

Research Paper

Optimization of Multi-Reservoir System Operation Using Symbiotic Organisms Search Algorithm Based on the Fitness-Distance-Balance

Aliakbar Rezaei-Estakhrouei¹, Navid Jalalkamali^{2*}, Mehdi Momeniroghabadi³

¹ PhD. Candidate of water Resources Eng. And Management, Department of Civil Eng., Shahid Soleimani University, Kerman, Iran.

² Assistant Professor, Department of Water Eng., Shahid Soleimani University, Kerman, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Civil Eng., Shahid Soleimani University, Kerman, Iran.



10.22125/IWE.2021.260108.1448

Received:
December.01.2020
Accepted:
April.12.2021
Available online:
October.05.2022

Keywords:
Keywords: FDB-SOS Algorithm, Optimal Operation, Halilrood Basin, Metaheuristic algorithms

Abstract

In recent decades, metaheuristic algorithms have been successfully applied in various aspects of water resource engineering and management issues, especially in reservoirs' optimal operation. In this paper, a new method based on Symbiotic Organisms Search using the Fitness-Distance-Balance (FDB-SOS) algorithm has been developed for modeling optimal operation of complex multi reservoir system Baft, Safarood, and Jiroft reservoirs of Halilrood basin situated at latitude 56°51'-61°30' N and longitude 26°18'-29°30' E. The system consists of 3 different agricultural irrigation demands allocation with environmental prioritize in the long-term (from 2000 to 2019) approach. The developed model was used to solve the complex multi-reservoir system operating Halilrood basin. The new FDB-SOS algorithm results were compared with other developed evolutionary algorithms, including Harmony Search Algorithm (HS) and Imperialist competitive algorithm (ICA). Results showed the new FDB-SOS algorithm's sustainability index was obtained 87.23, 74.34, and 96.03 percent of downstream demands for Baft, Safarood, and Jiroft reservoirs. The finding revealed that the new FDB-SOS algorithm was the superior algorithm in optimal operation of the multi-reservoir system.

1. Introduction

The optimal operation of dam reservoirs is one of the priorities of water resources programming and management. Due to water demands of various regions, sometimes a storage system is designed

* **Corresponding Author:** Navid Jalalkamali

Address: Department of Water Eng., Shahid Soleimani University, Kerman, Iran,

Email: njalalkamali@iauk.ac.ir

Tel: +989133407201

including multiple reservoirs on the river, or a network of reservoirs on the rivers and branches. With advances made in various branches of water resources science and engineering, the design, programming and operation of multi-reservoir water resources systems has been made possible using various methods.

A comprehensive evaluation of different optimization methods and their applications in water engineering, especially reservoir operation, is presented in studies by Yeh (1985), Simonovic (1992) and Labadie (2004). In many engineering problems, due to the complexity of the type of problem studied and the objective functions, and several local and global optimal points, classical methods are unable to distinguish between them in order to find global optimal points. In recent years, with development of soft computing-based methods that often perform searches based on the initial population, in very complex problems approximate solutions can be found very close to the global optimal. These methods include genetic algorithms (GA) (Chang *et al.*, 2005), water cycle algorithm (WCA) (Qaderi *et al.*, 2018), shark algorithm (SA) (Ehteram *et al.*, 2017), symbiotic organisms search (SOS) (Bozorg-Haddad *et al.*, 2017; Akbarifard and Radmanesh, 2018), particle swarm optimization (PSO). Tejani *et al.* (2016) used symbiotic organisms search algorithm to optimize the construct design. The results showed that SOS algorithm performed better and more efficiently compared to other algorithms studied.

Due to the complex nature of our hydro-system, in this study, the SOS algorithm was modified and its efficiency was investigated for optimizing the operation of the system.

2. Materials and Methods

Halilrud basin is one of the main sub-basins of Hamun-Jazmurian which is located in the southeast of Iran and plays a major role in producing its annual flow. It is located in the western part of Hamun-Jazmurian, $56^{\circ} 51'$ to $61^{\circ} 30'$ E longitude and $26^{\circ} 18'$ to $29^{\circ} 30'$ N latitude. Precipitation in this basin varies from about 600 mm per year in the northern highlands of the basin to about 100 mm per year in the southern lowlands, while the amount of evaporation is from 1800 mm in the highlands to 4400 mm in the lowlands. Several reservoirs have been constructed in this basin and a number of others are under study.

With construction of the several dams, inflows through rivers to Jazmurian Wetland, in the outlet of basin, have been almost cut off. improper environmental water allocation has caused several crises namely significant fall of groundwater level and disappearing of Jazmurian wetland. For this reason, it is necessary to conduct management studies on surface water resources and different scenarios of optimal use of the existing resources and dams, which is one of the objectives of this study. Figure 1 demonstrates the schematic view of the Halilrud multi reservoir system with information of each reservoir such as storage volume, upstream/downstream demand and various objectives.

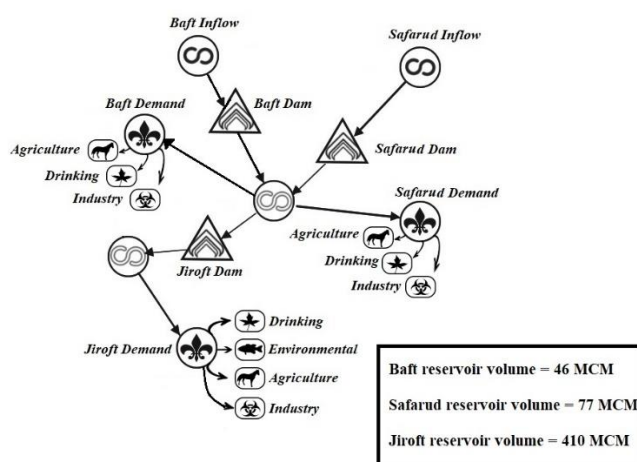


Figure 1- Schematic view of Halilrud multi reservoir system

Symbiotic Organism Search (SOS) Algorithm is a meta-heuristic algorithm based on interactional behavior simulation between organisms (Cheng and Prayogo, 2014). The organisms rarely live in isolation because they rely on other species for life and even survival. This relationship based on trust is known as symbiosis. The outstanding performance of SOS algorithm makes it one of the most powerful meta-heuristic algorithms. In order to evaluate efficiency of the studied algorithms in the problem of optimal operation of the reservoir system, the reservoir performance indicators including temporal and volumetric reliability, vulnerability and resilience were used and finally sustainability index was defined to select the best scenario.

In this study, the objective function is defined as minimizing non-supply applied to a specific demand. The formulation of the objective function and constraints are as equation 1.

$$\text{Minimize } F(Re) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 (De_{i,t} - Re_{i,t})^2 + Penalty \quad (1)$$

where, $F(Re)$ is the value of the objective function (non-supply), $Re_{i,t}$ ($106 \times m3$) is the volume of release from the i th reservoir during period t , $De_{i,t}$ ($106 \times m3$) is the downstream demand of the i th reservoir during period t , T (month) is the total number of operation periods, i is the reservoir index where $i = 1$ is the reservoir of Baft dam, $i = 2$ is the reservoir of Safarud dam and $i = 3$ is the reservoir of Jiroft dam. Penalty is the penalty function that is applied to the objective function if the reservoir i volume is not satisfied in month t .

The constraints of the multi-reservoir system studied are given in Equations (2) to (9).

The constraint on overflow volume and evaporation loss applies as follows:

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{max,i} + S_{min,i} & \text{if } S_{i,t} > (S_{max,i} - S_{min,i}) \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \leq (S_{max,i} - S_{min,i}) \end{cases} \quad (2)$$

$$Loss_{i,t} = A_{i,t} \times Ev_{i,t} \quad (3)$$

$$A_{i,t} = a_i + b_i \times S_{i,t} + c_i \times S_{i,t}^2 \quad (4)$$

where, $Sp_{i,t}$ is water overflow from the i th reservoir during period t ($106 \times m3$), $S_{i,t}$ is the storages of the i th reservoir at the beginning of period t ($106 \times m3$), $S_{max,i}$ is the maximum storage in the i th reservoir during period t ($106 \times m3$), $S_{min,i}$ is the minimum storage in the i th reservoir during period t ($106 \times m3$), $Loss_{i,t}$ is loss from the i th reservoir surface during period t ($106 \times m3$) as evaporation considering the area-storage-height functions of the reservoir calculated based on Equation (4) where $A_{i,t}$ is area of the i th reservoir during period t (km^2), $Ev_{i,t}$ is net evaporation (evaporation minus precipitation) from the i th reservoir during the period t (m) and a_i , b_i and c_i are coefficients of storage-area relation for reservoir i (dimensionless).

At all stages of optimization of reservoir operation, a mass balance should be established between the input and output values and the storage volume of the reservoir.

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Sp_{1,t} - Loss_{1,t} \quad (5)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} - Re_{2,t} - Sp_{2,t} - Loss_{2,t} \quad (6)$$

$$S_{3,t+1} = S_{3,t} + Q_{3,t} + Sp_{1,t} + Sp_{2,t} + Re_{min 1,t} + Re_{min 2,t} - Re_{3,t} - Sp_{3,t} - Loss_{3,t} \quad (7)$$

where, $S_{i,t+1}$ is the storage of the i th reservoir at the end of period t ($106 \times m3$) and $Q_{i,t}$ is volume of water inflow into the i th reservoir during period t ($106 \times m3$).

The constraint on reservoir release can be expressed as:

$$Re_{min i,t} \leq Re_{i,t} \leq Re_{max i,t} \quad (8)$$

Where, $Re_{min i,t}$ is the minimum allowable release from the i th reservoir during period t ($106 \times m3$) ($Re_{min i,t}$ is equal to the environmental demand) and $Re_{max i,t}$ is the maximum allowable release from the i th reservoir during period t ($106 \times m3$) ($Re_{max i,t}$ is equal to the total demand).

The reservoir storage should not be less than the minimum storage ($S_{min,i}$) and more than the maximum storage ($S_{max,i}$). For this purpose, a penalty function is defined in Equation (9). Since the algorithm

tries to minimize the objective function, the penalty function is added if the constraints of reservoirs storage are not met.

$$Penalty = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 (S_{i,t} - S_{min,i})^2 & \text{if } S_{i,t} < S_{min,i} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 (S_{i,t} - S_{max,i})^2 & \text{if } S_{i,t} > S_{max,i} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \geq S_{min,i} \text{ and } S_{i,t} \leq S_{max,i} \end{cases} \quad (9)$$

Using this model, the problem is solved during a long period of 19 years (223 months) since October 2000 to April 2019. The optimal path of operation has included the optimal supply for each demand during these months.

3. Results

In this section, the results of implementing the model of the reservoir system operation of Baft, Safarud and Jiroft dams with objective function of minimizing total demand non-supply during a 223-month period (2000-2019) are presented. The results of the best value of objective function and reservoir performance indicators obtained from implementation of the developed algorithms on objective function in the long run for 1000 iterations are presented in Tables I. As shown in Table I, the value of objective function in the new developed FDB-SOS algorithm is 8.11, which indicates that FDB-SOS algorithm is more capable than HS and ICA algorithms in problems with high dimensions. FDB-SOS algorithm with 87.23, 74.34 and 96.03% of total demand of Baft, Safarud and Jiroft dams and implementation time of 204 seconds, respectively, which is one of the important parameters in superiority of meta-heuristic algorithms, shows power and speed in large and complex problems compared to other algorithms. Table II shows performance evaluation criteria of FDB-SOS, HS and ICA algorithms in operation of Baft, Safarud and Jiroft three-reservoir system including reliability, resilience and vulnerability during the operation period.

Table I. Objective function values and demand non-supply of reservoirs resulting from the implementation of

Algorithm	Implementation time (s)	Objective function	Baft		Safarud		Jiroft	
			Non-supply	Supply	Non-supply	Supply	Non-supply	Supply
			(10 ⁶ ×m ³)	percentage	(10 ⁶ ×m ³)	percentage	(10 ⁶ ×m ³)	percentage
FDB-SOS	204.46	8.11	41.12	87.23	145.43	74.34	46.85	96.03
HS	727.48	21.75	70.58	78.08	169.38	70.11	246.7	79.09
ICA	556.6	11.39	51.28	84.08	169.97	70.01	111.2	90.57

Table II. Criteria for evaluating efficiency of the studied algorithms for operation of the reservoir system

Demand	Algorithm	Reliability (%)	Resilience (%)	Vulnerability (%)	Sustainability index (%)
Baft	FDB-SOS	71.30	27.19	65.55	40.57
	HS	43.05	23.61	94.92	17.28
	ICA	59.19	20.91	74.03	31.79
Safarud	FDB-SOS	38.57	23.06	65.59	31.28
	HS	34.98	19.63	83.07	22.65
	ICA	19.73	13.63	74.79	18.93
Jiroft	FDB-SOS	89.68	30.23	21.13	59.80
	HS	31.39	19.63	96.07	13.43
	ICA	61.44	19.37	67.22	33.91

In this study, the Halilrud reservoirs system problem was solved as an integrated model by the studied algorithms. The best operational policy is that which yields the minimum total deficit during the operational period for the whole system. In this way, it is possible that in some reservoirs in a particular month or year, the results of a good algorithm (such as FDB-SOS) will be weaker than other algorithms (such as HS), but our target is the superiority of the release scenarios of an algorithm for the whole system in the integrated model.

As can be seen in Figure 3, the HS and ICA algorithms have performed superior to the FDB-SOS algorithm for some years in the Baft and Safarud reservoirs, while the FDB-SOS algorithm performs much better than the other two algorithms for most years in the whole system.

4. Discussion and Conclusion

In this study, performance of FDB-SOS algorithm in optimal operation of the complex three-reservoir system of Halilrud basin was investigated. Also, this algorithm was compared with the well-known HS and ICA algorithms. The results of problem solving indicate good performance of the improved FDB-SOS algorithm compared to the other two algorithms; with the objective function value obtained from FDB-SOS, HS and ICA algorithms being equal to 8.11, 21.75 and 11.39, respectively. Another aspect of superiority of FDB-SOS algorithm over the other two algorithms was computational time, requiring only 204 seconds compared to the HS and ICA algorithms, each requiring 727 and 556 seconds, respectively, and this advantage was especially apparent for high-dimensional problems. Optimization, as the most important feature of FDB-SOS algorithm, yielded far better results than the other two algorithms. Problem solving using the new FDB-SOS algorithm resulted in demand non-supply in Baft, Safarud and Jiroft reservoirs equal to 41.12, 145.43 and 46.85 million cubic meters, respectively. Demand non-supply was equal to 51.28, 169.97 and 112.2 in ICA algorithm; and 70.58, 169.38 and 246.7 in HS algorithm, with the FDB-SOS algorithm achieving the lowest values. Then, using efficiency evaluation indicators of operating policies including reliability, resilience and vulnerability, and finally sustainability index, it was shown that operating policy in the multi-reservoir system based on the improved FDB-SOS algorithm, with sustainability index of 40.57, 31.28 and 59.80 have a much higher benefit compared to HS and ICA algorithms. Therefore, the use of the improved FDB-SOS algorithm for explaining operating policies, especially complex multi-reservoir systems, can be strongly recommended.

5. Six important references

1. Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP. 1982. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* **18**: 14-20. DOI: 10.1029/WR018i001p00014.
2. Kahraman HT, Aras S, Gedikli E. 2020. Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems* **190**: 105169. DOI: 10.1016/j.knosys.2019.105169.
3. Madadi MR, Akbarifard S, Qaderi K. 2020a. Performance evaluation of improved symbiotic organism search algorithm for estimation of solute transport in rivers. *Water Resources Management* **34**: 1453-1464. DOI: 10.1007/s11269-020-02512-9.
4. Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* **137**: 381-390. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134.
5. Sharifi MR, Akbarifard S, Qaderi K, Madadi MR. 2021a. Comparative analysis of some evolutionary-based models in optimization of dam reservoirs operation. *Scientific Reports* **11**: 1-17. DOI: 10.1038/s41598-021-95159-4.
6. Tejani GG, Savsani VJ, Patel VK. 2016. Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. *Journal of Computational Design and Engineering* **3**: 226–249. DOI: 10.1016/j.jcde.2016.02.003.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to



بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنه با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست مبتنی بر برازش - فاصله - توازن

علی اکبر رضایی استخرئیه^۱، نوید جلال کمالی^{۲*}، مهدی مومنی رق آبادی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

مقاله برگرفته از رساله دکتری

چکیده

در چند دهه اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری نقش مؤثری در مسائل مختلف مهندسی از جمله بهره‌برداری بهینه از مخازن داشته‌اند. به دلیل پیچیدگی مسائل مدیریت منابع آب و در نتیجه نیاز روزافزون به توسعه و رواج روش‌های مزبور، در پژوهش حاضر اقدام به مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنی با استفاده از روش جدید الگوریتم جستجوی موجودات همزیست مبتنی بر برازش - فاصله - توازن (FDB-SOS) گردید. برای این منظور سامانه آبی متشکل از سدهای بافت، صفارود و جیرفت واقع در حوضه آبریز هلیل رود، حدفاصل طول‌های جغرافیایی ۵۱°-۵۶° تا ۳۰°-۶۱° درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۱۸°-۲۶° تا ۳۰°-۲۹° درجه شمالی، به‌منظور تخصیص بهینه برای تأمین نیاز آبی سه منطقه، با اولویت تأمین نیاز آبی شرب، زیست‌محیطی، کشاورزی و صنعت در نظر گرفته شده است. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم جدید FDB-SOS، سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه مزبور در دوره زمانی ۲۲۳ ماهه (دوره ۱۳۹۸-۱۳۷۹) علاوه بر الگوریتم FDB-SOS، با الگوریتم‌های شناخته شده جستجوی هارمونی HS و رقابت استعماری ICA، مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سیاست بهره‌برداری حاصل از الگوریتم جدید FDB-SOS با تأمین ۸۷/۲۳، ۷۴/۳۴ و ۹۶/۰۳ درصد از نیازهای پایین دست سدهای بافت، صفارود و جیرفت، در مقایسه با سیاست‌های حاصله از اعمال الگوریتم‌های HS و ICA از برتری برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم FDB-SOS؛ بهره‌برداری بهینه؛ حوضه آبریز هلیل رود؛ الگوریتم‌های فراابتکاری.

^۱ - دانشجوی دکتری، مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهید حاج قاسم سلیمانی، کرمان، ۰۹۱۳۱۹۵۰۱۵۷ aliakbarrezaei19@yahoo.com

^۲ - استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهید حاج قاسم سلیمانی، کرمان، ۰۹۱۳۳۴۰۷۲۰۱ njalalkamali@iauk.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهید حاج قاسم سلیمانی، کرمان، ۰۹۱۳۱۴۲۴۸۳۰ zimaraz.pars1387@gmail.com



مقدمه

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها از اولویت‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد. به لحاظ وجود نیازهای آبی در مناطق متعدد مکانی، گاهی سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن و گاهی شامل چندین مخزن سری روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن طرح می‌گردد. با پیشرفت‌های انجام شده در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی منابع آب، نحوه طرح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر گردیده است.

ارزیابی جامعی از روش‌های مختلف بهینه‌سازی و کاربردهای آن‌ها در مسائل مهندسی آب و به‌ویژه بهره‌برداری از مخازن در تحقیقات (Yeh, 1985), (Simonovic, 1992) و (Labadie, 2004) ارائه شده است. در بسیاری از مسائل مهندسی، به دلیل پیچیده بودن نوع مسئله مورد بررسی و توابع هدف و وجود چندین نقطه بهینه موضعی و سراسری، روش‌های کلاسیک قادر به تفکیک بین آن‌ها و یافتن نقاط بهینه سراسری نمی‌باشند. در چند سال اخیر با ابداع روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم که اغلب جستجو را بر اساس جمعیت اولیه انجام می‌دهند، می‌توان در مسائل بسیار پیچیده پاسخ‌های تقریبی بسیار نزدیک به بهینه سراسری را پیدا نمود. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (GA^1)، جستجوی ممنوعه (TS^2)، کلونی مورچگان (ACO^3)، ازدحام ذرات (PSO^4) و جستجوی موجودات همزیست (SOS^5) اشاره نمود. کاربردهای متعددی از روش‌های فوق در منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن گزارش شده است.

Esat and Hall (1994) کاربرد مدل GA را با برنامه‌ریزی پویا در یک سیستم چهار مخزنی مقایسه نمودند. آن‌ها مدل GA را به لحاظ نیازهای محاسباتی

کاملاً برتر گزارش کردند. Wardlaw and Sharif (1999) از GA برای بهینه‌سازی یک سامانه چهار مخزنه، (Qaderi et al., 2010) از روش برخورد گروهی با داده‌ها ($GMDH^6$) برای بهره‌برداری سیستماتیک از مخازن چندگانه موجود در دشت تهران و Nourani et al. (2012) از ترکیب مدل برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنی حوضه آبریز سفیدرود، استفاده نمودند. همچنین Fallah-Mehdipour and Bozorg-Haddad (2013) به مقایسه برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP^7) با روش بهینه‌سازی چندهدفه جمعیت ذرات ($MOPSO^8$) در بهره‌برداری بهینه از مخزن بازفت با چندین هدف پرداختند که نتایج برتری جواب‌های الگوریتم MOPSO را با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP نشان داد. (Akbarifard et al., 2015) با استفاده از الگوریتم‌های چرخه آب (WCA^9) و جستجوی گرانشی (GSA^{10}) به بهره‌برداری از سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود پرداختند. نتایج حاصل با روش سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP^{11}) مورد مقایسه قرار گرفت که حاکی از عملکرد بالای الگوریتم WCA نسبت به دیگر روش‌ها بوده است. (Sethi et al., 2015) به ارزیابی عملکرد و تشخیص روند هیدرولوژیکی یک مخزن در اورپسا هند، تحت شرایط تغییر اقلیم پرداختند. در این مطالعه مقدار جریان ورودی به مخزن با استفاده از مدل ARNO تعیین گردید و سپس عملکرد مخزن با استفاده از مدل WEAP در شرایط تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی جریان ورودی به مخزن توسط مدل ARNO نشان می‌دهد که تغییر در جریان شبیه‌سازی شده به‌طور مستقیم با بارش در ارتباط است. همچنین ارزیابی عملکرد مخزن با استفاده از مدل WEAP نشان داد که اگر جریان ۲۰

⁶ Group Method of Data Handling

⁷ Non-Linear Programming

⁸ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

⁹ Water Cycle Algorithm

¹⁰ Gravitational Search Algorithm

¹¹ Standard Operating Policy

¹ Genetic Algorithm

² Tabu Search

³ Ant Colony Optimization

⁴ Particle Swarm Optimization

⁵ Symbiotic Organisms Search

اثبات رسید، (Kahraman et. al. (2020) برای اولین بار دست به توسعه الگوریتم SOS تحت عنوان FDB-SOS زدند. در همین راستا (Madadi et. al. (2020) الگوریتم FDB-SOS به منظور تخمین پارامترهای مدل پراکندگی طولی آلاینده ها در رودخانه های طبیعی استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده توانایی بالای الگوریتم بهبود یافته FDB-SOS در مقایسه با مطالعات دیگر در برآورد پارامترهای مدل پخش طولی آلاینده ها در رودخانه های طبیعی بود.

نظر به ضرورت روزافزون بهینه نمودن بهره‌برداری سامانه‌های آبی از یکسو و کاربرد الگوریتم جدید و بهبود یافته FDB-SOS در سایر علوم از سوی دیگر، در پژوهش حاضر برای اولین بار به بررسی کارایی الگوریتم مزبور در بهینه‌سازی تخصیص منابع آبی پرداخته شد. به همین منظور مدلی بر اساس الگوریتم FDB-SOS در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شد. نتایج به‌دست آمده از مدل توسعه داده شده با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نتایج الگوریتم مورد بررسی با الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و رقابت استعماری مورد مقایسه قرار گرفت.

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 های 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 قسمت هایی از غرب استان سیستان و بلوچستان شامل ایرانشهر را در بر می‌گیرد. سدهای اصلی موجود در بخش غربی این حوضه شامل سد خاکی بافت (آسیاب جفته) با اهداف کشاورزی، شرب و صنعت، سد بتنی دو قوسی جیرفت با اهداف شرب، صنعت، کشاورزی، تولید

درصد کاهش یابد، قابلیت اطمینان عرضه به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.

یکی از روش‌های مؤثر بهینه‌سازی که توسط Cheng and Prayogo (2014) ارائه شده، الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS) می‌باشد. (Tran et al. (2015) برای مسئله بهینه‌سازی شیفتهای کاری در پروژه‌های ساختمانی با اهداف معاوضه میان مدت زمان پروژه، هزینه پروژه و استفاده از شیفتهای کار ظهر و شب، از الگوریتم چندهدفه جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده قدرت بالای الگوریتم فوق در بهینه‌سازی برنامه شیفتهای کاری که می‌تواند در انتخاب طرح مناسب یک پروژه به مدیران کمک کند بوده است. (Panda and Pani (2016) با استفاده از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست به حل مسائل بهینه‌سازی مقید چندهدفه پرداختند. آن‌ها از دوازده مسئله معیار چندهدفه نامقید و شش مسئله مقید استفاده و جهت بررسی و رسیدگی به برابری و نابرابری در محدودیت‌ها از تابع پناستی تطبیقی استفاده کردند. نتایج بدست آمده از ۵۰ اجرای مختلف نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های چندهدفه بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد (MOCBO)^۱، الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO)، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA)^۲، الگوریتم چندهدفه گرادیان جستجوگر (MGE)^۳ و الگوریتم چندهدفه گرادیان مسیریاب (MGP)^۴ بوده است. (Tejani et al. (2016) برای بهینه‌سازی طراحی سازه از الگوریتم جستجوی موجودات همزیست استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد مناسب و کارآمدتر الگوریتم SOS در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی بوده است. همچنین (Akbarifard and Sharifi (2018) و Akbarifard et al. (2018) برتری الگوریتم SOS را در مسائل بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه به اثبات رساندند. با توجه به قابلیت بالای الگوریتم SOS که در مطالعات مختلف به

¹ Multi-Objective Colliding Bodies Optimization

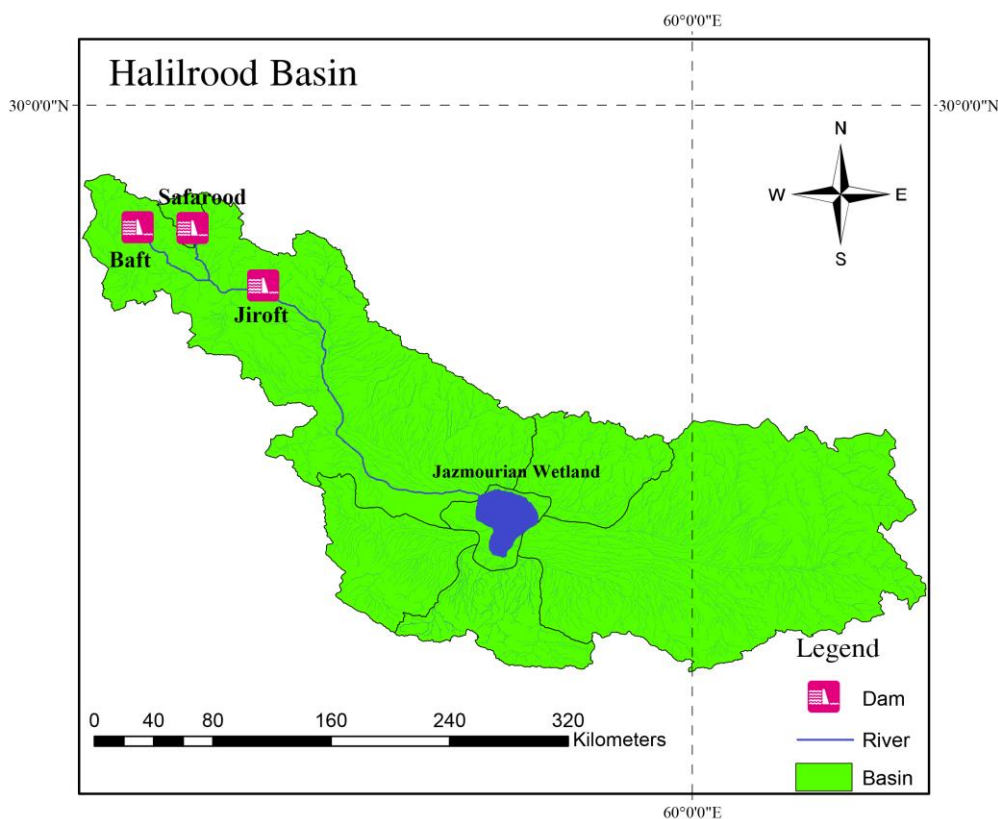
² Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

³ Multi-Gradient Explorer

⁴ Multi-Gradient Pathfinder

با احداث سدهای فوق، جریانات ورودی از طریق رودخانه‌ها به تالاب جازموریان تقریباً قطع گردیده است و بنابراین، احداث فزاینده سدها و استحصال آب جهت مصارف مختلف و همچنین عدم تخصیص مناسب حقایق به عنوان نیاز آب زیست محیطی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش سطح تالاب بر جای گذاشته است و اگر حقایق مناسبی در مدیریت برنامه ریزی سدها به بخش محیط زیست اختصاص داده نشود و روند رو به تزاید احداث سدهای جدید در حوضه ادامه داشته باشد، وضعیت نامناسب‌تری قابل انتظار خواهد بود. به همین منظور ضرورت هر چه بیشتر مطالعات مدیریتی بر روی منابع آب سطحی و بررسی سناریوهای مختلف بهره برداری بهینه از این منابع و سدهای موجود ضروری بوده که از اهداف این پژوهش است.

برق و کنترل سیلاب و سد صفارود (در حال ساخت) با اهداف کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشند. شکل (۱) نیز موقعیت سدهای فوق در بخش غربی حوضه آبریز جازموریان (حوضه آبریز هلیل رود) را نمایش می‌دهد. با وجود احداث سدهای متعدد بر روی رودخانه‌های اصلی تأمین کننده آب تالاب و سرشاخه‌های آنها، روند رو به تزاید مطالعه و احداث سدهای جدید در این حوضه همچنان ادامه دارد. در نتیجه این امر، با احداث روزافزون سدها و برنامه ریزی جهت استحصال آب رودخانه‌ها در این حوضه، بدیهی است که آب ورودی به تالاب از طریق منابع آب سطحی تأمین کننده آب تالاب تا حد بسیار زیادی کاهش یابد. از این میان، نقش سد جیرفت واقع بر رودخانه هلیل در قسمت غربی جازموریان از دیگر سدها مشهودتر است.



شکل (۱): موقعیت سیستم مخازن حوضه آبریز هلیل رود



الگوریتم جستجوی موجودات همزیست (SOS)

الگوریتم جستجوی موجودات همزیست SOS یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که بر پایه شبیه‌سازی رفتاری متقابل میان موجودات، ارائه شده است (Cheng and Prayogo, 2014). موجودات به علت تکیه بر دیگر گونه‌ها برای گذراندن زندگی و حتی بقا، به ندرت در انزوا زندگی می‌کنند. این رابطه مبتنی بر اعتماد، به‌عنوان همزیستی شناخته می‌شود.

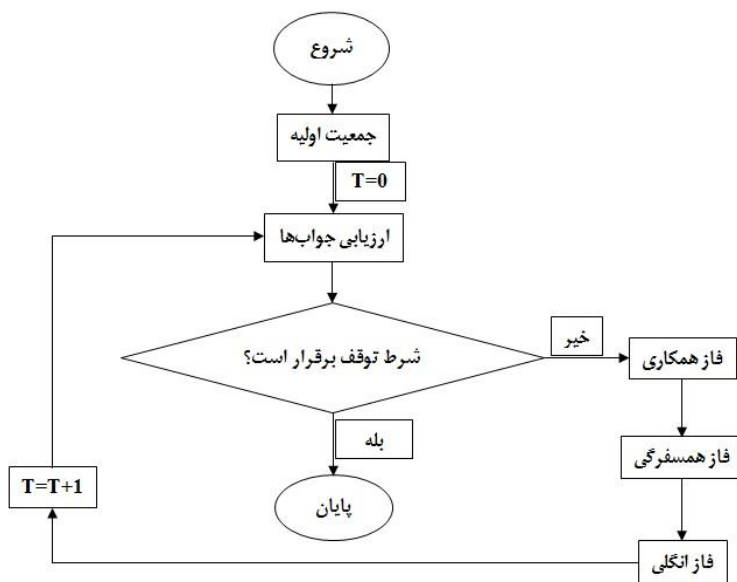
الگوریتم‌های فراابتکاری جدید تقلیدی از پدیده‌های طبیعی هستند. برای مثال الگوریتم گروه ذرات (PSO) رفتار ازدحامی حیوانات و الگوریتم ژنتیک (GA) روند تکامل طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند. الگوریتم SOS فعل و انفعالات همزیستی در رابطه بین دو گونه را شبیه‌سازی می‌کند، به نحوی که یک گونه به جستجو برای پیدا کردن مناسب‌ترین موجود می‌پردازد. مانند دیگر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، الگوریتم SOS مکرراً جمعیتی از کاندیداها را برای یافتن مناطقی به عنوان جواب بهینه در محدوده کلی جواب ایجاد می‌کند. که این جمعیت معادل سناریوهای رهاسازی بهینه در هر دوره، در مسئله بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن می‌باشد. الگوریتم SOS با یک جمعیت اولیه به نام اکوسیستم کار خود را آغاز می‌کند. در اکوسیستم اولیه، گروهی از موجودات (متغیر تصمیم) به‌طور تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شوند. هر موجود زنده به عنوان یک کاندید از راه‌حل مسئله که با میزان برازش خاصی در ارتباط است، نشان‌دهنده درجه انطباق با هدف مورد نظر (مقدار تابع هدف) است. تقریباً تمام الگوریتم‌های فراابتکاری در هر تکرار، عملکرد جایگزینی را برای حل مسئله اعمال می‌کنند تا راه‌حل جدیدی برای تکرار بعدی به وجود آورند. به عنوان مثال یک الگوریتم ژنتیک استاندارد از دو عملگر ادغام و جهش برای این منظور استفاده می‌کند. الگوریتم جستجوی هارمونی، سه قانون بررسی حافظه، تنظیم گام و انتخاب تصادفی را برای ایجاد یک هارمونی جدید پیشنهاد می‌کند. سه فاز زنبور کارگر، زنبور ناظر و زنبور

دیده‌بان در الگوریتم ABC^۱ برای پیدا کردن بهترین منبع غذا معرفی می‌شود. در SOS، تولید راه‌حل جدید به وسیله تقلید تعامل بیولوژیک بین دو موجود در اکوسیستم اداره می‌شود. سه فاز همکاری (استفاده متقابل)، هم‌سفرگی و انگلی که شبیه به مدل تعاملی بیولوژیکی در دنیای واقعی است معرفی می‌شوند.

هویت هر تعامل مبتنی بر نوع تعامل، تعریف می‌شود. به این ترتیب که سود دو طرفه بیانگر فاز همکاری، سود یک طرفه مبین فاز هم‌سفرگی و سود یک طرف و زیان طرف دیگر، نشان‌دهنده فاز انگلی می‌باشد. در همه فازها هر موجود به صورت تصادفی با موجود دیگر تعامل می‌کند. این فرآیند تا زمانی که معیار خاتمه فرآیند (رسیدن به حداکثر تعداد تکرار) برآورده شوند ادامه پیدا می‌کند. روند کلی الگوریتم به شکل زیر است:

مقداردهی اولیه ← تکرار ← فاز همکاری ← فاز هم‌سفرگی ← فاز انگلی ← خاتمه فرآیند پس از رسیدن به حداکثر تعداد تکرار
روند کلی الگوریتم SOS در شکل (۲) را آورده شده است.

¹ Artificial Bee Colony



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم SOS

فاز همکاری

یک مثال برای فاز همکاری که دو طرف از آن سود می‌برند رابطه بین گل‌ها و زنبورهاست. زنبورها بین گل‌ها پرواز می‌کنند، شهد جمع می‌کنند تا به عسل تبدیل کنند؛ این کاری است که باعث سود بردن زنبورها می‌شود. این فعالیت همچنین باعث سود بردن گل‌ها می‌شود چون زنبورها در طی روند کاری خود گرده را توزیع می‌کنند که گرده‌افشانی را تسهیل می‌کند. الگوریتم SOS از این روند به عنوان فاز همکاری تقلید می‌کند.

در SOS، X_i موجودی است که با تأمین عضو محیط (متغیر تصمیم مسئله) همخوانی دارد. موجود دیگر که X_j باشد به صورت رندم انتخاب می‌شود تا با X_i در تعامل باشد. هر دو موجود در رابطه تعامل، با هدف افزایش مزایای بقاء دو طرفه در اکوسیستم شرکت می‌کنند. راه‌حل‌های جدید برای X_i و X_j بر اساس همکاری تعاملی بین X_i و X_j با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود:

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(0,1) \times (X_{\text{best}} - \text{Mutual} - \text{Vector} \times \text{BF}_1) \quad (1)$$

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(0,1) \times (X_{\text{best}} - \text{Mutual} - \text{Vector} \times \text{BF}_2) \quad (2)$$

$$\text{Mutual} - \text{Vector} = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (3)$$

که در روابط فوق، $\text{rand}(0,1)$ یک بردار از اعداد تصادفی است. نقش BF_1 و BF_2 به شرح زیر است. در طبیعت، بعضی از روابط تعاملی ممکن است سود بیشتری برای یک طرف از موجودات نسبت به طرف دیگر داشته باشد. به بیان دیگر، موجود A ممکن است نسبت به موجود B سود بسیار بیشتری ببرد. در همین حال موجود B به سود خود بسنده می‌کند یا سود قابل توجهی نمی‌برد. در اینجا، فاکتور سود (BF_1 و BF_2) به صورت تصادفی در روابط (۱) و (۲) تعریف شده‌اند. این فاکتورها نشان دهنده سطح سود بردن هر موجود است که آیا یک موجود از این رابطه سود کامل می‌برد یا بخشی از سود را می‌برد.

رابطه (۳) برداری را نشان می‌دهد که به آن بردار متقابل گفته می‌شود و خصوصیات ارتباطی بین X_i و X_j را نشان می‌دهد. قسمتی از رابطه $(X_{\text{best}} - \text{Mutual} - \text{Vector})$ به اثر تعاملی برمی‌گردد که با این تعامل و همکاری، چه میزان هدف بقاء برای دو طرف بدست خواهد آمد. بر اساس فاز همکاری، همه موجودات با افزایش توانایی و انطباق خود در محیط‌زیست روبرو

مثل می‌کند، فرد میزبان ممکن است مالاریا گرفته و در نتیجه بمیرد.

در SOS، موجود X_i به وسیله ایجاد انگلی مصنوعی به نام "بردار انگل"، نقشی شبیه به پشه آنوفل را ایفا می‌کند. بردار انگل در فضای جستجو با تکثیر موجود X_i به وجود می‌آید، سپس تغییرات بر اساس انتخاب تصادفی و با استفاده از یک عدد تصادفی بر روی آن رخ می‌دهد. موجود X_j به عنوان میزبان و به صورت تصادفی از اکوسیستم انتخاب می‌شود. بردار انگل تلاش می‌کند تا X_j را در اکوسیستم جایجا کند. هر دو موجود (X_i و X_j) با اندازه‌گیری میزان برازندگی (میزان تابع هدف) خود مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اگر بردار انگل برازندگی بیشتری داشته باشد، موجود X_j را خواهد کشت و جایگاه آن را در اکوسیستم تصاحب می‌کند اما اگر برازندگی X_j بیشتر باشد، X_i نسبت به انگل در امان خواهد بود و بردار انگل توانایی بیشتری برای زندگی در آن اکوسیستم را نداشته و در آن اکوسیستم جایی ندارد.

روش پیشنهادی: انتخاب FDB (برازش-فاصله-توازن)^۱

هدف از توسعه روش انتخاب FDB، کشف نامزد یا نامزدهایی است که بیشترین سهم را در فرایند جستجو جمعیت، با روشی پایدار و مؤثر خواهند داشت، می‌باشد. در نتیجه، اطمینان حاصل خواهد شد که فرایند تغییر، که امکان کاوش در مناطق مختلف فضای جستجو را فراهم می‌کند، و فرایند تشدید، که بهره‌گیری از دانش قبلی در مورد میزان برازش برای الگوریتم‌های MHS را تضمین می‌کند، به صورت متوازن انجام خواهد شد.

در مرحله اول روش FDB، میزان فاصله جواب کاندیدها از بهترین جواب (Pbest) محاسبه می‌شود. برخی از معیارهای اندازه‌گیری مسافت شامل اقلیدسی (EU)، منهتن (MA) و مینکوفسکی (MI) است که در محاسبات مسافت می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. با استفاده از تابع هدف، جمعیت P و معیار فاصله اقلیدسی (EU)، مقدار فاصله هر عضو از Pbest همانطور که در معادله (۵) آورده شده است محاسبه می‌شود. بردار فاصله

هستند. بعضی از آن‌ها از رابطه همزیستی با موجود دیگری برای افزایش امتیاز بقاء استفاده می‌کنند. در اینجا هدف بدست آوردن X_{best} است زیرا X_{best} دارای بیشترین درجه انطباق با نقطه بهینه سراسری می‌باشد. بنابراین، X_{best} (راه‌حل سراسری) برای مدل کردن بالاترین درجه انطباق به عنوان نقطه نهایی و افزایش برازش هر دو موجود استفاده می‌شود. در نهایت موجود زمانی انطباق پیدا می‌کند که میزان برازندگی جدیدش نسبت به قبل از تعاملش بهتر باشد.

فاز هم‌سفرگی

رابطه هم‌سفرگی مانند رابطه بین ماهی چسبنده و کوسه است. ماهی چسبنده خود را به کوسه می‌چسباند و از غذای باقی‌مانده می‌خورد، بنابراین سود دریافت می‌کند. کوسه در برابر فعالیت ماهی چسبنده منفعتی نمی‌برد یا اگر هم ببرد به کمترین میزان است. مشابه با حالت تعامل دو طرفه، موجود X_j به صورت تصادفی از اکوسیستم مرتبط با موجود X_i انتخاب می‌شود. در این شرایط، موجود X_i تلاش می‌کند که از این ارتباط بیشترین سود را دریافت کند در حالی که موجود X_j در این رابطه نه سودی می‌برد و نه متحمل ضرری می‌شود. راه‌حل جدید X_i بر طبق همزیستی هم‌سفرگی بین موجودات X_i و X_j از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. بر طبق قوانین حاکم بر طبیعت، موجود X_i فقط وقتی انطباق پیدا می‌کند که میزان برازندگی جدیدش بهتر از برازندگی قبل از تعاملش باشد.

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(-1,1) \times (X_{\text{best}} - X_i) \quad (4)$$

قسمت $(X_{\text{best}} - X_j)$ ، به سودی که توسط X_j برای کمک به X_i به وجود می‌آید برمی‌گردد تا شانس نجات خود را در اکوسیستم کنونی بیشتر کند.

فاز انگلی

یک مثال از فاز انگلی، انگل پلاسمودیوم است که از رابطه‌اش، به وسیله پشه آنوفل از انسان به عنوان میزبان استفاده می‌کند. در حالی که انگل در بدن انسان رشد و تولید

¹ Fitness-Distance-Balance



و مقادیر فاصله را تعیین می کند. با توجه به این توضیحات و $0 < \omega < 1$ ، امتیاز هر کاندید در جمعیت P محاسبه می شود. در این مطالعه، ω به عنوان ۰/۵ در نظر گرفته شده است. معادلات (۷) یا (۸) می توانند در روش انتخاب FDB برای محاسبه امتیاز استفاده شوند.

$$\forall_{i=1}^n P_i, S_{FDB^1 P_i} = \omega * normF_{P_i} + (1 - \omega) * normD_{P_i} \quad (7)$$

$$\forall_{i=1}^n P_i, S_{FDB^2 P_i} = normF_{P_i} * normD_{P_i} \quad (8)$$

بردار امتیاز (S_p) از جمعیت در معادله (۹) آورده شده است.

$$S_p \equiv \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (9)$$

D_p ایجاد شده برای جواب کاندیدها در معادله (۶) ارائه شده است.

$$\forall_{i=1}^n, P_i \neq P_{best}, D_{P_i} = \sqrt{(x_{1P_i} - x_{1P_{best}})^2 + \dots + (x_{mP_i} - x_{mP_{best}})^2} \quad (5)$$

$$D_p \equiv \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (6)$$

در مرحله دوم روش FDB، امتیازات برای کاندیدها محاسبه می شود. مقادیر برآزش نرمال (normF) و مقادیر نرمال فاصله (normDP) از کاندیدها در محاسبه امتیاز استفاده می شوند. دلیل استفاده از مقادیر عددی نرمال، جلوگیری از غلبه این دو پارامتر بر یکدیگر در محاسبه امتیاز است. در محاسبه امتیازات اعضا از ضریب وزن (ω) استفاده می شود که همچنین تاثیر مقدار برآزش مراحل روش انتخاب FDB در الگوریتم (۱) آورده شده است.

الگوریتم (۱): مراحل روش انتخاب FDB

۱	شروع
۲	انتخاب اندازه فاصله
۳	ایجاد یک عدد تصادفی در محدوده [۰.۴-۰.۶] برای ضریب وزنی w
۴	برای $i=1:n$
۵	محاسبه فاصله بین P_i و P_{best} با استفاده از معادله (۵):
۶	$D_{P_i} = \sqrt{(x_{1P_i} - x_{1P_{best}})^2 + (x_{2P_i} - x_{2P_{best}})^2 + \dots + (x_{mP_i} - x_{mP_{best}})^2}$ $D_p \equiv \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}_{n \times 1}$ ایجاد یا به روزرسانی بردار فاصله DP با استفاده از معادله (۶):
۷	پایان
۸	برای $i=1:n$
۹	نرمال سازی بردارهای برازش و فاصله در محدوده [۰-۱]
۱۰	محاسبه امتیاز برای کاندیدها با استفاده از معادلات (۷) یا (۸):
۱۱	$\forall_{i=1}^n P_i, S_{FDB^1 P_i} = \omega * normF_{P_i} + (1 - \omega) * normD_{P_i}$ $\forall_{i=1}^n P_i, S_{FDB^2 P_i} = normF_{P_i} * normD_{P_i}$ $S_p \equiv \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix}_{n \times 1}$ ایجاد بردار امتیاز مبتنی بر FDB با استفاده از معادله (۹):
۱۲	پایان
۱۳	انتخاب کاندیدها در فرآیند جستجو براساس امتیازات آنها (S_p)
۱۴	پایان

به ترتیب با محاسبه میزان فاصله و برازش مرتب می شوند. P_j به طور تصادفی از اکوسیستم انتخاب می شود. گام دوم الگوریتم شامل سه مرحله همزیستی، همسفرگی و انگلی است. در این سه مرحله از همان ارگانیسم های P_i و P_{best} استفاده می شود. به عبارت دیگر، ارگانیسم های P_i و P_{best} در فاز همزیستی و آنهایی که در فاز همسفرگی و انگلی به کار می روند یکسان هستند. P_j در هر سه مرحله به طور تصادفی تعیین می شود. در الگوریتم FDB-SOS انتخاب P_j با استفاده از روش انتخاب مبتنی بر FDB در مراحل همزیستی و همسفرگی تعیین می شود (همانطور که در الگوریتم (۱) نشان داده شده است). با توجه به این توضیحات، فرآیند

الگوریتم جدید جستجوی موجودات همزیست مبتنی بر برازش - فاصله - توازن (FDB-SOS)
الگوریتم FDB-SOS برای اولین بار توسط Kahraman et. al. (2020) توسعه داده شد. عملکرد فوق العاده الگوریتم SOS آن را به یکی از قوی ترین الگوریتم های فراکوشی تبدیل کرده است. در الگوریتم SOS، در گام اول سه دسته ارگانیسم P_i ، P_{best} و P_j از جمعیت (اکوسیستم)، فرآیند جستجو و رسیدن به هدف نهایی را دنبال می کنند. در فرایند انتخاب، هر دو ارگانیسم P_i ، P_{best} با روش قطعی تعیین می شوند. P_{best} کاندیدای با بالاترین میزان برازش در اکوسیستم است که انتخاب می شود و مابقی کاندیدها در اکوسیستم

جستجو در الگوریتم FDB-SOS در الگوریتم (۲) آورده شده است.
الگوریتم (۲): مراحل الگوریتم FDB-SOS

۱	شروع
۲	ایجاد اکوسیستم اولیه به صورت تصادفی
۳	برای $i=1:n$ (تعداد کاندیداها)
۴	ارزیابی میزان برازش هر عضو از جمعیت
۵	پایان
۶	تا زمانیکه فرآیند جستجو کامل می شود
۷	برای $i=1:n$ (تعداد کاندیداها)
۸	فرآیند انتخاب: انتخاب P_i و P_{best} (مشابه الگوریتم SOS) و انتخاب P_j با استفاده از روش انتخاب FDB در الگوریتم (۱)
۹	فاز همزیستی:
۱۰	$Mutual_Vector = (P_i + P_j)/2$
۱۱	$P_{i_new} = P_i + rand(0,1) \times (P_{best} - Mutual_Vector \times BF_1)$
۱۲	$P_{j_new} = P_j + rand(0,1) \times (P_{best} - Mutual_Vector \times BF_2)$
۱۳	فرآیند انتخاب: انتخاب P_j با استفاده از روش انتخاب FDB در الگوریتم ۱
۱۴	فاز همسفرگی:
۱۵	$P_{i_new} = P_i + rand(-1,1) \times (P_{best} - P_j)$
۱۶	فرآیند انتخاب: انتخاب P_j مشابه الگوریتم SOS
۱۷	فاز انگلی:
۱۸	ایجاد بردار انگل (Parasite_Vector) از ارگانیسم P_i
۱۹	اگر بردار انگل (Parasite_Vector) مناسب تر از ارگانیسم P_j باشد آنگاه $P_j = Parasite_Vector$ پایان
۲۰	پایان
۲۱	پایان
۲۲	پایان

$$Mutual_Vector = (P_i + P_j)/2 \quad (10)$$

$$P_{i_new} = P_i + rand(0,1) \times (P_{best} - Mutual_Vector \times BF_1) \quad (11)$$

$$P_{j_new} = P_j + rand(0,1) \times (P_{best} - Mutual_Vector \times BF_2) \quad (12)$$

$$P_{i_new} = P_i + rand(-1,1) \times (P_{best} - P_j) \quad (13)$$

همان طور که گفته شد، برای ارزیابی توانایی الگوریتم FDB-SOS، نتایج آن با نتایج الگوریتم‌های HS (Geem, 2000) و ICA (Atashpaz-Gargari & Lucas, 2007) مقایسه شد.

در خط نهم الگوریتم (۲) مرحله همزیستی آغاز می شود. در این مرحله Mutual_Vector با استفاده از رابطه (۱۰) ایجاد شده و موقعیت ارگانیسم های P_{i_new} و P_{j_new} با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) به روز می شوند. در مرحله همسفرگی نیز رابطه (۱۳) برای جستجو استفاده می شود. با توجه به اینکه کاندیدای P_j با استفاده از روش FDB انتخاب می شوند، تأثیر این روش بر همگرایی در فازهای همزیستی و همسفرگی مشخص می شود. از این نظر می توان گفت که روش انتخاب FDB نقش مهمی در موفقیت الگوریتم SOS دارد.

$$A_{i,t} = a_i + b_i \times S_{i,t} + c_i \times S_{i,t}^2 \quad (17)$$

رابطه پیوستگی: در تمامی مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بایستی موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد.

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + Q_{1,t} - Re_{1,t} - Sp_{1,t} - Loss_{1,t} \quad (18)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + Q_{2,t} - Re_{2,t} - Sp_{2,t} - Loss_{2,t} \quad (19)$$

$$S_{3,t+1} = S_{3,t} + Q_{3,t} + Sp_{1,t} + Sp_{2,t} + DeZ_{1,t} \quad (20)$$

$$+ DeZ_{2,t} - Re_{3,t} - Sp_{3,t} - Loss_{3,t}$$

• محدودیت متغیرهای تصمیم

$$S_{mini} \leq S_{i,t} \leq S_{maxi} \quad (21)$$

$$Re_{mini,t} \leq Re_{i,t} \leq Re_{maxi,t} \quad (22)$$

• تابع جریمه مربوط به حجم مخازن

$$Penalty_i = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 \left(\frac{S_{i,t} - S_{mini}}{S_{mini}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} < S_{mini} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 \left(\frac{S_{i,t} - S_{maxi}}{S_{maxi}} \right)^2 & \text{if } S_{i,t} > S_{maxi} \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \geq S_{mini} \text{ and } S_{i,t} \leq S_{maxi} \end{cases} \quad (23)$$

که $Sp_{i,t}$ مقدار آب سرریز شده از مخزن سد i ام در $S_{i,t}$ حجم مخزن سد i ام در ابتدای دوره t ، $S_{i,t+1}$ حجم مخزن سد i ام در انتهای دوره t ، S_{maxi} حجم مخزن سد i ام در رقوم حداکثر، S_{mini} حداقل حجم مخزن سد i ام، $Q_{i,t}$ حجم آب ورودی به مخزن سد i ام در ماه t ، $Loss_{i,t}$ میزان تلفات مخزن سد i ام در ماه t که تلفات از مخزن به صورت تبخیر و با در نظر گرفتن روابط توانی سطح-حجم مخزن بر اساس رابطه (۱۷) محاسبه شده که $A_{i,t}$ میزان سطح آب مخزن i ام در دوره t ام (کیلومتر مربع)، $Ev_{i,t}$ میزان تبخیر از سطح مخزن i ام در دوره t ام (متر) و a_i ، b_i و c_i ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیره مخزن i ام به سطح متناظر آن در ابتدای همان دوره می‌باشند. $DeZ_{i,t}$ نیاز زیست‌محیطی سد i ام در ماه

معیار همگرایی در این پژوهش رسیدن به حداکثر تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. کدنویسی الگوریتم‌های HS، FDB-SOS، ICA و در قسمت برنامه-نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شد. همچنین برای بررسی کارآمدی الگوریتم‌های موردبررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل قابلیت اعتماد زمانی و حجمی، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری استفاده و در نهایت شاخص پایداری جهت انتخاب سناریو برتر تعریف گردید.

مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن

در این پژوهش تابع هدف به صورت حداقل‌سازی میزان کمبود اعمال شده نسبت به یک نیاز مشخص تعریف شده است. فرمولاسیون تابع هدف و قیود به صورت زیر می‌باشد. رابطه (۱۴) بیانگر تابع هدف و روابط (۱۵) تا (۲۳) بیانگر قیود مسئله می‌باشند.

$$\text{Min } F(\text{Re}) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^3 (\text{Re}_{i,t} - \text{De}_{i,t})^2 + \text{Penalty}_{i,t} \quad (14)$$

که در آن $F(\text{Re})$ مقدار تابع هدف (کمبود)، حجم رهاسازی برای نیازهای مخزن i ام در ماه t ، $De_{i,t}$ مقدار نیازهای پایین دست مخزن i ام در ماه t طول دوره بهره‌برداری، i شمارنده مربوط به هر مخزن می‌باشد که $i=1$ مخزن سد بافت، $i=2$ مخزن سد صفارود و $i=3$ مخزن سد جیرفت می‌باشند. $Penalty_{i,t}$ مقدار جریمه‌ای که در صورت ارضا نشدن قید حجم مخزن i ام در ماه t ، در تابع هدف اعمال می‌شود.

محدودیت‌های سیستم چند مخزنه مورد مطالعه در روابط (۱۵) تا (۲۳) آورده شده است.

قیود مربوط به حجم سرریز و تلفات تبخیر به صورت روابط زیر اعمال می‌شود.

$$Sp_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{maxi} + S_{mini} & \text{if } S_{i,t} > (S_{maxi} - S_{mini}) \\ 0 & \text{if } S_{i,t} \leq (S_{maxi} - S_{mini}) \end{cases} \quad (15)$$

$$Loss_{i,t} = A_{i,t} \times Ev_{i,t} \quad (16)$$



• آسیب پذیری

این شاخص نشان دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Hashimoto et al., 1985).

$$Val = \max \left\{ \frac{(De_i - Re_i)}{De_i} \right\} \times 100, \quad i = 1, 2, \dots, t \quad (26)$$

که در آن: Val آسیب‌پذیری سیستم، De_i مقدار نیاز در دوره i ، Re_i مقدار خروجی در دوره i و t تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری می‌باشد.

• برگشت پذیری

این شاخص توانایی سیستم در تغییر شرایط موجود را نشان می‌دهد. احتمال اینکه یک سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد را برگشت‌پذیری گویند (Hashimoto et al., 1985). مقدار این پارامتر از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Res = \frac{\sum_{i=1}^T N(Def_{i+1} = 0 | Def_i > 0)}{\sum_{i=1}^T N(Def_i > 0)} \times 100 \quad (27)$$

$i = 1, 2, \dots, T$

که در آن $N(0)$ تعداد دوره‌هایی است که شرط درون پرانتز در آن‌ها اتفاق افتاده است و Def_i کمبود در دوره i می‌باشد.

• شاخص پایداری

این شاخص جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین سناریوهای مختلف بر اساس شاخص‌های عملکرد مخزن است که به صورت زیر تعریف می‌گردد (Sandoval-Solis et al., 2011).

$$SI = \{Rel \times Res \times (1 - Vul)\}^{1/3} \quad (28)$$

به منظور تخمین بهترین مقدار پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری از سیستم

$Re_{mini,t}$ حداقل رهاسازی سد i ام در ماه t و $Re_{maxi,t}$ حداکثر رهاسازی سد i ام در ماه t می‌باشند.

با استفاده از این مدل، مسئله برای یک دوره بلندمدت ۱۹ ساله (۲۲۳ ماه) از مهر ۱۳۷۹ تا فروردین ۱۳۹۸ حل شده است. مسیر بهینه بهره‌برداری شامل میزان بهینه تأمین هر یک از نیازها در طول این ماه‌ها بوده است.

شاخص‌های عملکرد مخزن

ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری، آخرین و مهم‌ترین گام در استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی جهت بهره‌برداری از مخازن است.

• قابلیت اعتماد پذیری

اعتمادپذیری را می‌توان به دو صورت زمانی و حجمی تعریف کرد. منظور از اعتمادپذیری زمانی، درصد دوره‌هایی است که سیستم به‌طور کامل نیازهای موجود را تأمین کرده و با شکست روبرو نمی‌شود. مقدار این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Rel = \left(1 - \frac{NDef}{T} \right) \times 100 \quad (29)$$

$$NDef = \text{تعداد } (De_i > Re_i)$$

که در آن: $NDef$ تعداد کل شکست‌های رخ داده در طول دوره بهره‌برداری، De_i مقدار نیاز در دوره i و Re_i مقدار خروجی دوره i و Rel اعتمادپذیری سیستم در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، قابلیت اعتماد زمانی سیستم بیشتر خواهد بود.

نوع دیگر قابلیت اعتماد، قابلیت اعتماد حجمی می‌باشد که عبارت است از مقدار حجم رهاسازی در کل دوره نسبت به مقدار کل نیاز مخزن که از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود. می‌توان قابلیت اعتماد را به صورت مخالف ریسک مطرح کرد (قابلیت اعتماد-۱=ریسک) (Hashimoto et al., 1982).

$$\alpha_v = \frac{Re_t}{De_t} \times 100 \quad (25)$$



پارامترهای الگوریتم‌های مورد بررسی در جدول (۳) آورده شده است

مخازن حوضه آبریز هلیل رود، تحلیل حساسیت روی این مقادیر در اجراهای متفاوت مورد آزمون قرار گرفت. مقدار

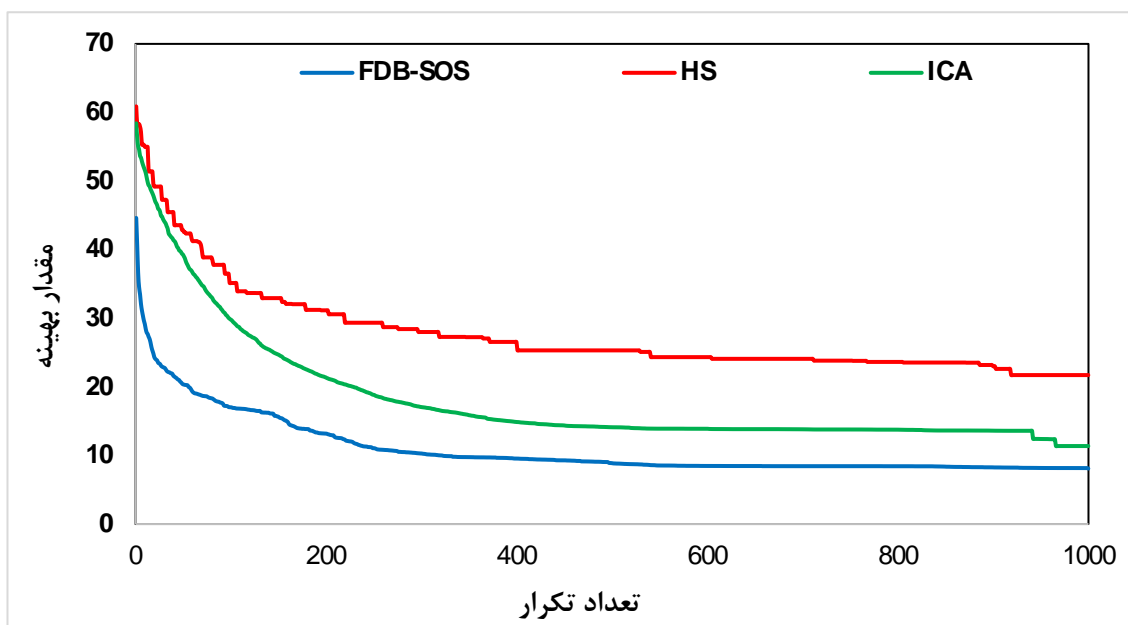
جدول (۳) مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های مختلف در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوضه آبریز هلیل رود

BF2	BF1	تعداد متغیرهای تصمیم	اندازه جمعیت	تعداد تکرار	FDB-SOS
۱ یا ۲	۱ یا ۲	۶۶۹	۳۰۰	۱۰۰۰	
PAR	HMCR	تعداد متغیرهای تصمیم	اندازه حافظه هارمونی	تعداد تکرار	HS
۰/۳	۰/۹۵	۶۶۹	۳۰۰	۱۰۰۰	
نرخ جذب	نرخ انقلاب	تعداد استعمارگر اولیه	تعداد کشور اولیه	تعداد تکرار	ICA
۰/۵	۰/۴	۱۰	۳۰۰	۱۰۰۰	

نتایج و بحث

روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن حوضه آبریز هلیل رود در شکل (۳) نشان داده شده است.

در این قسمت نتایج حاصل از اجرای مدل بهره‌برداری از سیستم مخازن سد‌های بافت، صفارود و جیرفت با تابع هدف حداقل کردن کمبود کل برای حالت بلندمدت ۲۲۳ ماهه (دوره ۱۳۹۸-۱۳۷۹) ارائه می‌شود.



شکل (۳): روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی

در شکل (۳) دیده می‌شود که الگوریتم FDB-SOS نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد مناسب‌تری در فرآیند بهینه‌سازی مسئله مورد بررسی داشته است. نتایج بهترین مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای الگوریتم‌های توسعه یافته بر روی تابع هدف در دوره بلند برای ۱۰۰۰ تکرار در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول (۴): مقادیر تابع هدف و کمبود نیاز مخزن حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

الگوریتم	زمان اجرا (s)	تابع هدف	بافت		صفارود		جیرفت	
			درصد	کمبود (MCM)	درصد	کمبود (MCM)	درصد	کمبود (MCM)
FDB-SOS	۲۰۴/۴۶	۸/۱۱	۴۱/۱۲	۸۷/۲۳	۱۴۵/۴۳	۷۴/۳۴	۴۶/۸۵	۹۶/۰۳
HS	۷۲۷/۴۸	۲۱/۷۵	۷۰/۵۸	۷۸/۰۸	۱۶۹/۳۸	۷۰/۱۱	۲۴۶/۷	۷۹/۰۹
ICA	۵۵۶/۶	۱۱/۳۹	۵۱/۲۸	۸۴/۰۸	۱۶۹/۹۷	۷۰/۰۱	۱۱۱/۲	۹۰/۵۷

از پارامترهای مهم در برتری الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد، قدرت و سرعت خود در مسائل بزرگ و پیچیده را نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. در جدول (۵) معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های FDB-SOS، HS و ICA در بهره‌برداری از سامانه سه مخزنه بافت، صفارود و جیرفت شامل قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در طول دوره بهره‌برداری آورده شده است.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف در الگوریتم جدید جستجوی موجودات همزیست ارتقاء یافته (FDB-SOS) برابر ۸/۱۱ می‌باشد که بیانگر قابلیت بیشتر الگوریتم FDB-SOS در مقایسه با الگوریتم‌های HS و ICA، در مسائل با ابعاد بالا می‌باشد. الگوریتم FDB-SOS به ترتیب با تأمین ۸۷/۲۳، ۷۴/۳۴ و ۹۶/۰۳ درصد از نیازهای کل سدهای بافت، صفارود و جیرفت و زمان اجرای برابر ۲۰۴ ثانیه که یکی

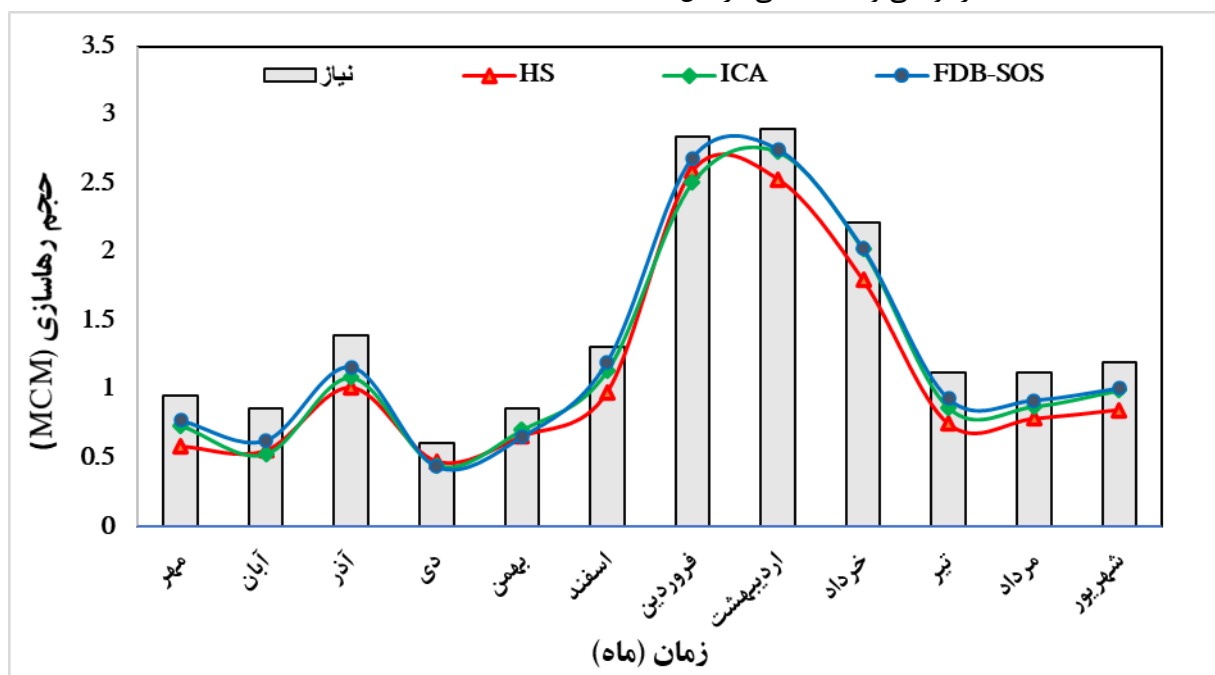
جدول (۵): معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سامانه مخازن

نیاز	الگوریتم	قابلیت اعتماد	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری	شاخص پایداری
بافت	FDB-SOS	۷۱/۳۰	۲۷/۱۹	۶۵/۵۵	۴۰/۵۷
	HS	۴۳/۰۵	۲۳/۶۱	۹۴/۹۲	۱۷/۲۸
	ICA	۵۹/۱۹	۲۰/۹۱	۷۴/۰۳	۳۱/۷۹
صفارود	FDB-SOS	۳۸/۵۷	۲۳/۰۶	۶۵/۵۹	۳۱/۲۸
	HS	۳۴/۹۸	۱۹/۶۳	۸۳/۰۷	۲۲/۶۵
	ICA	۱۹/۷۳	۱۳/۶۳	۷۴/۷۹	۱۸/۹۳
جیرفت	FDB-SOS	۸۹/۶۸	۳۰/۲۲	۲۱/۱۳	۵۹/۸۰
	HS	۳۱/۳۹	۱۹/۶۳	۹۶/۰۷	۱۳/۴۳
	ICA	۶۱/۴۴	۱۹/۳۷	۶۷/۲۲	۳۳/۹۱

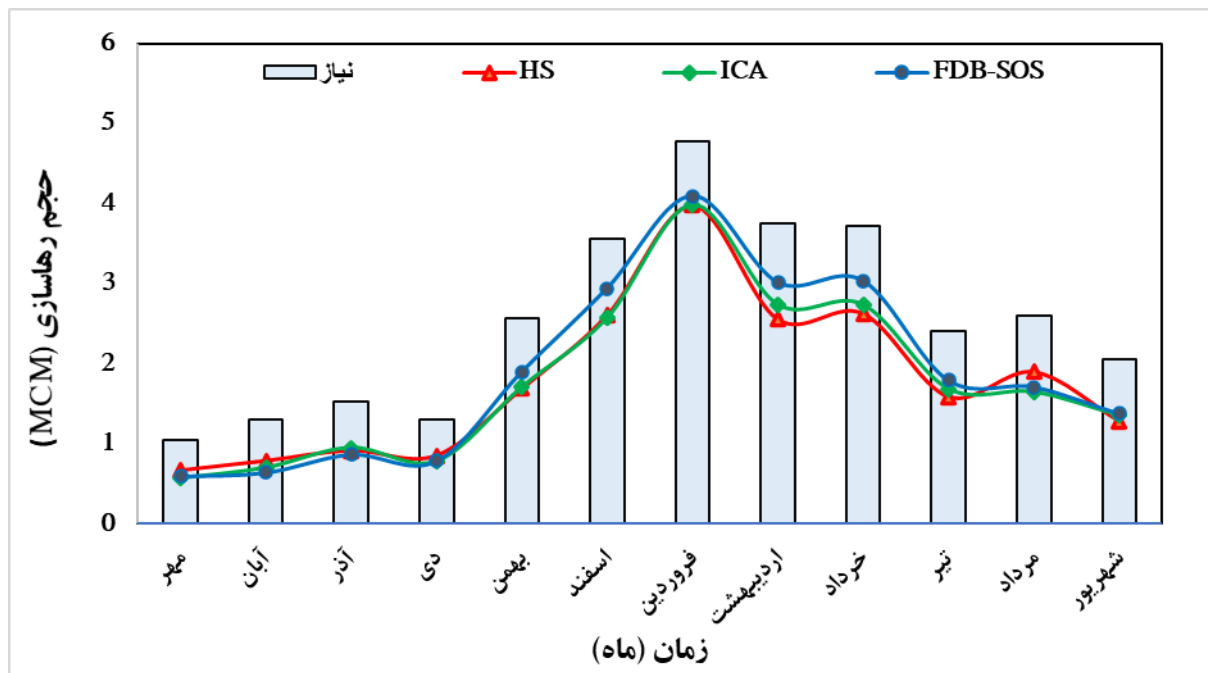
مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن با هدف تأمین نیاز پایین دست می‌باشد.

شکل‌های (۴) تا (۶) به ترتیب میانگین ماهانه میزان رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی را در مخازن بافت، صفارود و جیرفت در طول دوره مورد مطالعه (دوره ۱۳۷۹-۱۳۹۸) نشان می‌دهند.

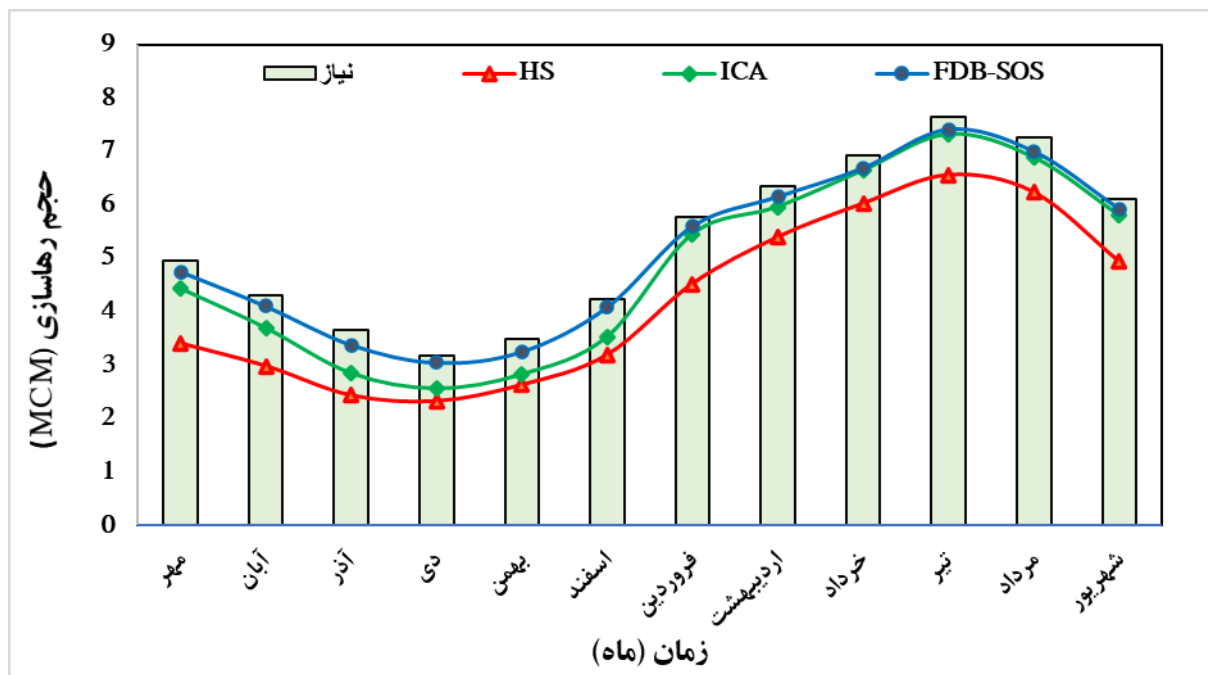
همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود شاخص پایداری به دست آمده توسط الگوریتم جدید FDB-SOS که یک معیار جهت تشخیص عملکرد سیستم‌های منابع آب می‌باشد، برای تأمین نیازهای مخازن بافت، صفارود و جیرفت به ترتیب برابر ۴۰/۵۷، ۳۱/۲۸ و ۵۹/۸۰ در مقایسه با مقادیر متناظر در الگوریتم‌های HS و ICA بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان گفت که الگوریتم توسعه یافته FDB-SOS، از توانایی و دقت بالایی در حل



شکل (۴): میانگین ماهانه میزان رهاسازی در مقابل نیاز سد بافت



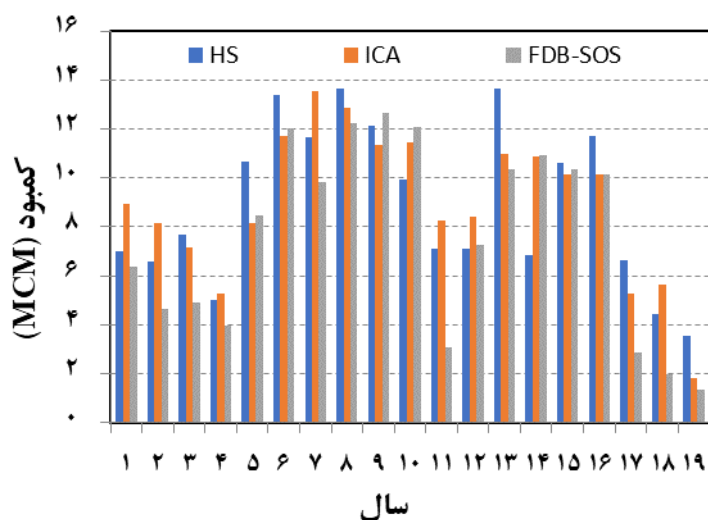
شکل (۵): میانگین ماهانه میزان رهاسازی در مقابل نیاز سد صفارود



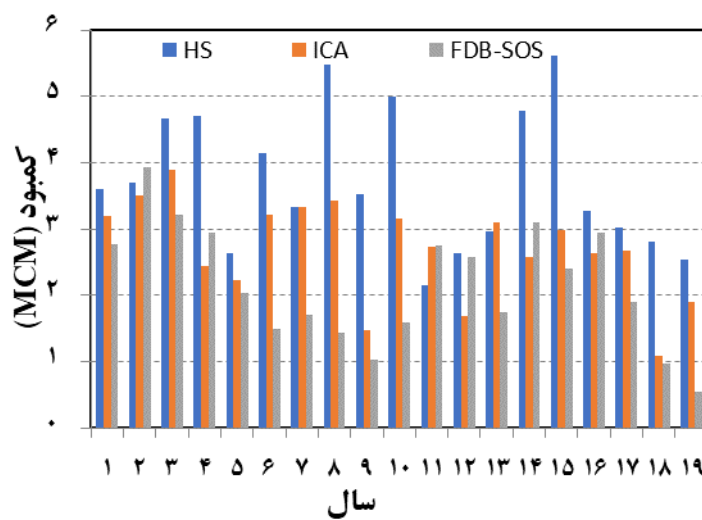
شکل (۶): میانگین ماهانه میزان رهاسازی در مقابل نیاز سد جیرفت

را داشته است. شکل‌های (۷) تا (۹) مقادیر متوسط کمبود سالانه حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی در سیستم مخازن حوضه آبریز هلیل رود را نشان می‌دهند.

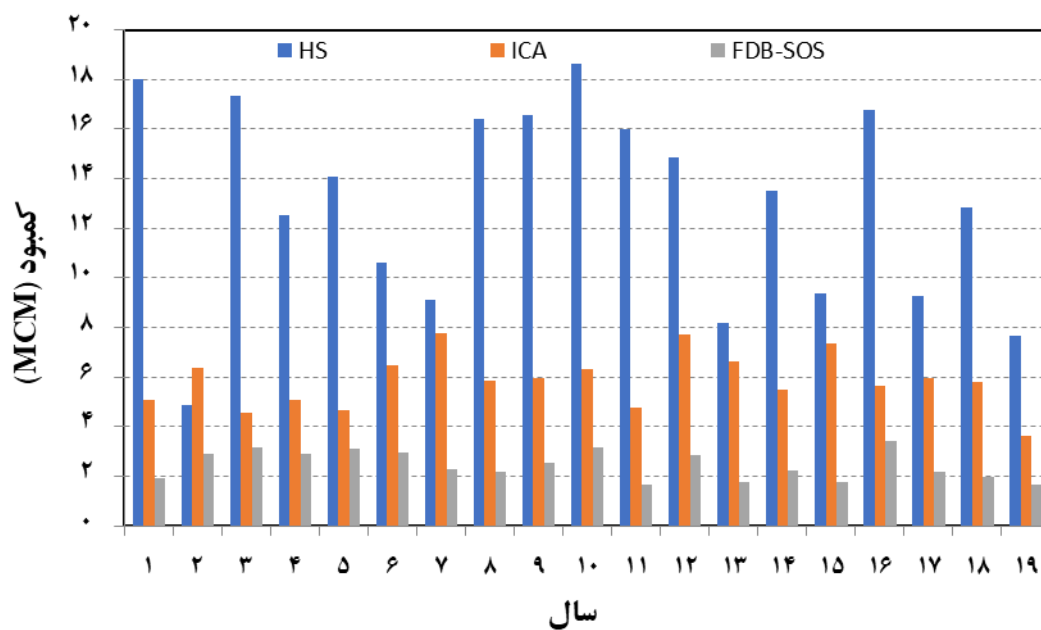
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم جدید FDB-SOS برآورد بهتری از نیازهای پایین دست سدهای مورد مطالعه و حداقل کمبود



شکل (۸): میزان متوسط کمبود سالانه سد صفارود



شکل (۷): میزان متوسط کمبود سالانه سد بافت



شکل (۹): میزان متوسط کمبود سالانه سد جیرفت

نتیجه‌گیری

الگوریتم جدید جستجوی موجودات همزیست مبتنی بر برازش-فاصله-توازن (FDB-SOS) که پیش‌تر در حل مسئله تخمین پارامترهای مدل پراکندگی طولی آلاینده‌ها در رودخانه‌های طبیعی از دقت خوبی برخوردار بود (Madadi et al., 2020)، آن‌گونه که نتایج نشان داد در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه منابع آب نیز از کارایی بسیار خوبی برخوردار می‌باشد. مقایسه روند مدل‌سازی الگوریتم مزبور در مقایسه با دو الگوریتم HS و ICA، ضمن تأیید نتایج

قبلی، نشان داد که الگوریتم بهبود یافته مورد نظر در این پژوهش، در مقایسه با دو الگوریتم رایج HS و ICA تطابق بهتری دارد. در ادامه عملکرد این الگوریتم در بهره‌برداری بهینه از سیستم پیچیده سه مخزنی حوضه آبریز هلیل رود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از حل مسئله، نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم بهبود یافته FDB-SOS نسبت به دو الگوریتم دیگر می‌باشد؛ به طوری که مقدار تابع هدف توسط الگوریتم‌های FDB-SOS، HS و ICA به ترتیب برابر ۸/۱۱، ۲۱/۷۵ و ۱۱/۳۹ به دست آمده است. جنبه دیگر برتری الگوریتم FDB-SOS نسبت

HS به ترتیب برابر با ۷۰/۵۸، ۱۶۹/۳۸ و ۲۴۶/۷، بعد از الگوریتم FDB-SOS، کمترین مقادیر حجم کمبود را ارائه دادند. در ادامه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی کارایی سیاست‌های بهره‌برداری مشتمل بر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، و در نهایت شاخص پایداری نشان داده شد که سیاست بهره‌برداری در سامانه چند مخزنه مبتنی بر الگوریتم بهبود یافته FDB-SOS، با شاخص پایداری ۴۰/۵۷، ۳۱/۲۸ و ۵۹/۸۰ در مقایسه با دو الگوریتم HS و ICA، از مزیت بسیار بالاتری برخوردار می‌باشد. لذا می‌توان استفاده از الگوریتم بهبود یافته FDB-SOS را برای تبیین سیاست‌های بهره‌برداری، خصوصاً سامانه‌های چند مخزنه پیچیده، قویاً توصیه نمود.

به دو الگوریتم دیگر، سرعت محاسبات بود که نتایج نشان داد، الگوریتم اخیر با زمان ۲۰۴ ثانیه، در مقایسه با دو الگوریتم HS و ICA، به ترتیب هر یک با ۷۲۷ و ۵۵۶ ثانیه، از سرعت بالاتری، بخصوص در مسائل با ابعاد بالا، برخوردار بود. بهینگی، به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی الگوریتم FDB-SOS، در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، به مراتب نتایج بهتری ارائه داد. به‌طوری که کمبود تأمین نیاز برای مخازن بافت، صفارود و جیرفت حاصل از حل مسئله با استفاده از الگوریتم جدید FDB-SOS، به ترتیب برابر با ۴۱/۱۲، ۱۴۵/۴۳ و ۴۶/۸۵ میلیون مترمکعب حاصل شد. این در حالی بود که کمبود تأمین نیاز در الگوریتم ICA به ترتیب برابر ۵۱/۲۸، ۱۶۹/۹۷ و ۱۱۱/۲ و در الگوریتم

منابع

- Akbarifard S, Qaderi K, Aliannejad M (2015) Optimal Operation of a Multi-Reservoir System Using Water Cycle Algorithm (WCA) and Gravitational Search Algorithm (GSA) (Case study: Gorganrood Basin). *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant* 2(5):37-49 (In Persian)
- Akbarifard, S., Sharifi, M. (2018). Optimization Operation of Karkheh River Basin Multi-Reservoirs System Operation by using Symbiotic Organisms Search (SOS) Algorithm. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(72), 69-86. (In Persian)
- Akbarifard, S., Sharifi, M., Radmanesh, F. (2018). Optimal Operation of Multi-Reservoir System Using Symbiotic Organisms Search Algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 269-273. (In Persian)
- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In 2007 IEEE congress on evolutionary computation (pp. 4661-4667). Ieee
- Cheng MY, Prayogo D (2014) Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Journal of Computers & Structures* 139: 98-112.
- Esat V, Hall MJ (1994) Water resources system optimization using genetic algorithm. *Hydro informatics* 94:225-231
- Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science, Proceedings of the Sixth International Symposium on* (pp. 39-43) IEEE
- Fallah-Mehdipour E, Bozorg-Haddad O (2013) Optimization of Multipurpose Reservoir Operation with Application Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Water and Wastewater* 23(4):97-105 (In Persian)
- Geem, Z. W. (2009). Optimal design of water distribution networks using harmony search (p. 112). Lap Lambert Academic Pub.
- Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP (1982) Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1):14-20
- Holland J (1975) *Adaptation in Natural and Artificial System*. University of Michigan Press.
- Kahraman, H. T., Aras, S., & Gedikli, E. (2020). Fitness-distance balance (FDB): A new selection method for meta-heuristic search algorithms. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105169.



Qaderi K, Arab D, Teshnehlab M, Ghazagh A (2010) Intelligent Operation Modeling of Reservoirs Using Group Method of Data Handling (GMDH). *Journal of Iran-Water Resources Research* 6(3):55-67 (In Persian)

Nourani V, Abolvaset N, Salehi K (2012) A hybrid Goal Programming method and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System for Optimal Operation of a Multi-Objective Two-Reservoir System. *Journal of Iran-Water Resources Research* 8(2):1-11 (In Persian)

Labadie J W (2004) optimal operation of multi-reservoir systems: State of the art review. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(2): 93-111

Madadi, M. R., Akbarifard, S., & Qaderi, K. (2020). Performance Evaluation of Improved Symbiotic Organism Search Algorithm for Estimation of Solute Transport in Rivers. *Water Resources Management*, 1-12.

Sethi R, Pandey BK, Krishan R, Khare D, Nayak PC (2015) Performance evaluation and hydrological trend detection of a reservoir under climate change condition. *Modeling Earth Systems and Environment* 1(4):33-43

Panda A, Pani, S (2016) A Symbiotic Organism Search algorithm with Adaptive Penalty Function to solve multi-objective constrained optimization problems. *Applied Soft Computing* 46:344–360

Tran DH, Cheng MY, Prayogo D (2015) A novel Multiple Objective Symbiotic Organisms Search (MOSOS) for time–cost–labor utilization tradeoff problem. *Knowledge-Based Systems* 94:132–145

Tejani G, Savsani V, Patel V (2016) Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. *Journal of Computational Design and Engineering* 3(3):226–249

Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-390

Simonovic S P (1992) Closing gap between theory and practice. *Water Resources Planning and Management* 118(3):262-280

Wardlaw R and Sharif M (1999). Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system Operation. *Water Resources Planning and Management* 125(1):25-33

Yeh W G (1985) Reservoir management and operation models: A State-of-the-art review. *Water Resources Research* 21(12):1797-1818



Optimization of Multi-Reservoir System Operation Using Symbiotic Organisms Search Algorithm Based on the Fitness-Distance-Balance

Aliakbar Rezaei-Estakhrouei¹, Navid Jalalkamali^{2*}, Mehdi Momeniroghabadi³

Abstract

In recent decades, metaheuristic algorithms have been successfully applied in various aspects of water resource engineering and management issues, especially in reservoirs' optimal operation. In this paper, a new method based on Symbiotic Organisms Search using the Fitness-Distance-Balance (FDB-SOS) algorithm has been developed for modeling optimal operation of complex multi reservoir system Baft, Safarood, and Jiroft reservoirs of Halilrood basin situated at latitude $56^{\circ}51'-61^{\circ}30'$ N and longitude $26^{\circ}18'-29^{\circ}30'$ E. The system consists of 3 different agricultural irrigation demands allocation with environmental prioritize in the long-term (from 2000 to 2019) approach. The developed model was used to solve the complex multi-reservoir system operating Halilrood basin. The new FDB-SOS algorithm results were compared with other developed evolutionary algorithms, including Harmony Search Algorithm (HS) and Imperialist competitive algorithm (ICA). Results showed the new FDB-SOS algorithm's sustainability index was obtained 87.23, 74.34, and 96.03 percent of downstream demands for Baft, Safarood, and Jiroft reservoirs. The finding revealed that the new FDB-SOS algorithm was the superior algorithm in optimal operation of the multi-reservoir system.

Keywords: FDB-SOS Algorithm, Optimal Operation, Halilrood Basin, Metaheuristic algorithms.

¹ Ph. D. Candidate in Water Resources Management, Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran. (aliakbarrezaei19@yahoo.com)

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran. (*Corresponding Author: njalalkamali@iauk.ac.ir)

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran. (zimaraz.pars1387@gmail.com)