

A comparison of modern metaheuristic algorithms in the operation of multi-purpose dams

Hossein Azargoon¹, Seyed Reza Hashemi², Abbas Khashei Siuki^{3*} 

¹MSc Graduated of Water Resources Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

²Associate Professor, Department of Sciences and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

³Professor, Department of Sciences and Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 4 March
2024

Received in revised
form 30 May 2024

Accepted 9 June
2024

Published online 15
Aguset 2024

Keywords:

Optimization, The
objective function,
Pareto Front,
Release.

ABSTRACT

Objective: The optimal operation of a multi-purpose reservoir is one of the complex and non-linear problems in multi-objective optimization. The limit of water resources and its non-uniform distribution have made the optimal management and utilization of water resources.

Methods: Metaheuristic algorithms are suitable optimization methods, so in this study, water cycle algorithms, The gray wolf algorithms, and a combination of these two algorithms were studied in single-objective and multi-objective fashion and compared to find the optimized operation model of Latian and Dez dams. After examining the effectiveness of the single-objective mode of water cycle algorithms, gray wolf, and combination mode using 8 standard benchmark functions and these algorithms were measured by ZDT functions, they were used to solve the problem of optimal operation in the Latian reservoir system. Also, the performance of the algorithms was evaluated using the performance indicators of the reservoir, and these algorithms were assessed using ZDT functions. After validation, the operation of the multi-operation model of the Dez Dam was developed according to the above-mentioned algorithms.

Results: The results demonstrated that the hybrid algorithm presented better results in almost all functions of both the water cycle algorithm and the gray wolf. According to the results obtained from the operation model of Latian Dam, the hybrid algorithm with the value of the objective function of 0.011, provides 98.57% of the downstream needs.

Conclusions: The total amount of deficiencies is 1.43% along with the stability index of 97% and presents the convergence and release curve.

It performed better than the two water cycle algorithms and the gray wolf.

*Corresponding Author Email: Abbaskhashei@birjand.ac.ir, Phone: 09153327478

Cite this article: Azargoon, H., Hashemi, S.R., & Khashei Siuki, A. (2024). A comparison of modern metaheuristic algorithms in the operation of multi-purpose dams, *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, (),

. <http://doi.org/>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.451221.1068>

Publisher: Gonbad Kavous University.



مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری نوین در بهره‌برداری از سدهای چندمنظوره

حسین آذرگون^۱، سیدرضا هاشمی^۲، عباس خاشعی سیوکی^{۳*}

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۳ استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	هدف: بهره‌برداری بهینه از مخازن چندمنظوره یکی از مسائل پیچیده و غیرخطی، در بهینه‌سازی چندهدفه است. محدودیت منابع آب و توزیع غیریکتواخت آن، لزوم مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع را امکان‌ناپذیر ساخته است.
مقاله پژوهشی	مواد و روش‌ها: الگوریتم‌های فراابتکاری ابزار بهینه‌سازی مناسبی هستند؛ لذا در این تحقیق الگوریتم‌های چرخه آب، گرگ خاکستری و ترکیب این دو در حالت‌های تک‌هدفه و چندهدفه، به‌منظور بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری سدهای لتیان و دز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. در حالت تک‌هدفه الگوریتم‌های چرخه آب، گرگ خاکستری و ترکیبی، پس از بررسی کارآمدی آنها توسط ۸ تابع محک استاندارد، در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزن لتیان استفاده شد. همچنین عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن بررسی و در حالت بهره‌برداری چندهدفه ابتدا الگوریتم‌های چندهدفه چرخه آب، گرگ خاکستری و ترکیبی توسط توابع ZDT مورد سنجش قرار گرفت و پس از صحت‌سنجی مدل بهره‌برداری چندهدفه سد دز بر اساس الگوریتم‌های فوق‌الذکر توسعه داده شد.
تاریخ دریافت:	نتایج: نتایج نشان داد که الگوریتم ترکیبی، تقریباً در تمامی توابع از هر دو الگوریتم چرخه آب و گرگ خاکستری نتایج بهتری ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل بهره‌برداری سد لتیان الگوریتم ترکیبی با مقدار تابع هدف ۰/۰۱۱، ۹۸/۵۷ درصد از نیازهای پایین‌دست را تأمین می‌کند.
۱۴۰۲/۱۲/۱۴	نتیجه‌گیری: میزان کل کمبودها ۱/۴۳ درصد و با شاخص پایداری ۹۷٪ و ارائه منحنی همگرایی و رهاسازی مناسب‌تر نسبت به دو الگوریتم چرخه آب و گرگ خاکستری عملکرد بهتری داشته است.
تاریخ بازنگری:	بهرینه‌سازی، تابع هدف، جبهه پارتو، مخزن سد.
۱۴۰۳/۰۳/۱۰	
تاریخ پذیرش:	
۱۴۰۳/۰۳/۲۰	
تاریخ انتشار:	
۱۴۰۳/۰۵/۲۵	

* ایمیل نویسنده مسئول: Abbaskhashei@birjand.ac.ir

استناد: آذرگون، حسین؛ هاشمی، سیدرضا؛ و خاشعی سیوکی، عباس. (۱۴۰۳). مقایسه الگوریتم‌های فرا ابتکاری نوین در بهره‌برداری از سدهای چند

منظوره، *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.451221.1068>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

مقدمه

امروزه منابع آب، در زمره گنجینه‌های عظیم بشری به‌شمار می‌آیند که لازمه بهره‌برداری از آن‌ها با توجه به نیازهای پرشمار، کمبودها و محدودیت‌های موجود این منابع، اعمال قوانین و مدیریت بهینه بهره‌برداری است. یکی از راه‌کارهای مقابله با مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب و توزیع زمانی و مکانی نامناسب آن، استفاده بهینه از مخازن است. ساخت سدهای بزرگ در برخی کشورهای جهان، بالا بردن بازده و کارایی این سیستم‌های مخزنی و حداکثر نمودن منافع ناشی از آن‌ها از مهم‌ترین مباحث مورد بررسی سال‌های اخیر است (لابادیه، ۲۰۰۴). به‌طور کلی بهینه‌سازی زمانی مطرح می‌شود که از بین منابع موجود (که می‌توانند مواردی مانند آب، زمین، منابع مالی، نیروی کار و یا غیره باشند)، یکی و یا تعدادی از آن‌ها عامل محدودکننده توسعه باشند. واضح است که در صورت وجود فراوانی از نظر تمام منابع مورد نیاز برای توسعه، اهمیت استفاده بهینه از منابع چندان مطرح نمی‌شود؛ بنابراین بهینه‌سازی اغلب زمانی مطرح می‌شود که یا استفاده از یک یا چند منبع به‌طور آزادانه و بی‌دغدغه ممکن نباشد و یا انجام اضافه برداشت از یک مقدار خاص سبب بروز آسیب‌های جدی بر سامانه آبی و یا کاهش بازده اقتصادی طرح گردد (بزرگ حداد، ۱۳۹۳، میثاقی و همکاران، ۱۳۹۹). برای تعریف سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن که رهاسازی مطلوب آب مخزن را به‌عنوان تابعی از حجم ذخیره اولیه و جریان‌های ورودی در هر دوره مشخص می‌کند، می‌توان از مدل‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده نمود. بیشتر روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی هستند که از این تکنیک‌ها برای پیدا کردن بهترین پاسخ‌های امکان‌پذیر بر اساس عملکرد تابع هدف و تعداد زیاد قیود فیزیکی استفاده می‌کنند (لابادیه، ۲۰۰۴). بسیاری از مسائل جهان حقیقی را می‌توان به‌صورت مسائل بهینه‌سازی با اهداف چندگانه در نظر گرفت که شامل اهدافی مغایر، در فضای جست‌وجوی بسیار بزرگ و پیچیده هستند (رضایی استخرویه و همکاران، ۱۴۰۱؛ هانگ و همکاران، ۲۰۰۴). در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه (SOP) راه‌حل بهینه معمولاً به وضوح قابل تعریف است؛ اما در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه (MOP)، ممکن است برای یک هدف، ممکن است که یک راه‌حل، بهترین پاسخ باشد؛ در حالی که برای اهداف دیگر جواب مناسبی نباشد؛ بنابراین در MOP به‌جای یک جواب بهینه واحد، مجموعه‌ای از جواب‌های همگرا وجود دارد (زیتلر، ۱۹۹۹). البته تعیین مجموعه بهینه پارتو به‌صورت کامل امری غیرممکن است. برای بسیاری از مسائل، به‌خصوص مسائل بهینه‌سازی ترکیبی، یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو از لحاظ محاسباتی ناممکن است؛ بنابراین، یک راه‌حل شدنی برای بهینه‌سازی مسائل چندهدفه تخمین مجموعه راه حل بهینه است (کوناک و همکاران، ۲۰۰۶). مدل کردن ریاضی مسائل بهینه‌سازی نیازمند تعریف تک‌تک اهداف و روابط بین آن‌ها در سیستم و همچنین تعریف قیود مسأله و در نهایت انتخاب جواب بهینه است و در مسائلی که ماهیت غیرخطی و پیچیده‌ای دارند، یافتن جواب‌های بهینه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی معمولی و ریاضی مشکل و یا در برخی موارد غیرممکن است. از این روی، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه برای حل غیرخطی که حل آن‌ها با استفاده از روش‌های معمولی و تحلیلی ممکن نیست، اجتناب‌ناپذیر است (اینانلو، ۱۳۹۰؛ شهرکی و همکاران، ۱۳۹۸).

الگوریتم‌ها، به‌عنوان روش‌های محاسباتی برای حل مسائل بهینه‌سازی، دارای مزایا و معایبی متعدد هستند. از جمله مزایا می‌توان به قابلیت پیچیدگی محاسباتی کمتر، سرعت بالا در پیدا کردن راه‌حل‌ها، و قابلیت اعمال به‌صورت خودکار اشاره کرد. در تحقیقات مرتبط با بهره‌برداری از منابع آب و بهینه‌سازی مخازن، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه اهمیت زیادی دارد (بنی‌اسدی مقدم و همکاران، ۱۴۰۱). این الگوریتم‌ها به دلیل قابلیتشان در حل مسائل پیچیده و چندگانه،

مانند مسائل بهینه‌سازی مخازن آب، که اغلب دارای فضای جست‌وجوی بزرگ و پیچیده هستند، بسیار مؤثر هستند. از طرف دیگر، با توجه به ماهیت غیرخطی و پیچیده بسیاری از این مسائل، الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه به‌عنوان روشی مناسب برای یافتن راه‌حل‌های بهینه و مجموعه‌ای از جواب‌ها که در مصالحه با یکدیگرند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو، انتخاب الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده و غیرخطی، مانند مسائل بهینه‌سازی مخازن آب، ضروری و اساسی است (دنیاپی و همکاران، ۱۳۹۹).

در سال‌های اخیر استفاده از تحلیل‌های چندهدفه در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. قادری و همکاران (۱۳۹۲) به‌منظور بهره‌برداری از مخزن سد درودزن فارس، یک مدل کامپیوتری رایانه‌ای بر مبنای الگوریتم چندهدفه TV-MOPSO توسعه دادند. نتایج عملکرد الگوریتم پیشنهادی ایشان با دو الگوریتم NSGA-II و SPEA-II که از الگوریتم‌های توانا در حل مسائل چندهدفه هستند، مقایسه گردید. عملکرد این مدل توسعه داده شده در سناریوهای مختلف بررسی شده است و نتایج حاکی از عملکرد بالای مدل TV-MOPSO در مقایسه با سایر مدل‌ها بوده است.

جعفرزاده و خاشعی سیوکی (۱۳۹۴) در تحقیقی از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به‌منظور بهینه‌سازی سیستم مدیریت مخزن سد لتیان استفاده نمودند. مقدار تابع هدف و زمان پس از ۱۰ مرتبه اجرای برنامه به‌ترتیب به اعداد ۳۰/۱۱۶ و ۳۵۱/۰۹ ثانیه رسید. و نتایج گویای قدرت بالای الگوریتم در پیدا کردن جواب‌های بهینه حکایت داشت. ابراهیم‌پور و کرامتی (۱۳۹۵) به بررسی عملکرد قواعد بهره‌برداری بهینه خطی و غیرخطی از مخزن کارون ۴ با هدف برقایی با دو رویکرد وابسته به پیش‌بینی و مستقل از پیش‌بینی جریان پرداختند. بدین‌منظور بهره‌برداری از مخزن کارون ۴ برای یک دوره ۵ ساله مربوط به سال‌های آبی ۷۶-۷۵ تا ۸۰-۷۹ با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد قواعد غیرخطی نسبت به خطی عملکرد بهتری را داشته‌اند. افشار و همکاران (۲۰۰۹) دو مکانیسم جهش برای برقراری تعادل بین مشخصه‌های اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم PSO ارائه کرد که باعث بهبود عملکرد الگوریتم PSO در مسئله بهره‌برداری بهینه تک‌هدفه از مخزن سد دز طی دوره‌های ۶۰ و ۱۲۰ ماهه شد. یک مدل جریان کلی از آب و رسوب را برای پیش‌بینی حرکت رسوب در مخزن سانمنگزی^۱ واقع در (چین) توسعه داده شد. سپس با توجه به جریان رسوب پیش‌بینی شده توسط مدل، یک برنامه بهینه برای مخزن با توجه به خروج رسوبات ارائه گردید (وان و همکاران، ۲۰۱۰).

افشار و مطاعی (۲۰۱۱) با استفاده از الگوریتم انفجار بزرگ-انهدام بزرگ (BB-BC) به بهره‌برداری بهینه از مخزن دز با اهداف تأمین آب و تولید انرژی برق‌آبی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کارایی الگوریتم مورد بررسی مذکور در حل مسأله بهره‌برداری از مخزن نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی بوده است. در تحقیقی طبری و سلطانی (۲۰۱۳) الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب نخبه‌گرا (NSGA-II) برای بیشینه کردن اطمینان‌پذیری سامانه و همچنین کمینه کردن هزینه‌های ناشی از تأمین آب، احیای آبخوان و غیره توسعه دادند. همچنین، الگوریتم ژنتیک متوالی (SGA) به‌منظور مقایسه با NSGA-II به کار گرفتند. نتایج ایشان نشان داد مدل‌های NSGA-II در مقایسه با مدل بهینه‌سازی SGA می‌توانند به‌طور شایان توجه بار محاسبه را کم کنند. منحنی تقابل به‌دست‌آمده نشان داد افزایش کم در اطمینان‌پذیری به هزینه‌های بیشتر سامانه منجر شده است. سونالیا و سوریا نارایانا (۲۰۱۳) در مطالعه دیگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از مخزن یوکای (در هند) پرداختند. نتایج

^۱ Sanmenxia

نشان داد که GA می‌تواند به‌طور کامل نیازهای پایین‌دست آبیاری را تأمین کند و رهاسازی را به حداقل برساند که منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در آب می‌شود. بشیری اطرابی و همکاران (۲۰۱۵) کاربرد الگوریتم جست‌وجوی هارمونی را در بهره‌برداری بهینه از مخزن نرماب مطالعه کردند و نتایج را با روش بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل و روش برنامه‌ریزی غیرخطی مقایسه نمودند. نتایج ایشان نشان داد، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی، برای بهینه کردن مقدار تابع هدف نتایج رضایت‌بخشی در سرعت همگرایی نسبت به سایر روش‌ها دارا است. در این تحقیق ابتدا با توجه به منطقه مورد مطالعه و شرایط موجود حاکم بر مخزن سد و اهداف و محدودیت‌های خاص مخزن، داده‌های در دسترس، بالا بودن تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و قیود مسأله سعی شده است با استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه چرخه آب (MOWCA) و گرگ‌خاکستری (MOGWO) برای مخزن چندهدفه، قوانین بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با استفاده بهتر از منابع موجود استخراج گردد؛ لذا اهداف این تحقیق عبارتند از کاربرد الگوریتم‌های چندهدفه بهینه‌ساز چرخه آب و گرگ‌خاکستری در بهینه‌سازی عملکرد سدهای چندمنظوره و مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم چندهدفه چرخه آب با نتایج حاصل از الگوریتم چندهدفه گرگ‌خاکستری.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۶۹۸۰۰ کیلومتر مربع و با متوسط جریان آب سالانه به میزان ۳۵۰ میلیون مترمکعب در استان تهران و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شرقی تهران و ۵ کیلومتری بخش جاجرود قرار دارد. نیروگاه کلان در فاصله ۲۰ کیلومتری در منطقه کلان، بالادست سد لتیان احداث گردیده است. از جمله اهداف احداث این سد تأمین آب شرب تهران به میزان ۲۹۰ میلیون مترمکعب از طریق تونل ۵/۹ کیلومتری به تصفیه‌خانه تهران پارس، تأمین آب زراعی دشت ورامین به میزان متوسط ۱۶۰ میلیون مترمکعب و همچنین تولید متوسط سالانه ۷۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق-آبی برای تأمین برق شبکه سراسری است. جدول (۱) مشخصات سد لتیان را نشان می‌دهد. در ادامه توسعه منابع آب شرب برای مصرف روز افزون تهران بزرگ، از سال ۱۳۶۷ نیز سالانه به‌طور متوسط ۱۴۰ میلیون مترمکعب آب از سد لار، از طریق تونل انتقال لار-کلان به طول ۲۰ کیلومتر به نیروگاه کلان و از آنجا به مخزن سد لتیان انتقال داده شده است که این توسعه باعث بالا رفتن حجم آب قابل تنظیم سد لتیان به میزان ۴۱۰ میلیون مترمکعب شده است. حجم حداکثر و حداقل آن به ترتیب برابر ۸۲/۴۵ و ۴/۸۵ میلیون مترمکعب است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سد لتیان

طول تاج	۴۵۰ متر
عرض تاج	۹ متر
عرض در کف رودخانه	۹۹ متر
ارتفاع از کف رودخانه	۸۰ متر
ارتفاع از پی	۱۰۷ متر
حجم مخزن در تراز حداکثر	۸۲/۴۵ میلیون مترمکعب
حجم مخزن در تراز حداقل	۴/۴۸ میلیون مترمکعب
مجموع ظرفیت دریاچه‌های تخلیه آب	۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه

سد دز بلندترین سد ایران و در زمان ساخت نیز مرتفع‌ترین سد مخزنی در خاورمیانه بوده و بر روی رودخانه دز در استان خوزستان، جنوب غربی ایران ساخته شده است. محل سد در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان دزفول قرار دارد. رودخانه دز که از ارتفاعات غربی زاگرس (کوه‌های بختیاری) سرچشمه می‌گیرد، از نظر میزان آبدهی دومین رودخانه ایران محسوب می‌شود و در ۴۵ کیلومتری شمال اهواز به رودخانه کارون می‌پیوندد. سد دز از نوع بتنی دو قوسی است که ارتفاع آن از پی ۲۰۳ متر و از کف رودخانه ۱۹۰ متر است. عرض بدنه در پی ۲۷ متر و در تاج ۴/۵ متر، طول تاج ۲۱۲ متر و رقوم تاج سد ۳۵۴ متر از سطح دریا است. سطح دریاچه در این رقوم به ۶۵ کیلومتر مربع می‌رسد (جدول ۲). این سد یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی اراضی حاصل‌خیز خوزستان و تولیدکننده انرژی برقابی در کشور است. هدف اصلی از احداث سد دز تأمین نیروی لازم برای تولید برق، کنترل سیلاب‌ها و تنظیم آب برای مصارف آبیاری است. آب مصرفی برای تولید انرژی برقابی می‌تواند پس از عبور از توربین‌های سد برای مصارف دیگر مورد استفاده قرار گیرد. آب خروجی از سد دز علاوه بر نیاز توربین‌های تولید انرژی برای مواردی از قبیل: تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، آب مورد نیاز مراکز صنعتی و حداقل آب برای حفظ محیط زیست رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سد دز

نوع سد	بتنی دو قوسی جدار نازک
ارتفاع سد	۲۰۳ متر
ارتفاع تاج سد از سطح دریا	۳۵۴ متر
ارتفاع پی سد از سطح دریا	۱۵۱ متر
طول تاج سد	۲۱۲ متر
ضخامت بدنه سد در بالا (عرض در تاج)	۵/۴ متر
ضخامت بدنه سد در پی (عرض در پی)	۲۷/۵ متر
ارتفاع دریچه‌های آبیاری از سطح دریا	۲۲۲/۷ متر
ارتفاع دریچه‌ها در بدنه سد	۷۱ متر
آغاز بهره‌برداری	اسفندماه ۱۳۴۱
حداکثر ارتفاع سطح دریاچه	۳۵۲ متر از سطح دریا
حداقل ارتفاع سطح آب مؤثر در تولید	۲۹۰ متر از سطح دریا
حداکثر ارتفاع سطح قابل مهار	۳۵۲ متر از سطح دریا
حجم دریاچه در حداکثر ارتفاع	۳/۳ میلیارد مترمکعب
طول دریاچه	۶۵ کیلومتر

الگوریتم بهینه‌ساز تک‌هدفه گرگ خاکستری

در این الگوریتم، روش شکار و سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری به‌منظور طراحی GWO و انجام بهینه‌سازی، به‌صورت ریاضی مدل شده است. الگوریتم GWO توسط میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد شد. رهبری اجتماعی و روش شکار گرگ

خاکستری الهام بخش اصلی این الگوریتم بودند. به منظور مدل سازی ریاضی سلسله مراتب اجتماعی از گرگها در هنگام طراحی GWO، راه حل اصلاح به عنوان آلفا (α) گرگ نظر گرفته شود. در نتیجه از بین بهترین راه حلها، دومین و سومین راه حل، به ترتیب گرگهای بتا (β) و دلتا (δ) نامیده شده اند. بقیه راه حل نامزد گرگهای امگا (ω) فرض می شوند. در الگوریتم GWO شکار (بهینه سازی) است که توسط α ، β و δ هدایت گردیده است. گرگهای ω در جست و جو برای بهینه کلی این سه گرگ را دنبال می کنند. معادله های مربوط به این روش در میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شد. به منظور شبیه سازی ریاضی رفتار شکار گرگهای خاکستری، فرض می کنیم می شود آلفا (بهترین راه حل موجود)، بتا و دلتا در مورد مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند؛ بنابراین سه تا از بهترین راه حل های به دست آمده را ذخیره کرده و دیگر عوامل جست و جو (از جمله گرگهای امگا) را وادار می کنند تا موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین عوامل جست و جو به روزرسانی نمایند. گرگهای خاکستری زمانی که شکار متوقف می شود، به آن حمله کرده و شکار را به پایان می رسانند. با توجه به عملگرهایی که تاکنون ارائه شد، الگوریتم GWO به عوامل جست و جوی خود اجازه می دهد موقعیت خود را بر اساس موقعیت آلفا، بتا و دلتا به روزرسانی کرده و به طعمه حمله کنند. با این حال الگوریتم GWO ممکن است در معرض گیر افتادن در حداقل های محلی باشد، بنابراین نیاز به عملگرهای برای جلوگیری از گیر کردن در حداقل های محلی است. اگر چه مکانیسم محاصره پیشنهاد شده تا حدی مکانیسم شناسایی را نیز نشان می دهد، اما GWO به عملگرهای بیشتری برای ایجاد خاصیت اکتشاف نیاز دارد.

الگوریتم ترکیبی تک هدفه

در روش الگوریتم ترکیبی برای شروع بهینه سازی، یک جمعیت اولیه بر اساس الگوریتم چرخه آب تولید شده و مقدار تابع هدف برای هر یک از نهرها محاسبه می گردد. در ادامه بر اساس مقدار تابع هدف، بهترین اعضای جمعیت به عنوان دریا و رودخانهها انتخاب می شوند. همچنین باقی مانده اعضای جمعیت به عنوان نهر انتخاب شده و به دریا و رودخانهها تخصیص داده می شوند. سپس الگوریتم وارد حلقه اصلی می شود. هر تکرار با حرکت نهرها به سمت رودخانهها و از رودخانهها به سمت دریا شروع می شود. نهرها در جهات مختلف به سمت رودخانهها و رودخانهها به سمت دریا جریان دارند که به الگوریتم اجازه جست و جوی بهتر فضای هدف را می دهد. به منظور اکتشاف اولیه قابلیت جست و جو برای طعمه (شناسایی) مورد استفاده قرار گرفته است. عوامل جست و جو با توجه به موقعیت آلفا، بتا و دلتا به جست و جو می پردازند. آنها برای جست و جوی شکار از یکدیگر فاصله گرفته، برای حمله به آن به یکدیگر نزدیک شده، همکاری می کنند. این روال، فرآیند شناسایی را نشان می دهد و به عوامل جست و جو اجازه می دهد تا عمل جست و جو را به طور سراسری انجام دهد. به علاوه عملگرهای تصادفی در مرحله اکتشاف اولیه برای طعمه وزن های تصادفی را فراهم می کنند که در بیشتر نشان دادن رفتار تصادفی در طول بهینه سازی و به تبع آن اکتشاف بهتر و اجتناب از گیر افتادن در بهینه محلی کمک می کنند. در مرحله بعدی آلفا، بتا، دلتا و عوامل جست و جو به دریا، رودخانهها و نهرها تبدیل می گردند و شرط تبخیر به عنوان اکتشاف ثانویه بر روی آنها اعمال می گردد. در صورت تحقق شرط تبخیر فرآیند بارش صورت می گیرد که موجب شکل گیری نهرهای جدید در مکان های مختلف می شود. در واقع فرآیند تبخیر به عنوان اکتشاف ثانویه موجب بهبود توانایی جست و جوی محلی و اکتشاف بهتر الگوریتم ترکیبی شده است. در صورت تحقق معیار همگرایی الگوریتم متوقف شده در غیر این صورت وارد تکرار بعدی می شود. در این تحقیق ترکیب پیشنهادی از الگوریتم های چرخه آب (WCA) و گرگ خاکستری (GWO) با نام HWCGWO نشان داده می شود. برای الگوریتم ترکیبی (HWCGWO) همانند دو الگوریتم دیگر حداکثر تعداد تکرارها

به‌عنوان یک معیار همگرایی انتخاب شده است. مقدار مطلوب پارامترهای الگوریتم ترکیبی N_{sr} و d_{max} بعد از تحلیل حساسیت به ترتیب ۸ و ۱۶-۱۰× انتخاب شده است.

بهینه‌سازی چندهدفه

مسائل چندهدفه بهینه‌سازی (MOP_s) می‌توان به‌عنوان مسائل بهینه‌سازی که حداقل دو تابع هدف به‌طور هم‌زمان بهینه شده تعریف شده است. از نظر ریاضیاتی یک MOP می‌تواند به شرح زیر فرموله شده:

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)]^T \quad (1)$$

که در آن $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_d]$ یک بردار متغیرهای طراحی (d تعداد متغیرهای طراحی است) است. یک رویکرد اولیه برای حل MOP_s استفاده از فاکتورهای وزنی برای تبدیل یک MOP به یک مسئله تک‌هدفه بهینه‌سازی است (هاپت، ۲۰۰۴). این تکنیک را می‌توان بر اساس معادله زیر فرموله کرد:

$$F = \sum_{n=1}^N W_n f_n \quad (2)$$

که در آن N تعداد توابع هدف و به ترتیب W_n و f_n فاکتورهای وزنی و توابع هدف هستند.

الگوریتم چندهدفه بهینه‌ساز گرگ خاکستری الگوریتم چندهدفه بهینه‌ساز گرگ خاکستری به‌منظور انجام بهینه‌سازی چندهدفه با GWO ، دو مؤلفه جدید ادغام گشته است. اجزای به‌کارگرفته شده بسیار شبیه به اجزای $MOPSO$ هستند (کوتلو و همکاران، ۲۰۰۴). اولین مؤلفه یک آرشیو است که مسئول ذخیره‌سازی راه‌حل‌های بهینه نامغلوب پارتو به‌دست آمده است. دومین مؤلفه یک استراتژی انتخاب رهبر است که کمک می‌کند تا به انتخاب راه‌حل‌های آلفا، بتا و دلتا به‌عنوان رهبران روند شکار (جواب بهینه) از آرشیو است. پیچیدگی محاسباتی $MOGWO$ از نوع (MN^2) است که در آن N تعداد افراد در جامعه است و M تعداد اهداف است. مقدار مطلوب پارامترهای الگوریتم چندهدفه بهینه‌ساز گرگ خاکستری α ، N Grid، γ و β به ترتیب ۰/۱، ۱۰، ۲ و ۲ انتخاب شده است؛ که در آن α ، پارامتر تورم شبکه N Grid، تعداد شبکه‌ها در هر بعد γ ، پارامتر فشار انتخاب اعضای اضافی آرشیو برای حذف β ، پارامتر فشار انتخاب رهبر است. الگوریتم ترکیبی چندهدفه در الگوریتم ترکیبی چندهدفه همانند الگوریتم چندهدفه چرخه آب ($MOWCA$) انتخاب بهترین راه‌حل از مکانیسم فاصله ازدحام و آرشیو استفاده شده است. در تمام تکرارها فاصله ازدحام برای همه راه‌حل‌ها غیر مغلوب محاسبه شده و راه‌حل‌های با بالاترین مقدار فاصله ازدحام انتخاب می‌شوند. راه‌حل‌های غیرمغلوب در یک آرشیو برای تولید جبهه پارتو ذخیره می‌شوند. آرشیو در هر تکرار به‌روزرسانی شده، هر راه‌حل مغلوبی از آن حذف می‌شود. در الگوریتم ترکیبی چندهدفه جمعیت اولیه بر اساس جمعیت اولیه در الگوریتم چرخه آب تولید شده، فاصله ازدحام به‌منظور انتخاب راه‌حل‌های غیر مغلوب اعمال می‌گردد. در حلقه اصلی الگوریتم بهره‌برداری اولیه یا جست‌وجوی سراسری به‌وسیله حرکت تصادفی نهرها و رودخانه‌ها به‌سمت دریا انجام می‌گردد و فاصله ازدحامی بین راه‌حل‌های محاسبه می‌شود، سپس مرحله بهره‌برداری ثانویه و مرحله اکتشاف اولیه توسط دو قابلیت حمله به طعمه و جست‌وجو برای طعمه، الگوریتم گرگ خاکستری انجام می‌گردد و به‌منظور اکتشاف ثانویه فرآیند تبخیر و بارش اعمال می‌گردد و پس از آن فاصله ازدحامی محاسبه و جبهه پارتو بر اساس فاصله ازدحامی و مرتب‌سازی اعضای غیر مغلوب جمعیت شکل می‌گیرد. در صورت تحقق معیار همگرایی،

الگوریتم متوقف می‌گردد؛ در غیر این صورت وارد تکرار بعدی می‌شود. استفاده هم‌زمان از مراحل اکتشاف و بهره‌برداری دو الگوریتم WCA و GWO موجب بهبود توانایی اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم ترکیبی شده است. در این تحقیق ترکیب پیشنهادی از الگوریتم‌های چرخه آب چندهدفه (MOWCA) و گرگ خاکستری چندهدفه (MOGWO) با نام MOHWCGWO نشان داده استفاده گردید. مقدار مطلوب پارامترهای الگوریتم ترکیبی چندهدفه N_{sr} و d_{max} به ترتیب ۸ و 1×10^5 انتخاب شده است. توابع ارزیابی و سنجش الگوریتم‌ها در حالت تک‌هدفه به منظور بررسی کارآمدی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌های WCA، GWO و MOHWCGWO که کدنویسی آن‌ها در قسمت برنامه‌نویسی توسط نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی انجام گردید، از چندین تابع محک استاندارد استفاده شده است. جدول (۳) توابع محک استاندارد مورد استفاده را نشان می‌دهد. تعداد اعضای جمعیت در هر الگوریتم و تعداد تکرارها برابر ۱۰۰۰ است.

جدول ۳- توابع محک استاندارد جهت بررسی الگوریتم‌های تک‌هدف

نام تابع	بازه	معادله تابع	مقدار بهینه f_{min}	ابعاد
Rosen brock	۱۰ و -۵	$f(x) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	.	۳۰
Ackley	$32/768$ و $-32/768$	$f(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(cx_i)\right) + 20 + \exp(1)$	.	۳۰
Dixon-Price	۱۰ و -۱۰	$f(x) = (x_1 - 1)^2 + \sum_{i=2}^d i(2x_i^2 - x_{i-1})^2$	.	۳۰
Three hamp camel	۵ و -۵	$f(x) = 2x_1^2 - 1.05x_1^4 + \frac{x_1^6}{6} + x_1x_2 + x_2^2$	.	۲
Sphere	۱۰ و -۱۰	$f(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$	.	۳۰
Rastrigin	$5/12$ و $-5/12$	$f(x) = 10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]$	.	۳۰
Bohachevsky	۱۰۰ و -۱۰۰	$f(x) = x_1^2 + 2x_2^2 - 0.3 \cos(3\pi x_1) - 0.4 \cos(4\pi x_2) + 0.7$	.	۲
Goldstein Price	۲ و -۲	$f(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)] \times [30 + (2x_1 - 3x_2)^2(18 - 32x_2)^2(18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	۳	۲

جدول ۴- توابع محک استاندارد جهت بررسی الگوریتم‌های چندهدفه

مسئله	ابعاد	کران‌های متغیر	توابع هدف	جواب بهینه	توضیحات
ZDT1	30	[0,1]	$f_1(x)=x_1$ $f_2(x)=g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \right]$ $g(x)=1+9 \left(\sum_{i=2}^n x_i \right) / (n-1)$	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in 0,$ $i = 2, \dots, n$	محدب
ZDT2	30	[0,1]	$f_1(x)=x_1$ $f_2(x)=g(x) \left[1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \right]$ $g(x)=1+9 \left(\sum_{i=2}^n x_i \right) / (n-1)$	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in 0,$ $i = 2, \dots, n$	نامحدب
ZDT3	30	[0,1]	$f_1(x)=x_1$ $f_2(x)=g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right) \sin(10\pi f_1(x)) \right]$ $g(x)=1+9 \left(\sum_{i=2}^n x_i \right) / (n-1)$	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in 0,$ $i = 2, \dots, n$	محدب، ناپیوسته
ZDT4	10	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in [-5,5],$ $i = 2, \dots, n$	$f_1(x)=x_1$ $f_2(x)=g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \right]$ $g(x)=1+10(n-1) + \sum_{i=2}^n (x_i^2 - 10 \cos(4\pi x_i))$	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in 0,$ $i = 2, \dots, n$	محدب
ZDT6	10	[0,1]	$f_1(x)=1-\exp(-4x_1)\sin^6(6\pi x_1)$ $f_2(x)=g(x) \left[1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \right]$	$x_1 \in [0,1]$ $x_i \in 0,$ $i = 2, \dots, n$	نامحدب، دامنه

$$g(x) = 1 + 9 \left(\frac{\sum_{i=2}^{10} x_i}{(n-1)} \right)^{0.25}$$

یافته‌ها و بحث

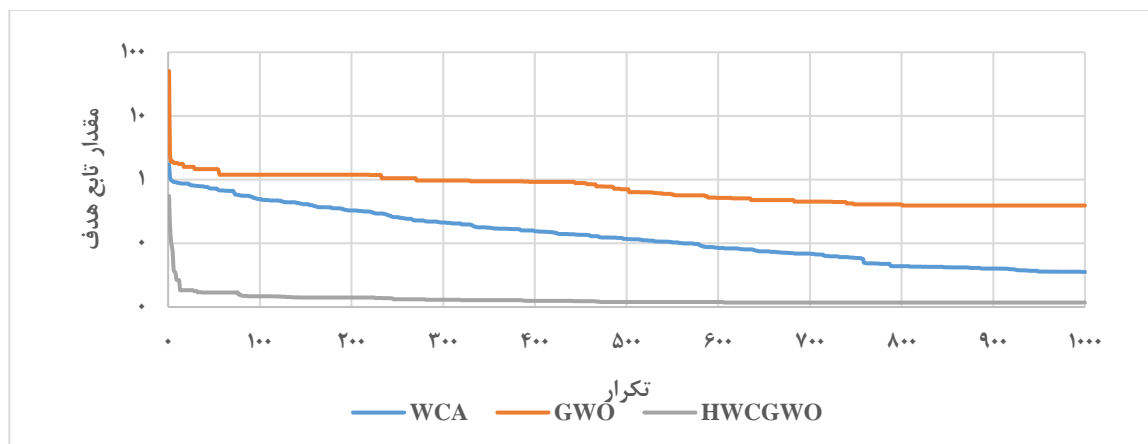
برای بررسی کارآمدی و درستی عملکرد الگوریتم‌های WCA، GWO و HWCGWO از چندین تابع محک استاندارد استفاده شد. جدول (۵) نتایج آماری پیاده‌سازی الگوریتم‌های WCA، GWO و HWCGWO روی توابع محک استاندارد را نشان می‌دهد. الگوریتم WCA به جوابی نزدیک به جواب بهینه دست یافته است؛ درحالی‌که الگوریتم GWO و HWCGWO توانسته به پاسخی بهینه دست پیدا کند.

جدول ۵- نتایج الگوریتم‌ها یفرابتکاری در توابع استاندارد

Rosen brock				Ackley				تابع الگوریتم
انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	
۱۱/۳۶۴	۷/۹۷	۲۵/۲۳۶	۱/۹E-۰۷	۳/۵E-۱۵	۱/۸۷E-۱۴	۲/۲۲E-۱۴	۱/۵E-۱۴	WCA
۰/۶۶۵	۲۵/۱۰۷	۲۶/۱۵۲	۲۴/۲۱۳	۱/۵E-۳۰	۷/۹E-۱۵	۷/۹E-۱۵	۷/۹E-۱۵	GWO
۰/۲۱۰	۱۸/۵۸۲	۱۸/۹۷۸	۱۸/۲۰	۱/۷E-۱۵	۲/۶E-۱۵	۴/۴E-۱۵	۸/۸۸E-۱۶	HWC GWO
Dixon price				Three hump camel				تابع الگوریتم
انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	
۰	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۲/۲E-۱۵۳	۷/۹E-۱۵۴	۷/۱E-۱۵۳	۰	WCA
۳/۳E-۱۰	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۰	۰	۰	۰	GWO
۴/۴E-۰۸	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۰/۶۶۶	۰	۰	۰	۰	HWC GWO
Sphere				Rastrigin				تابع الگوریتم
Std	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	
۱/۳۴E-۳۷	۱/۶۱E-۳۷	۵/۲۴E-۳۷	۳/۶۵E-۳۸	۹/۶۵۵	۲۳/۰۸۳	۴۴/۷۷۳	۱۰/۹۴۴۵۵	WCA
۲/۱E-۱۳۳	۱/۵E-۱۳۳	۶E-۱۳۳	۳/۱E-۱۳۶	۰	۰	۰	۰	GWO

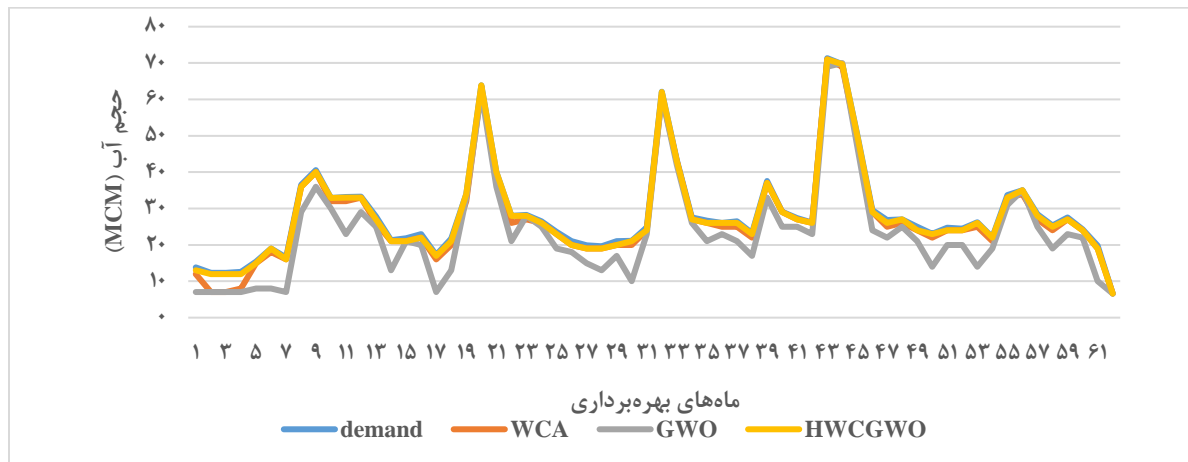
Bohachevsky		Goldstein price			HWC		GWO	
انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	انحراف معیار	میانگین	بیشترین	کمترین	
۰	۵/۳E-۳۰۶	۲/۹E-۳۰۵	۰	۹/۷۱E-۰۹	۳	۳	۳	WCA
۰	۰	۰	۰	۶/۴۷E-۰۹	۳	۳	۳	GWO
۰	۰	۰	۰	۱/۵۸E-۱۱	۳	۳	۳	HWC
								GWO

نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری از مخزن سد لتیان در شکل (۱) آورده شده است که الگوریتم ترکیبی شیب همگرایی بهتری نسبت به دو الگوریتم WCA و GWO دارد که نشان‌دهنده روند همگرایی مناسب الگوریتم ترکیبی است و با سرعت بالاتری به جواب نهایی رسیده است؛ به عبارت دیگر منحنی الگوریتم ترکیبی تحدب بیشتری دارد. علاوه بر این فاصله منحنی الگوریتم ترکیبی از جواب بهینه مطلق، مبدأ مختصات کمتر است.



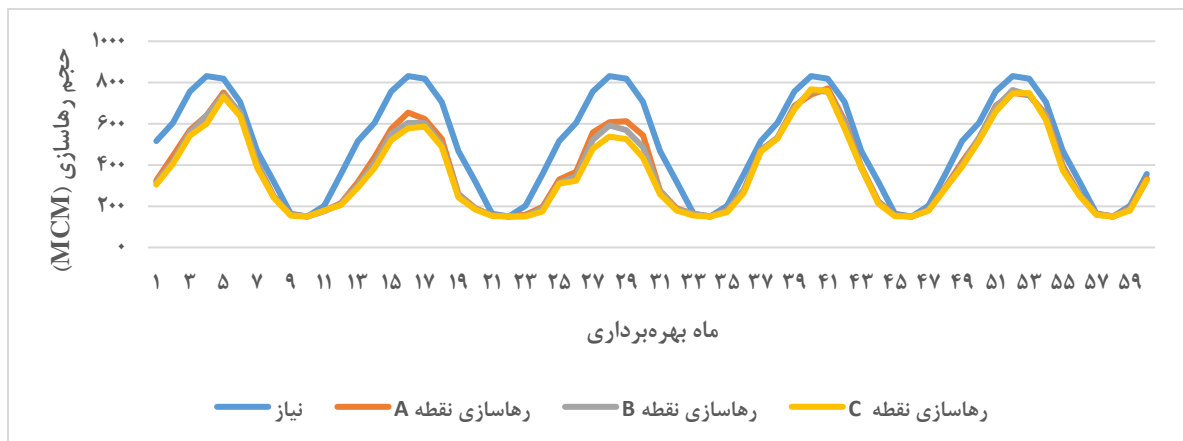
شکل ۱- نحوه همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری تک‌هدفه از مخزن

شکل (۲) نشان می‌دهد که مقدار رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم ترکیبی بسیار نزدیک به مقدار کل نیازهای پایین دست سد مورد مطالعه بوده، حداقل کمبود را داشته است. بعد از الگوریتم ترکیبی الگوریتم WCA دارای رهاسازی بهتری است و به جزء ماه‌های ابتدایی دوره که رهاسازی نامناسبی دارد و در آخر الگوریتم GWO که رهاسازی مناسبی نداشته و دارای بیشترین کمبود است، به‌طوری‌که در اکثر ماه‌ها نتوانسته نیاز پایین دست را فراهم کند.

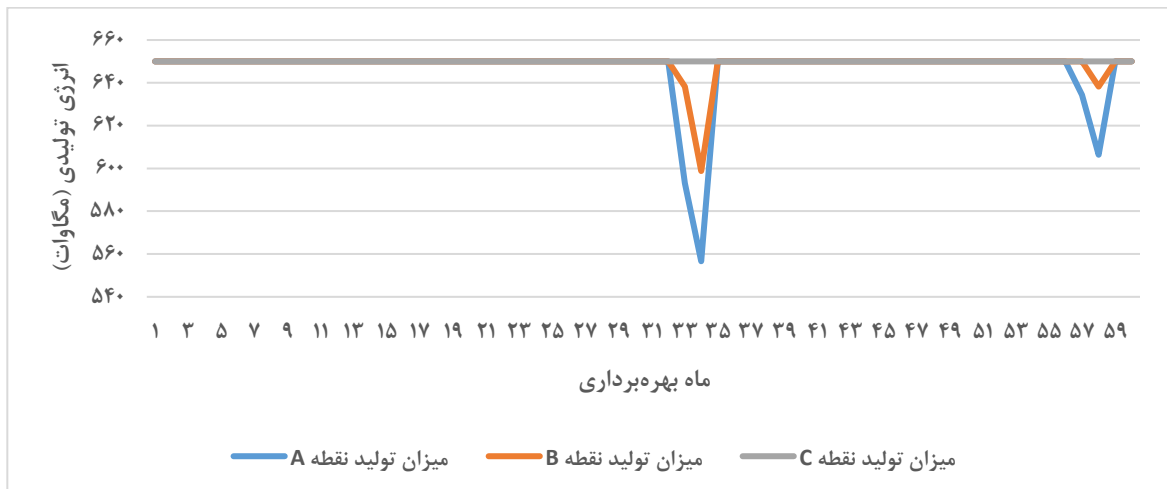


شکل ۲- مقدار رهاسازی حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی در مقابل نیاز سد لتیان

منحنی‌های رهاسازی و مقدار انرژی تولیدی ماهانه سه نقطه انتخابی در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. نقطه A با کمترین مقدار تابع هدف تأمین نیاز پایین‌دست بهترین رهاسازی و کمترین کمبود را دارد و انرژی تولیدی آن در سال‌های سوم و پنجم در ماه‌های گرم مقدار حداکثر را ندارد. در نقطه C با کمترین مقدار تابع هدف کمبود تولیدی، رهاسازی مناسبی نسبت به دو نقطه A و B ندارد که دارای کمبود بیشتری است. در حالی که مقدار انرژی تولیدی آن در تمام ماه‌ها حداکثر است. منحنی رهاسازی و انرژی تولیدی نقطه B مابین منحنی رهاسازی و انرژی تولیدی دو نقطه A و C قرار دارد و به‌ازای هر دو تابع تأمین نیاز پایین‌دست و کمبود تولیدی مقادیر بهینه را ارائه داده است.

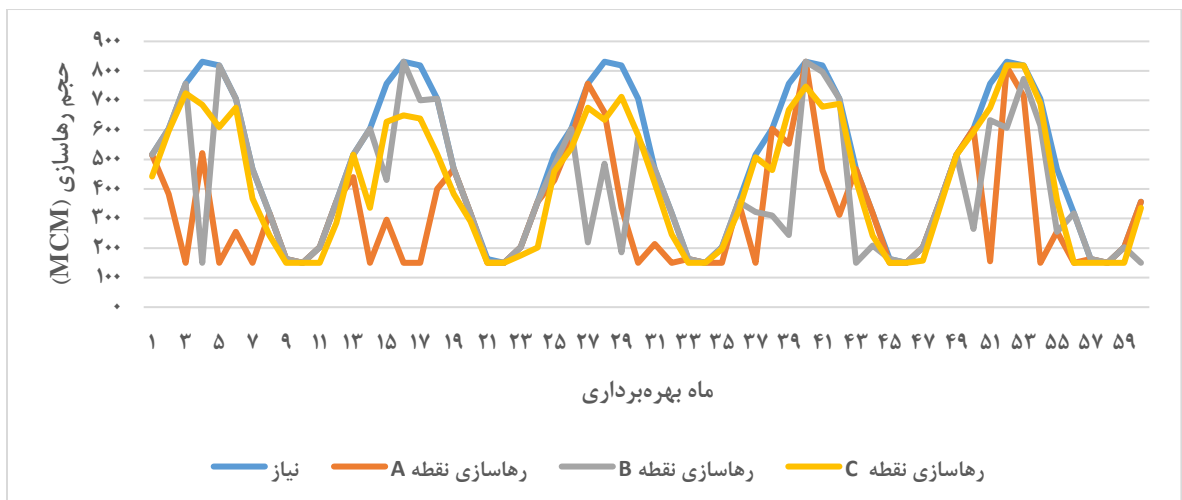


شکل ۳- تغییرات حجم رهاسازی از مخزن در نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOGWO در مقابل نیاز پایین‌دست

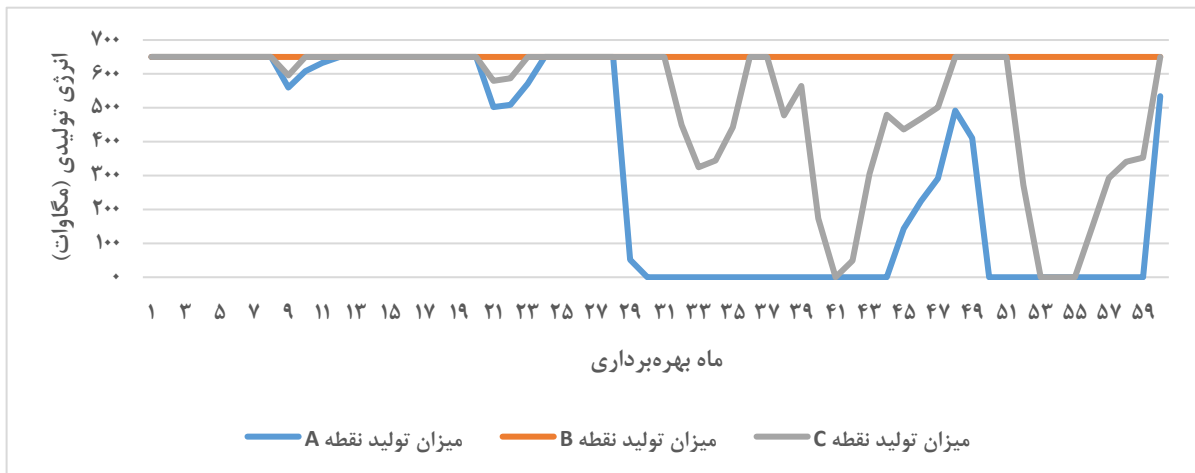


شکل ۴- مقادیر انرژی تولیدی نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOGWO

منحنی‌های رهاسازی و مقدار انرژی تولیدی ماهانه سه نقطه انتخابی در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. نقطه A با داشتن کمترین مقدار تابع هدف تأمین نیاز پایین‌دست و بیشترین مقدار تابع هدف کمبود توان تولیدی، رهاسازی آن نامناسب و بیشترین مقدار کمبود را دارد و انرژی تولیدی آن در سال‌های اول و دوم در ماه‌های گرم مقدار حداکثر را ندارد و در سال‌های سوم تا پنجم در اکثر ماه‌ها انرژی تولیدی صفر است. در نقطه C با کمترین مقدار تابع هدف کمبود توان تولیدی و بیشترین مقدار تابع هدف تأمین نیاز پایین‌دست، رهاسازی مناسبی نسبت به دو نقطه A و B دارد و دارای کمبود کمتری است. در حالی که مقدار انرژی تولیدی آن در سال‌های اول و دوم همانند نقطه A است و در سال‌های سوم تا پنجم در اکثر ماه‌ها انرژی تولیدی تغییرات زیادی دارد. منحنی رهاسازی نقطه B مابین منحنی‌های رهاسازی دو نقطه A و C و دارای کمبودی مابین کمبود نقطه A و B است و انرژی تولیدی آن تمام در حداکثر مقدار قرار دارد به‌ازای هر دو تابع تأمین نیاز پایین‌دست و کمبود توان تولیدی مقادیر بهینه را ارائه داده است. دلیل رهاسازی نامناسب و مقدار بالای تابع هدف کمبود توان تولیدی توانایی کم الگوریتم MOWCA در یافتن مقدار بهینه تابع هدف با توجه به نتایج عملکرد الگوریتم در تابع ZDT4 است.

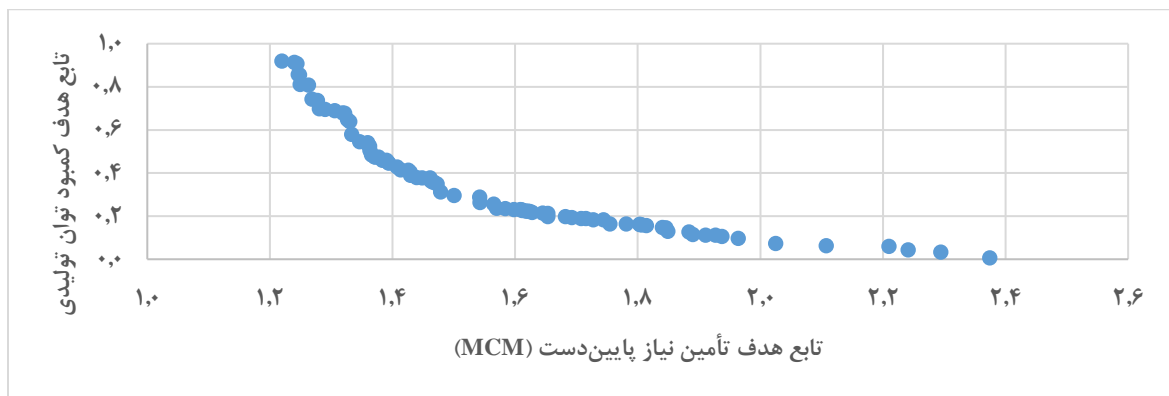


شکل ۵- تغییرات حجم رهاسازی از مخزن در نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOWCA در مقابل نیاز پایین‌دست

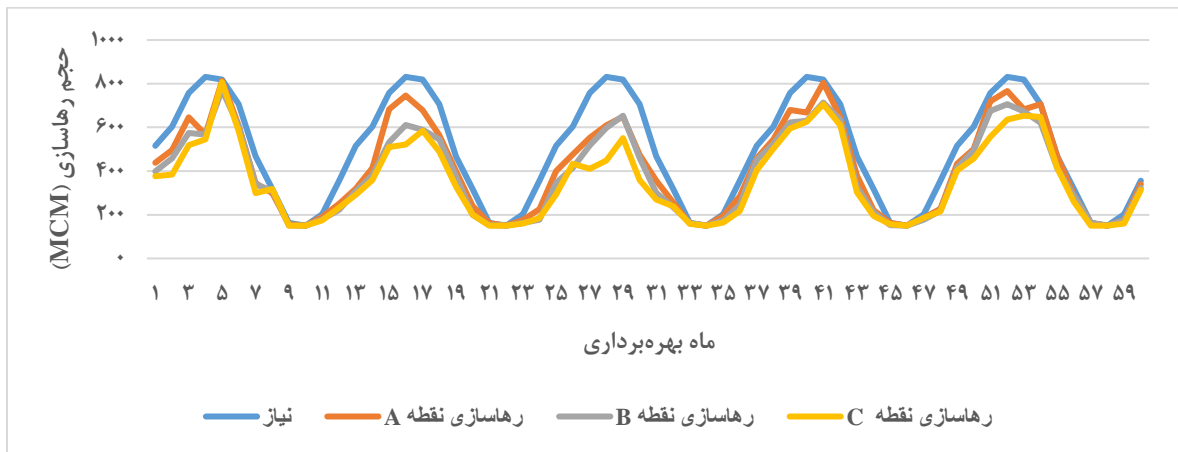


شکل ۶- مقادیر انرژی تولیدی نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOGWO

جبهه پارتو به دست آمده از الگوریتم MOHWCWGO در حل مدل بهره‌برداری چندهدفه سد دز در شکل (۷) نشان داده شده است. منحنی‌های رهاسازی و مقدار انرژی تولیدی ماهانه سه نقطه انتخابی در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. نقطه A دارای کمترین مقدار تابع هدف تأمین نیاز پایین‌دست، بهترین رهاسازی و کمترین کمبود است و انرژی تولیدی آن در سال‌های دوم و سوم و پنجم در ماه‌های گرم مقدار حداکثر را ندارد. در نقطه C با کمترین مقدار تابع هدف کمبود تولیدی، رهاسازی مناسبی نسبت به دو نقطه A و B ندارد و دارای کمبود بیشتری است. در حالی که مقدار انرژی تولیدی آن در تمام ماه‌ها حداکثر است. منحنی رهاسازی و انرژی تولیدی نقطه B مابین منحنی‌های رهاسازی و انرژی تولیدی دو نقطه A و C قرار دارد و به ازای هر دو تابع تأمین نیاز پایین‌دست و کمبود تولیدی مقادیر بهینه را ارائه داده است. با توجه به نتایج جبهه پارتو تشکیل شده الگوریتم‌های MOGWO، MOWCA و MOHCGWGO به صورت محذب است. جبهه پارتو الگوریتم MOGWO نسبت به سایر الگوریتم‌ها به مبدأ مختصات به عنوان نقطه ایده آل نزدیک‌تر است و بهترین جبهه پارتو را تشکیل داده است.



شکل ۷- جبهه پارتو به دست آمده توسط الگوریتم MOHWCWGO



شکل ۸- تغییرات حجم رهاسازی از مخزن در نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOHWCWGO در مقابل نیاز پایین دست



شکل ۹- مقادیر انرژی تولیدی نقاط انتخابی از جبهه پارتو الگوریتم MOHWCWGO

نتایج این بخش از تحقیق با نتایج فلاح مهدی پور و بزرگ حداد (۲۰۱۴) شباهت دارد. ایشان در تحقیقی به بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با کاربرد روش بهینه‌سازی مجموعه ذرات پرداختند. نتایج مقایسه بین نقاط انتهایی مجموعه جواب الگوریتم MOPSO و NLP نشان داد که جواب‌های الگوریتم MOPSO با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP، قابلیت زیادی در ارائه جواب‌های بهینه در نقاط انتهایی مجموعه جواب داشته است. به‌طور کلی نقطه A روی جبهه پارتو نقطه‌ای است که بهینه‌ترین حالت را برای تابع هدف تأمین نیاز پایین دست بدون در نظر گرفتن تابع هدف کمبود توان تولیدی نشان می‌دهد. همچنین نقطه C بهینه‌ترین نقطه را برای تابع هدف کمبود توان تولیدی را نشان می‌دهد. واضح است که هر دو تابع هدف نمی‌توانند هم‌زمان در بهینه‌ترین حالت خود باشند. ولی مبدأ مختصات را می‌توان به‌عنوان نقطه ایده آل در نظر گرفت و نزدیک‌ترین نقطه به مبدأ مختصات بر روی منحنی پارتو را می‌توان به‌عنوان یک نقطه مطلوب نهایی در نظر گرفت. با توجه به اینکه نقطه B بر روی جبهه پارتو نزدیک‌ترین نقطه به جبهه به مبدأ مختصات است. منحنی رهاسازی به‌ازای نقطه B برای الگوریتم MOHWCWGO نسبت به

سایر الگوریتم‌ها بهتر و کمبود کمتری دارد و منحنی تولید انرژی به‌ازای نقطه B برای الگوریتم MOWCA در تمامی ماه‌ها تولید انرژی حداکثری را دارد.

نتیجه‌گیری

یکی از راه‌کارهای مقابله با مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب و عدم توزیع زمانی و مکانی متناسب آن، استفاده بهینه از مخازن است. بهره‌برداری از سیستم مخزن چندهدفه، نوعاً یک مسأله پیچیده تصمیم‌سازی با تعداد متغیرهای زیاد و اهداف متعدد و تحت تأثیر عدم قطعیت و ریسک است. از این رو برای حل آن از الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر الگوریتم‌های WCA، GWO و HWCGWO در حالت تک‌هدفه و چندهدفه به‌منظور بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری سدهای لتیان و دز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

با توجه به این تحقیق نتایج بررسی کارآمدی عملکرد الگوریتم‌های تک‌هدفه WCA، GWO و HWCGWO توسط توابع محک استاندارد نشان داد که الگوریتم GWO در توابع ساده عملکرد بهتری دارد و به‌سرعت همگرا می‌شود، ولی با پیچیده شدن تابع در دام بهینه‌های محلی می‌افتد. الگوریتم WCA در توابع پیچیده قادر به عبور از بهینه‌های محلی و رسیدن به بهینه جهانی (مطلق) است. الگوریتم HWCGWO، در واقع سرعت الگوریتم GWO و توانایی الگوریتم WCA در به‌دست‌آوردن جواب بهینه را با هم ترکیب کرده به‌طوری که در فضای جست‌وجو جواب‌های مناسبی را ارائه می‌دهد. در مجموع تقریباً در تمامی توابع از هر دو الگوریتم WCA و GWO جواب بهتری ارائه می‌دهد. الگوریتم‌های WCA، GWO و HWCGWO برای بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری سد لتیان در دوره ۶۲ ماهه به‌کارگرفته شدند و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل بهره‌برداری سد لتیان الگوریتم ترکیبی با مقدار تابع هدف ۰/۰۱۱، تأمین ۹۸/۵۷ درصد از نیازهای پایین‌دست، میزان کل کمبودها ۱/۴۳ درصد و با شاخص پایداری ۹۷٪ و ارائه منحنی همگرایی و رهاسازی مناسب‌تر نسبت به دو الگوریتم چرخه آب و گرگ خاکستری عملکرد بهتری داشته است. به‌منظور سنجش و ارزیابی الگوریتم‌های چندهدفه MOWCA، MOGWO و MOHWCGWO توابع ZDT به کار گرفته شد نتایج ارزیابی نشان داد در الگوریتم MOWCA جبهه پارتو گستردگی و پراکندگی مناسب و همگرایی مطلوبی به‌جز در تابع ZDT4 دارد و جبهه پارتو الگوریتم MOGWO همگرایی مناسبی دارد درحالی‌که پراکندگی و پراکنش جواب‌های جبهه پارتو نسبت به الگوریتم MOWCA بهتر نیست. در الگوریتم MOHWCGWO، جبهه پارتو از گسترش و پراکندگی مناسبی در تمام توابع به‌جز ZDT4 و فاصله کمتر با جبهه پارتو به‌عبارت دیگر همگرایی بهتر برخوردار است. الگوریتم‌های MOWCA، MOGWO و MOHWCGWO برای بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری چندهدفه سد دز در دوره ۶۰ ماهه به کار گرفته شدند نتایج حل مدل نشان داد که الگوریتم MOGWO نسبت به سایر الگوریتم‌ها جبهه پارتو بهتری را ارائه می‌دهد. بررسی بهترین نقطه بر روی جبهه پارتو الگوریتم‌های MOWCA، MOGWO و MOHWCGWO نشان داد که الگوریتم MOHWCGWO منحنی رهاسازی بهتری و الگوریتم MOWCA منحنی انرژی تولیدی مناسب‌تری را ارائه می‌دهد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- ابراهیم پور، ع.، کرامتی، ح. (۱۳۹۵). استخراج و مقایسه قوانین مختلف برای استفاده بهینه از مخزن با هدف برق رسانی (مطالعه موردی: مخزن کارون ۴). *ششمین همایش ملی مدیریت منابع آب/ایران، دانشگاه کردستان، کردستان*.
- اینانلو، ب. (۱۳۹۰). ترکیب روش تصمیم گیری چند معیاره TOPSIS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO در حل مسائل چندهدفه مدیریت منابع آب. پایان نامه کارشناسی ارشد، *دانشگاه تهران، ایران*.
- بزرگ حداد، ا. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب. *انتشارات دانشگاه تهران*. ص ۹.
- بنی‌اسدی مقدم، ا.، ابراهیمی، ح.، خاشعی سیوکی، ع.، اکبرپور، ا. (۱۴۰۱). به کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری نوین برای بهره‌برداری تک هدفه از مخزن سد امیرکبیر، *نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر*، ۵۴(۶): ۲۱۷۳-۲۱۸۸.
- جعفرزاده، ع.، خاشعی سیوکی، ع. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری از مخزن با روش جیره‌بندی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (مطالعه موردی: سد لتیان). *سیزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، ایران*.
- دنایی، ع.، صراف، ا.، احمدی، ح. (۱۳۹۹). ارائه الگوریتم تکاملی هیبریدی نوین در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن بر اساس تکنیک نوین ارزیابی مبتنی بر فاصله ترکیبی (CODAS)، *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۷(۵): ۲۳-۱.
- رضایی استخرویه، ع.، جلال کمالی، ن.، مومنی رق آبادی، م. (۱۴۰۱). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنه با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی موجودات همزیست مبتنی بر برازش-فاصله-توازن. *مهندسی آبیاری و آب/ایران*، ۱۳(۱): ۲۴۴-۲۱۹.
- شهرکی، ج.، سردار شهرکی، ع.، نوری، س. (۱۳۹۸). کاربرد الگوریتم فرا ابتکاری کرم شب‌تاب (FA) در تخصیص بهینه‌ی منابع آب چاه نیمه‌ی سیستم تحت سناریوی توسعه‌ی کشاورزی. *فصلنامه علمی مهندسی منابع آب*، ۱۲(۴۳): ۷۵-۶۴.
- قادری، ک.، رحیمی، ع.، پورشیخالی، ز.، زلفی، ع. (۱۳۹۲). بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از الگوریتم TV-MOPSO (مطالعه موردی: سد درودزن). *دوازدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران*.
- میثاقی، ف.، امانی، ع.ح.، صدیق، ع. (۱۳۹۹). مقایسه کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری گرگ خاکستری و رقابت استعماری در حوزه تخصیص بهینه آب در شبکه آبیاری و زهکشی (مطالعه موردی: شبکه صوفی چای)، *علوم محیطی*، ۱۸(۲): ۲۱۸-۲۰۳.
- Afshar A., Sharifi, F. and Jalali, M.R., 2009. Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation. *Engineering Optimization*, 41(4): 313-325.
- Afshar, M.H. and Motaie, I., 2011. Constrained big bang-big crunch algorithm for optimal solution of large scale reservoir operation problem. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2: 357-375.
- Baniasadi Moghadam, A., Ebrahimi, H., Khasheie, A., & Akbarpour, A. 2022. Using Novel Meta-Heuristic Algorithms for Single-Objective Operation of Reservoir Amirkabir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(6), 2173-2188. [in Persian].
- Bashiri-Atrabi, H., Qaderi, K., Rheinheimer, D.E. and Sharifi, E., 2015. Application of harmony search algorithm to reservoir operation optimization. *Water Resources Management*, 29: 5729-5748.
- Bogorg Haddad, A. 2013. Optimization of water resources systems. *Tehran University Publications*. Page 9 [in Persian].
- Coello, C.A.C., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S., 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8(3): 256-279.
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. 2020. Presenting a new hybrid evolutionary algorithm in optimizing reservoir operation based on new combinative distance-based assessment (CODAS). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 1-23. [in Persian].
- Ebrahimpour, A., Karamati, H. 2016. Extraction and comparison of various rules for optimal use of the reservoir with the purpose of electrification (case study: Karun 4 reservoir). *The 6th National Conference of Iranian Water Resources Management, University of Kordestan, Kordestan* [In Persian].

- Fallah Mehdipour, Elahe, & Bozorg Haddad, Omid. 2014. Application Of The Nash Conflict Resolution Model In Operation Of Reservoir Systems. *Water Engineering*, 7(22): 11-22.
- Haupt, R.L. and Haupt, S.E., 2004. Practical genetic algorithms. *John Wiley & Sons*.
- Huang, V.L., Zhao, S.Z., Mallipeddi, R. Suganthan, P.N., 2009, May. Multi-objective optimization using self-adaptive differential evolution algorithm. *In 2009 IEEE congress on evolutionary computation*: 190-194.
- Inanlu, B. 2011. Combination of TOPSIS multi-criteria decision-making method and PSO optimization algorithm in solving multi-objective problems of water resources management. *Master's thesis, University of Tehran, Iran* [in Persian].
- Jafarzadeh, A, Khashai-Siuki, A. 2015. Optimizing the reservoir exploitation model with rationing procedure using particle swarm algorithm (case study: Lethyan Dam). *The 13th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman* [in Persian]. *Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 3(6): 13681-13687.
- Konak, A., Coit, D.W. and Smith, A.E., 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability engineering & system safety*, 91(9): 992-1007.
- Labadie, J.W., 2004. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of water resources planning and management*, 130(2): 93-111.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A., 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69: 46-61.
- Misaghi, F., Amani, A. H., & Seddigh, A. R. 2020. Comparison of the efficiency of gray wolf optimizer and imperialist competitive algorithms in an optimal allocation of water in irrigation and drainage networks (case study: Sofi-Chay network). *Environmental Sciences*, 18(2), 203-218. [in Persian].
- Qaderi, K., Rahimi, A., Porshikhali, Z., Zalqi, A. 2013. Optimum exploitation of the reservoir using TV-MOPSO algorithm (case study: Droodzen Dam). *The 12th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction. Kerman Shahid Bahonar University. Kerman* [in Persian].
- Rezaei-Estakhroueyeh, A., Jalalkamali, N., & Momeniroghabadi, M. 2022. Optimization of Multi-Reservoir System Operation Using Symbiotic Organisms Search Algorithm Based on the Fitness-Distance-Balance. *Irrigation and Water Engineering*, 13(1), 219-244. [in Persian].
- Shahraki, J., Sardar Shahraki, A., & Nouri, S. 2020. Application of Firefly Fractional Algorithm (FA) In Optimal Water Resources Distribution in Chahnimeh of Sistan under the Managerial Scenarios. *Water Resources Engineering*, 12(43), 64-75. [in Persian].
- Sonaliya, S. and Suryanarayana, T.M.V., 2014. Optimal reservoir operation using genetic algorithm: *A case study of ukai reservoir project. International*
- Tabari, M.M.R. and Soltani, J., 2013. Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. *Water resources management*, 27: 37-53.
- Wan, X.Y., Wang, G.Q., Yi, P. Bao, W.M., 2010. Similarity-based optimal operation of water and sediment in a sediment-laden reservoir. *Water resources management*, 24: 4381-4402.
- Zitzler, E., 1999. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: *Methods and applications*, 63. Ithaca: