



Optimal operation of the reservoir to reduce the flood damage (Case study: Karkheh dam)

Amir Hatamkhani¹ | Ali Moridi²

1. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_hatamkhani@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_moridi@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Given the high potential for flooding in many regions of Iran, optimal reservoir management for reducing flood-related damages is of significant importance. This study aims to provide an optimization model for managing reservoir operations during flood events. In this research, the Karun Dam and the 2019 flood were selected as the case study. A Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to minimize the difference between the release discharge and the permissible discharge (damage threshold downstream). The decision variables were the daily release values from the reservoir during the flood period. The results showed that using the optimization model significantly improved the objective function (the difference from permissible discharge). For permissible discharges of 400, 600, and 800 cubic meters per second, the improvement in the objective function was 11%, 17%, and 37%, respectively. Additionally, the maximum release discharge decreased from about 2,500 cubic meters per second in the actual operation to around 1,900 cubic meters per second in the optimized model. Sensitivity analysis indicated that increasing the maximum permissible storage volume in the reservoir could further reduce damages. This study demonstrates that optimal reservoir operation can significantly reduce flood-related damages. Furthermore, reducing reservoir storage before peak rainfall events and gradual water release are among the proposed strategies. The findings of this study can assist in improving reservoir operation policies.
Article history: Received 17 February 2025 Received in revised form 10 April 2025 Accepted 27 April 2025 Published online 11 October 2025	
Keywords: PSO Optimal reservoir operation Flood control Optimization model	

Cite this article: Hatamkhani, A., & Moridi, A. (2025). Optimal operation of the reservoir to reduce the flood damage (Case study: Karkheh dam). *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 265-277.
 DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.390592.1209>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.390592.1209>

Publisher: University of Tehran Press.



بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها به منظور کاهش خسارت ناشی از سیلاب (مطالعه موردی: سد کرخه)

امیر حاتم‌خانی^۱ | علی مریدی^۲

۱. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_hatamkhani@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با توجه به پتانسیل بالای وقوع سیل در ایران، مدیریت بهینه مخازن سدها برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب اهمیت زیادی دارد. این مطالعه به منظور ارائه مدل بهینه‌سازی برای مدیریت بهره‌برداری از مخزن سدها در زمان سیلاب انجام شده است. در این پژوهش، سد کرخه و سیلاب ۱۳۹۸ به عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای کمینه‌سازی تفاضل بین دبی رهاسازی و دبی مجاز (آستانه خسارت پایین‌دست) استفاده شد. متغیرهای تصمیم، مقادیر رهاسازی روزانه از مخزن در طول دوره سیلابی بودند. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل بهینه‌سازی، مقدار تابع هدف (تفاضل از دبی مجاز) به طور چشم‌گیری بهبود یافت. برای دبی‌های مجاز ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه، بهبود تابع هدف به ترتیب ۱۱، ۱۷ و ۳۷ درصد بود. همچنین، حداکثر دبی رهاسازی از حدود ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه در بهره‌برداری واقعی، به حدود ۱۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت. تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش حداکثر حجم مجاز ذخیره در مخزن می‌تواند به کاهش بیش‌تر خسارت‌ها کمک کند. این مطالعه نشان می‌دهد که با بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها می‌توان خسارت‌های ناشی از سیلاب را به طور قابل‌توجهی کاهش داد. همچنین، کاهش حجم ذخیره مخزن قبل از وقوع پیک بارش‌ها و رهاسازی تدریجی آب از جمله راه‌کارهای پیشنهادی است. نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن سدها کمک کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹	کلیدواژه‌ها: الگوریتم ازدحام ذرات بهره‌برداری بهینه مخزن کنترل سیلاب مدل بهینه‌سازی

استناد: حاتم‌خانی، امیر و مریدی، علی (۱۴۰۴). بهره‌برداری بهینه از مخزن سدها به منظور کاهش خسارت ناشی از سیلاب (مطالعه موردی: سد کرخه). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۲)، ۲۶۵-۲۷۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.390592.1209>



۱. مقدمه

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها به‌ویژه برای کنترل سیلاب، یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. با توجه به توسعه روزافزون پروژه‌های سدسازی در سطح جهان، استفاده از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی برای تعیین سیاست‌های کارآمد بهره‌برداری از مخازن ضروری شده است. در این میان، روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای حل مسائل پیچیده و غیرخطی بهره‌برداری از سدها موردتوجه قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها با ترکیب هوشمندانه جستجوی تصادفی، یادگیری از تجربیات گذشته و هدایت سیستماتیک به سمت جواب‌های بهینه، توانسته‌اند راه کارهای مناسبی برای کاهش اثرات مخرب سیلاب از طریق مدیریت هوشمند حجم ذخیره مخازن ارائه دهند. کاربرد موفق این روش‌ها در مطالعات اخیر نشان‌دهنده ظرفیت بالای آن‌ها در بهبود عملکرد سیستم‌های مخزنی و افزایش کارایی آن‌ها در کنترل سیلاب است.

Banibashar et al. (2011) و Afshar et al. (2012) از الگوریتم جامعه مورچگان^۱ در بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده کردند و عملکرد آن را مناسب گزارش نمودند. JanatRostami et al. (2010) از الگوریتم جستجوی هارمونی^۲ برای مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی استفاده کردند.

Bozorg Haddad et al. (2008) و Afshar et al. (2011) از الگوریتم زنبور عسل^۳ به‌عنوان الگوریتم فراابتکاری برای تعیین قوانین بهره‌برداری بهینه مخازن استفاده کردند. Shenava and Shourian (2018) به استخراج منحنی فرمان بهینه بهره‌برداری از مخزن با اهداف افزایش تأمین نیازها و کاهش خسارت سیلاب با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری^۴ پرداختند. Afshar et al. (2017) به بررسی ترکیب یک روش جدید ارائه‌شده به نام اتوماتای سلولی^۵ با الگوریتم معروف جستجوی هارمونی برای حل کارآمد مسئله بهره‌برداری چند مخزن پرداختند.

الگوریتم ژنتیک^۶ (GA) و بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۷ (PSO) به‌صورت گسترده در زمینه منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند و عملکرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف با موفقیت گزارش شده است. Loucks and Oliveira (1997) از GA به‌منظور استخراج قوانین بهره‌برداری از سامانه‌های چند مخزن استفاده نمودند. Cai et al. (2001) از الگوریتم ترکیبی ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی مسائل مدیریت منابع آب استفاده کردند. Hatamkhani et al. (2021) به بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری مخازن سدهای برقابی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پرداختند. Ren et al. (2022) از یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته برای بهینه‌سازی توزیع کنترل سیل در طول فرایند سیل استفاده کرد و نتایج را با الگوریتم ژنتیک سنتی در طرح بهره‌برداری کنترل سیل مخازن در مقیاس بزرگ ۲۰۲۰ مقایسه کرد.

SaberChenari et al. (2016) به ارائه مدل کوتاه‌مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب با استفاده از الگوریتم جامعه ذرات پرداختند و نتیجه گرفتند که الگوریتم PSO در تعیین سیاست بهره‌برداری مخزن عملکرد مناسبی دارد. Ostadrahimi et al. (2012) از PSO چندهدفه برای استخراج قوانین بهره‌برداری از سامانه چند مخزن استفاده نمودند؛ Bayat et al. (2011) به توسعه تلفیقی از یک مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای بهره‌برداری از سیستم مخازن در زمان سیلاب در جهت کنترل خسارت‌های ناشی از آن پرداختند؛ Hatamkhani and Moridi (2019) در پژوهشی با استفاده از مدل WEAP به بررسی نحوه مناسب توسعه واحدهای در حال رقابت کشاورزی و برقابی در حوضه رودخانه کشکان پرداختند. براساس نتایج این پژوهش علاوه بر این که میزان سطح زیر کشت واحدهای کشاورزی بزرگ‌تر از پژوهش‌های قبلی محاسبه شد، میزان انرژی تولیدی توسط نیروگاه تنگ معشوره نیز بهبود یافته است. Hatamkhani et al. (2020) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای طراحی بهینه سیستم‌های برق آبی با نمای سیستماتیک حوضه (که یک مسئله غیرخطی پیچیده است) توسعه دادند. برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در حوضه آب، از مدل WEAP استفاده شده است.

Ding et al. (2023) مفهوم تاب‌آوری را برای سنجش توانایی سیستم‌های کنترل سیلاب در حفظ یا بازگشت به حالت‌های اولیه پس از یک سیلاب شدید معرفی کردند. بیان کمی تاب‌آوری به‌عنوان مجموع تلفات عملکردی سیستم در طول فرایند کامل سیلاب تعریف شده است. براساس این معیار تاب‌آوری پیشنهادی، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن ریسک سیلاب (که توسط حداکثر سطح آب مخزن و دبی اوج پایین‌دست نشان داده می‌شود) و تاب‌آوری در برابر سیلاب به‌عنوان اهداف، ایجاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند تاب‌آوری را بدون افزایش خطرات سیل در مقایسه با مدل سنتی بهبود بخشد.

Song et al. (2023) الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب^۸ و مدل مدل عمومی دریاچه- کتابخانه پویایی اکوسیستم آبی^۹ را برای بهینه‌سازی عملیات مخزن همراه کردند. با در نظر گرفتن مخزن Zipingpu به‌عنوان یک مطالعه موردی، نتایج نشان داد که با استفاده از این مدل، اوج تخلیه خروجی را می‌توان از ۱۰۵۹/۵ به ۸۶۱/۴ مترمکعب بر ثانیه (۱۹ درصد) کاهش داد و کل تولید برق را می‌توان از ۱۰۸×۶/۶ به ۱۰۸×۷/۱ کیلووات ساعت افزایش داد.

این مطالعه با ارائه یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی را برای مدیریت مخزن سد شرایط سیلابی، رویکردی نوین در کنترل خسارت‌های سیل ارائه می‌دهد. نوآوری اصلی پژوهش، تلفیق سیاست رهاسازی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی (مانند حجم ذخیره مجاز و دبی ایمن براساس تاب‌آوری پایین‌دست) است. این روش می‌تواند پیش از اوج بارش‌ها، سازوکاری کارآمد برای مدیریت سیلاب‌های غیرمترقبه ارائه می‌کند. این پژوهش از جنبه کاربردی، چارچوبی قابل‌تعمیم برای سدهای مشابه با شرایط هیدرولوژیکی پیچیده ایجاد کرده است. بنابراین، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به بهره‌برداری از مخزن با هدف به حداقل رساندن خسارت‌های سیل پرداخته شده است. برای مطالعه موردی از سد کرخه و سیل ابتدای سال ۱۳۹۸ استفاده شده است. برای این منظور، مدل بهینه‌ساز در سناریوهای مختلف اجرا شده و نتایج محاسبه‌شده با نتایج بهره‌برداری از سد کرخه در واقعیت مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مطالعه موردی

سد کرخه بر روی رودخانه کرخه و در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک واقع در استان خوزستان ساخته شده است. این پروژه در ۴۸ درجه و ۸/۷ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۲ درجه و ۶/۲۹ دقیقه شمالی واقع شده است. محل قرار گرفتن سد کرخه در حوضه آبریز کرخه در شکل (۱) نشان داده شده است.

سد کرخه با تاجی به طول ۳۰۳۰ متر و ارتفاع ۱۲۷ متر از لحاظ حجم بدنه، بزرگ‌ترین سد تاریخ ایران محسوب می‌شود و با حجم مخزنی به میزان ۷ میلیارد و ۳۰۰ میلیون مترمکعب، سبب پدید آمدن بزرگ‌ترین دریاچه مصنوعی ایران نیز شده است. نمودار حجم سطح ارتفاع سد کرخه در شکل (۲) نشان داده شده است.

از اهداف سد کرخه می‌توان به تولید انرژی برقی به میزان ۹۳۴ گیگاوات ساعت در سال، تأمین و تنظیم آب جهت آبیاری ۳۲۰ هزار هکتار از اراضی پایین‌دست، دشت‌های پای پل و همچنین دشت‌های حمیدیه و قدس واقع در شمال غربی و غرب استان خوزستان، دشت آزادگان، دشت عباس، فکه و عین خوش واقع در جنوب غربی استان ایلام و کنترل سیل‌های مخرب رودخانه و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از آن اشاره کرد. سد کرخه نقش بسیار مهمی در کاهش خسارت‌های سیل اواخر سال ۱۳۹۷ و ابتدای سال ۱۳۹۸ ایفا کرد و در صورت نبود این سد، تلفات سیل خوزستان به مراتب بیش‌تر می‌شد. در اینجا به این مسئله پرداخته می‌شود که چگونه با بهره‌برداری بهینه از مخزن، خسارت‌های ناشی از سیل قابل کاهش بود. شکل (۳) میزان دبی ورودی و خروجی (مترمکعب بر ثانیه) از مخزن سد کرخه در دوره مورد بررسی را نشان می‌دهد.

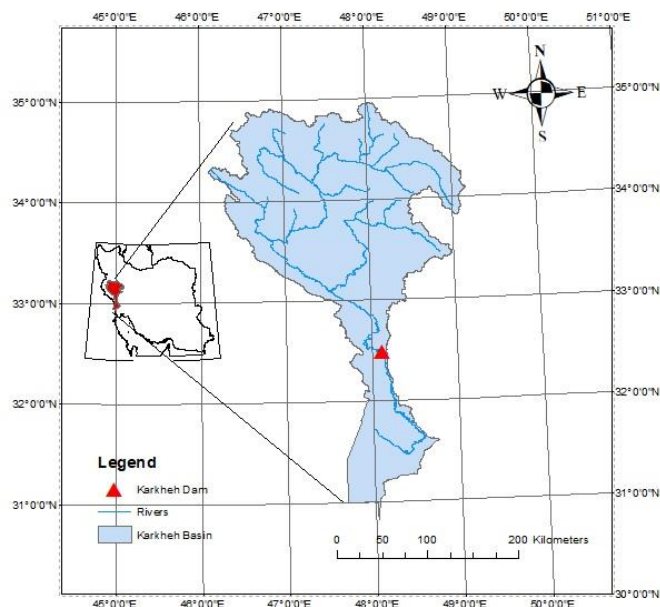


Figure 1. Location of Karkheh Basin and dam

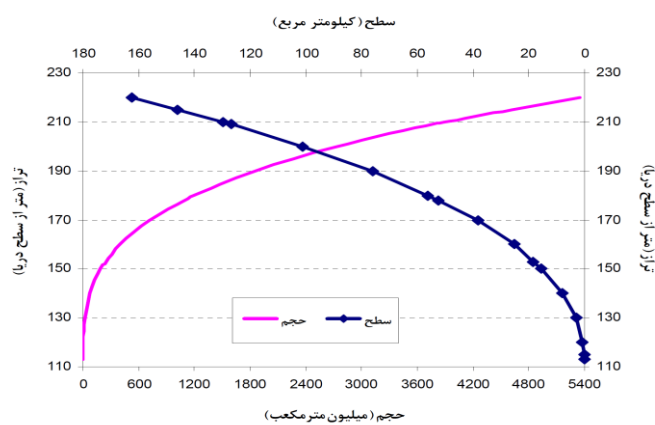


Figure 2. Reservoir volume-elevation curve of Karkheh Dam

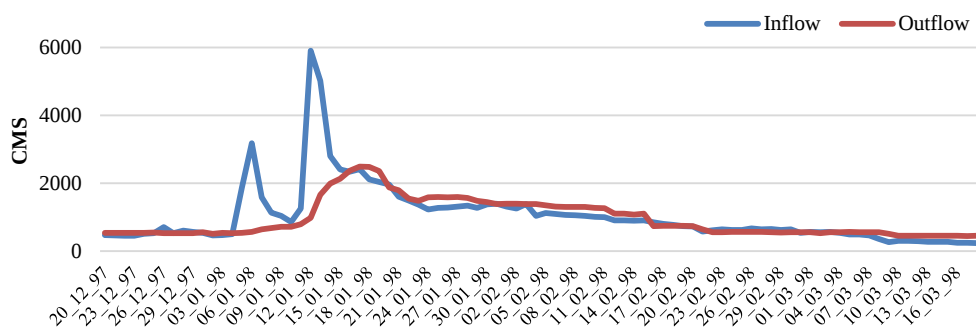


Figure 3. Inflow and outflow discharge from the Karkheh Dam reservoir

۲.۲. فرمول بندی مدل بهینه‌سازی

برنامه ریاضی مسئله بهره‌برداری از مخزن با هدف کمینه‌سازی هزینه خسارت سیل ارائه شده است.

- رابطه (۱) $Min \Sigma(R_t - Q_{safe})$
- Subject to:
- رابطه (۲) $S_{t+1} = S_t + I_t - Loss_t - R_t \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۳) $S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۴) $R_t = R_t(S_t, I_t) \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۵) $R_t = R_{HP,t} + R_{Oth,t} + R_{Spil,t} \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۶) $SD_t \leq D_t \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۷) $Loss_t = A_t \times EV_t \quad \forall t = 1, \dots, T$
- رابطه (۸) $A_t = aS_t^3 + bS_t^2 + cS_t + d \quad \forall t = 1, \dots, T$

که در این روابط، t : اندیس مربوط به گام‌های زمانی که می‌تواند برابر مقادیر ۱ تا T باشد، S_t : حجم ذخیره مخزن در ابتدای گام زمانی t -ام، I_t : حجم آورد مخزن در گام زمانی t -ام، $Loss_t$: مقدار تلفات از مخزن در گام زمانی t -ام، EV_t : حجم تبخیر خالص از مخزن در گام زمانی t -ام، R_t : حجم رهاسازی آب از مخزن در گام زمانی t -ام برحسب میلیون مترمکعب، S_{min} : حداقل حجم بهره‌برداری مخزن به صورت تابعی از رقوم حداقل بهره‌برداری، S_{max} : حداکثر حجم مخزن در زمان سیلاب، R_{HP} : بخشی از حجم رهاسازی آب از مخزن مربوط به تولید انرژی برقابی، $R_{Oth,t}$: بخشی از حجم رهاسازی آب از مخزن مربوط به سایر نیازهای پایین‌دست، $R_{Spil,t}$: بخشی از حجم رهاسازی آب از مخزن مربوط به سرریز از مخزن، i : اندیس مربوط به گره‌های نیاز آبی که می‌تواند برابر مقادیر ۱ تا I باشد، $D_{t,i}$: حجم نیاز آبی گره نیاز i -ام در گام زمانی t -ام، $SD_{t,i}$: مقدار آب تخصیص یافته به گره نیاز i -ام در گام زمانی t -ام، A_t : سطح مخزن در گام زمانی t -ام، a, b, c, d : ضرایب ثابت معادله حجم سطح ارتفاع مخزن هستند.

در رابطه (۱)، تابع هدف برنامه ریاضی به صورت کمینه نمودن مجموع تفاضل میزان رهاسازی از مخزن با دبی مجاز (Q_{safe}) در تمامی گام‌های زمانی می‌باشد. رابطه (۲) مربوط به معادله بیلان ماهانه مخزن سد است. در رابطه (۳) حجم ذخیره ماهانه مخزن سد به حجم حداقل بهره‌برداری و حداکثر حجم آن محدود شده است. رابطه (۴) مربوط به سیاست بهره‌برداری ماهانه مخزن به صورت تابعی از ذخیره و آورد می‌باشد. همچنین در رابطه (۵) حجم آب رهاسازی از مخزن به سه قسمت آب رهاسازی برای تولید انرژی برقابی، نیاز پایین‌دست و سرریز تقسیم شده است. رابطه (۶) مربوط به مقید نمودن آب تخصیص یافته برای تأمین نیاز آبی پایین‌دست در هر گام زمانی به حجم نیاز آبی می‌باشد. رابطه (۷) تلفات را براساس تبخیر و مساحت مخزن بیان می‌کند و رابطه (۸) رابطه سطح با حجم مخزن می‌باشد.

بهینه‌سازی رهاسازی از مخزن سد کرخه در یک دوره ۹۰ روزه از تاریخ ۲۰ اسفندماه ۱۳۹۷ تا ۱۸ خردادماه ۱۳۹۸ که در بر گیرنده دو سیلاب مهم بهار ۱۳۹۸ است، انجام شده است.

۳.۲. الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)

روش بهینه‌سازی دسته ذرات، اولین بار توسط Kenney and Eberhart (1995) معرفی گردید. اساس این الگوریتم، شبیه‌سازی یک رفتار دسته جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرنده‌ها و ماهیان استفاده می‌شود. PSO نیز مانند سایر تکنیک‌های محاسبات تکاملی، از یک جمعیت یا Swarm که شامل راه‌حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. هرچند که در PSO هر عضو از جمعیت، دارای یک سرعت انطباقی (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جستجو حرکت می‌کنند، علاوه بر آن، هر کدام از آن‌ها دارای حافظه نیز می‌باشند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به‌خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر عضو در دو جهت صورت می‌گیرد.

۱- به‌سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند (pbest).

۲- به‌سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آن‌ها ملاقات کرده است (gbest).

فرض کنید که فضای جستجوی مسئله، D بعدی باشد، پس λ مین ذره از جمعیت را می‌توان با یک بردار D بعدی $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^D$ و سرعت آن (تغییر مکان) را هم می‌توان با بردار D بعدی $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^D$ نمایش داد. بهترین موقعیت ملاقات‌شده توسط هر ذره را با pbest و بهترین موقعیت ملاقات‌شده در کل را با gbest نمایش می‌دهند و از بالانویس n برای نمایش شماره تکرارها استفاده می‌شود. در نهایت جمعیت مطابق با دو رابطه زیر، به حرکت در می‌آید (Shi, 2000).

$$v_{id}^{n+1} = \chi [W v_{id}^n + C_1 r_1^n (P_{id}^n - x_{id}^n) + C_2 r_2^n (P_{gd}^n - x_{id}^n)] \quad \text{رابطه ۹}$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در روابط بالا داریم:

$$d = 1, 2, \dots, D$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

در این روابط، n شماره تکرارها، N اندازه جمعیت، C_1 و C_2 دو ضریب ثابت و مثبت می‌باشند که به ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی خوانده می‌شوند، W اینرسی وزن، χ ضریب انقباض و r_1 و r_2 اعداد تصادفی در محدوده صفر تا یک با توزیع یکنواخت هستند. مقدار پارامترهای الگوریتم PSO در این پژوهش به صورت جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم PSO پس از رسیدن به ۱۰۰ تکرار (مطابق با اندازه ذرات در جدول پارامترها) متوقف شد. این عدد براساس تست‌های اولیه و تعادل بین دقت و زمان محاسبه انتخاب گردید.

Table 1. Parameters used in the PSO algorithm

Parameter	Value
χ	1
W_{max}	0.9
W_{min}	0.4
C_1	1.8
C_2	1.8
Swarm size	90
Particle size	300

در شکل (۴) مراحل بهینه‌سازی توسط الگوریتم PSO ارائه شده است.

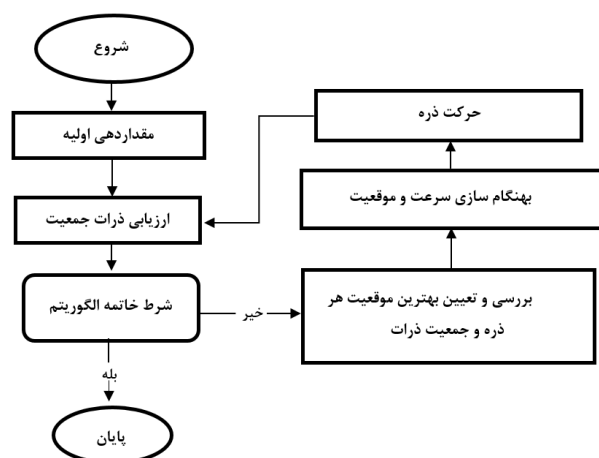


Figure 4. Steps of the PSO algorithm

۳. بحث و نتایج

همان گونه که تشریح شد، هدف این پژوهش بهره‌برداری بهینه از مخزن در دوره سیلابی جهت کاهش خسارات ناشی از سیل می‌باشد. تابع هدف مسئله کمینه‌سازی مجموع تفاضل رهاسازی از دبی مجاز است. متغیرهای تصمیم مسئله مقادیر رهاسازی روزانه از مخزن می‌باشند. بنابراین، مسئله دارای ۹۰ متغیر تصمیم می‌باشد. برای بررسی و مقایسه سه دبی مجاز (Qsafe) برای مسئله لحاظ شده است. این سه مقدار برابر با ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشند. نکته دیگر حداکثر حجم آب مجاز در مخزن می‌باشد. با توجه به احتمال وجود سیلاب‌های بعدی و خطر سرریز شدن مخزن، حداکثر حجم مجاز مخزن برابر با ۶۰۰۰ میلیون مترمکعب لحاظ شده است و در صورت افزایش این مقدار تابع هدف دچار جریمه می‌گردد. باید توجه کرد حجم مخزن در واقعیت به حدود ۶۰۷۰ میلیون مترمکعب رسیده است. نمودار شکل‌های (۵) تا (۷) به ترتیب نحوه همگرایی تابع هدف را برای دبی مجاز ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهند.

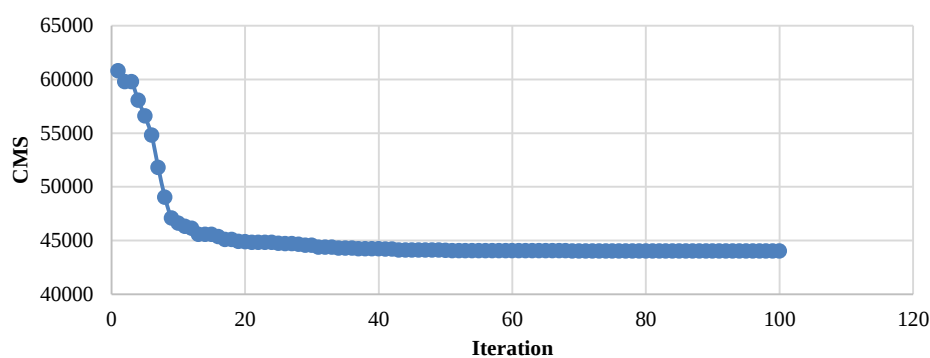


Figure 5. Convergence trend of the objective function for a permissible discharge of 400 CMS

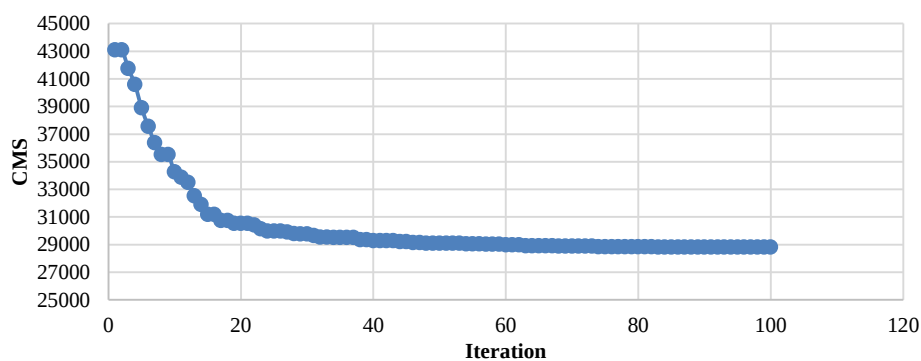


Figure 6. Convergence trend of the objective function for a permissible discharge of 600 CMS

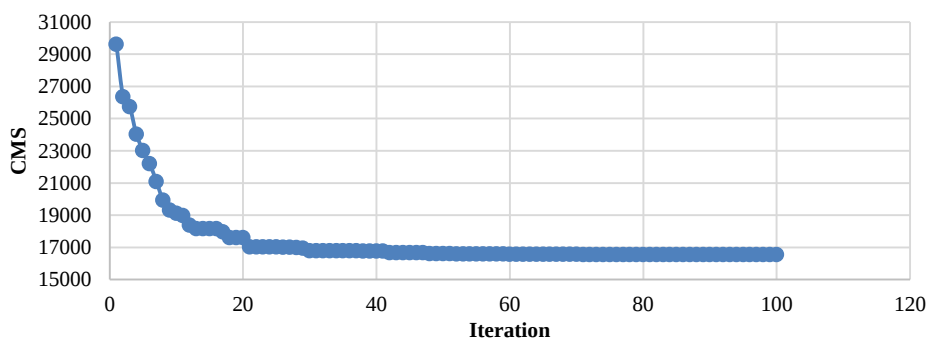


Figure 7. Convergence trend of the objective function for a permissible discharge of 800 CMS

نتایج حاصل از بهینه‌سازی رهاسازی از مخزن سد کرخه در جدول (۲) نشان داده شده است. برای مقایسه باید عنوان گردد که در بهره‌برداری انجام شده در واقعیت، مقدار بیشینه رهاسازی برابر ۲۴۹۲/۵ مترمکعب بر ثانیه و متوسط خروجی برابر با ۹۴۷/۶ مترمکعب بر ثانیه است. مقدار تابع هدف براساس بهره‌برداری انجام شده در واقعیت برای دبی‌های مجاز مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

Table 2. Optimization model results for different permissible discharges

Permissible discharge (CMS)	Qsafe = 400	Qsafe = 600	Qsafe = 800
Objective function (CMS)	44001	28800	16541
Average reservoir release (CMS)	884	899.2	923
Maximum reservoir release (CMS)	1876	1806.5	1881
Objective function based on the actual release from the reservoir (CMS)	49289	34650	26393

بدیهی است که با افزایش مقدار دبی مجاز برای رهاسازی مقدار تابع هدف و خسارت ناشی از سیل کاهش می‌یابد. همچنین مقدار متوسط رهاسازی با افزایش دبی مجاز افزایش یافته است، اما مقدار حداکثر رهاسازی تابعیتی از دبی مجاز نداشته است. در مقایسه با بهره‌برداری انجام شده در واقعیت در بازه زمانی مورد مطالعه، در دبی‌های مجاز ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ مقدار تابع هدف به دست آمده در مدل، به ترتیب ۱۱، ۱۷ و ۳۷ درصد بهبود داشته است. برای مقایسه در شکل‌های (۸) تا (۱۰) رهاسازی انجام شده در واقعیت و مدل بهینه‌سازی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده در مدل دارای پیک‌های کوچک‌تری است، اما تعداد گام‌های زمانی که مقدار رهاسازی از دبی مجاز تجاوز می‌کند، بیش‌تر می‌باشد.

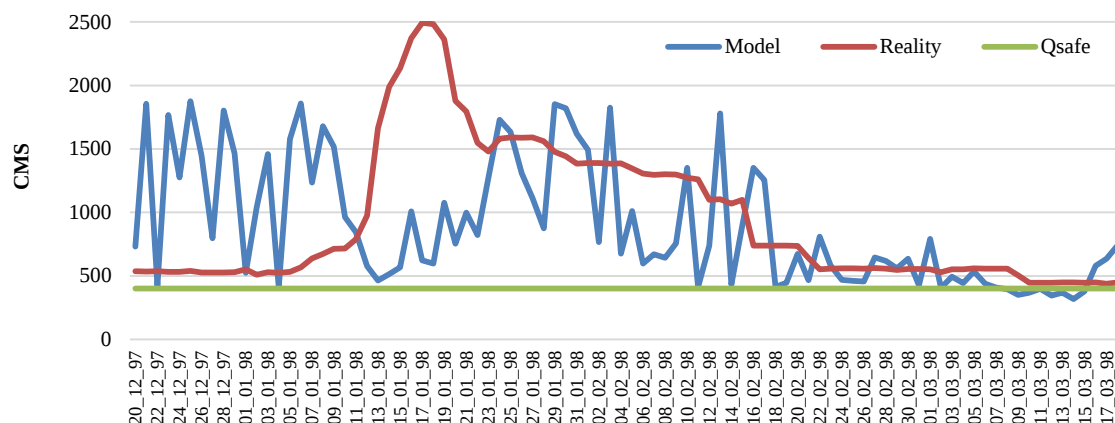


Figure 8. Reservoir release at a permissible discharge of 400 cubic meters per second

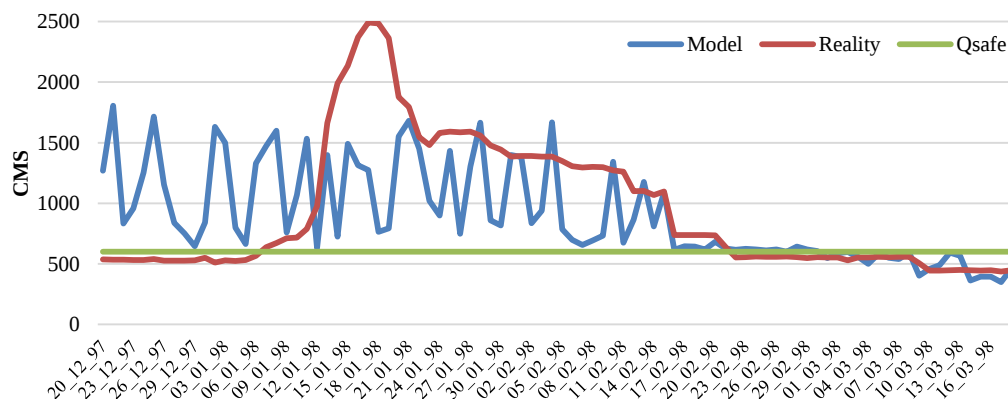


Figure 9. Reservoir release at a permissible discharge of 600 cubic meters per second

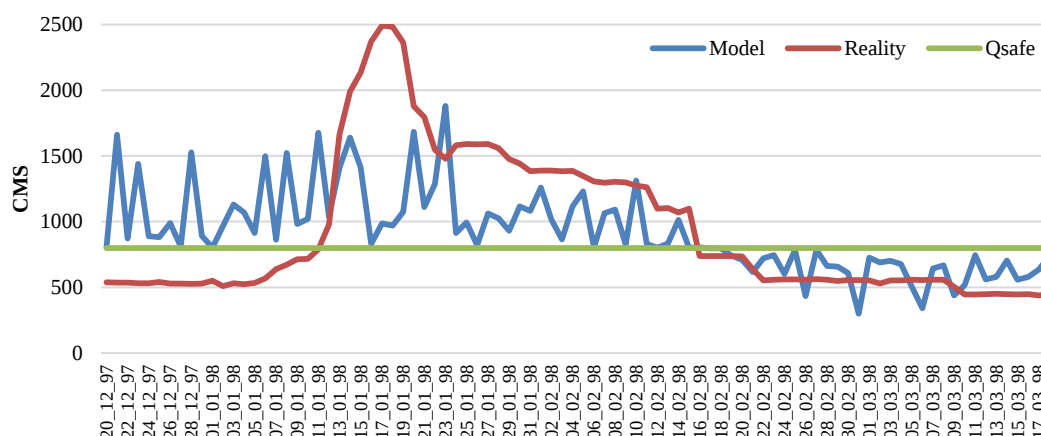


Figure 10. Reservoir release at a permissible discharge of 800 cubic meters per second

تعیین حداکثر حجم ذخیره مجاز در مخزن نقش مهمی در بهره‌برداری مخزن ایفا می‌کند. از طرفی مقدار حداکثر ذخیره باید به گونه‌ای باشد که در صورت بروز سیلاب‌های بعدی امکان مهار سیل وجود داشته باشد و از طرف دیگر هرچه مقدار حداکثر حجم ذخیره بیش‌تر باشد امکان ذخیره بیش‌تر و رهاسازی کم‌تر فراهم می‌شود. برای این منظور تحلیل حساسیتی برای حداکثر مجاز آب ذخیره‌شده در مخزن انجام گردید و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. باید توجه داشت مقدار دبی مجاز در هر سه حالت ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

Table 3. Optimization model results for different maximum permissible reservoir volumes

Maximum permissible reservoir volumes (MCM)	Ssafe = 5500	Ssafe = 6000	Ssafe = 6500
Objective function (CMS)	49788	44001	38214
Average reservoir release (CMS)	948	884	818
Maximum reservoir release (CMS)	1977	1876	1884

همان‌گونه که از جدول (۳) مشخص است با افزایش حد مجاز ذخیره در مخزن مقدار تابع هدف بهبود قابل‌توجهی داشته است. به‌گونه‌ای که با افزایش آن از ۶۰۰۰ به ۶۵۰۰ میلیون مترمکعب، تابع هدف (کمینه‌سازی مجموع تخطی از آستانه تحمل پایین‌دست یا دبی مجاز) به میزان ۵۷۷۰ یعنی در حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین با افزایش ذخیره در مخزن امکان رهاسازی کم‌تر در زمان سیلاب برای جلوگیری از خسارت‌های سیل فراهم می‌شود و مشخص است که متوسط رهاسازی از مخزن با افزایش ذخیره مخزن کاهش یافته است.

شکل (۱۱) تغییرات ذخیره مخزن را در طول دوره بهره‌برداری نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌گردد که سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن (حجم ذخیره در مخزن) برای کاهش خسارت‌ها یکسان می‌باشد (کاهش حجم ذخیره مخزن قبل از وقوع اوج بارش‌ها و رهاسازی تدریجی آب از مخزن) و تغییرات حداکثر مجاز حجم مخزن تنها حدود تغییرات ذخیره در مخزن را تغییر می‌دهد.

نتایج ارائه‌شده الگوهای جالبی از رفتار سیستم را در شرایط مختلف بهینه‌سازی آشکار می‌سازد. در بررسی حساسیت مدل به دبی مجاز پایین‌دست، مشاهده می‌شود که بهبود عملکرد مدل از ۱۱ تا ۳۷ درصد به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده آن است که با افزایش انعطاف‌پذیری سیستم در پذیرش دبی‌های بالاتر، فضای مانور الگوریتم برای یافتن راه‌کارهای بهینه گسترده‌تر می‌شود. به‌ویژه در شرایطی که دبی مجاز به ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد، مدل می‌تواند با توزیع هوشمندانه‌تر رهاسازی در طول زمان، هماهنگی بهتری بین ذخیره‌سازی و رهاسازی ایجاد نماید.

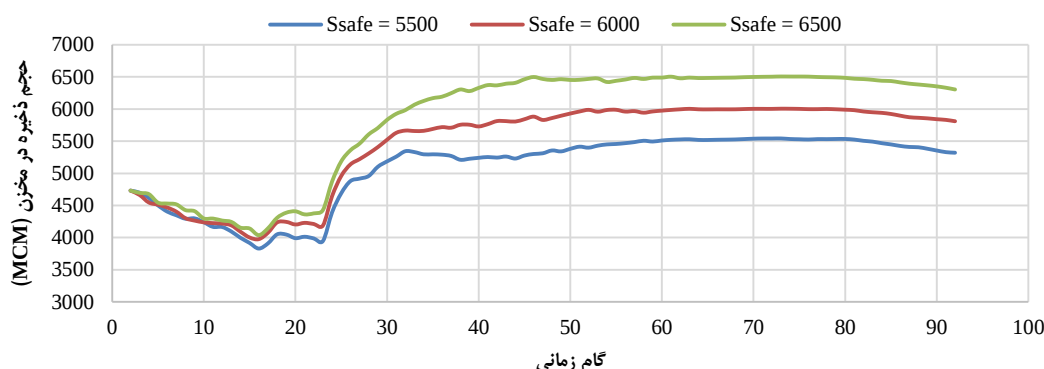


Figure 11. Changes in reservoir storage during the operation period

تحلیل حساسیت حجم مخزن نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. افزایش حجم مخزن از ۵۵۰۰ به ۶۵۰۰ میلیون مترمکعب منجر به بهبود ۲۵ درصد در تابع هدف می‌شود که حاکی از اثر شتابی این پارامتر بر عملکرد سیستم است. نکته جالب توجه اینجاست که این بهبود به‌طور عمده از طریق کاهش متوسط دبی رهاسازی (۱۴ درصد) محقق شده است، نه کاهش حداکثر دبی خروجی. این موضوع نشان می‌دهد که مدل ترجیح می‌دهد با افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، جریان سیلاب را در طول زمان گسترش دهد تا از ایجاد پیک‌های مخرب جلوگیری کند.

ترکیب این دو دسته نتایج، استراتژی بهینه‌ای را پیشنهاد می‌کند؛ استفاده همزمان از حجم ذخیره کافی (حدود ۶۵۰۰ میلیون مترمکعب) همراه با اعمال دبی مجاز متوسط (حدود ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه). این ترکیب به سیستم اجازه می‌دهد هم از مزایای ذخیره‌سازی پیک سیلاب بهره‌برد و هم با رهاسازی تدریجی و کنترل‌شده، از ایجاد تنش در پایین‌دست جلوگیری کند. شکل (۱۱) پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که چگونه مدل به‌صورت خودکار به سمت کاهش پیشگیرانه ذخیره قبل از پیک بارش‌ها و سپس پرکردن تدریجی مخزن گرایش دارد.

این یافته‌ها نه‌تنها برای سد کرخه، بلکه برای کلیه سدهایی که با چالش مدیریت سیلاب‌های ناگهانی مواجه هستند، قابل‌تعمیم است. الگوهای شناسایی‌شده می‌توانند مبنایی برای طراحی دستورالعمل‌های بهره‌برداری در شرایط اضطراری باشند و به مدیران منابع آب کمک کنند تا در مواجهه با پیش‌بینی‌های سیلاب، تصمیم‌های آگاهانه‌تری اتخاذ نمایند.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای مدیریت بهره‌برداری از مخزن سدها در زمان سیلاب، به‌منظور کاهش خسارت‌های پایین‌دست ناشی از رهاسازی آب، انجام شد. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، سیاست بهینه رهاسازی از مخزن سد کرخه در طول سیلاب سال ۱۳۹۸ تعیین گردید. نتایج نشان داد که بهره‌برداری بهینه از مخزن می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خسارت‌های ناشی از سیلاب را کاهش دهد. در مقایسه با بهره‌برداری واقعی، مدل بهینه‌سازی توانست تابع هدف (مجموع تخطی از دبی مجاز) را برای دبی‌های مجاز ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب ۱۱، ۱۷ و ۳۷ درصد بهبود بخشد. هم‌چنین، حداکثر دبی رهاسازی از حدود ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه به حدود ۱۹۰۰ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافت. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که افزایش حداکثر حجم مجاز ذخیره در مخزن، می‌تواند به کاهش بیش‌تر خسارت‌ها کمک کند. به‌طور خاص، افزایش حداکثر حجم ذخیره از ۶۰۰۰ به ۶۵۰۰ میلیون مترمکعب، تابع هدف را حدود ۲۵ درصد بهبود بخشید. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدیریت پیشگیرانه حجم ذخیره مخزن و رهاسازی تدریجی آب، می‌تواند به کاهش اثرات مخرب سیلاب کمک کند.

با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که مدیران منابع آب از مدل‌های بهینه‌سازی برای بهبود سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن سدها استفاده کنند. با توجه به پیش‌بینی‌های هواشناسی، کاهش حجم ذخیره مخزن قبل از وقوع پیک بارش‌ها و اجرای سیاست‌های رهاسازی تدریجی آب، می‌تواند از ایجاد پیک‌های شدید جریان در پایین‌دست جلوگیری کند. همچنین، به‌روزرسانی مدل‌های بهینه‌سازی با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی و هیدرولوژیکی می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها را افزایش دهد. توسعه مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه که علاوه بر کاهش خسارت‌های سیلاب، اهداف دیگری مانند تأمین نیازهای آبی پایین‌دست و تولید انرژی برقی را نیز در نظر می‌گیرند، می‌تواند به مدیریت جامع‌تر منابع آب منجر شود. همچنین در مطالعات بعدی می‌توان اثر تغییرات دبی ورودی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف و یا اتصال به مدل‌های پیش‌بینی سیل مورد بررسی قرار داد. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و مدیریت هوشمندانه مخازن سدها، می‌توان خسارت‌های ناشی از سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای مدیران منابع آب در جهت بهبود سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن سدها و کاهش خطرهای ناشی از سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Ant Colony Optimization
2. Harmony Search
3. Honey-bee mating optimization
4. Imperialistic Competitive Algorithm
5. Cellular Automata
6. Genetic Algorithm
7. Particle Swarm Optimization
8. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
9. General Lake Model-Aquatic EcoDynamics library

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Afshar, A., Shafii, M., & Haddad, O. B. (2011). Optimizing multi-reservoir operation rules: an improved HBMO approach. *Journal of Hydroinformatics*, 13(1), 121-139.
- Afshar, M. H., Azizipour, M., Oghbaee, B., & Kim, J. H. (2017). Exploring the efficiency of harmony search algorithm for hydropower operation of multi-reservoir systems: a hybrid cellular automata-harmony search approach. In *Harmony Search Algorithm: Proceedings of the 3rd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017)* 3 (pp. 252-260). Springer Singapore.
- Afshar, M. H., rezai, A., & Moeini, R. (2012). Optimal Reservoir Operation using Deterministic Adaptive Refinement mechanism for Ant Algorithm. *Ferdowsi Civil Engineering*, 23(1), 65-84. (In Persian)
- Banibashar, M., Alami, M., & Abbasi, H. (2011). Optimum Exploitation of Multi-purpose Alavian Dam Reservoir Using Ant Colony Algorithm. *Water and Soil Science*, 20(4), 1-13. (In Persian)
- Bozorg Haddad, O., Afshar, A., & Mariño, M. A. (2008). Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs. *Journal of Hydroinformatics*, 10(3), 257-264.
- Cai, X., McKinney, D. C., & Lasdon, L. S. (2001). Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in Water Resources*, 24(6), 667-676.

- Diaz, G.E., & Fontane, D.G. (1989). Hydropower optimization via sequential quadratic programming. *Water Resources Planning and Management*, 115(6), 715-733.
- Ding, W., Wei, G., & Zhou, H. (2023). Improving flood resilience through optimal reservoir operation. *Journal of Hydrology*, 620, 129494.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, November). Particle swarm optimization. In Proceedings of the IEEE international conference on neural networks (Vol. 4, pp. 1942-1948).
- Hatamkhani, A., & Moridi, A. (2019). Multi-objective optimization of hydropower and agricultural development at river basin scale. *Water Resources Management*, 33, 4431-4450.
- Hatamkhani, A., Moridi, A., & Yazdi, J. (2020). A simulation–Optimization models for multi-reservoir hydropower systems design at watershed scale. *Renewable Energy*, 149, 253-263.
- Hatamkhani, A., Shourian, M., & Moridi, A. (2021). Optimal design and operation of a hydropower reservoir plant using a WEAP-Based simulation–optimization approach. *Water Resources Management*, 35(5), 1637-1652.
- JanatRostami, S., Kholghi, M., & Bozorg Haddad, O. (2010). Management of Reservoir Operation System Using Improved Harmony Search Algorithm. *Water and Soil Science*, 20(3), 61-71. (In Persian)
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- Oliveira, R., & Loucks, D.P. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water resources research*, 33(4), 839-852.
- 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.
- Bayat, B., Mousavi, S. J., & Namin, M. M. (2011). Optimization–simulation for short-term reservoir operation under flooding conditions. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 60(7), 434-447.
- Ren, M., Zhang, Q., Yang, Y., Wang, G., Xu, W., & Zhao, L. (2022). Research and application of reservoir flood control optimal operation based on improved genetic algorithm. *Water*, 14(8), 1272.
- SaberChenari, K., Abghari, H., & Tabari, H. (2016). Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 1-11.
- Shenava, N., & Shourian, M. (2018). Optimal reservoir operation with water supply enhancement and flood mitigation objectives using an optimization-simulation approach. *Water resources management*, 32(13), 4393-4407.
- Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*. Vol. 1. IEEE.
- Song, Y., Shen, C., & Wang, Y. (2023). Multi-objective optimal reservoir operation considering algal bloom control in reservoirs. *Journal of Environmental Management*, 344, 118436.