Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 433-436
DOI: 10.22060/ceej.2021.18971.7012

Using Novel Meta-Heuristic Algorithms for Single-Objective Operation of Reservoir Amirkabir

A. BaniAsadi Moghadam[1], H. Ebrahimi[2*], A. Khashei Siuki[3], A. Akbarpour[4]

[1] Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.
[2] Department of Water Science and Engineering, Shahre-e-qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[3] Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
[4] Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

ABSTRACT: In this study, the objective function of minimizing the total power of the difference between the demand of agriculture and release has been used to solve the problem of optimizing the operation of the Amirkabir reservoir. The purpose of this study was to evaluate the performance of single-objective versions of algorithms such as multi-verse optimizer and genetic algorithm, as well as the performance of a combination of these two algorithms (MVGA). The results of the study of meta-heuristic algorithms indicated that among the multi-verse, genetic algorithm and MVGA algorithm, the MVGA algorithm similar to GA, has a lower number of iterations with objective function values of 24.29 and 24.22, respectively, better than the MVO algorithm with objective function values 29.14. The results of this study showed that to increase the efficiency of one algorithm, it can be combined with another algorithm. In this study, the combination of a genetic algorithm with multi-world algorithm has improved the performance of the multi-world algorithm by 16.64%.

Review History:
Received: Sep. 08, 2020
Revised: Oct. 28, 2021
Accepted: Oct. 30, 2021
Available Online: Nov. 06, 2021

Keywords:
Multi-Objective Algorithm
Genetic Algorithm
Multiverse Algorithm
Hybrid Algorithm
Performance Criteria

1- Introduction

Dams are one of the most important sources of storage and water supply. Therefore, due to the importance of optimal operation of reservoirs, researchers tried to improve the operation of reservoirs by providing appropriate methods.

There have been many research; some researchers have investigated the optimal operation of a single reservoir system [1] while others have investigated the optimization of the multi reservoir, simultaneously [2-4]. Some researchers have combined meta-heuristic algorithms to present a new algorithm and examine its performance in solving the problem of optimizing the operation of reservoirs [5, 6].

As mentioned, one way to improve the performance of one algorithm is to combine it with another algorithm. Therefore, the purpose of this study is to use GA and MVO algorithms and a hybrid MVGA algorithm to solve the problem of optimizing the operation of the reservoir. In this regard, first, the above algorithms should be adapted to the present problem, and then the effective parameters of each algorithm should be identified and the appropriate values for each of the parameters should be specified. Finally, the algorithms are applied to the present problem and compared.

2- Methodology

a. Case study

Amirkabir Dam, on the Karaj River in the north of Karaj city, is located at a latitude of 51° 58’ 30” East and latitude 35° 58’ 45” North, with an altitude of 1297 meters above sea level. This dam, also known as Karaj Dam, is one of the most important sources of drinking water in Tehran and Karaj.

b. Objective function

In the present research that was done to optimize the exploitation of the Amir Kabir dam, the first objective function is defined as (1) the sum of the squared difference of the agricultural need from the release that the purpose is minimizing the value of this function. The function values are divided into the maximum requirement (demand) to normalize. It should be noted that the minimization of the objective function has been done after providing half of Tehran’s and Karaj’s drinking needs. In this relation, NT is the total period t; D_t the rate of demand in the period t; R_t the release rate in the period t; and D_{max} is the maximum absolute need in the periods (NT).

*Corresponding author’s email: ebrahimi.hossein@srbiau.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

$$F = \sum_{t=1}^{NT} \left(\frac{D_t - R_t}{D_{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

Constraints are one of the critical elements in optimization problems that define the range of possible solutions in these problems. Water balance constraints in the reservoir that most vital of them is the continuity relationship, which is determined based on Equation (2):

$$S_t + \Delta S_t = S_{t+1} \quad (2)$$

In this equation, the volume at the beginning of the period is S_t and the volume at the end of the period is S_{t+1}; also the volume change during the period is ΔS_t.

The problem of optimization of constraints related to the release rate from the reservoir and the reservoir volume is the other constraint that, according to them, the release rate in each period should not be less or more than a specific limit. In other words, as shown in Equations (3) and (4), the release at each interval (R_i) must be between the minimum ($R_{\min}$) and the maximum release rate ($R_{\max}$), and on the other side, the volume of the reservoir at each period (S_i) must be between the minimum ($S_{\min}$) and the maximum volume of the reservoir ($S_{\max}$).

$$R_{\min} < R_i < R_{\max} \quad (3)$$

$$S_{\min} < S_i < S_{\max} \quad (4)$$

c. Multi-verse Algorithm

The MVO algorithm is inspired by one of the theories of physics about the existence of multiple (parallel) universes. The universes interact through black holes, white holes, and wormholes. The objects are transmitted through a tunnel in this theory. Also, the wormholes can transfer objects from one corner of the world to another without the need for white holes or black holes.

d. Genetic Algorithm

In the genetic algorithm, there are also phases, such as the crossover and mutation phase. How select the best members of the population is based on the value of the objective function, and each member of the population who calculated the minimum value of the objective function is ranked first.

e. MVGA Algorithm

In this research, two multi-verse and genetic algorithms will be combined and a new algorithm called MVGA will be presented. In this algorithm, at first time, the position of each universe is determined, then the algorithm enters the main loop and after defining the WEP and TDR variables, the value of the objective function is calculated for each universe. Then a copy of these worlds is made and entered into the genetic algorithm. Then the role of all the members of the population that used to be different worlds is changed here into chromosomal strings and each object in the universe is turned into genes of chromosome and then phases such as crossover and mutation are applied to them and the value of the objective function is calculated. The chromosome then returns to the multiverse algorithm and becomes universes, merging with the previous universes from which they were copied. Finally, the universes are sorted according to the value of the objective function in order to complete the first iteration.

3- Results and Discussion

In a multi- verse algorithm, there are parameters whose change in value can affect the performance of this algorithm. These include the number of population members, WEPmax parameter, WEPmin parameter, p parameter.

After investigating different values for the MVO algorithm parameters, the results showed that the best values for the WEPmin, WEPmax and p parameters are zero, 3 and 6, respectively.

The algorithm is run 5 times to investigate the efficiency of the algorithm more carefully. The average of the five times the algorithm is executed, the best and worst performance of the algorithm with the values of the objective function are 29.1410, 25.2579 and 31.5635, respectively.

In genetic algorithm, many parameters affect the performance of this algorithm. These include the number of members of the population, the ratio of parents to the total population, the probability of mutation, the structure of chromosomes, the type of crossover. After finding the most appropriate values for the parameters of the genetic algorithm in the number of iterations of 100, in the next step, the algorithm is run five times, which is the average of five times the algorithm execution, the best and worst performance of the algorithm with the target function values of 24.2193, 22.7869 and 26.4207, respectively, has been obtained.

Also, the average of five runs of MVGA algorithm, the best and worst performance of the algorithm with the value of the objective function, 24.2894, 23.6426 and 24.4545, respectively, have been obtained.

The best performance of multi-verse, genetic and MVGA algorithms is shown in “Figure 1”. As can be seen in this figure, the two algorithms GA and MVGA have found a more appropriate answer in the fewer number of iterations. Therefore, it can be said that combining this algorithm with a genetic algorithm can be a good approach to increase the efficiency of the multiverse algorithm in solving the current optimization problem.

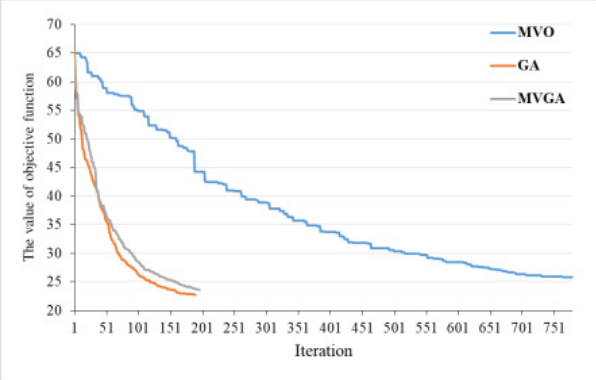


Fig. 1. The best performance of the single-objective version of the examined algorithms

4- Conclusion

In this study, the chain restraint approach was used in such a way that the release was determined in the first month and the interval for release in the second month was determined, during which the release should be selected and then the interval for release in the third month is determined again. In the meantime, if, at the end of the implementation of the algorithm there are solution(s) with violations, this solution will be removed from the set of solutions found. After examining different values for the parameters of each algorithm, the results showed that for the multiverse algorithm, the best values for the WEPmin, WEPmax and p parameters are zero, 3 and 6, respectively. Also, for the genetic algorithm, the highest value for the ratio of parents to the total population equal to 0.9 resulted in the best performance of the algorithm. The reason for this can be seen in the increase in the number of parents and, consequently, the increase in the number of children, which leads to more diversity in the solutions found.

To solve the problem of optimizing the operation of the Amirkabir reservoir, among these three algorithms, the best performance is related to the genetic algorithm with an average value of 24.22, followed by MVGA and MVO algorithms with average values of 24.29 and 29.14 are in the next ranks. In this study, as can be seen, the two algorithms GA and MVGA have almost similar performance in solving the problem of optimizing the operation of the Amirkabir Dam reservoir. Also, the combination of genetic algorithm with multiverse has improved the performance of multiverse algorithm by 16.64%. Therefore, combining a multi-verse algorithm with a genetic algorithm can effectively increase the efficiency of a multi-verse algorithm.

References

[1] M. Zeynali, O. Mohamad Reza Pour, F. Frooghi, Using Firefly Algorithm for Optimizing Operation of Doroudzan Reservoir, Irrigation and Water Engineering, 6(1) (2015) 33-45.

[2] Y.H. Al-Aqeeli, O.M.M. Agha, Optimal operation of multi-reservoir system for hydropower production using particle swarm optimization algorithm, Water Resources Management, 34(10) (2020) 3099-3112.

[3] O. Mohammadrezapour, M. Zeynali, Comparison of meta-heuristic algorithms in the optimal operation of multi-reservoir (a case study: Golestan and Voshmgir dams), Journal of Water and Soil Science, 22(1) (2018).

[4] O.M.R. Pour, M.J. Zeynali, Application of an max-min ant system algorithm for optimal operation of multi-reservoirs (case study: Golestan and Voshmgir reservoir dams), International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS), 8(1) (2015) 27-33.

[5] Y. Xia, Z.-k. Feng, W.-j. Niu, H. Qin, Z.-q. Jiang, J.-z. Zhou, Simplex quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with application to ecological operation of cascade hydropower reservoirs, Applied Soft Computing, 84 (2019) 105715.

[6] Z.M. Yaseen, M.F. Allawi, H. Karami, M. Ehteram, S. Farzin, A.N. Ahmed, S.B. Koting, N.S. Mohd, W.Z.B. Jaafar, H.A. Afan, A hybrid bat–swarm algorithm for optimizing dam and reservoir operation, Neural Computing and Applications, 31(12) (2019) 8807-8821.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. BaniAsadi Moghadam, H. Ebrahimi, A. Khashei Siuki, A. Akbarpour, Using Novel Meta-Heuristic Algorithms for Single-Objective Operation of Reservoir Amirkabir, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 433-436.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18971.7012

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۱۷۳ تا ۲۱۸۸
DOI: 10.22060/ceej.2021.18971.7012

به کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری نوین برای بهره‌برداری تک هدفه از مخزن سد امیرکبیر

ابوالفضل بنی اسدی مقدم [۱]، حسین ابراهیمی*[۲]، عباس خاشعی سیوکی[۳]، ابوالفضل اکبرپور[۴]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران
۲- گروه علوم و مهندسی آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران
۳- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۴- گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

خلاصه: یکی از راهکارهای مقابله با مسائل مربوط به توزیع زمانی و مکانی نامناسب منابع آبی، استفاده بهینه از مخازن سدها است. سیستم‌های مخزنی به تحلیل، مدیریت صحیح و بهره‌برداری مناسب از منابع آب می‌پردازد و سعی دارد که سیستم‌های منابع آب را به گونه‌ای طراحی نماید که اهداف خاصی همچون تولید انرژی برقابی، تأمین آب شرب و کشاورزی، کنترل سیلاب‌های مخرب و غیره را با توجه به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها، به صورت بهینه تحقق بخشد. به همین منظور در این تحقیق تابع هدف کمینه‌سازی مجموع توان دوم اختلاف نیاز کشاورزی از رهاسازی برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی کارایی نسخه تک هدفه الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم چند جهانی و ژنتیک بوده و همچنین کارایی ترکیبی از این دو الگوریتم (MVGA) نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی الگوریتم‌های چند جهانی، ژنتیک و MVGA نشان داد که الگوریتم MVGA مشابه با GA در تعداد تکرار کمتر به ترتیب با مقادیر تابع هدف ۲۴/۲۹ و ۲۴/۲۲ جواب بهتری نسبت به الگوریتم MVO با مقدار تابع هدف ۲۹/۱۴ پیدا می‌نماید. نتایج این تحقیق نشان داد که برای افزایش کارایی یک الگوریتم می‌توان آن را با الگوریتم دیگری ترکیب نمود. در این تحقیق ترکیب الگوریتم ژنتیک با الگوریتم چند جهانی باعث بهبود عملکرد الگوریتم چند جهانی به میزان ۱۶/۶۴ درصد شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:
الگوریتم چند هدفه
الگوریتم ژنتیک
الگوریتم چند جهانی
الگوریتم ترکیبی
معیارهای عملکرد

۱- مقدمه

پژوهش‌های جهانی نشان می‌دهد که کمبود منابع آب در خاورمیانه و رقابت بر سر بهره‌برداری از منابع آب موجود در منطقه نقش روزافزونی در امنیت ملی هر یک از کشورهای منطقه خاورمیانه دارد. از این رو در آینده نزدیک آب در خاورمیانه می‌تواند به سرمایه‌ای ارزنده‌تر از نفت تبدیل شود. همچنین کمبود منابع آبی در کشور باعث شده مدیریت منابع آب به منظور ذخیره‌سازی و استفاده بهینه از آن به نحو مناسب و قابل قبول به صورت یک برنامه مطالعاتی مورد توجه قرار گیرد. بهره‌برداری بهینه از منابع آب را در حالت کلی می‌توان بدین صورت تعریف نمود: مدیریت مصرف و ذخیره‌سازی آب به منظور تأمین تمام نیازها با درصد اطمینان‌پذیری مطلوب. سدها یکی از مهم‌ترین منابع ذخیره‌سازی و تأمین آب می‌باشند لذا با توجه به اهمیت بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، محققین سعی نمودند با ارائه روش‌های مناسب، به نحو مطلوبی بهره‌برداری از مخازن سدها را بهبود بخشند.

در این راستا در داخل و خارج از کشور تحقیقات بسیاری صورت گرفته است؛ برخی از محققین بهره‌برداری بهینه از یک سیستم تک مخزنه را بررسی نموده‌اند [۱] و برخی دیگر بهینه‌سازی بهره‌برداری از چند سد را به طور هم‌زمان مورد بررسی قرار داده‌اند [۴-۲]. بسیاری از محققین از روش‌های کلاسیک مانند برنامه‌ریزی پویا استفاده نموده‌اند [۶ و ۵] و بسیاری دیگر از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده کرده‌اند. همچنین تحقیقات صورت گرفته به صورت تک هدفه [۷] و یا چند هدفه بوده است [۸]. برخی از محققین از الگوریتم‌های رایج استفاده نموده [۱۰ و ۹] و برخی دیگر، از الگوریتم‌های نوین مانند الگوریتم سینوس-کسینوس و شب پره شعله برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سدها استفاده نمودند [۱۳-۱۱]. در این بین، برخی از محققین، الگوریتم‌های فرا ابتکاری را با هم ترکیب نموده تا بدین ترتیب الگوریتم جدیدی را ارائه دهند و عملکرد آن را در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها مورد بررسی قرار دهند [۱۵ و ۱۴].

روش‌های مختلفی برای بهبود عملکرد یک الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن ارائه شده است. زینلی و همکاران در سال

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ebrahimi.hossein@srbiau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

۱۳۹۴ در تحقیق به بررسی مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و جامعه مورچگان پرداختند. در این تحقیق از قیود زنجیره‌ای استفاده گردید. این رویکرد بدین صورت است که در هر ماه میزان رهاسازی (متغیر تصمیم) به میزان رهاسازی ماه قبل بستگی دارد. یعنی پس از مشخص شدن میزان رهاسازی در یک ماه، بازه‌ای برای رهاسازی برای ماه بعد تعیین می‌شود که یک عضو جمعیت تنها در آن بازه بایستی یک متغیر تصمیم (رهاسازی) را انتخاب نماید. نتایج این تحقیق نشان داد که در الگوریتم رقابت استعماری در طی اجراهای مختلف به ندرت توانایی رسیدن به یک جواب شدنی را دارد، این در حالی است که با اعمال قیود زنجیره‌ای همواره الگوریتم به یک جواب شدنی می‌رسد و به مراتب کارایی الگوریتم در این خصوص بالا می‌رود. همچنین مقایسه بین این دو الگوریتم نشان داد که عملکرد الگوریتم رقابت استعماری به مراتب بهتر از الگوریتم جامعه مورچگان است [۱۶].

نایو[1] و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی یک مدل چند هدفه برای تعادل سود و اعتمادپذیری انرژی برقابی ارائه نمودند در این تحقیق از الگوریتم ازحام ذرات چند هدفه موازی (PMOPSO[2]) که ترکیبی از شایستگی‌های جمعیت کوچک، محاسبات موازی و MOPSO است استفاده گردید. همچنین در این تحقیق از تکنولوژی موازی برای بهبود بهره‌وری عملکرد و تنوع جمعیت استفاده گردید [۱۷].

افشار و حاجی‌آبادی در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی به بررسی مسئله بهینه‌سازی چند هدفه بهره‌برداری از مخزن پرداخته و در این خصوص روش نوین اتوماتای سلولی موازی نوینی را ارائه نمودند. در این تحقیق دو نسخه متفاوت از اتوماتای سلولی موازی ارائه گردید و نتایج نشان داد که راه حل‌های پارتو به دست آمده از روش پیشنهادی نسبت به NSGA-II راه حل‌های مناسب‌تری بوده‌اند [۱۸].

فنگ[3] و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی یک مدل چند هدفه برای عملیات اکولوژیکی تولید برق آبی ارائه نمودند و از الگوریتم ژنتیک چند هدفه موازی برای حل این مدل معرفی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که تکنولوژی موازی و استراتژی تجزیه‌پذیری، تنوع جمعیت را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر شناسایی فضایی و استراتژی‌های غلبه اصلاح شده امکان‌سنجی راه حل را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج در موارد مختلف اثربخشی روش ارائه شده را نشان می‌دهد [۱۹].

آذری و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیقی مدل توأم WEAP-NSGA-II به منظور اعمال سیاست جیره‌بندی در یک سیستم دو مخزنی را ارائه نمودند. در این تحقیق پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل WEAP، مدل برای دوره آماری ۴ و ۲ سال کالیبره نمودند. سپس دوره‌های کمبود برای بیست سال آینده با تعیین یک سناریو مرجع در مدل‌های همبسته مقایسه گردید. در این تحقیق مدل مورد بررسی با دو الگوریتم PESA[4]-II و SPEA[5]-II مقایسه گردید. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II قادر به تولید یک جبهه پارتو بهتر از لحاظ به کمینه‌سازی توابع هدف در مقایسه با الگوریتم‌های PESA-II و SPEA-II است [۲۰].

همان طور که گفته شد یکی از راه‌های بهبود عملکرد یک الگوریتم ترکیب آن با الگوریتم دیگر است. لذا هدف از این تحقیق به کارگیری دو الگوریتم GA و MVO و الگوریتم ترکیبی MVGA در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد است. در این راستا ابتدا بایستی الگوریتم‌های فوق با مسئله حاضر تطبیق داده شوند و پس از آن پارامترهای تاثیرگذار هر یک از الگوریتم‌ها مشخص شده و مقادیر مناسب برای هر یک از پارامترها مشخص شود. در نهایت الگوریتم‌ها برای مسئله حاضر به کار برده شده و با هم مقایسه شوند.

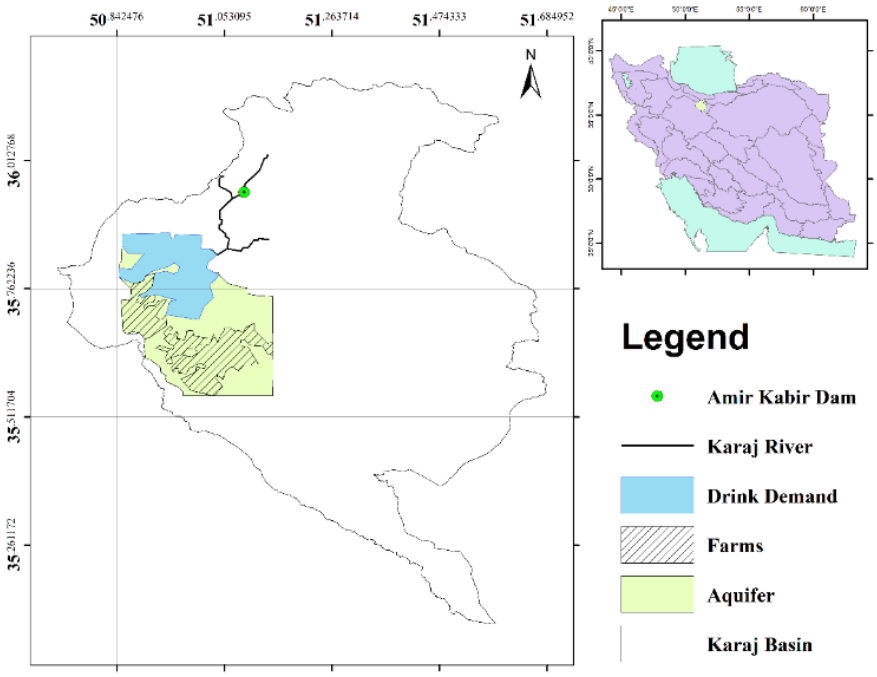
۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- منطقه مورد مطالعه

سد امیرکبیر، بر روی رودخانه کرج در شمال شهر کرج، در طول جغرافیایی «۳۰ ’۵۸ °۵۱ شرقی و عرض جغرافیایی «۴۵ ’۵۸ °۳۵ شمالی، با ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا، در ۴۸ کیلومتری غرب تهران قرار دارد. این سد که به سد کرج نیز معروف است یکی از مهم‌ترین منابع تامین کننده آب شرب شهر تهران و کرج است. مساحت حوضه سد کرج حدود ۸۶۴ کیلومتر مربع و متوسط آورد سالانه آن در حدود ۴۱۵ میلیون متر مکعب است. در شکل ۱ موقعیت سد کرج نشان داده شده است.

از آنجایی که مقدار بسیار زیادی از آورد سالانه به این سد به شرب شهر تهران اختصاص داده می‌شود. لذا این منبع نمی‌تواند سایر نیازها، الالخصوص نیاز کشاورزی اراضی و باغات پایین‌دست سد را به طور کلی تامین نماید.

1 Niu
2 Parallel Multi-Objective Particle Swarm Optimization
3 Feng
4 Pareto Envelope-based Selection Algorithm
5 Strength Pareto Evolutionary Algorithm



شکل ۱. نمایی از منطقه مورد مطالعه (سد امیرکبیر)

Fig. 1. Schematic of the study area (Amirkabir Dam)

دوره مورد مطالعه، یک دوره ۱۳۲ ماهه از اسفند ماه سال ۱۳۸۶ تا بهمن ماه سال ۱۳۹۷ بوده است و داده‌های ماهانه مربوط به مخزن سد شامل بارندگی، ورودی به مخزن سد، تبخیر، نشت، سرریز، خروجی کشاورزی و به طور کلی ورودی به مخزن و خروجی از آن بوده است. همچنین عمده محصولاتی که در اراضی آبخور سد امیرکبیر وجود دارند شامل محصولات باغی و محصولات زراعی می‌باشد. در جدول ۱ مقادیر نیازهای شرب شهر تهران و کرج و همچنین میزان نیاز کشاورزی کرج آورده شده است [۲۱].

۲- ۲- تابع هدف

در این تحقیق که بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد امیرکبیر مورد نظر بوده، تابع هدف مطابق با (۱) به صورت مجموع توان دوم اختلاف نیاز کشاورزی از رهاسازی تعریف شده که هدف کمینه‌سازی مقدار این تابع بوده است و برای نرمال‌سازی مقادیر تابع بر حداکثر نیاز (تقاضا) تقسیم شده‌اند. لازم به ذکر است که کمینه‌سازی تابع هدف پس از تأمین نیمی از نیاز شرب شهرهای تهران و کرج صورت گرفته است. در این رابطه NT کل دوره‌ی زمانی؛ D_t میزان نیاز در دوره tام؛ R_t میزان رهاسازی در دوره زمانی tام؛ و D_{max} بیشینه نیاز کل در دوره‌های زمانی (NT) است.

$$F=\sum_{t=1}^{NT}\left(\frac{D_t-R_t}{D_{\max}}\right)^2 \qquad (۱)$$

۲- ۳- قیدهای مسئله

در مسائل بهینه‌سازی قیدها یکی از ارکان اصلی هستند که در این مسائل، محدوده جواب‌های شدنی را تعریف می‌نمایند. قیود مربوط به بیلان آب در مخزن که مهم‌ترین آن‌ها رابطه پیوستگی است که بر اساس معادله (۳) استوار است:

$$S_t+\Delta S_t=S_{t+1} \qquad (۲)$$

که در این معادله S_t حجم ابتدای دوره t و S_{t+1} حجم انتهای دوره t می‌باشد؛ ΔS_t نیز تغییرات حجم در طول دوره t بوده که به صورت رابطه (۴) در نظر گرفته می‌شود:

جدول ۱. نیاز ماهانه منطقه مورد مطالعه (میلیون متر مکعب)

Table 1. Monthly demand of the study area (Mm3)

ماه	شرب تهران	شرب کرج	کشاورزی کرج	مجموع
مهر	۳۸/۷۵	۸/۷۶	۵۵/۱۷	۹۲/۶۸
آبان	۲۷/۷۲	۱۶/۳۲	۲۴/۷۶	۶۸/۸۰
آذر	۲۶/۴۱	۱۸/۱۶	۹/۰۳	۵۳/۶۰
دی	۲۷/۲۰	۱۹/۲۶	۰/۶۳	۴۷/۰۹
بهمن	۲۴/۱۲	۱۶/۰۰	۰۰/۰۰	۴۰/۱۸
اسفند	۲۵/۷۷	۱۹/۹۵	۱/۴۹	۴۷/۲۱
فروردین	۲۷/۴۹	۱۸/۲۸	۱/۶۴	۴۷/۴۱
اردیبهشت	۲۸/۵۸	۱۷/۴۰	۲/۲۰	۴۸/۱۸
خرداد	۳۰/۳۶	۱۴/۴۳	۱۴/۹۶	۵۹/۷۵
تیر	۳۱/۴۳	۱۸/۰۹	۲۸/۶۹	۷۸/۲۱
مرداد	۳۱/۲۶	۱۶/۴۰	۴۰/۷۵	۸۸/۴۱
شهریور	۳۰/۹۱	۱۶/۷۵	۴۷/۴۹	۹۵/۱۵
مجموع	۳۴۰/۰۰	۱۹۹/۸۰	۲۲۶/۸۱	۷۶۶/۶۷

$$\Delta S_t = I_t + P_t - O_{1t} - E_t - O_{2t} - Pe_t \quad (۳)$$

$$R_{\min} < R_i < R_{\max} \quad (۴)$$

$$S_{\min} < S_i < S_{\max} \quad (۵)$$

که در این رابطه I_t ورودی به مخزن در بازه زمانی t، P_t میزان بارش بر روی سطح دریاچه سد، O_{1t} خروجی از سد است که خود شامل خروجی کشاورزی، شرب و برقابی می‌باشد؛ E_t میزان تبخیر از سطح آب دریاچه مخزن است؛ O_{2t} میزان نشت از مخزن بوده و Pe_t میزان سرریز از مخزن سد می‌باشد.

قیود دیگری مسئله بهینه‌سازی قیود مربوط به میزان رهاسازی از مخزن و حجم مخزن است که میزان رهاسازی در هر دوره نباید از حدودی کم‌تر یا بیش‌تر باشد. به عبارت دیگر همان‌طور که در معادلات (۵) و (۶) مشخص است، باید رهاسازی در هر بازه (R_i) باید بین میزان رهاسازی کمینه ($R_{\min}$) و میزان رهاسازی بیشینه ($R_{\max}$) باشد و از طرفی میزان حجم مخزن در هر دوره (S_i) نیز باید بین حجم کمینه ($S_{\min}$) و حجم بیشینه مخزن ($S_{\max}$) باشد.

۲- ۴- الگوریتم چند جهانی

نظریه انفجار بزرگ بیان می‌دارد که پیدایش جهان ما با یک انفجار بزرگ شروع شده است. بر طبق این نظریه، انفجار بزرگ منشأ همه چیز در این جهان است و هیچ چیز پیش از آن وجود نداشته است. نظریه چند جهانی یکی دیگر از نظریه‌های اخیر و شناخته شده بین فیزیکدانان است. در این نظریه اعتقاد بر این است که بیش از یک انفجار بزرگ وجود دارد و هر انفجار بزرگ باعث تولد یک جهان می‌شود. اصطلاح چند جهانی، مخالف جهان است. این اصطلاح به این موضوع اشاره دارد که جهان‌های دیگری علاوه بر جهانی که ما در آن زندگی می‌کنیم وجود دارد. جهان‌های چندگانه می‌تواند

با دیگر نظریه‌های چند جهانی بوده و یا حتی در تضاد با آن باشد. نظریه چند جهانی نیز نشان می‌دهد که ممکن است قوانین فیزیکی مختلفی در هر یک از جهان‌ها وجود داشته باشد [۲۲].

برای الگوریتم بهینه‌ساز چند جهانی[1] از سه مفهوم اصلی نظریه چند جهانی الهام گرفته شده است. این سه مفهوم سفید چاله‌ها، سیاه چاله‌ها و کرم چاله‌ها هستند. سفید چاله هرگز در جهان ما دیده نشده است، اما فیزیکدانان فکر می‌کنند که این انفجار بزرگ می‌تواند به عنوان یک سفید چاله در نظر گرفته شود و ممکن است جزء اصلی تولد یک جهان باشد. همچنین در مدل چرخه‌ای نظریه چند جهانی استدلال می‌شود که در محل برخورد بین جهان‌های موازی، انفجار بزرگ یا سوراخ‌های سفید ایجاد می‌شوند. سیاه چاله‌ها که اغلب مشاهده می‌شوند، به طور کامل برعکس سفید چاله‌ها رفتار می‌کنند. آن‌ها همه چیز را با نیروی گرانشی بسیار زیاد خود جذب می‌کنند. سیاه چاله‌ها حتی توانایی جذب پرتوهای نور را نیز دارند. کرم چاله‌ها سوراخ‌هایی هستند که قسمت‌های مختلف یک جهان را به هم متصل می‌کنند. کرم چاله‌ها در نظریه چند جهانی به عنوان تونل‌های سفر فضایی یا زمانی عمل می‌کنند که در آن اشیا قادر هستند فوراً به هر گوشه‌ای از جهان (یا حتی از یک جهان به جهان دیگر) سفر کنند [۲۲].

هر جهان دارای یک نرخ تورم[2] (تورم بی‌پایان[3]) است که باعث گسترش آن در فضا می‌شود. سرعت تورم یک جهان بر حسب تشکیل ستاره‌ها، سیارات، سیارک‌ها، سیاه چاله‌ها، سفید چاله‌ها، کرم چاله‌ها، قوانین فیزیکی و مناسب بودن برای زندگی بسیار مهم است. سرعت تورم در یکی از مدل‌های چرخه‌ای چند جهانی این گونه استدلال می‌شود که چندین جهان از طریق سفید چاله‌ها، سیاه چاله‌ها و کرم چاله‌ها برای رسیدن به یک وضعیت پایدار با یکدیگر در تعامل هستند. از این واقعیت برای طراحی الگوریتم چند جهانی الهام گرفته شده است که به طور مفهومی و ریاضی در ادامه مدل‌سازی شده است [۲۲].

یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت فرایند جست‌وجو را در دو مرحله اکتشاف و بهره‌برداری انجام می‌دهد. در این الگوریتم از مفاهیم سفید چاله و سیاه چاله برای اکتشاف فضای جست‌وجو استفاده می‌شود. در مقابل، کرم چاله‌ها در بهره‌برداری از فضاهای جست‌وجو کمک می‌کنند. در این الگوریتم فرض می‌شود که هر راه حل شبیه به یک جهان و هر متغیر در این راه حل یک شی در این جهان است. علاوه بر این، برای هر راه حل یک نرخ تورم تعیین می‌شود، که متناسب با مقدار تابع هدف است. در اینجا همچنین از اصطلاح زمان به جای تکرار استفاده می‌شود، زیرا این اصطلاح رایج در تئوری چند جهانی و کیهان شناسی است.

در خلال حل مسئله بهینه‌سازی، قوانین زیر در جهان‌های این الگوریتم اعمال می‌شود [۲۲]:

نرخ تورم بالاتر به معنای احتمال داشتن سفید چاله بیشتر است.

نرخ تورم بالاتر به معنای احتمال داشتن سیاه چاله کمتر است.

جهان‌ها با نرخ تورم بالاتر تمایل به ارسال اشیاء از طریق سوراخ‌های سفید دارند.

جهان‌ها با نرخ تورم پایین‌تر تمایل دارند که اشیاء بیشتری را از طریق سیاه چاله‌ها دریافت کنند.

اشیاء در همه جهان‌ها می‌توانند با حرکت تصادفی و به وسیله کرم چاله‌ها و بدون در نظر گرفتن نرخ تورم به بهترین جهان منتقل شوند.

به منظور فراهم آوردن تغییرات موضعی برای هر جهان و داشتن احتمال بالایی از نرخ تورم با استفاده از کرم چاله‌ها، فرض می‌شود که تونل‌های کرم چاله همیشه بین یک جهان و بهترین جهانی که تاکنون ایجاد شده است وجود دارد. فرمول این مکانیسم به صورت رابطه (۷) است [۲۲].

$$x_i^j = \begin{cases} \begin{cases} X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r4 + lb_j) \\ r3 < 0.5 \end{cases} & r2 < WEP \\ \begin{cases} X_j - TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r4 + lb_j) \\ r3 \geq 0.5 \end{cases} & \\ x_i^j & r2 \geq WEP \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن X_j نشان دهنده پارامتر jام بهترین جهانی است که تاکنون ایجاد شده، TDR و WEP هر دو ضریب هستند و lb_j حد پایین متغیر jام و ub_j حد بالای متغیر jام است. همچنین x_i^j نشان دهنده متغیر jام جهان iام و r2، r3 و r4 اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند. TDR به معنای نرخ فاصله سفر[4] و WEP به معنای احتمال وجود کرم چاله[5] است. فرمول دو ضریب WEP و TDR به شرح رابطه (۸) و (۹) است [۲۲].

$$WEP = \min + l \times \left(\frac{\max - \min}{L} \right) \quad (۷)$$

1 multi-verse optimizer
2 inflation rate
3 eternal inflation
4 Travelling Distance Rate
5 Wormhole Existence Probability

که در آن min کمینه احتمال وجود کرم چاله است ۰/۲ پیشنهاد شده و max بیشینه احتمال وجود کرم چاله است که مقدار یک برای آن پیشنهاد شده است. همچنین l نشان دهنده تکرار حاضر و L نشان می‌دهد حداکثر تعداد تکرارها است.

$$TDR = 1 - \frac{l^{1/p}}{L^{1/p}} \quad (۸)$$

که در آن p که در نسخه اصلی مقاله برابر ۶ در نظر گرفته شده است دقت بهره‌برداری در طی تکرارهای متوالی تعریف می‌شود. p بالاتر، جست‌وجوی موضعی یا بهره‌برداری دقیق‌تر یا جست‌وجوی سریع‌تر را نشان می‌دهد.

۲- ۵- الگوریتم ژنتیک

در این الگوریتم فازهایی مانند فاز ترکیب و فاز جهش نیز وجود دارد. نحوه انتخاب بهترین‌های اعضای جمعیت بر اساس مقدار تابع هدف بوده و هر عضو از جمعیت که مقدار تابع هدف کمتری را محاسبه نموده بود در رتبه اول قرار می‌گیرد.

مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک بدین صورت است که ابتدا یک جمعیت اولیه از افراد بدون در نظر گرفتن معیار خاصی و به طور تصادفی انتخاب می‌شود. برای تمامی کروموزوم‌های (افراد) نسل صفر، مقدار برازش با توجه به تابع هدف تعیین می‌شود؛ سپس با مکانیسم‌های مختلف تعریف شده برای عملگر انتخاب، زیر مجموعه‌ای از جمعیت اولیه به عنوان والد و مجموعه‌ای دیگر به عنوان افراد کاندیدای جهش انتخاب خواهند شد. سپس روی این افراد انتخاب شده عملیات بُرش و جهش در صورت لزوم با توجه به صورت مسئله انتخاب خواهد شد. حال باید این افراد که مکانیسم الگوریتم‌های ژنتیک در موردشان اعمال شده است، با افراد جمعیت اولیه (نسل صفر) از لحاظ مقدار برازش مقایسه شوند. (قطعاً توقع داریم که افراد نسل اول با توجه به یکبار اعمال الگوریتم‌های ژنتیک روی آنان، از شایستگی بیش‌تری برخوردار باشند، اما الزاماً این چنین نخواهد بود). به هر حال افرادی باقی خواهند ماند که بیش‌ترین برازش را داشته باشند. چنین افرادی در مقام یک مجموعه به عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعدی الگوریتم عمل خواهد کرد. هر مرحله تکرار الگوریتم یک نسل جدید را ایجاد می‌کند که با توجه به اصلاحاتی که در آن صورت پذیرفته است، رو به سوی تکامل خواهد داشت.

در حالت کلی، وقتی یک الگوریتم ژنتیکی اعمال می‌شود، چرخه زیر را طی می‌کند:

۱-کدینگ

۲-ایجاد جمعیت اولیه

۳-انتخاب والدین برای عمل ترکیب

۴-انجام عمل ترکیب

۵-انجام عمل جهش

۶-ادغام جمعیت اولیه، فرزندان و جمعیت جهش یافتگان:

۷-برداشت به اندازه جمعیت اولیه

۸-بازگشت به مرحله (۳) تا برآورده شدن شرایط خاتمه

۹-پایان

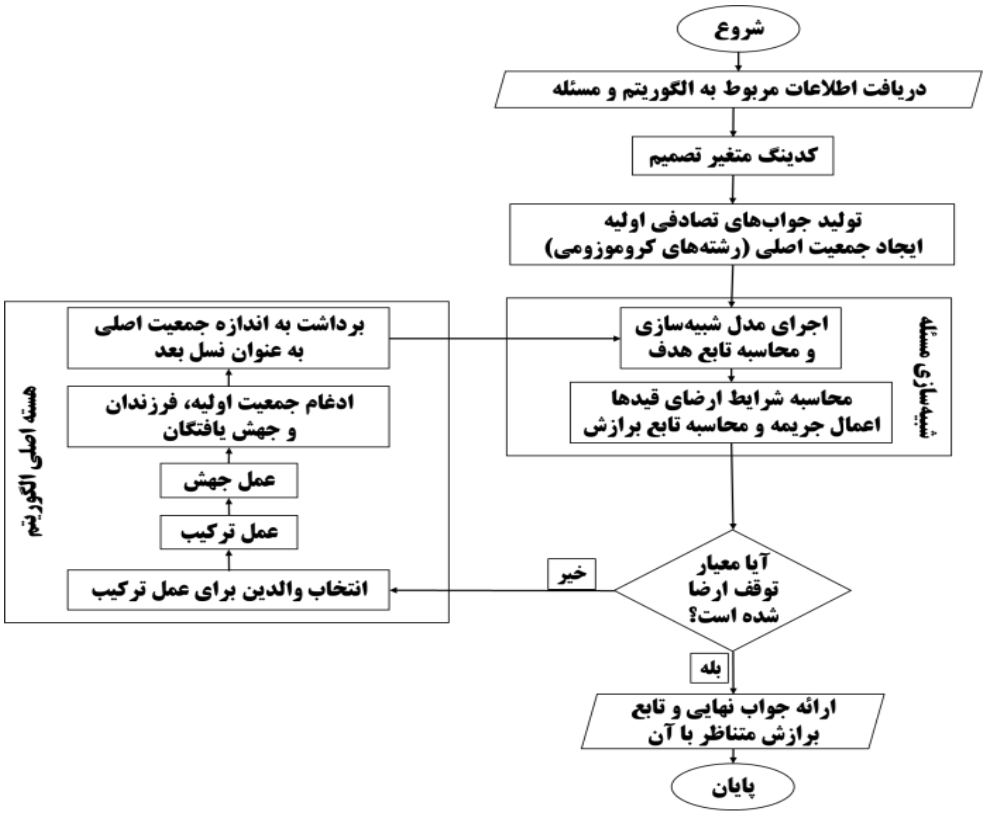
نمودار گردشی الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله بهینه‌سازی به صورت شکل ۲ می‌باشد.

۲- ۶- الگوریتم ترکیبی چند جهانی-ژنتیک (MVGA)

در این تحقیق دو الگوریتم چند جهانی و ژنتیک با هم ترکیب خواهند شد و الگوریتم جدید تحت عنوان MVGA ارائه خواهد گردید. در آن ابتدا موقعیت هر جهان مشخص می‌شود سپس الگوریتم وارد حلقه اصلی شده و پس از تعریف متغیرهای WEP و TDR، برای هر یک از جهان‌ها مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد. سپس یک کپی از این جهان‌ها تهیه شده و وارد الگوریتم ژنتیک می‌شوند. در ادامه نقش همه اعضای جمعیت که قبلا جهان‌های مختلف بوده‌اند عوض شده در این‌جا به رشته‌های کروموزومی تبدیل می‌شوند و هر یک از اشیاء درون جهان‌ها به ژن‌های رشته‌های کروموزومی تبدیل می‌گردند و در ادامه فازهایی همچون ترکیب و جهش بر روی آن‌ها اعمال گشته و مقدار تابع هدف برای هر یک از آن‌ها محاسبه می‌گردد. در ادامه رشته‌های کروموزومی به الگوریتم چند جهانی باز گشته و به جهان تبدیل می‌شوند و با جهان‌های قبل که از آن‌ها کپی تهیه شده بود، ادغام می‌گردند. در نهایت به توجه مقدار تابع هدف جهان‌ها مرتب شده و به اندازه تعداد اعضای جمعیت مورد نظر از آن برداشت می‌شود تا بدین ترتیب تکرار اول تمام شود. این اعمال تا زمانی که شرایط خاتمه برقرار شود ادامه می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق الگوریتم چند جهانی و الگوریتم ژنتیک و نسخه ترکیبی این دو الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت و برای حل مسئله بهینه‌سازی



شکل ۲. نمودار گردشی الگوریتم ژنتیک

Fig. 2. Flowchart of genetic algorithm

بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر واقع در استان البرز به کار برده شدند.

۳- ۱- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم چند جهانی

در الگوریتم چند جهانی پارامترهایی وجود دارد که تغییر در مقدار آن‌ها می‌تواند بر عملکرد این الگوریتم تأثیرگذار باشد. از جمله آن‌ها می‌توان به تعداد اعضای جمعیت، پارامتر WEPmax، WEPmin، پارامتر p، نحوه کاهش تدریجی پارامتر TDR و افزایش تدریجی پارامتر WEP اشاره نمود.

تأثیر مقادیر مختلف پارامتر WEPmax، WEPmin و p در نحوه عملکرد الگوریتم چند جهانی در جدول ۲ آورده شده است و همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد با افزایش مقدار پارامتر WEPmax تا سه باعث بهبود در مقادیر تابع هدف اول (کمینه‌سازی) می‌شود اما پس از آن افزایش در مقدار این پارامتر در مقدار تابع هدف بهبودی را حاصل نمی‌نماید. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد در مقدار سه برای پارامتر WEPmax الگوریتم بهترین جواب را از میان مقادیر تست شده محاسبه نموده است و این مقدار برابر ۴۱/۴۰۵۰ است. همچنین مقدار صفر برای پارامتر WEPmin مناسب‌ترین مقدار در بین مقادیر آزمون شده است. همچنین بهترین مقدار برای پارامتر p مقدار ۶ است که منجر به بهترین جواب می‌شود. لازم به ذکر است که این مقدار برای پارامتر p در مقاله اصلی ارائه دهنده این الگوریتم نیز توصیه شده است.

از جمله موارد دیگری که می‌تواند در الگوریتم چند جهانی مورد بررسی قرار گیرد؛ نحوه کاهش تدریجی مقدار متغیر TDR و افزایش تدریجی مقدار متغیر WEP است که کاهش خطی و نمایی با بهترین p محاسبه شده برای متغیر TDR و افزایش خطی و نمایی با بهترین p محاسبه شده برای متغیر WEP در طی تکرارهای متوالی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد، زمانی که نحوه کاهش تدریجی متغیر TDR در طی تکرارهای مختلف به صورت خطی باشد مقدار تابع هدف برابر با ۵۷/۱۱۶۶ و کاهش به صورت نمایی مقدار تابع هدف ۴۱/۴۰۵۰ را محاسبه می‌نماید. از طرف

جدول ۲. مقادیر مختلف پارامتر WEPmax، WEPmin و p برای الگوریتم چند جهانی

Table 2. WEBmax, WEBmin, and p parameter values for multiverse algorithm

پارامتر WEPmax	۱	۲	۳	۴
مقدار تابع هدف	۴۹/۶۸۴۲	۴۶/۵۵۶۶	۴۱/۴۰۵۰	۴۵/۵۹۶۱
پارامتر WEPmin	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶
مقدار تابع هدف	۴۱/۴۰۵۰	۶۰/۸۹۴۸	۶۰/۰۵۱۱	۶۱/۴۹۴۲
پارامتر p	۲	۴	۶	۸
مقدار تابع هدف	۵۱/۴۳۴۷	۶۱/۵۱۵۰	۴۱/۴۰۵۰	۴۴/۶۲۴۶

جدول ۳. مقادیر مختلف تعداد اعضای جمعیت برای الگوریتم چند جهانی

Table 3. The number of population members for multiverse algorithm

تعداد جمعیت	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
مقدار تابع هدف	۳۵/۶۷۵۰	۳۳/۲۷۷۸	۳۲/۸۵۴۹	۳۲/۱۷۱۴	۳۳/۹۳۷۴	۳۰/۶۷۴۱

جدول ۴. مقادیر مختلف تعداد تکرار برای الگوریتم چند جهانی

Table 4. The number of iterations for multiverse algorithm

تعداد تکرارها (L)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰
مقدار تابع هدف	۴۶/۴۳۲۵	۴۳/۰۰۵۸	۳۲/۸۷۵۰	۳۳/۴۲۹۸	۳۰/۶۷۴۱	۳۴/۷۴۵۵	۲۸/۶۳۹۶	۲۵/۸۰۷۹

دیگر، نحوه افزایش تدریجی در مقدار متغیر WEP به صورت خطی و نمایی به ترتیب مقدار تابع هدف را ۴۱/۴۰۵۰ و ۳۵/۶۷۵۰ محاسبه می‌نمایند. لذا افزایش نمایی در مقدار متغیر WEP در طی تکرارهای مختلف می‌تواند کارایی الگوریتم را بالا ببرد.

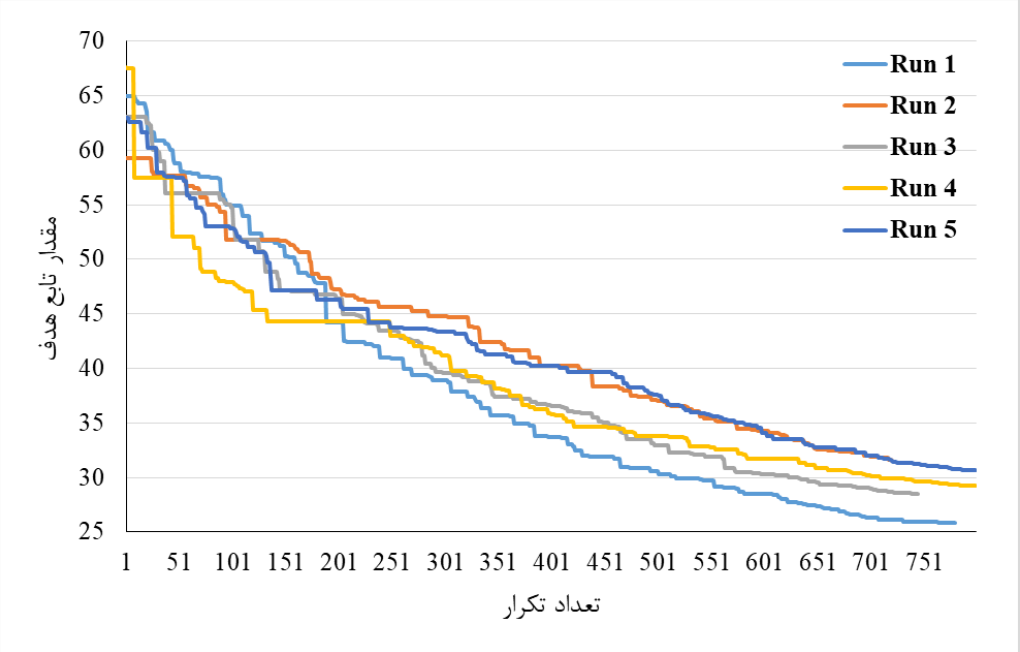
تأثیر افزایش تعداد اعضای جمعیت در نحوه عملکرد الگوریتم چند جهانی در جدول ۳ آورده شده است و همان طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد اعضای جمعیت با وجود نوساناتی در مقدار تابع هدف دیده می‌شود اما به طور کلی می‌توان گفت که افزایش تعداد اعضای جمعیت بر نحوه عملکرد الگوریتم چند جهانی تأثیر مثبتی داشته است و بهترین عملکرد الگوریتم با تعداد اعضای جمعیت ۶۰۰ با مقدار تابع هدف ۳۰/۶۷۴۱ بوده است. همچنین بدترین عملکرد الگوریتم در تعداد اعضای جمعیت ۱۰۰، با مقدار ۳۵/۶۷۵۰ به دست آمده است.

تأثیر افزایش تعداد تکرارها در نحوه عملکرد الگوریتم چند جهانی در جدول ۴ آورده شده است و همان طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد

جدول ۵. نتایج حاصل از پنج مرتبه اجرای الگوریتم چند جهانی

Table 5. The results of five runs for multiverse algorithm

شماره اجرا	اجرای اول	اجرای دوم	اجرای سوم	اجرای چهارم	اجرای پنجم
مقدار تابع هدف	۲۵/۸۰۷۹	۳۱/۵۶۳۵	۲۸/۴۴۷۸	۲۹/۲۱۲۷	۳۰/۶۷۲۷



شکل ۳.نحوه عملکرد الگوریتم MVO در پنج مرتبه اجرا

Fig. 3. The performance of the MVO algorithm in five runs

با افزایش تعداد تکرارها به طور کلی مقدار تابع هدف بهبود پیدا می‌کند و بهترین مقدار تابع هدف با مقدار ۲۵/۸۰۷۹ در تکرار ۸۰۰ بوده و بهترین عملکرد الگوریتم در این تعداد تکرار حاصل شده است.

پس از بررسی مقادیر مختلف برای پارامترهای الگوریتم MVO نتایج نشان داد که بهترین مقدار برای پارامترهای WEPmin، WEPmax و p به ترتیب صفر، ۳ و ۶ می‌باشد. همچنین نحوه کاهش تدریجی متغیر TDR و افزایش تدریجی متغیر WEP در طی تکرارهای مختلف به صورت نمایی عملکرد الگوریتم را در حل مسئله بهینه‌سازی حاضر بهبود می‌بخشد.

با توجه به این که عملکرد یک الگوریتم را نمی‌توان تنها با یک مرتبه اجرای الگوریتم نشان داد. لذا الگوریتم ۵ مرتبه اجرا شده تا کارایی الگوریتم با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از پنج مرتبه اجرای الگوریتم چند جهانی در جدول ۵ نشان داده شده است. میانگین پنج مرتبه اجرای الگوریتم، بهترین و بدترین عملکرد الگوریتم به ترتیب با مقدار تابع هدف ۲۹/۱۴۱۰، ۲۵/۸۰۷۹ و ۳۱/۵۶۳۵ به دست آمده است. همچنین در شکل ۳ نحوه عملکرد الگوریتم MVO در پنج مرتبه اجرای این الگوریتم نشان داده شده است.

جدول ۶. تأثیر تعداد اعضای جمعیت بر عملکرد الگوریتم ژنتیک (nPop)

Table 6. The impact of a number of population on the performance of the genetic algorithm (nPop)

تعداد اعضای جمعیت	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۱۰۰	۱۰۰	۴۳/۷۷۸۱
۱۵۰	۱۰۰	۳۸/۴۹۵۸
۲۰۰	۱۰۰	۴۰/۴۱۲۱
۲۵۰	۱۰۰	۳۸/۶۲۴۲
۳۰۰	۱۰۰	۴۰/۱۳۱۲
۳۵۰	۱۰۰	۴۰/۴۴۹۶
۴۰۰	۱۰۰	۳۸/۷۸۵۷
۴۵۰	۱۰۰	۳۷/۷۰۷۳
۵۰۰	۱۰۰	۳۶/۰۶۶۳
۵۵۰	۱۰۰	۳۸/۴۶۵۰
۶۰۰	۱۰۰	۳۷/۹۷۸۰
۶۵۰	۱۰۰	۳۷/۲۰۸۲
۷۰۰	۱۰۰	۳۶/۴۳۰۸
۷۵۰	۱۰۰	۳۵/۶۶۵۰
۸۰۰	۱۰۰	۴۰/۶۶۵۹

۳- ۲- نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک نیز پارامترهای زیادی بر عملکرد این الگوریتم تأثیرگذار هستند. از جمله آن‌ها می‌توان به تعداد اعضای جمعیت، نسبت والدین به کل جمعیت، احتمال جهش، ساختار کروموزوم‌ها، نوع برش و جابجایی کروموزوم‌ها، و غیره اشاره نمود. در این تحقیق برای جلوگیری از طویل شدن طول کروموزوم، از کدینگ ارزشی استفاده شده است.

تأثیر افزایش تعداد اعضای جمعیت در نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک در جدول ۶ آورده شده است و همان طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد اعضای جمعیت با وجود نوساناتی در مقدار تابع هدف دیده می‌شود اما به طور کلی می‌توان گفت که افزایش تعداد اعضای جمعیت بر نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک تأثیر مثبتی داشته است و لذا تعداد اعضای ۷۵۰، با مقدار تابع هدف ۳۵/۶۶۵۰ به عنوان مناسب‌ترین تعداد اعضای جمعیت برای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد.

انتخاب والدین با سه روش انتخاب چرخ گردان، انتخاب رقابتی و انتخاب تصادفی نیز مورد بررسی قرار گرفته و مقدار تابع هدف برای هر یک از این روش‌ها به ترتیب ۳۵/۶۶۵۰، ۳۴/۷۶۰۰ و ۳۸/۳۹۵۹ بوده است. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که انتخاب به روش چرخ گردان نسبت به انتخاب تصادفی ۷/۱۱ درصد و انتخاب رقابتی نسبت به انتخاب تصادفی ۹/۴۷ درصد بهبود کارایی الگوریتم را نشان می‌دهد.

در جدول ۷ نیز نسبت تعداد والدین به کل جمعیت و احتمال جهش مورد بررسی قرار گرفته و همان طور که در جدول ۷ ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت والدین به کل جمعیت عملکرد الگوریتم بهبود می‌یابد و زمانی که ۹۰ درصد از اعضای جمعیت به عنوان والد انتخاب می‌شوند مقدار تابع هدف به بهترین مقدار خود (۳۱/۳۹۳۶) می‌رسد. همچنین نتایج بررسی و آزمون و خطا در خصوص احتمال جهش نتایج ضد و نقیضی را نشان می‌دهد و به طور قطع نمی‌توان بیان داشت که افزایش احتمال جهش عملکرد الگوریتم را بهبود می‌بخشد بنابراین در این تحقیق احتمال جهش برابر با ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی جست و جو در محدوده فضای جواب شامل دو

جدول ۷. تأثیر تغییر در نسبت والدین به کل جمعیت (pc) و احتمال جهش (pm)

Table 7. The impact of changing the ratio of parents to the total population (pc) and mutation probability (pm)

نسبت والدین به کل جمعیت	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف	احتمال جهش	تعداد تکرار	مقدار تابع هدف
۰/۱	۹۶	۴۴/۸۰۲۳	۰/۱	۱۰۰	۳۹/۷۹۲۳
۰/۲	۱۰۰	۴۰/۶۳۰۴	۰/۲	۱۰۰	۳۸/۲۸۴۶
۰/۳	۱۰۰	۴۰/۵۵۱۲	۰/۳	۱۰۰	۳۳/۴۵۲۴
۰/۴	۱۰۰	۳۸/۹۲۴۵	۰/۴	۱۰۰	۳۳/۳۲۶۲
۰/۵	۱۰۰	۴۰/۰۷۸۹	۰/۵	۱۰۰	۳۵/۲۸۵۰
۰/۶	۱۰۰	۳۵/۴۳۸۷	۰/۶	۱۰۰	۳۲/۵۶۶۸
۰/۷	۱۰۰	۳۴/۴۰۸۱	۰/۷	۱۰۰	۳۲/۰۳۹۰
۰/۸	۱۰۰	۳۴/۷۶۰۰	۰/۸	۱۰۰	۳۲/۶۸۸۹
۰/۹	۱۰۰	۳۱/۳۹۳۶	۰/۹	۱۰۰	۳۱/۳۹۳۶

جدول ۸. پارامترهای به کار برده شده در الگوریتم ژنتیک

Table 8. Parameters used in genetic algorithm

تعداد جمعیت	**۷۵۰**
نسبت تعداد والدین به کل جمعیت	۰/۹
احتمال جهش	۰/۹
احتمال انتخاب برش تک نقطه‌ای	۰/۳
احتمال انتخاب برش دو نقطه‌ای	۰/۶
احتمال انتخاب برش چند نقطه‌ای	۰/۱
نوع کدینگ	کدینگ ارزشی
ضریب جریمه	۱۰
نوع انتخاب والدین و انتخاب برش	انتخاب به صورت رقابتی

عمل «اکتشاف[1]» و «بهره‌برداری[2]» است که در این الگوریتم عمل جهش فاز اکتشاف را بر عهده دارد اما نمی‌توان با قطعیت بیان داشت که جهش همواره در راستای بهبود عملکرد الگوریتم گام بر می‌دارد.

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد الگوریتم ژنتیک نحوه برش رشته کروموزومی می‌باشد که در این تحقیق سه روش تک نقطه، دو نقطه و چند نقطه (یکنواخت) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که برش دو نقطه کارایی الگوریتم را نسبت به دو روش دیگر به مراتب افزایش می‌دهد. مقدار تابع هدف در برش تک نقطه، دو نقطه و یکنواخت به ترتیب برابر با ۲۹/۲۲۹۶، ۲۷/۵۷۹۹ و ۳۱/۳۹۳۶ بوده است.

با وجود این که در زمان انجام برش به صورت دو نقطه مقدار تابع هدف به نحو چشم‌گیری بهبود یافته است اما برای اجرای الگوریتم از هر سه نوع برش استفاده می‌گردد اما دو برش تک نقطه و یکنواخت با احتمال وقوع کمتر نسبت به برش یکنواخت به کار گرفته خواهد شد.

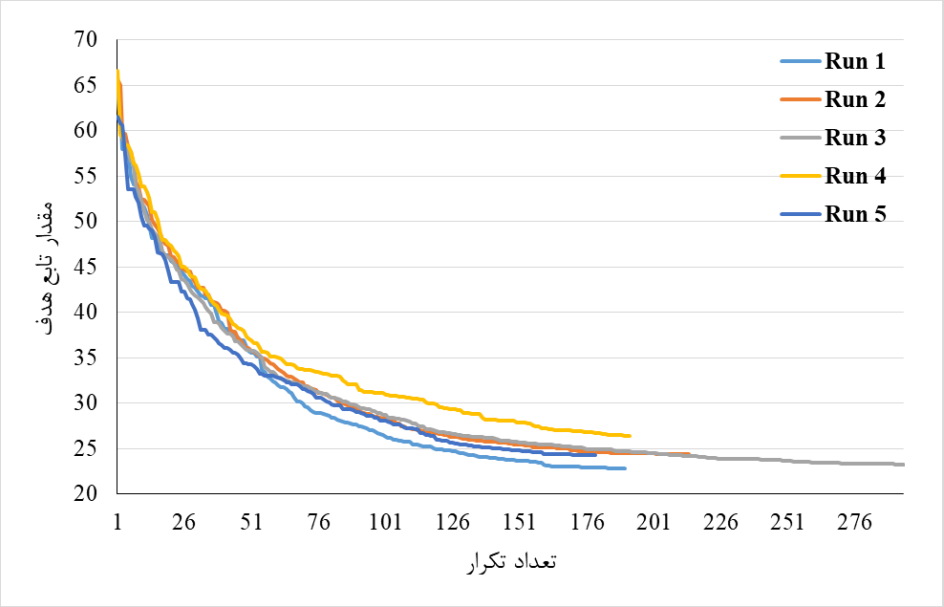
مقادیر پارامترهای به کار رفته در الگوریتم ژنتیک در جدول ۸ آورده شده است. حال پس یافتن مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترهای الگوریتم

1 Exploration
2 Exploitation

جدول ۹. مقادیر تابع هدف برای الگوریتم ژنتیک در پنج مرتبه اجرا

Table 9. Objective function values for genetic algorithm in five runs

شماره اجرا	۱	۲	۳	۴	۵
تعداد تکرار	۱۹۰	۲۱۴	۲۹۴	۱۹۲	۱۷۹
مقدار تابع هدف	۲۲/۷۸۶۹	۲۴/۴۰۰۹	۲۳/۲۳۵۲	۲۶/۴۲۰۷	۲۴/۲۵۳۰



شکل ۴. نحوه عملکرد الگوریتم GA در پنج مرتبه اجرا

Fig. 4. The performance of the GA algorithm in five runs

ژنتیک در تعداد تکرار ۱۰۰، در گام بعدی، الگوریتم پنج مرتبه اجرا شده که نتایج حاصل از پنج مرتبه اجرای الگوریتم با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای در جدول ۹ نشان داده شده است. شرایط توقف اجرای الگوریتم به این صورت بوده است که اگر در طی ۵۰ تکرار متوالی، مقدار تابع هدف بیش از ۰/۱ تغییر نداشت (کم‌تر نشد) اجرای برنامه متوقف شود. میانگین پنج مرتبه اجرای الگوریتم، بهترین و بدترین عملکرد الگوریتم به ترتیب با مقدار تابع هدف ۲۴/۲۱۹۳، ۲۲/۷۸۶۹ و ۲۶/۴۲۰۷ به دست آمده است. در شکل ۴ نحوه عملکرد الگوریتم GA در پنج مرتبه اجرای این الگوریتم نشان داده شده است.

۳- ۳- نتایج بررسی عملکرد الگوریتم MVGA

همان‌طور که در نتایج دو الگوریتم GA و MVO ملاحظه گردید الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم چند جهانی از کارایی بالاتری در برخوردار بوده است. یا به عبارت دیگر در این تحقیق که هدف بررسی کارایی الگوریتم چند جهانی بوده است ملاحظه گردید که این الگوریتم در حل مسئله بهینه‌سازی حاضر از کارایی بالایی برخوردار نبود و کارایی الگوریتم ژنتیک در حل مسئله بهینه‌سازی حاضر بیشتر است. لذا در این تحقیق برای بالا بردن کارایی الگوریتم چند جهانی، این الگوریتم را با الگوریتم ژنتیک تلفیق نموده و کارایی الگوریتم جدید که تحت عنوان الگوریتم MVGA نامیده

جدول ۱۰. مقادیر مختلف تعداد اعضای جمعیت برای الگوریتم MVGA

Table 10. The number of population members for MVGA algorithm

تعداد جمعیت	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰
مقدار تابع هدف	۳۴/۸۴۸۷	۳۷/۰۶۶۳	۳۱/۵۷۹۹	۳۳/۳۵۴۲	۳۱/۲۷۴۵	۳۰/۱۱۶۵	۳۱/۹۶۸۰
تعداد جمعیت	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۷۵۰	۸۰۰
مقدار تابع هدف	۲۸/۵۷۹۲	۲۹/۷۶۱۵	۲۷/۷۶۵۴	۲۹/۲۹۳۵	۲۹/۴۹۷۹	۳۰/۱۹۰۳	۲۶/۷۲۸۵

جدول ۱۱. مقادیر مختلف تعداد تکرار برای الگوریتم MVGA

Table 11. The number of iterations for MVGA algorithm

تعداد تکرارها (L)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰
مقدار تابع هدف	۲۶/۷۲۸۵	۲۳/۶۴۲۶	۲۶/۸۷۸۵	۲۴/۲۲۱۴	۲۷/۸۴۹۵	۲۶/۳۶۳۲	۲۶/۹۱۷۸	۲۶/۷۴۴۵

جدول ۱۲. نتایج حاصل از پنج مرتبه اجرای الگوریتم MVGA

Table 12. The results of five runs for MVGA algorithm

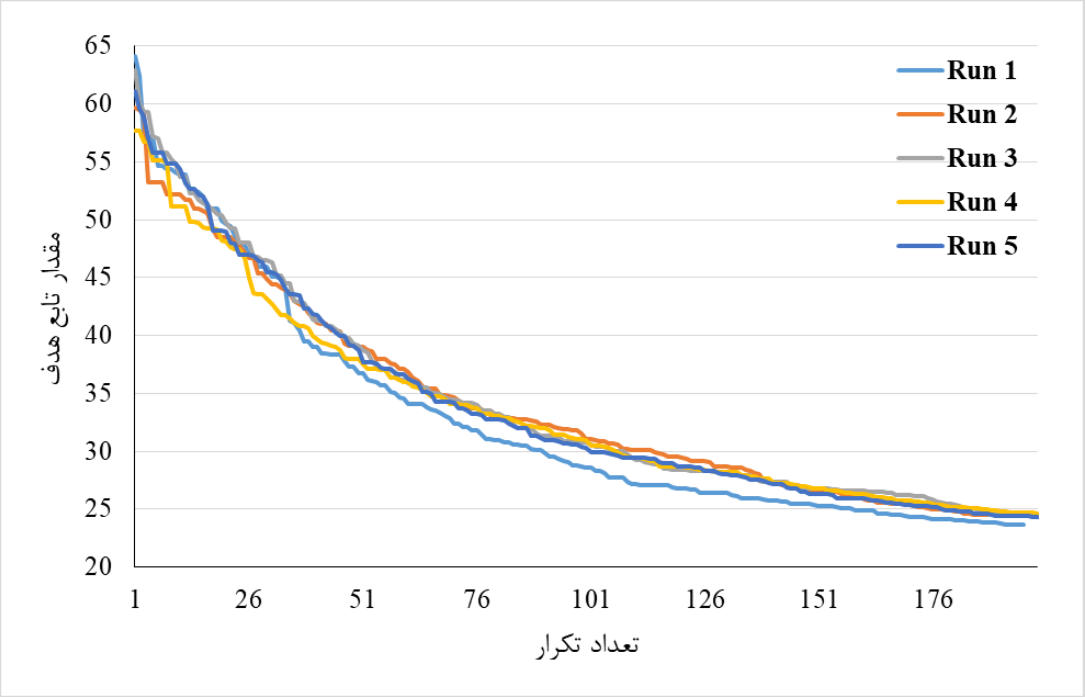
شماره تکرار	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	تکرار چهارم	تکرار پنجم
مقدار تابع هدف	۲۳/۶۴۲۶	۲۴/۴۹۷۶	۲۴/۳۴۶۸	۲۴/۶۴۵۹	۲۴/۳۱۴۱

شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. همین عمل برای نسخه چند هدفه این دو الگوریتم نیز انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در ترکیب این دو الگوریتم از بهترین مقادیر پارامترهای محاسبه شده برای هر دو الگوریتم بهره گرفته شده است. بنابراین در این قسمت تنها تعداد اعضای جمعیت و تعداد تکرارهای الگوریتم مورد آزمون و خطا قرار می‌گیرد. نتایج بررسی تعداد جمعیت در الگوریتم MVGA در جدول ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد بهترین مقدار تابع هدف برابر با ۲۶/۷۲۸۵ و در تعداد اعضای جمعیت ۸۰۰ بوده است.

همان‌طور که گفته شد تعداد تکرارها در الگوریتم MVGA نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول ۱۱ آورده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که تعداد زیاد تکرارها لزوما منجر به بهبود در مقدار تابع هدف نمی‌شود و بهترین مقدار تابع هدف در ۲۰۰ تکرار به دست آمده و مقدار آن برابر با ۲۳/۶۲۲۶ است. لازم به ذکر است که در این الگوریتم نیز شرایط خاتمه بدین صورت تعریف شده که اگر پس از ۱۰۰ تکرار بهبودی در مقدار تابع هدف حاصل نشد، اجرای برنامه متوقف شود.

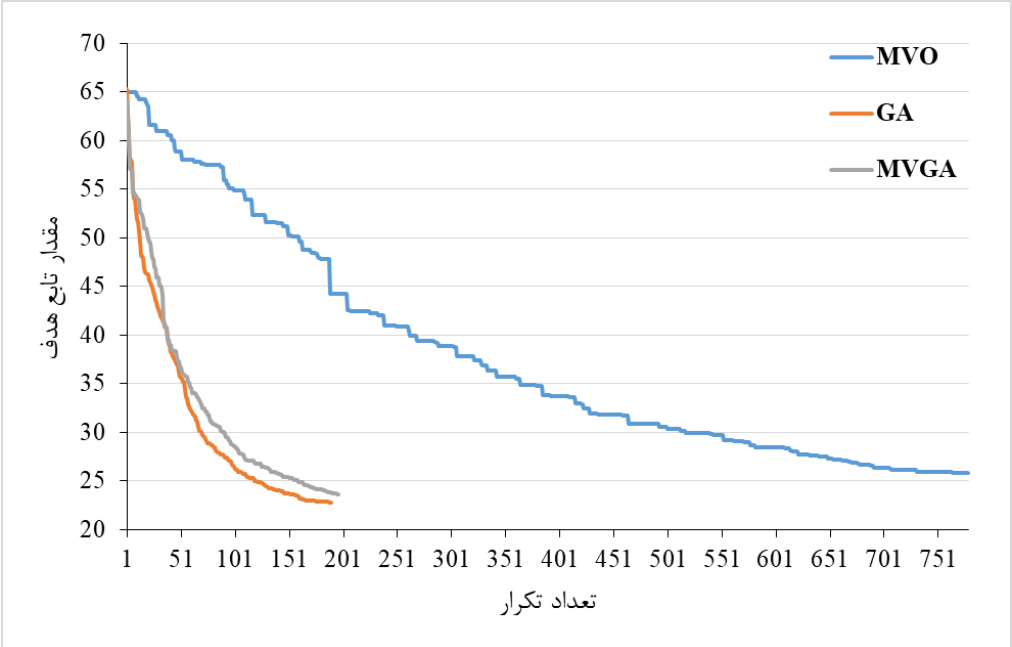
نتایج حاصل از پنج مرتبه اجرای الگوریتم MVGA در جدول ۱۲ نشان داده شده است. میانگین پنج مرتبه اجرای الگوریتم MVGA بهترین و بدترین عملکرد الگوریتم به ترتیب با مقدار تابع هدف ۲۴/۲۸۹۴، ۲۳/۶۴۲۶ و ۲۴/۶۴۵۹ به دست آمده است. در شکل ۵ نحوه عملکرد الگوریتم MVGA در پنج مرتبه اجرای این الگوریتم نشان داده شده است.

بهترین عملکرد الگوریتم‌های چند جهانی، ژنتیک و MVGA در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد



شکل ۵. نحوه عملکرد الگوریتم MVGA در پنج مرتبه اجرا

Fig. 5. The performance of the MVGA algorithm in five runs



شکل ۶. بهترین عملکرد نسخه تک هدفه الگوریتم‌های مورد بررسی

Fig. 6. The best performance of the single-objective version of the examined algorithms

دو الگوریتم GA و MVGA در تعداد تکرار کمتر جواب مناسب‌تر را یافته‌اند. لذا می‌توان گفت برای بالا بردن کارایی الگوریتم چند جهانی در حل مسئله بهینه‌سازی حاضر، تلفیق این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک می‌تواند رویکرد مناسبی باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق الگوریتم چند جهانی و الگوریتم ژنتیک و همچنین تلفیق این دو الگوریتم تحت عنوان MVGA برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر به کار برده شدند. مسئله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی مجموع توان دوم اختلاف تقاضای کشاورزی از رهاسازی، تعریف گردید و نتایج تحقیق نشان داد که همه الگوریتم‌ها توانایی حل این مسئله بهینه‌سازی حاضر را دارا می‌باشند.

در این تحقیق از رویکرد قیود زنجیری استفاده گردید بدین ترتیب که رهاسازی در ماه اول مشخص شده و بازه‌ای برای رهاسازی در ماه دوم تعیین شده که رهاسازی بایستی در این بازه انتخاب شود و پس از آن دوباره بازه‌ای برای رهاسازی در ماه سوم مشخص می‌شود. در این بین اگر در انتهای اجرای الگوریتم راه حل‌های دارای تخطی وجود داشته باشند این راه حل از مجموعه راه حل‌هایی یافته شده حذف می‌شوند. پس از بررسی مقادیر مختلف برای پارامترهای هر یک از الگوریتم‌ها نتایج نشان داد که برای الگوریتم چند جهانی بهترین مقدار برای پارامترهای WEPmin، WEPmax و p به ترتیب صفر، ۳ و ۶ می‌باشد. همچنین نحوه کاهش تدریجی متغیر TDR و افزایش تدریجی متغیر WEP در طی تکرارهای مختلف به صورت نمایی عملکرد الگوریتم را در حل مسئله بهینه‌سازی حاضر بهبود می‌بخشد. همچنین برای الگوریتم ژنتیک بیشترین مقدار برای نسبت والدین به کل اعضای جمعیت برابر ۰/۹ منجر به بهترین عملکرد الگوریتم شد. دلیل این امر را می‌توان در افزایش تعداد والدین و به تبع آن افزایش تعداد فرزندان دانست که تنوع بیشتر در راه حل‌های یافته شده را در پی دارد.

برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر، در بین این سه الگوریتم، بهترین عملکرد مربوط به الگوریتم ژنتیک با میانگین مقدار تابع هدف ۲۴/۲۲ بوده و پس از آن الگوریتم‌های MVGA و MVO با مقادیر میانگین تابع هدف ۲۴/۲۹ و ۲۹/۱۴ در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج تحقیق مشابه با تحقیق زینلی و همکاران (۱۳۹۴) بوده است که در آن سه الگوریتم ازدحام ذرات، ژنتیک و سیستم مورچگان پیوسته برای حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن مقایسه شده بودند و در آن الگوریتم ژنتیک از کارایی بالاتری نسبت به دو الگوریتم دیگر برخوردار بود. در این تحقیق همان‌طور که ملاحظه می‌گردد دو الگوریتم GA و MVGA عملکرد تقریبا مشابهی را در حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد امیرکبیر داشته‌اند. همچنین ترکیب الگوریتم ژنتیک با چند جهانی باعث بهبود عملکرد الگوریتم چند جهانی به میزان ۱۶/۶۴ درصد شده است. لذا ترکیب الگوریتم چند جهانی با الگوریتم ژنتیک می‌تواند به نحو موثری کارایی الگوریتم چند جهانی را بالا ببرد.

منابع

[1] M. Zeynali, O. Mohamad Reza Pour, F. Frooghi, Using Firefly Algorithm for Optimizing Operation of Doroudzan Reservoir, Irrigation and Water Engineering, 6(1) (2015) 33-45.

[2] O. Mohammadrezapour, M. Zeynali, Comparison of meta-heuristic algorithms in the optimal operation of multi-reservoir (a case study: Golestan and Voshmgir dams), Journal of Water and Soil Science, 22(1) (2018).

[3] O.M.R. Pour, M.J. Zeynali, Application of an max-min ant system algorithm for optimal operation of multi-reservoirs (case study: Golestan and Voshmgir reservoir dams), International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS), 8(1) (2015) 27-33.

[4] Y.H. Al-Aqeeli, O.M.M. Agha, Optimal operation of multi-reservoir system for hydropower production using particle swarm optimization algorithm, Water Resources Management, 34(10) (2020) 3099-3112.

[5] X. Zeng, T. Hu, X. Cai, Y. Zhou, X. Wang, Improved dynamic programming for parallel reservoir system operation optimization, Advances in Water Resources, 131 (2019) 103373.

[6] D. Rani, M. Pant, S. Jain, Dynamic programming integrated particle swarm optimization algorithm for reservoir operation, International Journal of System Assurance Engineering and Management, 11(2) (2020) 515-529.

[7] M. Rabiei, M. Aalami, S. Talatahari, Reservoir operation optimization using CBO, ECBO and VPS algorithms, Iran University of Science & Technology, 8(3) (2018) 489-509.

[8] A. Moridi, J. Yazdi, Optimal allocation of flood control capacity for multi-reservoir systems using multi-objective optimization approach, Water Resources Management, 31(14) (2017) 4521-4538.

[9] J. Anand, A. Gosain, R. Khosa, Optimisation of multipurpose reservoir operation by coupling SWAT and genetic algorithm for optimal operating policy (case study: Ganga River basin), (2018).

[10] K. Srinivasan, K. Kumar, Multi-objective simulation-optimization model for long-term reservoir operation using piecewise linear hedging rule, Water resources management, 32(5) (2018) 1901-1911.

[11] Z.-k. Feng, S. Liu, W.-j. Niu, B.-j. Li, W.-c. Wang, B. Luo, S.-m. Miao, A modified sine cosine algorithm for accurate global optimization of numerical functions and multiple hydropower reservoirs operation, Knowledge-Based Systems, 208 (2020) 106461.

[12] Z.-k. Feng, W.-j. Niu, S. Liu, B. Luo, S.-m. Miao, K. Liu, Multiple hydropower reservoirs operation optimization by adaptive mutation sine cosine algorithm based on neighborhood search and simplex search strategies, Journal of Hydrology, 590 (2020) 125223.

[13] Z. Zhang, H. Qin, L. Yao, Y. Liu, Z. Jiang, Z. Feng, S. Ouyang, Improved Multi-objective Moth-flame Optimization Algorithm Based on R-domination for cascade reservoirs operation, Journal of Hydrology, 581 (2020) 124431.

[14] Z.M. Yaseen, M.F. Allawi, H. Karami, M. Ehteram, S. Farzin, A.N. Ahmed, S.B. Koting, N.S. Mohd, W.Z.B. Jaafar, H.A. Afan, A hybrid bat–swarm algorithm for optimizing dam and reservoir operation, Neural Computing and Applications, 31(12) (2019) 8807-8821.

[15] Y. Xia, Z.-k. Feng, W.-j. Niu, H. Qin, Z.-q. Jiang, J.-z. Zhou, Simplex quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with application to ecological operation of cascade hydropower reservoirs, Applied Soft Computing, 84 (2019) 105715.

[16] M. Zeynali, R.P.O. MOHAMAD, F. FROOGHI, Comparison of imperialist competitive algorithm (ICA) and ant colony algorithm (ACO) for optimizing exploitation of Doroudzan reservoir with application of chain constraints approach, (2016).

[17] W.-j. Niu, Z.-k. Feng, C.-t. Cheng, X.-y. Wu, A parallel multi-objective particle swarm optimization for cascade hydropower reservoir operation in southwest China, Applied Soft Computing, 70 (2018) 562-575.

[18] M.H. Afshar, R. Hajiabadi, A novel parallel cellular automata algorithm for multi-objective reservoir operation optimization, Water resources management, 32(2) (2018) 785-803.

[19] Z.-k. Feng, W.-j. Niu, C.-t. Cheng, Optimization of hydropower reservoirs operation balancing generation benefit and ecological requirement with parallel multi-objective genetic algorithm, Energy, 153 (2018) 706-718.

[20] A. Azari, S. Hamzeh, S. Naderi, Multi-objective optimization of the reservoir system operation by using the hedging policy, Water resources management, 32(6) (2018) 2061-2078.

[21] e. f, o. b, s. a, Optimal Operation of the Conjunctive Aquifers - Dam system: The Genetic Programming Approach, Water Resources Engineering, 7(21) (2014) 51-66.

[22] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Hatamlou, Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization, Neural Computing and Applications, 27(2) (2016) 495-513.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. BaniAsadi Moghadam, H. Ebrahimi, A. Khashei Siuki, A. Akbarpour, Using Novel Meta-Heuristic Algorithms for Single-Objective Operation of Reservoir Amirkabir, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2173-2188.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18971.7012