ۱۴۷۴/۶۴، ۱۴۳۰/۴۴، ۱۴۸۰/۹۱ و ۱۴۰۳/۶۵ گیگاوات ساعت در طول دوره آماری ۱۹ ساله بودند. همچنین بهترین مقدار تابع هدف برای الگوریتم‌های dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب برابر با ۸/۱۰، ۸/۹۲، ۱۰/۰۴، ۹/۱۸، ۱۵/۶۶، ۸/۳۱ و ۱۹/۲۶ به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم‌های جدید dFDB-MRFO و WHO در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه انرژی برق‌آبی می‌باشد. به نحوی که سناریوهای بهره‌برداری حاصل از الگوریتم‌های جدید dFDB-MRFO و WHO به ترتیب قادر به تولید انرژی به میزان ۹۶/۴۱ و ۹۶/۳۱ درصد از کل ظرفیت نیروگاه سد جیرفت در طول دوره آماری مورد بررسی بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های تکاملی؛ بهره‌برداری بهینه، سد برق‌آبی جیرفت؛ تولید برق.

[۱] استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. ایمیل: s.akbarifard@kgut.ac.ir (*نویسنده مسئول)

[۲] استاد بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ایمیل: zounemat@uk.ac.ir

[۲] پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

[۳] دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. ایمیل: madadi@ujiroft.ac.ir

مقدمه

سد جیرفت یکی از بزرگ‌ترین سدهای مخزنی برق‌آبی جنوب شرق کشور است که در حوزه آبریز هامون-جازموریان قرار دارد. اهداف اولیه ساخت این سد شامل ذخیره ۴۱۲ میلیون متر مکعب آب سالیانه برای آبیاری اراضی پایین‌دست، کنترل، پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از سیل و خشکسالی،تولید انرژی برق‌آبی به میزان ۸۰ گیگاوات ساعت در سال و کمک به شبکه تولید برق در زمان اوج مصرف می‌باشد.. بدیهی است که برای مدیریت بهینه این سد، پیاده‌سازی یک سیاست بهره‌برداری ضروری و حائز اهمیت است. یک سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره-برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می‌نماید (Wurbs, 1993). تعیین یک برنامه بهره-برداری مناسب از سامانه‌های منابع آب، به گونه‌ای که در تمام شرایط مورد نظر بتوان عملکرد مطلوبی از آن‌ها به دست آورد، بهینه‌سازی نامیده می‌شود. به منظور بهینه-سازی و تعیین برنامه بهره‌برداری از مخازن سدها، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الزامی است.

در دنیای واقعی، مدیریت بهینه مخازن سدها می-تواند بسیار پیچیده باشد. افزایش پیچیدگی در مسائل مهندسی و نگاه سیستمی به مدیریت به خصوص در مهندسی منابع آب باعث کاهش کارایی روش‌های بهینه‌یابی کلاسیک شده است. در راستای رفع این مشکل، در چند دهه اخیر تلاش-های گسترده‌ای به منظور تهیه و ارائه الگوریتم‌های بهینه-یابی مناسب‌تر صورت پذیرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی اشاره کرد. این الگوریتم‌ها که الهام گرفته از طبیعت هستند، در مطالعات نظری و کاربردی متعددی توسعه داده شده‌اند و در سال‌های اخیر در بسیاری از شاخه‌های علمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله الگوریتم‌های تکاملی نسبتاً قوی که اخیراً توسعه یافته و هنوز عملکرد آنها در علوم مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است، می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی غذای سفره ماهی دیو مبتنی بر برازش- فاصله- توازن پویا-dFDB-MRFO- (۲۰۲۲)، بهینه‌سازی خرگوش‌های مصنوعی-ARO- (۲۰۲۲)، بهینه‌ساز تعادل-EO- (۲۰۲۰)، بهینه‌سازی مولکول‌های جورهسته-HMO- (۲۰۲۲)، حلقه گل-MRA- (۲۰۲۲) و بهینه‌سازی اسب-های وحشی-WHO- (۲۰۲۲) اشاره نمود.

در سال‌های اخیر، محققین مختلفی به بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی پرداخته‌اند، لیکن در زمینه بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از مخازن با توجه به پیچیدگی مسئله، مطالعات نسبتاً کمتری انجام گرفته است. افشار و همکاران (۱۳۹۳) به منظور بهره‌برداری برقابی از مخزن سد دز از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، الگوریتمی مناسب در حل مسائل بهره‌برداری از مخازن سدها می‌باشد. احمدیان‌فر و ادیب (۱۳۹۴) به بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برقابی از سد دز با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که الگوریتم ترکیبی باعث افزایش انعطاف‌پذیری و بهبود توانایی الگوریتم منفرد شده و کارایی بسیاری در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب دارد. احترام و همکاران (۱۳۹۵) ترکیبی از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و ازدحام ذرات را به منظور افزایش تولید انرژی برق‌آبی از مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ ارائه نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش ترکیبی پاسخ نزدیک‌تری به پاسخ بهینه مطلق دارد. حسینی موغاری و همکاران (۱۳۹۶) کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) را در بهره‌برداری بهینه از آبگیرهای برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس پژوهش ایشان، الگوریتم فاخته نسبت به الگوریتم ژنتیک توانایی بالاتری را در رسیدن به جواب بهینه از خود نشان داد. اکبری فرد و همکاران (۱۴۰۰) به منظور بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از نیروگاه سد کارون ۴ از الگوریتم‌های ازدحام پروانه (MSA)، ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) استفاده نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از برتری الگوریتم MSA نسبت به دو الگوریتم دیگر در افزایش تولید انرژی برق‌آبی بود.

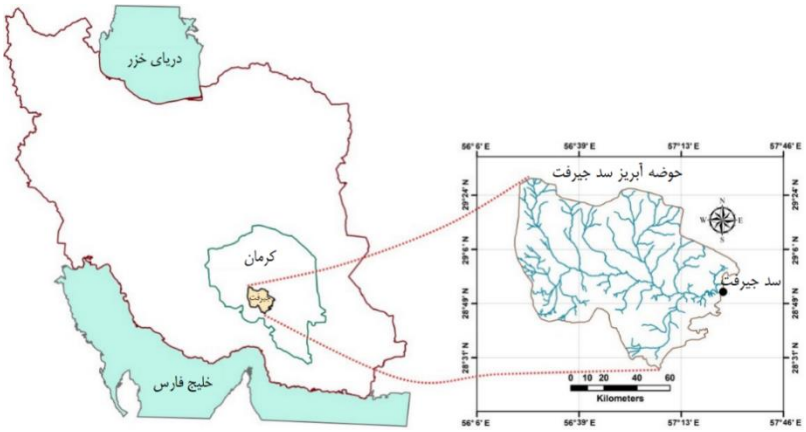
ژانگ و همکاران از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی در یک سامانه چند مخزنه در چین استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات بود (Zhang et al., 2011). عزیزی‌پور و همکاران کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) را برای بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی سد دز برای دوره‌های کوتاه، متوسط و بلند مدت مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات حاکی از کارآمدی و موثرتر بودن الگوریتم IWO در مسئله بهره‌برداری برق‌آبی بوده است (Azizipour et al. 2016). وو و همکاران با استفاده از برنامه‌ریزی پویای تصادفی دو مرحله‌ای (SDP) به بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سامانه مخازن در رودخانه لانکانگ چین پرداختند. نتایج نشان داد که محدودیت‌های سامانه به خوبی در نظر گرفته شده و زمان محاسبات کاهش ۵۰ درصدی به همراه برتری توان تولیدی نسبت به برنامه‌ریزی پویای تصادفی معمولی داشته است (Wu et al. 2018). نیر و ساسیکومار یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر اطمینان‌پذیری فازی را برای یک مخزن برق‌آبی توسعه دادند. نتایج نشان داد که این مدل در ایجاد سیاست بهره‌برداری بهینه مفید بوده و با افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برق آبی همراه می‌باشد (Nair and Sasikumar, 2019). شریفی و همکاران به بررسی قابلیت ۱۴ الگوریتم تکاملی قوی در بهینه‌سازی تولید انرژی از نیروگاه برق‌آبی مخزن کارون-۴ پرداختند. نتایج نشان داد که سیاست‌های بهره‌برداری حاصل از الگوریتم‌های MSA، SGA، WCA، SOS و COA، تولید انرژی را بیش از ۶۵ درصد افزایش داده و برخی از الگوریتم‌های مورد استفاده، از جمله GOA، DA، ALO و WOA نتوانستند نتایج قابل قبولی ارائه نمایند. نتایج کلی بیانگر قابلیت امیدوارکننده برخی از الگوریتم‌ها برای بهره‌برداری بهینه از مخازن برق‌آبی بود (Sharifi et al., 2022). رشید و همکاران (۲۰۲۲) منحنی‌های فرمان بهینه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و مدل RESOOSE را برای به حداکثر رساندن انرژی برق‌آبی، آبیاری و تخلیه رسوب از سامانه مخازن زنجیره‌ای چند منظوره در پاکستان ارائه نمودند. نتایج نشان داد که انرژی برق‌آبی همراه با حداکثر کردن مزایای مرتبط بهینه شده است. منحنی‌های فرمان بهینه مخازن زنجیره‌ای توسعه یافته، مزایای کلی را برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار با قحطی صفر، انرژی پاک مقرون‌به‌صرفه، رشد اقتصادی و در دسترس بودن آب افزایش داد (Rashid et al., 2022).

بنا به اهمیت سد مخزنی جیرفت و همچنین به دلیل آن که مطالعات جامعی در رابطه با بهره‌برداری بهینه برق‌آبی و استفاده حداکثری از توان تولیدی نیروگاه آن توسط روش‌های هوشمند جدید صورت نگرفته است، لذا ضرورت مطالعه‌ای که به این مهم بپردازد آشکار می‌گردد. بنابراین در مطالعه حاضر از شش الگوریتم هوشمند جدید dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA و WHO که جزء الگوریتم‌های نسبتا قوی و جدید در راستای بهینه‌یابی می‌باشد، در مقایسه با الگوریتم معروف GA، برای بهینه‌سازی انرژی برقابی سد جیرفت استفاده گردیده تا هم بتوان توانایی الگوریتم‌های جدیدی که تا بحال در زمینه منابع آب مورد استفاده قرار نگرفته‌اند را با یکدیگر مقایسه کرد و هم بتوان بهترین نتیجه را برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سد مذکور به دست آورد.

مواد و روش

حوضه آبریز هلیل‌رود از زیرحوضه های اصلی هامون-جازموریان است که نقش عمده‌ای در تولید جریان سالانه آن دارد و در قسمت غربی هامون-جازموریان، بین طول جغرافیایی ´۵۱-°۵۶ تا ´۳۰-°۶۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ´۱۸-°۲۶ تا ´۳۰-°۲۹ درجه شمالی واقع گردیده است. این حوضه قسمت‌هایی از جنوب و شرق استان کرمان، شامل شهرستان‌های بافت، جیرفت، کهنوج و قسمت‌هایی از غرب استان سیستان و بلوچستان شامل ایرانشهر را در بر می‌گیرد. با وجود احداث سدهای متعدد بر روی رودخانه‌های اصلی تأمین کننده آب تالاب و سرشاخه‌های آنها، روند رو به افزایش مطالعه و احداث سدهای جدید در این حوضه همچنان ادامه دارد. با احداث روزافزون سدها و برنامه‌ریزی جهت استحصال آب رودخانه‌ها در این حوضه، بدیهی است که آب ورودی به

تالاب جازموریان از طریق منابع آب سطحی تأمین کننده آب تالاب تا حد بسیار زیادی کاهش یابد که در این میان، نقش سد جیرفت واقع بر رودخانه هلیل‌رود در قسمت غربی جازموریان از دیگر سدها مشهودتر است. شکل (۱) موقعیت سد جیرفت در حوضه آبریز هلیل‌رود را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت سد جیرفت در حوضه آبریز هلیل‌رود (ذونعمت و همکاران، ۲۰۲۰)

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی غذای سفره‌ماهی دیو مبتنی بر برازش-فاصله- توازن پویا (dFDB-MRFO)

الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی غذای سفره‌ماهی دیو برای اولین بار توسط ژائو و همکاران (Zhao et al., 2020) با الهام از رفتار این موجود در طبیعت (الهام گرفته از فرآیند زیستی) پیشنهاد گردید. سفره‌ماهی دیو یکی از بزرگترین موجودات دریایی است که عرض آن حدود ۷ متر و طول عمر آنها حدود ۲۰ سال است و از پلانکتون (جانداران میکروسکوپی) تغذیه می‌کنند. این سفره ماهی‌ها مهارت‌های بقای خود را مدیون سه استراتژی تغذیه‌ای (الگوی حرکتی) قدرتمندی هستند که عبارتند از: جستجوی زنجیره‌ای، جستجوی سیکلون و جستجوی معلق. در حرکت زنجیره‌ای یک سفره ماهی به عنوان کاشف منابع غذایی بالاتر از همه و در اعماق کم حرکت می‌کند و بقیه‌ی سفره ماهی‌ها جلوی آن و در اعماق کمتر حرکت می‌کنند. در حالت دوم که حرکت معلق است، منبع غذایی مابین حرکت معلق و مورب سفره ماهی‌ها محبوس می‌شود. در حرکت سیکلون نیز سفره‌ماهی‌ها با حرکت چرخشی ساعت‌گرد به سمت متراکم‌ترین مکان پلانکتون‌ها حرکت می‌کنند و جستجوی غذا در متراکم‌ترین محل انجام می‌گیرد.

با توجه به اینکه روش‌های انتخاب در الگوریتم‌ها نقش مهمی در تعیین موقعیت‌های مرجع دارند که فرآیند جستجوی الگوریتم‌های فراابتکاری را در ایجاد تعادل بین قابلیت‌های اکتشاف و استخراج هدایت می‌کنند و در تعیین عملکرد الگوریتم‌ها نیز موثر می باشند، کهرمان و همکاران (Kahraman et al., 2022) نشان دادند که استفاده از روش جستجوی جدید *dFDB* در الگوریتم *MRFO*، به افزایش عملکرد این الگوریتم در مسئله بهینه‌سازی هماهنگی رله‌های اضافه جریان جهت‌دار (*DOCRs*) کمک شایانی می‌نماید. بدین ترتیب، آن‌ها برای اولین بار روش جستجوی جدیدی مبتنی بر برازش- فاصله- توازن پویا (*dFDB*) را توسعه و با الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی غذای سفره‌ماهی دیو (*MRFO*) ترکیب نمودند.

الگوریتم بهینه‌سازی خرگوش‌های مصنوعی (ARO)

الگوریتم بهینه‌سازی خرگوش‌های مصنوعی (*ARO*) یک الگوریتم فراابتکاری جدید زیست الهام است که توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) با الهام از استراتژی‌های بقای خرگوش‌ها در طبیعت، از جمله جستجوی انحرافی و پنهان‌سازی تصادفی پیشنهاد شده است. استراتژی جستجوی انحرافی، خرگوش را مجبور می‌کند که علف‌های نزدیک لانه خرگوش‌های دیگر را بخورد، که می‌تواند از کشف لانه خود توسط شکارچیان

جلوگیری کند. استراتژی پنهان‌سازی تصادفی، خرگوش را قادر می‌سازد تا به طور تصادفی یک لانه را از بین لانه‌های خود برای مخفی شدن انتخاب کند، که می‌تواند احتمال اسیر شدن توسط دشمنان خود را کاهش دهد. علاوه بر این، کاهش انرژی خرگوش‌ها منجر به انتقال از استراتژی جستجوی انحرافی به استراتژی پنهان‌سازی تصادفی شود.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) الگوریتم پیشنهادی ARO را بر روی ۳۱ تابع محک استاندارد و ۵ مسئله مهندسی مورد بررسی قرار داده و با ۷ الگوریتم فراابتکاری شناخته شده دیگر مقایسه نمودند که نتایج تجربی حاصل، ادعای آن‌ها در خصوص برتری کلی الگوریتم پیشنهادی نسبت به سایر رقبای مورد آزمایش در حل توابع محک معیار و مسائل مهندسی را به اثبات رساند.

الگوریتم بهینه‌ساز تعادل (EO)

فرامرزی و همکاران (Faramarzi et al., 2020) یک الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر فیزیک جدید تحت عنوان بهینه‌ساز تعادل (EO) را که از یک معادله تعادل جرم عمومی برای حجم کنترل الهام گرفته شده است، ارائه نمودند. طراحی الگوریتم EO شامل مکانیزم‌های جستجوی مختلف برای تغییر تصادفی راه حل‌ها به منظور افزایش قابلیت‌های اکتشاف و استخراج می‌باشد. در این الگوریتم هر ذره (محلول) با غلظت (موقعیت) خود به عنوان عوامل جستجو عمل می‌کند. همچنین به طور تصادفی، غلظت‌ها با توجه به راه حل‌های مناسب تحت عنوان گزینه‌های تعادل به‌روزرسانی می‌شوند. این به‌روزرسانی تصادفی همراه با اصطلاح "نرخ تولید" به نحوی تعریف شده است که قابلیت اکتشاف *EO* را در تکرارهای اولیه و قابلیت استخراج در تکرارهای نهایی بهبود بخشد و در کل فرآیند بهینه‌سازی به اجتناب از به دام افتادن در بهینه‌های محلی کمک کند. همچنین، قابلیت‌های اکتشاف و استخراج متعادل کننده، مقادیر تطبیقی لازم برای پارامتر کنترل کننده را ارائه نموده و میزان حرکت ذرات را نیز کاهش می‌دهند. آن‌ها کارایی و اثربخشی EO را با استفاده از معیارهای کمی و کیفی با آزمایش آن بر روی مجموع ۵۸ تابع معیار ریاضی به همراه ۳ مسئله مهندسی اثبات نمودند. همچنین، بر طبق مقایسه‌های صورت گرفته با چندین الگوریتم بهینه‌سازی با کارایی بالا، مشخص شد که الگوریتم EO پیشنهادی در دستیابی به راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه با بازده معمولاً بالاتر (یعنی زمان محاسباتی کمتر یا تعداد تکرارهای کمتر) در بسیاری از مسائل از اثربخشی بالایی برخوردار است.

الگوریتم بهینه‌سازی مولکول‌های جورهسته (HMO)

الگوریتم بهینه‌سازی مولکول‌های جورهسته (HMO) برای نخستین بار توسط مهدوی میمند و ذونعمت کرمان (Mahdavi-Meymand and Zounemat-Kermani, 2022) با الهام از آرایش الکترون‌ها در اطراف اتم‌ها با توجه به مدل اتمی بور و ساختار مولکول‌های جورهسته برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده و غیرخطی معرفی شد. این الگوریتم مبتنی بر ایجاد جمعیت اولیه مجموعه‌ای از اتم‌ها در فضای جستجو و الکترون‌های مرتبط با هر اتم (عوامل جستجوگر) با توجه به اعداد کوانتومی است. در هر تکرار، بهترین الکترون هر اتم به عنوان مکان جدید هسته انتخاب می‌شود و تعدادی از اتم‌ها به سمت اتم با بهترین راه حل حرکت می‌کنند تا یک مولکول جورهسته‌ای تشکیل دهند. در نهایت پس از سپری شدن تعداد تکرار مورد نظر و رسیدن به معیار خاتمه، الگوریتم همگرا شده و به بهینه سراسری نزدیک می‌شود. آن‌ها الگوریتم پیشنهادی HMO را در مقایسه با ۴ الگوریتم کلاسیک و جدید دیگر مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند که الگوریتم HMO قادر به حل دقیق توابع تک وجهی و یافتن راه حل‌های بهینه سراسری و محلی برای توابع چندوجهی بوده و به طور کلی از الگوریتم‌های کلاسیک بهتر عمل می‌کند و توانایی رقابت با الگوریتم‌های جدید و کارآمد را دارد.

الگوریتم حلقه گلی (MRA)

الگوریتم حلقه گلی (MRA)، رفتار دلفین‌های پوزه بطری سواحل اقیانوس اطلس در تغذیه حلقه گلی آن‌ها را تقلید می‌کند. دلفین‌ها سه نوع صدا تولید می‌کنند: صداهای پژواکی، سوت، و صداهای انفجاری. پژواک دلفین تولید صداهایی با فرکانس‌های بالا (۴۰-۱۳۰ کیلوهرتز)

است. این خصوصیت در جستجوی غذا، ناوبری، و تشخیص شکارچی از طریق امواج فراصوت که از اجسام در آب پرش می‌کنند و به دلفین باز می‌گردند، استفاده می‌شود که می‌تواند آن را توسط اندام ملون (بخشی در جلوی سر که از چربی ساخته شده است) خود که مانند سونار (ناوبری یا فاصله‌یابی صوتی) عمل می‌کند و پیام را رمزگشایی می‌کند، تشخیص دهد. دلفین‌ها همچنین می‌توانند شکل بزرگی از سوت‌ها مانند سوت‌های یکتایی که مانند امضای شخصی برای آنهاست تولید کنند که به صورت جداگانه برای برقراری ارتباط مکان، هویت و احتمالاً حالت احساسی مشخص می‌شوند. اما از طریق تعاملات اجتماعی، صداهای انفجاری-پالس تولید می‌شود. بسیاری از استراتژی‌های شکار توسط دلفین‌ها استفاده می‌شود. این استراتژی‌ها با توجه به طعمه و شرایط محیطی (زیستگاه) متفاوت است. تغذیه حلقه گلی (ماهیگیری با گل و لای) یک استراتژی منحصر به فرد در جستجوی غذا است که برای اولین بار در طی مطالعه رفتار دلفین‌های پوزه بطری در آب‌های کم عمق سواحل اقیانوس اطلس فلوریدا در سال ۱۹۹۹ مشاهده شد. در این روش جستجوی غذا، پس از تشکیل دسته دلفین‌ها، یک دلفین از این دسته در اطراف طعمه (گروه ماهی) شنا می‌کند تا دایره‌ای در امتداد کف ساحل اقیانوس تشکیل دهد و دم خود را در نزدیکی شن و ماسه بالا و پایین می‌برد تا حلقه یا ستونی از گل و لای ایجاد کند که باعث می‌شود ماهی‌ها منحرف شوند و آنها را مجبور به پریدن از آب به سمت دهان دلفین‌هایی می‌کند که در امتداد لبه بیرونی حلقه گل منتظر هستند. الگوریتم حلقه گلی (MRA) نخستین بار توسط دسوکی و همکاران (Desuky et al., 2022) ارائه و این رفتار جستجوی دلفین‌های پوزه بطری را شبیه‌سازی می‌کند که از فرآیند جستجوی طعمه توسط دسته دلفین‌ها با استفاده از پژواک شروع می‌شود و با تشکیل حلقه گلی برای تغذیه پایان می‌یابد. آن‌ها اثربخشی الگوریتم MRA را از طریق مقایسه جامع با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری در ۲۹ تابع معیار استاندارد و ۴ مسئله معیار مهندسی رایج به اثبات رساندند. مقایسه‌ها و نتایج آماری نشان داد که الگوریتم MRA در برخورد با این مسائل بهینه‌سازی برتری دارد و می‌تواند بهترین راه‌حل‌ها را نسبت به سایر بهینه‌سازهای فراابتکاری به دست آورد.

الگوریتم بهینه‌ساز اسب‌های وحشی (WHO)

نارویی و کی نیا (Naruei and Keynia, 2022) با الهام از رفتار اجتماعی زندگی اسب‌های وحشی، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید تحت عنوان بهینه‌ساز اسب وحشی (WHO) را ارائه نمودند. سازمان اجتماعی اسب‌ها به دو گروه محلی و غیرمحلی (وحشی) تقسیم می‌شود. تفاوت زیادی بین این دو نوع سازمان در گروه‌بندی اجتماعی، همسریابی و چرا کردن، جفت‌گیری، سلسله مراتب رهبری و تسلط و نفوذ وجود دارد. اسب‌های وحشی گله‌هایی هستند که از گروه‌های خانوادگی پایدار که شامل یک اسب نر و یک یا چند مادیان و فرزندان است، تشکیل شده‌اند. همچنین، گروه‌های منفردی شامل نریان بالغ و اسب‌های نوجوان وجود دارد. اسب نر برای برقراری ارتباط نزدیک به مادیان‌ها قرار می‌گیرد و جفت‌گیری ممکن است در هر زمانی رخ دهد. کره اسب‌ها معمولاً از هفته اول زندگی شروع به چرا می‌کنند و با افزایش سن، میزان چرای بیشتر و استراحت کمتری دارند. رفتار جذابی که اسب‌ها را از سایر حیوانات متمایز می‌کند، نجابت است. رفتار نجابت اسب به گونه‌ای است که کره اسب‌ها قبل از رسیدن به سن بلوغ گروه را ترک می‌کنند و به گروه‌های دیگر می‌پیوندند. اسب‌های نر به گروه‌های مجرد می‌پیوندند تا برای جفت‌گیری به اندازه کافی بالغ شوند و همچنین کره اسب‌های ماده برای عضویت در خانواده جدید به سایر گروه‌ها می‌پیوندند. این خروج کره اسب‌ها قبل از رسیدن به سن بلوغ برای جلوگیری از جفت‌گیری پدر با دختر یا خواهر و برادر است. سلسله مراتب معمولاً خطی است و افراد درون گروه تمایل به تعامل با افراد هم درجه و هم سن دارند. پدیده دیگری که در رفتار اجتماعی اسب‌های وحشی وجود دارد رهبری است. رهبر حیوانی است که سرعت و جهت حرکت اسب‌ها در گروه را تعیین می‌کند. در اسب‌های وحشی آزاد، رهبر یک گروه معمولاً غالب‌ترین مادیان است و بقیه گروه به ترتیب سلسله مراتب دنباله‌رو رهبرند و اسب نر معمولاً در فاصله کوتاهی از گروه قرار دارد. به منظور طراحی الگوریتم بهینه‌ساز WHO از رفتارهای گروهی، چرا

کردن، جفت‌گیری، سلسله مراتب یا تسلط و رهبری اسب‌های وحشی الهام گرفته شده است. نارویی و کی‌نیا (۲۰۲۲) الگوریتم پیشنهادی WHO را بر روی چندین مجموعه از توابع محک آزمایش و با روش‌های بهینه‌سازی رایج و جدید مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم WHO قابل رقابت با سایر الگوریتم‌های رایج و جدید است.

مدل ریاضی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی

هر نیروگاه برق آبی از تعدادی واحد مستقل تولید انرژی تشکیل شده است که هر واحد، ظرفیت تولید یا ظرفیت نصب (PPC) مشخصی دارد. همچنین، هر نیروگاه برق‌آبی دارای بازده معینی برای تولید برق است که بیانگر نحوه عملکرد و کارآیی نیروگاه می‌باشد. تولید برق در هر نیروگاه بر اساس ضریب کارکرد آن در طول دوره زمانی مشخص صورت می‌گیرد. این ضریب نشان می‌دهد که در چند درصد از مواقع در بازه‌های زمانی مختلف از طول دوره بهره‌برداری، واحدهای نیروگاهی با بیشترین توان خود (ظرفیت نصب) به تولید برق می‌پردازند.

در سامانه سد جیرفت، ضریب کارکرد به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که هر نیروگاه در ماه‌های مختلف بهره‌برداری، دست کم شش الی هفت ساعت در هر شبانه روز توانی معادل با ظرفیت نصب خود را تولید کند. تراز پایاب نیروگاه معادل ۱۰۳۰ متر از سطح دریا منظور شده است و نیروگاه آن از ۲ واحد ۱۶/۲ مگاواتی تشکیل شده است. ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۳۲/۴ مگاوات و بازده آن معادل ۸۴ درصد منظورگردیده است. اطلاعات تکمیلی مربوط به نیروگاه بر اساس جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): مشخصات نیروگاه سد جیرفت

پارامتر	واحد	مقدار
تعداد واحد نیروگاه	--	۲
قدرت هر واحد	مگاوات (MW)	۱۶/۲
مجموع ظرفیت دو واحد نیروگاهی	مگاوات (MW)	۳۲/۴
متوسط تولید انرژی سالیانه	گیگاوات ساعت (GWH)	۸۰
بازده تولید انرژی برق‌آبی	درصد	۸۴
ضریب کارکرد	درصد	۳۰
رقوم کف پایین‌دست نیروگاه	متر از سطح دریا ($MASL$)	۱۰۳۰

متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انرژی برق‌آبی از مخزن، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برق‌آبی ماهانه از مخازن سدها می‌باشند. افق برنامه‌ریزی در این پژوهش دوره بهره‌برداری ۱۳۹۸-۱۳۷۹ در نظر گرفته شده است. معیار سنجش پاسخ‌ها، تولید انرژی برق‌آبی در ماه‌های مختلف سال است. رهاسازی از خروجی برق‌آبی مخزن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می‌باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم آورد رودخانه، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه می‌باشد.

در مسائل مخزن، تابع هدف بهینه‌سازی قطعی سامانه مخازن می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$Min(Max)\ Z = \sum_{t=1}^{T} f(S_t, Re_t) \qquad (۱)$$

که در این رابطه: t اندیس دوره مورد نظر، T تعداد دوره‌های بهره‌برداری، Z هدفی که باید بیشینه و یا کمینه شود (در این جا به صورت کمینه‌سازی نسبت انرژی تولیدی به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف گردید)، Re_t میزان رهاسازی و S_t حجم ذخیره مخزن در دوره t است.

به منظور بهره‌برداری بهینه برق‌آبی پیچیدگی‌های مسئله به خصوص از نظر قیود و شرایط غیر خطی اضافه شده و تابع هدف به صورت حداقل‌سازی کمبود توان تولیدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف می‌شود:

$$Min\ f = \sum_{t=1}^{T} (1 - \frac{P_t}{PPC}) \qquad (۲)$$

که در این رابطه: f تابع هدف که به صورت کمینه‌سازی نسبت تولید انرژی به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف گردید، P_t توان تولیدی در دوره tام بر حسب مگاوات و PPC ظرفیت نصب نیروگاه بر حسب مگاوات است.

سایر روابط حاکم منطبق بر روابط زیر است:

$$P_t = g \times e_t \times \frac{\frac{RP_t}{PF}}{Mul_t} \times (\overline{H_t} - TW_t)/1000 \quad (۳)$$

$$\overline{H_t} = (H_t + H_{t+1})/2 \quad (۴)$$

$$H_t = a_0 + a_1.S_t + a_2.S_t^2 + a_3.S_t^3 \quad (۵)$$

$$TW_t = b_0 + b_1.Re_t^{Power} + b_2.(Re_t^{Power})^2 + b_3.(Re_t^{Power})^3 \quad (۶)$$

$$RPS_t = Re_t^{Power} - RP_t \quad (۷)$$

$$0 \le P_t \le PPC \quad (۸)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t^{Power} - Sp_t - Loss_t \quad (۹)$$

$$Loss_t = Ev_t \times \overline{A_t}/1000 \quad (۱۰)$$

$$\overline{A_t} = (A_t + A_{t+1})/2 \quad (۱۱)$$

$$A_t = a \times {S_t}^2 + b \times S_t + c \quad (۱۲)$$

$$S_{Min} \le S_t \le S_{Max} \quad (۱۳)$$

$$Re_{Min} \le Re_t \le Re_{Max} \quad (۱۴)$$

که در این روابط: g شتاب جاذبه زمین و برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه، e_t بازده نیروگاه که برای تمامی دوره‌ها ثابت فرض شده است، PF ضریب کارکرد نیروگاه، Mul_t ضریب تبدیل میلیون متر مکعب به متر مکعب بر ثانیه در دوره tام، $\overline{H_t}$ متوسط تراز آب مخزن در دوره tام بر حسب متر، H_t تراز آب در ابتدای دوره tام بر حسب متر، H_{t+1} تراز آب در انتهای دوره tام بر حسب متر، TW_t تراز آب پایاب در دوره tام بر حسب متر، a_0، a_1، a_2 و a_3 ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به ارتفاع متناظر آن، b_0، b_1، b_2 و b_3 ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه به تراز آب پایاب، RP_t میزان رهاسازی از خروجی برق‌آبی به منظور تولید توان در دوره tام بر حسب میلیون متر مکعب، RPS_t میزان سرریز از خروجی برق‌آبی در دوره tام بر حسب میلیون متر مکعب، Q_t جریان ورودی رودخانه در دوره tام، Sp_t سرریز در دوره tام، $Loss_t$ کل تلفات آب در دوره tام، Ev_t مقدار متوسط افت در دوره tام (تبخیر منهای بارش) بر حسب میلی متر، $\overline{A_t}$ میانگین میزان سطح آب مخزن در دوره tام بر حسب کیلومتر مربع، A_t و A_{t+1} به ترتیب میزان سطح آب مخزن بر حسب کیلومتر مربع در ابتدا و انتهای دوره tام، a، b و c ضرایب ثابت تبدیل حجم مخزن به سطح متناظر مخزن، S_{Min} حداقل حجم ذخیره، S_{Max} حداکثر حجم ذخیره، Re_{Min} حداقل حجم رهاسازی و Re_{Max} حداکثر حجم رهاسازی است.

نتایج و بحث

در مطالعه‌ی حاضر از شش الگوریتم هوشمند جدید dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA و WHO در مقایسه با الگوریتم معروف GA، برای بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی سد جیرفت استفاده گردید تا هم بتوان توانایی الگوریتم‌های جدیدی که تا به حال در زمینه منابع آب مورد استفاده قرار نگرفته‌اند را با یکدیگر مقایسه کرد و هم بتوان بهترین نتیجه را برای بهره‌برداری بهینه تولید انرژی برق‌آبی از سد مذکور به دست آورد.

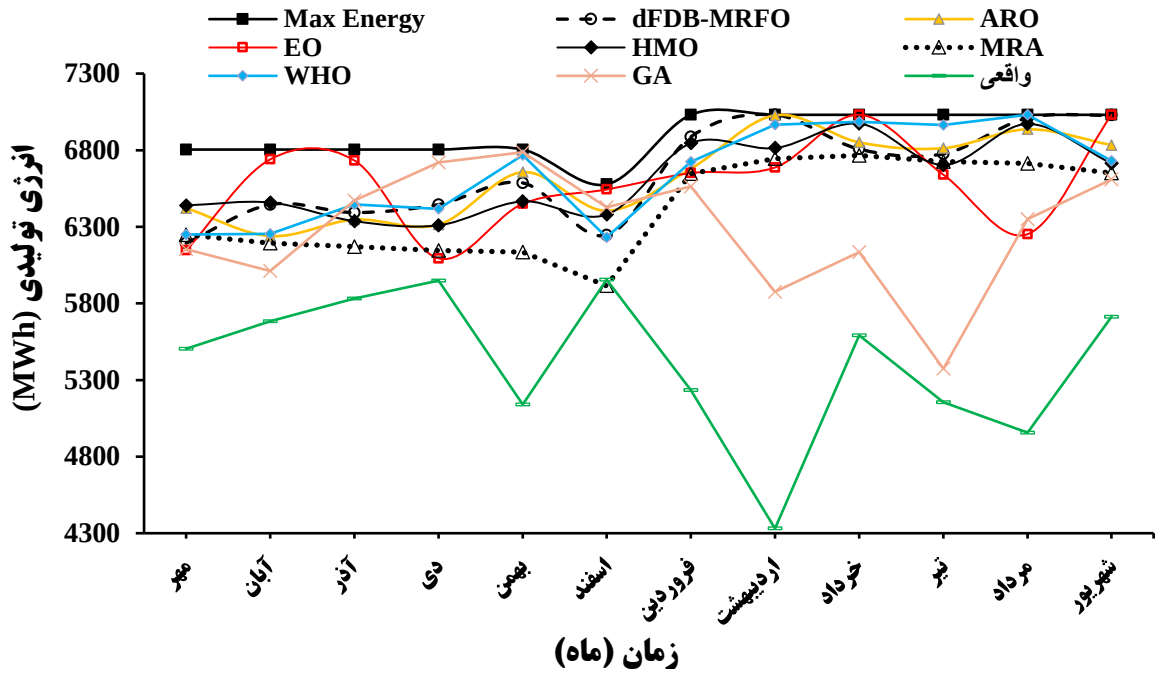
در این راستا مدلی به منظور بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی سد جیرفت برای دوره زمانی مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸ از آمار در دسترس توسعه و توسط الگوریتم های مذکور حل شد. تعداد تکرار برای الگوریتم‌های مورد بررسی، با انجام تحلیل حساسیت بر روی این پارامتر برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. جدول (۲) مقادیر تابع هدف مسئله را به ازای ۱۰ اجرای مختلف، نشان می‌دهد.

جدول (۲): مقادیر تابع هدف و معیارهای آماری حاصل از ۱۰ اجرای مختلف در الگوریتم‌های مورد بررسی

تعداد اجرا	dFDB-MRFO	ARO	EO	HMO	MRA	WHO	GA
۱	۸/۲۲۲۹	۹/۸۴۹۹	۱۴/۴۶۴۷	۹/۷۹۶۱	۱۵/۹۰۵۲	۱۰/۴۷۵۹	۴۷/۹۳۶۵
۲	۸/۲۱۳۶	۸/۹۶۶۶	۱۱/۳۳۰۶	۱۰/۳۰۰۰	۱۵/۹۲۲۵	۸/۴۳۶۷	۵۳/۴۵۲۲
۳	۸/۱۷۲۹	۹/۰۱۲۰	۲۰/۶۴۱۳	۹/۹۶۱۶	۱۵/۹۲۴۸	۸/۳۵۵۴	۴۱/۷۳۳۰
۴	۸/۳۰۱۲	۸/۹۲۲۸	۱۴/۳۵۶۱	۱۰/۲۱۵۷	۱۵/۹۳۴۵	۸/۳۱۲۴	۴۸/۴۲۸۲
۵	۸/۲۵۶۷	۹/۲۷۳۸	۱۹/۱۷۴۹	۱۰/۰۵۸۸	۱۵/۶۶۲۰	۹/۳۰۲۱	۲۰/۸۲۳۳
۶	۸/۲۶۷۲	۹/۴۱۴۰	۱۴/۵۴۹۳	۹/۱۸۷۴	۱۵/۹۲۲۹	۸/۳۷۸۷	۱۹/۲۶۴۸
۷	۸/۱۷۶۷	۹/۵۸۴۸	۱۵/۹۸۶۵	۱۰/۰۳۲۴	۱۵/۹۳۸۷	۸/۴۱۴۸	۳۵/۵۳۵۰
۸	۸/۲۳۱۹	۹/۲۲۹۷	۱۰/۰۳۹۴	۹/۸۷۹۸	۱۵/۹۲۴۹	۸/۴۶۸۸	۵۱/۱۵۲۴
۹	۸/۰۹۹۷	۹/۶۶۰۴	۱۶/۳۰۳۸	۹/۷۶۲۳	۱۵/۹۳۱۷	۸/۳۳۱۴	۲۳/۲۲۴۹
۱۰	۸/۲۶۱۶	۹/۳۳۴۴	۱۵/۵۶۱۱	۱۰/۳۶۸۷	۱۵/۹۴۰۹	۸/۳۵۰۹	۲۵/۲۲۰۰
بهترین جواب	۸/۰۹۹۷	۸/۹۲۲۸	۱۰/۰۳۹۴	۹/۱۸۷۴	۱۵/۶۶۲۰	۸/۳۱۲۴	۱۹/۲۶۴۸
بدترین جواب	۸/۳۰۱۲	۹/۸۴۹۹	۲۰/۶۴۱۳	۱۰/۳۶۸۷	۱۵/۹۴۰۹	۱۰/۴۷۵۹	۵۳/۴۵۲۲
میانگین	۸/۲۲۰۴	۹/۳۲۴۹	۱۵/۲۴۰۸	۹/۹۵۶۳	۱۵/۹۰۰۸	۸/۶۸۲۷	۳۶/۶۷۷۰
انحراف معیار	۰/۰۵۸۴	۰/۳۰۹۷	۳/۱۷۳۵	۰/۳۳۸۷	۰/۰۸۴۵	۰/۶۹۵۰	۱۳/۵۳۷۷
ضریب تغییرات	۰/۰۰۷۱	۰/۰۳۳۲	۰/۲۰۸۲	۰/۰۳۴۰	۰/۰۰۵۳	۰/۰۸۰۰	۰/۳۶۹۱
زمان اجرا (ثانیه)	۲۲۵/۶۵	۲۱۳/۷۹	۳۰۶/۲۵	۱۰۱۷/۱۱	۳۶۲/۱۴	۲۵۶/۷۸	۲۶۷/۴۸

نتایج حاصل از جدول (۲) نشان‌دهنده برتری الگوریتم ترکیبی جدید dFDB-MRFO نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی در کمینه‌سازی تابع هدف می‌باشد. میانگین تابع هدف در ۱۰ اجرای مختلف برای الگوریتم dFDB-MRFO برابر ۸/۲۲ می‌باشد که این مقدار برای الگوریتم‌های ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب برابر ۹/۳۲، ۱۵/۲۴، ۹/۹۶، ۱۵/۹۰ و ۸/۶۸ و ۳۶/۶۸ می‌باشد. همچنین انحراف معیار حاصل از الگوریتم‌های dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب برابر ۰/۰۵۸۴، ۰/۳۰۹۷، ۳/۱۷۳۵، ۰/۳۳۸۷، ۰/۰۸۴۵ و ۰/۶۹۵۰ و ۱۳/۵۴ است که نشان‌دهنده همگرایی بهتر الگوریتم ترکیبی dFDB-MRFO در اجراهای مختلف می‌باشد. از لحاظ زمان اجرا، الگوریتمی موفق‌تر است که بتواند در زمان کمتری به جواب بهینه برسد. از این نظر نیز الگوریتم ARO با زمان اجرای ۲۱۳/۷۹ ثانیه بهترین عملکرد را از خود نشان داد. بعد از آن به ترتیب الگوریتم‌های dFDB-MRFO (۲۲۵/۶۵ ثانیه)، WHO (۲۵۶/۷۸ ثانیه)، GA (۲۶۷/۴۸ ثانیه)، EO (۳۰۶/۲۵ ثانیه)، MRA (۳۶۲/۱۴ ثانیه) و HMO (۱۰۱۷/۱۱ ثانیه) قرار گرفته‌اند.

شکل (۲) میانگین ماهانه انرژی تولیدی بدست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی در دوره آماری بلندمدت ۱۹ ساله را در مقایسه با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. همچنین جدول (۳) میزان متوسط توان و کل انرژی تولیدی حاصل از سناریوهای مختلف بهره‌برداری حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی در دوره آماری بلندمدت ۱۹ ساله را نشان می‌دهد.



شکل (۲): میانگین بلندمدت تغییرات ماهانه انرژی تولیدی نیروگاه سد جیرفت حاصل از سناریوهای بهره‌برداری توسط الگوریتم‌های مختلف

جدول (۳): توان و انرژی تولیدی حاصل از سناریوهای بهره‌برداری توسط الگوریتم‌های مورد بررسی در دوره آماری بلندمدت ۱۹ ساله

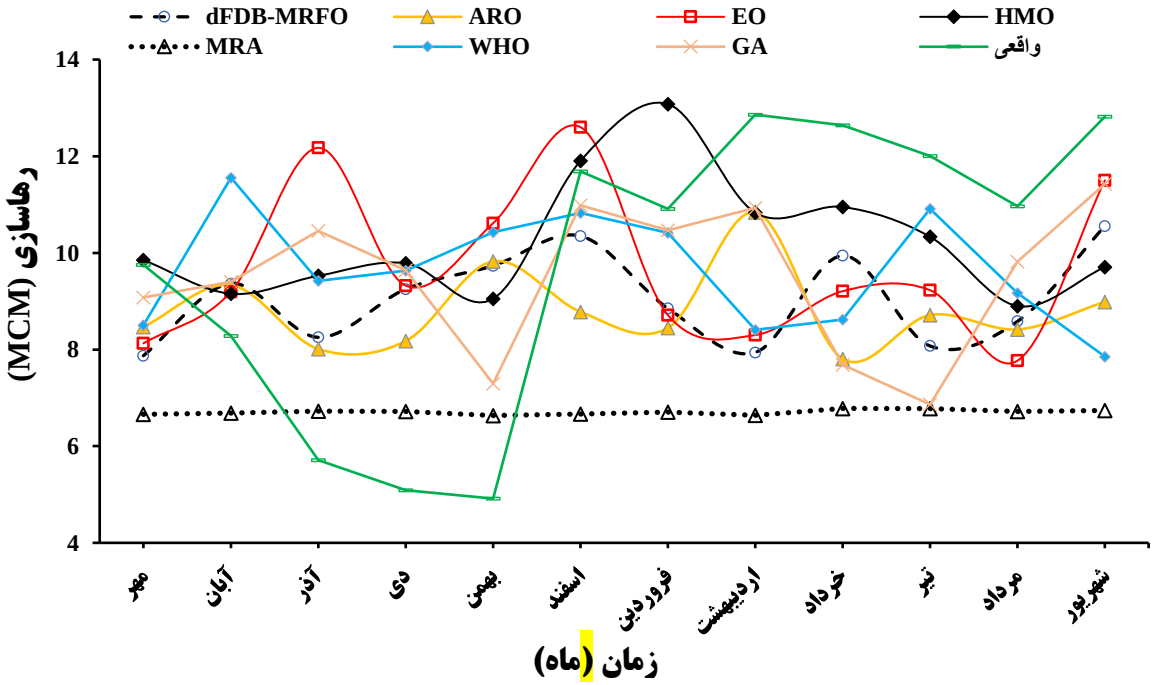
الگوریتم	dFDB-MRFO	ARO	EO	HMO	MRA	WHO	GA	PPC
میانگین توان تولیدی (MW)	۳۱/۲۲	۳۱/۱۰	۳۰/۹۴	۳۱/۰۷	۳۰/۱۲	۳۰/۱۹	۲۹/۶۰	۳۲/۴۰
کل انرژی تولید شده (GWh)	۱۴۸۲/۴۳	۱۴۷۶/۴۹	۱۴۶۸/۳۰	۱۴۷۴/۶۴	۱۴۳۰/۴۴	۱۴۸۰/۹۱	۱۴۰۳/۶۵	۱۵۳۷/۷۰

همان‌طور که در شکل (۲) و جدول (۳) مشاهده می‌شود، میزان توان و انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم dFDB-MRFO نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد بررسی، در سطح بالاتری قرار دارد و نسبت به الگوریتم‌های مورد بررسی دیگر، به ظرفیت تولید نیروگاه نزدیک‌تر می‌باشد. میزان کل انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم‌های dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب برابر ۱۴۸۲/۴۳، ۱۴۷۶/۴۹، ۱۴۶۸/۳۰، ۱۴۷۴/۶۴، ۱۴۳۰/۴۴، ۱۴۸۰/۹۱ و ۱۴۰۳/۶۵ گیگاوات ساعت در طول دوره ۱۹ ساله (از مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸) بوده که حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم‌های جدید مورد بررسی و برتری نسبی الگوریتم ترکیبی dFDB-MRFO در تولید انرژی برق‌آبی نیروگاه سد جیرفت می‌باشد. این الگوریتم توانسته است بیش از ۹۶ درصد از ظرفیت نصب نیروگاه آبی مورد مطالعه، توان تولیدی داشته باشد. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم معروف GA در مقایسه با الگوریتم‌های هوشمند جدید مورد بررسی، توان تولیدی کمتری (۲۹/۶۰ مگاوات) را ارائه کرده است. همچنین نمودارهای شکل (۲) نشان می‌دهد که کلیه الگوریتم‌های مورد بررسی توانسته‌اند انرژی بالاتری را در مقایسه با شرایط واقعی تولید نمایند. این یافته، اهمیت به کارگیری الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را در مسائل پیچیده مهندسی و به صورت خاص، در مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای برق‌آبی ثابت می‌کند.

در شکل (۳) نیز میانگین بلندمدت ماهانه رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی در دوره آماری مذکور نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشخص است میانگین رهاسازی ماهانه بلندمدت حاصل از سناریوی بهره‌برداری الگوریتم MRA نسبت به سایر

الگوریتم‌های مورد بررسی پایین‌تر و اختلاف معنی‌داری از این حیث دارد که نشان‌دهنده توانایی پایین‌تر این الگوریتم در مسئله مورد نظر می‌باشد. در حالی که میانگین رهاسازی ماهانه از نیروگاه سد جیرفت حاصل از سایر الگوریتم‌ها نسبتاً در یک محدوده قرار داشته و عملکرد مناسب‌تری را نشان می‌دهند

.



شکل (۳): میانگین بلندمدت ماهانه رهاسازی از نیروگاه سد جیرفت حاصل از سناریوهای بهره‌برداری توسط الگوریتم‌های مختلف

نتیجه‌گیری

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده در چند دهه اخیر رواج یافته است. با توجه به این که یک روش یا الگوریتم بهینه‌سازی توانایی حل تمامی مسائل بهینه‌سازی با شرایط و توابع متفاوت را ندارد و بسته به زمینه مورد مطالعه، نوع مسئله، نوع توابع و قیدها، روش ها و الگوریتم های بهینه‌سازی مختلف برای حل آن انتخاب و استفاده می‌شود، ازاین‌رو توسعه و پیشرفت روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف در دهه‌های اخیر به طور چشم‌گیری رونق یافته و دارد. وجود اکسترمم‌های موضعی و متعدد، در مسائلی از قبیل بهره‌برداری بهینه انرژی برق‌آبی از نیروگاه‌های آبی، لزوم توسعه ایده روش‌های فراکاوشی و استفاده از روش‌های نوظهور و جدید را برای بهینه‌سازی توابع هدف پیچیده در چنین مسائلی ضروری نموده است. یکی دیگر از دلایل ظهور الگوریتم‌های جدید و به‌کارگیری آن‌ها در مسائلی از قبیل بهره‌برداری بهینه انرژی برق‌آبی از نیروگاه‌های آبی، تلاش این‌گونه روش‌ها در برقراری تعادل بین دو ویژگی اکتشاف (*Exploration*) و استخراج (*Exploitation*) الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌باشد. ویژگی اکتشاف، مربوط به استعداد روش، در یافتن محدوده جواب بهینه، و در مقابل، ویژگی استخراج، مربوط به همگرایی به نقطه جواب بهینه است. با توجه به اینکه افزایش ابعاد و بزرگی مسئله، همواره یکی از مشکلات فراروی روش‌های جمعیت‌گرا بوده، یکی از معیارهای توانمندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در رفع این معضل، ایجاد تعادل بین این دو ویژگی (اکتشاف و استخراج)، در جریان دستیابی به جواب بهینه سراسری است. از این‌رو متناسب با پیچیدگی مسئله، تلاش در جهت

افزایش توانایی الگوریتم در یافتن موقعیت قطعی جواب بهینه (اکتشاف) و همچنین کاهش زمان انجام محاسبات در رسیدن به نقطه جواب بهینه (استخراج)، همواره جزء انگیزه‌های اصلی محققین توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی به شمار آمده است.

از این رو و بنا به اهمیت سد مخزنی جیرفت و همچنین به دلیل آن که مطالعات جامعی در رابطه با بهره-برداری بهینه‌ی برق‌آبی و استفاده حداکثری از توان تولیدی نیروگاه آن توسط روش‌های هوشمند جدید صورت نگرفته است، در مطالعه‌ی حاضر از ۶ الگوریتم هوشمند جدید dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA و WHO که جزء الگوریتم‌های نسبتا قوی و جدید در راستای بهینه‌یابی می‌باشند، در مقایسه با الگوریتم مشهور GA، برای بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی سد جیرفت استفاده گردید تا هم بتوان توانایی الگوریتم‌های جدیدی که تا به حال در زمینه منابع آب مورد استفاده قرار نگرفته‌اند را با یکدیگر و با الگوریتم‌های قدیمی‌تر مقایسه کرد و هم بتوان بهترین نتیجه را برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی از سد مذکور به دست آورد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که الگوریتم‌های جدید dFDB-MRFO و WHO، در مقایسه با ۵ الگوریتم مورد بررسی دیگر، نتایج بهتر و قابل اعتمادتری را دارا می‌باشند، به طوری که بهترین مقدار برای تابع هدف در الگوریتم‌های dFDB-MRFO و WHO برابر با ۸/۱۰ و ۸/۳۱ نسبت به ۵ الگوریتم ARO، EO، HMO، MRA و GA به ترتیب با مقادیر ۸/۹۲، ۱۰/۰۴، ۹/۱۹، ۱۵/۶۶ و ۱۹/۲۶ کاهش محسوس‌تری داشته و این موضوع بیانگر عملکرد مناسب این دو روش در زمینه بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی سد جیرفت می‌باشد. همچنین میزان کل انرژی تولیدی حاصل از الگوریتم‌های dFDB-MRFO، ARO، EO، HMO، MRA، WHO و GA به ترتیب برابر ۱۴۸۲/۴۳، ۱۴۷۶/۴۹، ۱۴۶۸/۳۰، ۱۴۷۴/۶۴، ۱۴۳۰/۴۴، ۱۴۸۰/۹۱ و ۱۴۰۳/۶۵ گیگاوات ساعت در طول دوره ۱۹ ساله بود که حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم‌های جدید مورد بررسی و برتری نسبی الگوریتم ترکیبی dFDB-MRFO در تولید انرژی برق‌آبی نیروگاه سد جیرفت می‌باشد.

.

قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (*INSF*) و پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان در انجام طرح با شماره ۴۰۰۵۸۸۱ تشکر و قدردانی می‌گردد.

.

منابع

افشار. م.، رضایی سنگدهی. س.، معینی. ر. (۱۳۹۳). الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان در مسأله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها : مطالعه‌ی مقایسه‌ای چهار الگوریتم. فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۲۵(۲)، ۱۱۷-۱۳۴.

احمدیان فر. ا.، ادیب. آ. (۱۳۹۴). بهینه سازی بهره‌برداری انرژی برق‌آبی از سدها با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: سد دز)، علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۳)، ۶۳-۷۱.

احترام. م.، موسوی. س. ف.، کرمی. ح.، تهرانی. ن.، امیری. آ. (۱۳۹۵). ارائه ی روش هیبریدی برای بهینه سازی مخازن سدها مبتنی بر هوش مصنوعی. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران. ۳ (۱۱) :۵۴-۴۴.

اکبری‌فرد. س، شریفی. م.، قادری. ک. (۱۴۰۰). بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخازن با استفاده از الگوریتم ازدحام پروانه (مطالعه موردی: سد کارون ۴). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴): ۶۹-۸۶.

حسینی موغاری. س.م.، مقدس. م.، عراقی نژاد. ش. (۱۳۹۶). کاربرد الگوریتم بهینه سازی فاخته در بهره‌برداری بهینه از مخزن برق‌آبی (مطالعه موردی: مخزن کارون۴)، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی منابع آب، ۱۰(۳۲): ۱۹-۲۳.

Azizipour, M., Ghalenoei, V., Afshar, M. H., & Solis, S. S. (2016). Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm. Water resources management, 30(11), 3995-4009.

Desuky, A. S., Cifci, M. A., Kausar, S., Hussain, S., & El Bakrawy, L. M. (2022). Mud Ring Algorithm: A new meta-heuristic optimization algorithm for solving mathematical and engineering challenges. IEEE Access, 10, 50448-50466.

Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B., & Mirjalili, S. (2020). Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. Knowledge-Based Systems, 191, 105190.

Kahraman, H. T., Bakir, H., Duman, S., Katı, M., Aras, S., & Guvenc, U. (2022). Dynamic FDB selection method and its application: modeling and optimizing of directional overcurrent relays coordination. Applied Intelligence, 1-36.

Mahdavi-Meymand, A., & Zounemat-Kermani, M. (2022). Homonuclear Molecules Optimization (HMO) meta-heuristic algorithm. Knowledge-Based Systems, 258, 110032.

Nair, S. J., & Sasikumar, K. (2019). Fuzzy reliability-based optimization of a hydropower reservoir. Journal of Hydroinformatics, 21(2), 308-317.

Naruei, I., & Keynia, F. (2022). Wild horse optimizer: A new meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. Engineering with computers, 38(Suppl 4), 3025-3056.

Rashid, M. U., Abid, I., & Latif, A. (2022). Optimization of hydropower and related benefits through Cascade Reservoirs for sustainable economic growth. Renewable Energy, 185, 241-254.

Sharifi, M. R., Akbarifard, S., Madadi, M. R., Qaderi, K., & Akbarifard, H. (2022). Optimization of hydropower energy generation by 14 robust evolutionary algorithms. Scientific Reports, 12(1), 7739.

Wurbs, R.A., (1993). "Reservoir-system simulation and optimization models" J. Water Resource Planning and Management. 119(4), 455-472.

Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C. T., & Zhang, S. Q. (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. Water Science and Engineering, 4(1), 61-74.

Wang, L., Cao, Q., Zhang, Z., Mirjalili, S., & Zhao, W. (2022). Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 114, 105082.

Wu, X., Cheng, C., Lund, J. R., Niu, W., & Miao, S. (2018). Stochastic dynamic programming for hydropower reservoir operations with multiple local optima. Journal of hydrology, 564, 712-722.

Zhao, W., Zhang, Z., & Wang, L. (2020). Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 87, 103300.

Zounemat-Kermani, M., Ramezani-Charmahineh, A., Razavi, R., Alizamir, M., & Ouarda, T. B. (2020). Machine learning and water economy: a new approach to predicting dams water sales revenue. Water Resources Management, 34, 1893-1911.