

Research Article

Application of Teaching-Learning Based Optimization Algorithms in Operation of Eleviyan Reservoir Considering Environmental Demand

R Dashti¹, V Nourani², H Feizi³, MT Sattari^{4*}

Received: July 27, 2022

Accepted: November 7, 2022

Received in Revised: October 31, 2022

Published online: September 23, 2023

1-M.SC. Engineering and Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

2-Prof. Dept. of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

3-PhD. Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

4-Assoc. Prof. Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.

*Corresponding Author, E-mail: mtsattar@gmail.com

Abstract

Background and Objectives

Generally, Iran has an arid and semi-arid climate with a high population. In recent years, the shortages of surface water and groundwater have become a main national challenge in Iran. The optimum operation of reservoirs is one of the most critical challenges in water resources management. In a situation where the drying crisis of the Urmia Lake is serious, comprehensive management of water resources in this basin, allocation of environmental water rights, and the optimal operation of dam reservoirs are the most principled methods of allocation to combat the drying crisis of this lake. The choice of management policies and optimization method depends on the system specification, availability of data, type of objective function, constraints, and variables. The Eleviyan dam is located on the Sufi-Chay River and is one of the main existing dams in the Urmia Lake basin. Therefore, in this research, the performance of the Teaching Learning Based Optimization algorithm (TLBO) is compared with Improved Harmony Search (IHS) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms in order to optimize the Eleviyan reservoir operation, located across the Sufi-Chay River.

Methodology

Considering the vital importance of environmental flow to prevent the death of Urmia Lake, the minimum environmental flow of the Sufi-Chay River was estimated by two hydrological methods: Tennant (first scenario) and Flow Duration Curve analysis (second scenario). The Teaching Learning Based Optimization algorithm, Improved Harmony Search, and Particle Swarm Optimization algorithms were used for optimization. The optimization models were written in the form of two scenarios, taking into account the complete provision of the minimum environmental flow, the municipal demands, and industry, and minimizing the severity of agricultural shortages. In order to check the performance of the studied algorithms in the optimal exploitation of the reservoir, the performance indicators of the reservoir including reliability, vulnerability, and stability index of the reservoir were used.



Findings

The results in this study showed better performance of the TLBO algorithm method compared with both scenarios. In TLBO algorithm, the objective function values for both scenarios are calculated, respectively 2.43 and 7.54. While with Improved Harmony Search algorithm objective function values are calculated respectively 2.81 and 8, and with the Particle Swarm Optimization algorithm objective function values are calculated 3.34 and 8.45 with both Tenant and Flow Duration Curve (FDC) methods. Based on the obtained results, the TLBO algorithm has been able to supply the downstream demand of the dam. So, for the first scenario, it will provide 81.40% and for the second scenario, 62.55% of the demands. The release of observation has been able to provide about 70% of the total demand and according to the situation of Urmia Lake, the current policy of the dam is not suitable and should be revised. Taking place according to the second scenario (flow duration curve method), in case of reducing about 8% of agricultural expenses and allocating it to the environmental flow, the problem of water rights of Urmia Lake from the Sufi-Chay River will also be solved to some extent.

Conclusion

One of the main causes of drying of the Urmia Lake is the reduction of inflow to the Lake due to the development of agricultural lands, allocation of irregular water resources to the agricultural sector regardless of the environmental right of water, and irregular yields of surface and groundwater resources. Regarding the scenarios, it seems that if the downstream agricultural demand is reduced by about 8% in methods such as lessened irrigation of gardens, changes to crop cultivation, and revising the curve of dams around the Lake, it would aid the recovery of Urmia Lake and play an important role in adequately supplying the downstream needs. The results show that managing the Eleviyan dam is required to reduce the agricultural demand through the methods such as reducing the crop area and changing the cropping patterns such as low consumption plant cultivation or changing the type of irrigation method in order to optimize the operation of water resources in the basin. Otherwise, water stress will increase in the basin. The results in this study showed a higher performance of the Teaching algorithm compared with the other methods employed in the optimum release from the Eleviyan reservoir with considering environmental flow.

Keywords: Eleviyan reservoir, Environmental flow, Improved Harmony Search algorithm, Optimum Operation of reservoir, Teaching Learning Based Optimization algorithm

مقاله پژوهشی

کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش در بهره‌برداری از مخزن سد

علویان با لحاظ حق آبه زیست‌محیطی

رضا دشتی^۱، وحید نورانی^۲، هاجر فیضی^۳، محمدتقی ستاری^{۴*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت ویرایش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۷/۱

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز
 - ۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز
 - ۳- دکترای مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
 - ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
- *مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی mtsattar@gmail.com

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهاست. در این تحقیق عملکرد الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش در مقایسه با الگوریتم‌های جستجوی هارمونی اصلاح‌شده و مجموعه ذرات به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان، واقع بر روی رودخانه صوفی‌چای موردبررسی قرار گرفت. جریان زیست‌محیطی رودخانه صوفی‌چای با دو روش هیدرولوژیک تنانت (سناریوی اول) و تحلیل منحنی تداوم جریان (سناریوی دوم) برآورد شد. سپس، مدل بهینه‌سازی در قالب دو سناریو و با در نظر گرفتن تأمین کامل حداقل جریان زیست‌محیطی، شرب، صنعت و به حداقل رساندن شدت کمبودهای کشاورزی نوشته شد. جهت بررسی عملکرد الگوریتم‌های موردبررسی در بهره‌برداری بهینه از مخزن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و شاخص پایداری مخزن استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم یادگیری و آموزش نسبت به روش‌های موردبررسی برای هر دو سناریو بود. به‌طوری‌که در الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش، مقادیر تابع هدف برای سناریوی اول و دوم به ترتیب برابر ۲/۴۳ و ۷/۵۴ حاصل شد. درحالی‌که در الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح‌شده مقادیر تابع هدف برای سناریوی اول و دوم به ترتیب برابر ۲/۸۱ و ۸ و برای الگوریتم مجموعه ذرات به ترتیب ۳/۳۴ و ۸/۴۵ به‌دست آمد. به‌طورکلی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از قابلیت بالای الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش در محاسبه مقادیر بهینه آب رهاشده از مخزن سد علویان با لحاظ حق آبه زیست‌محیطی بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی، الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری، بهره‌برداری بهینه از مخزن، حق آبه زیست‌محیطی، سد علویان

مقدمه

احداث بی‌رویه سدها و توسعه اراضی زیر کشت از عمده‌ترین علل خشکیدگی دریاچه ارومیه می‌باشد. مدیریت جامع منابع آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تخصیص حق‌آبه زیست‌محیطی دریاچه و بهره‌برداری بهینه از آب مخازن سدها از اصولی‌ترین روش‌های مبارزه با بحران خشک شدن دریاچه ارومیه است. انتخاب روش بهینه‌سازی به خصوصیات سیستم در نظر گرفته‌شده، در دسترس بودن داده‌ها، نوع تابع هدف، قیود و متغیرها بستگی دارد (لابادیه ۲۰۰۴). تاکنون از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن استفاده‌شده است. با ظهور روش‌های فراکاوشی، انقلابی در زمینه بهینه‌سازی صورت گرفت. این روش‌ها نه وابسته به نوع مسئله از نظر خطی و غیرخطی بودن هستند و نه نیازی به گسسته‌سازی مسئله دارند، همچنین دارای سرعت و دقت مناسب در مقایسه با سایر روش‌های موجود می‌باشند (رانی و موریرا ۲۰۱۰). روش‌های فراکاوشی نیز در درون خود به روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که علت این تنوع و معرفی روش‌های جدید را می‌توان بهبود بخشیدن دقت و افزایش سرعت رسیدن به جواب بهینه دانست. بررسی منابع نشان می‌دهد در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن در داخل و خارج کشور از روش‌های فراکاوشی گوناگونی استفاده‌شده است. پرادهان و تریپانی (۲۰۱۳) به بهره‌برداری بهینه چندمنظوره از مخزن هیدراکورد با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک با سیاست فعلی، بیانگر توانایی و تأثیر این الگوریتم بود. سونالیا و سوریانارایانا (۲۰۱۴) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهره‌برداری بهینه از مخزن سد یوکای در هند پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک می‌تواند به‌طور کامل نیازهای پایین‌دست آبیاری را تأمین کند و رهاسازی را به حداقل برساند. جی و همکاران (۲۰۱۴) برای عملکرد پیش‌بینی تقاضای آب ساعتی از سیستم

تأمین آب در شانگهای، از روش حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LS-SVM) و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم TLBO عملکرد بهتری نسبت به LS-SVM دارد. بشیری‌اترایی و همکاران (۲۰۱۵) کاربرد الگوریتم جستجوی هارمونی را در بهره‌برداری بهینه از مخزن نرماب مورد مطالعه قرار داده و نتایج حاصله را با روش بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل و روش برنامه‌ریزی غیرخطی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد، الگوریتم جستجوی هارمونی، برای بهینه کردن مقدار تابع هدف نتایج رضایت‌بخشی در سرعت همگرایی نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشد. صابرچناری و همکاران (۲۰۱۶) از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد مهاباد استفاده کرده و تابع هدف را به‌صورت کمینه‌سازی اختلاف مقدار رهاسازی با نیاز آبی پایین‌دست بر اساس برقراری رابطه پیوستگی ارائه دادند نتایج نشان داد که مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک حتی در شرایط بحرانی از خشکسالی کارایی مناسبی داشته و می‌تواند نیاز آبی پایین‌دست را تأمین کند. چن و همکاران (۲۰۱۶) برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در استان هوبی چین، به‌منظور کاهش تأثیر خشکسالی، از الگوریتم کلونی زنبورعسل، الگوریتم تکامل تفاضلی و الگوریتم ازدحام ذرات استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل یکپارچه نسبت به سه مدل گفته شده می‌تواند به‌صورت قابل توجهی در کاهش تأثیر خشکسالی نقش داشته باشد. ونخیا و همکاران (۲۰۱۸) برای بهره‌برداری بهینه و درازمدت از مخزن از الگوریتم TLBO استفاده کردند. نتایج نشان داد که این الگوریتم از مزایای دقت محاسباتی بالا و زمان محاسبات کوتاه برخوردار است. کومار و یاداو (۲۰۲۱) با هدف به حداکثر رساندن تخصیص آب مخزن اوکای در هند برای تأمین آب آبیاری، مصارف خانگی و صنعتی از الگوریتم‌های TLBO، PSO و DE استفاده کردند. نتایج

این مقاله، به نظر می‌رسد از الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش در بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده نشده است و برای اولین بار این تحقیق به بررسی عملکرد این الگوریتم در بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌پردازد. همچنین، مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌کار رفته در این تحقیق با در نظر گرفتن نیاز زیست‌محیطی محاسبه‌شده با روش‌های تنانت و منحنی تداوم جریان برای اولین بار در سد علویان مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از محدودیت‌های این تحقیق، به دست آوردن مقدار بهینه پارامترهای تنظیم‌کننده الگوریتم‌ها است. عدم تنظیم بهینه این پارامترها سبب کند شدن سرعت همگرایی و ضعف عملکرد الگوریتم‌ها می‌شود.

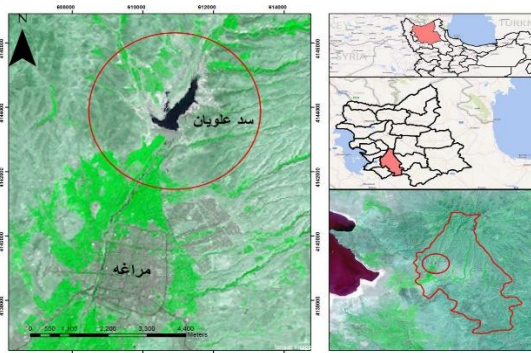
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد علویان در دامنه جنوبی کوه سهند در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، بر روی رودخانه صوفی‌چای در ۳/۵ کیلومتری شمال شهر مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث شده است (شکل ۱). حجم‌های حداقل و حداکثر سد به ترتیب برابر ۳ و ۶۰ میلیون مترمکعب و میانگین تبخیر و بارش سالانه به ترتیب ۱۸۸۵/۵۱ میلی‌متر و ۳۳۰/۵۵ میلی‌متر است. مساحت حوضه سد ۹۱۴/۳ کیلومترمربع بوده و از اهداف اصلی احداث سد تأمین آب موردنیاز کشاورزی در محدوده شهرستان مراغه و بناب با وسعتی برابر با ۱۲۰۰ هکتار، تأمین بخشی از آب شرب شهرستان مراغه، تأمین آب موردنیاز صنایع منطقه و همچنین مهار کردن سیلاب رودخانه صوفی‌چای است. با توجه به گزارش کمیته اجتماعی فرهنگی ستاد احیای دریاچه ارومیه (بی نام ۲۰۱۵)، سهم رودخانه صوفی‌چای در تأمین آب دریاچه ارومیه ۲٪ است.

بر اساس روش طبقه‌بندی آمبرژه، اقلیم‌های مورد انتظار در زیرحوضه صوفی‌چای خشک سرد، نیمه‌خشک سرد و اقلیم ارتفاعات می‌باشند. برای

نشان داد که الگوریتم TLBO براساس شاخص‌های عملکرد مختلف قابل اعتماد است و می‌تواند برای بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده شود. پاتنایک و سواين (۲۰۲۱) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن از تکنیک‌های فراابتکاری PSO و TLBO استفاده کردند و هدف از این مطالعه را توسعه سیاستی برای بهینه‌سازی آزادسازی کل آب برای آبیاری، تولید برق و صنایع در دوره غیرموسمی در مخزن چندمنظوره هیراکود در هند بیان کردند. نتایج نشان داد که روش‌های استفاده شده کارایی خوبی در زمینه مورد مطالعه دارند. جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان با استفاده از روش‌های کلاسیک و فراکاووشی مطالعات زیادی انجام گرفته است، لیکن هیچ‌کدام از مطالعات فوق‌حق‌آبه زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را در معادله بیلان دخالت نداده‌اند. این در حالی است که تعیین نیاز زیست‌محیطی و در نظر گرفتن آن به‌عنوان یک محدودیت در مدل بهینه‌سازی مخزن به‌منظور جلوگیری از خشک شدن دریاچه ضروری است. هدف اساسی این مطالعه، بررسی عملکرد الگوریتم نوین بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مجموعه ذرات و جستجوی هارمونی اصلاح‌شده در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان هست که با در نظر گرفتن تأمین کامل نیاز شرب، صنعت و حق‌آبه زیست‌محیطی دریاچه ارومیه بر اساس دو روش هیدرولوژیک تنانت و تحلیل منحنی تداوم جریان بوده و باهدف کاهش شدت کمبودهای کشاورزی در طول دوره بهره‌برداری مورد مطالعه در این سد می‌باشد. لذا با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه و شرایط حاکم بر مخزن و اهداف و محدودیت‌های خاص مخزن و داده‌های در دسترس، تعیین حجم بهینه‌ی آب ذخیره‌شده در مخزن سد و همچنین مقدار برداشت بهینه در دوره‌های مختلف بهره‌برداری از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. با توجه به بررسی منابع صورت گرفته تا زمان نگارش

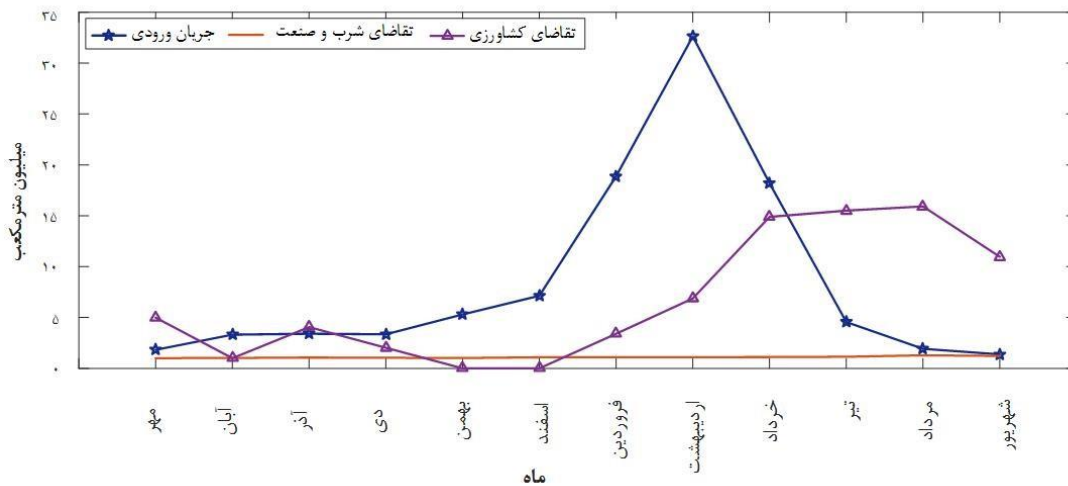


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد علویان.

محاسبه مقدار حجم تبخیر از سطح دریاچه و همچنین بارندگی مستقیم به سطح دریاچه سد، مساحت دریاچه با استفاده از منحنی سطح-حجم-ارتفاع سد و با رابطه ریاضی ۱ حاصل گردید.

$$A_t = -0.0006S_t^2 + 0.072S_t + 0.123 \quad [1]$$

$$(R^2 = 0.993)$$



شکل ۲- متوسط جریان ورودی، توزیع نیاز بخش کشاورزی، شرب و صنعت در مقیاس ماهانه در مخزن سد. علویان.

سد ارائه شده است. در این مطالعه دوره آماری ۱۴ ساله (از سال آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴) جریان ورودی به مخزن سد مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های آماری داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

نیاز زیست‌محیطی

از عوامل اصلی بحران دریاچه ارومیه، کاهش سهم جریان ورودی از رودخانه‌ها به دریاچه در سال‌های گذشته، در اثر مصرف زیاد آب در بخش کشاورزی بوده است. در روند احیای دریاچه ارومیه، تخصیص سهم جریان زیست‌محیطی برای هر یک از ده رودخانه اصلی و تضمین تداوم جریان تا دریاچه، از راهکارهای اصلی و پایدار است (احمدی‌پور و یاسی ۲۰۱۴). نیازهای آبی زیست‌محیطی، دربرگیرنده

جدول ۱- ویژگی‌های آمار پایه هیدرولوژیک سد علویان در طی دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۹۴.

آمار پایه هیدرولوژیک	میانگین	انحراف از معیار	بیشینه مقدار	کمینه مقدار
نیاز کشاورزی (MCM)	۶/۶۴	۶/۱۲	۱۵/۹۲	۰/۰۰
نیاز شرب صنعت (MCM)	۱/۱۰	۰/۲۷	۲/۰۳	۰/۰۰
بارش ماهانه مخزن (mm)	۲۷/۵۵	۲۱/۱۱	۶۰/۳۰	۲/۵۷
تبخیر ماهانه مخزن (mm)	۱۵۷/۱۳	۱۴۱/۲۰	۲۸۴/۷۷	۰/۰۰

که در آن، A_t مساحت دریاچه سد علویان در ماه t ام به کیلومتر مربع و S_t حجم آب نخیره شده در مخزن سد علویان به میلیون مترمکعب می‌باشد. در شکل ۲ رژیم جریان ورودی به مخزن و توزیع نیاز ماهانه پایین دست

(Q_{70})، به‌عنوان شاخص جریان کم‌آبی، برای حداقل جریان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود (پیرس ۲۰۰۴). جریان Q_{95} معرف جریانی هست که در ۹۵ درصد مواقع جریان دارد و در این تحقیق به‌عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر نیاز زیست‌محیطی با روش تنانت اصلاح‌شده و تحلیل منحنی تداوم جریان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه صوفی چای با روش تنانت و تحلیل منحنی تداوم جریان در مقیاس ماهانه (MCM).

ماه	حجم جریان براساس تنانت	حجم جریان براساس منحنی تداوم جریان
مهر	۰/۸۴۹	۱/۲۴
آبان	۰/۸۴۹	۱/۴۹
آذر	۰/۸۴۹	۱/۸۱
دی	۰/۸۴۹	۲/۰۸
بهمن	۲/۵۴۸	۱/۹۹
اسفند	۲/۵۴۸	۲/۳۶
فروردین	۲/۵۴۸	۶/۸۵
اردیبهشت	۲/۵۴۸	۱۳/۶۱
خرداد	۲/۵۴۸	۵/۵۷
تیر	۲/۵۴۸	۱/۱۵
مرداد	۰/۸۴۹	۰/۷۱
شهریور	۰/۸۴۹	۰/۸۸

همان‌طور که از جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد، نیاز زیست‌محیطی محاسبه‌شده از روش تنانت برای یک سال آبی برابر با ۲۰/۳۸ و از روش تحلیل منحنی تداوم جریان برابر با ۳۹/۷۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش منحنی تداوم جریان ۱/۹۵ برابر بیشتر از روش تنانت جریان زیست‌محیطی رودخانه صوفی‌چای را در نظر می‌گیرد که این مقدار می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در مدیریت آب حوضه دریاچه ارومیه و رودخانه صوفی‌چای داشته باشد. نتایج این بخش با نتایج شاعری کریمی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. آن‌ها از پنج روش

رژیم‌های آبی است که می‌توانند با حداقل ریسک، ارزش‌های اکولوژیکی اکوسیستم‌های آبی را حفظ نمایند (بیران ۲۰۰۸). در این پژوهش برای برآورد حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه صوفی‌چای از دو روش هیدرولوژیک تنانت و تحلیل منحنی تداوم جریان استفاده شده و نتایج حاصل تحت دو سناریو با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

روش هیدرولوژیک تنانت^۱ یا مونتانا

این روش از ساده‌ترین و سریع‌ترین روش‌های هیدرولوژیک برای تعیین نیاز آب زیست‌محیطی محسوب می‌شود. در سال ۱۹۷۶، تنانت روشی برای تعیین جریان زیست‌محیطی موردنیاز برای ماهی‌ها معروف به روش (مونتانا) معرفی کرد (تنانت ۱۹۷۶). در این روش، درصد‌های مختلفی از متوسط جریان سالانه^۲ (MAR) در نظر گرفته می‌شود (ثارمه ۲۰۰۳). روش تنانت، از متوسط جریان سالانه برای دو ۶ ماهه سال که در آن اکوسیستم رودخانه در حد قابل‌قبولی حفظ شود، استفاده می‌کند (تنانت ۱۹۷۶). سطح قابل‌قبول از این روش، با توجه به نشریه استاندارد وزارت نیرو، معادل ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برای فروردین تا شهریور (به‌عنوان دوره پرآبی) و ۱۰ درصد دبی متوسط سالانه برای مهر تا اسفند (به‌عنوان دوره کم‌آبی) می‌باشد (بی‌نام ۲۰۰۹). در این تحقیق از روش تنانت اصلاح‌شده با توجه به دبی رودخانه، ماه‌های بهمن تا تیر به‌عنوان دوره‌های پرآبی و ماه‌های مرداد تا دی به‌عنوان دوره‌های کم‌آبی در نظر گرفته شده است.

روش تحلیل منحنی تداوم جریان^۳ (FDCA)

یکی از خصوصیات مربوط به جریان آب در ارزیابی نوسانات و تغییرپذیری آب رودخانه از نظر زیست‌محیطی، منحنی تداوم جریان است. در این روش عموماً بده جریان در سطح اطمینان ۷۰٪ تا ۹۵٪ (Q_{95})

¹ Tenant

² Mean Annual Runoff

³ Flow Duration Curve Analysis

انتقال دانش را تعیین می‌کند. مقدار T_f به‌طور تصادفی و با احتمال $T_f = \text{round}[(1 + \text{rand}(0,1)) \cdot 2 - 1]$ می‌تواند ۱ یا ۲ باشد. راه‌حل موجود را می‌توان به‌صورت رابطه ۳ به‌روزرسانی کرد.

$$X_{\text{new},i} = X_{\text{old},i} + \text{Difference_Mean}_i \quad [۳]$$

$X_{\text{new},i}$ راه حل جدید و $X_{\text{old},i}$ راه حل قبلی می‌باشد.

در مرحله دوم (فاز یادگیری)، دانش حاصل از تعامل متقابل یادگیرنده‌ها میانگین سطح کلاس را بهبود می‌دهد. روند الگوریتم در فاز دوم به این ترتیب است که دو عضو از کلاس تصادفی با یکدیگر در تعامل قرار می‌گیرند و دانش حاصل از تعامل آن دو بر سطح دانش سایر اعضا تأثیر می‌گذارد. میزان تأثیر براساس رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} & \text{if } f(X_i) < f(X_j) \\ & X_{\text{new},i} = X_{\text{old},i} + r(X_j - X_i) \\ & \text{Else} \\ & X_{\text{new},i} = X_{\text{old},i} + r(X_j - X_i) \end{aligned} \quad [۴]$$

در صورت بهبود در تابع برازندگی این تأثیر پذیرفته می‌شود. فرایند مذکور تا یافتن پاسخ بهینه یا برآورد شرایط توقف تکرار می‌شود.

الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی (IHS)

در سال ۲۰۰۱، گیم و همکاران الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) را ارائه نمود که طرح کلی آن برگرفته از رفتار موسیقی‌دان‌ها در ساخت یک موسیقی است (گیم و همکاران ۲۰۰۱). الگوریتم IHS^5 توسط مهدوی و همکاران در سال ۲۰۰۷ بهبود یافته است. آن‌ها با مقایسه نتایج حاصل از کاربرد الگوریتم HS و IHS دریافتند که سرعت همگرایی به‌مراتب سریع‌تر و نتایج بهتری حاصل می‌شود (مهدوی و همکاران ۲۰۰۷). PAR و bw در الگوریتم HS، پارامترهای مهمی در میزان‌سازی دقیق بردارهای جواب بهینه و تنظیم سرعت همگرایی الگوریتم هستند. این دو پارامتر در الگوریتم HS به‌صورت عدد ثابت استفاده می‌شود و در طول تکرارهای جدیدتر تغییر نمی‌کند، این یک مانع

تنانت، تسمن، مدل ذخیره رومیزی (DRM)، روش محدوده تغییرپذیری (RVA) و انتقال منحنی تداوم جریان (FDC) برای محاسبه جریان زیست‌محیطی دریاچه ارومیه استفاده کردند و نتیجه گرفتند که دو روش FDC و DRM عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارند.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش (TLBO)

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش $TLBO^4$ الگوریتمی برگرفته از فرایند آموزش و یادگیری است که اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط رائو، ساوسانی و وخایار ارائه شد (رائو و همکاران ۲۰۱۱). این الگوریتم بر مبنای تأثیر آموزگار بر بازده دانش‌آموزان در یک کلاس بنا نهاده شده است و طی دو مرحله فرایند بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. کران‌های بالا و پایین متغیرها، تعداد تولید و تابع برازندگی ورودی این الگوریتم محسوب می‌شود. ابتدا اعضای کلاس با توجه به حدود کران متغیرها تولید می‌شوند. بهترین پاسخ با توجه به تابع برازندگی به‌عنوان استاد انتخاب می‌شود. در مرحله اول که فاز آموزش نامیده می‌شود، استاد سعی می‌کند با تأثیر بر سطح دانش اعضای کلاس میانگین آن را بالا برد تا سطح خود را افزایش دهد. با فرض اینکه M_i میانگین یک کلاس و T_i یک استاد در تکرار n م باشد، پس از آموزش استاد میانگین جدید بهبود می‌یابد و برابر T_i خواهد شد که با M_{new} نشان داده می‌شود. بنابراین پاسخ براساس اختلاف بین میانگین موجود و جدید طبق رابطه ۲ به‌روز می‌شود.

$$\text{Difference_Mean}_i = r_i(M_{\text{new}} - T_i M_i) \quad [۲]$$

که r_i یک عدد تصادفی بین $[0,1]$ و T_f فاکتور تدریس است که کیفیت آموزش و توانایی استاد در

⁴ Teaching-learning based optimization algorithm

⁵ Improved Harmony Search Algorithm

مدل ریاضی بهره‌برداری بهینه از مخزن

در روش‌های بهینه‌سازی مخزن، برای اینکه تابع هدف مسئله که معمولاً به صورت بیشینه‌سازی آب خروجی از مخزن سد یا کمینه‌سازی اختلاف بین نیاز آب پایین‌دست و آب رهاشده از مخزن سد تعریف می‌گردد، ارضا شود و متغیرهای تصمیم محاسبه گردند بایستی یک سری محدودیت‌ها و قیدها در رابطه با شرایط حاکم بر مسئله اعمال گردد. در این تحقیق، مقدار خروجی و حجم مخزن به ترتیب متغیر تصمیم و حالت می‌باشد. هدف مسئله در بهینه‌سازی، حداقل کردن مجذور شدت کمبودهای کشاورزی در طول دوره بهره‌برداری است. تابع هدف مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان به صورت معادله ۵ ارائه گردیده است (دشتی و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیق موردنظر دارای ۱۶۸ متغیر تصمیم به ازای هر پارامتر می‌باشد و تابع هدف از نوع غیرخطی می‌باشد و به همین دلیل برای حل تابع موردنظر بهترین روش استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی یا روش‌های فراابتکاری می‌باشد.

$$\text{Minimize} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{R(t) - D(t)}{D_{\max}} \right)^2 \quad t = 1, 2, \dots, T \quad [5]$$

در تمامی مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد. رابطه پیوستگی مورد استفاده در این پژوهش به صورت رابطه ۶ می‌باشد. میزان تبخیر از سطح مخزن و همچنین میزان بارش به سطح مخزن برای محاسبه میزان ذخیره مخزن، در هر ماه طبق رابطه ۷ بیان شده است.

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) + PP(t) - EV(t) - \text{Spill}(t) - R(t) - DM(t) - DE(t) \quad [6]$$

$$\begin{cases} PP(t) = P(t) * A(t) \\ EV(t) = E(t) * A(t) \end{cases} \quad [7]$$

بزرگی است که در الگوریتم HS ظاهر می‌شود. برای اصلاح الگوریتم و از بین بردن این مانع بجای استفاده از مقادیر ثابت این متغیرها، آن‌ها را به صورت متغیر و وابسته به تکرار در نظر می‌گیرند که بنام الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی معرفی شده است. پارامترهای تنظیم‌کننده این الگوریتم، شامل PAR_{\min} مینیمم سرعت تنظیم قطعات، PAR_{\max} ماکزیمم سرعت تنظیم قطعات، bw_{\max} ماکزیمم پهنای باند، bw_{\min} مینیمم پهنای باند، HMS اندازه حافظه هارمونی، HMCR نرخ بررسی حافظه هارمونی و تعداد جمعیت هستند.

الگوریتم مجموعه ذرات (PSO)

الگوریتم‌های تکاملی، از اصول تکامل طبیعی برای جستجوی بهینه تقلید می‌کنند و دارای دو عملیات مشخص انتخاب و جستجو هستند. الگوریتم PSO یکی از اولین الگوریتم‌های فراابتکاری است که از مدل واقعی در طبیعت الهام گرفته شده است. این مدل از رفتار جمعی پرندگان دریافتن غذا بهره می‌گیرد، بدین ترتیب که جمعیتی متشکل از یک سری ذرات را تشکیل می‌دهد که هر ذره معرف یک پرنده در فضای جستجو است و PSO با بروز کردن موقعیت ذرات با توجه به میزان جمعیت، آن‌ها را به سمت جواب بهینه هدایت می‌کند و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن‌که جواب موردنظر به دست آید. در واقع انبوه ذرات که کمینه یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که دنبال غذا می‌گردند (ابره‌ارت و کندی ۱۹۹۵). پارامترهای تنظیم‌کننده این الگوریتم شامل C1 و C2 ضرایب یادگیری، W ضریب اینرسی و تعداد جمعیت هستند.

$$\delta = 100 * \left(1 - \frac{f}{T}\right) \quad [10]$$

که در آن f تعداد کل دوره‌های شکست، T تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری و δ قابلیت اعتمادپذیری زمانی می‌باشند. در واقع این پارامتر متمم احتمال شکست مخزن می‌باشد.

قابلیت اعتماد حجمی عبارت است از نسبت مقدار حجم آب ره‌اشده در کل دوره (Re_T) به مقدار کل حجم آب موردنیاز پایین‌دست مخزن (De_T). برای محاسبه این شاخص از رابطه ۱۱ استفاده می‌شود.

$$\delta_v = 100 * \frac{Re_T}{De_T} \quad [11]$$

شاخص آسیب‌پذیری

این شاخص نشان‌دهنده بزرگی شکست‌های سیستم است که از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود (لاکس و همکاران ۲۰۰۵).

$$\eta = \frac{(\sum_{t \in f} R_t^* - \sum_{t \in f} R_t)}{\sum R_t^*} \quad [12]$$

که در آن η بزرگی شکست، R_t^* تقاضای موردنظر در طول t امین دوره شکست، R_t مقدار آب ره‌اشده از سیستم در طول t امین دوره شکست، f تعداد کل دوره‌های شکست می‌باشد.

شاخص پایداری (انعطاف‌پذیری)

با توجه به عدم وجود رابطه‌ی همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، لاکس شاخص پایداری را که ترکیبی از سه شاخص فوق بود، معرفی نمود. گزینه‌ای که بیش‌ترین شاخص پایداری را داشته باشد، به‌عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. شاخص پایداری از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود (لاکس و همکاران ۲۰۰۵).

$$\varphi = \delta \gamma (1 - \eta) \quad [13]$$

که در آن φ شاخص پایداری، δ شاخص اعتمادپذیری، γ شاخص سرعت برگشت‌پذیری و η شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. در رابطه بالا شاخص سرعت برگشت‌پذیری از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

همچنین روابط ۸ و ۹ قیود مدل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad [8]$$

$$0 \leq R(t) \leq D(t) \quad [9]$$

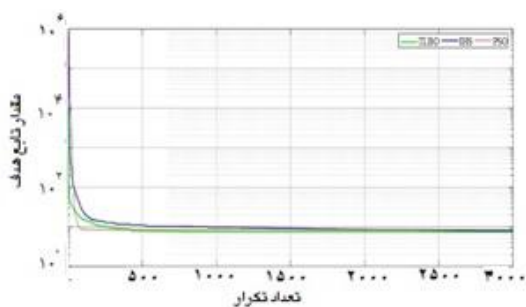
در روابط بالا، $R(t)$ میزان حجم آب ره‌اسازی ماهانه، $D(t)$ میزان حجم آب موردنیاز کشاورزی در هرماه، D_{max} حداکثر نیاز ماهانه کشاورزی در طول دوره بهره‌برداری، S_{min} حداقل حجم مخزن، S_{max} حداکثر حجم مخزن، $S(t+1)$ مقدار حجم آب نخیره‌شده در مخزن در دوره $t+1$ ، $S(t)$ مقدار حجم آب نخیره‌شده در مخزن در دوره t ، $Q(t)$ حجم جریان ورودی به مخزن در ماه t ام، $PP(t)$ حجم بارش به‌صورت مستقیم بر سطح دریاچه سد در ماه t ام، $EV(t)$ حجم آب تبخیر شده از سطح دریاچه در ماه t ام، $Spill(t)$ حجم آب سرریز شده در ماه t ام و $DM(t)$ مجموع حجم نیاز شرب و صنعت در ماه t ام، $DE(t)$ حداقل حجم حق‌آبه زیست‌محیطی رودخانه در ماه t ام، $A(t)$ سطح مخزن که از رابطه ۱ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که واحد پارامترها برحسب میلیون مترمکعب می‌باشد.

شاخص‌های عملکرد مخزن

به‌منظور امکان بررسی عملکرد الگوریتم‌های به کار گرفته‌شده (TLBO, IHS, PSO) از سه شاخص قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری مخزن استفاده می‌شود که در ادامه به‌اختصار شرح داده می‌شود.

شاخص قابلیت اعتماد

شاخص قابلیت اعتماد، احتمال اینکه سیستم در طول دوره‌ی عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرار گیرد را ارائه می‌دهد. این شاخص به دو صورت زمانی و حجمی به شرح زیر قابل تعریف است. قابلیت اعتماد زمانی، درصدی از زمان است که مخزن قادر به تأمین تقاضا می‌باشد و با شکست روبرو نمی‌شود. مقدار این شاخص از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود (لاکس و همکاران ۲۰۰۵).



شکل ۴- تغییرات تابع هدف با تعداد تکرار متفاوت در بهترین اجرای هر سه روش برای سناریوی دوم.

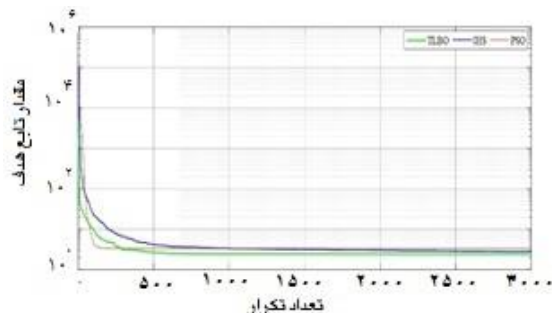
همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌گردد، هر سه الگوریتم سرعت همگرایی بالایی دارند. به علت بالا بودن قابلیت دو الگوریتم IHS و PSO که در مقالات مشابه نیز ثابت شده است (آذرافزا و همکاران ۲۰۱۲، کوگیاس و تئودوسیو ۲۰۱۳، بشیری‌اترابی و همکاران ۲۰۱۵)، برای مقایسه با روش اصلی انتخاب شده است. اما الگوریتم TLBO همان‌طور که از نمودار می‌توان دریافت مقدار تابع هدف را در تکرارهای اولیه سریعاً کاهش داده و از بهینه‌های محلی فاصله گرفته است. همچنین مدت‌زمان کل اجرای الگوریتم TLBO برابر با ۱۷ دقیقه، الگوریتم IHS برابر با ۲/۵ ساعت و الگوریتم PSO برابر با ۱۷ دقیقه می‌باشد. این موضوع قابلیت بالای الگوریتم TLBO را نشان می‌دهد (این زمان در سیستم لپ‌تاپ با مشخصات ویندوز ۱۰، CPU Corei7 و RAM 16 GB ثبت گردیده است). در جداول ۳ مقادیر مطلوب پارامترهای موردنیاز هر سه الگوریتم نشان داده شده است.

$$\gamma = \frac{1}{f/f_s} \quad [14]$$

که در آن، f_s تعداد دوره‌های شکست به‌طور پیوسته و f تعداد کل دوره‌های زمانی می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه صوفی‌چای با دو روش هیدرولوژیک تنانت اصلاح‌شده (سناریوی اول) و تحلیل منحنی تداوم جریان (سناریوی دوم) برآورد شده و مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تأمین کامل حداقل جریان زیست‌محیطی، تأمین صد درصد نیاز شرب، صنعت و به حداقل رساندن شدت کمبودهای کشاورزی توسعه داده شد. مدل بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم‌های TLBO، IHS و PSO در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ در یک شرایط کاملاً یکسان با تعداد جمعیت برابر ۲۰۰۰ و تعداد تکرار ۳۰۰۰ کدنویسی و اجرا گردید. شکل‌های ۳ و ۴ میزان تغییرات تابع هدف برحسب تعداد تکرار در هر سه الگوریتم را برای هر دو سناریو نشان می‌دهند.



شکل ۳- تغییرات تابع هدف با تعداد تکرار متفاوت در بهترین اجرای هر سه روش برای سناریوی اول.

جدول ۳- مقادیر مطلوب پارامترهای موردنیاز برای الگوریتم‌های TLBO، IHS و PSO.

تعداد جمعیت							تعداد جمعیت	TLBO
۲۰۰۰								
HMS	HMCR	bw_{max}	bw_{min}	PAR_{max}	PAR_{min}	تعداد جمعیت	IHS	PSO
۵۰	۰/۹۵	۰/۱۸۵	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۸۰	۰/۰۰۰۰۱	۲۰۰۰		
C2		C1	W	تعداد جمعیت			PSO	
۱/۴۹		۱/۴۹	۰/۵۴۵۳	۲۰۰۰				

مزایای الگوریتم TLBO می‌باشد. این در حالی است که بقیه الگوریتم‌ها حداقل سه پارامتر یا بیشتر دارند. مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای الگوریتم‌ها بر روی تابع هدف در کل دوره آماری (۱۶۸ ماه) برای سناریوی اول در جدول ۴ و سناریوی دوم در جدول ۵ آورده شده است.

عمده‌ترین ایراد و ضعف روش‌های فراکاشی در حساسیت پارامترها در رسیدن به جواب بهینه است که این ضعف به‌عنوان مشکل اساسی محققان در این روش‌ها می‌باشد. الگوریتم TLBO دارای یک پارامتر (تعداد جمعیت) بوده و لذا مشکل حساسیت پارامترها در رسیدن به جواب بهینه در این الگوریتم حل شده است. ویژگی تک‌پارامتری از اصلی‌ترین

جدول ۴- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد حاصل از اجرای الگوریتم‌ها برای سناریوی اول مخزن علویان.

شاخص پایداری	آسیب‌پذیری (درصد)	قابلیت اعتماد حجمی (درصد)	مجموع کمبودها (MCM)	تابع هدف	روش‌ها
۱۳/۱۷	۳۰/۴۰	۸۱/۴۰	۲۰۷	۲/۴۳	TLBO
۱۱/۰۰	۲۳/۱۰	۷۹/۰۰	۲۳۵	۲/۸۱	IHS
۱۰/۸۰	۲۳/۰۷	۷۸/۴۰	۲۴۰	۳/۳۴	PSO

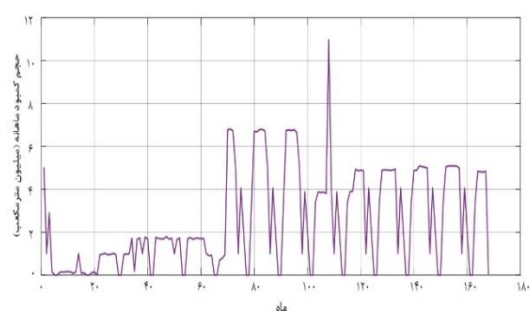
جدول ۵- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد حاصل از اجرای الگوریتم‌ها برای سناریوی دوم مخزن علویان.

شاخص پایداری	آسیب‌پذیری (درصد)	قابلیت اعتماد حجمی (درصد)	مجموع کمبودها (MCM)	تابع هدف	روش‌ها
۵/۱۰	۳۸/۸۵	۶۲/۵۵	۴۱۷/۵۵	۷/۵۴	TLBO
۴/۷۰	۳۸/۴	۶۱/۵	۴۲۸/۳۶	۸/۰۰	IHS
۴/۳۰	۳۸/۲۰	۶۰/۷۰	۴۳۷/۵۳	۸/۴۵	PSO

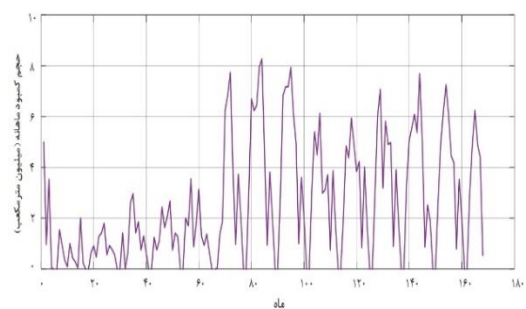
می‌توان عملکرد بهتر الگوریتم TLBO را دریافت با این تفاوت که در سناریوی دوم به دلیل استفاده از روش زیست‌محیطی منحنی تداوم جریان آب بیشتری برای جریان زیست‌محیطی اختصاص داده شده است. در سناریوی دوم الگوریتم TLBO توانسته حدود ۶۲/۵۵ درصد از نیازهای پایین‌دست سد علویان را تأمین کند و با در نظر گرفتن زمان اجرای الگوریتم TLBO نسبت به IHS و PSO می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم TLBO برای مسائل بزرگ دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. شکل‌های

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف برای سناریوی اول در الگوریتم TLBO، ۲/۴۳ به‌دست‌آمده درحالی‌که در الگوریتم IHS برابر با ۲/۸۱ و الگوریتم PSO، ۳/۳۴ می‌باشد. با توجه به شاخص‌های عملکرد مخزن الگوریتم TLBO توانسته است در سناریوی اول ۸۱/۴۰ درصد و الگوریتم IHS، ۷۹ درصد و الگوریتم PSO، ۷۸/۴۰ درصد از نیاز آبی کشاورزی پایین‌دست سد علویان را تأمین کند. همچنین شاخص پایداری برای الگوریتم TLBO، IHS و PSO به ترتیب برابر ۱۳/۱۷، ۱۱ و ۱۰/۸۰ می‌باشد؛ و از جدول ۵ نیز

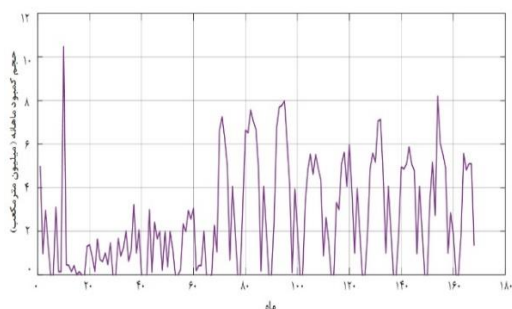
الگوریتم PSO دارای ۲۳۸ میلیون مترمکعب کمبود در طول کل دوره بهره‌برداری از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ می‌باشد. بیشترین مقدار کمبود در طول کل دوره برحسب ماه برای الگوریتم TLBO برابر ۴/۹۲، الگوریتم IHS برابر ۶ و برای الگوریتم PSO برابر ۸/۵۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقادیر کمبودهای کل دوره سد علویان را برای سناریوی دوم نشان می‌دهند.



شکل ۸- مقادیر حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد علویان از الگوریتم TLBO برای سناریوی دوم در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.

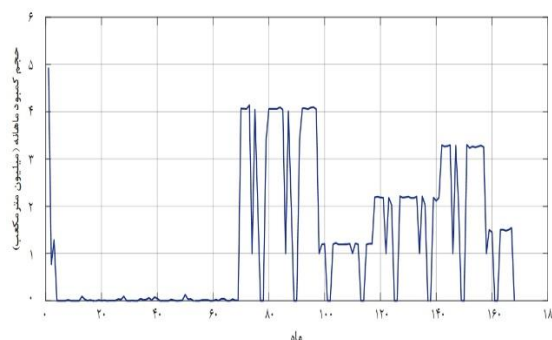


شکل ۹- مقادیر حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد علویان از الگوریتم IHS برای سناریوی دوم در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.

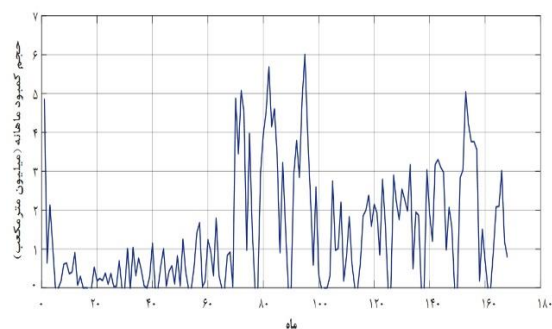


شکل ۱۰- حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد

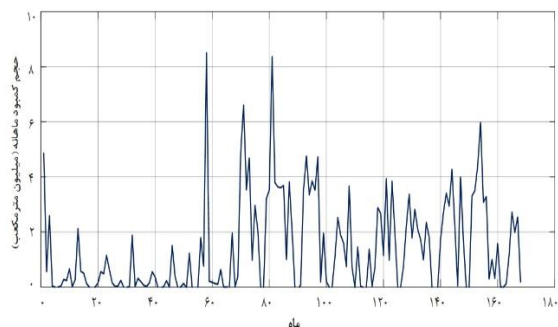
۵ تا ۷ مقادیر کمبودهای کل دوره سد علویان را برای سناریوی اول نشان می‌دهند.



شکل ۵- مقادیر حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد علویان از الگوریتم TLBO برای سناریوی اول در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.



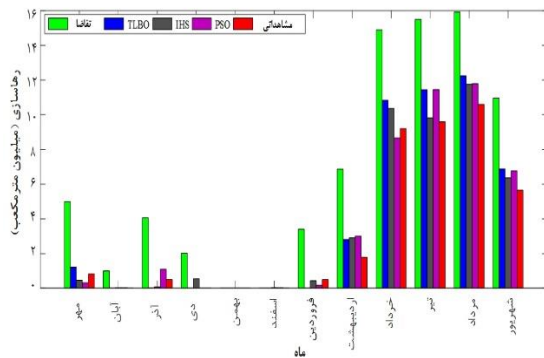
شکل ۶- مقادیر حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد علویان از الگوریتم IHS برای سناریوی اول در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.



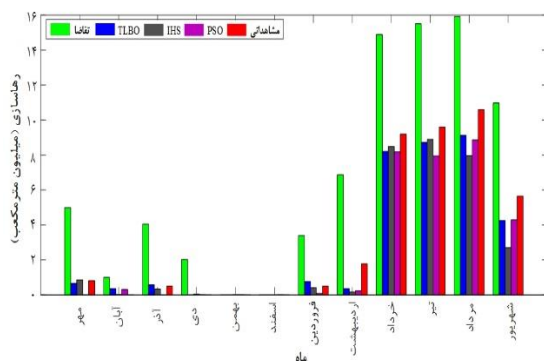
شکل ۷- مقادیر حجم کمبود آب ماهانه به‌دست‌آمده سد علویان از الگوریتم PSO برای سناریوی اول در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.

با توجه به شکل‌های ۵ تا ۷ از مجموع کل تقاضای ۱۱۱۵ میلیون مترمکعب، برای سناریوی اول الگوریتم TLBO دارای ۲۰۷، الگوریتم IHS دارای ۲۳۶/۵ و

سد در آن سال نسبت به بقیه سالها کمترین مقدار باشد.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تقاضای کشاورزی، مقادیر رهاسازی به دست آمده توسط الگوریتم IHS, TLBO, PSO و مقادیر رهاسازی مشاهداتی سد علویان در بحرانی‌ترین سال آبی برای سناریوی اول.

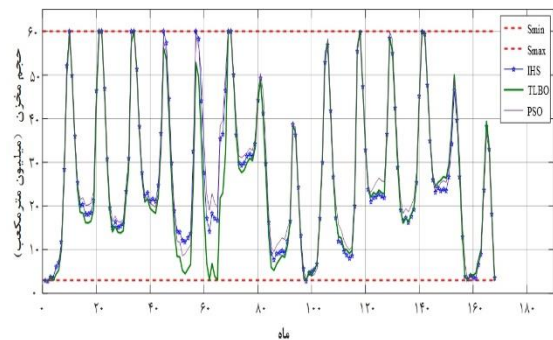


شکل ۱۳- مقایسه مقادیر تقاضای کشاورزی، مقادیر رهاسازی به دست آمده توسط الگوریتم IHS, TLBO, PSO و مقادیر رهاسازی مشاهداتی سد علویان در بحرانی‌ترین سال آبی برای سناریوی دوم.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در سناریوی اول برای بحرانی‌ترین سال آبی در طول دوره بهره‌برداری الگوریتم TLBO برابر ۵۶/۲۰ درصد، الگوریتم IHS برابر ۵۳/۸۰ درصد، الگوریتم PSO برابر ۵۲/۵۰ درصد و رهاسازی مشاهداتی توانسته است ۴۸/۵۰ درصد از نیازهای کشاورزی پایین دست را برآورده سازند. اما در سناریوی دوم (شکل ۱۳)

علویان از الگوریتم PSO با سناریوی دوم در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود برای سناریوی دوم نیز از مجموع کل تقاضای ۱۱۱۵ میلیون مترمکعب، الگوریتم TLBO دارای ۴۱۷/۵۵، الگوریتم IHS دارای ۴۲۸/۳۶ و الگوریتم PSO دارای ۴۳۷/۵۳ میلیون مترمکعب کمبود در طول کل دوره بهره‌برداری از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ می‌باشد. بیشترین مقدار کمبود در طول کل دوره برحسب ماه برای الگوریتم TLBO برابر ۱۰/۹۷، الگوریتم IHS برابر ۸/۲۷ و برای الگوریتم PSO برابر با ۱۰/۴۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. شکل ۱۱ مقادیر تغییرات حجم مخزن در طول دوره بهره‌برداری را برای هر سه الگوریتم نشان می‌دهد.

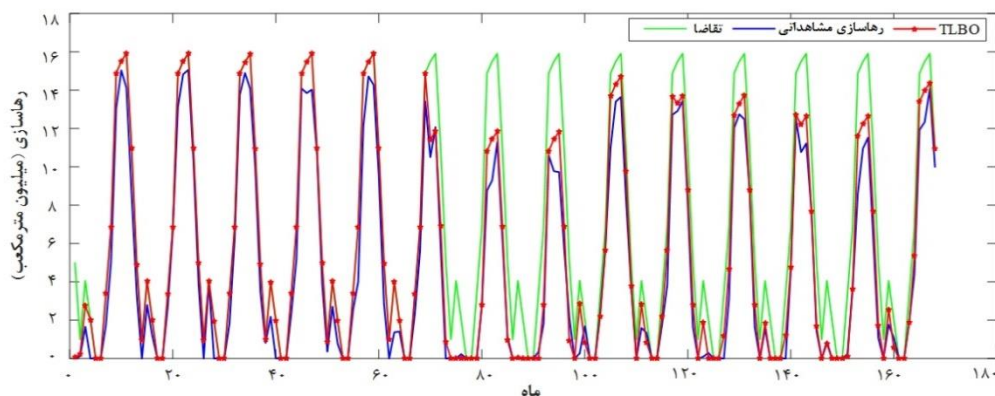


شکل ۱۱- مقادیر تغییرات حجم مخزن در طول دوره بهره‌برداری سد علویان توسط الگوریتم IHS, TLBO, PSO.

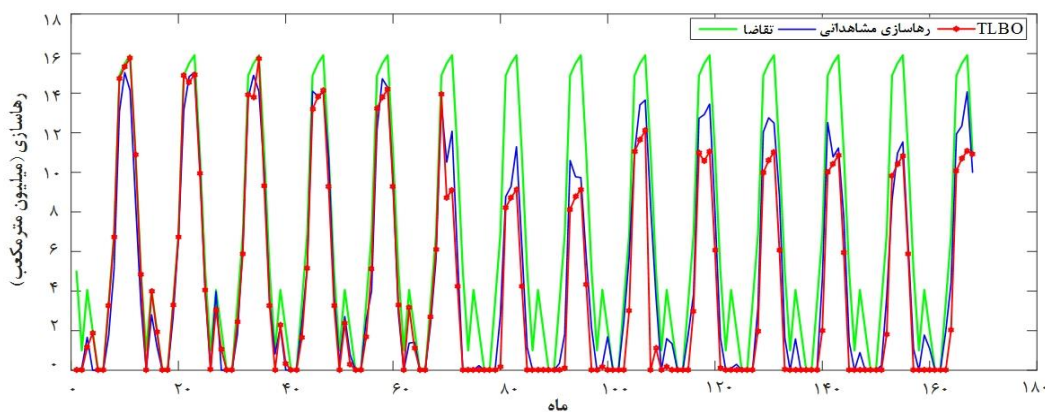
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، حجم مخزن بین مقادیر حجم مرده که برابر ۳ و حجم حداکثر ۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد، در نوسان است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقادیر تقاضای کشاورزی، مقادیر رهاسازی به دست آمده توسط الگوریتم IHS, TLBO, PSO و مقادیر رهاسازی انجام گرفته با سیاست فعلی سد علویان (مشاهداتی) در بحرانی‌ترین سال آبی را برای هر دو سناریو نشان می‌دهند. سال بحرانی به سالی اطلاق می‌شود که میانگین حجم ورودی به مخزن

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نیز مقادیر رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم TLBO، در مقابل نیاز کشاورزی پایین‌دست سد علویان را نشان می‌دهند.

الگوریتم TLBO برابر ۴۰/۱۰ درصد، الگوریتم IHS برابر ۳۸/۲۰ درصد، الگوریتم PSO برابر ۳۷/۳۰ درصد و رهاسازی مشاهداتی توانسته است ۴۸/۵۰ درصد از نیازهای کشاورزی پایین‌دست را برآورده سازند. این نتایج نیز برتری نسبی الگوریتم TLBO را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- مقادیر تقاضای کشاورزی و رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم TLBO برای سناریوی اول سد علویان.



شکل ۱۵- مقادیر تقاضای کشاورزی و رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم TLBO برای سناریوی دوم سد علویان.

درصد از تقاضای کل را تأمین کند و با توجه به وضعیت دریاچه ارومیه سیاست فعلی سد مناسب نبوده و باید تجدیدنظر صورت پذیرد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد بر اساس سناریوی دوم (روش تحلیل منحنی تداوم جریان) در صورت کاهش دادن حدود ۸ درصد از مصارف کشاورزی و اختصاص آن به جریان

همان‌طور که از شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان استنباط کرد این است که الگوریتم TLBO توانسته است به‌خوبی تقاضای پایین‌دست سد را برآورده سازد. به‌طوری‌که برای سناریوی اول ۸۱/۴۰ درصد و برای سناریوی دوم ۶۲/۵۵ درصد از نیازها را تأمین کند، درحالی‌که رهاسازی مشاهداتی توانسته است حدود ۷۰

زیست‌محیطی مشکل حق‌آبه دریاچه ارومیه از رودخانه صوفی‌چای نیز تا حدودی حل می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، از الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش به‌عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری، جهت ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه سد علویان با در نظر گرفتن نیاز زیست‌محیطی رودخانه صوفی‌چای استفاده گردید و نتایج در دو سناریو ارائه شد. در سناریوی اول برای برآورد حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه، از روش تنانت اصلاح‌شده و در سناریوی دوم برای برآورد حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه، از روش تحلیل منحنی تداوم جریان استفاده گردید. همچنین عملکرد الگوریتم موردنظر با استفاده از شاخص‌های عملکرد مخزن (قابلیت اعتماد حجمی، آسیب‌پذیری و پایداری) بررسی و نتایج حاصل از آن با الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی و الگوریتم مجموعه ذرات مورد مقایسه قرار گرفت. در سناریوی اول تابع هدف برای الگوریتم TLBO برابر $2/43$ و به ترتیب برای الگوریتم‌های IHS و PSO برابر $2/81$ و $2/34$ حاصل گردید. بر اساس این سناریو، میزان خروجی حاصل از الگوریتم‌های TLBO، IHS و PSO به ترتیب قادر به تأمین $81/40$ ، 79 و $78/40$ درصد از نیاز کل پایین‌دست سد علویان بوده و همچنین میزان کل کمبودها در الگوریتم TLBO برابر 207 ، الگوریتم IHS برابر $236/5$ و الگوریتم PSO برابر 228 میلیون مترمکعب در طول کل دوره بهره‌برداری (1380 تا 1394) محاسبه شد. در سناریوی دوم، تابع هدف برای الگوریتم TLBO برابر $7/54$ و به ترتیب برای الگوریتم‌های IHS و PSO برابر 8 و $8/45$ حاصل گردید.

منابع مورد استفاده

Ahmadipur Z and Yasi M, 2014. Comparison of eco-hydrological-hydraulic methods in evaluating the environmental flow of rivers (Nazlo River, Urmia Lake Basin). Hydraulic 9(2): 69-82. (In Persian with English abstract)

بر اساس این سناریو، میزان خروجی حاصل از الگوریتم‌های TLBO، IHS و PSO به ترتیب قادر به تأمین $62/55$ ، $61/5$ و $60/70$ درصد از نیاز کل پایین‌دست سد علویان در طول دوره بهره‌برداری بوده و میزان کل کمبودها در الگوریتم TLBO برابر $417/55$ ، الگوریتم IHS برابر $428/36$ و الگوریتم PSO برابر $437/53$ میلیون مترمکعب محاسبه شد. بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌های عملکرد مخزن، الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری برای هر دو سناریو ارائه می‌کند و از این‌رو این الگوریتم در مطالعات بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن با توابع هدف پیچیده غیرخطی توصیه می‌شود. همچنین به خاطر اهمیت جریان زیست‌محیطی، سناریوی دوم برای سد علویان پیشنهاد می‌شود که در صورت کاهش دادن حدود 8 درصد از مصارف کشاورزی و اختصاص آن به زیست‌محیطی مشکل زیست‌محیطی رودخانه حل و برای احیای دریاچه ارومیه مؤثر خواهد بود. با توجه به اینکه رودخانه صوفی‌چای تنها بخش بسیار اندکی از آب دریاچه ارومیه را تأمین می‌کند، به احتمال زیاد اندازه‌گیری دقیق تأثیر این پیشنهاد سخت خواهد بود. از این رو، این تحقیق بیش از آن‌که بدنبال اندازه‌گیری دقیق این تأثیر باشد، بدنبال طرح این موضوع است که لحاظ حق‌آبه زیست‌محیطی در طرح‌های مربوط به بهره‌برداری از مخازن سدها یک ضرورت است. روند رو به رشد خشک شدن دریاچه ارومیه این ضرورت فراموش شده در سال‌های گذشته را بیش از پیش نمایان ساخت.

- Anonymous, 2009. Guide for determining the minimum water requirements of aquatic ecosystems. Water and Wastewater Engineering and Technical Standard Office, 113 p. Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Anonymous, 2015. Urmia lake restoration report, preparations and solutions. Sociocultural Committee of Urmia Lake Restoration Headquarters. Iran.
- Azarafza H, Rezaei H, Bahmanesh J and Basharat S, 2012. Comparing the results of using PSO, GA and SA algorithms in the optimization of single reservoir systems (Case study: Shahrchai Dam, Urmia). *Water and Soil Science* 5(26): 1108-1101. (In Persian with English abstract)
- Babran S, 2008. The legal status of environmental water rights. *The Scientific Journal of Strategy* 16(3): 129-164. (In Persian with English abstract)
- Bashiri-Atrabi H, Qaderi K, Rheinheimer, DE and Sharifi E, 2015. Application of harmony search algorithm to reservoir operation optimization. *Water Resources Management* 29(15): 5729-5748.
- Burhani Darian A and Mortazavi Naini M, 2008. Comparing the use of exploration methods in the optimal use of water resources. *Water and Wastewater Scientific Research* 19(68): 57-66 (In Persian with English abstract).
- Chen S, Shao D, Li X and Lei C, 2016. Simulation-Optimization modeling of conjunctive operation of reservoirs and ponds for irrigation of multiple crops using an improved Artificial Bee Colony Algorithm. *Water Resources Management* 30(9): 2887-2905.
- Dashti R, Sattari MT, Noorani V and Abbasfam J, 2016. Optimum exploitation of single reservoir system using modified harmony search algorithm (Case study: Alavian Dam). Pp. 442-451. The Second International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. 31 May, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Eberhart RC and Kennedy J, 1995. A new optimizer using particle swarm theory. Pp. 39-43. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. 04-06 October, Nagoya, Japan.
- Geem ZW, Kim JH and Loganathan GV, 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation* 76(2): 60-68.
- Ji G, Wang J, Ge Y and Liu H, 2014. Urban water demand forecasting by LS-SVM with tuning based on elitist teaching-learning-based optimization. Pp. 3997-4002. Control and Decision Conference. 31 May-02 June, Changsha, China.
- Kougias IP and Theodossiou NP, 2013. Application of the Harmony Search optimization algorithm for the solution of the multiple dam system scheduling. *Journal of Optimization and Engineering* 14(2): 331-344.
- Kumar V and Yadav SM, 2021. Optimization of water allocation for Ukai reservoir using Elitist TLBO. *Water Resources Management and Reservoir Operation* 107: 191-204
- Labadie JW, 2004. Optimal operation of multi-reservoir system: State of the art review. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(2): 93-111.
- Loucks DP, Van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JP and Villars MT, 2005. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Paris.
- Mahdavi M, Fesanghary M and Damangir E, 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation* 8(18): 1567-1579.
- Patnaik P and Swain PC, 2021. Intelligent operation of Hirakud reservoir using metaheuristic techniques (PSO and TLBO). *Water Resources Management and Reservoir Operation* 107: 263-276.
- Pradhan SN and Tripathy UK, 2013. Optimization of the operating policy of the multipurpose Hirakud reservoir by genetic algorithm. *American Journal of Engineering Research* 2(11): 260-266.
- Rani D and Moreira MM, 2010. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management* 24(6): 1107-1138.
- Rao RV, Savsani VJ and Vakharia D, 2011. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design* 43(3): 303-315.
- Saberchenari K, Abghari H, Erfanian M, Ghaderi M, Salmani H and Asadinalivan O, 2016. Optimization reservoir operation policy with approach reduces probability of inflow using genetic algorithm (Case study: Mahabad Reservoir Dam). 4: 34-43. (In Persian with English abstract)
- Sonaliya S and Suryanarayana TMV, 2014. Optimal reservoir operation using genetic algorithm: A Case Study of Ukai Reservoir Project. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 3(6): 13681-13687.

- Tennant DL, 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Journal of Fisheries* 1(4): 6-10.
- Tharme RE, 2003. A Global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 9(5): 397-441.
- Wenxia Y, Tianyi Q, Wenwu L and Zhi Z, 2018. Application of teaching learning based optimization in long term optimal reservoir operation. Pp. 1-5. 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 02-04 July, Guiyang, China.