

Research Article

Evaluation of Multi-Objective Firefly Algorithm and its Application in Optimal Multi- Objective Operation of Reservoirs

M Khorsandi¹, PS Ashofteh^{2*}

Received: November 27, 2021

Accepted: November 23, 2022

Revised: July 7, 2022

Published online: September 22, 2024

1-M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2-Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran

* Corresponding Author, Email: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Previous researches have often used the Firefly Algorithm (FA) as a single-purpose operation of the reservoir. For example, Garousi-Nejad and Bozorg-haddad (2014) used FA for the first time in water science and reservoir operation, using ten-year statistical data of the Aidoghmoush reservoir located in East Azerbaijan province of Iran. They used it to meet the needs of downstream irrigation. In order to show the efficiency of FA, the results of this algorithm were compared with the global optimum results obtained from the nonlinear programming (NLP) method. The results showed that FA responses differed by less than one percent from NLP. Garousi-Nejad et al. (2016) used the FA to operate the reservoir and used the superiority of this algorithm over GA using five mathematical tests, the problem of reservoir operation for agricultural water supply, and the problem of reservoir operation to generate electricity. The results showed the superiority of FA performance in terms of global optimum convergence rate compared to GA results. Therefore, further investigating the capability and application of the multi-objective of this algorithm in the multi-purpose reservoir operation is necessary.

In this study, first, the performance of the MOFA algorithm is compared with the well-known and common NSGA-II algorithm from three perspectives of execution time, generation distance, and distance metric in two mathematical test functions. After ensuring they perform correctly in the test functions, an evaluation is performed for a reservoir operation problem. Then, three reservoir operation policies are selected from the policy set and reviewed.

Methodology

Aidoghmoush dam is one of the dams built in East Azerbaijan Province, located at 19 km from Mianeh city. Aidoghmoush dam is located in the Sefidrood catchment area and Aidoghmoush sub-basin on the Aidoghmoush river. The structure of the dam is a clay-core rockfill. In this study, the Aidoghmoush reservoir's operation is examined from 1990 to 1996. The FA algorithm was developed by Yang (2008). This algorithm is based on the idealization of the behavior and flashing patterns of fireflies. The test functions used in the present study are (1) Schaffer test function (SCH) and (2) Fonesca test function (FON) (Coello et al. 2007). The MOFA algorithm was used to solve two multi-objective test functions, and its performance was compared with NSGA-II. The Generational Distance (GD) metric, introduced by Van Veldhuizen and Lamont (1998), was used to measure the proximity of the non-dominated solutions obtained to the true Pareto front (PF_{true}) (Coello et al. 2007). The spacing (SP) metric introduced by Schott (1995) was also used to measure the distribution of the obtained non-dominated solutions.

Findings



In both test functions, the MOFA with good solution quality has a significant time difference in execution time compared to the NSGA-II algorithm; the MOFA is 30% faster in the SCH test function and 15% more quickly in the FON test function than the NSGA-II. Therefore, the MOFA can be a good algorithm for optimizing complex and time-consuming problems such as reservoir operation. The MOFA algorithm in two groups of parameters compared with the NSGA-II algorithm was evaluated in the problem of reservoir operation to maximize reservoir storage and minimize deficit. Extracted solutions from the MOFA algorithm improved by 11% compared to the NSGA-II algorithm by considering better parameter values in terms of proximity to the PF_{true} . Also, the execution time of the MOFA algorithm was improved by 13% compared to the NSGA-II algorithm's execution time.

Conclusion

Nature-inspired meta-heuristic algorithms have been considered in recent decades due to their suitable ability to derive optimal reservoir operation policies compared to classical methods. In this research, the Multi-Objective Firefly Algorithm (MOFA) is compared with the widely-used Non-Dominated Genetic Algorithm (NSGA-II) in two test functions [Schaffer (SCH) and Fonseca (FON)]. These algorithms are then used to solve the optimizing the reservoir operation problem. Aidoghmoush reservoir, located in East Azerbaijan province, is used as a case study. Two conflicting objective functions are considered, including the first objective function of maximizing reservoir storage and the second objective function of minimizing deficiency. The algorithm runtime, generation distance, and Spacing metric are used to evaluate and compare the studied algorithms. The results showed that the execution time of the MOFA algorithm in the two test problems examined was, on average, 22% less than the execution time of the NSGA-II algorithm, and the quality of the answers could be better or worse than NSGA-II. The results obtained in the multi-objective operation of the reservoir showed that the set of solutions obtained from the MOFA algorithm became closer to the PF_{true} averagely of 13% by considering the parameters α , β , and γ equal to 10, 1, and 0.1, instead of considering the parameters α , β , and γ equivalent to 0.25, 1 and 1, and the average execution time of the algorithm was improved by 3%. This improvement of the solution's quality and runtime was 13 and 11, respectively, compared to the NSGA-II algorithm.

Since the MOFA algorithm is fast, the quality of the resulting set of answers can be improved by adjusting parameters, modifying, or integrating with other methods, such as different optimization algorithms or machine learning algorithms, and using it to Optimize real-time problems that are important in terms of computational time and burden. It is further suggested that the MOFA algorithm be developed for more complex models such as multi-purpose reservoir operation with more than two objectives of multi-reservoir systems, and its performance in reservoir operation management problems be compared with other meta-heuristic algorithms.

Keywords: MOFA, Multi-Objective Optimization, NSGA-II, Optimal Reservoir Operation, Test Function



مقاله پژوهشی

ارزیابی الگوریتم چندهدفه کرم شب‌تاب و کاربرد آن در بهره‌برداری بهینه چندهدفه از مخازن

محبوبه خورسندی^۱، پریسادات آشفته^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه قم

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

چکیده

الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری روش‌های قدرتمند و قابل اعتمادی برای حل مسائل پیچیده از جمله بهینه‌سازی سامانه‌های مخازن هستند. در این تحقیق الگوریتم چندهدفه کرم شب‌تاب (MOFA) با الگوریتم پرکاربرد ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) در دو تابع آزمون [شیفر (SCH) و فونسکا (FON)] مقایسه شد. سپس این الگوریتم‌ها برای حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری چندهدفه از مخزن بکار گرفته شدند. مخزن آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی، به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شد. دو تابع هدف متقابل از جمله تابع هدف اول بیشینه‌سازی ذخیره مخزن و تابع هدف دوم کمینه‌سازی کمبود در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های مورد بررسی از شاخص‌های زمان اجرای الگوریتم، فاصله نسلی و معیار فاصله استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم MOFA در دو تابع آزمون بررسی‌شده نسبت به NSGA-II به طور میانگین ۲۲ درصد سریع‌تر است. در مسأله بهره‌برداری از مخزن، نتایج نشان داد که کیفیت جواب‌ها از نظر نزدیکی به جبهه پارتو بهینه برای الگوریتم MOFA با بهبود مقادیر پارامترها توانست به میزان ۱۱ درصد نسبت به الگوریتم NSGA-II بهبود یابد. همچنین زمان اجرای الگوریتم MOFA نسبت به زمان متناظر در الگوریتم NSGA-II به میزان ۱۳ درصد بهبود یافت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری بهینه از مخزن، بهینه‌سازی چندهدفه، تابع آزمون، MOFA، NSGA-II

مقدمه

اغلب مخازن برای اهداف مختلف طراحی و ساخته شده‌اند. بنابراین لازم است بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره ارزیابی شود و بهترین سیاست بهره‌برداری از مخزن از طریق مدل‌های بهینه‌سازی استخراج شود و الگوی تقابلات بین اهداف توسط نمودار جبهه پارتو یافته شود. مسائل بهره‌برداری از مخزن دارای روابط پیچیده و غیرخطی، ناپیوسته^۱ و چندحالتی^۲ هستند که روش‌های کلاسیک به علت مشکلاتی از قبیل دچار شدن به نفرین ابعادی^۳ و به دام افتادن در بهینه موضعی قادر به حل این مسائل نیستند. بنابراین محققان برای یافتن قواعد بهینه بهره‌برداری به استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و فراابتکاری مختلف روی آورده‌اند (بزرگحداد و همکاران ۲۰۱۷، جهان‌دیده-تهرانی و همکاران ۲۰۲۱). به عنوان مثال، دین پژوه و همکاران (۲۰۱۷) از دو الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۴ (PSO) و الگوریتم ژنتیک^۵ (GA) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن آب سد علویان استفاده کردند. نتایج به دست آمده از این دو روش با نتایج سیاست بهره‌برداری استاندارد با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مقایسه شد. نتایج نشان داد که عملکرد الگوریتم PSO مناسب‌تر از الگوریتم ژنتیک بود. اکبری و همکاران (۲۰۱۸) از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش-یادگیری^۶ (TLBO)، الگوریتم جستجوی داخلی و الگوریتم GA برای بهره‌برداری از دو مخزن دز و علویان تحت سناریوهای تغییر اقلیم استفاده کردند. یعقوب‌زاده-باوندپور و همکاران (۲۰۲۲) الگوریتم‌های هوش ازدحامی^۷ (SI) و محاسبات تکاملی^۸ (EC) را در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن

مقایسه کردند. ایشان از چهار الگوریتم PSO، TLBO، GA و الگوریتم فرهنگی^۹ (CA) برای تعیین بهره‌برداری بهینه مخزن آیدوغموش واقع در استان آذربایجان شرقی، ایران استفاده کردند. ایشان از چهار معیار شامل مقدار تابع هدف، زمان اجرا، استحکام، و نرخ همگرایی برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های منتخب استفاده کردند. نتایج نشان داد که اگرچه هر دو الگوریتم SI و EC عملکرد قابل قبولی داشتند و راه‌حل‌های بهینه را برای بهره‌برداری مخزن ارائه کردند، الگوریتم‌های SI از نظر دقت راه‌حل‌ها، نرخ همگرایی و زمان اجرا برای رسیدن به بهینه سراسری از الگوریتم‌های EC بهتر عمل کردند. یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری که عملکرد مناسب‌تری در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن نسبت به الگوریتم‌های متداول پیشین [مانند الگوریتم GA] داشته است، الگوریتم کرم شب‌تاب^{۱۰} (FA) است (گروسی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۶b). پژوهش‌هایی به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با استفاده از الگوریتم FA پرداخته‌اند؛ از جمله: گروسی‌نژاد و بزرگحداد (۲۰۱۴) الگوریتم FA را برای اولین بار در علوم آب و بهره‌برداری از مخزن، با استفاده از داده‌های آماری ده-ساله مخزن آیدوغموش با هدف تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست، استفاده کردند. ایشان نتایج الگوریتم FA را با نتایج بهینه سراسری حاصل از روش برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۱} (NLP) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که پاسخ‌های FA کم‌تر از یک درصد با NLP اختلاف داشت. حسینی‌موغاری و بنی‌حبیب (۲۰۱۴) الگوریتم کرم شب‌تاب را برای مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بازفت برای یک بازه ۱۲۰ ماهه بکار گرفتند. تابع هدف، کمینه‌کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار تقاضا و

⁷ Swarm Intelligence⁸ Evolutionary Computation⁹ Cultural Algorithm¹⁰ Fierfly Algorithm¹¹ Non-Linear Programing¹ Discontinuity² Multimodality³ Curse of Dimensionality⁴ Particle Swarm Optimization⁵ Genetic Algorithm⁶ Teaching-learning-based Optimization

یک روش بهینه‌سازی قابل رقابت با سایر روش‌ها بود که توانست انواع مسائل بهره‌برداری مخزن را حل کند. گروسی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۶b) الگوریتم FA را برای بهره‌برداری از مخزن استفاده نمودند و با استفاده از پنج تابع آزمون ریاضی و دو مسأله بهره‌برداری از مخزن یکی با هدف تأمین آب کشاورزی و دیگری با هدف تولید برق، برتری این الگوریتم را نسبت به الگوریتم GA از نظر میزان همگرایی به بهینه سراسری، نشان دادند. بزرگحداد و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتم کرم شبتاب توسعه‌یافته چندهدفه^{۱۱} (MODFA) را برای تولید انرژی برق‌آبی ایجاد کردند. ایشان اهداف بیشینه نمودن اطمینان‌پذیری از تولید نیروگاه‌های آبی و کمینه نمودن آسیب‌پذیری سامانه سه‌مخزنه را در نظر گرفتند. پارتوهای بهینه^{۱۲} (OPs) حاصل از MODFA با مواردی که از الگوریتم MOGA و MOFA به‌دست آمد، برای آستانه‌های مختلف بهره‌برداری مقایسه شد. نتایج نشان داد که برای محاسبه OP‌های مناسب با راه‌حل‌های مجزا^{۱۳} و توزیع گسترده‌ای از راه‌حل‌ها^{۱۴}، MODFA از MOGA و MOFA برتر بود. آزادی و همکاران (۲۰۲۱) برای به‌دست آوردن رهاسازی‌های بهینه مخزن برای بهینه‌سازی کل جامدات محلول (TDS) تحت شرایط تغییر اقلیم یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی ارائه دادند. این رویکرد با اتصال مدل هیدرودینامیکی CE-QUAL-W2 به الگوریتم کرم شبتاب k-نزدیک‌ترین همسایه^{۱۵} (FA-KNN) توسعه یافت که در آن FA-KNN بر بار محاسباتی CE-QUAL-W2 غلبه کرد. مخزن آیدوغموش برای ارزیابی رویکرد پیشنهادی بررسی شد. ۳۶ سناریوی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای ارزیابی الگوریتم ترکیبی

مقدار رهاسازی‌شده از مخزن، به بیشینه نیاز طی دوره بهره‌برداری بود. عملکرد الگوریتم FA با الگوریتم‌های GA و PSO مقایسه شد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر FA نسبت به دو روش دیگر بود. زینلی و همکاران (۲۰۱۵) بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن در یک دوره ۹۹ ماهه را با استفاده از FA بررسی کردند. α را به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در تحلیل حساسیت پارامترها یافتند و و بررسی نمودند که انتخاب مقدار مناسب برای آن در بهبود کارایی FA موثر خواهد بود. ایشان برای ارزیابی عملکرد FA در مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد، نتایج آن را با نتایج الگوریتم‌های سامانه مورچگان پیوسته^۱ (ACOR) و سامانه مورچگان ترتیبی^۲ (ACOrank) مقایسه کردند. همچنین الگوریتم‌های مذکور را تحت دو حالت با و بدون قیود زنجیره‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد مربوط به الگوریتم FA با قیود زنجیره‌ای و سپس با اختلاف زیاد به‌ترتیب مربوط به الگوریتم‌های ACOR و ACOrank با قیود زنجیره‌ای بود. گروسی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۶a) الگوریتم کرم شبتاب اصلاح‌شده^۳ (MFA) را برای حل مسأله بهره‌برداری از مخزن در دامنه پیوسته و گسسته ارائه و سه مسأله بهره‌برداری چندمخزنه برای تولید انرژی را بهینه نمودند. نتایج MFA با نتایج LP، برنامه‌ریزی پویا دیفرانسیلی^۴ (DDP) و برنامه‌ریزی گسسته^۵ (DDDP)، GA، الگوریتم چندکلونی مورچه^۶ (MCAA)، الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل^۷ (HBMO)، الگوریتم چرخه آب^۸ (WCA)، الگوریتم خفاش^۹ (BA) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر بیوگرافی^{۱۰} (BBO) مقایسه شد. نتایج نشان داد که MFA

¹⁰ Biogeography-Based Optimization¹¹ Multi-Objective Developed Firefly Algorithm¹² Optimal Pareto¹³ Distinct Solutions¹⁴ Wide Distribution of Solutions¹⁵ Firefly Algorithm k-Nearest Neighbor¹ Continuous domain Ant Colony Optimization Algorithm² Ranking Ants Colony Optimization Algorithm³ Modified Firefly Algorithm⁴ Differential Dynamic Programming⁵ Discrete DDP⁶ Multicolony Ant Algorithm⁷ Honey-Bee Mating Optimization⁸ Water Cycle Algorithm⁹ Bat Algorithm

مواد و روش‌ها

الگوریتم MOFA

FA، الگوریتمی فراابتکاری است که با الهام از رفتار کرم‌های شب‌تاب و ایده‌آل‌سازی ارتباط نوری بین آنها توسط یانگ (۲۰۰۸) توسعه یافت. برای ایده‌آل‌سازی این ویژگی‌ها سه قانون در نظر گرفته شده است: (۱) همه کرم‌های شب‌تاب تک‌جنسیتی^۱ هستند و فارغ از جنسیت جذب یکدیگر می‌شوند. (۲) جذابیت آنها با درخشندگی^۲ آنها متناسب است، بنابراین کرم‌های با روشنایی کمتر، جذب کرم روشن‌تر می‌شوند و به سوی آن حرکت می‌کنند. (۳) در مسائل بهینه‌سازی، روشنایی یک کرم شب‌تاب متأثر از تابع هدف راه‌حل‌های موجود در فضای تصمیم محاسبه می‌شود.

جذابیت کرم‌های شب‌تاب با شدت درخشندگی مشاهده‌شده توسط کرم‌های مجاور و فاصله بین آنها متناسب است (رابطه ۱). همچنین برای محاسبه سریع‌تر رابطه ۲ پیشنهاد شد.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad [1]$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r_{ij}^2} \quad [2]$$

که در آنها، β = جذابیت کرم‌های شب‌تاب، γ = ضریب جذب نور و β_0 = جذابیت در $r_{ij} = 0$ هستند و r_{ij} = فاصله بین دو کرم شب‌تاب i و j به ترتیب در موقعیت‌های x_i و x_j است که می‌تواند توسط فاصله کارتزین $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ محاسبه شود.

حرکت کرم i به سمت کرم جذاب‌تر (روشن‌تر) j به صورت زیر محاسبه می‌شود (یانگ ۲۰۰۸):

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad [3]$$

که در آن، x_i و x_j = به ترتیب موقعیت کرم‌های شب‌تاب i و j = پارامتر تصادفی ساز، ε_i = یک بردار تصادفی برای

ارزیابی شد. خورسندی و همکاران (۲۰۲۲) الگوریتم کارآمد و ترکیبی چندهدفه کرم شب‌تاب-K نزدیک‌ترین همسایه (MOFA-KNN) را، برای مسائلی که از نظر محاسباتی سنگین هستند، توسعه دادند که به پیچیدگی رویکردهای قبلی نبود. الگوریتم پیشنهادی برای مسائل معیار و واقعی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که زمان اجرای الگوریتم ترکیبی MOFA-KNN برای مسأله معیار توانست تا ۹۹/۹۸ درصد کمتر از زمان اجرای الگوریتم MOFA باشد. همچنین الگوریتم MOFA-KNN در مسأله واقعی بهره‌برداری چندهدفه از مخزن با اهداف کمینه‌سازی TDS رهاسازی‌شده و اختلاف دمای آب جریان ورودی و خروجی، به‌طور قابل توجهی (۶۶۰ بار) زمان اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی را در مقایسه با استفاده از MOFA به‌تنهایی، کاهش داد. در تحقیقات پیشین به بهره‌برداری چندهدفه از مخزن با استفاده از الگوریتم MOFA کمتر پرداخته شده است. بنابراین لازم است قابلیت و کاربرد این الگوریتم در بهره‌برداری از مخزن مورد بررسی بیش‌تری قرار گیرد.

در این مطالعه ابتدا به مقایسه عملکرد الگوریتم MOFA با الگوریتم شناخته‌شده و متداول NSGA-II از سه منظر زمان اجرا، فاصله نسلی و معیار فاصله در دو تابع آزمون ریاضی پرداخته می‌شود و پس از اطمینان از درستی عملکرد آنها در مسائل آزمون، ارزیابی برای یک مسأله بهره‌برداری از مخزن نیز انجام می‌گردد. سپس سه سیاست بهره‌برداری از مخزن از بین مجموعه سیاست‌ها انتخاب و بررسی می‌شود. هدف این مطالعه بررسی و بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری کرم شب‌تاب چندهدفه در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب در تعیین مجموعه سیاست‌های بهره‌برداری چندهدفه از سامانه تک‌مخزنه می‌باشد.

¹ Unisex

² Light Intensity

معیارهای عملکرد

برای ارزیابی توابع چندهدفه شاخص‌های متعددی وجود دارد که کیفیت مجموعه راه‌حل‌های به‌دست‌آمده را از دو منظر بهینه بودن راه‌حل‌ها و تنوع آنها می‌سنجند. شاخص معیار فاصله نسلی^۴ (GD) (ون ولدهایزن و لامونت ۱۹۹۸) برای اندازه‌گیری نزدیکی راه‌حل‌های نامغلوب به‌دست‌آمده به جبهه پارتوی صحیح^۵ (PF_{true}) استفاده شد. همچنین از معیار فاصله^۶ (SP) (شات ۱۹۹۵) برای اندازه‌گیری توزیع راه‌حل‌های نامغلوب به‌دست‌آمده استفاده شد. مقادیر کمتر برای معیار GD و SP نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم است.

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad [۶]$$

$$SP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad [۷]$$

که در آن، $d_i = \min_j \|f(x_i) - PF_{true}(x_j)\|$ فاصله اقلیدسی بین راه‌حل‌های نامغلوب $f(x_i)$ و نزدیک‌ترین راه‌حل‌های جبهه پارتو در فضای هدف است. $\bar{d}$ میانگین مقدار d_i و n تعداد اعضا در مجموعه نامغلوب است.

بهره‌برداری چندهدفه از مخزن

منطقه مورد مطالعه

سد آیدوغموش یکی از سدهای احداث‌شده در استان آذربایجان شرقی است که در ۱۹ کیلومتری شهرستان میانه می‌باشد. سد آیدوغموش در حوضه آبریز سفیدرود و زیرحوضه آیدوغموش، بر روی رودخانه آیدوغموش واقع شده است. شکل ۳ موقعیت مخزن آیدوغموش را نشان می‌دهد.

کرم شب‌تاب است که از توزیع گوسی یا توزیع یکنواخت گرفته شده است. همچنین بخش دوم سمت راست معادله برای جذب است. بخش سوم تصادفی‌سازی است.

در این مطالعه از رویکرد بکار رفته در NSGA-II (دب و همکاران ۲۰۰۲) یعنی رویکرد رتبه‌بندی براساس مرتب‌سازی نامغلوب^۱ (NS) و تخصیص براساس فاصله ازدحامی^۲ برای ایجاد الگوریتم چندهدفه کرم شب‌تاب استفاده شد؛ و در هر اجرا مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب به‌عنوان جبهه پارتو ارائه می‌شود.

توابع آزمون چندهدفه ریاضی

تابع آزمون شیفر^۳ (SCH) یک تابع دوهدفه غیرمقید با جبهه پارتوی پیوسته منفرد محدب است که دارای یک متغیر تصمیم می‌باشد. رابطه ۴ تابع SCH را نشان می‌دهد (دب ۲۰۰۱).

تابع آزمون فونسکا (FON) یک تابع دوهدفه غیرمقید با جبهه پارتوی مقعر است که دارای سه متغیر تصمیم‌گیری می‌باشد. رابطه ۵ تابع FON را نشان می‌دهد (دب ۲۰۰۱).

$$\begin{cases} F_1(x) = x^2 \\ F_2(x) = (x-2)^2 \end{cases} \quad -10^5 \leq x \leq 10^5 \quad [۴]$$

$$\begin{cases} F_1(x) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right) \\ F_2(x) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right) \end{cases} \quad [۵]$$

$-4 \leq x_i \leq 4; i = 1, 2, 3$

که در آنها، $F_1(x)$ و $F_2(x)$ به‌ترتیب توابع هدف اول و دوم هستند و x_i متغیر تصمیم i ام است.

⁴ Generational Distance

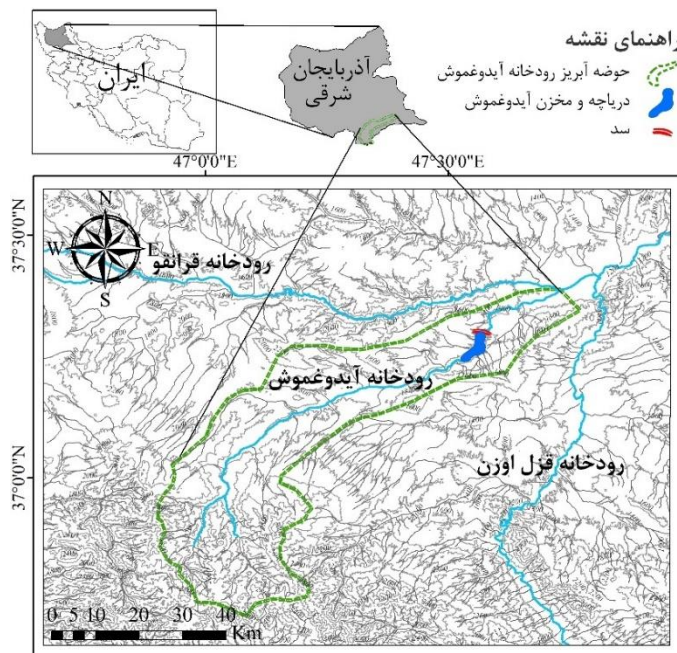
⁵ True Pareto Front

⁶ Spacing

¹ Nondominated Sorting

² Crowding-distance Sorting

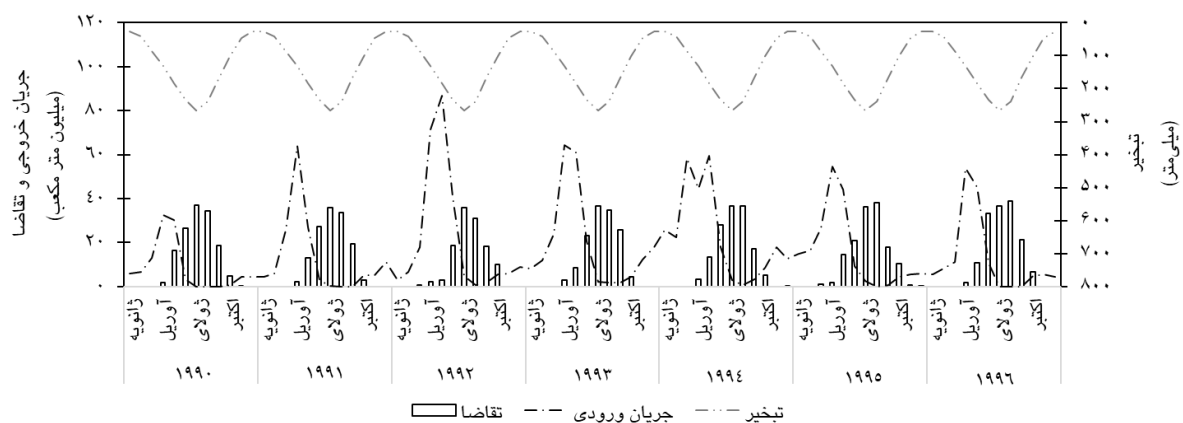
³ Schaffer



شکل ۱- موقعیت مخزن آیدوغموش.

جریان ورودی و تبخیر را برای مخزن آیدوغموش را در دوره مورد مطالعه (۱۹۹۰-۱۹۹۶) نشان می‌دهد.

در این مطالعه برنامه بهره‌برداری از مخزن آیدوغموش در بازه زمانی سال ۱۹۹۰ تا سال ۱۹۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ تقاضای پایین‌دست،



شکل ۲- تقاضای پایین‌دست، جریان ورودی و تبخیر در بازه ۷ ساله (۱۹۹۰-۱۹۹۶).

مقدار معینی در نظر گرفته شده که بیشترین مقدار مربوط به ماه ژوئیه و کمترین مربوط به ماه دسامبر است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کمترین و بیشترین جریان ورودی سالانه به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۴ می‌باشد. کمترین و بیشترین تقاضای سالانه به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۶ است. همچنین میزان تبخیر برای هر سال

مدل بهره‌برداری از مخزن

سامانه مخزن منطبق بر رابطه پیوستگی بیلان مخزن شبیه‌سازی می‌شود. رابطه ۸ معادله پیوستگی

هستند. در واقع در این مدل میزان رهاسازی ماهانه متغیر تصمیم و حجم ذخیره مخزن متغیر حالت است.

راه حل‌ها در مسأله بهره‌برداری از مخزن لازم است قیود رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ را برآورده سازد. در صورتی که راه حل‌ها از رابطه ۱۳ و ۱۴ تخطی کنند به ترتیب مقدار جریمه‌های رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، مطابق رابطه ۱۷ با توابع هدف کسر یا جمع می‌شود؛ به طوری که در تابع هدف بیشینه‌سازی، مقدار جریمه کسر و در تابع هدف کمینه‌سازی مقدار جریمه جمع می‌شود.

$$R_m \geq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad [13]$$

$$S_m \geq S_{min}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad [14]$$

$$Penalty1 = \frac{S_{min} - S_m}{S_{max} - S_{min}} \quad [15]$$

$$Penalty2 = \frac{R_m}{D_{ave}} \quad [16]$$

$$\begin{aligned} F_1(or F_2) \\ = F_1(or F_2) \\ \pm c \times Penalty1(or Penalty2) \end{aligned} \quad [17]$$

که در آنها، S_{min} = کمینه ظرفیت مخزن؛ $Penalty$ = مقدار جریمه؛ c = عدد ثابت مثبتی به عنوان ضریب تابع جریمه، است.

نتایج و بحث

برای بهینه‌سازی توابع آزمون و مسأله بهره‌برداری از مخزن، جمعیت ۵۰ و تکرار ۵۰۰ برای الگوریتم‌ها در نظر گرفته شد. برای مسائل آزمون و مسأله بهره‌برداری از مخزن ۱۰ اجرای مستقل متوالی از الگوریتم‌ها انجام شد. پارامترهای α ، β و γ در الگوریتم MOFA، مطابق مقادیر پیشنهادی یانگ (۲۰۱۳) به ترتیب ۰/۲۵، ۱ و ۱ در نظر گرفته شد. پارامترهای p_c و p_m در الگوریتم NSGA-II، مطابق مقادیر پیشنهادی دب و همکاران (۲۰۰۲) به ترتیب ۰/۹ و $1/nvar$ در نظر گرفته شد. در مسأله بهره‌برداری از مخزن علاوه بر پارامترهای پیشنهادی یانگ برای الگوریتم MOFA،

مخزن را نشان می‌دهد که حجم آب را در ماه $m + 1$ محاسبه می‌کند (آشفته و همکاران ۲۰۱۵).

[۸]

$$S_{m+1} = S_m + Q_m - R_m - (E_m \times \bar{A}_m) - Sp_m$$

$$\bar{A}_m = r_0 + r_1 \quad [9]$$

[۱۰]

$$\begin{aligned} Sp_m &= S_m + Q_m - R_m - (E_m \times \bar{A}_m) - S_{max} \\ \text{if } S_m + Q_m - R_m - (E_m \times \bar{A}_m) &\geq S_{max} \end{aligned}$$

یا

$$\begin{aligned} Sp_m &= 0 \\ \text{if } S_m + Q_m - R_m - (E_m \times \bar{A}_m) &< S_{max} \end{aligned}$$

که در آنها، m شمارنده ماه‌ها به ازای $m = 1, 2, 3, \dots, M$ و M تعداد کل ماه‌های بازه زمانی مورد مطالعه؛ S_{m+1} و S_m = حجم ذخیره‌سازی مخزن به ترتیب در انتها و ابتدای ماه m ؛ Q_m = جریان ورودی به مخزن در ماه m ؛ R_m = رهاسازی در ماه m ؛ E_m = تبخیر در ماه m ؛ $\bar{A}_m$ = میانگین سطح دریاچه مخزن در ماه m ؛ Sp_m = حجم سرریز از مخزن در ماه m ؛ $\bar{S}_m$ = میانگین حجم ذخیره مخزن به ترتیب در ابتدا و انتهای ماه m ؛ r_0 و r_1 = متغیرهای ثابت در رابطه سطح-حجم؛ S_{max} = بیشینه ظرفیت مخزن، هستند (آشفته و همکاران ۲۰۱۵).

در این پژوهش دو هدف بیشینه‌سازی ذخیره‌سازی مخزن و کمینه‌سازی کمبود برای بهره‌برداری از مخزن در نظر گرفته شدند. رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ اهداف را نشان می‌دهند.

$$\text{Maximize } F_1 = \sum_{y=1}^Y \sum_{m=1}^{12} S_m^y \quad [11]$$

$$\text{Minimize } F_2 = \frac{\sum_{m=1}^M (D_m - R_m | R_m < D_m)}{D_{ave}} \quad [12]$$

که در آنها، F_1 و F_2 = توابع هدف؛ Y = تعداد سال‌های مورد مطالعه؛ y و m = به ترتیب شمارش‌گر سال و ماه؛ S_m^y = ذخیره مخزن در ماه m و سال y ؛ D_m = تقاضای پایین‌دست مخزن در ماه m ؛ R_m = رهاسازی در ماه m ؛ D_{ave} = متوسط تقاضای پایین‌دست مخزن،

GD	18×10^{-4}	16×10^{-4}	16×10^{-4}
SP	14×10^{-3}	11×10^{-3}	10×10^{-3}

در جدول ۱ مشاهده می‌شود که الگوریتم MOFA به‌صورت کلی در معیار زمان و SP، از الگوریتم NSGA-II در مسأله آزمون SCH بهتر است؛ اما الگوریتم MOFA معیار GD بهتری دارد. در الگوریتم MOFA محدوده تغییرات بزرگ‌تری دارد؛ در صورتی که در الگوریتم NSGA-II، معیار GD در یک بازه محدود تغییرات داشته است. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که الگوریتم MOFA به‌صورت کلی در هر سه معیار زمان، GD و SP نسبت به الگوریتم NSGA-II برتری دارد؛ اما در معیارهای GD و SP با تفاوت کمی برتر است. به‌صورت کلی در هر دو مسأله آزمون، الگوریتم MOFA با کیفیت جواب مناسب، تفاوت زمانی قابل توجهی در زمان اجرا نسبت به الگوریتم NSGA-II دارد؛ به‌طوری که، الگوریتم MOFA در تابع آزمون SCH، ۳۰ درصد و در تابع آزمون FON، ۱۵ درصد نسبت به الگوریتم NSGA-II سریع‌تر است. بنابراین الگوریتم MOFA می‌تواند الگوریتم مناسبی برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده و زمان‌بر مثل بهره‌برداری از مخزن باشد.

نتایج مربوط به مسأله بهره‌برداری از مخزن

در بهینه‌سازی چندهدفه در هر اجرا مجموعه‌ای از جواب‌ها به دست می‌آید. شکل ۵ مجموع نقاط به‌دست‌آمده از ۱۰ اجرای مستقل را به‌ازای هریک از الگوریتم‌های MOFA با پارامترهای پیشنهادی یانگ (۲۰۱۳) (MOFA1) و با پارامترهای پیشنهادی گروسی‌نژاد و بزرگ‌حداد (۲۰۱۴) (MOFA2)، الگوریتم NSGA-II با مقادیر پیشنهادی دب و همکاران (۲۰۰۲) و جبهه پارتوی صحیح به‌دست‌آمده از مجموع اجراها را نشان می‌دهد.

پارامترهای پیشنهادی گروسی‌نژاد و بزرگ‌حداد (۲۰۱۴)، یعنی ۱۰، ۱ و ۰/۱ به‌ترتیب برای α ، β و γ ، در نظر گرفته شد. بهینه‌سازی با نرم‌افزار MATLAB R2017b و توسط رایانه HPC با مشخصات واحد پردازش مرکزی Intel-Xeon CPU E5-2660 v4 @ 2 GHz 2 GHz (2 processors) و ۳۲ گیگابایت حافظه صورت گرفته است.

ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها

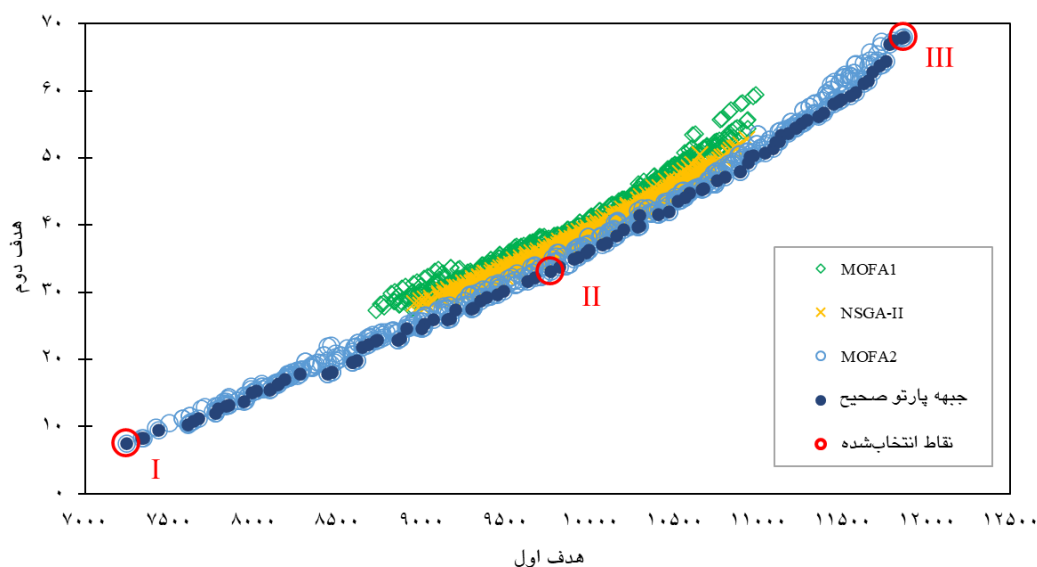
جدول ۱ عملکرد الگوریتم‌ها در تابع آزمون SCH و جدول ۲ عملکرد الگوریتم‌ها در تابع آزمون FON را نشان می‌دهند.

جدول ۱- عملکرد الگوریتم‌ها در تابع آزمون مسأله آزمون SCH.

معیار	زمان (ثانیه)	GD	SP
MOFA	۲۲۹	49×10^{-6}	44×10^{-3}
NSGA-II	۲۲۱	59×10^{-6}	44×10^{-3}
MOFA	۲۲۹	49×10^{-6}	44×10^{-3}
NSGA-II	۲۲۱	59×10^{-6}	44×10^{-3}

جدول ۲- عملکرد الگوریتم‌ها در تابع آزمون مسأله آزمون FON.

معیار	زمان (ثانیه)	GD	SP
MOFA	۱۷۸	14×10^{-4}	1×10^{-2}
NSGA-II	۱۵۸	16×10^{-4}	13×10^{-2}
MOFA	۱۷۸	14×10^{-4}	1×10^{-2}
NSGA-II	۱۵۸	16×10^{-4}	13×10^{-2}



شکل ۳- مجموع اجراها برای هریک از الگوریتم‌های MOFA و NSGA-II، جبهه پارتوی صحیح و نقاط انتخاب شده.

MOFA1	زمان (ثانیه)	۲۰۱	۱۹۹	۲۰۶
	GD	۲/۵۹	۲/۲۴	۲/۹۷
	SP	۸/۵۵	۳/۳۸	۱۴/۸۹
MOFA2	زمان (ثانیه)	۱۹۵	۱۷۷	۲۱۳
	GD	۲/۲۵	۱/۶۴	۳/۰۳
	SP	۲۶/۳۲	۲۱/۹۹	۳۰/۵۶
NSGA-II	زمان (ثانیه)	۲۲۳	۱۸۹	۲۵۳
	GD	۲/۵۴	۲/۲۵	۲/۷۴
	SP	۱۲/۲۹	۸/۷۹	۱۶/۴۱

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در مسأله بهره‌برداری از مخزن با اهداف بیشینه‌سازی ذخیره مخزن و کمینه‌سازی کمبود نیز اجرای MOFA1 و MOFA2 به زمان کمتری نسبت به اجرای NSGA-II نیاز دارد و اجرای MOFA2 زمان کمتری نسبت به MOFA1 از نظر معیار SP، MOFA1 کم‌ترین و بهترین و MOFA2 بیش‌ترین و بدترین مقدار را دارد. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده شد، MOFA2 نزدیک‌ترین راه‌حل‌ها را نسبت به پارتوی صحیح داشت، بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت، کم‌ترین GD در جدول ۳ متعلق به این

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، راه‌حل‌های حاصل از الگوریتم NSGA-II، اغلب راه‌حل‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم MOFA1 را مغلوب می‌کند. در صورتی که راه‌حل‌های حاصل از الگوریتم MOFA2 علاوه بر MOFA1، NSGA-II را هم مغلوب می‌کند. همچنین کاملاً مشهود است که گستردگی راه‌حل‌های الگوریتم MOFA2 در امتداد جبهه پارتو بسیار مناسب‌تر از سایر راه‌حل‌ها است (دب ۲۰۰۱). در ادامه، عملکرد الگوریتم‌ها توسط سه معیار مقایسه می‌شوند. جدول ۳ مقادیر معیارهای زمان اجرا، GD و SP برای ۱۰ اجرای مستقل متوالی از هریک از الگوریتم‌ها را در بهره‌برداری چندهدفه از مخزن را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که مقدار GD برای هر اجرا نسبت به جبهه پارتوی صحیح به‌دست آمده از مجموع اجراها، سنجیده شده است.

جدول ۴- میانگین، بهترین و بدترین مقادیر زمان اجرا، GD و SP برای الگوریتم‌های MOFA1، MOFA2 و NSGA-II در بهره‌برداری چندهدفه از مخزن.

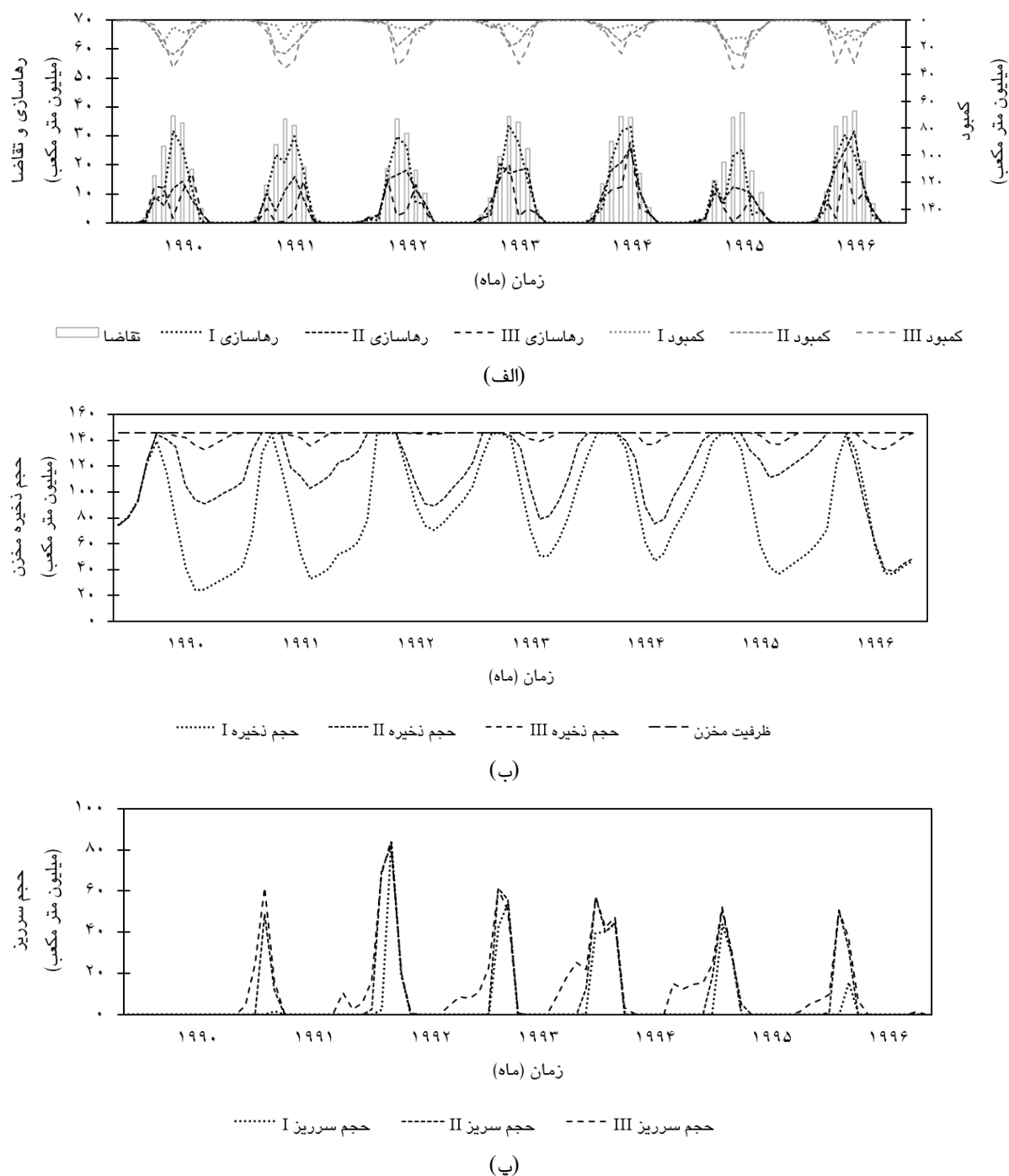
میانگین	بهترین	بدترین	GD	SP	زمان
۳.۱۱	۳.۱۱	۳.۱۱	۳.۱۱	۳.۱۱	۳.۱۱

الگوریتم و بیشترین GD متعلق به MOFA1 است که راه‌حل‌های حاصل از آن نسبت به پارتوی صحیح دورترین فاصله را داشتند. به‌صورت کلی الگوریتم MOFA2 از نظر زمان و نزدیکی به راه‌حل‌های بهینه یعنی معیار GD نسبت به الگوریتم‌های MOFA1 و NSGA-II عملکرد بهتری دارد؛ به‌طوری که زمان اجرای MOFA2 به‌ترتیب ۳ و ۱۳ درصد نسبت به زمان اجرای الگوریتم‌های MOFA1 و NSGA-II کمتر است. معیار GD در MOFA2 به‌ترتیب ۱۳ و ۱۱ درصد نسبت به . معیار GD در الگوریتم‌های MOFA1 و NSGA-II بهتر است. اما، توزیع راه‌حل‌ها در MOFA1 و NSGA-II بهتر است؛ به‌طوری که معیار SP در الگوریتم‌های MOFA1 و NSGA-II به‌ترتیب ۶۸ و ۵۳ درصد بهتر از مقدار متناظر در MOFA2 است.

همان‌طور که یافته‌های گروسی‌نژاد و بزرگ‌حداد (۲۰۱۴) نشان داد که مقادیر مناسب برای پارامترهای α ، β و γ در بهره‌برداری تک‌هدفه از مخزن آیدوغموش با استفاده از الگوریتم تک‌هدفه کرم شب‌تاب به‌ترتیب برابر با ۱۰، ۱ و ۰/۱ هستند، در این پژوهش نیز بررسی‌ها نشان داد که این مقادیر برای پارامترهای الگوریتم چندهدفه کرم شب‌تاب در بهره‌برداری چندهدفه از مخزن آیدوغموش نه‌تنها از نظر کیفیت جواب‌ها بلکه از نظر زمان اجرا نیز نتایج بهتری را به همراه دارد. بنابراین با توجه به نوع مسأله مورد بررسی و ویژگی‌های آن می‌توان با تحلیل حساسیت و تنظیم پارامترها (گروسی‌نژاد و بزرگ‌حداد ۲۰۱۴) و اصلاحات (گروسی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۶a)، الگوریتم MOFA را از نظر کیفیت جواب‌ها بهبود داد و با تلفیق با روش‌های دیگر (آزادی و همکاران ۲۰۲۱، خورسندی و همکاران ۲۰۲۲) سرعت محاسبات را تسریع بخشید.

هر یک از نقاط به‌دست‌آمده در فضای تصمیم نماینده یک سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف تعیین‌شده برای بهره‌برداری است (شکل ۵). در این مطالعه، هر نقطه تعیین‌کننده میزان رهاسازی در

بهره‌برداری از مخزن برای دستیابی همزمان به بیشینه ذخیره مخزن و کمینه کمبود است. برای بررسی سیاست‌های بهینه بهره‌برداری سه نقطه ابتدایی، میانی و انتهایی از مجموعه نقاط جبهه پارتو به‌دست‌آمده انتخاب شدند. نقطه میانی به‌صورتی انتخاب شده است که در هر یک از اهداف نزدیک‌ترین مقدار را نسبت به میانگین مقادیر آن هدف را دارد. این نقاط به‌ترتیب I، II و III نام‌گذاری شدند. سیاست I که در ابتدای جبهه پارتو قرار دارد، بر برآورده ساختن هدف دوم یعنی کمینه‌سازی کمبود متمرکز است و سیاست‌های II و III برای تأمین این هدف به‌ترتیب در اولویت دوم و سوم قرار می‌گیرند. سیاست III که در انتهای جبهه پارتو قرار دارد، بر برآورده ساختن هدف اول یعنی بیشینه‌سازی ذخیره مخزن متمرکز است و سیاست‌های II و I برای تأمین این هدف به‌ترتیب در اولویت دوم و سوم قرار می‌گیرند (شکل ۵). سیاست II بر هر دو هدف تأکید می‌کند. شکل ۶ (الف)، (ب) و (پ) به‌ترتیب رهاسازی، تقاضا و کمبود، حجم ذخیره مخزن و سرریز از مخزن را برای سه سیاست I، II و III نشان می‌دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود، سیاست I که اولویت اول برای کمینه‌سازی کمبود بود، در شکل (الف) بیش‌ترین رهاسازی، در شکل (ب) کم‌ترین ذخیره‌سازی و در شکل (پ) کم‌ترین سرریز را دارد. سیاست III که اولویت اول برای بیشینه‌سازی ذخیره مخزن بود، در شکل (الف) کم‌ترین رهاسازی، در شکل (ب) بیش‌ترین ذخیره‌سازی و در شکل (پ) بیش‌ترین سرریز را دارد. سیاست II در رهاسازی، ذخیره مخزن و سرریز، مقداری متوسط دارد. بنابراین با توجه به تقابل اهداف در بهره‌برداری چندهدفه از مخازن که بهبود یکی از اهداف تنزل دیگری را به‌دنبال دارد، اگر در بهره‌برداری از مخزن برآورده‌سازی هر دو هدف به یک میزان برای بهره‌بردار اهمیت داشته باشد، سیاست‌های متناظر با نقاط میانی جبهه پارتو، می‌تواند سیاست‌هایی مناسب برای برقرار کردن تعادل بین اهداف باشد.



شکل ۶- نمایش (الف) رهاسازی و تقاضا، (ب) حجم ذخیره مخزن و (پ) سرریز از مخزن آیدوغموش برای سه سیاست I، II و III در بازه ۷ ساله (۱۹۹۰-۱۹۹۶).

شده است. الگوریتم چندهدفه کرم شب تاب، MOFA، که الهام گرفته شده از رفتار جمعی کرم های شب تاب است، یکی از این الگوریتم های فراابتکاری است. در این مطالعه، عملکرد MOFA با دو مسأله آزمون ریاضی SCH و FON

نتیجه گیری کلی

الگوریتم های بهینه سازی فراابتکاری به طور گسترده ای برای حل مسائل پیچیده مدیریت آب استفاده

و حل یک مسأله بهینه‌سازی بیشینه‌سازی-کمینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، ارزیابی شد. همچنین عملکرد این الگوریتم نسبت به الگوریتم متداول و شناخته‌شده NSGA-II مقایسه شد. نتایج نشان داد که زمان اجرای الگوریتم MOFA در دو مسأله‌ی آزمون بررسی‌شده به‌طور میانگین ۲۲ درصد از زمان اجرای الگوریتم NSGA-II کمتر است و از نظر کیفیت جواب‌ها می‌تواند بهتر یا بدتر از NSGA-II باشد. نتایج حاصل در مسأله‌ی بهره‌برداری چندهدفه از مخزن، نشان داد که مجموعه راه‌حل‌های حاصل از الگوریتم MOFA با در نظر گرفتن پارامترهای α ، β و γ برابر با ۱۰، ۱ و ۰/۱، نسبت به به در نظر گرفتن پارامترهای α ، β و γ برابر با ۰/۲۵، ۱ و ۱ برای این الگوریتم، به‌طور میانگین ۱۳ درصد به جبهه پارتو صحیح نزدیک‌تر شد و میانگین زمان اجرای الگوریتم ۳ درصد بهبود یافت. این بهبود کیفیت راه‌حل‌ها

و زمان اجرا، نسبت به الگوریتم NSGA-II به‌ترتیب ۱۳ و ۱۱ بود.

با توجه به این که الگوریتم MOFA الگوریتمی سریع است، بنابراین می‌توان کیفیت مجموعه جواب‌های حاصل از آن را نیز با تنظیم پارامترها، اصلاحات یا تلفیق با روش‌های دیگر مثل تلفیق با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بهبود داد و از آن در حل بهینه‌سازی مسائل واقعی که از نظر زمان و بار محاسباتی دارای اهمیت هستند، بهره جست. در ادامه پیشنهاد می‌گردد الگوریتم MOFA برای مدل‌های پیچیده‌تر مثل بهره‌برداری چندهدفه با بیش از دو هدف از سیستم‌های چندمخزنه توسعه یابد و عملکرد آن در مسائل مدیریت بهره‌برداری از مخزن با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مقایسه شود.

منابع مورد استفاده

- Akbari-Alashti H, Soncini A, Dinpashoh Y, Fakheri-Fard A, Talatahari S and Bocchiola D, 2018. Operation of two major reservoirs of Iran under IPCC scenarios during the XXI century. *Hydrological Processes* 32(21):3254-3271.
- Ashofteh PS, Bozorg Haddad O and Loáiciga HA, 2015. Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with multiobjective genetic programming, *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(11).
- Azadi F, Ashofteh PS and Loáiciga HA, 2021. Simulation-optimization of reservoir water quality under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management* 147 (9):04021054.
- Bozorg-Haddad O, Solgi M and Loáiciga HA, 2017. *Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization*. John Wiley and Sons. Inc. 111 River Street. Hoboken. NJ 07030. USA.
- Bozorg-Haddad O, Garousi-Nejad I and Loáiciga HA, 2017. Extended multi-objective firefly algorithm for hydropower energy generation. *Journal of Hydroinformatics* 19 (5):734-751.
- Deb K, 2001. *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley and Sons. Inc. New York, USA.
- Deb K, Pratap A, Agrawal S and Meyarivan T, 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2):182-197.
- Dinpazhoh Y, Sattari MT, Ebrahimi S and Darbandi S, 2017. Optimum operation of reservoir using the genetic algorithm and particle swarm optimization (Case study: Alavian dam), *Water and Soil Science-University of Tabriz* 27(2):17-29 (In Persian with English abstract).
- Garousi-Nejad I and Bozorg-Haddad O, 2014. Optimal operation of the reservoir using the implementation of the worm optimization algorithm. Pp. 845-856. *Proceedings of the 5th Iranian Water Resources Management Conference*. 18-19 Feb, Tehran, Iran.
- Garousi-Nejad I, Bozorg-Haddad O and Loáiciga HA, 2016. Modified firefly algorithm for solving multireservoir operation in continuous and discrete domains. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(9):1-15.

- Garousi-Nejad I, Bozorg-Haddad O, Loáiciga, HA and Mariño MA, 2016. Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(10):1-12.
- Hosseini-Moghari SM and Banihabib ME, 2014. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly algorithm. *Journal of Soil and Water Resources Protection* 3(4):17-31 (In Persian with English abstract).
- Jahandideh-Tehrani M, Bozorg-Haddad O and Loáiciga HA, 2020. A review of applications of animal-inspired evolutionary algorithms in reservoir operation modeling. *Water and Environment Journal* 35(2):628-646.
- Khorsandi M, Ashofteh PS, Azadi F and Chu X, 2022. Multi-objective firefly integration with the k-nearest neighbor to reduce simulation model calls to accelerate the optimal operation of multi-objective reservoirs. *Water Resources Management* (In Press).
- Schott JR, 1995. Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithm optimization, Master's thesis. Boston. MA. Department of Aeronautics and Astronautics. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, M Massachusetts.
- Van Veldhuizen DA and Lamont GB, 1998. Evolutionary computation and convergence to a Pareto front. Pp. 221–228. In: Koza JR, (ed.), *Late Breaking Papers at the Genetic Programming 1998 Conference*: 28-31 Jul, Stanford University, California, Stanford University Bookstore.
- Yaghoubzadeh-Bavandpour A, Bozorg-Haddad O, Rajabi M, Zolghadr-Asli B and Chu X, 2022. Application of swarm intelligence and evolutionary computation algorithms for optimal reservoir operation. *Water Resources Management* 36:2275–2292.
- Yang XS, 2008. Firefly Algorithm. Pp. 157-180. In: Balamurugan S, Jain A, Sharma S, Goyal D, Duggal S and Sharma S (eds). *Nature-Inspired Meta-Heuristic Algorithms*. Wiley Online Library.
- Zeynali MJ, Mohammad RezaPour O and Frooghi F, 2015. Using firefly algorithm for optimizing operation of Doroudzan reservoir. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering* 6(1):33-45 (In Persian with English abstract).