

Research Paper

Application of Adaptive Dynamic Differential Evolution Algorithm in Optimal Allocation of Water Resources (Case Study: Kerman Baft Dam)

Hossein Mohammadi¹,Zahra Ghaffari Moghadam^{2*}

¹ Master of Science, Department of Computer Science, Faculty of Mathematics - Statistics and Computer Science, University of Sistan and Baluchestan, Iran

² Assistant Professor Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol, Iran.
Email: zahraghafari@uoz.ac.ir



10.22125/IWE.2023.173291

Received:
May 19, 2022
Accepted:
August 2, 2022
Available online:
June 25, 2023

Keywords:
Optimal efficiency of water resources, single-reservoir system, differential evolution, parameters dynamic adaptive scheme, water management

Abstract

Optimal use of dam's water resources is a serious challenge in water resources management and engineering, due to continuous droughts and water shortages. Therefore, in order to comprehensively management in the used amount of dams water resources, it is essential to establish a control mechanism in the release of water resources. In this study, an improved evolutionary algorithm entitled "Adaptive Differential Evolution by Choosing of Dynamic incremental intervals (ADECDII)" was proposed to optimize the single-reservoir water system. Efficiency of the ADECDII approach was to use the dynamic incremental interval selection scheme for parameters adjustment of the standard differential evolution (DE). Problem modeling was defined as a problem of minimization with the objective function of error values between real demand and released water, with one-month time periods between 2008-2018 years, on Baft Dam in Kerman province. ADECDII performance evaluation was compared with six advanced algorithms. Based on the statistical results, lowest average of the dam water shortages with mean error of zero ($< 10^{-31}$) MCM (Million Cubic Meters) was recorded for ADECDII, which proved the efficiency of the proposed approach in the optimal allocation of released water values. This is while, other comparable algorithms could not report a real shortage of less than 0.37 MCM. The average of runtime for ADECDII was 7.15 sec, which was three seconds longer than DE runtime. Also, ADECDII in the tests of reliability index, vulnerability index, resilience index, sustainability index, difference absolute error values between released water values and total demand in an annual average, and convergence rate clearly showed a higher performance in compared to other comparable algorithms.

1. Introduction

Drought crisis and Lack of water resources have forced people to plan for water resources management. Water resources management is the economic use of water resources that leads to optimal and sustainable water allocation. Storing of water resources in behind of dams is an important approach to downstream needs supplement. Therefore, the introduction of efficient methods in the optimal using of water resources is very important. These methods should be powerful tools in optimization to control downstream water needs supplement. Today, the operation of dam reservoirs has been considered as an

* **Corresponding Author:** Zahra Ghaffari Moghadam

Address: Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol, Iran

Email: zahraghafari@uoz.ac.ir

Tel: 09155441671

optimization problem and mathematical models and evolutionary algorithms have been used to solve them. In general, classical algorithms are not able to optimize the water engineering problem efficiently due to the complex nature of water problems. Therefore, designing improved versions and introducing new evolutionary algorithms is needed to optimization approach be able to provide a high-quality solution. In this study, a new improved algorithm for the optimal efficiency of the Baft Dam in state of single-reservoir system is define and is suggested a new strategy for water resources management.

2. Materials and Methods

The proposed algorithm to increase the performance of DE in solving problem and in order to increasing trade of between exploration and exploitation uses a technique of dynamic incremental intervals selection in during of evolution process to adjust the number of parameters. The proposed approach is called "Adaptive Differential Evolution by Choosing of Dynamic incremental intervals (ADECDDII)". The Dynamic incremental intervals technique control the behaviour of algorithm and eliminates the user role from the parameters adjustment. The purpose of this study is the optimal efficiency of water resources on the Baft Dam in Kerman province for use in different sectors of drinking, agriculture, industry, aquaculture and environment

3. Results

This study is presented in other to minimizing irrigation shortages by focusing on the optimal allocation of water resources. A case study on Kerman Baft Dam is modeled in the form of single-reservoir system and is used from an improved differential evolution algorithm based on the selection of dynamic incremental intervals. Optimal efficiency in allocating water resources of Baft Reservoir Dam with a ten-year time horizon between 2008-2018 years is considered that is separated into monthly time periods. ADECDDII is compared with six state-of-the-art algorithms including ICA, GA, DE, BBO, ABC and IWO, and each algorithm presented 30 different runs. From the evaluation of Statistical results in five status, best, mean, median, standard deviation (STD) and worst error values (from the comparison of values between real demand and released irrigation water), ADECDDII, with an mean error of zero MCM is the best algorithm. This is while, DE, BBO, ICA, IWO, GA, ABC, with mean errors of 0.37, 0.37, 0.39, 0.49, 0.59 and 1.6 MCM, respectively, are report more real deficiencies. The highest reliability index with an average confidence of 100% and the lowest vulnerability index with an average failure of 0% are assigned to ADECDDII. Also, based on the resilience index, the best algorithm with an average resilience of 100% is ADECDDII. In this tests, ICA and IWO are the second-best algorithms; so that, so that, ICA gains an average failure of 4.47%; Also, IWO acquires an average confidence of 87.5% and an average resilience of 61.1%, respectively.

4. Discussion and Conclusion

ADECDDII based on the dynamic adaptive technique for parameters adjustment is very successful in controlling convergence and better exploring the problem search space. In future research, ADECDDII is successfully used to solve multi-objective problems in water resources management and other real-world problems.

5. Six important references

- 1) Ali, M.Z., Awad, N.H., Suganthan, P.N. 2015. Multi-population differential evolution with balanced ensemble of mutation strategies for large-scale global optimization. *Applied Soft Computing* 33:304-27
- 2) Bozorg-Haddad, O., Karimirad, I., Seifollahi-Aghmiuni, S., Loáiciga, H.A. 2015. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141:04014097
- 3) Derrac, J., García, S., Molina, D., Herrera, F. 2011. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation* 1:3-18
- 4) Ehteram, M., Karami, H., Farzin, S. 2018. Reducing irrigation deficiencies based optimizing model for multi-reservoir systems utilizing spider monkey algorithm. *Water Resources Management* 32:2315-34
- 5) Safavi, H., Gol Mohammadi, M. 2016. Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-water resources research* 12:68-83
- 6) Storn, R., Price, K. 1997. *Journal of global optimization* 11:341-59



کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی پویای تطبیقی در تخصیص بهینه منابع آب (مطالعه موردی: سد بافت کرمان)

حسین محمدی^۱، زهرا غفاری مقدم^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

استفاده بهینه از منابع آبی سدها به دلیل خشک‌سالی‌های مستمر و کم‌آبی‌های موجود، چالشی جدی در مدیریت و مهندسی منابع آب است. از این رو، به منظور مدیریت جامع در مقدار مصرف منابع آبی سدها، ایجاد سازوکار کنترلی در رهاسازی منابع آبی بسیار ضروری است. در این مطالعه، یک الگوریتم تکاملی بهبود یافته با عنوان «تکامل تفاضلی تطبیقی با انتخاب بازه‌های افزایشی پویا (ADECDII)» برای بهینه‌سازی سیستم آبی تک مخزنی پیشنهاد شد. کارایی رویکرد ADECDII در استفاده از طرح انتخاب بازه‌های افزایشی پویا برای تنظیم پارامترهای نسخه تکامل تفاضلی کلاسیک (DE) بود. مدسازی مسئله نیز به صورت یک مسئله کمینه‌سازی مقید با تابع هدف مقادیر خطا بین تقاضای حقیقی و آب رهاسازی شده، با دوره‌های زمانی یک‌ماهه بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷، بر روی سد بافت کرمان تعریف شد. ارزیابی عملکرد ADECDII با شش الگوریتم پیشرفته مقایسه گردید. بر اساس نتایج آماری، کمترین میانگین کمبودهای آبی سد با میانگین خطای تقریباً صفر (10^{-3}) در واحد میلیون مترمکعب برای ADECDII ثبت شد که کارآمدی رویکرد پیشنهادی را در تخصیص بهینه مقادیر آب رهاسازی شده اثبات کرد. این در حالی است که، سایر الگوریتم‌های مقایسه شونده نتوانستند کمبود واقعی کمتر از $0/37$ میلیون مترمکعب گزارش کنند. میانگین زمان اجرای ADECDII با اندازه $7/15$ ثانیه به دست آمد که نسبت به DE اختلاف سه‌ثانیه‌ای داشت. همچنین، ADECDII در برگزاری آزمون‌های شاخص قابلیت اطمینان، شاخص آسیب‌پذیری، شاخص برگشت‌پذیری، شاخص پایداری، اختلاف مقادیر رهاسازی نسبت به مقادیر تقاضای حقیقی در یک متوسط سالانه و نرخ همگرایی، به‌وضوح برتری عملکرد بالاتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌های شرکت‌کننده در رقابت نشان داد.

واژه‌های کلیدی بهره‌وری بهینه منابع آب، سیستم تک مخزن، تکامل تفاضلی، طرح تطبیقی پویای پارامترها، مدیریت آب

^۱ کارشناس ارشد محاسبات علمی، گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضیات - آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ایمیل: Mohammadi_cs94@pgs.usb.ac.ir

^۲ استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: zahraghafari@uoz.ac.ir

مقدمه

(Ahmadianfar et al., 2021; Pant, 2022) از الگوریتم تکامل تفاضلی، دنیایی و همکاران در (Donyaii et al., 2020) از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ آبی، فنگ و همکاران در (Fang et al., 2020) و احترام و همکاران در (Ehteram et al., 2018b) از الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم، محمدرضاپور و همکاران در (Mohammadrezapour et al., 2019) از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، راه و اسواین در (Rath and Swain, 2018)، امیرخانی و همکاران در (Amirkhani et al., 2017) و احترام و همکاران در (Ehteram et al., 2017) از الگوریتم ژنتیک، قادری و همکاران در (Qaderi et al., 2018) از الگوریتم چرخه آب، چونگ و همکاران در (Choong et al., 2017) و حسینی و الشافی در (Hossain and El-Shafie, 2013) از الگوریتم کلونی زنبورعسل، حداد و همکاران در (Haddad et al., 2016) از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و درنهایت، افشار و همکاران در (Afshar et al., 2015) از الگوریتم رقابت استعماری برای بهره‌برداری بهینه منابع آبی از مخازن سدها استفاده کرده‌اند.

در پژوهش‌های متعدد، جزئیات بیشتری از مسائل مدیریت منابع آبی تک مخزنی و چند مخزنی سدها، مبتنی بر دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی ریاضی و یا در تعامل با الگوریتم‌های تکاملی قابل دریافت است. به‌عنوان مثال، خراشادی‌زاده و همکاران (Khorashadizadeh et al., 2022)، به‌منظور مدیریت توزیع آلودگی مکانی و زمانی بر روی رودخانه قشلاق کردستان و با تمرکز بر تقاضای مصرف‌کننده، از یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند. عبدالقادر و همکاران (Abdelkader et al., 2022)، پیش‌بینی پتانسیل خطرات پایین‌دستی سدها را با استفاده از مدل درختی رگرسیونی و الگوریتم تکامل تفاضلی ارائه دادند. صدیقی کیا و همکاران (Sedighkia et al., 2021)، به‌منظور جلوگیری از هدر رفت زیستگاه فیزیکی پایین‌دستی، عملیات مخزنی را با استفاده از مدل فرا ابتکاری ANFIS جفت‌شده بهینه‌سازی کردند. خراشادی‌زاده و همکاران در (Khorashadizadeh et al., 2020)، یک مدل ریاضی را

بحران خشک‌سالی و کمبود منابع آبی انسان‌ها را به استفاده صحیح از آب و مدیریت آن وادار کرده است. مدیریت منابع آب، استفاده اقتصادی از منابع آب است که منجر به تخصیص بهینه و پایدار آب می‌شود (Srinivasan and Kumar, 2018). بیشتر کشورها از جمله ایران به دلایل میزان بارندگی کم و اندازه تبخیر بالا از کمبود آب شدیدی رنج می‌برند و ذخیره منابع آبی در پشت سدها، یکی از مهم‌ترین ابزارهایشان برای تأمین نیازهای آبی پایین‌دستی است (Chen et al., 2017). از این‌رو، تصمیم‌گیری‌های استراتژیک برای معرفی روش‌های کارآمد، در استفاده بهینه از منابع آبی بسیار حائز اهمیت است. این روش‌ها باید ابزارهای بهینه‌سازی قدرتمندی برای کنترل هدر رفت و تأمین نیازهای آبی باشند و عرضه آب در بخش‌های مختلف (شامل صنعت، کشاورزی و ...) را به‌طور کنترل‌شده‌ای هدایت کنند (Ehteram et al., 2018b). به‌طور کلی، مدیریت خشک‌سالی معمولاً بر اساس تعادل بین ذخیره منابع آبی و اندازه آب رهاسازی شده از سدها انجام می‌شود. در سال‌های اخیر، موضوع در نظر گرفته‌شده در زمینه منابع آب و بهره‌برداری از مخازن سدها به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های تکاملی برای حل آن‌ها استفاده شده است (Mansouri et al., 2018; Raso et al., 2017). الگوریتم‌ها تلاش می‌کند تا با ارائه یک راه‌حل بهینه با محاسبات دقیق، برنامه‌ریزی جامعی در تأمین منابع آبی، کاهش شکاف ایجادشده بین هدر رفت آب، کنترل تقاضای پایین‌دست و کاهش کمبود منابع آبی در اختیار مدیران قرار دهند (Cheng et al., 2008; Mansouri et al., 2018; Raso et al., 2017).

در طی دو دهه گذشته، الگوریتم‌های تکاملی متعددی برای حل مسائل بهینه‌سازی منابع آبی ارائه شده‌اند. هرچند که، این مسائل دارای پیچیدگی محاسباتی بالا بوده و بهینه‌سازی آن‌ها متناسب با میزان تقاضا، فرایندی زمان‌بر است؛ اما، الگوریتم‌های تکاملی توانسته‌اند تا با حداقل سخت‌افزار ممکن، راه‌حلی با کیفیت بالا در مدت‌زمان محدود انتشار دهند. به‌عنوان مثال، احمدیانفر و همکاران در



(Fallah-Mehdipour et al., 2012)، برنامه‌ریزی ژنتیک را به‌منظور کمینه‌سازی کمبود آب آبیاری استفاده کردند.

بررسی پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهند که الگوریتم‌های تکاملی بسیاری برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه منابع آبی بکار رفته‌اند. هرچند، این الگوریتم‌ها غالباً نسخه‌های کلاسیک می‌باشند. از این‌رو، طراحی نسخه‌های بهبودیافته و معرفی الگوریتم‌های تکاملی جدیدی نیاز است تا بتواند در ارائه راه‌حلی با کیفیت بالا مؤثر باشند. الگوریتم‌های تکاملی جدید مبتنی بر عملگرهای پیشرفته می‌توانند به رفع نقاط ضعف قبلی فائق آیند. از سوی دیگر، دستیابی به راه‌حلی بهینه یا نزدیک به بهینه در حل مسئله بهره‌برداری بهینه منابع آبی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا، مدیریت بهینه آب می‌تواند کنترل مناسبی در تمامی حوزه (شامل صنعت، کشاورزی و ...) ایجاد کند که با گذشت زمان، پایداری مناسبی در توزیع آب ارائه دهد. در این مطالعه، الگوریتم جدیدی برای بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنی سد بافت تعریف می‌شود و استراتژی جدیدی برای مدیریت منابع آبی ارائه می‌گردد. الگوریتم جدید پیشنهادی، نسخه بهبودیافته‌ای از الگوریتم تکامل تفاضلی کلاسیک (DE) است؛ به طوری که، برای افزایش کارایی DE در حل مسئله، با هدف افزایش کنترل مصالح‌های مناسب بین اکتشاف و بهره‌برداری، از یک تکنیک انتخاب بازه‌های افزایشی پویا در طی فرایند تکامل برای تنظیم مقدار پارامترها استفاده می‌کند. رویکرد پیشنهادی با عنوان «تکامل تفاضلی تطبیقی مبتنی بر بازه‌های افزایشی پویا (ADECDII)» نام‌گذاری می‌شود. این تکنیک منجر به کنترل رفتار الگوریتم و حذف نقش کاربر از تنظیم مجدد پارامترها می‌گردد. ADECDII با ایجاد سازوکاری مناسب در انتخاب پارامترها، با افزایش تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری میان راه‌حل‌ها در طی روند تکاملی، نواحی مطلوب را با قدرت بیشتری شناسایی می‌کند؛ نرخ همگرایی را افزایش می‌دهد؛ از به دام افتادن راه‌حل‌ها در بهینه محلی می‌کاهد و در نهایت، از ایجاد پدیده رکود و همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند. هدف از این مطالعه، بهره‌برداری بهینه منابع آبی با هدف کاهش کمبودهای آب آبیاری در بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی، صنعت، آبی‌پروری و

برای مدیریت ورود آلاینده به رودخانه پیشنهاد دادند. آن‌ها در (Khorashadizadeh et al., 2020) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، مدیریت کیفیت رودخانه را برای کاهش آسیب آلودگی آب مصرف‌کنندگان پیگیری کردند. محمدرضاپور و همکاران (Mohammadrezapour et al., 2019)، بهینه‌سازی کشت، مدیریت آبیاری و درآمد حاصل از کشت محصولات در دشت قزوین (فلات مرکزی ایران) را بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ارائه دادند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2019)، عملیات مخزن بلادرنگ را با استفاده از شبکه‌های عصبی و مطابق با پیش‌بینی جریان ورودی از یک مدل هیدرولوژیکی توزیع شده بررسی کردند. تانگوان و همکاران (Thongwan et al., 2019)، عملیات مخزن سدها را بر اساس تکنیک منحنی قوانین آینده چندهدفه، از ترکیب الگوریتم جستجوی مشروط تابو و الگوریتم ژنتیک مشروط انجام دادند. علوی و همکاران (Allawi et al., 2018)، بهره‌برداری بهینه از منابع آبی سد آسوان مصر را مبتنی بر تکنیک یادگیری ماشین بر روی الگوریتم بهینه‌سازی بویایی کوسه پیشنهاد کردند. راه و اسواین (Rath and Swain, 2018)، نیز برای بهره‌برداری بهینه منابع آبی در کشور هند، سه الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی کلونی مورچگان را در تعامل با یکدیگر بکار بردند. احترام و همکاران (Ehteram et al., 2018a)، بهره‌برداری چند مخزنی بر روی دو سد گلستان و وشمگیر را با هدف کاهش کمبود آب آبیاری، مبتنی بر الگوریتم میمون عنکبوتی ارائه دادند. قادری و همکاران (Qaderi et al., 2018)، با استفاده از الگوریتم چرخه آب، بهره‌برداری بهینه چند مخزنی را به‌منظور دریافت راه‌حل مطلوب از دو سد گلستان و وشمگیر بررسی کردند. خراشادی‌زاده و همکاران در (Khorashadizadeh et al., 2016)، انتقال آلودگی در روش حجم محدود دوبعدی را با استفاده از معادله آب کم‌عمق شبیه‌سازی کردند. در این روش، معادلات دیفرانسیل سیال حاکم به‌صورت عددی حل شد و ارزیابی عدم قطعیت برای سه پارامتر کالیبراسیون در مدل انتقال آلودگی، مبتنی بر الگوریتم عدم قطعیت GLUE محاسبه گردید. در نهایت، فلاح‌مهدی‌پور و همکاران



- الگوریتم ADECDII راه حل بهینه را بعد از چندین اجرای مستقل، با مقدار خطای نزدیک به صفر از مقایسه مقادیر آب رهاسازی شده از سد نسبت به مقدار تقاضای حقیقی به دست می‌آورد.

بخش‌های بعدی بدین شرح سازمان‌دهی می‌شوند: مطالعه موردی سد بافت و تعریف مسئله به تفصیل، الگوریتم تکامل تقاضای کلاسیک و به دنبال آن رویکرد پیشنهادی به طور مفصل در بخش دوم ارائه می‌شوند. بخش سوم به بحث و گفتگو پیرامون نتایج تجربی و ارزیابی‌های عددی-آماري اختصاص می‌یابد. در نهایت، در بخش چهارم، چارچوب مطالب با نتیجه‌گیری کلی از مطالعه و پیشنهاد کارهای آینده به پایان می‌رسد.

مواد و روش‌ها

معرفی مسئله (محدوده مورد مطالعه)

سد بافت^۱ در موقعیت جغرافیایی جنوب غربی شهرستان کرمان (در فاصله ۱۶۰ کیلومتری) و شمال شرقی شهرستان بافت (در فاصله ۴ کیلومتری)، بر روی رودخانه هلیل رود احداث شده است. در ابتدا و در سال ۱۳۸۷، این سد جهت تأمین نیاز آبی در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و برای آبیاری زمین‌های کشاورزی در بخش کشاورزی بکار می‌رفت؛ اما، از نیمه دوم سال ۱۳۹۳، از آبیگری سد جهت تأمین آب آشامیدنی شهر بافت استفاده شد. سد بافت با ظرفیت ۴۰ میلیون مترمکعب (mcm) از نوع سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی است. ارتفاع سد از بستر رودخانه ۶۲/۵ متر است و طول و عرض تاج آن به ترتیب ۱۱۳۷ و ۱۰ متر می‌باشد (Beiramipoor et al., 2018).

مسئله بهره‌وری بهینه منابع آبی سد مخزنی بافت، یک مدل بهینه‌سازی ریاضی نامقید است. داده‌های مسئله از سازمان آب منطقه‌ای استان کرمان گردآوری شده است. این داده‌ها مربوط به ۱۰ سال اخیر (بین سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۷) است که به تفکیک اطلاعات t -دوره ماهانه جمع‌آوری شده است. هر دوره، داده‌های ثبت‌شده از پارامترهایی شامل مقدار تقاضای حقیقی بخش‌های مختلف، ورودی به سد، تبخیر از سد و سرریز از سد در پایان هر ماه می‌باشد. بنابراین، $t =$

محیط‌زیست بر روی سد بافت در استان کرمان است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به‌منظور کاهش خطا در تخصیص منابع آبی متناسب با مقدار تقاضای حقیقی (کاهش کمبودهای آبیاری)، با برخی از پیشرفته‌ترین الگوریتم‌ها مقایسه می‌شود. نتایج تجربی، حالت بهینه در تخصیص منابع آبی را با در نظر گرفتن دو هدف تأمین آب و حداکثر کردن سود گزارش می‌کنند. از تحلیل نتایج، تدابیر مدیریتی لازم برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی به‌خصوص در بحران‌های خشک‌سالی قابل‌بررسی است.

جمع‌بندی این مطالعه به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

- با توجه به این واقعیت که مقدار ثابت پارامترها در تمام فرآیند حلقه تکاملی الگوریتم نمی‌تواند منجر به اطلاعات کافی برای تخمین راه‌حلی با کیفیت مناسب باشد؛ در این مقاله، از تکنیک انتخاب بازه‌های افزایشی پویا برای تنظیم مقدار پارامترها در هر تکرار از فرآیند حلقه تکامل استفاده می‌شود.
- رویکرد پیشنهادی، یک هم‌افزایی ساده و درعین حال کارآمد با دو هدف اساسی در حل مسئله است. هدف اول، شناسایی تمام ویژگی‌ها تابع هدف و فضای جستجوی مسئله است که بهبود کارایی و اثربخشی DE را با تولید راه‌حل‌های باکیفیت جدید به سمت نواحی امیدوارکننده هدایت می‌کند. هدف دوم نیز حفظ برتری DE در تنظیم خودکار پارامترها بدون دخالت کاربر و بر اساس نوع مسئله است. همچنین، هیچ پارامتر اضافی در ADECDII مورد نیاز نیست.
- کاربرد رویکرد ADECDII با انجام آزمایشات متعدد از مطالعات موردی در مسئله تخصیص بهینه آب، بر روی سد بافت کرمان بررسی شده و عملکرد ADECDII با برخی از الگوریتم‌های تکاملی پیشرفته مقایسه می‌شود.
- تعریف مسئله در یک مدل‌سازی مقید و با استفاده از مجموعه داده به‌دست‌آمده از اطلاعات آب منطقه‌ای کرمان ارائه می‌شود.

^۱ جزئیات بیشتری از سد بافت در آدرس «سد بافت» https://fa.wikipedia.org/wiki/سد_بافت قابل دریافت است.



می‌باشند. R_{min} حد پایین مقدار رهاسازی آب بوده و با مقدار صفر (۰) تنظیم می‌شود؛ R_{max} حد بالای مقدار رهاسازی آب از سد است که برابر با حداکثر حجم مخزن مقداردهی می‌گردد.

به‌طور کلی، پارامتر حجم مخزن یا ذخیره آبی S_t در ابتدای هر دوره t وابسته به چهار مقدار جریان ورودی آب به سد، مقادیر آب رهاسازی شده از سد و تبخیر و سرریز از سطح مخزن سد می‌باشد، که می‌تواند حجم آبی مخزن را خارج از بازه معین مقداردهی کند. بنابراین، وقتی که حجم مخزن سد (S_t) در دوره t مقداری غیرمجاز دریافت کند، با استفاده از معادله (۴) جریمه می‌شود.

$$\begin{cases} \text{if } S_t < S_{min} & \text{then} \\ P(1) = K \times \sum_{t=1}^T \left(\frac{(S_{min} - S_t)^2}{S_{min}} \right) \\ \text{if } S_t > S_{max} & \text{then} \\ P(2) = K \times \sum_{t=1}^T \left(\frac{(S_t - S_{max})^2}{S_{max}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

که در معادله (۴)، K یک عدد اسکالر بزرگ در نظر گرفته شده و $P(1)$ و $P(2)$ اندازه مقداری توابع جریمه هستند.

از طرف دیگر، به‌منظور ارزیابی رویکردهای اعمال شده در حل مسئله بهره‌وری بهینه منابع آبی سد، و بررسی قدرتمندی الگوریتم‌های تکاملی، از چهار شاخص اطمینان-پذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری بدین شرح استفاده شده است:

شاخص اطمینان‌پذیری (Rel): اندازه کارآمدی سیستم در مقادیر آب رهاسازی شده نسبت به مقدار تقاضای درخواستی پایین‌دستی است که در حالت اطمینان به‌دست‌آمده و برحسب درصد گزارش می‌شود. در این مطالعه، شاخص اطمینان‌پذیری به تفکیک دوره‌های یک‌ماهه بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ و تحت ارضای شرط تأمین تعداد دوره‌هایی که مقدار تقاضا به‌طور کامل برآورده شده است، محاسبه می‌شود (Safavi and Gol, 2016). صفوی و گل محمدی این شاخص را مطابق با معادله (۵) ارائه داده‌اند.

شاخص آسیب‌پذیری (Vul): نسبت تعداد شکست سیستم در تأمین ناصحیح منابع آبی متناسب با مقدار تقاضای درخواستی پایین‌دستی است، که در طی سال‌های

$T = 1, 2, \dots, T$ و $T = 120$ است. تابع هدف مسئله با فرض کمینه‌سازی کمبودهای آبیاری مطابق با معادله (۱) تعریف می‌شود (Ehteram et al., 2018a).

$$OF = \sum_{t=1}^T \left(\frac{D_i - R_i}{\max(D_i)} \right)^2 \quad (1)$$

که در معادله (۱)، OF تابع هدف مسئله، D_i نیازهای آبی پایین‌دست در بخش‌های شرب، کشاورزی، صنعت و ... بوده، $\max(D_i)$ حداکثر مقدار تقاضا شده از سد در تمام T دوره و R_i مقادیر آب رهاسازی شده از سد می‌باشد.

معادله پیوستگی سیستم آب در مخزن سد بافت، به‌صورت معادله (۲) بیان می‌شود. منظور از پیوستگی آب در مخزن، مقدار آبی است که پس از کسر مقادیر تبخیر و سرریز و افزودن مقدار ورودی جدید به سد، همراه با مقدار آب موجود قبلی، به‌عنوان مقدار نهایی آب سد در نظر گرفته می‌شود.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - L_t - R_t - Sp_t \quad (2)$$

که در معادله (۲)، S_{t+1} ذخیره مخزن سد در انتهای دوره t و ابتدای دوره $t+1$ (برحسب میلیون مترمکعب (mcm)) است. S_t ذخیره ابتدای هر دوره t (برحسب mcm) می‌باشد. پارامترهای I_t ، R_t ، L_t و Sp_t به ترتیب، جریان ورودی به مخزن، آب رهاسازی شده از مخزن، تبخیر از سطح مخزن و سرریز از سطح مخزن سد را در هر دوره t (برحسب mcm) نشان می‌دهند.

حجم تبخیر در هر دوره، تابعی از سطح مخزن و ارتفاع تبخیر است؛ به‌طوری‌که، سطح مخزن سد، برحسب داده‌های سطح-حجم-ارتفاع محاسبه می‌گردد. حجم تبخیر (L_t) نیز بر اساس معادله (۳) ارزیابی می‌شود؛ به‌طوری‌که، A_t و E_t به ترتیب محدوده سد و عمق تبخیر در دوره t هستند.

$$L_t = A_t(E_t) \quad (3)$$

حجم مخزن سد یا ذخیره آبی ابتدای هر دوره t (S_t) در بازه $S_{min} \leq S_t \leq S_{max}$ مقدار می‌گیرد و مقادیر رهاسازی از مخزن (R_t) در هر دوره t ، در بازه $R_{min} \leq R_t \leq R_{max}$ تنظیم می‌شود؛ به‌طوری‌که، S_{min} حداقل حجم مخزن سد و S_{max} حداکثر حجم مخزن سد

تأمین و رهاسازی شده است. $T = 120$ تعداد کل دوره‌های یک‌ماهه بین سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۷ است. تعداد دفعاتی که سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب برگشته است. $No. Times D_t = 0$ $follows D_t > 0$ تعداد دفعاتی است که سیستم با کمبود (یا شکست) مواجه بوده است. و Rel, Vul, Res و Sus نیز مقادیر قابلیت اطمینان، شکست، تاب‌آوری و پایداری را به ترتیب گزارش می‌کنند.

الگوریتم تکامل تفاضلی کلاسیک

امروزه، برای دستیابی به راه‌حل بهینه در حل مسائل در یک مدت زمان محدود، به‌کارگیری روش‌های قطعی ریاضی تقریباً ناممکن است؛ زیرا، روش‌های قطعی ریاضی معمولاً از همگرایی زودرس به یک نقطه نامناسب در فضای جستجو رنج می‌برند. همچنین، توانایی حل مسائل را با تعداد زیادی از متغیرهای تصمیم‌گیری در فضای جستجوی مسئله ندارند و در حل مسائل با فضای جستجوی گسسته نیز با مشکل مواجه می‌شوند (Rao, 2019). از این‌رو، به‌منظور کنترل مناسبی از جستجو در فضای مسئله و دستیابی به یک راه‌حل با باکیفیت بالا، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی پیشنهاد می‌شود. در ادامه، نخست، تکامل تفاضلی کلاسیک (DE) به‌اختصار معرفی می‌شود. سپس، رویکرد پیشنهادی ADECDII به‌عنوان رویکردی بهبودیافته‌ای از DE تشریح می‌گردد.

الگوریتم DE در یک چارچوبی شامل جمعیت اولیه و یک حلقه تکامل (مبتنی بر سه عملگر جهش، برش و انتخاب) در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس معرفی شد (Storn and Price, 1997). پارامترهای اساسی DE شامل سه پارامتر فاکتور مقیاس جهش (F)، نرخ تنظیم برش (CR) و اندازه جمعیت (NP) است. در توضیح تولید جمعیت اولیه داریم که: با فرض اینکه هر عضو از جمعیت نسل g ، برداری به فرم $(x_{1i}^g, x_{2i}^g, \dots, x_{Di}^g)$ باشد؛ به‌طوری‌که، $i = 1, 2, \dots, NP$ است؛ در این صورت، جمعیت اولیه در نسل صفر با نماد X_i^0 آماری نرمال تولید می‌گردد. در اینجا، $x_{ji}^0 \leq x_{ji} \leq x_{ubj}$ برای $i = 1, 2, \dots, NP$ و $j = 1, 2, \dots, D$ است و

(به تفکیک دوره‌های ماهانه)، برحسب درصد محاسبه می‌شود (Bozorg-Haddad et al., 2015). حداد و همکارانش شاخص آسیب‌پذیری را مطابق با معادله (۶) پیشنهاد کردند.

شاخص برگشت‌پذیری (Res): توانایی سیستم در تغییر شرایط است؛ به‌طوری‌که یک سیستم تا چه اندازه می‌تواند پس از شکست به حالت مطلوب برگردد. در این مطالعه، شاخص برگشت‌پذیری در طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۷ و به تفکیک دوره‌های یک‌ماهه، برحسب درصد بیان شده و منظور از آن، تعداد دفعاتی است که سیستم در طی دوره شبیه‌سازی از حالت شکست به حالت مطلوب برگشته نسبت به کل دوره‌هایی که با کمبود مواجه بوده است (Hashimoto et al., 1982). هاشیموتو و همکاران شاخص برگشت‌پذیری را مطابق با معادله (۷) استفاده کردند.

شاخص پایداری (Sus): جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم شامل شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری است که به‌صورت یک شاخص کلی بیان می‌شود. از شاخص پایداری برای ایجاد سهولت در تصمیم‌گیری‌ها بین گزینه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب استفاده می‌شود. همچنین، معیاری برای تعیین میزان ریسک خطر است (Sandoval-Solis et al., 2011). سالیس و همکاران شاخص پایداری را با میانگین‌گیری وزنی از سه شاخص مذکور و برحسب درصد، مطابق با معادله (۸) ارائه دادند.

$$Rel = \frac{N_t}{T} \times 100\% \quad (5)$$

$$Vul = \max_{1 \leq t \leq T} \left(\frac{D_t - R_t}{D_t} \right) \times 100\% \quad (6)$$

$$Res = \frac{No. Times D_t=0 follows D_t>0}{No. Times D_t=0 ocured} \times 100 \quad (7)$$

$$Sus = \sqrt[3]{Rel \times Res \times (1 - Vul)} \quad (8)$$

که در معادلات (۵-۸)، N_t تعداد کل دوره‌های یک‌ماهه‌ای است که مقدار آب تقاضا شده در حالت مطمئن



g با راه‌حل‌های متناظر تولیدشده‌ی U^t ، جمعیت X^{g+1} در نسل $g + 1$ را مطابق با معادله (۱۲) تشکیل می‌دهد (Ali et al., 2015).

$$X_i^{g+1} = \begin{cases} U_i^g & \text{if } f(U_i^g) < f(X_i^g) \\ X_i^g & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

که در معادله (۱۲)، $f(U_i^g)$ و $f(X_i^g)$ به ترتیب مقدار ارزیابی‌های تابع هدف از بردارهای U_i^g و X_i^g است و X_i^{g+1} تأمین عضو از اعضای جمعیت نسل $g + 1$ می‌باشد.

الگوریتم تکامل تفاضلی تطبیقی مبتنی بر انتخاب بازه‌های افزایشی پویا (ADECDII)

امروزه، با توجه به پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی به‌خصوص در مسائلی با کاربرد دنیای واقعی، استفاده از یک مقدار ثابت برای تنظیم پارامترهای DE منجر به نمایش ضعیفی از الگوریتم در کسب راه‌حل بهینه باکیفیت می‌شود. از این رو، نیاز به استفاده از تکنیک‌های استراتژیک نظیر طرح کنترل تطبیقی پارامترها است. در ساده‌ترین حالت و در پژوهش‌های متعدد، از یک طرح تنظیم خطی برای مقداردهی به پارامترها استفاده می‌شود (Draa et al., 2015). در تنظیم خطی، پارامترها در هر تکرار g از فرایند تکامل به‌طور افزایشی یا کاهش‌ی مقدار می‌گیرند.

طرح تنظیم خطی در کنترل پارامترها، نیازمند تعداد زیادی از پارامترها است؛ علاوه بر این، مقادیر پارامترها تنها در یک جهت امکان تغییر دارند. به همین منظور، برای تنظیم پویای پارامترها در طی روند تکامل، رویکرد پیشنهادی مبتنی بر طرح انتخاب بازه‌های افزایشی پویا پیشنهاد می‌شود. این طرح با الهام از طرح تنظیم خطی، بازه‌های مجاز برای انتخاب مقادیر پارامترها را در هر تکرار از فرایند تکاملی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، امکان تغییر مقادیر از کاهش‌ی به افزایش و بالعکس را برای تنظیم پارامترها امکان‌پذیر می‌کند. به عبارت دیگر، در این طرح، در تکرارهای اولیه از حلقه تکامل الگوریتم، بازه‌های مجاز برای انتخاب مقادیر پارامترها کوچک است و در طی فرایند تکاملی، بازه‌های مجاز برای انتخاب مقادیر افزایش می‌یابد.

هر متغیر تصمیم‌گیری x_{ji}^0 مطابق با معادله (۹) مقداردهی می‌شود (Ali et al., 2015).

$$x_{ji}^0 = rand \times (x_{ubj} - x_{lbj}) + x_{lbj} \quad (9)$$

که در معادله (۹)، $rand$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ است و x_{ubj} و x_{lbj} حدود پایین و بالای متغیر تصمیم‌گیری j ام را به ترتیب نشان می‌دهند.

در توصیف حلقه تکامل و برای عملیات جهش فرض کنید نسل فعلی، نسل g باشد. جمعیت در این نسل با $X_i^g = (x_{1i}^g, x_{2i}^g, \dots, x_{Di}^g)$ نمایش داده می‌شود. عملیات جهش، بردار جهش‌یافته V_i^g را به ازای هر $i = 1, 2, \dots, NP$ مطابق با معادله (۱۰) ایجاد می‌کند (Ali et al., 2015).

$$V_i^g = X_{r_1}^g + F \times (X_{r_2}^g - X_{r_3}^g) \quad (10)$$

که در معادله (۱۰)، $X_{r_1}^g$ ، $X_{r_2}^g$ و $X_{r_3}^g$ سه عضو متمایز و متفاوت با X_i^g از اعضای جمعیت نسل g است و F پارامتر فاکتور مقیاس جهش با مقدار حقیقی در بازه $[0,1]$ می‌باشد.

عملیات برش در حلقه تکامل برای اعمال برخی از متغیرهای تصمیم‌گیری بردار عضو فعلی جمعیت (X_i^g) به بردار جهش‌یافته V_i^g بکار می‌رود. این عملیات با ترکیب دو بردار V_i^g و X_i^g بردار جدید $U_i^g = (u_{1i}^g, u_{2i}^g, \dots, u_{Di}^g)$ را مطابق با معادله (۱۱) تولید می‌کند (Ali et al., 2015).

$$u_{ji}^g = \begin{cases} v_{ji}^g & \text{if } rand_j \leq CR \text{ OR } j = j_{rand} \\ x_{ji}^g & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

که در معادله (۱۱)، $j = 1, 2, \dots, D$ ، مشخص‌کننده شماره متغیر تصمیم‌گیری، j_{rand} یک عدد تصادفی از مجموعه $[1, 2, \dots, D]$ و CR پارامتر تنظیم برش با مقدار حقیقی در بازه $[0,1]$ است.

در نهایت، از عملیات انتخاب در حلقه تکامل برای انتقال اعضای بهتر به جمعیت نسل بعدی $(g + 1)$ ، بر اساس مقدار تابع هدف آن‌ها استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، با فرض اینکه مسئله موردنظر یک مسئله کمینه‌سازی باشد، عملیات انتخاب از رقابت حریصانه بین جمعیت X^g در نسل



۱. جمعیت اولیه $X_i^0 = (x_{1i}^0, x_{2i}^0, \dots, x_{Di}^0)$ را مطابق با معادله (۹) تولید کن.
۲. تکرار گام‌های ۹-۲ را تا زمانی که $g < G$ است.
۳. مقدار دو پارامتر F^g و CR^g را مطابق با معادلات (۱۳) و (۱۴) محاسبه کن؛ به طوری که، اگر $rand(0, 1) < 0.5$ باشد از معادله (۱۳) و در غیر این صورت از معادله (۱۴) استفاده کن.
۴. برای هر عضو X_i^g گام‌های ۷-۵ را تکرار کن.
۵. بردار جهش‌یافته V_i^g را مطابق با معادله (۱۰) تولید کن؛ به طوری که، در معادله (۱۰) $F = F^g$ باشد.
۶. بردار جدید U_i^g را مطابق با معادله (۱۱) تولید کن؛ به طوری که، در معادله (۱۱) $CR = CR^g$ باشد.
۷. تابع هدف $f(U_i^g)$ را برای بردار U_i^g ارزیابی کن.
۸. جمعیت نسل جدید X^{g+1} را مطابق با معادله (۱۲) به‌روزرسانی کن.
۹. کران پایین و بالای بازه انتخاب مقادیر، در تکنیک انتخاب بازه‌های افزایشی پویا را مطابق با معادله (۱۵) به‌روزرسانی کن.

فرمول تصادفی خطی مبتنی بر انتخاب بازه‌های افزایشی پویا مطابق با معادلات (۱۳) و (۱۴) معرفی می‌شود.

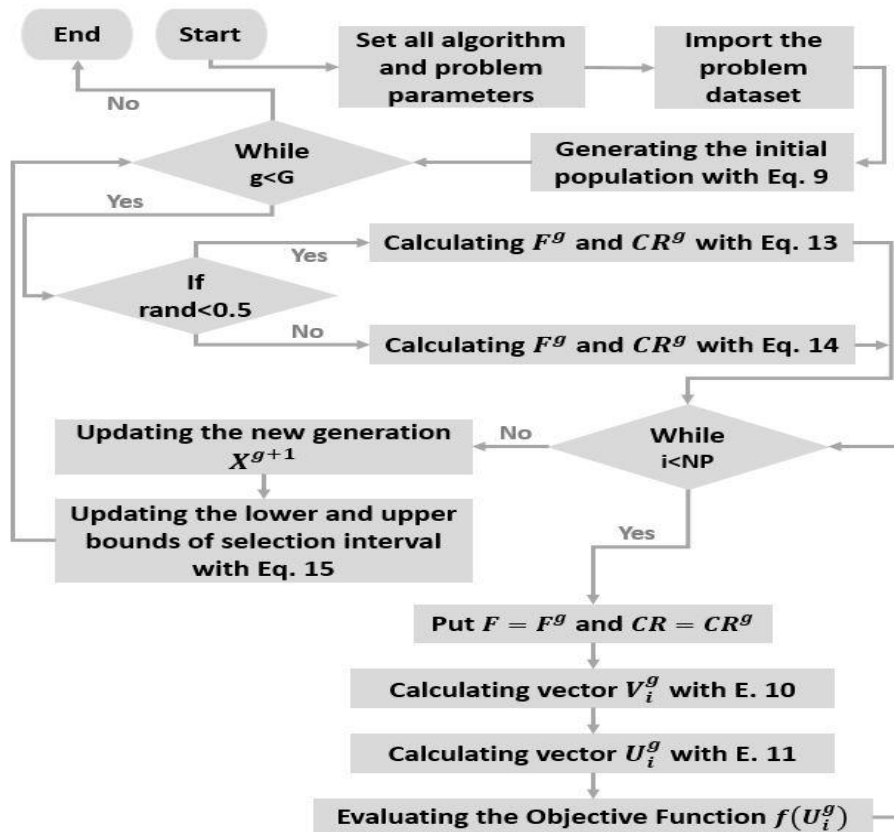
$$\begin{cases} F^g = rand \times (B_{max}^g - B_{min}^g) + B_{min}^g \\ CR^g = 1 - F^g \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} CR^g = rand \times (B_{max}^g - B_{min}^g) + B_{min}^g \\ F^g = 1 - CR^g \end{cases} \quad (14)$$

که در معادلات (۱۳) و (۱۴)، $rand$ یک مقدار تصادفی توزیع‌شده‌ی به‌صورت یکنواخت در بازه $[0, 1]$ است. F^g و CR^g ، به ترتیب فاکتور مقیاس جهش و نرخ تنظیم برش در تکرار g حلقه تکاملی می‌باشند و B_{min}^g و B_{max}^g ، به ترتیب کران پایین و بالای بازه انتخاب مقادیر هستند که مبتنی بر معادله (۱۵) محاسبه می‌گردند.

$$\begin{cases} B_{min}^t = 0.5 + 0.3 * (g/G) \\ B_{max}^t = 0.5 + 0.5 * (g/G) \end{cases} \quad (15)$$

در نهایت، فلوجارت رویکرد پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده و شبه کد ADECDII بدین شرح بیان می‌شود:



شکل (۱): فلوجارت رویکرد پیشنهادی ADECDII

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی کارآمدی ADECDII، قدرتمندی و بهره‌وری آن در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های تکاملی پرکاربرد، اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی با شش الگوریتم شامل بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) (Karaboga and Basturk, 2007)، بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) (Simon, 2008)، تکامل تفاضلی (DE) (Storn and Price, 1997)، الگوریتم ژنتیک (GA) (Holland, 1992)، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) (Atashpaz-Gargari and Lucas, 2007) و بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم (IWO) (Mehrabian and Lucas, 2006) مقایسه می‌شود. مسئله بهینه‌سازی به منظور بهره‌وری بهینه منابع آبی سد بافت با ۱۲۰ متغیر تصمیم‌گیری که از تفکیک دوره‌های ماهانه بین سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۷ جمع‌آوری شده، ارائه می‌گردد. تمامی الگوریتم‌ها در شرایط تصادفی استاندارد بر روی PC

با مشخصات intel core i7-CPU 2.40 GHz و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB پیاده‌سازی می‌شوند. برای هر الگوریتم ۳۰ اجرای مختلف ثبت شده و در هر اجرا، بهترین راه‌حل گزارش می‌گردد. عملکرد الگوریتم‌ها بر اساس نتایج آماری، در پنج وضعیت بهترین، میانگین، میانه، انحراف معیار و بدترین مقادیر خطا تجزیه و تحلیل می‌شوند که از ۳۰ بهترین کسب‌شده بعد از ۳۰ اجرای مختلف برای هر الگوریتم به دست می‌آیند. مقادیر خطا به وضوح نشان می‌دهند که هر الگوریتم در تخصیص مقادیر آب رهاسازی شده از سد به تفکیک ماهیانه نسبت به مقدار تقاضای حقیقی در بخش‌های مختلف، تا چه اندازه‌ای انحراف داشته است. مقدار خطای صفر نشان‌دهنده تخصیص دقیق رهاسازی متناسب با نیاز درخواستی پایین‌دستی است. مقدار خطای کمتر از 10^{-31} به عنوان خطای صفر شناخته می‌شود. در این مطالعه، از آزمون آماری فریدمن (Derrac et al., 2011) در جهت تشخیص تفاوت‌ها بین الگوریتم‌های مقایسه‌شونده، در شرایطی با حداقل n نمونه

و $1/60$ میلیون متر مکعب، به ترتیب، بدترین الگوریتم‌ها در حل مسئله هستند. از مقایسه ADECDII با رویکرد DE نیز به‌وضوح کارآمدی رویکرد پیشنهادی قابل تشخیص است. اگرچه، در مقایسه میانگین زمان اجرا، DE با ثبت مقدار زمان $4/13$ ثانیه در هر اجرا، عملکرد بهتری نسبت به ADECDII و رتبه نخست را در بین همه الگوریتم‌های مقایسه شونده دارد. ADECDII از نظر میانگین زمان اجرا با مقدار زمان $7/15$ ثانیه، دومین بهترین الگوریتم در بین همه الگوریتم‌های مقایسه‌شونده است. بر اساس آزمون فریدمن نیز بهترین امتیاز رتبه‌ای به ADECDII می‌رسد. در این میان، سه الگوریتم DE، BBO و ICA در امتیاز رتبه‌ای آزمون فریدمن نزدیک به یکدیگر هستند. همچنین، دو الگوریتم GA و ABC بدترین امتیاز رتبه‌ای را به ترتیب دریافت می‌کنند. رتبه‌بندی الگوریتم‌ها بر اساس آزمون فریدمن در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری کارآمدی الگوریتم‌ها در تخصیص صحیح مقادیر آب رهاسازی نسبت به تقاضای حقیقی، همچنین، به‌منظور دریافت تعداد شکست‌های الگوریتم‌ها در عدم تخصیص صحیح منابع آبی متناسب با تقاضای کل و علاوه بر این، توانایی الگوریتم‌ها در برگشت به حالت مطلوب به تخصیص صحیح منابع آبی که بعد از هر شکست اتفاق افتاده است، نمودارهای گرافیکی متعددی ترسیم شده‌اند. شکل ۳، تحلیل چهار شاخص اطمینان-پذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری سیستم را با به‌کارگیری هر الگوریتم و بعد از 30 اجرای مختلف، برحسب درصد بیان می‌دارد. بر اساس شکل ۳، الگوریتم ADECDII بهترین قابلیت اطمینان با کارآمدی مطلوب را در بین

(در اینجا 30 اجرای مختلف)، بر اساس مقادیر میانگین خطاها استفاده می‌شود تا رتبه‌بندی الگوریتم‌ها انجام گردد. جزئیات بیشتر آزمون آماری فریدمن در (Derrac et al., 2011) قابل دریافت است.

تنظیم دو پارامتر F و CR در رویکرد پیشنهادی ADECDII مطابق با معادلات (۱۳) و (۱۴) مقداردهی می‌شوند. علاوه بر این، سه پارامتر مشترک بین ADECDII و تمامی الگوریتم‌های مقایسه‌شونده دیگر شامل تعداد تکرار حلقه تکامل الگوریتم (G)، تعداد ارزیابی‌های تابع هدف (NFE) و اندازه جمعیت (NP)، به ترتیب با مقادیر 8000 ، 400000 و 50 تنظیم می‌گردند. مقداردهی دیگر پارامترهای اختصاصی مرتبط با هر الگوریتم مقایسه‌شونده مطابق با مقادیر پیشنهادشده در متن اصلی آن مقالات جایابی می‌شوند.

نتایج عددی به‌دست‌آمده از تابع هدف مسئله بهره‌وری بهینه منابع آبی سد بافت، بعد از 30 اجرای مختلف هر یک از الگوریتم‌های ADECDII، ABC، BBO، DE، GA، ICA و IWO، در جدول ۱ بیان شده است. همچنین، تحلیل نتایج آماری بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از جدول ۱، در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۲، نتایج عددی-آماري را در پنج وضعیت بهترین، میانگین، میانه، انحراف معیار و بدترین مقادیر به‌دست‌آمده بعد از 30 اجرای مختلف هر یک از الگوریتم‌های شرکت‌کننده در رقابت گزارش می‌کند. بر اساس جدول ۲، بهترین عملکرد در ارائه راه‌حلی با کیفیت با مقدار میانگین خطای صفر میلیون متر-مکعب به ADECDII اختصاص می‌یابد. این در حالی است که، دومین بهترین الگوریتم، نمی‌تواند مقدار میانگین خطایی کمتر از $0/37$ میلیون متر مکعب به دست آورد. در این میان، GA و ABC با ثبت مقدار میانگین خطای $0/59$



جدول (۱): نتایج عددی گزارش شده بین الگوریتم‌های مقایسه شونده بعد از ۳۰ اجرای مختلف

الگوریتم‌های مقایسه شونده							شماره اجرا
IWO	ICA	GA	DE	BBO	ABC	ADECDII	
۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۴۰	۱/۵۵	۰/۰۰	۱
۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۳۴	۰/۳۱	۱/۵۵	۰/۰۰	۲
۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۳۲	۱/۸۳	۰/۰۰	۳
۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۶۸	۰/۳۵	۰/۳۵	۱/۵۴	۰/۰۰	۴
۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵۴	۰/۳۰	۰/۳۴	۱/۶۲	۰/۰۰	۵
۰/۴۹	۰/۳۷	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۳۵	۱/۶۸	۰/۰۰	۶
۰/۴۹	۰/۲۶	۰/۷۱	۰/۳۷	۰/۳۴	۱/۶۰	۰/۰۰	۷
۰/۴۹	۰/۳۰	۰/۵۷	۰/۲۸	۰/۳۴	۱/۵۳	۰/۰۰	۸
۰/۴۸	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۱۷	۰/۳۷	۱/۶۵	۰/۰۰	۹
۰/۴۸	۰/۴۱	۰/۷۱	۰/۲۱	۰/۳۸	۱/۵۱	۰/۰۰	۱۰
۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۳۹	۱/۵۷	۰/۰۰	۱۱
۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۱۲	۰/۳۳	۱/۴۲	۰/۰۰	۱۲
۰/۴۹	۰/۲۷	۰/۵۷	۰/۲۶	۰/۳۹	۱/۶۹	۰/۰۰	۱۳
۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۷۱	۰/۶۲	۰/۳۴	۱/۶۶	۰/۰۰	۱۴
۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۱۵	۰/۴۰	۱/۷۱	۰/۰۰	۱۵
۰/۴۹	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۱/۴۱	۰/۰۰	۱۶
۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۱	۱/۵۲	۰/۰۰	۱۷
۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۶۱	۰/۲۲	۰/۳۳	۱/۶۷	۰/۰۰	۱۸
۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۳۱	۰/۳۸	۱/۶۰	۰/۰۰	۱۹
۰/۴۸	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۳۸	۱/۵۸	۰/۰۰	۲۰
۰/۴۹	۰/۳۴	۰/۷۰	۰/۳۱	۰/۴۰	۱/۶۵	۰/۰۰	۲۱
۰/۴۸	۰/۳۴	۰/۶۵	۰/۴۹	۰/۴۰	۱/۴۵	۰/۰۰	۲۲
۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۱/۷۷	۰/۰۰	۲۳
۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۶۸	۰/۱۱	۰/۳۸	۱/۷۴	۰/۰۰	۲۴
۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۳۶	۱/۵۸	۰/۰۰	۲۵
۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۲۸	۰/۴۱	۱/۵۸	۰/۰۰	۲۶
۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۵۹	۰/۵۴	۰/۳۶	۱/۶۳	۰/۰۰	۲۷
۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۵۶	۱/۳۰	۰/۵۰	۱/۶۰	۰/۰۰	۲۸
۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۳۲	۰/۳۴	۱/۵۰	۰/۰۰	۲۹
۰/۴۹	۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۱۵	۰/۳۷	۱/۵۳	۰/۰۰	۳۰

توجه: تمامی اعداد جدول تا با دو رقم اعشار ذکر شده است. مقدار کوچکتر 10^{-31} با مقدار $0/00$ در نظر گرفته شده است.

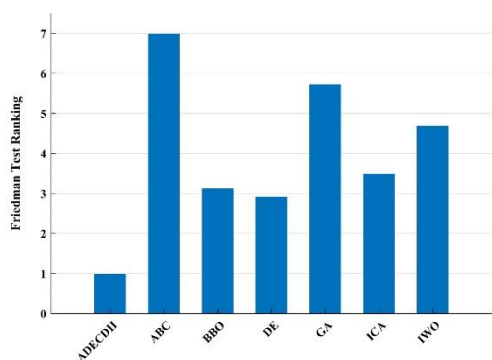
طرفی دیگر، بر اساس شاخص آسیب‌پذیری نیز بهترین عملکرد به الگوریتم ADECDII تعلق می‌گیرد. به‌طوری‌که، ADECDII در طی دوره‌های یک‌ماهه بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ با مقدار میانگین شکست صفر درصد، بالاترین کارایی را در ثبت تعداد شکست

الگوریتم‌های مقایسه شونده به دست می‌آورد. به-طوری‌که، ADECDII با ثبت میانگین اطمینان 100% ، بالاترین عملکرد را در رهاسازی صحیح منابع آبی نسبت به تقاضاهای کل درخواستی، در طی ۱۲۰ دوره گزارش می‌کند. این در حالی است که، بالاترین عملکرد بعدی با میانگین اطمینان $78/5\%$ به ICA اختصاص می‌یابد. از

جدول (۲): تحلیل کارایی بین رویکرد پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌های مقایسه شونده بر روی مسئله بهره‌وری بهینه سد بافت

IWO	ICA	GA	DE	BBO	ABC	ADECDII	
۰/۴۷	۰/۲۶	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۳۱	۱/۴۱	≈۰	بهترین
۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۵۹	۰/۳۷	۰/۳۷	۱/۶۰	≈۰	میانگین
۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۵۸	۰/۳۲	۰/۳۶	۱/۵۹	≈۰	میانه
۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۱۰	≈۰	انحراف معیار
۰/۵۱	۰/۵۶	۰/۸۵	۱/۳۰	۰/۵۰	۱/۸۳	≈۰	بدترین
۱۵/۱۵	۱۸/۰۱	۲۲/۸۹	۴/۱۳	۱۶۶/۴۵	۱۷/۷۸	۷/۱۵	زمان اجرا (ثانیه)
۴/۷۰	۳/۵۰	۵/۷۳	۲/۹۳	۳/۱۳	۷/۰۰	۱/۰۰	رتبه‌بندی آزمون فریدمن

توجه: تمامی اعداد جدول (به‌استثنای دو ردیف آخر) مقدار خطا بین تقاضای حقیقی و آب ره‌اشده از سد نسبت به عدد صفر است.



شکل (۲): رتبه‌بندی الگوریتم‌های بر اساس آزمون آماری فریدمن

نمودارهای میانگین مقادیر ره‌سازی نسبت به تقاضای کل در تفکیک دوره‌های یک‌ماهه بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷، بعد از ۳۰ اجرای مختلف، در شکل ۴-الف و ۴-ب نمایش داده شده است. شکل ۴ به‌وضوح نشان می‌دهد که نمودار میانگین مقادیر ره‌سازی ADECDII بر نقاط تقاضای کل در هر دوره کاملاً منطبق است. در نتیجه، ADECDII با ارائه کمترین کمبودها (صفر یا بسیار نزدیک به صفر $(\leq 10^{-31})$) در هر دوره) در تأمین تقاضاهای پایین‌دستی، بالاترین کیفیت را نسبت به تمام الگوریتم‌های مقایسه شونده به دست می‌آورد. کمترین کمبودها در تأمین تقاضاها برای دیگر الگوریتم‌های مقایسه شونده نیز به ترتیب به الگوریتم‌های BBO، DE، IWO، GA، ABC و ICA اختصاص می‌یابند.

میانگین اختلاف مقادیر ره‌سازی نسبت به تقاضای کل درخواست شده در یک متوسط سالانه، بعد از ۳۰ اجرای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودارهای میله‌ای

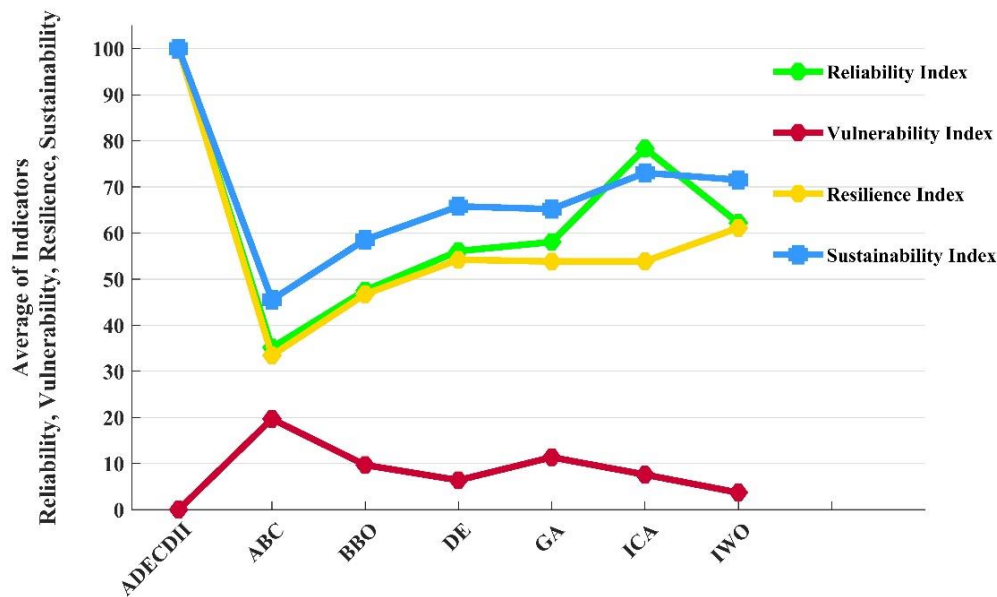
در تخصیص نامناسب ره‌سازی نسبت به تقاضای کل دریافت می‌کند. در این آزمون، IWO، دومین بهترین الگوریتم با مقدار میانگین شکست ۳/۴۷٪ بر اساس شاخص آسیب‌پذیری است و رتبه‌های بعدی، به ترتیب به ICA، DE، BBO، GA و ABC اختصاص می‌یابند. بر اساس شاخص برگشت‌پذیری نیز بهترین الگوریتم با میانگین تاب‌آوری ۱۰۰٪، ADECDII است. در واقع، ADECDII با ثبت میانگین شکست صفر درصد (بدون شکست)، توانسته حالت مطلوبی در تخصیص صحیح منابع آبی در تمام طی ۱۲۰ دوره به دست آورد. در نتیجه، شاخص برگشت‌پذیری بهترین کارآمدی در تاب‌آوری را به ADECDII اختصاص می‌دهد. دومین بهترین الگوریتم بر اساس شاخص برگشت‌پذیری و با مقدار میانگین ۶۱/۱٪، IWO است. همچنین، ABC با ثبت مقدار میانگین ۳۳/۴۶٪ بدترین الگوریتم از نظر شاخص برگشت‌پذیری به شمار می‌رود. در نهایت، بر اساس شاخص پایداری، از مجموع معیارهای عملکردی سیستم (شامل شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری) و در راستای دریافت تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در بین الگوریتم‌های مختلف مقایسه شونده، به‌عنوان روش‌های مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، داریم که: ADECDII با میانگین مقدار پایداری ۱۰۰٪، بهترین الگوریتم در ارائه نتایج مطلوب در برنامه‌ریزی منابع آبی است. همچنین، هر یک از الگوریتم‌های مقایسه شونده ABC، BBO، DE، GA، ICA و IWO بر اساس شاخص پایداری، میانگین مقادیر پایداری ۴۵/۵۴٪، ۵۸/۵۴٪، ۶۵/۷۸٪، ۶۵/۱۸٪، ۷۳/۰۵٪ و ۷۱/۵۳٪ را به ترتیب دریافت می‌کنند.



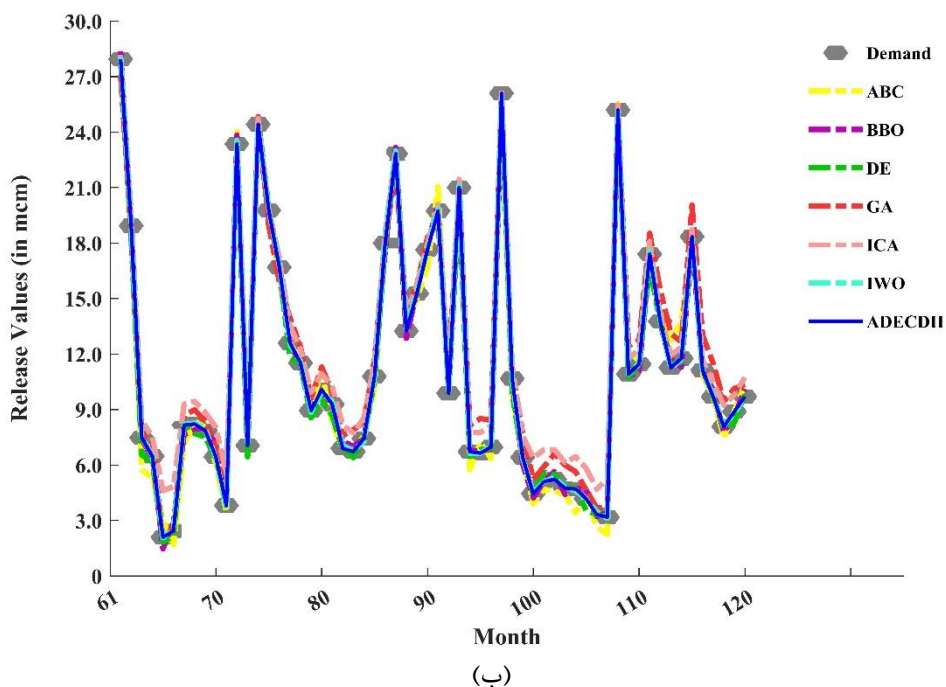
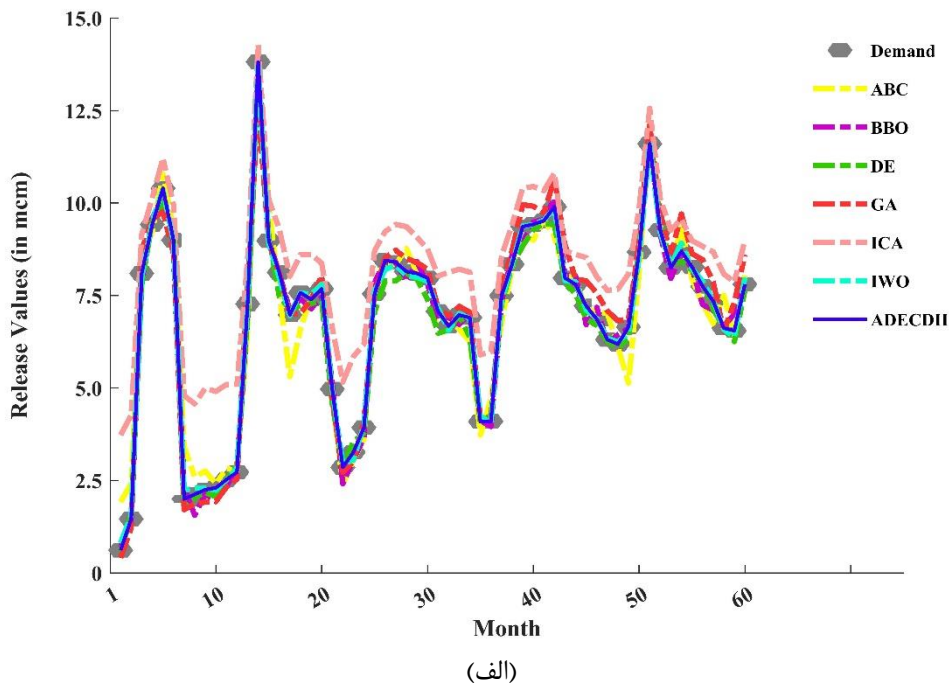
تکاملی قابل مقایسه دیگر ارائه دهد.

در نهایت، به منظور درک فرایند بهینه‌سازی در طی روند حلقه تکاملی الگوریتم‌ها، نمودارهای میانگین نرخ همگرایی برای همه الگوریتم‌های مقایسه شونده در شکل ۶ نمایش داده شده است. شکل ۶، برای هر الگوریتم، نمایش مناسبی از میزان تنوع و اندازه همگرایی بین اعضای جمعیت را در هر تکرار از حلقه تکامل آن الگوریتم نشان می‌دهد. شکل ۶، به‌وضوح بیان می‌دارد که ADECDII در تکرارهای اولیه از روند حلقه تکامل با تنوع بالایی از اعضای جمعیت (با پراکندگی مناسبی در فضای جستجو) مواجه است. از این‌رو، قادر است تا بیشتر فضای جستجو را کاوش کند. سپس، ADECDII با شناسایی

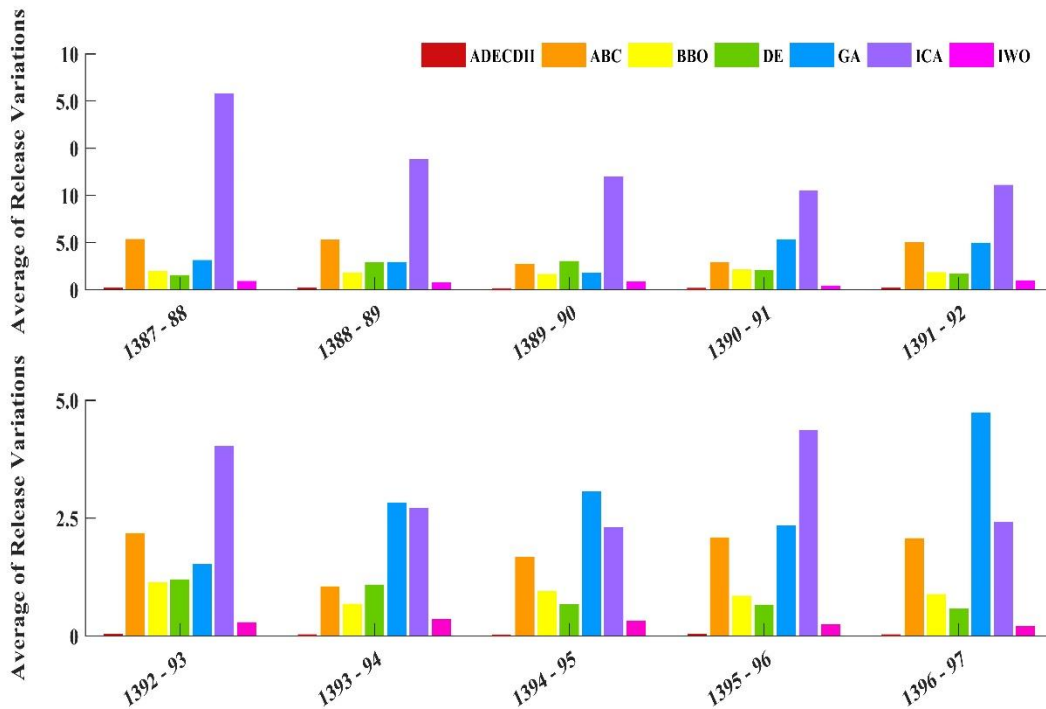
ترسیم‌شده در شکل ۵، بیشترین شدت نقض در مقادیر آب رهاسازی شده نسبت به مقادیر تقاضای کل را به ترتیب به الگوریتم‌های ICA و GA اختصاص می‌یابد. در این آزمون نیز کمترین شدت نقض بین همه الگوریتم‌های مقایسه شونده به الگوریتم ADECDII تعلق می‌گیرد. ADECDII برای تمام سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷، شدت نقض در رهاسازی را بزرگ‌تر از 10^{-15} میلیون مترمکعب گزارش نمی‌کند. از مقایسه ADECDII با الگوریتم DE کلاسیک نیز کارآمدی ADECDII به‌وضوح مشهود است؛ به طوری که، DE هرگز نمی‌تواند شدت نقضی کمتر از $2/6$ میلیون مترمکعب را در یک بازه [۰، ۱۰] به دست آورد. از این‌رو، ADECDII قادر است تا ثبات، پایداری و دقت قابل قبولی در ارائه راه‌حلهایی بسیار باکیفیت‌تر در حل مسائل مهندسی منابع آب، چه نسبت به DE و چه نسبت به دیگر الگوریتم‌های



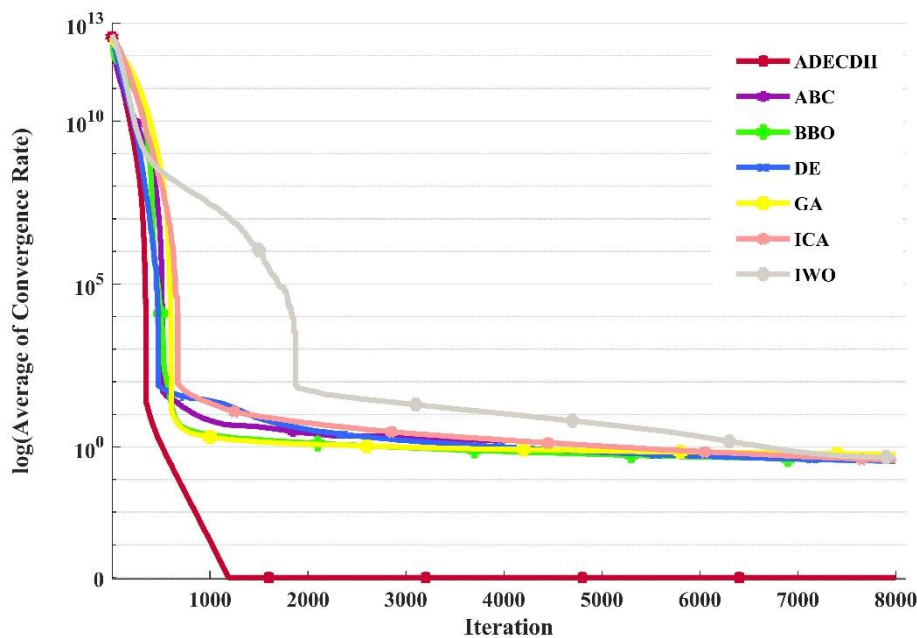
شکل (۳): مقایسه میانگین مقادیر اطمینان، شکست، تاب‌آوری و پایداری بین الگوریتم‌های مقایسه شونده برای حل مسئله بهره‌وری بهینه سد بافت مبتنی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری بعد از ۳۰ اجرای مختلف



شکل (۴): مقایسه میانگین مقادیر رهاسازی منابع آبی نسبت به تقاضای کل درخواست شده در طول دوره مورد مطالعه (الف- بین ماه‌های ۱-۶۰ و (ب- بین ماه‌های ۶۱-۱۲۰) برای الگوریتم‌های ICA, GA, DE, BBO, ABC, ADECDII و IWO



شکل (۵): مقایسه شدت نقض‌ها بر اساس میانگین اختلاف مقادیر آب رهاسازی شده نسبت به تقاضای حقیقی کل در یک متوسط سالانه بین الگوریتم‌های مقایسه شونده بعد از ۳۰ اجرای مختلف



شکل (۶): تحلیل میانگین نرخ همگرایی از ۳۰ اجرای مختلف هر یک الگوریتم‌های مقایسه شونده در حل مسئله بهره‌وری بهینه سد بافت

راه‌حلهایی با کیفیت بالاتر می‌شود. این تعادل مناسب بین تنوع و همگرایی جمعیتی که در نتیجه اقدامات مناسب عملیات جهش و برش، با تنظیم تطبیقی پارامترها مبتنی

نواحی مطلوب، به‌خصوص در تکرارهای انتهایی حلقه تکامل، تمرکز بر همگرایی اعضای جمعیت به ناحیه مطلوب و تأکید بر کاوش آن ناحیه دارد که منجر به ارائه



شاخص آسیب‌پذیری پایین‌ترین نرخ آسیب‌پذیری را با میانگین شکست ۰٪ ثبت کرد. همچنین، بهترین نرخ برگشت‌پذیری با میانگین تاب‌آوری ۱۰۰٪ را بر اساس شاخص برگشت‌پذیری به دست آورد. در این آزمون، ICA با میانگین اطمینان ۷۸/۵٪ و IWO با میانگین شکست ۳/۴۷٪ و میانگین تاب‌آوری ۶۱/۱٪، دومین بهترین الگوریتم‌ها بر اساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری ارزیابی شدند. بر اساس آزمون اختلاف رهاسازی منابع آبی نسبت به تقاضا کل حقیقی در یک متوسط سالانه نیز کمترین شدت نقض به ADECDII تعلق گرفت که نشان‌دهنده کارایی بالای این الگوریتم است. در این آزمون، الگوریتم‌های IWO، DE، BBO، ABC، GA، ICA به ترتیب شدت نقض بیشتری به دست آوردند. زمان اجرای (زمان CPU) برای ADECDII، ۷/۱۵ ثانیه به طول انجامید. در حالی که، تنها الگوریتم DE با زمان اجرای ۴/۱۳ ثانیه بهتر از ADECDII بود. در یک نتیجه‌گیری کلی، ADECDII مبتنی بر تکنیک تنظیم تطبیقی پارامترها، در کنترل سرعت همگرایی و کاوش بهتری از فضای جستجوی مسائل مدیریت مهندسی آب بسیار موفق است. در تحقیقات آینده، ADECDII می‌تواند با موفقیت برای حل مسائل چندهدفه در مدیریت مهندسی منابع آب و سایر مسائل دنیای واقعی به کار رود.

بر تکنیک انتخاب بازه‌های افزایشی پویا است، منجر به قدرتمندی ADECDII در حل مسئله بهره‌وری بهینه منابع آبی سد بافت شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف به حداقل رساندن کمبودهای آب آبیاری، با تمرکز بر تخصیص بهینه منابع آبی ارائه شد. به همین منظور، یک الگوریتم تکامل تفاضلی تطبیقی مبتنی بر انتخاب بازه‌های افزایشی پویا (ADECDII) پیشنهاد گردید و مطالعه موردی سد بافت کرمان، در چارچوب سیستم تک مخزنی پیچیده با یک افق زمانی ده‌ساله بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ مدل‌سازی شد. ADECDII با شش الگوریتم پرکاربرد مقایسه گردید که هر الگوریتم ۳۰ اجرای متفاوت ارائه کرد. از ارزیابی نتایج مقادیر خطا (بین آب آبیاری رهاسازی شده نسبت به تقاضای کل حقیقی)، ADECDII با میانگین خطای صفر (10^{-3}) میلیون مترمکعب بهترین الگوریتم بود. این در حالی است که، DE، BBO، ICA، IWO، GA، ABC به ترتیب با میانگین خطای ۰/۳۷، ۰/۳۷، ۰/۴۹، ۰/۵۹ و ۱/۶ میلیون مترمکعب، کمبودهای واقعی بیشتری در دوره مورد مطالعه گزارش کردند. ADECDII در شاخص اطمینان‌پذیری با میانگین اطمینان ۱۰۰٪، بالاترین نرخ اطمینان و در

منابع

- Abdelkader, E.M., A. Al-Sakkaf, G. Alfalah, and N. Elshaboury. 2022. Hybrid Differential Evolution-Based Regression Tree Model for Predicting Downstream Dam Hazard Potential. *Sustainability* 14:3013.
- Afshar, A., M.J. Emami Skardi, and F. Masoumi. 2015. Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: an imperialist competitive algorithm approach. *Engineering Optimization* 47:1208-1225.
- Ahmadianfar, I., A. Kheyrandish, M. Jamei, and B. Gharabaghi. 2021. Optimizing operating rules for multi-reservoir hydropower generation systems: An adaptive hybrid differential evolution algorithm. *Renewable Energy* 167:774-790.
- Ali, M.Z., N.H. Awad, and P.N. Suganthan. 2015. Multi-population differential evolution with balanced ensemble of mutation strategies for large-scale global optimization. *Applied Soft Computing* 33:304-327.
- Allawi, M.F., O. Jaafar, F.M. Hamzah, M. Ehteram, M.S. Hossain, and A. El-Shafie. 2018. Operating a reservoir system based on the shark machine learning algorithm. *Environmental Earth Sciences* 77:366.

Amirkhani, M., O. Bozorg-Haddad, A. Azarnivand, and H.A. Loáiciga. 2017. Multiobjective optimal operation of gated spillways. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 143:04016078.

Atashpaz-Gargari, E., and C. Lucas. 2007. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In 2007 IEEE congress on evolutionary computation. Ieee, 4661-4667.

Beiramipoor, S., K. Qaderi, H. Haghjuie, and M. Rahimpour. 2018. Reservoir water quality management of Baft dam through selected drainage from the dam outlet locations using the model CE-QUAL-W2. *Irrigation and Water Engineering* 8:237-251.

Bozorg-Haddad, O., I. Karimirad, S. Seifollahi-Aghmiuni, and H.A. Loáiciga. 2015. Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141:04014097.

Chen, D., A.S. Leon, S.P. Engle, C. Fuentes, and Q. Chen. 2017. Offline training for improving online performance of a genetic algorithm based optimization model for hourly multi-reservoir operation. *Environmental modelling & software* 96:46-57.

Cheng, C.-T., W.-C. Wang, D.-M. Xu, and K. Chau. 2008. Optimizing hydropower reservoir operation using hybrid genetic algorithm and chaos. *Water Resources Management* 22:895-909.

Choong, S.-M., A. El-Shafie, and W. Wan Mohtar. 2017. Optimisation of multiple hydropower reservoir operation using artificial bee colony algorithm. *Water resources management* 31:1397-1411.

Derrac, J., S. García, D. Molina, and F. Herrera. 2011. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation* 1:3-18.

Donyaii, A., A. Sarraf, and H. Ahmadi. 2020. A novel approach to supply the water reservoir demand based on a hybrid whale optimization algorithm. *Shock and Vibration* 2020.

Draa, A., S. Bouzoubia, and I. Boukhalfa. 2015. A sinusoidal differential evolution algorithm for numerical optimisation. *Applied Soft Computing* 27:99-126.

Ehteram, M., H. Karami, and S. Farzin. 2018a. Reducing irrigation deficiencies based optimizing model for multi-reservoir systems utilizing spider monkey algorithm. *Water Resources Management* 32:۲۳۱۵-۲۳۳۴.

Ehteram, M., S.-F. Mousavi, H. Karami, S. Farzin, M. Emami, F.B. Othman, Z. Amini, O. Kisi, and A. El-Shafie. 2017. Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. *Advanced Engineering Informatics* 32:287-298.

Ehteram, M., V. P Singh, H. Karami, K. Hosseini, M. Dianatikhah, M. Hossain, C. Ming Fai, and A. El-Shafie. 2018b. Irrigation management based on reservoir operation with an improved weed algorithm. *Water* 10:1267.

Fallah-Mehdipour, E., O.B. Haddad, and M. Mariño. 2012. Real-time operation of reservoir system by genetic programming. *Water resources management* 26:4091-4103.

Fang, G.-h., C.-j. Wu, T. Liao, X.-f. Huang, and B. Qu. 2020. A two-layer improved invasive weed optimization algorithm for optimal operation of cascade reservoirs. *Water Supply* 20:2311-2323.

Haddad, O.B., S.-M. Hosseini-Moghari, and H.A. Loáiciga. 2016. Biogeography-based optimization algorithm for optimal operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142:04015034.

Hashimoto, T., J.R. Stedinger, and D.P. Loucks. 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research* 18:14-20.

Holland, J.H. 1992. Genetic algorithms. *Scientific american* 267:66-73.



Hossain, M.S., and A. El-Shafie. 2013. Application of artificial bee colony (ABC) algorithm in search of optimal release of Aswan High Dam. In *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 012001.

Karaboga, D., and B. Basturk. 2007. Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. In *International fuzzy systems association world congress*. Springer, 789-798.

Khorashadizadeh, M., G. Azizyan, S. Hashemi Monfared, A. Akbarpour, and A. Shabani. 2020. A timetable and spatial planning for pollutant entrance to the river. *International Journal of Environmental Science and Technology* 17:4171-4188.

Khorashadizadeh, M., G. Azizyan, S. Hashemi Monfared, A. Akbarpour, and A. Shabani. 2022. Presenting a two-objective model to manage spatiotemporal pollution distribution in river with consideration of consumer demand. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19:4459-4480.

Khorashadizadeh, M., S.A. Hashemimonfared, A. Akbarpour, and M. Pourreza-bilondi. 2016. Uncertainty assessment of pollution transport model using GLUE method. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 10:284-293.

Mansouri, A., B. Aminnejad, and H. Ahmadi. 2018. Introducing modified version of penguins search optimization algorithm (PeSOA) and its application in optimal operation of reservoir systems. *Water Science and Technology: Water Supply* 18:1484-1496.

Mehrabian, A.R., and C. Lucas. 2006. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization. *Ecological informatics* 1:355-366.

Mohammadrezapour, O., I. Yoosefdoost, and M. Ebrahimi. 2019. Cuckoo optimization algorithm in optimal water allocation and crop planning under various weather conditions (case study: Qazvin plain, Iran). *Neural Computing and Applications* 31:1879-1892.

Pant, M. 2022. *Differential Evolution for Water Management Problems*. In *Differential Evolution: From Theory to Practice*. Springer, 197-214.

Qaderi, K., S. Akbarifard, M.R. Madadi, and B. Bakhtiari. 2018. Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. Thomas Telford Ltd, 179-190.

Rao, S.S. 2019. *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons ,

Raso, L., P.-O. Malaterre, and J.-C. Bader. 2017. Effective streamflow process modeling for optimal reservoir operation using stochastic dual dynamic programming. *Journal of water resources planning and management* 143:04017003.

Rath, A., and P.C. Swain. 2018. Water allocation from Hirakud Dam, Odisha, India for irrigation and power generation using optimization techniques. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 1-15.

Safavi, H., and M. Gol Mohammadi. 2016. Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-water resources research* 12:68-83.

Sandoval-Solis, S., D. McKinney, and D.P. Loucks. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of water resources planning and management* 137:381-390.

Sedighkia, M., B. Datta, and A. Abdoli. 2021. Optimizing reservoir operation to avoid downstream physical habitat loss using coupled ANFIS-metaheuristic model. *Earth Science Informatics* 14:2203-2220.

Simon, D. 2008. Biogeography-based optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation* 12:702-713.

Srinivasan, K., and K. Kumar. 2018. Multi-objective simulation-optimization model for long-term reservoir operation using piecewise linear hedging rule. *Water resources management* 32:1901-1911.



Storn, R., and K. Price. 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization* 11:341-359.

Thongwan, T., A. Kangrang, and H. Prasanchum. 2019. Multi-objective future rule curves using conditional tabu search algorithm and conditional genetic algorithm for reservoir operation. *Heliyon* 5:e02401.

Yang, S., D. Yang, J. Chen, and B. Zhao. 2019. Real-time reservoir operation using recurrent neural networks and inflow forecast from a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* 579:124229.



Application of Adaptive Dynamic Differential Evolution Algorithm in Optimal Allocation of Water Resources (Case Study: Kerman Baft Dam)

Hossein Mohammadi¹, Zahra Ghaffari Moghadam²

Abstract

Optimal use of dam's water resources is a serious challenge in water resources management and engineering, due to continuous droughts and water shortages. Therefore, in order to comprehensively management in the used amount of dam's water resources, it is essential to establish a control mechanism in the release of water resources. In this study, an improved evolutionary algorithm entitled "Adaptive Differential Evolution by Choosing of Dynamic incremental intervals (ADECDII)" was proposed to optimize the single-reservoir water system. Efficiency of the ADECDII approach was to use the dynamic incremental interval selection scheme for parameters adjustment of the classical differential evolution (DE). Problem modeling was defined as a problem of minimization with the objective function of error values between real demand and released water, with one-month time periods between 2008-2018 years, on Baft Dam in Kerman province. ADECDII performance evaluation was compared with six advanced algorithms. Based on the statistical results, lowest average of the dam water shortages with mean error of zero ($< 10^{-31}$) MCM (Million Cubic Meters) was recorded for ADECDII, which proved the efficiency of the proposed approach in the optimal allocation of released water values. This is while, other comparable algorithms could not report a real shortage of less than 0.37 MCM. The average of runtime for ADECDII was 7.15 sec, which was three seconds longer than DE runtime. Also, ADECDII in the tests of reliability index, vulnerability index, resilience index, sustainability index, difference absolute error values between released water values and total demand in an annual average, and convergence rate clearly showed a higher performance in compared to other comparable algorithms.

Keywords: Optimal efficiency of water resources, Single-reservoir system, Differential Evolution, Dynamic adaptive scheme of parameters, Water management

¹ Master of Science, Department of Computer Science, Faculty of Mathematics - Statistics and Computer Science, University of Sistan and Baluchestan, Iran
Email: Mohammadi_cs94@pgs.usb.ac.ir

² Assistant Professor Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of zabol, Zabol, Iran.
(Corresponding Author)
Email: zahraghafari@uoz.ac.ir