

Research Paper

Optimization of Hydropower Energy Generation in the Karoun Basin Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm

Kimiya Soltani¹ Marzie Samare Hashemi^{2*} Armin Shahrokhi³ Mohammad Zounemat-Kermani⁴

¹ MSc of water structures engineering, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture, Bahonar university of Kerman, Iran

² Assist. Professor, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture, Bahonar university of Kerman, Iran

³ MSc student of water structures engineering, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture, Bahonar university of Kerman, Iran

⁴ Assoc. professor, Department of water science and engineering, Faculty of agriculture, Bahonar university of Kerman, Iran



10.22125/IWE.2024.416092.1748

Received:
September 12, 2023
Accepted:
January 1, 2024
Available online:
June 29, 2024

Keywords:
Operation of Reservoir, Hydro-electrical Power Plants, Water Resource Management, BFO algorithm, Genetic algorithm.

Abstract

Hydropower plants are one of the renewable energy sources with higher efficiency than other renewable sources. One of the appropriate methods to maximize efficiency in these power plants is metaheuristic methods. The purpose of this study is to calculate the maximum power generation from the Karoun Basin reservoirs, so that there is no disruption in the supply of downstream demands. Thus, the bacterial foraging optimization algorithm (BFO) and genetic algorithm (GA) have been used to optimize power generation. The results showed that it is possible to have maximum hydropower energy production with 75% reliability in downstream water supply. According to the results of GA and BFO, there is an annual hydropower energy production capacity of 18347 and 18431 GWh, respectively, in the study area, the majority of which is related to the Godarlandar dam on the Karoun river. The Dez river share in power generation, according to the GA results, is 2632.4 GWh and, according to the BFO results, is 2645.2 GWh. Comparing the performance of GA and BFO, as the objective function becomes more complex, BFO shows a higher ability in more accurate calculations.

1. Introduction

The increasing need for water resources has become one of the crises of the last century, and due to the limited surface water resources, there is a need for proper planning and management. Optimizing the operation of multi-reservoir hydropower systems is one of the most complex issues of water resources management that has been considered in this paper.

Considering the importance of the Karoun Basin and the high potential of hydropower energy generation as a clean energy source in this basin, increasing the production of energy without interfering

* **Corresponding Author:** Marzie Samare Hashemi

Address: Department of water science and engineering, Faculty of agriculture, Bahonar university of Kerman, Iran.

Email: samare@uk.ac.ir
Tel: 03432232662

in downstream demands is very important. On the other hand, due to the large number of variables and the complexity of the problem, considering the number of dams and their location, it is necessary to use efficient and suitable optimization algorithms. In this regard, according to the review conducted on previous studies, Bacterial Foraging optimization Algorithm BFO is used in this paper, and Genetic Algorithm GA is used to compare the results.

2. Materials and Methods

Case study: Khuzestan is a province in the southwest of Iran, located on the coast of the Persian Gulf. It is surrounded by the Zagros mountains from the north and east. The area studied in this paper includes the dams under operation in the Karoun River basin (Karoun 3 and 4, Abbaspur, Gotvand, Dez and Godarlander), which have the largest share in the generation of hydropower energy in Iran.

Bacterial Foraging Optimization Algorithm: It is inspired by the search behavior of E.Coli bacteria as presented by Pacino in 2002. In this algorithm, bacteria are defined as D-dimensional space vectors carrying θ variables of the optimization problem based on the cost function $J(\theta)$. The foraging behavior of bacteria includes three important stages: chemotaxis (rotation and swimming), reproduction and elimination-dispersal.

The objective function: The objective function for maximizing the hydropower energy generation of Karoun basin dams is presented in the form of equation (1).

$$MaxY(x_n) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (\rho \gamma O_{t,n} H_{t,n}) \quad (1)$$

where Y is the total energy generation (MW), N the number of system reservoirs, T the number of monthly simulation periods, ρ the efficiency of the power plant, $O_{t,n}$ the rate of flow release from reservoir n for different uses, $H_{t,n}$ the water level of reservoir n in release period t, and x is the minimum water level for each of the reservoirs. The constraints of the objective function are the balance equation, overflow, storage and reliability. The time period of modeling in this paper is 41 years, which includes dry, wet and normal climatic periods.

Standard benchmark: To compare and check the effectiveness of the methods used, the Rosenbrock function $R(x)$ with 2, 10, and 50 dimensions has been used. The function is unimodal, and the global minimum lies in a narrow, parabolic valley. However, even though this valley is easy to find, convergence to the minimum is difficult.

3. Results

Setting the initial parameters, the results obtained from the bacterial foraging optimization algorithm and the genetic algorithm in MATLAB, table (1).

Table (1) output results of BFO and GA for optimized hydropower energy

Power plant	Min water Level BFO (msl)	Min water Level GA (msl)	Max power generation BFO (GW/H)	Max power generation GA (GW/H)
Karoun 4	980.2	985.4	2012.4	2010.3
Karoun 3	800.1	815.2	3405.4	3395.2
Karoun 1 (Abbaspour)	498.6	510.3	3510.5	3480.1
Godarlandar	385.4	375.4	3521.3	3503.3
Gotvand	202.5	192.4	3336.6	3325.6
Dez	306.6	312.6	2645.2	2632.4
Sum			18431.4	18346.9

Also, according to table (2), it has been found that in high dimensions of the Rosenbrock function, GA is unstable in finding the absolute minimum value. But absolute minimum in high dimension problems can be found by BFO efficiently.

Table (2) comparing response time and optimized calculated value in GA and BFO

Function/dimension	absolute Min	GA		BFO	
		Optimized value	Time (s)	Optimized value	Time (s)
Rosenbrock 2	0	1.3×10^{-6}	1.2	0	7.5
Rosenbrock 10	0	3.87	2.1	0.005	15.6
Rosenbrock 50	0	26.43	30.5	0.035	27.2

4. Discussion and Conclusion

The results of BFO and GA showed that the Karoun multi-reservoir system, while meeting downstream demands, will have the ability to generate hydropower energy with an average of 18,347 and 18,431 GWh calculated from the GA and the BFO, respectively. In case of higher dimensions and complexity of the problem, the GA is not very reliable, but satisfying results were obtained from the BFO. Consequently, in case of considering the details of the irrigation networks and all the water potentials of the basin, in the simulation, BFO is suggested.

5. Six important references

- 1) Ahmadianfar, I., and Adib, A. 2014, "Optimizing Hydropower Dams Operation Using Hybrid of PSO and GA (Case Study: Dez Dam)". *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 38: 3. 63-71.
- 2) Ahmadianfar, I., Samadi-Koucheksaraee, A., and Bozorg-Haddad, O. 2017, "Extracting Optimal Policies of Hydropower Multi-Reservoir Systems Utilizing Enhanced Differential Evolution Algorithm". *Water Resources Management*. 31: 14. 4375-4397.
- 3) Chen, H., Ahmadianfar, I., Liang, G., Bakhshizadeh, H., Azad, B., and Chu, X, 2022, " A successful candidate strategy with Runge-Kutta optimization for multi-hydropower reservoir optimization" *Expert Systems with Applications*, Volume 209, Issue C.
- 4) Farshi, T., R., and Orujpour, M, 2021, " A multi-modal bacterial foraging optimization algorithm" *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Volume 12, PP:10035–10049
- 5) Parhizkari, M., Mazandaranzadeh, H. (2021), "multi-objective optimization of hydroelectric storage-case study: Karoun Dam 5". *Dam and hydropower scientific journal*, year 8, number 3(In Persian)
- 6) Passino, K. 2002. Biomimicry of Bacterial Foraging for Distributed Optimization and Control. *IEEE Control Syst Mag.* 22 (3), P: 52–67

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های برق آبی حوضه کارون به وسیله الگوریتم کاوش باکتری و الگوریتم ژنتیک

کیمیا سلطانی نژاد^۱، مرضیه ثمره هاشمی^{۲*}، آرمن شاهرخی^۳، محمد ذونعمت کرمانی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

نیروگاه‌های برق آبی یکی از منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که نسبت به سایر منابع احیا شدنی، بهره‌وری بهتری دارند. یکی از شیوه‌های مناسب به منظور برنامه‌ریزی جهت به حداکثر رساندن بهره‌وری در این نیروگاه‌ها، به کارگیری روش‌های نوین بهینه‌سازی، مانند روش‌های فراکاوشی است. هدف از انجام این مطالعه محاسبه تولید حداکثر انرژی برق ممکن از مجموعه مخازن موجود بر روی رودخانه‌های حوضه کارون می‌باشد، به نحوی که خللی در تأمین حقابه‌ها ایجاد نشود. به این منظور از روش الگوریتم کاوش باکتری (BFO^۵) و الگوریتم ژنتیک (GA) در بهینه‌یابی تولید برق استفاده شده است. نتایج نشان داد که می‌توان حداکثر تولید انرژی برق آبی را با ۷۵٪ اطمینان‌پذیری در تأمین آب پایین‌دست، در دسترس داشت. با توجه به نتایج الگوریتم ژنتیک و کاوش باکتری، به ترتیب توانایی تولید انرژی برق آبی سالانه ۱۸۳۴۷ و ۱۸۴۳۱ گیگاوات-ساعت در سامانه مورد مطالعه وجود دارد، که سهم بیشتر آن مربوط به سد گدارلندر از شاخه کارون است و سهم شاخه دز، مطابق نتایج الگوریتم ژنتیک ۲۶۳۲/۴ و با توجه به نتایج الگوریتم کاوش باکتری ۲۶۴۵/۲ گیگاوات-ساعت است. با مقایسه عملکرد دو الگوریتم ژنتیک و کاوش باکتری، با پیچیده‌تر شدن تابع هدف، الگوریتم جستجوی باکتری توانایی بالاتری از لحاظ دقت و سرعت را در انجام محاسبات دقیق‌تر بروز می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری از سیستم مخازن، نیروگاه‌های برق آبی، مدیریت منابع آب، الگوریتم کاوش باکتری، الگوریتم ژنتیک.

^۱ کارشناس ارشد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. kimiyasoltani@agr.uk.ac.ir

^{۲*} استادیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. samare@uk.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. arminshahrokhi@agr.uk.ac.ir

^۴ دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. zounemat@uk.ac.ir

مقدمه

نیاز روزافزون به منابع آب برای مصارف گوناگون به یکی از بحران‌های قرن اخیر بدل شده و با توجه به محدودیت بهره‌برداری از منابع آب سطحی نیاز به برنامه‌ریزی اصولی وجود دارد. امروزه توجه به طرح‌های توسعه انرژی با توجه به ضرورت دستیابی به منابع انرژی پاک از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این راستا ارزیابی پتانسیل هیدروانرژی با استفاده از روش‌های تحلیل سیستم‌ها و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سال‌هاست که مورد توجه قرار دارد. به علت وجود مغایرت در رژیم آبدی رودخانه‌ها با نیازهای آب شرب شهری، صنایع و نیاز کشاورزی، احداث سیستم‌های ذخیره‌ای جهت تنظیم جریانات طبیعی رودخانه‌ها و تامین نیازهای آبی، یکی از بهترین شیوه‌های استفاده از منابع آب می‌باشد (قدمی و همکاران، ۱۳۸۸). در دهه‌های اخیر با پیشرفت روش‌ها و تکنیک‌های رایانه‌ای، استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب به سرعت در حال توسعه می‌باشند. برای بهینه‌سازی سیستم‌های بهره‌برداری مخازن در اکثر پژوهش‌های ارائه شده از روش‌های الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی استفاده شده است. بهینه‌سازی بهره‌برداری سامانه‌های چند مخزنه برق‌آبی از عمده مسائل پیچیده مدیریت منابع آب می‌باشد که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در ایران و اکثر کشورهای دنیا مطالعات متعددی در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی و استفاده از الگوریتم‌های گوناگون صورت گرفته است که در ادامه به بررسی تعدادی از این مطالعات در حوزه بهینه‌سازی نیروی برق‌آبی پرداخته می‌شود.

(فاطمی و همکاران، ۱۳۹۵) یک الگوریتم توسعه یافته شبیه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی، به کمک نرم‌افزار MATLAB توسعه دادند. این مدل توسعه یافته جهت مدل‌سازی برق‌آبی سیستم حوضه آبریز سد ابوالعباس در استان خوزستان، به کار گرفته شد. در این شرایط

شبیه‌سازی تولید انرژی سد مزبور برای ظرفیت نصب‌های نیروگاهی مختلف انجام شد. با اعمال شاخص اطمینان‌پذیری ۹۰ درصد، ظرفیت نصب نیروگاه برابر ۷/۲ مگاوات تعیین گردید. در این ظرفیت نصب، انرژی اولیه و مازاد در اغلب ماه‌ها اتفاق افتاده است. همچنین در ۳۳ درصد مواقع که مخزن در حداکثر تراز خود قرار دارد انرژی اضافی تولید شده است و میزان انرژی اولیه و متوسط انرژی مازاد سرریزی به ترتیب برابر ۲۰/۸ و ۱۳/۲ گیگاوات ساعت در سال به صورت ۲۴ ساعت تعیین شد (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۵). در تحقیق دیگری با استفاده از مدل WEAP¹ ارزیابی پتانسیل برق‌آبی سد مخزنی سراب تلخ واقع در استان لرستان با هدف تأمین بخشی از آب شرب و صنعت شهر خرم‌آباد که به ترتیب ۵۵ و ۵ میلیون مترمکعب در سال است، انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پتانسیل برق‌آبی و آنالیز اقتصادی هزینه‌های اجرایی نشان داد نوسانات رقوم نرمال در مقایسه با رقوم مرده، اثرگذاری بیشتری بر تولید انرژی داشته و رقوم مرده ۱۴۲۴ و رقوم نرمال ۱۴۴۹ متر از سطح دریا به عنوان رقوم بهینه انتخاب شدند (کاکاوند و همکاران، ۱۳۹۷). تحقیقی بر روی حوضه آبریز کارون در استان خوزستان و نیروگاه‌های آبی زنجیره‌ای کارون ۳، کارون ۱ و مسجد سلیمان جهت ارائه روشی برای بهینه‌سازی تولید بلند مدت یک سیستم متشکل از چند نیروگاه برق‌آبی زنجیره‌ای صورت گرفت، نتایج نشان داد با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌توان سود بیشتری را نسبت به وضعیت فعلی نیروگاه‌ها به دست آورد (جمال‌منش و همکاران ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر، از الگوریتم فراکاوشی ازدحام پروانه MSA² به منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق‌آبی مخزن سد کارون ۴ واقع در حوضه آبریز کارون، برای یک دوره ۱۰۶ ماهه استفاده شد. پس از اطمینان از درستی عملکرد الگوریتم MSA با استفاده از چندین تابع محک استاندارد، مدلی برای بهره‌برداری بهینه برق‌آبی سد کارون ۴ توسعه داده شد. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم

² Moth Swarm Algorithm

¹Water Evaluation And Planning System

می‌گردند. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی انعطاف‌پذیری و قابلیت PSO را برای تولید افراد با رشد قوی‌تر، افزایش می‌دهد که می‌تواند سرعت همگرایی را افزایش دهند (Ahmadianfar and Adib, 2014). همچنین از الگوریتم جستجوی گرانشی GSA^4 و GA برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سامانه تک مخزنه و سامانه چهار مخزنه در سه مساله بهینه‌سازی توسط بزرگ حداد و همکاران استفاده شد و نتایج نشان داد که خروجی GSA به راه‌حل‌های بهینه نزدیک‌تر از خروجی GA هستند. مقادیر متوسط تابع هدف با GSA و GA به ترتیب برابر با ۱/۲۱۸ و ۱/۷۴۶ در حل مسئله نیروگاه آبی تک مخزن به دست آمدند (Bozorg-Haddad et al, 2016). در پژوهش دیگری یک الگوریتم تکامل دیفرانسیل پیشرفته EDE برای افزایش توانایی‌های اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم تکامل دیفرانسیل اصلی DE^5 معرفی شد. در حل مسئله بهینه‌سازی نیروی برق آبی ۱۰ مخزنه، ثابت شد که EDE برای رسیدن به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه بسیار کاربردی‌تر است و از نظر نرخ همگرایی و انحراف استاندارد نسبت به DE اصلی موثرتر است (Ahmadianfar et al, 2017). در مطالعه دیگری از الگوریتم تکاملی مبتنی بر گرادیان GE^6 برای بهینه‌سازی عملکرد یک سیستم چهارمخزنه و دو سیستم تک مخزنه استفاده شد، نتایج این پژوهش نشان داد که روش بهینه‌سازی به کار گرفته شده نسبت به روش‌های LP، NLP و GA توانایی بیشتری در رسیدن به نقطه بهینه دارد (Samadi-Koucheksaraee et al, 2018). در سال ۲۰۲۰ توسط فنگ و همکاران یک الگوریتم سینوس کسینوس اصلاح شده جهت حل مسئله بهینه‌سازی برق آبی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده با در نظر گرفتن یک استراتژی جهش نخبه، باعث بهبود عملکرد الگوریتم سینوس کسینوس موجود شده و می‌تواند با کارایی بالا در حل

MSA در مقایسه با الگوریتم‌های GA و PSO مورد بررسی، در بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی بود (اکبری‌فرد و همکاران، ۱۴۰۰). در پژوهش دیگری از الگوریتم فراکاووشی چرخه آب WCA به‌منظور بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی مخزن سد جیرفت واقع در حوضه آبریز هلیل‌رود، استفاده شد. متغیرهای تصمیم در مدل بهینه‌سازی انرژی برق آبی، مقادیر رهاسازی بهینه از خروجی برق آبی به صورت ماهانه از مخزن سد در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA در مقایسه با الگوریتم جستجوی هارمونی (HS^1) و الگوریتم رقابت استعماری (ICA^2) بود (یاوری و همکاران، ۱۴۰۱). مساله بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف تولید انرژی برق آبی و کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان ACO^3 نیز توسط ردی و کومار مورد بررسی قرار گرفت. خروجی نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان نتایج نسبت به الگوریتم ژنتیک ۰/۶۳ درصد بهبود یافت (Reddy and Kumar, 2006). جهت مدیریت انرژی برق آبی تولیدی سیستم چند مخزنه در حوضه آبریز مینجیانگ در کشور چین از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات ترکیبی اصلاح شده، بهره برده شد، جایی که یک سیستم قدرتمند متشکل از ۲۶ نیروگاه برق آبی وجود دارد. نتایج نشان داد زمان‌بندی الگوریتم IPSO عملکرد بهتری از PSO دارد و با نتایج الگوریتم تقریب متوالی برنامه‌نویسی پویا (DPSA) قابل مقایسه است (Zhang et al, 2011). برای حل مساله بهینه‌سازی انرژی برق آبی سد دز، یک مدل ترکیبی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) مورد مطالعه قرار گرفت. عمده هدف بحث بهبود الگوریتم ازدحام ذرات و استفاده از دو عملگر کارآمد جهش و تقاطع در الگوریتم ژنتیک بود که به ترتیب باعث افزایش گوناگونی جمعیت و تبادل اطلاعات بین دو ذره از جمعیت

⁴ Gravitational Search Algorithm

⁵ Differential Evolution

⁶ Gradient Evolution

¹ Harmony Search

² Imperialist Competitive Algorithm

³ Ant Colony Algorithm

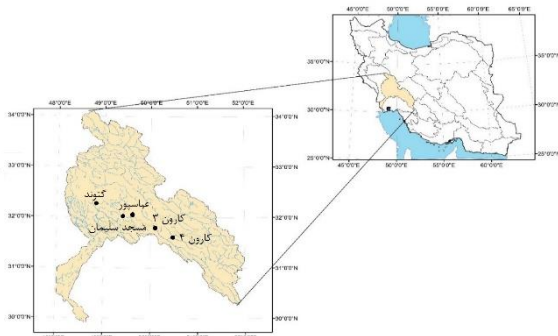


با توجه به تعدد سد‌ها و نحوه قرارگیری، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی کارآمد و مناسب ضروری است. در این راستا با توجه به بررسی انجام شده بر روی مطالعات پیشین از الگوریتم کاوش باکتری در این تحقیق استفاده می‌شود و برای مقایسه نتایج از الگوریتم ژنتیک نیز استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

خوزستان استانی در جنوب غرب ایران است که جنوب آن در کرانه خلیج فارس قرار دارد. استان خوزستان از شمال و شرق توسط رشته کوه‌های زاگرس احاطه شده است، با حرکت به سمت داخل استان از ارتفاع این کوه‌ها کاسته شده و جای خود را به تپه ماهور می‌دهد. خوزستان شامل دو منطقه کوهستانی و جلگه‌ای است. دو پنجم کل مساحت این استان کوهستانی و سه پنجم آن جلگه‌ای می‌باشد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل سدهای در دست بهره‌برداری در حوضه رودخانه کارون است که بیشترین سهم را در تولید نیروی برق آبی کشور دارا هستند. در این منطقه هم اکنون ۶ سد مخزنی در حال بهره‌برداری می‌باشند (شکل ۱).



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

روش‌ها GA

الگوریتم ژنتیک^۱ یک مدل محاسباتی^۲ به حساب می‌آید که از مفهوم تکامل^۳ الهام گرفته شده است. در این نوع از الگوریتم‌ها، جواب‌های احتمالی^۴ یا جواب‌های

مسائل بهینه سازی برق آبی مورد استفاده قرار گیرد (Feng et al, 2020).

یک الگوریتم بهینه‌سازی چندوجهی جدید با بسط الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند باکتریایی یک‌وجهی پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی بهینه‌سازی هوشمند باکتریایی چند وجهی MBFO نیاز به هیچ پارامتر اضافی، برای تعیین از قبل ندارد. علاوه بر این، پیچیدگی این الگوریتم جدید کمتر از شکل تک‌وجهی آن است، زیرا مرحله حذف-پراکندگی مانند هر مرحله دیگر، مثل یک الگوریتم خوشه‌بندی یا جستجوی محلی، کنار گذاشته شده است. این الگوریتم با شش الگوریتم بهینه‌سازی چند وجهی بر روی نه تابع معیار چند وجهی رایج، مقایسه گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم MBFO در حل مسائل بهینه‌سازی چند وجهی مفید است و از روش‌های دیگر بهتر عمل می‌کند (Farshi and Orujpour, 2021). در مطالعه‌ای یک استراتژی کاندید موفق همراه با روش Runge-Kutta (ScsRUN) برای بهینه‌سازی سریع، دقیق و قابل اعتماد مسائل انرژی آبی چند مخزن ارائه شد. به طور ویژه، استراتژی کاندید موفق برای بهبود ثبات بین مراحل اکتشاف و بهره‌برداری استفاده گردید. روش بهینه‌سازی جدید توسعه‌یافته در این مطالعه با استفاده از ۲۹ تابع آزمایشی و یک مسئله پیچیده چند مخزن در دنیای واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ScsRUN از دیگر روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته از نظر کارایی و قابلیت اطمینان بهتر عمل می‌کند و می‌تواند به طور گسترده‌ای برای حل انواع مشکلات پیچیده استفاده شود (Chen et al, 2022). با توجه به اهمیت حوضه کارون و پتانسیل بالای تولید انرژی برق آبی به عنوان یک انرژی پاک در این حوضه، فراهم آوردن شرایطی برای افزایش تولید این انرژی بدون ایجاد مشکلات تأمین نیازهای پایین دست دارای اهمیت به‌سزایی است. از سوی دیگر با توجه به تعداد متغیرهای بسیار زیاد و پیچیدگی مدیریت بهره‌برداری در این حوضه،

³ Evolution

⁴ Potential Solutions

¹ Genetic Algorithms

² Computational Models

حامل متغیرهای θ مساله بهینه سازی مبتنی بر تابع هزینه $J(\theta)$ ، تعریف شده است. رفتار تغذیه‌ای باکتری‌ها شامل سه مرحله مهم می‌باشد: کموتاکسیس (چرخش و شنا)، تکثیر و حذف و پراکندگی. مرحله کموتاکسیس، حرکت یک باکتری E.Coli به شکل شنا یا چرخش و از طریق تاژک‌ها است. هر زمان که دم باکتری چرخش داشته باشد، باکتری جنبش کرده و در مسیر، شروع به حرکت می‌کند (جنبش). اگر در مسیری مقدار غذا بهتر بود باکتری در همان مسیر شنا می‌کند (شنا). در محیط طبیعی، این باکتری می‌تواند به دو طریق متفاوت حرکت کند که به طور کلی تمام عمر باکتری در جابه‌جایی بین این دو روش سپری می‌شود یا می‌تواند در طول بازه‌ای از زمان در یک جهت ثابت شنا کند و یا اینکه می‌تواند بچرخد. مرحله تکثیر، باکتری زمانی که شرایط بهتری را مهیا ببیند تکثیر می‌کند، که در غیر این صورت از مسیر عبور کرده و به سوی شرایط بهتر حرکت می‌کند. مرحله حذف و پراکندگی، زمانی رخ می‌دهد که تغییراتی مانند دمای هوا باعث کشته شدن باکتری‌ها و یا جابه‌جایی آنها به مکانی دیگر باشد. این پدیده می‌تواند روی حرکت کموتاکسیس اثر بگذارد (Passino, 2002).

دوره حیات باکتری‌ها را می‌توان به‌عنوان کموتاکس یا رفتار باکتری‌ها نام برد. این رفتار شامل N_s تکرار (طول دوره حیات) بوده که در آن باکتری‌ها برای جست‌وجوی مواد مغذی گام برمی‌دارند (Das et al, 2009).

$$\begin{aligned} & \theta^i(j+1, k, l) \\ & = \theta^i(j, k, l) \\ & + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \end{aligned} \quad (1)$$

$(j+1, k, l)$: موقعیت باکتری i در مرحله $(j+1)$ از کموتاکسیس و k امین مرحله تولید مثل و i امین مرحله حذف و پراکندگی است و N_s ، تعداد مراحل کموتاکسیس.. باکتری‌ها می‌توانند ماده‌ای از خود ترشح کنند که باعث جذب باکتری‌های دیگر به ناحیه‌ای خاص

کاندید^۱ و یا فرضیه‌های ممکن^۲ برای حل یک مساله درجهت ساختار داده‌ای، کروموزوم مانند^۳ کدبندی می‌شوند. الگوریتم ژنتیک از طریق انجام عملگرهای بازترکیب^۴ روی ساختارهای داده‌ای کروموزوم مانند، اطلاعات حیاتی ذخیره شده در این ساختارهای داده‌ای را حفظ کرده و روند استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک به این صورت می‌باشد: معرفی جواب‌های مسئله به عنوان کروموزوم، معرفی تابع برازندگی/هزینه (Fitness)، جمع‌آوری اولین جمعیت، معرفی عملگرهای انتخاب، معرفی عملگرهای تولید مثل. عمدتاً الگوریتم‌های ژنتیک یک عدد احتمال اتصال که بین $0/6$ و 1 می‌باشد، را دارند که احتمال به وجود آمدن فرزند را نشان می‌دهد. کروموزوم‌ها با این احتمال دوباره با هم ترکیب می‌شوند. اتصال 2 کروموزوم باعث به وجود آمدن فرزند می‌شود، که به نسل بعدی اضافه می‌شوند. این فرآیند تکرار می‌شود تا زمانی که کاندیدهای مناسبی برای جواب در نسل بعدی پیدا شوند. مرحله بعد تغییر دادن فرزندان جدید است. الگوریتم‌های ژنتیک یک احتمال تغییر کوچک و ثابت در حدود $0/01$ یا کمتر دارند. بر این اساس، کروموزوم‌های فرزند می‌توانند به‌طور تصادفی تغییر یا جهش در بیت‌های کروموزوم پیدا کنند، این فرآیند باعث می‌شود نسل جدیدی از کروموزوم‌ها که با نسل قبلی تفاوت دارند، به وجود آیند و برای نسل بعدی هم تکرار خواهند شد. جفت‌ها برای ترکیب انتخاب می‌شوند، جمعیت نسل سوم به وجود می‌آید و این فرآیند تکرار می‌شود تا این که به آخرین مرحله برسیم (Mathew, 2003; Moghadasi et al., 2022).

BFO

BFO با الهام از رفتار جست‌وجوی باکتری‌های E.Coli توسط پاسینو^۵ در سال ۲۰۰۲ ارائه شد. در این الگوریتم، باکتری‌ها به صورت بردارهای فضایی D بعدی

⁴ Recombination Operators

⁵ Passino

¹ Candidate Solutions

² Possible Hypothesis

³ Chromosome-like

ایستادند، میزان سلامت باکتری‌ها که مواد مغذی در طول حیات خود دریافت کرده‌اند بر اساس رابطه ۴ برای همه باکتری‌ها محاسبه می‌شوند. سپس تعدادی از باکتری‌ها با بیشترین مجموع تابع هزینه می‌میرند (حذف می‌شوند) و به همان تعداد از بهترین باکتری‌ها تکثیر می‌شوند (به دو باکتری تبدیل می‌شوند).

$$J_{health}^i = \sum_{j=1}^{Nc+1} J(i, j, k, l) \quad (4)$$

در شکل (۲) الگوریتم روش کاوش باکتری نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳)، پیکره‌بندی شماتیک سیستم منابع آبی اتصال سیستم‌های چند مخزنه سدهای درون حوضه کارون و نحوه ارتباط ورودی-خروجی آنها نشان داده شده است. در انتها مجموع حقایق پایین دست که توسط شبکه‌های آبیاری انتقال و توزیع می‌شود با یک مربع سبز رنگ مشخص گردیده است.

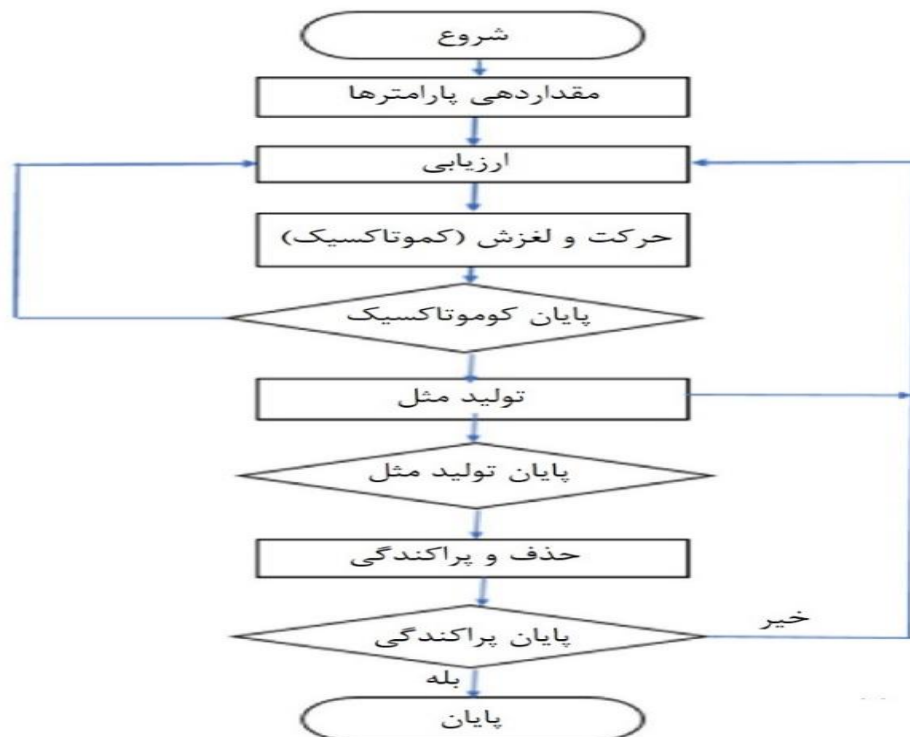
شود. بر اساس این ارتباط در رابطه به‌روز رسانی تابع هزینه هر باکتری پس از حرکت آن طبق رابطه زیر باید مقدار $J_{cc}(\theta, \pi(j, k, l))$ نیز به آن افزوده می‌شود که نماینده‌ای از میزان نیروهای جاذب و دافع بین باکتری‌ها در جمعیت است. (θ یک بردار در فضای D).

$$J(i, j, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}(\theta, p^i(j, k, l)) \quad (2)$$

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^s J_{cc}^i(\theta, \theta^i(j, k, l)) \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^s [-d_{attract} \exp(-w_{attract} \sum_{m=1}^p (\theta_m, \theta_m^i)^2)] + \sum_{i=1}^s [h_{repellant} \exp(-w_{repellant} \sum_{m=1}^p (\theta_m, \theta_m^i)^2)]$$

که در آن $d_{attract}$ و $w_{attract}$ ضریب جاذبه و $h_{repellant}$ و $w_{repellant}$ ضریب دافعه می‌باشند (Das et al. 2009). پس از آنکه باکتری‌ها از حرکت



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم کاوش باکتری

که می‌توانند در بهینه‌سازی منابع آب چند مخزنه با هدف تولید انرژی برق‌آبی بیشتر مد نظر قرار گیرند؛ حداقل و حداکثر حجم مخزن، ظرفیت تولید برق هر سد، بازده

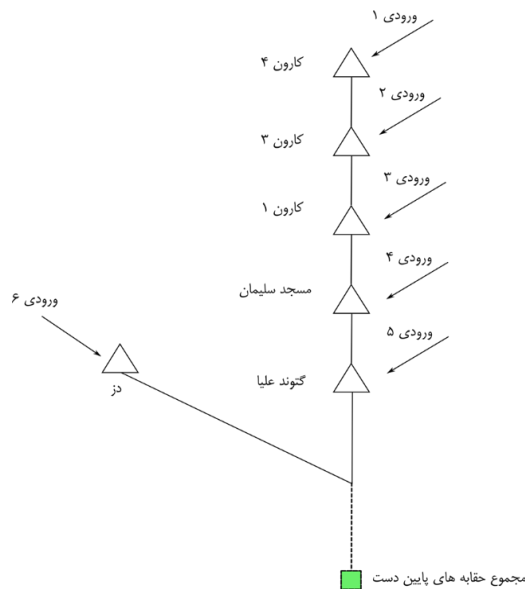
هدف، تولید حداکثر انرژی برق می‌باشد به نحوی که خللی در تأمین حقایق پایین دست هر سد و در مجموع حقایق‌های حوضه کارون ایجاد نشود. پارامترهایی



تولید برق، نیاز آبی پایین دست و تراز آب در شرایط مختلف می‌باشد. همچنین در جدول (۱) خلاصه‌ای از مشخصات سدهای مورد مطالعه در حوضه کارون بیان گردیده است.

جدول (۱): خلاصه‌ای از مشخصات سدهای مورد مطالعه

نام سد	حجم مخزن سد (میلیون متر مکعب؛ MCM)	تراز نرمال (متر بالای سطح دریا؛ masl)	ظرفیت اسمی نیروگاه (مگاوات؛ MW)	بازدهی نیروگاه (درصد؛ %)
کارون ۴	۲۱۹۰	۱۰۲۵	۱۰۰۰	۹۲
کارون ۳	۲۹۷۰	۸۴۵	۲۰۰۰	۹۴
کارون ۱ (شهید عباسپور)	۲۹۹۷	۵۳۰	۲۰۰۰	۹۰
گذار لندر	۲۱۱	۳۷۰/۲	۲۰۰۰	۹۲
گتوند علیا	۴۰۹۷	۲۳۰	۲۰۰۰	۹۳
دز	۲۸۶۴	۳۵۲/۵	۵۲۰	۸۹



شکل (۳): پیکره‌بندی شماتیک سیستم چند مخزنه حوضه کارون

$$MaxY(x_n) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (\rho \gamma O_{t,n} H_{t,n}) \quad (۵)$$

تابع هدف

که در آن Y ، تابع هدف یعنی مجموع انرژی تولیدی (مگاوات)، N تعداد مخازن سیستم، T تعداد دوره‌های

تابع هدف برای بیشینه کردن تولید انرژی برق آبی سدهای حوضه کارون به صورت رابطه (۵) ارائه شده است.

$$S_{min-n} \leq S_{t,n} \leq S_{max-n} \quad (۸)$$

که در آن S_{min-n} مقدار کمینه حجم ذخیره هر سد n می‌باشد.

محدودیت اعتمادپذیری

منظور از اعتمادپذیری (RE)، اعتماد از تأمین آب در کل دوره‌های زمانی مورد نظر از محل سد می‌باشد که می‌بایست از یک میزان کمینه بیشتر باشد. اعتمادپذیری از رابطه (۹) قابل تعریف و محدودیت آن با رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$RE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M d_i}{T} \quad (۹)$$

که در آن i نوع مصرف که باید تأمین شود، l شمارنده تعداد رویدادهای عدم تأمین نیاز، M تعداد کل این رویدادها، d_i مدت زمانی و T کل گام زمانی می‌باشد.

$$RE_i \geq RE_{req/i} \quad (۱۰)$$

که در آن $RE_{req/i}$ ، میزان اعتمادپذیری مورد نیاز برای تأمین هر نوع مصرف می‌باشد. برای کنترل اعتمادپذیری و اطمینان جهت تأمین نیازهای پایین دست، از روش تابع جریمه (p) استفاده شد (رابطه ۱۱).

$$p = \begin{cases} 1 & RE_i \geq RE_{req/i} \\ RE_{req/i} - RE_i + \mu & RE_i < RE_{req/i} \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در آن μ ضریب اهمیت شناوری می‌باشد. این ضریب برای تنظیم ارتباط بین اهمیت تأمین قطعی نیازهای پایین دست با حداکثر کردن تولید انرژی برقی است (که در این پژوهش $\mu = 1$ در نظر گرفته شد). بنابراین تابع اصلاح شده را می‌توان به صورت رابطه (۱۲) ارائه کرد.

$$\text{Maximize} \left(\frac{Y}{\sum p} \right) \quad (۱۲)$$

تابع محک استاندارد

برای مقایسه و بررسی کارایی روش‌های استفاده شده در این پژوهش، از تابع محک Rosenbrock $R(x)$ با ۲، ۱۰

ماهانه شبیه‌سازی، ρ راندمان نیروگاه، $O_{t,n}$ میزان رهاسازی جریان از مخزن n جهت مصارف مختلف، $H_{t,n}$ تراز مخزن n در دوره رهاسازی t و x حداقل تراز بهره‌برداری برای هر کدام از مخازن n می‌باشد. محدودیت تابع هدف، محدودیت بیلان، سرریز، ذخیره و اعتمادپذیری می‌باشد. شایان ذکر است نیازهای پایین دست از جمله نیاز کشاورزی در دو رویکرد کلی می‌تواند به صورت یکنواخت یا متفاوت در مراحل رشد در نظر گرفته شود که در مقاله حاضر به صورت یکنواخت لحاظ شده است (Anvari et al., 2017; Anvari et al., 2014). همچنین دوره مدل‌سازی در این پژوهش ۴۱ سال است که شامل دوره‌های اقلیمی خشک، تر و نرمال می‌باشد.

محدودیت بیلان

محدودیت بیلان به نحوی است که، رابطه بیلان در مخزن طبق معادله (۶) رعایت شود.

$$S_{t+1,n} - S_{t,n} = I_{t,n} - ET_{t,n} - O_{t,n} - OS_{t,n} \quad (۶)$$

که در آن S میزان ذخیره در مخزن، I میزان ورودی به مخزن، ET میزان تبخیر و نشست از مخزن سد و OS میزان خروجی به صورت سرریز از مخزن سد می‌باشد.

محدودیت سرریز

سرریز زمانی رخ می‌دهد که میزان ورودی از میزان ظرفیت نگهداشت مخزن سد بیشتر شود بنابراین می‌توان رابطه (۷) را برای محدودیت سرریز ارائه کرد.

$$OS_{t,n} = \max \{0, (S_{t+1,n} - S_{max-n})\} \quad (۷)$$

که در آن S_{max-n} بیشینه ظرفیت ذخیره هر مخزن n می‌باشد.

محدودیت ذخیره

ذخیره هر مخزن در محدوده حداقل و حداکثر مقدار قرار می‌گیرد مطابق رابطه (۸).

$$R_3(x) = \sum_{k=1}^r 100 \times (x_{k+1} - x_k^2)^{50} + (1 - x_k)^{50} \quad (15)$$

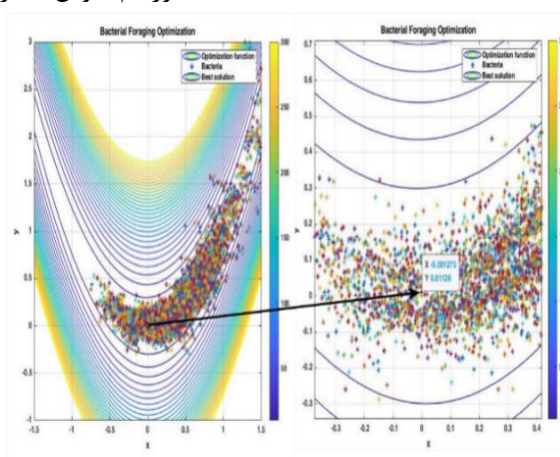
سیستم مورد استفاده الگوریتم‌های بهینه‌یابی

در این پژوهش از سیستمی با مشخصات CPU Core i7 2-3 Ghz استفاده شد. این مشخصات برای معیار مقایسه سرعت پاسخگویی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کاوش باکتری مورد استفاده قرار گرفت

و ۵۰ بعد استفاده شده است (به ترتیب رابطه ۱۳، ۱۴ و ۱۵). این تابع دارای مینیمم مطلق (۰ و ۰) می‌باشد.

$$R_1(x) = \sum_{k=1}^r 100 \times (x_{k+1} - x_k^2)^2 + (1 - x_k)^2 \quad (13)$$

$$R_2(x) = \sum_{k=1}^r 100 \times (x_{k+1} - x_k^2)^{10} + (1 - x_k)^{10} \quad (14)$$



شکل (۴) بررسی الگوریتم BFO با استفاده از تابع محک Rosenbrock

شده است. سپس بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار انرژی برق‌آبی تولیدی از شاخه کارون و از شاخه دز مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

نتایج استفاده از الگوریتم ژنتیک

با انتخاب پارامترهای اولیه همچون جمعیت اولیه، احتمال ترویج، جهش و دقت (همگرایی) به ترتیب برابر با، ۵۰، ۰/۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۰۰۲ الگوریتم ژنتیک در محیط برنامه‌نویسی متلب پیاده شد و نتایج جدول (۲) دریافت گردید.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج استفاده از روش‌های الگوریتم کاوش باکتری و الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی تولید برق با قید اعتماد پذیری تأمین آب پایین دست و شرایط مخزن برای دوره ۴۱ ساله ارائه شده است. در این راستا حداقل تراز مخازن سدها برای تولید انرژی بیشینه سالانه ارائه شده، سپس میانگین ماهانه انرژی تولیدی به صورت نمودار برای هر کدام از روش‌ها گزارش شده است. همچنین در این بخش به بحث و تفسیر نتایج حاصله از دو الگوریتم استفاده شده، یعنی GA و BFO پرداخته



جدول (۲): مشخصات نتایج خروجی از الگوریتم ژنتیک برای تولید بیشترین انرژی برق آبی

نام سد	تراز حداقل بهینه شده (masl)	انرژی بیشینه در سال (GW/H)	دبی خروجی از نیروگاه (MCM)
کارون ۴	۹۸۵/۴	۲۰۱۰/۳	۱۵۵/۰
کارون ۳	۸۱۵/۲	۳۳۹۵/۲	۲۶۰/۴
کارون ۱	۵۱۰/۳	۳۴۸۰/۱	۳۰۶/۳
گذار لندر	۳۷۵/۴	۳۵۰۳/۳	۳۴۰/۸
گتوند علیا	۱۹۲/۴	۳۳۲۵/۶	۳۶۶/۲
دز	۳۱۲/۶	۲۶۳۲/۴	۲۰۶/۷
مجموع		۱۸۳۴۶/۹	-

= را نشان می‌دهد که با توجه به مینیمم مطلق آن یعنی (۰ و ۰)، نشان از نزدیکی نتایج به حد بهینه می‌باشد.

مقایسه زمان پاسخ GA و BFO

همچنین طبق جدول (۳) مشخص است، در ابعاد بالای تابع محک Rosenbrock، الگوریتم ژنتیک در یافتن مقدار مینیمم مطلق دچار ناپایداری شده است، در مقابل الگوریتم کاوش باکتری علاوه بر سریع‌تر بودن، قابلیت یافتن دقیق مینیمم مطلق در ابعاد بسیار بالا را که در سیستم‌های پیچیده منابع آبی مشهود است، داراست.

نتایج استفاده از الگوریتم کاوش باکتری (BFO)

در این پژوهش برای بررسی کارایی الگوریتم کاوش باکتری ابتدا با استفاده از یک تابع محک، در اینجا تابع Rosenbrock، سنجیده شد. این تابع یک تابع مقعر است که مینیمم مطلق آن در قعر این تابع، یعنی (۰ و ۰)، رخ می‌دهد، که در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است، نتایج به دست آمده از محاسبه الگوریتم مد نظر در تابع محک استاندارد Rosenbrock مقادیر $X = -0/01275$ و $Y = 0/01126$

جدول (۳): مقایسه زمان پاسخ و مقدار بهینه در GA و BFO

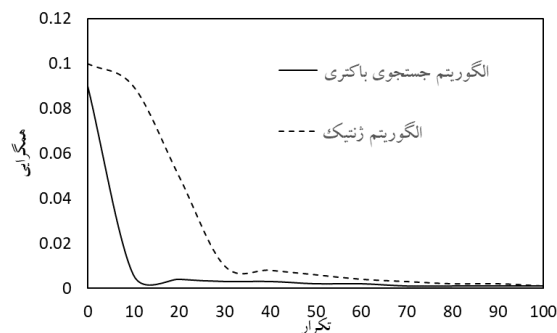
تابع	بعد	الگوریتم ژنتیک		الگوریتم باکتری	
		مقدار مینیمم مطلق	زمان s	مقدار بهینه	زمان s
Rosenbrock	۲	۰	۱۰/۲	۰	۷/۵
Rosenbrock	۱۰	۰	۲۰/۱	۰/۰۰۵	۱۵/۶
Rosenbrock	۵۰	۰	۲۶/۴۳	۰/۰۳۵	۲۷/۲

جدول (۴): مشخصات نتایج خروجی از BFO برای تولید بیشترین انرژی برق آبی

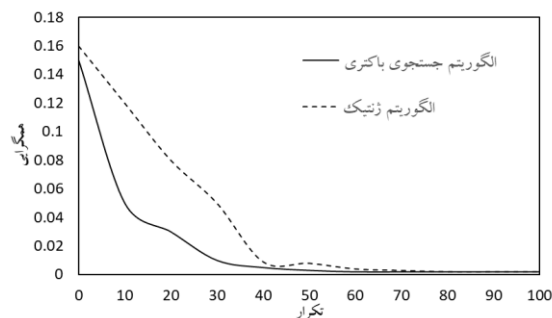
نام سد	تراز حداقل بهبینه شده (masl)	انرژی بیشینه در سال (GW/H)	دبی خروجی از نیروگاه (MCM)
کارون ۴	۹۸۰/۲	۲۰۱۲/۴	۱۶۰/۰
کارون ۳	۸۰۰/۱	۳۴۰۵/۴	۲۶۴/۲
کارون ۱	۴۹۸/۶	۳۵۱۰/۵	۳۱۶/۱
گدار لندر	۳۸۵/۴	۳۵۲۱/۳	۳۴۹/۸
گتوند علیا	۲۰۲/۵	۳۳۳۶/۶	۳۷۰/۴
دز	۳۰۶/۶	۲۶۴۵/۲	۲۱۲/۳
مجموع		۱۸۴۳۱/۴	-

تکرار استفاده شده است. شکل (۵) مربوط به تابع محک Rosenbrock دوبعدی می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) دیده می‌شود در بعدهای ۱۰ و ۵۰ و در تکرارهای بالا نتایج دو الگوریتم شبیه به هم می‌شود.

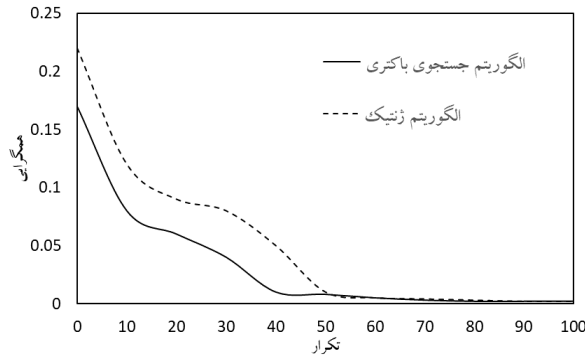
در شکل (۵) همگرایی پاسخ دو روش استفاده شده در تعداد مرتبه (برای GA) و تعداد کموتاکسیس (BFO) نشانگر همگرایی سریع‌تر روش الگوریتم کاوش باکتری می‌باشد. برای این کار از تابع محک Rosenbrock در ۱۰۰



شکل (۵): مقایسه همگرایی GA و BFO در ۱۰۰ تکرار در یافتن مینیمم مطلق تابع محک Rosenbrock دو بعدی



شکل (۶): مقایسه همگرایی GA و BFO در ۱۰۰ تکرار در یافتن مینیمم مطلق تابع محک Rosenbrock ۱۰ بعدی

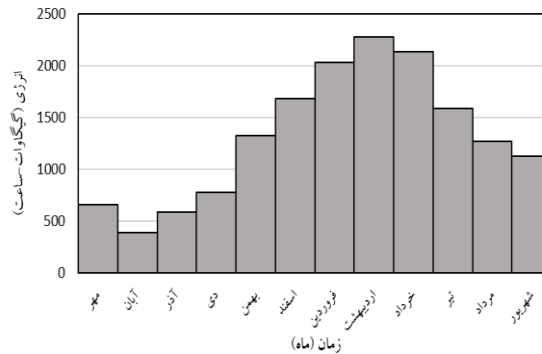


شکل (۷): مقایسه همگرایی GA و BFO در ۱۰۰ تکرار در یافتن مینیمم مطلق تابع محک Rosenbrock ۵۰ بعدی

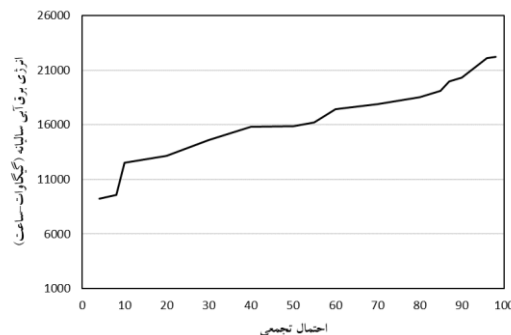
به دست آمده از دو الگوریتم مورد نیاز تفاوت مقادیر محاسبه شده بر اساس قیمت نیز مورد بررسی قرار گرفت، که با توجه به قیمت تقریبی ۱۶۰۰۰ ریال برای خرید هر کیلووات ساعت برق در بورس اوراق بهادار قیمت برق تولیدی مبتنی بر GA ۲۹۳،۵۵۲ هزار میلیارد ریال و مبتنی بر BFO ۲۹۴،۸۹۶ هزار میلیارد ریال خواهد بود که اختلاف قابل توجهی را نشان می‌دهد. در شکل (۸) میانگین تولید انرژی برق آبی سدهای شاخه کارون و در شکل (۹) احتمال تجمعی تولید انرژی برق آبی سدهای واقع شده در حوضه کارون از شاخه کارون نمایش داده شده است.

توانایی تولید انرژی برق آبی در حوضه کارون

با در نظر گرفتن نتایج GA و BFO، به ترتیب توانایی تولید انرژی برق آبی سالیانه ۱۸۳۴۷ و ۱۸۴۳۱ گیگاوات-ساعت با ۷۵٪ اطمینان پذیری تأمین آب پایین دست وجود دارد، که سهم بیشتر آن مربوط به سد گذارلندر بوده و در رتبه‌های بعد سد کارون ۱ (شهید عباسپور)، سد کارون ۳، سد گتوند علیا و سد کارون ۴ از شاخه کارون و سهم سد دز از شاخه دز، با در نظر گرفتن الگوریتم ژنتیک ۲۶۳۲/۴ و با توجه به نتایج الگوریتم کاوش باکتری ۲۶۴۵/۲ گیگاوات-ساعت می‌باشد. شایان ذکر است برای مقایسه بهتر اختلاف



شکل (۸): مقادیر انرژی خروجی شاخه کارون در طول سال آبی بر اساس BFO



شکل (۹): احتمال تجمعی تولید انرژی برق آبی از شاخه کارون واقع در حوضه کارون بر اساس BFO

علیا و دز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین قیودی چون اعتمادپذیری مطلوب برای تأمین نیازهای آبی پایین دست سدها مد نظر واقع شد. نتایج استفاده از الگوریتم ژنتیک و کاوش باکتری نشان داد، سیستم چند مخزنه کارون ضمن تأمین نیاز پایین دست (قید ۷۵ درصدی اعتمادپذیری) توانایی تولید انرژی برق آبی با میانگین ۱۸۳۴۷ و ۱۸۴۳۱ گیگاوات-ساعت (محاسبه شده به ترتیب از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کاوش باکتری) خواهد داشت. با توجه به اینکه در ابعاد بالاتر و پیچیده شدن مسئله، الگوریتم ژنتیک انحراف زیادی نشان داد، این روش با بیشتر کردن جزئیات سیستم منابع آبی چندان قابل اعتماد نیست اما در این پژوهش نتایج قابل قبولی از الگوریتم کاوش باکتری دریافت شد. در صورتی که جزئیات شبکه‌های آبیاری و تمام پتانسیل‌های آبی حوضه در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شود به دلیل بالا رفتن پیچیدگی مسئله با توجه به پاسخ‌های دقیق و سریع دریافت شده در این پژوهش از الگوریتم کاوش باکتری، این الگوریتم پیشنهاد می‌شود

همان‌طور که از شکل (۸) قابل مشاهده است در ۵۰ درصد مواقع مقدار حدوداً ۱۶۰۰۰ گیگاوات-ساعت (۱۵۸۵۶ گیگاوات-ساعت) در سال از شاخه کارون نیروی برق آبی قابل تولید است و حدود ۸۰ درصد انرژی تولیدی بین ۱۲۵۳۶ تا ۲۰۲۹۷ گیگاوات-ساعت در سال است که توزیع پراکندگی ماهانه آن در شکل (۸) قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های بهینه‌یابی در سیستم‌های منابع آبی به‌خصوص در شرایط بحرانی از ضرورت‌های مدیریت منابع آبی است که به‌توان علاوه بر تأمین نیازهای پایین دست هر سد (از جمله نیاز زیست‌محیطی، کشاورزی، صنعت و شرب)، تولید انرژی برق آبی را که یکی از انرژی‌های پاک می‌باشد به حداکثر مطلوب رساند. در این راستا، با استفاده از الگوریتم‌های کاوش باکتری و ژنتیک پیشینه کردن تولید انرژی برق آبی در سیستم چند مخزنه کارون، شامل مخازن سدهای کارون ۴، کارون ۳، شهید عباسپور، گذارلندر، گتوند

منابع

- اکبری فرد، س.، م. رشیدی، ک. قادری. ۱۴۰۰. بهره‌برداری بهینه از انرژی برق آبی مخازن با استفاده از الگوریتم ازدحام پروانه (مطالعه موردی: سد کارون ۴). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ش ۱۱، دوره ۴۴، ص ۶۹-۸۶.
- پرهیزکاری، م.، ح. مازندرانی‌زاده، حامد. ۱۴۰۰. بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن برق آبی-مطالعه موردی: سد کارون ۵. نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی، سال ۸، ش ۳۰، ۱-۱۰.
- جمال‌منش، آ. ا. سیفی، م. خداپرست مشهدی، م. ع. فلاحی. ۱۳۹۹. ارائه یک مدل غیرخطی برای حداکثرسازی سود نیروگاه‌های برق آبی در بلند مدت. فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی. شماره ۶۷، ۱-۳۲.
- فاطمی، ا.، م. پاک‌بین، م. حافظ پرست مودت. ۱۳۹۵. توسعه مدل شبیه‌سازی تولید انرژی برق آبی مخزن با رویکردی جدید. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ش ۴۶، دوره ۳، ص ۸۹-۹۹.
- قدمی، م.، ب. قهرمان، م. ر. شریفی، ح. رجبی مشهدی. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک. تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۵، دوره ۲، ۱۵-۱.
- کاکاوند، ع.، ب. شاهی‌نژاد، ح. ترابی‌پوده. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد مدل ویپ در تحلیل انرژی برق آبی (مطالعه موردی: سد مخزنی سراب تلخ- لرستان). فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۹، ش ۳۴، ص ۱۴۸-۱۶۵.
- گودرزی، م.، ا. فاطمی، م. حافظ پرست مودت. ۱۴۰۰. بررسی اثر توزیع احتمالاتی جریان بر بهینه‌سازی انرژی برق آبی مخزن سد مارون. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ۱۲، ش ۴۵، ص ۱۹۲-۲۰۹.
- یاوری، ح. ر.، ا. رباطی، ن. جلال کمالی. ۱۴۰۱. بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برق آبی از مخازن با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی WCA (مطالعه موردی: سد جیرفت) مجله پژوهش آب ایران، ش ۳، ۶۱-۷۵.

Ahmadianfar, I., Samadi-Koucheksaraee, A., and Bozorg-Haddad, O. 2017, "Extracting Optimal Policies of Hydropower Multi-Reservoir Systems Utilizing Enhanced Differential Evolution Algorithm". *Water Resources Management*. 31(14): 4375-4397.

Anvari, S., Mousavi, S., J., Morid, S. 2017, Stochastic dynamic programming-based approach for optimal irrigation scheduling under restricted water availability conditions, *Irrig. and Drain*. 66:492-500.

Anvari, S., Mousavi, S., J., Morid, S. 2014, Sampling/stochastic dynamic programming for optimal operation of multi-purpose reservoirs using artificial neural network-based ensemble streamflow predictions, *Journal of Hydroinformatics*, 16(4): 907-921.

Bozorg-Haddad, O., Janbaz, M., and Loáiciga, H.A. 2016, Application of the gravity search algorithm to multi-reservoir operation optimization. *Advances in Water Resources*. 98: 173-185.

Chen, H., Ahmadianfar, I., Liang, G., Bakhshizadeh, H., Azad, B., and Chu, X, 2022, A successful candidate strategy with Runge-Kutta optimization for multi-hydropower reservoir optimization, *Expert Systems with Applications*, , Issue C.

Das, S. Biswas, A. Dasgupta, S. and Abraham, A. 2009, Bacterial Foraging Optimization Algorithm: Theoretical Foundations, Analysis, and Applications. *Department of Electronics and Telecommunication Engineering*, 3: 23-55.

Farshi, T., R., and Orujpour, M, 2021, " A multi-modal bacterial foraging optimization algorithm" *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12: 10035–10049.

Feng Z., Niu W., Liu S., Luo B., Miao S., Liu K., 2020, Multiple hydropower reservoirs operation optimization by adaptive mutation sine cosine algorithm based on neighborhood search and simplex search strategies, *Journal of Hydrology*, 590: 125223. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125223>

Mathew, T.,V., 2003, " Genetic Algorithm" *Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India*

Moghadasi, M., Anvari, S., Akhondi, N., 2022, A trade-of analysis of adaptive and non-adaptive future optimized rule curves based on simulation algorithm and hedging rules, *journal of theoretical and applied climatology*, 148:65–78, <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03930-y>

Passino, K. 2002, Biomimicry of Bacterial Foraging for Distributed Optimization and Control. *IEEE Control Syst Mag.* 22 (3): 52–67

Reddy, M.J., and Kumar, D.N. 2006, "Optimal reservoir operation using multiobjective evolutionary algorithm", *Water Resources Management*. 20(6): 861-878.

Samadi-Koucheksaraee, A., Ahmadianfar, I., Bozorg-Haddad, O., and Asghari-Pari, S.A. 2018, "Gradient Evolution Optimization Algorithm to Optimize Reservoir Operation Systems". *Water Resources Management*. 33(2): 603-625.

Sinha, A., K., and Anand, A, 2020, "Optimizing supply chain network for perishable products using improved bacteria foraging algorithm" *Applied Soft Computing*, , Issue C.

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