



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۱ | بهمن ۱۴۰۰ (ص ۲۸۴۲-۲۸۲۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.332658.669106>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Application of a New Gorilla Troops Optimization Algorithm for Reservoir Operation Management

IRAJ PASANDIDEH¹, BEHROUZ YAGHOUBI^{1*}

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

(Received: Oct. 19, 2021- Revised: Dec. 2, 2021- Accepted: Dec. 11, 2021)

ABSTRACT

In this paper, the artificial gorilla troops (GTO) optimizer algorithm with the gray wolf optimizer (GWO) and particle swarm optimization (PSO) algorithms was compared for optimal operation of dam reservoir. The results of the GTO were evaluated with GWO and PSO results which are successful in complex engineering issues and reservoir operation. The objective function of minimizing the total squares of the downstream demand deficit was defined during the operation period. The constraints of the operating equation include the reservoir continuity equation, the reservoir volume, and the release volume. A case study of Jamishan reservoir dam located in Kermanshah province was considered. In this regard, runoff values related to the statistical years 1991-2011 were introduced as input to the reservoir for optimal operation management. The obtained results from optimization algorithms using error estimation indices including mean square root of error (RMSE), mean absolute value of error (MAE), Nash-Sutcliffe criterion (NSE), ratio of root mean square error to standard deviation of observational data (RSR), Reliability, Resiliency, Vulnerability And the minimization values of the objective function were evaluated. The values of these indicators for GTO were 2.86, 1.85, 0.73, 0.52, 69%, 36%, 23% and 4.7, respectively. The results showed that the GTO algorithm had very good accuracy in minimizing the objective function and based on the values of proposed indicators performed better than the GWO and PSO algorithms. Based on this algorithm, the amount of water release volume was brought to the reservoir as a function of the reservoir volume and the amount of water demand volume for the months of the year was determined.

Keywords: Optimization, Meta-Heuristics Algorithm, Artificial Gorilla Troops Optimizer, Reservoir Operation.

* Corresponding Author's Email: byaghubi@gmail.com

کاربرد الگوریتم نوین بهینه‌سازی گروه گوریل‌ها برای مدیریت بهره‌برداری مخزن

ایرج پسندیده^۱ و بهروز یعقوبی^{۱*}

۱- گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۹/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۹/۲۰)

چکیده

در این مقاله الگوریتم فرا ابتکاری بهینه‌ساز گروه گوریل‌های مصنوعی (GTO) با الگوریتم‌های بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) و ازدحام ذرات (PSO) به منظور مدیریت بهره‌برداری بهینه از مخزن سد مقایسه شد. نتایج الگوریتم GTO با الگوریتم‌های GWO و PSO که در زمینه مسائل پیچیده مهندسی و بهره‌برداری از مخزن موفق عمل کردند، ارزیابی شد. تابع هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات کمبود نیاز پایین‌دست طی دوره بهره‌برداری تعریف شد و قیود مربوط به معادله پیوستگی مخزن، حجم مخزن و حجم رهاسازی بر آن اعمال گردید. مطالعه موردی سد مخزنی جامیشان واقع در استان کرمانشاه در نظر گرفته شد. در این راستا مقادیر رواناب مربوط به سال‌های آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۰ بعنوان جریان ورودی آب به مخزن برای مدیریت بهره‌برداری بهینه از مخزن معرفی شد. نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از شاخص‌های ارزیابی خطا شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، معیار نش-ساتکلیف (NSE)، نسبت جذر میانگین مربعات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (RSR)، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و کمینه‌سازی تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب برای GTO ۰/۷۳، ۰/۵۲، ۰/۶۹، ۰/۳۶، ۰/۲۳ و ۴/۷ می‌باشند. مقادیر این شاخص‌ها مشخص کردند الگوریتم GTO دارای دقت بسیار خوبی بوده و بهتر از الگوریتم‌های GWO و PSO عمل می‌کند. لذا الگوریتم GTO می‌تواند بعنوان یک الگوریتم قدرتمند برای حل مسائل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بکار رود. براساس این الگوریتم، مقدار حجم رهاسازی آب بصورت تابعی از حجم مخزن سد، آورد به مخزن و مقادیر حجم تقاضای آب برای ماه‌های سال تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم فرا ابتکاری، گروه گوریل‌های مصنوعی، بهره‌برداری از مخزن.

مقدمه

مورد نیاز دوره‌های آبی توجه شود؛ بنابراین، اتخاذ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری برای مدیریت بهتر منابع آب ضروری می‌باشد (Ahmadi et al., 2015; Bolouri-Yazdeli et al., 2014; Bozorg-Haddad et al., 2017; Emami et al., 2020; Fallah-Mehdipour et al., 2011; Jahandideh-Tehrani et al., 2019; Mohammadi et al., 2019). برای بهره‌برداری بهینه از مخازن نیاز به حل معادلات بهینه بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. از آنجا که این معادلات دارای قیده‌های متعدد و پیچیده غیرخطی و همین‌طور شامل تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و حالت می‌باشند، لذا برای حل این معادلات غیرخطی و پیچیده نیاز به استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. این روش‌ها معمولاً ساده هستند و به عملیات اضافی پیچیده ریاضی مانند مشتقات نیاز ندارند، و به ندرت در نقاط بهینه محلی به دام می‌افتند. به همین دلیل استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل بهینه بهره‌برداری از مخزن توسط بسیاری از پژوهشگران برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب استفاده شده است (Afshar, 2012; Bozorg-Haddad et al., 2017; Bozorg-Haddad et al., 2015;

سهم عمده‌ای از نیازهای مختلف توسط منابع آب سطحی تأمین می‌شود. در سال‌های اخیر کاهش بارندگی‌ها و به تبع آن کاهش این منابع سبب شده‌است که مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب بیشتر مورد توجه قرار گیرد (Labadie, 2004; Wurbs, 1993; Yaghoobi et al., 2020; Yan et al., 2017). سدهای مخزنی از جمله سازه‌هایی هستند که برای ذخیره و استفاده از منابع سطحی مورد استفاده قرار گرفته و اهداف مختلفی نظیر تأمین آب مورد نیاز صنعت، کشاورزی، همچنین تولید انرژی الکتریکی، کنترل سیلاب، تأمین نیازهای کشتیرانی، زیست‌محیطی و تأمین نیاز شرب را برآورد می‌نمایند. برنامه بهره‌برداری از مخازن باید براساس تغییرات منابع و مصارف آب مورد بررسی و بازنگری مجدد قرار گیرد، تا کمترین شکست در طول دوره بهره‌برداری روی دهد. سدهای مخزنی در ایجاد تعادل بین تغییرات منابع و مصارف آب از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در این میان ضروری است که با استفاده از قوانین بهینه، به تأمین تقاضای آب

Chang *et al.*, 2005; Che *et al.*, 2020; Chong *et al.*, 2021; Donyaii *et al.*, 2020a, 2020b; Emami *et al.*, 2020; Garousi-Nejad *et al.*, 2016; Jahandideh-Tehrani *et al.*, Sharifi *et al.*, 2021; Yaghoubi ; ۰۲۰2019; Noori *et al.*, 2020).
 بهره‌برداری از مخزن سد گلستان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ، جستجوی فاخته و مگس میوه استفاده کردند و با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری و نتایج حاکی از الگوریتم‌های مذکور در بهینه‌سازی توابع هدف نسبت به یکدیگر مقایسه کردند. در این مقایسه برتری الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ در مقایسه با الگوریتم‌های جستجوی فاخته و مگس میوه مشخص گردید. (Masoumi *et al.*, 2020)
 الگوریتم بهینه‌سازی ملخ به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مسأله بهره‌برداری از سد مخزنی دز را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق کارایی مناسب این الگوریتم در حل مسأله بهره‌برداری از مخزن مشخص گردید. (Mohammadrezapour & Zeynali, 2018)
 از مخازن سدهای گلستان و وشمگیر به منظور تأمین نیاز پایین‌دست با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان نخبه، بیشینه-کمینه، مورچگان رتبه‌بندی شده و الگوریتم ازدحام ذرات تعیین و کارایی هر یک از این الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه کردند. این الگوریتم‌ها مقدار رهاسازی را به شکل بسیار خوبی بهینه کردند. در این پژوهش مشخص شد الگوریتم مورچگان نخبه در رتبه یک و الگوریتم‌های ازدحام ذرات، الگوریتم مورچگان رتبه‌بندی شده و الگوریتم مورچگان بیشینه-کمینه در رتبه‌های بعدی عملکرد بهینه‌سازی مقادیر رهاسازی از سدهای گلستان و وشمگیر قرار دارند.
 . با توجه به اینکه در پژوهش حاضر از الگوریتم‌های ازدحام ذرات (PSO)^۱، بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO)^۲ و بهینه‌ساز گروه گوریل‌های مصنوعی (GTO)^۳ برای حل مسأله بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است. لذا در این قسمت به کاربرد این الگوریتم‌ها در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخزن اشاره می‌گردد. الگوریتم PSO دارای سرعت همگرایی بالا است و به سختی در بهینه‌های موضعی به دام می‌افتد (Montalvo *et al.*, 2008). در مقالات مختلف از الگوریتم PSO در زمینه مدیریت منابع آب و سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده شده است (Afshar, 2012; Jahandideh-Tehrani *et al.*, 2020; Moeini & Babaei, 2017; Ostadrahimi *et al.*, 2012; Rani *et al.*, 2020; Reddy

پسندیده و یعقوبی: کاربرد الگوریتم نوین بهینه‌سازی گروه گوریل‌ها ... ۲۸۳۱

Chang *et al.*, 2005; Che *et al.*, 2020; Chong *et al.*, 2021; Donyaii *et al.*, 2020a, 2020b; Emami *et al.*, 2020; Garousi-Nejad *et al.*, 2016; Jahandideh-Tehrani *et al.*, Sharifi *et al.*, 2021; Yaghoubi ; ۰۲۰2019; Noori *et al.*, 2020).
 بهره‌برداری از مخزن سد گلستان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ، جستجوی فاخته و مگس میوه استفاده کردند و با استفاده از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری و نتایج حاکی از الگوریتم‌های مذکور در بهینه‌سازی توابع هدف نسبت به یکدیگر مقایسه کردند. در این مقایسه برتری الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ در مقایسه با الگوریتم‌های جستجوی فاخته و مگس میوه مشخص گردید. (Masoumi *et al.*, 2020)
 الگوریتم بهینه‌سازی ملخ به عنوان یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مسأله بهره‌برداری از سد مخزنی دز را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق کارایی مناسب این الگوریتم در حل مسأله بهره‌برداری از مخزن مشخص گردید. (Mohammadrezapour & Zeynali, 2018)
 از مخازن سدهای گلستان و وشمگیر به منظور تأمین نیاز پایین‌دست با استفاده از الگوریتم‌های مورچگان نخبه، بیشینه-کمینه، مورچگان رتبه‌بندی شده و الگوریتم ازدحام ذرات تعیین و کارایی هر یک از این الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه کردند. این الگوریتم‌ها مقدار رهاسازی را به شکل بسیار خوبی بهینه کردند. در این پژوهش مشخص شد الگوریتم مورچگان نخبه در رتبه یک و الگوریتم‌های ازدحام ذرات، الگوریتم مورچگان رتبه‌بندی شده و الگوریتم مورچگان بیشینه-کمینه در رتبه‌های بعدی عملکرد بهینه‌سازی مقادیر رهاسازی از سدهای گلستان و وشمگیر قرار دارند.

. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر از الگوریتم‌های ازدحام ذرات (PSO)^۱، بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO)^۲ و بهینه‌ساز گروه گوریل‌های مصنوعی (GTO)^۳ برای حل مسأله بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است. لذا در این قسمت به کاربرد این الگوریتم‌ها در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخزن اشاره می‌گردد. الگوریتم PSO دارای سرعت همگرایی بالا است و به سختی در بهینه‌های موضعی به دام می‌افتد (Montalvo *et al.*, 2008). در مقالات مختلف از الگوریتم PSO در زمینه مدیریت منابع آب و سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده شده است (Afshar, 2012; Jahandideh-Tehrani *et al.*, 2020; Moeini & Babaei, 2017; Ostadrahimi *et al.*, 2012; Rani *et al.*, 2020; Reddy

^۳ Artificial gorilla troops optimizer (GTO)

^۴ Hammam Boughrara reservoir

^۱ Particle Swarm Optimization (PSO)

^۲ Grey wolf optimizer algorithm (GWO)

مبتنی بر جمعیت^۲ قرار دارد. الگوریتم گرگ خاکستری از سلسله مراتب رهبری و ساز و کار شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت تقلید می‌نماید. گرگ‌های خاکستری زندگی اجتماعی دارند و تعداد متوسط گرگ‌های هر گله بین پنج تا ۱۲ است در هر گله چهار رتبه اصلی وجود دارد. گرگ‌های رهبر گروه آلفا (α) نامیده می‌شود این گرگ‌ها برگله مسلط هستند. گرگ‌های بتا (β) به گرگ‌های آلفا در فرآیند تصمیم‌گیری کمک نموده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آنها هستند. گرگ‌های دلتا (δ) پایین‌تر از گرگ‌های بتا و شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان هستند. گرگ‌های امگا (ω) پایین‌ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارد. گرگ‌های خاکستری شکار را بصورت گروهی در سه مرحله انجام می‌دهند، که در مرحله اول ردیابی، تعقیب و نزدیک شدن به طعمه انجام می‌شود. در مرحله دوم تلاش برای محاصره و خسته کردن طعمه تا زمانی که حرکت آن متوقف شود و در نهایت حمله به سمت طعمه می‌باشد. گرگ‌های خاکستری در طول شکار خود طعمه را محاصره می‌کنند. معادلات ۴ تا ۸ برای پیاده‌سازی ریاضی محاصره طعمه می‌باشند.

(رابطه ۴)

$$D = |C \times X_p(t) - X(t)|$$

(رابطه ۵)

$$X(t+1) = X_p(t) - A \times D$$

که در آن t بیانگر تکرار فعلی الگوریتم، A و C بردارهای ضریب، X_p بردار موقعیت طعمه، D بردار فاصله گرگ فعلی تا گرگ‌های رهبر و X بیانگر بردار موقعیت گرگ خاکستری می‌باشد. بردارهای A و C نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردند

(رابطه ۶)

$$A = |2 \times a \times r_1 - a(t)|$$

(رابطه ۷)

$$C = 2 \times r_2$$

(رابطه ۸)

$$a(t) = 2 - \frac{(2 \times t)}{\text{MaxIter}}$$

که مؤلفه‌های a به صورت خطی در مراحل تکرار الگوریتم، از دو تا صفر کاهش می‌یابند و r_1 و r_2 نیز بردارهای تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. t تکرار جاری و MaxIter حداکثر تعداد تکرار الگوریتم می‌باشد.

در یک فضای جستجوی انتزاعی، دانشی در مورد راه‌حل بهینه (موقعیت شکار) $[X_p(t)]$ وجود ندارد. از این رو موقعیت شکار را همان موقعیت آلفا (بهترین موقعیت بدست آمده) در نظر

دوره بهره‌برداری انجام شد. حل مدل ریاضی بهره‌برداری بهینه از مخزن با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO انجام و نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها با استفاده از مقادیر شاخص‌های مختلف و مقدار تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفت. و مقادیر رهاسازی آب از مخزن بصورت تابعی از حجم مخزن، مقادیر نیاز و آورد به مخزن سد تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

PSO از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و از دسته هوش جمعی، یک الگوریتم قوی برای بهینه‌سازی می‌باشد که از عملکرد دسته‌جمعی حیوانات مانند پرندگان، ماهی‌ها، حیوانات اقتباس شده‌است. در الگوریتم PSO هر یک از جواب‌های مسئله به عنوان یک ذره در نظر گرفته می‌شود هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از محدوده متغیرها محاسبه می‌کند و سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات بهترین ذرات موجود در جمع جبهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند، بر این اساس مقدار مرحله بعد هر ذره به صورت رابطه (۱) یعنی سرعت حرکت مرحله فعلی‌اش و رابطه (۲) تعریف می‌شود (SaberChenari et al., 2016). این روابط شامل پارامترهای $X_{i,j,k}$ موقعیت ذره، $V_{i,j,k}$ سرعت ذره است، k تعداد تکرار، c_1 و c_2 دو پارامتر مثبت و $c_1+c_2=4$ و معمولاً $c_1=c_2=2$ ، r_1 و r_2 دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ هستند. موقعیت فعلی هر ذره با $PBest_k$ و بهترین موقعیت تمام ذرات با $GBest_k$ نشان داده می‌شود. مقدار وزن اینرسی، w_k به طور خطی از حداکثر مقدار اولیه w_{max} به حداقل مقدار w_{min} در پایان تکرار کاهش می‌یابد.

(رابطه ۱)

$$V_{i,j,k} = w_k V_{i,j,k} + c_1 r_{1,i,j} (PBest_k - X_{i,j,k}) + c_2 r_{2,i,j} (GBest_k - X_{i,j,k})$$

(رابطه ۲)

$$X_{i,j,k+1} = X_{i,j,k} + V_{i,j,k+1}$$

(رابطه ۳)

$$w_{k+1} = w_k - \frac{k \times (w_{max} - w_{min})}{k_{max}}$$

الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO)

الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری^۱ در سال ۲۰۱۴ توسط Mirjalili et al., (2014) ارائه شد. این الگوریتم از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که در دسته الگوریتم‌های هوش ازدحامی و

میانجی را ایفا می‌کند و برای حرکت گروه تصمیم می‌گیرد. هر گوریل پشت نقره‌ای رهبر یک گروه ۵ تا ۳۰ عددی است. فلوجارت GTO در شکل ۲ نشان داده شده‌است، الگوریتم GTO از مکانیزم‌های مختلفی برای عملیات بهینه‌سازی (اکتشاف و استخراج) استفاده می‌کند. در مکانیزم‌های مورد استفاده در مرحله اکتشاف از سه مکانیزم مختلف مهاجرت به مکان نامعلوم، مهاجرت به مکان شناخته شده و حرکت به سمت گوریل‌های دیگر استفاده شده است. هر یک از این سه مکانیزم طبق یک روش کلی انتخاب می‌شوند. از پارامتری به نام p برای انتخاب مکانیزم مهاجرت به مکان نامعلوم استفاده می‌شود. اولین مکانیزم هنگام $\text{rand} < p$ انتخاب می‌شود. اگر $\text{rand} \geq 0.5$ باشد، مکانیزم حرکت به سمت دیگر گوریل‌ها انتخاب می‌شود. اگر $\text{rand} < 0.5$ باشد، مکانیزم مهاجرت به یک مکان شناخته شده انتخاب می‌شود. با توجه به مکانیزم‌های مورد استفاده، هر یک از مکانیزم‌ها توانایی فوق‌العاده‌ای به الگوریتم GTO می‌دهد. مکانیزم اول این امکان را به وجود می‌آورد که الگوریتم بتواند کل فضای مسأله را به خوبی کنترل کند، مکانیزم دوم عملکرد اکتشافی GTO را بهبود می‌بخشد و در نهایت، مکانیزم سوم GTO را در فرار از نقاط بهینه محلی تقویت می‌کند. از رابطه ۱۲ برای شبیه‌سازی سه مکانیزم مورد استفاده در فاز اکتشاف استفاده شده‌است.

(رابطه ۱۲)

$$GX(t+1) = \begin{cases} ((UB - LB) \times r_1 + LB \\ \text{if } \text{rand} < p \\ @ (r_2 - C) \times X_r(t) + L \times H \\ \text{if } \text{rand} \geq 0.5 \\ @ X(i) - L \times [L \times (X(t) - GX_r(t)) + \\ r_3 \times (X(t) - GX_r(t))] \\ \text{if } \text{rand} < 0.5 \end{cases}$$

$X(t)$ بردار موقعیت گوریل در تکرار $t+1$ است.

بردار موقعیت فعلی گوریل است. علاوه بر این، r_1 ، r_2 ، r_3 و r_4 مقادیر تصادفی هستند که در بازه $[0, 1]$ در هر تکرار به‌هنگام‌سازی می‌شوند. مقدار پارامتر p باید قبل از عملیات بهینه‌سازی در بازه $[0, 1]$ تعیین شود. این پارامتر احتمال انتخاب مکانیزم مهاجرت به مکان نامعلوم را تعیین می‌کند. UB و LB به ترتیب حداکثر و حداقل متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند. X_r یکی از اعضای گوریل‌های گروه است که به طور تصادفی از کل جمعیت انتخاب شده‌اند و همچنین GX_r یکی از بردارهای مکان کاندیدای گوریل به طور تصادفی انتخاب شده و شامل موقعیت‌های به‌هنگام‌سازی شده در هر مرحله است. در نهایت، L و H به ترتیب با استفاده از روابط ۱۳، ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند.

$$C = F \times \left(1 - \frac{It}{\text{Max It}}\right) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

گرفته می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود که آلفا، بتا و دلتا، دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه شکار دارند. روابط زیر بعنوان معادلات شکار پیشنهاد شده است:

(رابطه ۹)

$$D_\alpha = |C_1 \times X_\alpha - X(t)|, \quad D_\beta = |C_2 \times X_\beta - X(t)|, \quad D_\delta = |C_3 \times X_\delta - X(t)|$$

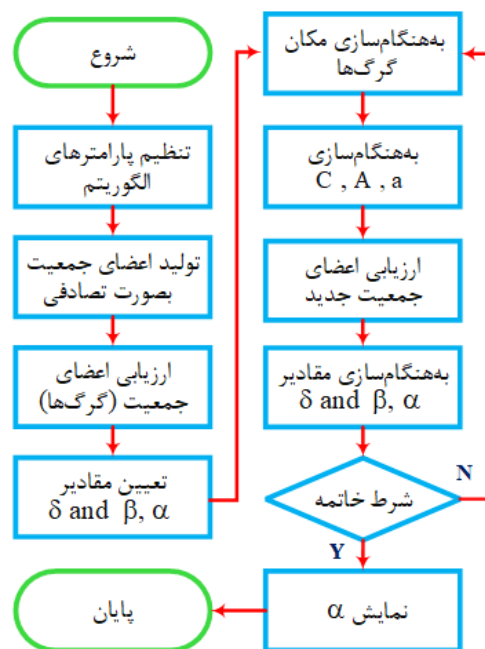
(رابطه ۱۰)

$$X_1 = |X_\alpha - A_1 \times D_\alpha|, \quad X_2 = |X_\beta - A_2 \times D_\beta|, \quad X_3 = |X_\delta - A_3 \times D_\delta|$$

(رابطه ۱۱)

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

که C_1 ، C_2 و C_3 از رابطه ۷ محاسبه می‌شوند. مقادیر A_1 ، A_2 و A_3 از رابطه ۶ و مقادیر D_α ، D_β و D_δ از رابطه ۹ تعیین می‌شوند. فلوجارت این الگوریتم در شکل ۱ ارائه شده‌است.



شکل ۱- فلوجارت الگوریتم GTO

الگوریتم بهینه‌ساز گروه گوریل‌های مصنوعی (GTO)

الگوریتم بهینه‌ساز گروه گوریل‌های مصنوعی^۱ در سال ۲۰۲۱ توسط آقای Abdollahzadeh et al., (2021) ارائه شد. این الگوریتم براساس زندگی اجتماعی گوریل‌ها تدوین شده‌است. گوریل‌ها فعالیت‌هایی مانند استراحت، مسافرت و غذا خوردن در طول روز را انجام می‌دهند. رهبر گروه گوریل‌ها، گوریل پشت نقره‌ای یک گوریل نر بالغ و قوی است معمولاً بیشتر از ۱۲ سال سن دارد و از موهای نقره‌ای پشتش شناخته می‌شود و همه تصمیم‌ها را می‌گیرد. در درگیری‌ها بین اعضای گروه نقش

در تکرار t نشان می‌دهد. N نشان دهنده تعداد کل گوریل‌ها است. g نیز با استفاده از معادله ۲۰ و در این رابطه، L نیز با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود. در اگر $C < W$ ، مکانیزم رقابت برای گوریل‌های ماده بالغ در مرحله استخراج انتخاب می‌شود. پس از مدتی، وقتی گوریل‌های جوان به سن بلوغ می‌رسند، با گوریل‌های نر دیگر مبارزه می‌کنند و گروه خود را در انتخاب گوریل ماده بالغ گسترش می‌دهند و این رقابت اغلب خشونت‌آمیز است. برای شبیه‌سازی این رفتار از معادله ۲۱ استفاده می‌شود.

(رابطه ۲۱)

$$GX(i) = X_{\text{Silverback}} - (X_{\text{Silverback}} \times Q - X(t) \times Q) \times A$$

$$Q = 2 \times r_5 - 1 \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

$$A = \beta \times E \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$E = \begin{cases} N_1 & \text{if rand} \geq 0.5 \\ N_2 & \text{if rand} < 0.5 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

در رابطه ۲۱، $X_{\text{Silverback}}$ بردار موقعیت پشت نقره‌ای (بهترین راه‌حل) و $X(t)$ بردار موقعیت گوریل فعلی است. Q برای شبیه‌سازی نیروی ضربه، از رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود. در معادله ۲۲، r_5 مقادیر تصادفی در بازه $[0, 1]$ است. A بردار ضریب برای تعیین میزان خشونت در درگیری‌ها با استفاده از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود. در معادله ۲۳، β پارامتری است که باید قبل از عملیات بهینه‌سازی تعیین شود و E از رابطه ۲۴ تعیین و برای شبیه‌سازی اثر خشونت بر ابعاد راه‌حل‌ها استفاده می‌شود. اگر $\text{rand} \geq 0.5$ باشد، مقدار E برابر با مقادیر تصادفی در توزیع نرمال و ابعاد مسئله است، اما اگر $\text{rand} < 0.5$ باشد، E در توزیع نرمال برابر با یک مقدار تصادفی است. rand نیز یک مقدار تصادفی در بازه $[0, 1]$ است. در پایان مرحله استخراج، عملیات شکل‌گیری گروه انجام می‌شود، که در آن تابع هزینه تمام راه‌حل‌های GX برآورد می‌شود و اگر تابع هزینه $GX(t) < X(t)$ ، از راه‌حل $GX(t)$ به عنوان راه‌حل $X(t)$ و بهترین راه‌حل به دست آمده در بین کل جمعیت به عنوان یک پشت‌نقره‌ای در نظر گرفته می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی جامیشان در استان کرمانشاه از کشور ایران با مختصات $34^{\circ}40'$ عرض شمالی و $47^{\circ}30'$ طول شرقی واقع شده است. حوضه آبریز این سد بخشی از سرشاخه‌های حوضه آبریز کرخه است. مساحت حوضه آبریز سد 524.07 km^2 و آورد متوسط سالیانه رودخانه در محل سد 58.35 MCM می‌باشد. ارتفاع سد از بستر رودخانه 53 متر و عرض تاج سد هشت متر است. حجم مخزن در رقوم نرمال بهره‌برداری 62.8 MCM و حجم رسوبات 50 ساله 962 MCM است. سردترین و گرمترین ماه سال به ترتیب دی و مرداد می‌باشد و متوسط درجه حرارت سالیانه

$$F = \text{Cos}(2 \times r_4) + 1 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$L = C \times I \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در رابطه ۱۳ It مقدار تکرار جاری، $\text{Max } It$ مقدار کل تکرارها برای انجام عملیات بهینه‌سازی و مقدار F از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه Cos تابع کسینوس است و r_4 مقدار تصادفی در بازه $[0, 1]$ و در هر تکرار بهنگام می‌شود. در رابطه ۱۳، در تکرارهای اولیه بهینه‌سازی مقادیر با تغییرات ناگهانی در یک بازه بزرگ ایجاد می‌شود و اما این بازه در تکرارهای نهایی کاهش می‌یابد. L با استفاده از رابطه ۱۵ تعیین می‌شود، که در آن I یک مقدار تصادفی در بازه $[-1, 1]$ است. از رابطه ۱۵ برای شبیه‌سازی رهبری گوریل پشت‌نقره‌ای استفاده می‌شود. در دنیای واقعی، گوریل پشت‌نقره‌ای به دلیل عدم تجربه کافی در مراحل اولیه رهبری گروه، ممکن است تصمیمات درستی برای یافتن غذا یا کنترل گروه اتخاذ نکند. با این حال، این تجربه کافی را برای رهبری به دست می‌آورد. همچنین، در رابطه ۱۲، H با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود، و در رابطه ۱۶، Z با استفاده از رابطه ۱۷ که یک مقدار تصادفی در ابعاد مسئله دارد و در بازه $[-C, C]$ تعیین می‌شود.

$$H = Z \times X(t) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$Z = [-C, C] \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

در پایان مرحله اکتشاف، تابع هزینه (هدف) تمام راه‌حل‌های GX محاسبه می‌شود و اگر تابع هدف $GX(t) < X(t)$ باشد، مقدار $GX(t)$ بجای $X(t)$ استفاده می‌شود. بنابراین، بهترین راه‌حل تولید شده در این مرحله نیز به عنوان یک پشت‌نقره‌ای در نظر گرفته می‌شود. در مرحله استخراج دو مکانیزم امکان انتخاب گزینه پیروی از گوریل پشت‌نقره‌ای و رقابت برای گوریل‌های ماده بالغ با استفاده از مقدار C در معادله ۱۳ وجود دارد. اگر $C \geq W$ ، مکانیزم پیروی از پشت‌نقره‌ای را انتخاب کنید، اما اگر $C < W$ ، رقابت برای گوریل‌های ماده بالغ انجام می‌شود. پارامتر W باید قبل از عملیات بهینه‌سازی تنظیم شود. برای شبیه‌سازی مکانیزم پیروی از پشت‌نقره‌ای از رابطه ۱۸ استفاده می‌شود.

(رابطه ۱۸)

$$GX(t+1) = L \times M \times [X(t) - X_{\text{Silverback}}] + X(t)$$

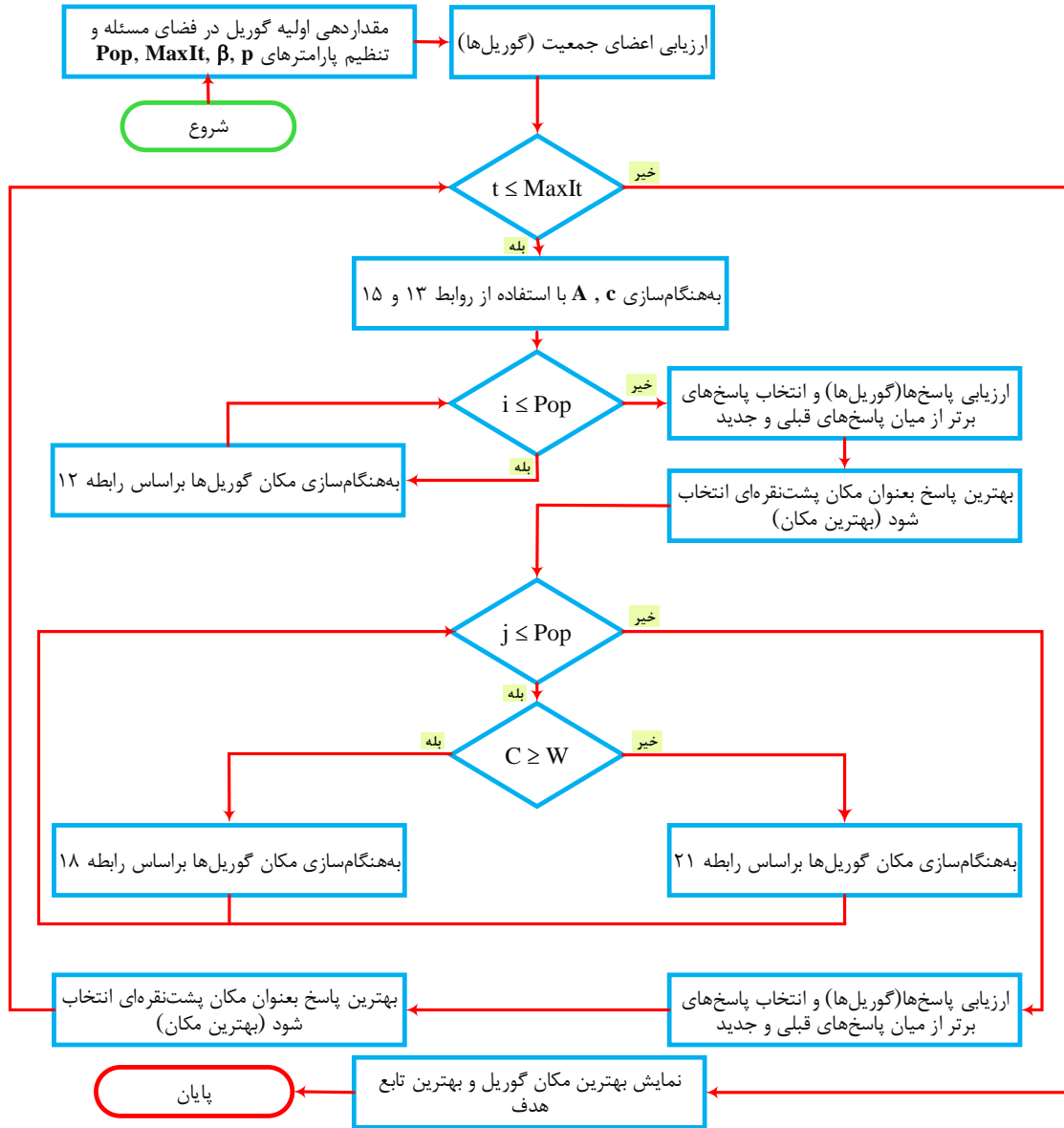
$$M = \left[\left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GX_i(t) \right|^{\frac{1}{g}} \right]^{\frac{1}{g}} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$g = 2^L \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

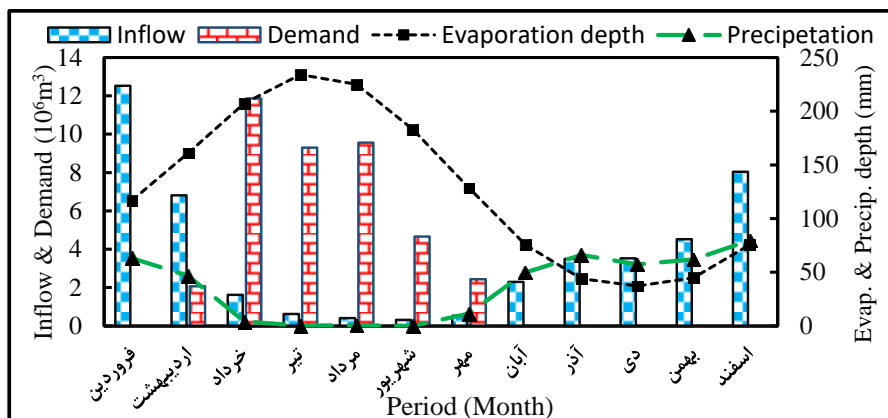
در معادله ۱۸، $X(t)$ بردار مکان گوریل است و $X_{\text{Silverback}}$ بردار مکان گوریل پشت‌نقره‌ای (بهترین راه‌حل) است. علاوه بر این، L با استفاده از رابطه ۱۵ و M با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود. در معادله ۱۹، $GX_i(t)$ مکان بردار هر گوریل کاندید را

تبخیر و تعرق ماهانه در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۴ موقعیت سد نشان داده شده است.

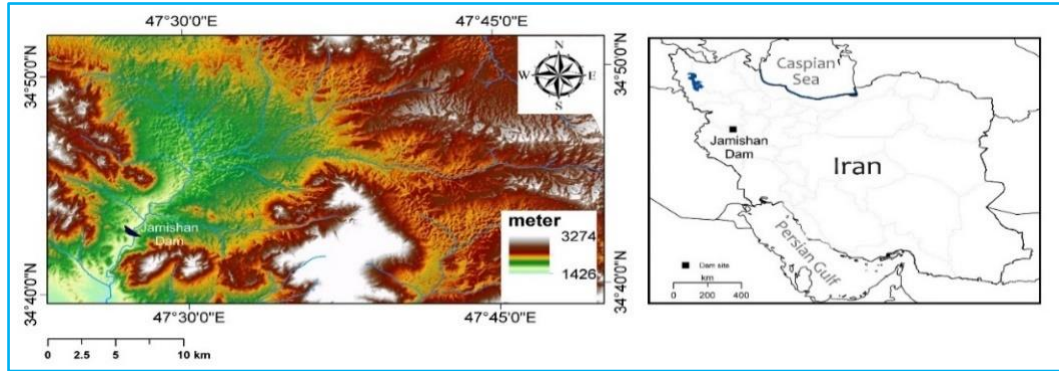
11.6°C است. میانگین بارندگی سالیانه 441mm است. بیشترین و کمترین بارندگی به ترتیب در ماههای اسفند و شهریور می‌باشد. مقادیر متوسط رواناب ورودی به سد، نیازهای آبی، بارندگی و



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم GTO



شکل ۳- مقادیر متوسط رواناب ورودی به سد، نیازهای پایین‌دست، بارندگی و تبخیر و تعرق ماهانه در حوضه مورد مطالعه



شکل ۴- موقعیت سد جامیشان

مدل ریاضی بهره‌برداری از مخزن
 میزان خروجی از مخزن در هر بازه زمانی با توجه به مقدار تقاضا، جریان ورودی به مخزن و اهداف بهره‌برداری تعیین می‌شود و تعیین میزان آب خروجی بهینه می‌تواند اهداف مورد نظر از بهره‌برداری مخزن را به مطلوب‌ترین حالت نزدیک نماید. ورودی‌های مدل ریاضی بهره‌برداری از مخزن سری زمانی حجم آورد رودخانه به مخزن، حجم ماهانه نیازهای پایین‌دست، حجم تبخیر از سطح دریاچه سد و منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن می‌باشد. متغیرهای تصمیم مدل مقادیر حجم رهاسازی ماهانه از مخزن، متغیرهای حالت حجم مخزن در انتهای ماه و تابع هدف مدل بصورت مینم‌سازی مجموع مربعات کمبود آب موردنیاز طی دوره بهره‌برداری تعریف شده‌است. تابع هدف مدل برای رفع نیازهای آبی پایین‌دست بصورت رابطه ۲۵ می‌باشد (Karami et al., 2019).

$$E_t = \frac{Area_t \times Ev_t}{1000} \quad (\text{رابطه ۲۷})$$

در این رابطه $Area_t$ سطح دریاچه مخزن (Km^2) و Ev_t عمق تبخیر از سطح دریاچه سد (mm) در زمان t است. مقدار حجم سرریزی^۱ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SPil_t = S_{t+1} - S_{max} \quad \text{if } S_{t+1} \geq S_{max} \quad \text{else } SPil_t = 0 \quad (\text{رابطه ۲۸})$$

قیود دیگر مدل بهینه بهره‌برداری از مخزن حدود (حداقل و حداکثر) متغیرهای تصمیم و حالت مدل را بیان می‌کنند.

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad (\text{رابطه ۲۹})$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (\text{رابطه ۳۰})$$

در این روابط مقادیر آب رهاسازی باید نامنفی و حداکثر آن برابر با مقدار تقاضا است و S_{max} حداکثر حجم و S_{min} حداقل حجم (حجم مرده) مخزن سد (MCM) است.

توابع جریمه برای تخطی و ارضا نشدن قیود بصورت روابط (۳۱) تا (۳۳) در نظر گرفته شده‌است:

$$P_{1t} = Pf_1 \frac{(S_{min} - S_{t+1})^2}{S_{min}} \quad \text{if } S_{t+1} \leq S_{min} \quad \text{else } P_{1t} = 0 \quad (\text{رابطه ۳۲})$$

$$P_{2t} = Pf_2 \frac{(S_{t+1} - S_{max})^2}{S_{max}} \quad \text{if } S_{t+1} \geq S_{max} \quad \text{else } P_{2t} = 0 \quad (\text{رابطه ۳۳})$$

$$P_{3t} = Pf_3 \frac{(R_t - D_t)^2}{D_{max}} \quad \text{if } R_t \geq D_t \quad \text{else } P_{3t} = 0$$

در این روابط P_{3t} ، P_{2t} ، P_{1t} توابع جریمه هستند که به تابع هدف اضافه می‌شوند و Pf_1 ، Pf_2 ، Pf_3 ثابت‌های توابع جریمه

Objective function = Minimize $\sum_{t=1}^T \left(\frac{D_t - R_t}{D_{max}} \right)^2$ (رابطه ۲۵)
 در این رابطه D_t حجم مورد نیاز پایین‌دست در ماه t ، R_t حجم آب رهاسازی از مخزن در ماه t ، D_{max} حداکثر حجم مورد نیاز پایین‌دست طی دوره بهره‌برداری و T طول دوره بهره‌برداری می‌باشد.

قیدهای مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن شامل محدودیت رابطه پیوستگی مخزن، محدودیت مربوط به متغیرهای مدل (متغیرهای تصمیم و حالت) است. قید مساوی مدل بهینه‌سازی بصورت معادله پیوستگی مخزن بصورت معادله ۲۶ است:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - SPil_t - E_t \quad (\text{رابطه ۲۶})$$

که در این معادله S_t حجم ذخیره مخزن در زمان t بر حسب میلیون متر مکعب (MCM)، I_t جریان ورودی به مخزن در زمان t (MCM)، $SPil_t$ حجم سرریزی در زمان t (MCM) و E_t حجم

هستند.

(رابطه ۳۹)

$$\beta = \frac{N_{t=1}^T(D_{t+1} \leq R_{t+1} | D_t > R_t)}{N_{t=1}^T(D_t > R_t)}$$

در این رابطه $N_{t=1}^T(D_{t+1} \leq R_{t+1} | D_t > R_t)$ تعداد ماه‌هایی که مقدار نیاز (D_t) کمتر از مقدار رهاسازی (R_t) است، بطوریکه در ماه قبل مقدار نیاز بیشتر از مقدار رهاسازی باشد و $N_{t=1}^T(D_t > R_t)$ تعداد ماه‌هایی که مقادیر نیاز بیشتر از رهاسازی است.

شاخص آسیب‌پذیری^۷: این شاخص بیانگر بزرگی شکست‌های سیستم در طول دوره بهره‌برداری است و از رابطه ۴۰ بدست می‌آید.

(رابطه ۴۰)

$$v = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - R_t | D_t > R_t)}{\sum_{t=1}^T D_t}$$

در این رابطه $\sum_{t=1}^T (D_t - R_t | D_t > R_t)$ مجموع مقدار کمبود برای ماه‌هایی که مقادیر نیاز بیشتر از مقادیر رهاسازی است. $\sum_{t=1}^T D_t$ مجموع مقادیر نیازها در طول دوره بهره‌برداری است.

نتایج و بحث

مقایسه کارایی الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO در بهینه‌کردن مدیریت بهره‌برداری از مخزن سد جامیشان و همچنین مقایسه این الگوریتم‌ها با همدیگر از اهداف این تحقیق می‌باشد. دوره بهره‌برداری از سد ۱۰ ساله (۱۲۰ ماه) در نظر گرفته شد. ورودی‌های مدل حجم جریان آب ورودی به مخزن، حجم تقاضا، ارتفاع تبخیر ماهانه، منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن، مقادیر حداقل و حدکثر آب رهاسازی و حجم مخزن، جمعیت اولیه، تعداد تکرار و پارامترهای تنظیم مربوط به الگوریتم‌ها مذکور می‌باشند. در این الگوریتم‌ها با سعی و خطا بهترین ترکیب جمعیت، تعداد تکرار و پارامترهای تنظیم اعمال شده‌است. در این مدل برای سری زمانی حجم جریان ورودی از آمار سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۹۰ استفاده شد. برای این تحقیق مدل بهره‌برداری بهینه در محیط نرم‌افزار متلب تهیه شد. و حل مدل بهینه با استفاده از الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO انجام گردید. پارامترهای تنظیم این الگوریتم‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌است؛ این پارامترها بر اساس بازه تعریف شده در مقاله‌های ارائه دهنده این الگوریتم‌ها و با اجزای مختلف با آزمون و خطا تعیین شده‌اند. با اجرای مدل مقادیر مجهول که مقادیر رهاسازی آب و حجم مخزن در ماه‌های مختلف است، تعیین شد. شکل ۵ مقادیر کمینه‌سازی تابع هدف

بررسی کارایی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن

معمولاً برای ارزیابی عملکرد مدل و مقایسه روش‌های حل مدل بهینه بهره‌برداری مورد استفاده از شاخص‌های ارزیابی خطا استفاده می‌شود. این شاخص‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند: شاخص جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE): این شاخص جذر میانگین مربعات خطا بین مقادیر نیاز (D_t) و رهاسازی آب (R_t) را بیان می‌کند و از رابطه زیر بدست می‌آید:

(رابطه ۳۴)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (D_t - R_t)^2}{T}}$$

شاخص میانگین قدرمطلق خطا^۲ (MAE): این شاخص برای آب تخصیصی (R_t) و مقادیر تقاضا از رابطه زیر تعیین می‌شود:

(رابطه ۳۵)

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^T |D_t - R_t|}{T}$$

معیار نش-ساتکلیف^۳ (NSE): این شاخص از رابطه زیر تعیین می‌شود:

(رابطه ۳۶)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - R_t)^2}{\sum_{t=1}^T (D_t - \bar{D}_t)^2}$$

در این رابطه \bar{D}_t میانگین نیازهای آبی پایین دست است. معیار نسبت شاخص مربعات خطا به انحراف معیار استاندارد مشاهداتی^۴ (RSR) ترکیبی از دو معیار RMSE و انحراف معیار استاندارد داده‌های مشاهداتی (STDEV_{obs}) است و در بهترین حالت مقدار آن صفر است.

(رابطه ۳۷)

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (D_t - R_t)^2}{T}}}{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (D_t - \bar{D}_t)^2}{T}}}$$

شاخص اطمینان‌پذیری^۵: درصد دوره‌هایی است که سیستم به طور کامل نیازهای موجود را تأمین کرده و با شکست روبرو نمی‌شود. و از رابطه ۳۸ تعیین می‌شود:

(رابطه ۳۸)

$$\alpha = \frac{N_{t=1}^T(D_t \leq R_t)}{T}$$

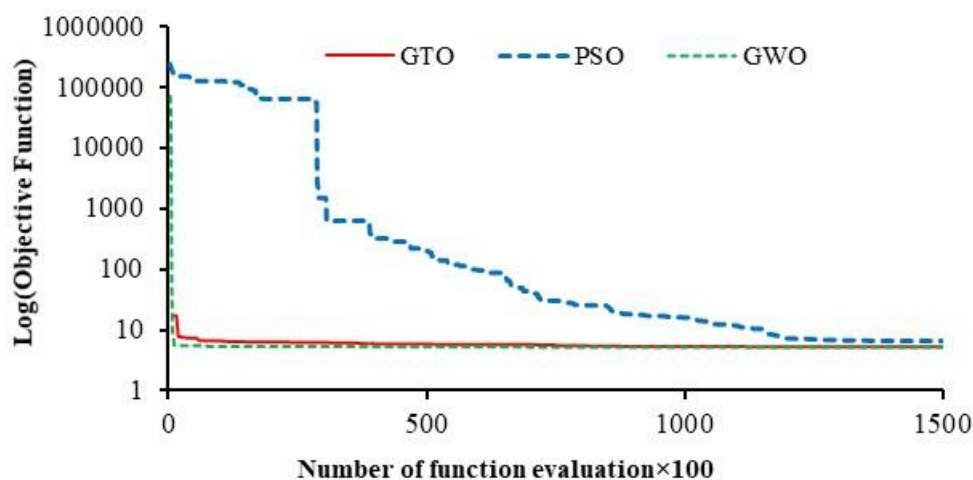
در این رابطه $N_{t=1}^T(D_t \leq R_t)$ تعداد ماه‌هایی که مقدار رهاسازی (R_t) بیشتر یا مساوی مقادیر نیاز (D_t) است. شاخص برگشت‌پذیری^۶: نشان‌دهنده احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از حالت شکست است و از رابطه ۳۹ محاسبه می‌گردد.

همگرایی بالا و مقدار کمتر تابع هدف محاسبه شده با الگوریتم‌های GTO و GWO نشان از عملکرد مطلوب این الگوریتم‌ها دارد. برخی از نتایج اجراهای مدل‌ها در قالب جداول و شکل‌های زیر نشان داده شده است.

را که با استفاده از الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO انجام شده است نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO در تکرارهای مختلف (تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف) مقدار تابع هدف را کمینه کردند. همچنین سرعت

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO

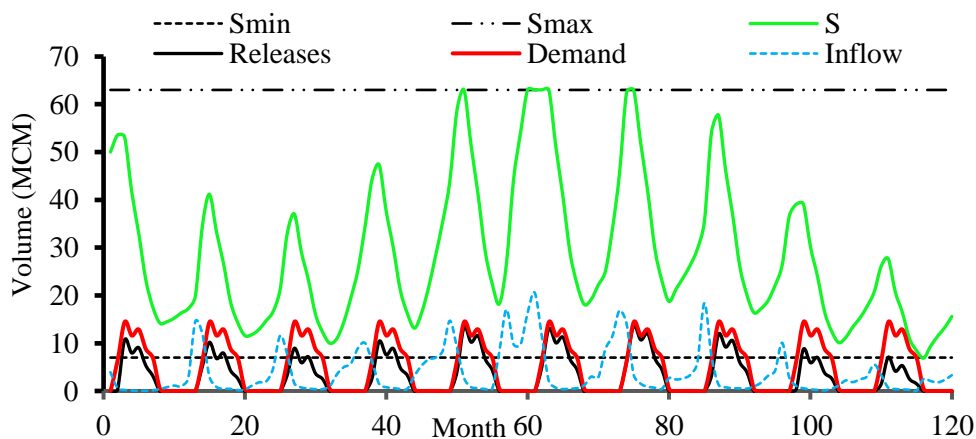
GTO				GWO			PSO				
w	β	P	حداکثر تکرار	اندازه جمعیت	حداکثر تکرار	اندازه جمعیت	C1, C2	wMin	wMax	حداکثر تکرار	اندازه جمعیت
۰/۸۵	۳	۰/۰۴	۱۰۰۰	۲۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۲	۰/۵	۰/۸	۱۰۰۰	۲۰۰



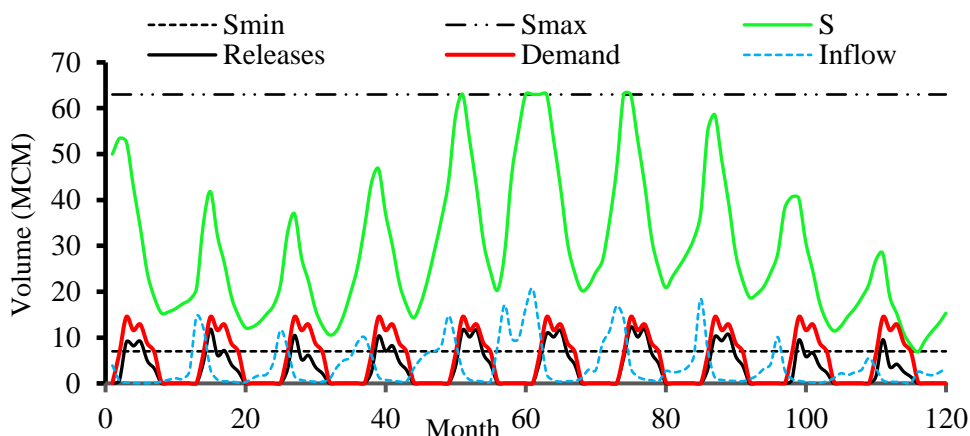
شکل ۵- تغییرات مقدار تابع هدف در طی فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO

بالا و دقت نشان از عملکرد بهتر الگوریتم GTO را در حل مسئله بهره‌برداری مخزن سد جامیشان نسبت به الگوریتم‌های GWO و PSO دارد. نتایج مدل بهینه بهره‌برداری از سد مخزنی جامیشان با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO در قالب شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است.

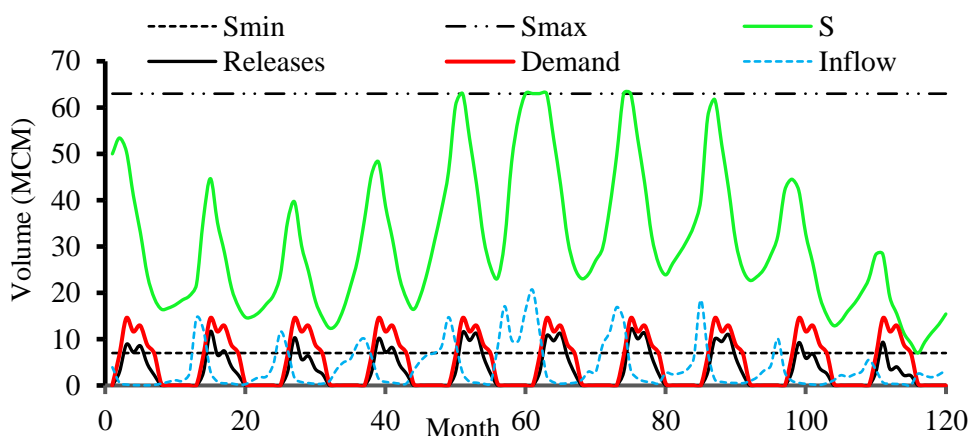
الگوریتم‌های GTO و GWO در تعداد تکرار و تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف کمتری به مقدار کمینه تابع هدف نسبت به الگوریتم PSO دست یافته‌اند. همچنین مقدار تابع هدف محاسبه شده توسط الگوریتم GTO مقدار کمتری نسبت به مقدار محاسباتی توسط الگوریتم GWO دارد. دو عامل سرعت همگرایی



شکل ۶- مقادیر خروجی، تقاضا و حجم مخزن بر اساس GTO



شکل ۷- مقادیر خروجی، تقاضا و حجم مخزن بر اساس GWO



شکل ۸- مقادیر خروجی، تقاضا و حجم مخزن بر اساس PSO

بهره‌برداری که با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO حل شده‌است نشان می‌دهد. در این جدول شاخص‌های ارزیابی خطا α ، β و γ محاسبه شده‌است. هرچه مقادیر شاخص‌های RMSE، MAE، RSR و γ اعداد کوچک‌تر و شاخص‌های NSE، α و β اعداد بزرگ‌تری باشند نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO در حل مدل بهینه بهره‌برداری است. مقادیر شاخص RMSE برای الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO به ترتیب برابر ۳/۰۹، ۲/۹۹ و ۲/۸۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. که نشان می‌دهد نتایج این الگوریتم‌ها برای حل مدل بهره‌برداری بسیار مناسب بوده و کارایی الگوریتم GTO بیشتر از GWO و PSO است. شاخص RSR در بهترین حالت نزدیک صفر است. مقادیر کمتر از ۰/۷ برای این شاخص نشان از نتایج رضایت‌بخش روش‌های به کار رفته بود و در مطالعه حاضر، مقادیر آن برای

شکل ۶ تا ۸ مقادیر حجم رهاسازی آب در ماه‌های مختلف دوره که به ترتیب بر اساس الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO تعیین شده‌اند، نشان می‌دهند. در این شکل‌ها حجم مخزن در ماه‌های مختلف، حجم حداکثر، حجم مرده، حجم جریان ورودی و مقادیر تقاضا برای آب نیز ارائه شده‌است. در شکل‌های ۶ تا ۸ مقادیر ورودی به مخزن در شروع سال‌های بهره‌برداری به نسبت مقادیر کمتری داشته‌است، بنابراین مخزن در این سال‌ها خالی شده است و تقریباً برابر حجم مرده شده است. در ماه‌های میانی دوره آورد رودخانه بیشتر بوده و مخزن پر شده است. و در انتهای دوره مجدداً خالی شده‌است. به همین دلیل مقادیر رهاسازی جریان در ماه‌های آخر دوره کمتر از مقادیر نیاز پایین‌دست هستند. در بعضی از ماه‌ها سد سرریز داشته است. حجم مخزن در دوره بهره‌برداری در بازه هفت و ۶۳ میلیون مترمکعب پر و خالی می‌شود. در شکل‌های ۶ تا ۸ عملکرد مطلوب مدل را در تعیین مقادیر رهاسازی از مخزن توسط مدل بهینه بهره‌برداری که با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO حل شده است به تصویر کشیده است. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل بهینه

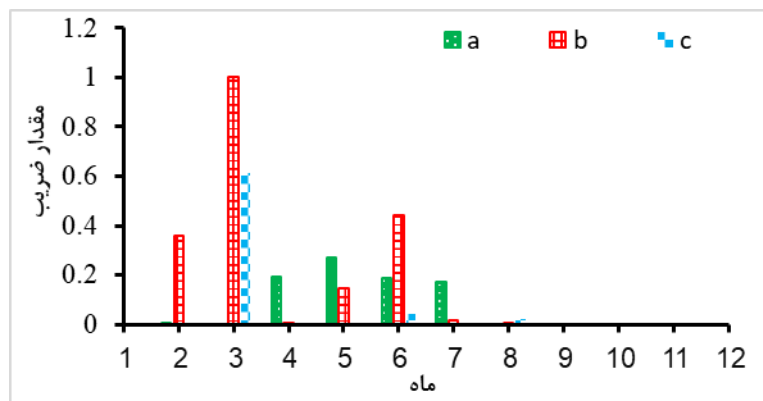
برای الگوریتم GWO به ترتیب برابر ۰/۶۸، ۳۶/۴ و ۲۵٪ و برای الگوریتم PSO به ترتیب برابر با ۰/۶۵، ۳۲٪ و ۲۹٪ است. لذا براساس شاخص‌های ارزیابی، همگرایی سریعتر و دقت بیشتر رتبه الگوریتم‌های GTO برابر یک، GWO برابر دو و PSO برابر سه است. با توجه به عملکرد بالای GTO در مدل بهینه بهره‌برداری از مخزن سد جامیشان برای تعیین مقادیر آب رهاسازی شده از آبگیر سد (منحنی فرمان) از رابطه ۴۱ بصورت تابعی از حجم مخزن سد (S_t)، مقدار جریان ورودی به مخزن (I_t) و مقادیر نیاز پایین‌دست (D_t) استفاده شد و ضرایب معادله برای هر ماه بصورت شکل ۹ ارائه گردید.

$$R_t = a \times S_t + b \times I_t + c \times D_t \quad (\text{رابطه ۴۱})$$

الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO به ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۵۵ و ۰/۵۲ می‌باشد. با توجه به مقادیر شاخص RSR نتایج حل این الگوریتم‌ها رضایت‌بخش و بسیار مناسب ارزیابی می‌شود. شاخص NSE می‌تواند در بازه $[-\infty, 1]$ تغییر نماید. اگر مقادیر NSE در بازه $[0, 1]$ تغییر نماید نشان کارایی بسیار خوب مدل و اگر مقادیر NSE در بازه $[0, 0.75]$ باشد، نتایج مدل رضایت‌بخش است. مقادیر شاخص NSE محاسبه شده برای حل مدل بهره‌برداری با الگوریتم‌های PSO، GWO و GTO به ترتیب برابر ۰/۶۸، ۰/۷ و ۰/۷۳ می‌باشد. که نشان می‌دهد نتایج مدل‌ها رضایت‌بخش و تقریباً بسیار مناسب است. مقادیر شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری برای الگوریتم GTO به ترتیب برابر ۰/۶۹، ۰/۳۶ و ۰/۲۳ می‌باشد. همین مقادیر

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های بکار رفته در حل بهینه مدل بهره‌برداری

الگوریتم	تابع هدف	RMSE(MCM)	MAE(MCM)	RSR	NSE	α (%)	β (%)	ν (%)
GTO	۴/۷۰	۲/۸۶	۱/۸۵	-۰/۵۲	-۰/۷۳	۶۹	۳۶	۲۳
GWO	۵/۱۲	۲/۹۹	۱/۹۶	-۰/۵۵	-۰/۷۰	۶۸	۳۶/۴	۲۵
PSO	۶/۳۸	۳/۰۹	۲/۰۹	-۰/۵۶	-۰/۶۸	۶۵	۳۲	۲۹



شکل ۹- ضرایب حجم، ورودی و نیاز در معادله مقدار رهاسازی آب در مدل بهینه بهره‌برداری

GTO، GWO و PSO به ترتیب ۴/۷، ۵/۱۲ و ۶/۳۸ بدست آمد، که توانایی بالای الگوریتم GTO را در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از مخزن را نشان می‌دهد. شاخص‌های ارزیابی خطا نیز برای بررسی نتایج کار استفاده شد. شاخص‌های RMSE، MAE، RSR، NSE، α ، β و ν نشان دادند که الگوریتم GTO نسبت به الگوریتم‌های GWO و PSO دارای دقت بیشتری است. همچنین الگوریتم GTO در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن علاوه بر دقت سرعت همگرایی بالای آن نیز قابل توجه است. اصولاً علت اصلی توسعه الگوریتم‌های فرا ابتکاری عامل‌های دقت و سرعت حل است. لزوماً همه الگوریتم‌ها برای مسائل پیچیده مهندسی دارای دقت بالایی نیستند و ممکن است تنظیم فاز

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به قابلیت‌ها و راندمان بالای الگوریتم‌های فرا ابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم GTO برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد جامیشان استفاده شد. الگوریتم GTO از الگوریتم‌های نوین فرا ابتکاری است که از پنج عملگر مختلف برای اکتشاف و استخراج بهره می‌گیرد. این الگوریتم از سه عملگر در فاز اکتشاف و دو عملگر در فاز استخراج استفاده می‌کند. الگوریتم GTO توانایی بالایی در تنظیم فازهای اکتشاف و استخراج و تعادل بین آنها دارد. نتایج حاصل از این الگوریتم را با الگوریتم‌های GWO و PSO مقایسه شد. مقادیر تابع هدف که کمینه‌سازی کمبود نیازهای آبی است برای الگوریتم‌های

مطلوبی برخوردار است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

اکتشاف و استخراج به‌درستی انجام نشود. الگوریتم GTO در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن که جزء مسائل پیچیده مهندسی محسوب می‌شود بخوبی عمل نموده‌است. و از عملکرد

REFERENCES

- Abdollahzadeh, B., Soleimanian Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(10), 5887-5958 .
- Afshar, M. (2012). Large scale reservoir operation by constrained particle swarm optimization algorithms. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), 75-87 .
- Ahmadi, A., Han, D., Kakaei Lafdani, E., & Moridi, A. (2015). Input selection for long-lead precipitation prediction using large-scale climate variables: a case study. *Journal of Hydroinformatics*, 17(1), 114-129 .
- Ahmadianfar, I., Kheyrandish, A., Jamei, M., & Gharabaghi, B. (2021). Optimizing operating rules for multi-reservoir hydropower generation systems: An adaptive hybrid differential evolution algorithm. *Renewable Energy*, 167, 774-790 .
- Bolouri-Yazdeldi, Y., Haddad, O. B., Fallah-Mehdipour, E., & Mariño, M. (2014). Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation. *Water resources management*, 28(3), 715-729 .
- Bozorg-Haddad, O., Azarnivand, A., Hosseini-Moghari, S.-M., & Loáiciga, H. A. (2017). Optimal operation of reservoir systems with the symbiotic organisms search (SOS) algorithm. *Journal of Hydroinformatics*, 19(4), 507-52 .
- Bozorg-Haddad, O., Karimirad, I., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Loáiciga, H. A. (2015). Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. *Journal of water resources planning and management*, 141(8), 0404097
- Chang, F. J., Chen, L., & Chang, L. C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(11), 2277-2289 .
- Che, G., Liu, L., & Yu, Z. (2020). An improved ant colony optimization algorithm based on particle swarm optimization algorithm for path planning of autonomous underwater vehicle. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(8), 3349-3354 .
- Chong, K. L., Lai, S. H., Ahmed, A. N., Jaafar, W. Z. W & ,El-Shafie, A. (2021). Optimization of hydropower reservoir operation based on hedging policy using Jaya algorithm. *Applied Soft Computing*, 106, 107325 .
- Choopan, Y., & Emami, S. (2019). Optimal Operation of Dam Reservoir Using Gray Wolf Optimizer Algorithm (Case Study: Urmia Shaharchay Dam in Iran). *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 3(3), 47-61 .
- Dahmani, S., & Yebdri, D. (2020). Hybrid algorithm of particle swarm optimization and Grey Wolf optimizer for reservoir operation management. *Water resources management*, 34(15), 4545-4560 .
- Davani Motlagh, A., Sadeghian, M., Javid, A., & Asgari, M. (2021). Optimization of Dam Reservoir Operation Using Grey Wolf Optimization and Genetic Algorithms (A Case Study of Taleghan Dam). *International Journal of Engineering*, 34(7), 1644-1652. (In Farsi)
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020a). Application of a new approach in optimizing the operation of the multi-objective reservoir. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(3), 1-20. (In Farsi)
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020b). Evaluation of Whale, Fruit Fly and Cuckoo Search Algorithms in Optimizing Multi-Objective Operation of Golestan Dam Reservoir Based on Multi-Criteria Decision-Making Method .
- Donyaii, A., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020c). Water reservoir multiobjective optimal operation using Grey Wolf optimizer. *Shock and Vibration*, 2020 (In Farsi) .
- Emami, S., Choopan, Y., & Salmasi, F. (2020). Presentation of a Method Based on Gray Wolf Optimizer and Imperialist Competitive Algorithms in Optimal Operation of Dam Reservoir. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5), 1027-1046 . (In Farsi)
- Fallah-Mehdipour, E., Haddad, O. B., & Mariño, M. (2011). MOPSO algorithm and its application in multipurpose multireservoir operations. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 794-811 .
- Feng, Z.-k., Niu, W.-j., Liu, S., Luo, B., Miao, S.-m., & Liu, K. (2020). Multiple hydropower reservoirs operation optimization by adaptive mutation sine cosine algorithm based on neighborhood search and simplex search strategies. *Journal of hydrology*, 590 ,125223 .
- Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. A., & Mariño, M. A. (2016). Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(10), 04016041 .
- Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2019). Application of non-animal-inspired evolutionary algorithms to reservoir operation: an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7), 1-2 .¹
- Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2020). Application of particle swarm optimization to water management: an introduction and overview. *Environmental*



- Monitoring and Assessment*, 192(5), 1-18 .
- Karami, H., Ehteram, M., Mousavi, S.-F., Farzin, S., Kisi, O., & El-Shafie, A. (2019). Optimization of energy management and conversion in the water systems based on evolutionary algorithms. *Neural computing and applications*, 31(10), 5951-5964.
- 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 .
- Masoumi, F., Salimi, N., & Zafari, N. (2020). Evaluation of Grasshopper Optimization Algorithm for Optimal Operation of Surface Water Reservoirs with Reliability Constraints. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(2), 579-592 .(In Farsi)
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61 .
- Moeini, R., & Babaei, M. (2017). Constrained improved particle swarm optimization algorithm for optimal operation of large scale reservoir: proposing three approaches. *Evolving Systems*, 8(4), 287-301 .(In Farsi)
- Mohammadi, M., Mousavi, S. F., Farzin, S., & Karami, H. (2019). Optimal operation of dam reservoir using whale optimization algorithm and its hybrid with genetic algorithm based on multi-criteria decision making. *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(2), 281-293(In Farsi) .
- Mohammadrezapour, O., & Zeynali, M. (2018). Comparison of meta-heuristic algorithms in the optimal operation of multi-reservoir (a case study: Golestan and Voshmgir dams). *Journal of Water and Soil Science*, 22(1) .
- Montalvo, I., Izquierdo, J., Pérez, R., & Tung, M. M. (2008). Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems. *Computers & Mathematics with Applications*, 56(3), 769-776 .
- Noori, M., Emadi, A., & Fazloulou, R. (2020). Agent Based Model Development for Optimal Water Allocation from Dam Reservoir Case Study: Shahid Rajaee Dam. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(4), 937-948 .(In Farsi)
- Ostadrahimi, L., Mariño, M. A., & Afshar, A. (2012). Multi-reservoir operation rules: multi-swarm PSO-based optimization approach. *Water resources management*, 26(2), 407-427 .
- Rani, D., Pant, M., & Jain, S. (2020). Dynamic programming integrated particle swarm optimization algorithm for reservoir operation. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 11(2), 515-529 .
- Reddy, M. J., & Kumar, D. N. (2007). Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 686-701 .
- SaberChenari, K., Abghari, H., & Tabari, H. (2016). Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(12), 1-11 .
- Sharifi, M. R., Akbarifard, S., Qaderi, K., & Madadi, M. R. (2021). Developing MSA algorithm by new fitness-distance-balance selection method to optimize cascade hydropower reservoirs operation. *Water resources management*, 35(1), 385-406 .
- Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of water resources planning and management*, 119(4), 455-472 .
- Yaghoubi, B., Hosseini, S. A., Nazif, S., & Daghighi, A. (2020). Development of reservoir's optimum operation rules considering water quality issues and climatic change data analysis. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102467 .
- Yan, D., Zhuang, K., Xu, B., Chen, D., Mei, R., Wu, C., & Wang, X. (2017). Excitation current analysis of a hydropower station model considering complex water diversion pipes. *Journal of Energy Engineering*, 143(5), 04017012 .
- Zhang, R., Zhou, J., Ouyang, S., Wang, X., & Zhang, H. (2013). Optimal operation of multi-reservoir system by multi-elite guide particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 48, 58-68 .