Vol 14, No. 3, Autumn 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Development of a hybrid model to reduce water loss in dams reservoir operation

Sakine Hatami[1] | Jaber Soltani[2]✉ | Ali Mohammadi[3]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: s.hatami73@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jsoltani@ut.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ali.mohammadi@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 26 May 2024
Received in revised form
20 June 2024
Accepted 25 June 2024
Published online 23 November 2024

Keywords:
Evaporation
Hybrid operation policy
Pishin dam
Seepage

ABSTRACT

One of the most important sources of water loss in reservoirs is controlling reservoir efficiency indicators, water deficit, and losses through evaporation and seepage. In this study, in the first step towards formulating operational policies, the SOP model of Pishin dam located in Sistan and Baluchestan Province during the years 1390 to 1397 was developed. Subsequently, to identify optimal release values in operational policies, the Generalized Reduced Gradient (GRG) extended to standard operational policy (SOP) and averaging method. Thus, hybrid optimization-simulation models of Generalized Reduced Gradient-Standard Operational Policy (GRG-SOP) and Generalized Reduced Gradient-Standard Operational Policy-Averaging (GRG-SOP-AVE) were developed. In this study, indicators of water losses (evaporation and seepage), deficit, and reservoir efficiency indices for the GRG-SOP, GRG-SOP-AVE policies, and current operation were estimated to identify the best operating policy. The results reveal that the operating policy derived from the GRG-SOP-AVE model leads to a reduction in the values of deficit, evaporation and seepage indicators by 35.32 MCM/yr, 10.74 MCM/yr, 0.002 MCM/yr, respectively. Additionally, the indicators of reliability, resilience, vulnerability, and flexibility have improved by 67.58%, 24.59%, 31.69%, and 11.35% respectively compared to other policies. Therefore, it is suggested to utilize the policy derived from the GRG-SOP-AVE model in other dams to reduce seepage, evaporation, and deficit indicators.

Cite this article: Hatami, S., Soltani, J., & Mohammadi, A. (2024). Development of a hybrid model to reduce water loss in dams reservoir operation. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (3), 681-696.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377070.1162

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377070.1162

دوره چهاردهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

توسعه مدل هیبریدی به‌منظور کاهش تلفات بهره‌برداری آب از مخزن سدها

سکینه حاتمی[۱] | جابر سلطانی[۲]✉ | علی محمدی[۳]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: s.hatami73@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: jsoltani@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ali.mohammadi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

کلیدواژه‌ها:

تبخیر

تراوش

سد پیشین

سیاست بهره‌برداری هیبریدی

چکیده

یکی از مهم‌ترین منابع هدررفت آب در مخازن سدها، کنترل شاخص‌های کارایی مخزن، کمبود و تلفات آب از طریق تبخیر و تراوش است. در این پژوهش درگام نخست جهت تدوین سیاست‌های بهره‌برداری، مدل SOP سد پیشین واقع در استان سیستان و بلوچستان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ تدوین شد. سپس برای شناسایی مقادیر رهاسازی بهینه در سیاست‌های بهره‌برداری، مدل گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته (GRG) با سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و روش میانگین‌گیری هیبرید گردید. لذا مدل‌های هیبریدی بهینه‌سازی- شبیه‌سازی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته-بهره‌برداری استاندارد (GRG-SOP) و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته-بهره‌برداری استاندارد-میانگین‌گیری (GRG-SOP-AVE) توسعه داده شد. در این پژوهش شاخص‌های تلفات آب (تبخیر و تراوش)، کمبود و شاخص‌های کارایی مخزن به‌ازای سیاست‌های بهره‌برداری GRG-SOP، GRG-SOP-AVE و بهره‌برداری فعلی برآورد شدند تا بهترین سیاست بهره‌برداری شناسایی گردد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیاست بهره‌برداری به‌دست‌آمده از مدل GRG-SOP-AVE، سبب می‌شود تا مقادیر شاخص‌های کمبود ۳۵/۳۲ MCM/yr، تبخیر ۱۰/۷۴ MCM/yr و تراوش ۰/۰۰۲ MCM/yr کاهش پیدا کنند. هم‌چنین شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به‌ترتیب به میزان ۶۷/۵۸، ۲۴/۵۹، ۳۱/۶۹ و ۱۱/۳۵ درصد نسبت به سیاست‌های دیگر بهبود بیش‌تری داشته است. لذا پیشنهاد می‌گردد جهت کاهش تلفات تراوش، تبخیر و کمبود تأمین، از سیاست به‌دست‌آمده از مدل GRG-SOP-AVE در سایر سدها استفاده شود.

استناد: حاتمی، سکینه؛ سلطانی، جابر و محمدی، علی (۱۴۰۳). توسعه مدل هیبریدی به‌منظور کاهش تلفات بهره‌برداری آب از مخزن سدها. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۳)، ۶۸۱-۶۹۶. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.377070.1162

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

گرمایش زمین و در نتیجه آن تغییرات اقلیمی، خسارت‌های جبران‌ناپذیری را بر بخش‌های مختلف محیط زیست به‌ویژه منابع آب وارد کرده است. بنابراین، تدوین راهبردهای سازگاری با پدیده تغییراقلیم جهت افزایش توانایی مقابله و تاب‌آوری با پیامدهای تأثیر تغییراقلیم بر منابع آب ضروری است. به‌دلیل شرایط اقلیمی و کاهش بارش‌ها، ایران یکی از کشورهای مواجه با کمبود آب محسوب می‌شود (Soltani *et al*., 2016). با افزایش جمعیت و درنتیجه افزایش نیاز به آب در صنعت، کشاورزی، شرب و دیگر بخش‌ها، بحران آب روز به روز رو به افزایش است و در ایران با اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بحران آب به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم اقتصادی–اجتماعی نیز معرفی می‌شود (Banihabib *et al*., 2021). کمبود آب، منجر به خالی‌ماندن سدها، از بین‌رفتن کشاورزی و در نتیجه کمبود غذا می‌شود لذا توجه بسیاری از برنامه‌ریزان سطح کلان و پژوهش‌گران، بررسی تأمین پایدار آب و غذا به‌عنوان یک موضوع چالشی و حیاتی در جهان است (Mohammadi *et al*., 2024; Yousefi *et al*., 2017). موضوع بهره‌برداری از سد، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از منظر تصمیم‌گیری و هدف‌های مدنظر پیچیده است. در این اقلیم‌ها، سیاست‌های بهره‌برداری برای کاهش شدت تنش در دوره‌های خشک از طریق ذخیره‌سازی آب در ماه‌های قبل از وقوع تنش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این روش‌های سیاست بهره‌برداری با کاهش تخصیص آب در ماه‌های مرطوب و تخصیص آب به ماه‌های مواجه با کم آبی، آسیب های شدید و جدی به سیستم را در ماه‌های خشک کاهش می‌دهد. اگرچه این سازوکار می‌تواند درصد اطمینان‌پذیری سیستم را برای تأمین نیازها کاهش دهد، اما به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند آسیب‌پذیری (شدت کمبود در دوره شکست) را کاهش دهد. سیاست‌های مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن وجود دارد که هرکدام می‌تواند عملکرد متفاوتی داشته باشد. استخراج بهترین رویکردهای (سیاست‌ها) بهره‌برداری با اهداف خاص، از مهم ترین دغدغه‌ها برنامه‌ریزان منابع آب است (Bayesteh and Azari, 2021).

ساخت سد برای تخصیص آب به مصارف مختلف مانند آبیاری، صنعت، شرب و محیط زیست همواره موضوع بحث برانگیزی بوده است. ساخت سد تا حدودی سبب تغییر آب‌وهوای مناطق مختلف می‌شود که این موضوع می‌تواند بر چالش ساخت سدها از منظر زیست‌محیطی بیفزاید (Zolfagharpour *et al*., 2021). ازآنجایی‌که ساخت سدها اجتناب‌ناپذیر است، اکوسیستم بار نیازهای انسانی و پیشرفت اقتصادی را بر دوش می‌کشد. با توجه به ارزش‌های زیست‌محیطی، بهره‌برداری از مخزن سد ممکن است تأثیر تغییر جریان در پایین‌دست را به حداقل برساند تا بقای تالاب‌های موجود را تضمین کند (Safavi *et al*., 2015, Dutta *et al*., 2020). همان‌طورکه پیش‌تر نیز ذکر شد، طی دهه‌های گذشته حل مسائل مرتبط با بهره‌برداری مخزن موضوع چالش‌برانگیزی برای مدیریت منابع آب بوده است. به‌منظور بهره‌برداری بهینه، چندین قاعده به‌همراه مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مانند مدل تصمیم خطی (LDR)، مدل گزینه حقیقی (ROM)، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و غیره ارائه شده‌اند. مدل SOP که رایج‌ترین و ساده‌ترین مدل استفاده‌شده تاکنون است، درصورتی که امکان رهاسازی آب باشد، در هر دوره از تقاضا، آب را رهاسازی می‌کند. در این روش به‌دلیل آن‌که کل آب در دسترس در دوره فعلی آزاد شده است، اگر ورودی آب در دوره‌های بعدی کم باشد می‌تواند این سیاست خسارت‌های زیادی را به‌دلیل کمبود آب به سیستم وارد نماید (Men *et al*., 2019)؛ به این معنی که روش SOP اغلب سبب کسری آب می‌شود. بنابراین در مطالعات مختلف سعی شد تا با ارتقای روش‌های فعلی و توسعه آن‌ها آن‌ها بتوان عملکرد مناسبی در بهره‌برداری بهینه از مخازن آب سدها نشان داد. Saadatpour *et al*. (2020)، به‌منظور افزایش کیفیت آب، حداکثرسازی تأمین آب و تولید انرژی به توسعه مدل‌های جانشین الگوریتم تکاملی در یک چارچوب انطباقی–بازگشتی اقدام کردند. رویکرد

مورداستفاده به‌طورقابل‌توجهی زمان محاسبات را کاهش داد و توانست جواب‌های دقیق را نسبت به رویکردهای مقایسه‌ای دیگر ارائه دهد.

Alimohammadi *et al.* (2020) در پژوهشی به‌منظور کاهش اثرات تغییراقلیم بر بهره‌برداری سدها و مخازن آن‌ها، تغییر از سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) به دستور تصمیم خطی اصلاح‌شده (MLDR) را به‌عنوان راه‌کاری موردبررسی قرار دادند. نتایج حاکی از عملکرد مناسب‌تر MLDR نسبت به روش SOP در تخلیه کامل آب سد بوده است. در پژوهش دیگری توسط Yaghoubi *et al.* (2020) سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سدها با درنظرگرفتن موضوعات کیفیت آب و داده‌های تغییر اقلیم موردارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش یک مدل بهره‌برداری بهینه براساس رواناب شبیه‌سازی‌شده و تقاضای آب در آینده توسعه داده شد. نتایج نشان داد براساس مدل پیشنهادی، مجموع مواد جامد محلول آب در آینده کاهش می‌یابد. هم‌چنین عملکرد مخزن در مقایسه با سیاست بهره‌برداری استاندارد بهبود کمی معناداری از خود نشان داده است. Zarei *et al.* (2023) نیز دو رویکرد سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و رویکرد ایده‌آل (IA) را برای ارزیابی عملکرد بهره‌برداری از سد در مقایسه با مدیریت گذشته سد تحت شرایط سیلابی توسعه دادند. نتایج این پژوهش منجربه معرفی یک روش SOP ابتکاری برای بهره‌برداری از سدها با عملکرد کنترل سیلاب، تأمین نیازهای آبی و تولید برقابی گردید. الگوریتم ژنتیک (GA)به‌همراه رویکرد IA با تابع هدف حداقل‌نمودن حداکثر آزادسازی از بزرگ‌ترین مخزن در یک سیستم چند مخزنه به‌کارگرفته شد. بررسی مطالعات پیشین نشان داد تأثیر شاخص‌های تلفات مخزن در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف ارزیابی نشده است. به‌دلیل اهمیت کاهش تلفات آب مخزن در بهره‌برداری بهینه، ضروری است شاخص‌های عملکردی (تراوش، تبخیر و کمبود تامین) در سیاست‌های بهره‌برداری موردبررسی قرار گیرد. بدین ترتیب سؤالاتی که در این پژوهش پاسخ آن‌ها آن‌ها دنبال می‌شود این است که تأثیر سیاست‌های بهره‌برداری از جمله سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی بهینه‌سازی شبیه‌سازی بر مقدار تلفات آب چگونه است؟ و کدام سیاست بهره‌برداری نسبت به سایر سیاست‌های موردبررسی، جهت کاهش تلفات مناسب‌تر است؟

در این پژوهش برای بهره‌گیری مقادیر رهاسازی بهینه در سیاست‌های بهره‌برداری، مدل گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته (GRG) با سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و روش میانگین‌گیری هیبرید گردید و مدل‌های هیبریدی بهینه‌سازی– شبیه‌سازی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته–بهره‌برداری استاندارد (GRG-SOP) و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته–بهره‌برداری استاندارد– میانگین‌گیری (GRG-SOP-AVE) توسعه داده شد تا بهترین سیاست برای کاهش تلفات تراوش، تبخیر، کمبود تأمین شناسایی و معرفی شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. معرفی منطقه موردمطالعه

سد پیشین در استان سیستان و بلوچستان در جنوب‌شرقی ایران به طول و عرض جغرافیایی ۶۱/۶۹ و ۲۶/۰۳۰ درجه واقع شده است. سد پیشین از نوع خاکی با هسته رسی با ارتفاع ۶۲ متر از بستر رودخانه و ۶۳ متر از پی سنگی، حجم بدنه ۲/۱۵ میلیون مترمکعب، طول تاج ۴۰۰ متر و رقوم تاج ۲۷۳ متر از سطح دریاست. موقعیت و نمایی از سد در شکل (۱) نمایش داده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر شاخص‌های عملکردی و کارایی در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف، داده‌های متوسط سالانه آبدهی ورودی و مصارف که شامل تقاضای آب های کشاورزی، شرب و صنعت در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ است در جدول (۱) ارائه گردیده است.

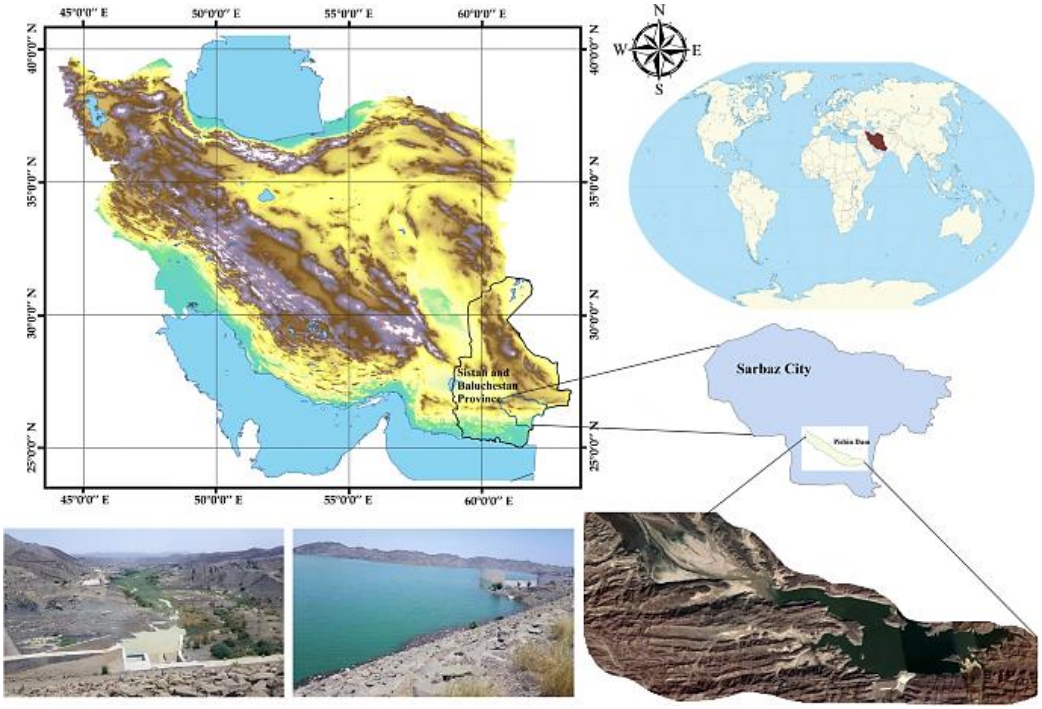

Figure 1. The location of the Pishin dam (adapted from Khodabandeh *et al*., 2021)

Table 1. Information on the inflow volume and consumption of the Pishin dam (MCM) (Hatami *et al*., 2020)

	Inflow	Evaporation	Industry	Domestic	Agriculture	Total Consumption
Study Period	6.93	1.10	0.00	0.34	3.72	4.06

۲. ۲. روش تحقیق

به‌منظور انجام این پژوهش، پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات سد پیشین، ابتدا مدل‌های هیبریدی بهینه‌سازی- شبیه‌سازی GRG-SOP و بهینه‌سازی- شبیه‌سازی-میانگین GRG-SOP-Average تدوین شدند. سپس شاخص‌های عملکردی و کارایی به‌ازای این سیاست‌ها و بهره‌برداری فعلی برآورد و مقایسه گردید و در انتها سیاست بهره‌برداری برتر انتخاب گردید. فلوچارت روش تحقیق در شکل (۲) نمایش داده شده است.

Figure 2. Research Process Flowchart

۲. ۳. سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)

تعیین حجم ذخیره مخزن در هر دوره براساس دبی ورودی به مخزن، برداشت آب و تلفات آب، شبیه‌سازی مخزن گفته می‌شود (Emadi *et al*., 2012). یکی از روش‌هایی که شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن براساس آن انجام می‌شود، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) می‌باشد (Bayesteh *et al*., 2021).

در بهره‌برداری از مخزن با روش SOP، میزان برداشت آب برابر با مقدار تقاضای آب فرض می‌شود. هنگامی‌که مخزن نتواند تقاضای آب را به‌طور کامل تأمین کند، درصدی از آن را تأمین می‌کند. سپس صحت این فرضیات کنترل می‌شود که در صورت برقرارنبودن آن‌ها آن‌ها دو حالت زیر ممکن است رخ دهد:

۱- اگر ذخیره مخزن در اول دوره بعدی از حجم حداکثر مخزن بیش‌تر باشد ($S_{t+1} \rangle S_{max}$)، به‌علت بیش‌تربودن حجم آب مخزن از حجم حداکثر مخزن سد سرریز خواهیم داشت که در این حالت، به مقدار تقاضای آب از مخزن آب برداشت می‌شود (روابط ۱ تا ۳). در این روابط Sp_t حجم سرریز، S_{t+1} ذخیره مخزن در اول دوره بعدی، S_{max} حجم حداکثر مخزن، De_t میزان تقاضای آب و Re_t میزان رهاسازی مخزن است (Shih and Revelle,1994).

رابطه ۱) $$Sp_t = S_{t+1} - S_{max}$$

رابطه ۲) $$S_{t+1} = S_{max}$$

رابطه ۳) $$Re_t = De_t$$

۲- اگر ذخیره مخزن از حجم حداقل مخزن کم‌تر باشد ($S_{t+1} \langle S_{min}$)، کل آب موجود در مخزن برداشت شده و مخزن کاملاً خالی می‌شود و روابط (۴) و (۵) برقرار است (Shih and Revelle,1994). در این روابط Def_t میزان کمبود و S_{min} نیز حجم حداقل مخزن است.

رابطه ۴) $$Def_t = S_{min} - S_{t+1}$$

رابطه ۵) $$S_{t+1} = S_{min}$$

در صورت رخداد کمبود، دو حالت رخ می‌دهد (Shih and Revelle,1994):

۱- اگر کمبود از تقاضای آب کم‌تر باشد ($Def_t \langle De_t$)، آنگاه رابطه (۶) برقرار است:

رابطه ۶) $$Re_t = De_t - Def_t$$

۲- اگر کمبود از تقاضای آب بیش‌تر باشد ($Def_t \rangle De_t$)، آنگاه رابطه زیر برقرار است که در آن Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در ماه t می‌باشد:

رابطه ۷) $$Re_t = Q_t$$

۲. ۴. الگوریتم غیرخطی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته (GRG)

در روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته متغیر تصمیم‌گیری، بردار $X(x_1.x_2.\dots.x_n)$ و قیود نیز توابع $g_1.g_2.\dots.g_m$ می‌باشند. تابع هدف و یا هر کدام از توابع قیدی می‌توانند غیرخطی باشند. هم‌چنین، امکان نامعین‌بودن محدوده‌ها وجود دارد. درصورتی‌که هیچ قیدی موجود نباشد، مسئله موجود یک مسئله بهینه‌سازی نامقید است. باید توجه داشت که حدود بالا و پایین برای متغیرها به‌عنوان قید اضافی عمل نمی‌کنند بلکه به‌صورت مجزا به برنامه مذکور اعمال می‌شوند (Varyani and Fatahi, 2014).

مراحل انجام این روش به شرح زیر است (Hatami *et al*., 2020):

الف- به‌دست‌آوردن مدل با نقاط عملیاتی و خطی‌کردن کل محدودیت‌های تابع هدف حول نقاط عملیاتی به شکلی که مسئله به بهینه‌سازی خطی تبدیل گردد و در نهایت از بهینه‌سازی خطی برای حل مسئله خطی استفاده گردد.

ب- تکرار روش بهینه‌سازی خطی با خطی‌کردن محدودیت‌ها و تابع هدف جهت نیل به جواب مناسب.

چنانچه جواب مناسب به‌دست نیامد با خطی‌کردن دوباره محدودیت‌ها و توابع هدف پیرامون نقطه جدید مقدار بهینه مسئله پیدا می‌گردد.

برای بهینه‌سازی بهره‌برداری روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته از افزونه Solver که دارای قابلیت نصب در اکسل است، استفاده شده است. در این روش رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیرهای تصمیم (شامل ۱۲ متغیر رهاسازی ماهانه) در نظر گرفته شد. تابع هدف حداقل‌سازی میانگین مربع اختلاف بین تقاضای آب و رهاسازی در طول دوره است (رابطه ۸)، تابع هدف و محدودیت‌ها در روابط (۹) تا (۱۱) ارائه گردیده است. در رابطه (۱۲)، R_{max} میزان حداکثر رهاسازی مخزن در طول دوره موردبررسی است.

$Min\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(De_t - Re_t)^2$ رابطه ۸)

$S_{t+1} \rangle = S_{min}$ رابطه ۹)

$S_{t+1} \langle = S_{max}$ رابطه ۱۰)

$Re_t \rangle = 0$ رابطه ۱۱)

$Re_t \langle = R_{max}$ رابطه ۱۲)

۲. ۵. سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP

ازآنجایی‌که تعیین رهاسازی‌ها با روش بهینه‌سازی غیرخطی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته عملکرد خوبی دارد و نتایج نشان از بهبود شاخص‌های عملکرد و کارایی مخزن دارد، اما قابلیت اجرا توسط بهره‌بردار را ندارد و ممکن است با مشکلاتی از قبیل کمبود آب سری جریان ورودی به مخزن در گذشته تعیین شده و نمی‌توان به‌عنوان سیاست رهاسازی آب در آینده استفاده شود. بدین ترتیب در این سیاست از ترکیب مدل بهینه‌سازی با مدل شبیه‌سازی مخزن بهره گرفتیم که اگر آب کافی موجود نبود، قواعد سیاست بهره‌برداری استاندارد اجرا گردد. لذا در این سیاست، رهاسازی‌های حاصل از بهینه‌سازی با روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته که شامل ۱۲ حجم رهاسازی ماهانه در یک سال است و در جدول (۲) نشان داده شده است در مدل شبیه‌سازی مخزن جایگزین تقاضای آب شده و در طول سال‌های دوره تکرار شد. درنهایت شبیه‌سازی با SOP انجام گرفته است.

Table 2. Monthly release volume resulting from generalized reduced gradient (GRG)

Month	Output Volume (MCM)	Month	Output Volume (MCM)
1	11.57	7	8.15
2	5.92	8	10.19
3	7.39	9	11.66
4	6.35	10	15.82
5	6.65	11	7.06
6	4.54	12	16.17

۲. ۶. سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE

سیاست بهینه‌سازی شبیه‌سازی میانگین‌گیری در سه مرحله انجام می‌گیرد، در مرحله اول جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته از نرم‌افزار GRG Solver که دارای قابلیت نصب در اکسل است، استفاده شده است. در این روش تابع هدف، متغیرها و محدودیت‌ها مشابه روش GRG-SOP است و رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد، که شامل ۹۶ متغیر رهاسازی ماهانه در طول دوره موردبررسی است. در مرحله دوم داده های رهاسازی ماهانه به‌ازای هر ماه (از فروردین‌ماه تا اسفندماه) در طول دوره تفکیک شد، سپس در هر ماه میانگین گرفته شد که به شرح جدول (۳) است. در مرحله سوم؛ ۱۲ متغیر رهاسازی به‌دست‌آمده از میانگین‌گیری، در مدل شبیه‌سازی مخزن جایگزین نیازها در سال اول می‌گردد و در تمام سال‌های دوره موردبررسی تکرار می‌گردد و درنهایت شبیه‌سازی با SOP انجام می گیرد.

Table 3. Average monthly release volume resulting from generalized reduced gradient (GRG)

Month	Output Volume (MCM)	Month	Output Volume (MCM)
1	11.569	7	8.150
2	5.918	8	10.190
3	7.386	9	11.663
4	6.497	10	15.823
5	6.651	11	7.054
6	4.534	12	16.171

۲. ۷. شاخص‌های ارزیابی عملکرد و کارایی مخزن

برای مقایسه و ارزیابی سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP، سیاست بهره‌برداری هیبریدی GA-SOP-AVE و بهره‌برداری فعلی در تخصیص آب، از شاخص‌های متفاوتی به‌عنوان یک مبنا برای مقایسه سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن استفاده گردید. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مخزن شامل شاخص تراوش، تبخیر، کمبود و شاخص‌های کارایی مخزن شامل اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری است. از معادله درصد اختلاف نیز جهت برآورد تغییرات شاخص‌های سیاست‌های بهره‌برداری نسبت به سیاست بهره‌برداری مبنا استفاده شد (Hatami *et al*., 2020).

در خصوص برآورد معادله تراوش، تحلیل عددی تراوش سد پیشین با استفاده از نرم‌افزار Seep/w براساس پیزومترهای تار مرتعش در مقطع حداکثر سد پیشین انجام شد و مدل با حداکثر خطای کم‌تر از ۱۰ درصد کالیبره شده است. سپس تحلیل عددی تراوش به‌ازای ترازهای مخزن سد صورت پذیرفت. جهت برآورد معادله تراوش، از پنج معادله در محیط اکسل استفاده گردید و ضریب تبیین R^2 و شاخص خطا MARE به‌ازای هر معادله محاسبه شد. درنهایت معادله ۱۳ با ضریب تبیین ۰/۹۹ و شاخص خطای ۰/۰۴ به‌عنوان بهترین معادله شاخص تراوش انتخاب گردید (Hatami *et al*., 2020). در معادله (۱۳) Sp دبی تراوش ماهانه برحسب مترمکعب بر ثانیه، El نیز تراز مخزن برحسب متر در ماه متناظر است (Hatami *et al*., 2020).

$$Sp = 2.33E\text{-}10\ El^2 - 1.01E\text{-}7El + 1.10E\text{-}5 \quad \text{رابطه ۱۳)}$$

جهت برآورد تبخیر از رابطه ۱۴ استفاده شد. که در آن Et حجم تبخیر ماهانه برحسب میلیون مترمکعب، A مساحت دریاچه مخزن برحسب کیلومتر مربع و h نیز عمق تبخیر ماهانه برحسب متر در ماه متناظر است (Hatami *et al*., 2020).

$$Et = A * h \quad \text{رابطه ۱۴)}$$

جهت محاسبه شاخص کمبود از رابطه (۱۵) استفاده گردید که در آن Def_t حجم کمبود ماهانه برحسب میلیون مترمکعب، R_t حجم رهاسازی ماهانه برحسب میلیون مترمکعب و D_t حجم تقاضای آب ماهانه برحسب میلیون مترمکعب است (Hatami *et al*., 2020).

$$Def_t = R_t - D_t \quad \text{رابطه ۱۵)}$$

جهت برآورد شاخص اعتمادپذیری حجمی از رابطه (۱۶) استفاده گردید که در آن α_V اعتمادپذیری حجمی، R_t حجم رهاسازی در کل دوره و D_t مقدار کل حجم موردتقاضای آب پایین‌دست مخزن است (Hashimoto *et al*., 1982).

$$\alpha_V = \frac{R_t}{D_t} \quad \text{رابطه ۱۶)}$$

برگشت‌پذیری در سیستم مخزن به‌صورت رابطه (۱۷) است که در آن β سرعت برگشت‌پذیری، r تعداد سری دوره‌های شکستی که بعد از آن پیروزی می‌باشد و R نیز تعداد کل سال‌های شکست می‌باشد (Hashimoto *et al*., 1982).

$$\beta = \frac{r}{R} \quad \text{رابطه ۱۷)}$$

جهت حصول شاخص آسیب‌پذیری از رابطه (۱۸) استفاده گردید که در آن Y شاخص آسیب‌پذیری، Def_t کمبود ماهانه در طول دوره بهره‌برداری و D_t نیز میزان تقاضای آب ماهانه پایین‌دست در همان دوره می‌باشد (Hashimoto *et al*., 1982).

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} Def_t}{\sum_{i=1}^{n} D_t} \quad \text{رابطه ۱۸)}$$

شاخص انعطاف‌پذیری از رابطه (۱۹) محاسبه شد. در این رابطه، Ψ شاخص انعطاف‌پذیری، α شاخص اعتمادپذیری حجمی، β شاخص برگشت‌پذیری و Y شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد (Loucks and Van Beek, 2005).

$$\Psi = \alpha * \beta * (1 - Y) \quad \text{رابطه ۱۹)}$$

از رابطه (۲۰) نیز جهت برآورد تغییرات شاخص‌های سیاست‌های بهره‌برداری نسبت به سیاست بهره‌برداری مبنا استفاده شد. در این رابطه D درصد اختلاف، A شاخص مبنا و B شاخصی که نسبت به شاخص مبنا ارزیابی می‌گردد (Hatami *et al*., 2020).

$$D(\%) = \left|\frac{(A-B)}{A} * 100\right| \quad \text{رابطه ۲۰)}$$

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. ارائه سیاست‌های بهره‌برداری با شاخص‌های مذکور و قیاس آن‌ها

۳. ۱. ۱. ارزیابی و مقایسه حجم رهاسازی ماهانه از مخزن براساس سیاست‌های بهره‌برداری مختلف

در خصوص جریان رهاسازی از مخزن در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف در طول دوره، نوسانات این سیاست‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. در سیاست بهره‌برداری فعلی نوسانات رهاسازی از صفر تا ۶۶ میلیون مترمکعب رخ داده است به‌طوری‌که حداکثر رهاسازی بین اواخر سال ۱۳۹۲ و اوایل سال ۱۳۹۳ است (به‌دلیل وقوع سیلاب)، درحالی‌که حداقل میزان رهاسازی در شهریورماه ۱۳۹۱ و متوسط میزان رهاسازی معادل ۶/۶۸ میلیون مترمکعب است. هم‌چنین در سیاست بهره‌برداری GRG-SOP نوسانات طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ رخ داده است. حجم رهاسازی از سد از صفر تا ۱۶/۱۷ میلیون مترمکعب متغیر است به‌طوری‌که بالاترین حجم رهاسازی به میزان ۱۶/۱۷ میلیون مترمکعب در اسفندماه کل سال‌های دوره غیر از سال ۱۳۹۶ رخ داده است و متوسط حجم رهاسازی معادل ۶/۳۴ میلیون مترمکعب است. در سیاست GRG-SOP-AVE نیز، نوسانات از صفر تا ۱۶/۲۶ میلیون مترمکعب است به‌طوریکه حداکثر رهاسازی در اسفندماه ۱۳۹۴به میزان ۱۶/۲۶ میلیون مترمکعب و متوسط میزان رهاسازی معادل ۵/۸۴ میلیون مترمکعب بوده است.

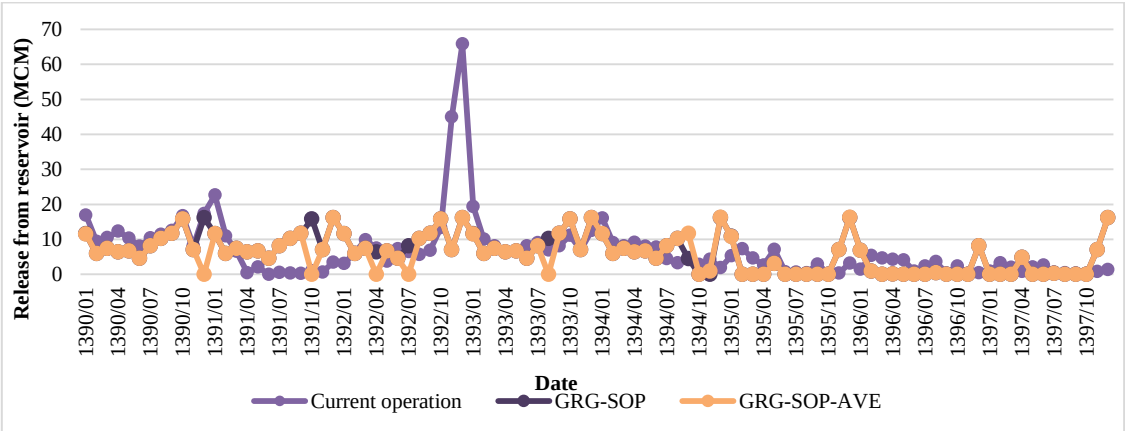

Figure 3. Comparison of the volume of released water under different operation policies

Table 4. Reservoir performance indicators based on different models and operation policies

Reservoir performance indices	Operation Policy		
	Current Operation	**GRG-SOP**	**GRG-SOP-AVE**
Deficit (MCM/Year)	52.74	35.32	35.32
Evaporation (MCM/Year)	13.21	10.74	10.74
Seepage (MCM/Year)	0.0023	0.0020	0.0020

۳. ۱. ۲. ارزیابی و مقایسه کمبود ماهانه مخزن براساس سیاست‌های بهره‌برداری مختلف

درخصوص تعیین شاخص کمبود ماهانه در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف، تغییرات این شاخص تحت بهره‌برداری فعلی و سیاست‌های هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است. در سیاست بهره‌برداری فعلی کمبود ماهانه بین صفر تا ۱۶ میلیون مترمکعب است. کمبود در ابتدای دوره صفر است و این مقدار تا اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۱ ادامه دارد سپس روند صعودی پیدا کرد تا در دی‌ماه ۱۳۹۱به مقدار ۱۴/۸۵ رسید. شهریور ۱۳۹۴ کمبود در بازه صفر تا ۵ میلیون مترمکعب متغیر است سپس روند صعودی پیدا کرد و تا انتهای دوره در بازه صفر تا ۱۶ میلیون مترمکعب نوسان دارد تا انتهای دوره کمبود معادل ۱۴/۸۴ میلیون مترمکعب است و متوسط کمبود معادل ۴/۵۳ میلیون مترمکعب است. هم‌چنین در سیاست بهره‌برداری GRG-SOP نوسانات کمبود ماهانه بین صفر تا ۱۵/۸۲ میلیون مترمکعب متغیر است. در ابتدای دوره میزان کمبود ناچیز بوده است و در ماه‌های انتهایی دوره افزایش داشته است. به‌طوری‌که حداکثر کمبود به میزان ۱۵/۸۲ میلیون مترمکعب در دی‌ماه ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ است و متوسط کمبود در کل دوره معادل ۲/۹۴ میلیون مترمکعب است. به این ترتیب در سیاست بهره‌برداری GRG-SOP-AVE، نوسانات کمبود ماهانه بین صفر تا ۱۶/۱۷ میلیون مترمکعب است. در ابتدای دوره میزان کمبود ۰/۰۲ میلیون مترمکعب و در ماه‌های بعد نیز نزدیک صفر است تا حداکثر کمبود معادل ۱۶/۱۷ میلیون مترمکعب در اسفند ماه ۱۳۹۰ است سپس کمبود در همین بازه متغیر است تا در انتهای دوره معادل صفر است و متوسط کمبود در طول دوره معادل ۳/۴۵ میلیون مترمکعب است.

بنابراین، تغییرات شاخص کمبود در سیاست بهره‌برداری فعلی بالاترین میزان را به خود اختصاص داده است. کمبود سالانه این سیاست نیز تأییدکننده این استنباط و برابر ۵۲/۷۴ میلیون مترمکعب بر سال است (جدول ۴). درحالی‌که کم‌ترین مقدار کمبود سالانه در سیاست‌های GRG-SOP و GRG-SOP-AVE برابر ۳۵/۳۲ میلیون مترمکعب بر سال است (جدول ۴). لذا سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE با داشتن کم‌ترین میزان کمبود به‌عنوان بهترین سیاست شاخص کمبود هستند.

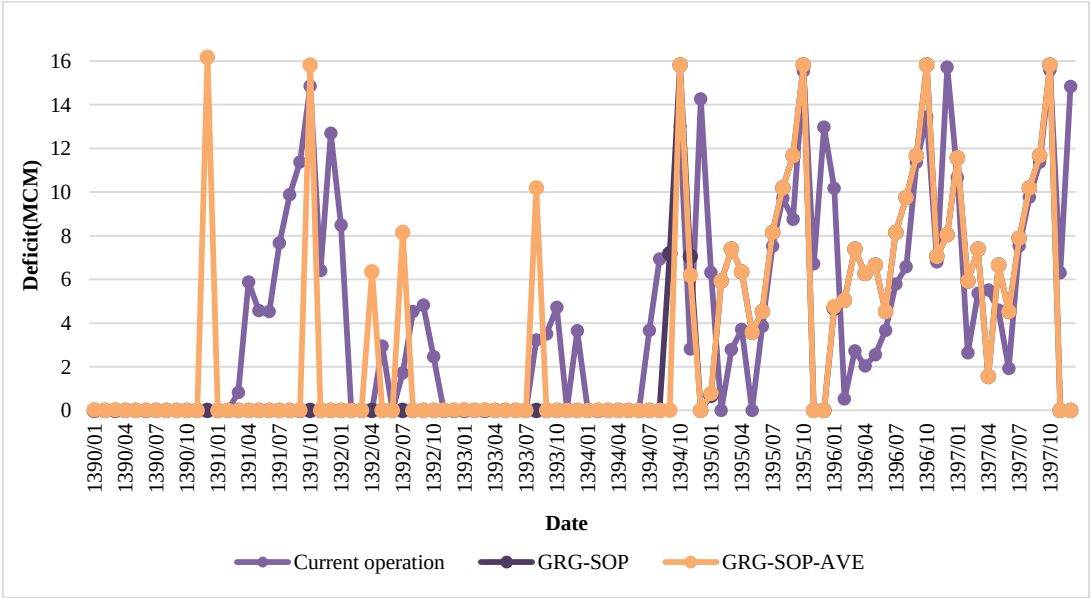

Figure 4. Comparison of monthly deficiency index under different operation policies

۳. ۱. ۳. ارزیابی و مقایسه تلفات تبخیر ماهانه از مخزن براساس سیاست‌های بهره‌برداری مختلف

درخصوص تعیین تبخیر ماهانه در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف در دوره موردبررسی (مطابق شکل ۵)، در سیاست بهره‌برداری فعلی نوسانات تبخیر ماهانه بین صفر تا ۴/۵ میلیون مترمکعب است در ابتدای دوره میزان تبخیر معادل ۲/۳ میلیون مترمکعب است و روند نزولی دارد سپس در بازه گفته‌شده نوسان دارد تا در خرداد ۱۳۹۳ حداکثر معادل ۴/۱۱ میلیون مترمکعب است (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و به تبع آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تبخیر را به‌دنبال داشته است) پس از آن روند نزولی دارد و در بازه ۰/۲ تا ۱/۸ میلیون مترمکعب نوسان دارد تا در انتهای دوره به ۱/۳۲ میلیون مترمکعب رسیده است و متوسط میزان تبخیر در دوره نیز معادل ۱/۱ میلیون مترمکعب است. در سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP، نوسانات تبخیر ماهانه بین ۰/۱ تا ۴/۲۱ میلیون مترمکعب است در ابتدای دوره میزان تبخیر معادل ۲/۳ میلیون مترمکعب است و در خردادماه ۱۳۹۰ به میزان ۲/۹۹ میلیون مترمکعب رسیده است سپس روند نزولی پیدا کرد تا خردادماه ۱۳۹۳ معادل۴/۲۱ میلیون مترمکعب است (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و در نتیجه آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تبخیر را به‌دنبال داشته است) و پس از آن روند نزولی پیدا کرد و در بازه ۰/۲ تا ۱/۴ میلیون مترمکعب نوسان دارد تا در انتهای دوره به میزان ۱/۰۵ میلیون مترمکعب رسیده است و متوسط میزان تبخیر در دوره نیز معادل ۰/۸۹ میلیون مترمکعب است. به همین ترتیب در سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE، تغییرات تبخیر ماهانه بین ۰/۱ تا ۴/۳ میلیون مترمکعب است، در ابتدای دوره میزان تبخیر معادل ۲/۳ میلیون مترمکعب است و در خرداد ۱۳۹۰ به مقدار ۲/۹۹ رسید سپس روند نزولی دارد و در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۳ افزایش یافت تا در خردادماه ۱۳۹۳ به حداکثر مقدار ۴/۲۱ میلیون مترمکعب رسید (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و در نتیجه آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تبخیر را به‌دنبال داشته است) پس از آن روند نزولی پیدا کرد و در بازه ۰/۲ تا ۱/۷ میلیون مترمکعب نوسان دارد تا در انتهای دوره به ۱/۰۵ میلیون مترمکعب رسیده است و متوسط میزان تبخیر در دوره نیز معادل ۰/۹۹ میلیون مترمکعب است. به این ترتیب، تغییرات تبخیر در سیاست بهره‌برداری فعلی بالاترین میزان را به خود اختصاص داده است (شکل ۵). تبخیر سالانه سیاست بهره‌برداری فعلی نیز این استنباط را تأیید و برابر ۱۳/۲۱ میلیون مترمکعب است (جدول ۴). درحالی‌که کم‌ترین میزان تبخیر متعلق به سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE، با کمبود سالانه ۱۰/۷۴ میلیون مترمکعب است (جدول ۴). لذا سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE با کم‌ترین میزان تبخیر به‌عنوان بهترین سیاست براساس شاخص تبخیر هستند.

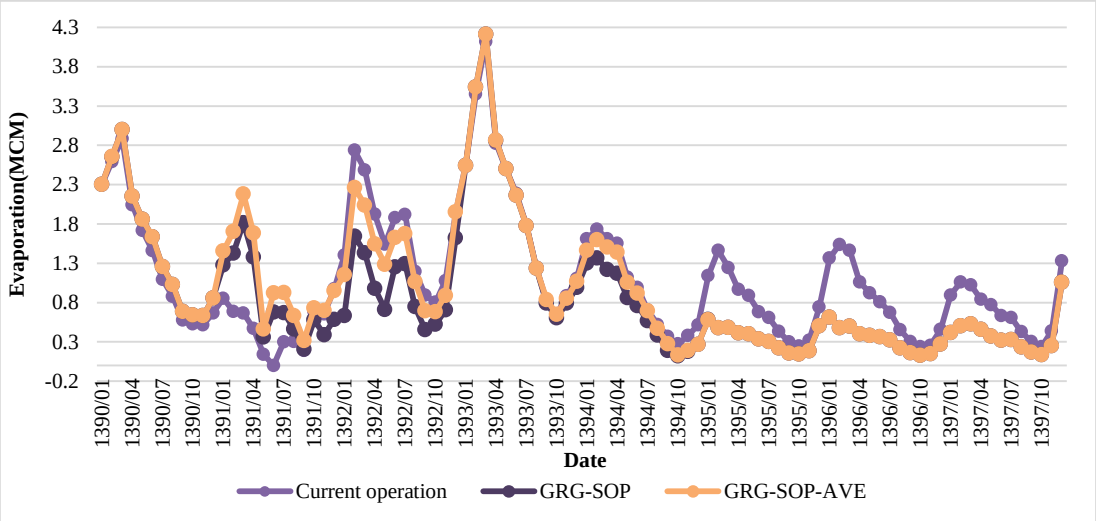

Figure 5. Comparison of monthly evaporation index under different operation policies

۳. ۱. ۴. ارزیابی و مقایسه تلفات تراوش ماهانه از مخزن براساس سیاست‌های بهره‌برداری مختلف

درخصوص تعیین تراوش ماهانه در سیاست‌های بهره‌برداری مختلف در دوره موردبررسی (شکل ۶)، در سیاست بهره‌برداری فعلی تراوش بین ۷۰ تا ۳۶۰ مترمکعب متغیر است. در ابتدای دوره معادل ۳۱۷/۲۴ مترمکعب است سپس تراوش نوسان دارد تا حداکثر تراوش در فروردین‌ماه ۱۳۹۳ به میزان ۳۵۲/۳۷ مترمکعب رسیده است (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و در نتیجه آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تراوش را به‌دنبال داشته است) و متوسط تراوش معادل ۱۹۰ مترمکعب است تا این‌که در انتهای دوره تراوش معادل ۲۶۵/۸۹ مترمکعب شده است. در سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP، در ابتدای دوره تراوش معادل ۳۲۶/۶۳ مترمکعب است. تراوش بین ۲۷ تا ۳۵۰ مترمکعب متغیر است، به‌طوری‌که حداکثر تراوش در فروردین‌ماه ۱۳۹۳ معادل ۳۵۷/۳۱ مترمکعب است (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و در نتیجه آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تراوش را به‌دنبال داشته است) و متوسط تراوش نیز معادل ۱۶۷/۲۱ مترمکعب است و در انتهای دوره به میزان ۱۸۲/۳۸ مترمکعب رسیده است. بدین ترتیب در سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE در ابتدای دوره تراوش معادل ۳۲۶/۶۳ مترمکعب است. تراوش بین ۷۷ تا ۳۶۰ مترمکعب متغیر است، به‌طوری‌که بالاترین میزان تراوش معادل ۳۵۷/۳۱ مترمکعب متعلق به اسفندماه ۱۳۹۲ و فروردین‌ماه ۱۳۹۳ است (به‌دلیل افزایش حجم مخزن و در نتیجه آن افزایش سطح و تراز آب مخزن، افزایش تراوش را به‌دنبال داشته است) و متوسط تراوش نیز معادل ۱۸۱/۲۱ مترمکعب است و در انتهای دوره تراوش به میزان ۱۸۲/۳۹ مترمکعب رسیده است. به این ترتیب، تغییرات تراوش در سیاست بهره‌برداری فعلی بالاترین میزان را دارد. تراوش سالانه این سیاست نیز تأییدکننده این استنباط و برابر ۲۳۰۰ مترمکعب است (جدول ۴). کم‌ترین میزان تراوش متعلق به سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE، با تراوش سالانه معادل ۲۰۰۶/۵۷ مترمکعب است (جدول ۴). لذا سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP و GRG-SOP-AVE، با کم‌ترین میزان تراوش به‌عنوان بهترین سیاست براساس شاخص تراوش هستند.

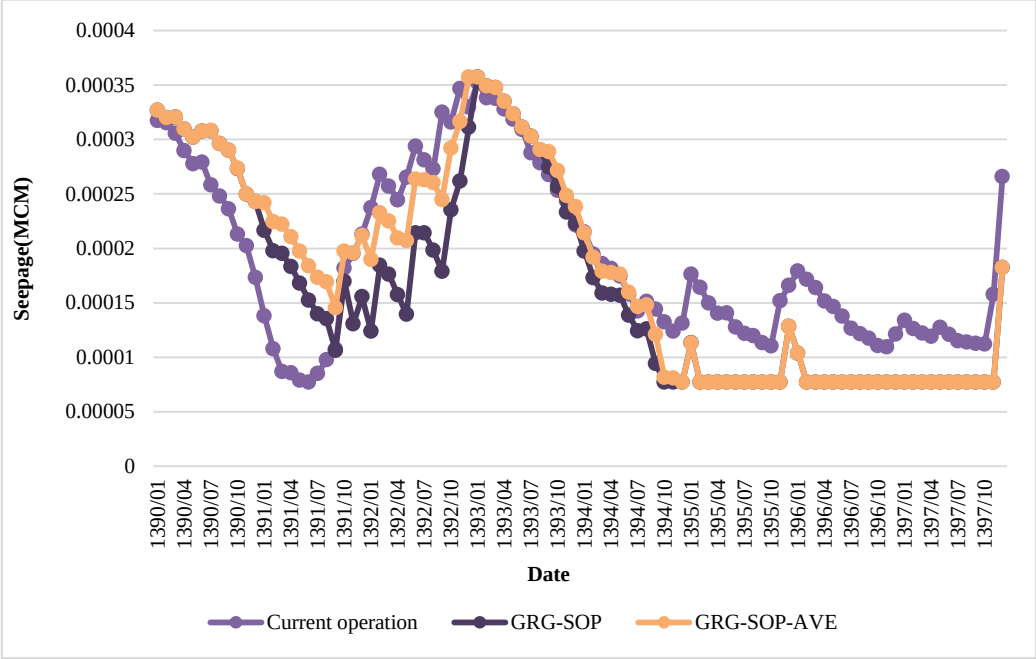

Figure 6. Comparison of monthly seepage index under different operation policies

۳. ۱. ۵. ارزیابی شاخص‌های کارایی مخزن سیاست‌های بهره‌برداری مختلف

در خصوص تعیین سیاست بهره‌برداری برتر مخزن سد، علاوه‌بر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود از شاخص‌های کارایی مخزن نیز استفاده شد و نتایج حاصل از آن‌ها در جدول (۵) ارائه گردیده است و هر شاخص در سیاست‌های بهره‌برداری موردارزیابی قرار گرفت.

Table 5. Reservoir performance indicators in various operation policies

Reservoir performance indicators	Operation Policy		
	Current Operation	GRG-SOP	GRG-SOP-AVE
Reliability (α_v%) Volumetric	57.24	67.58	67.58
Reversibility (β%)	9.84	8.57	24.59
Vulnerability (Υ%)	47.32	31.69	31.69
Flexibility (Ψ%)	2.97	3.96	11.35

در خصوص تعیین سیاست بهره‌برداری برتر از نظر شاخص اعتمادپذیری (جدول ۵)، مقادیر اعتمادپذیری نشان داده است سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP و GRG-SOP-AVE با اعتمادپذیری ۶۷/۵۸ درصد، قابل‌اعتمادترین سیاست هستند. درحالی‌که سیاست بهره‌برداری فعلی با اعتمادپذیری ۵۷/۲۴ درصد در رده بعدی قرار دارد. بنابراین بالاترین اعتمادپذیری متعلق به سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP و GRG-SOP-AVE است.

در خصوص تعیین سیاست بهره‌برداری برتر از نظر شاخص برگشت‌پذیری (جدول ۵)، نتایج گویاست که سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE با برگشت‌پذیری ۲۴/۵۹ درصد، دارای بالاترین سرعت برگشت‌پذیری است. نکته جالب این‌که سیاست بهره‌برداری فعلی با برگشت‌پذیری ۹/۸۴ درصد در رده بعدی قرار دارد. درحالی‌که سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP با برگشت‌پذیری ۸/۵۷ درصد در اولویت آخر قرار دارند. بنابراین، سریع‌ترین برگشت‌پذیری متعلق به سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE است.

در خصوص تعیین سیاست بهره‌برداری برتر از نظر شاخص آسیب‌پذیری (جدول ۵)، نتایج نشان می‌دهد سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP و GRG-SOP-AVE با آسیب‌پذیری ۳۱/۶۹ درصد، دارای آسیب‌پذیری کم‌تری است. درحالی‌که سیاست بهره‌برداری فعلی با آسیب‌پذیری ۴۷/۳۱ درصد در رده بعدی قرار دارد. بنابراین، بهترین سیاست از نظر شاخص آسیب‌پذیری متعلق به سیاست‌های بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP و GRG-SOP-AVE است.

در خصوص تعیین سیاست بهره‌برداری برتر از نظر شاخص انعطاف‌پذیری (جدول ۵)، نتایج حاصله گویاست سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE با انعطاف‌پذیری ۱۱/۳۵ درصد، در اولویت اول قرار دارد. درحالی‌که سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP با انعطاف‌پذیری ۳/۹۶ درصد، در اولویت بعدی قرار دارد. به‌طوری‌که سیاست بهره‌برداری فعلی به‌ترتیب دارای انعطاف‌پذیری ۲/۹۷ درصد در اولویت آخر قرار دارند. بنابراین منعطف‌ترین سیاست، سیاست بهره‌برداری GRG-SOP-AVE است.

۳. ۱. ۶. مقایسه سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE با سیاست‌های بهره‌برداری دیگر

در خصوص قیاس سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE نسبت به سیاست بهره‌برداری فعلی، از نظر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود سالانه به‌ترتیب به میزان ۱۴/۶۲، ۲۲/۹۵ و ۴۹/۳۱ درصد بهبود یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به‌ترتیب به میزان ۱۵/۲۹، ۶۰، ۴۹/۳۱ و ۷۳/۸۷ درصد بهبود یافته است.

در مقایسه سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE نسبت به سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP،

شاخص‌های برگشت‌پذیری و انعطاف‌پذیری به میزان ۶۵/۱۴ درصد بهبود یافته است و از نظر شاخص‌های تراوش سالانه، تبخیر سالانه، کمبود سالانه، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری نیز برابر بودند.

سیاست‌های GRG-SOP-AVE و GRG -SOP از نظر شاخص‌های تراوش سالانه، تبخیر سالانه، کمبود سالانه، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری برابر بودند. این در حالی است که سیاست GRG-SOP-AVE از نظر شاخص‌های برگشت-پذیری و به تبع آن انعطاف‌پذیری نتایج قابل‌قبول‌تری ارائه داده است. بنابراین، اگر هدف بهبود شاخص‌های عملکرد و کارایی مخزن باشد، سیاست GRG-SOP-AVE مناسب است.

۴. نتیجه‌گیری

به‌طورکلی کنترل تلفات آب مخازن سدها جهت بهره‌برداری بهینه یکی از مسائل است، لذا استخراج سیاست بهره‌برداری جهت تأمین بهینه نیازها بسیار دارای اهمیت است. در سال‌های اخیر پژوهش‌گران سعی کرده‌اند شاخص‌های کارایی مخزن و کمبود را ارزیابی نمایند، اما شاخص‌های تلفات آب موردبررسی قرار نگرفته بود که این امر در پژوهش حاضر محقق گردید. بدین منظور از مخزن سد پیشین به‌عنوان مطالعه موردی و داده‌های آن طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ استفاده شد. علاوه بر تدوین سیاست بهره‌برداری استاندارد، برای بهره‌گیری مقادیر رهاسازی بهینه گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته در سیاست‌های بهره‌برداری مدل گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته (GRG) را با سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و میانگین‌گیری هیبرید نمودیم و مدل‌های تدوین سیاست بهره‌برداری هیبریدی بهینه‌سازی شبیه‌سازی (GRG-SOP) و سیاست بهره‌برداری هیبریدی بهینه‌سازی شبیه‌سازی میانگین‌گیری (GRG-SOP-AVE) توسعه دادیم. شاخص‌های عملکرد (تلفات آب، کمبود) و شاخص‌های کارایی مخزن به‌ازای هر سیاست بهره‌برداری محاسبه گردید. به‌طور خلاصه مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح زیر است.

– سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE نسبت به سیاست بهره‌برداری فعلی، از نظر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود سالانه به‌ترتیب به میزان ۱۴/۶۲، ۲۲/۹۵ و ۴۹/۳۱ درصد بهبود یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به‌ترتیب به میزان ۱۵/۲۹، ۶۰، ۴۹/۳۱ و ۷۳/۸۷ درصد بهبود یافته است.

– سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG-SOP-AVE نسبت به سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP، از نظر شاخص‌های برگشت‌پذیری و انعطاف‌پذیری به میزان ۶۵/۱۴ درصد بهبود یافته است و از نظر شاخص‌های تراوش سالانه، تبخیر سالانه، کمبود سالانه، اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری نیز برابر بودند.

در پژوهش حاضر شاخص‌های تبخیر، تراوش، کمبود و اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در سیاست بهره‌برداری GRG-SOP-AVE و سیاست بهره‌برداری هیبریدی GRG -SOP برابر بودند. در این سیاست‌ها به‌دلیل کاهش حجم مخزن و در نتیجه آن کاهش سطح و تراز آب مخزن، کاهش تلفات تبخیر و تراوش را به‌دنبال داشته است. درحالی‌که از نظر شاخص‌های برگشت‌پذیری و انعطاف‌پذیری سیاست بهره‌برداری GRG-SOP-AVE نسبت به سیاست GRG -SOP بهتر بود. بنابراین اگر هدف بهبود شاخص‌های عملکرد و کارایی مخزن باشد، سیاست GRG-SOP-AVE مناسب است و پیشنهاد می‌شود در سایر مخازن موردبررسی قرار گیرد. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود از مواردی نظیر چندهدفه‌بودن تابع هدف، استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی و غیره در استخراج سیاست بهره‌برداری مخازن برای ارزیابی تلفات موردبررسی واقع گردد. نتایج این پژوهش تأکید کرد که استفاده از سیاست‌های هیبریدی در کاهش هدررفت آب مخازن سدها، تلفات تبخیر و تراوش می‌تواند مفید واقع شود، لذا می‌توان با به‌کارگیری سیاست‌های هیبریدی بهینه‌سازی–شبیه‌سازی در کاهش تلفات آب و در نتیجه کمبود تأمین و بهبود شاخص‌های کارایی مخزن، به مدیریت بهتر منابع آب کمک نمود.

۵. تشکر و قدردانی

از شرکت مدیریت منابع آب ایران که اطلاعات موردنیاز را در اختیار قرار دادند و مقاله حاضر بخشی از قرارداد پژوهشی به شماره ۰۱۲/ س/۹۹ تحت عنوان ارزیابی اثر بهره‌برداری بهینه از مخزن سد خاکی روی تلفات آب است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Alimohammadi, H., Massah Bavani, A. R., & Roozbahani, A. (2020). Mitigating the impacts of climate change on the performance of multi-purpose reservoirs by changing the operation policy from SOP to MLDR. *Water Resources Management*, *34*, 1495-1516.

Banihabib, M. E., Jurik, L., Khorasani, M. M. A., Shahdany, S. M. H., Mohammadi, A., & Pokrývková, J. (2021). Optimizing Embedded Water Trades to Conserve Lakes in Arid and Semiarid Regions. *Polish Journal of Environmental Studies*, *30*(5), 4413-4423.

Bayesteh, M., & Azari, A. (2021). Stochastic optimization of reservoir operation by applying hedging rules. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *147*(2), 04020099.

Dutta, V., Sharma, U., & Kumar, R. (2020). Restoring environmental flows for managing river ecosystems: global scenario with special reference to India. *Environmental Concerns and Sustainable Development: Volume 1: Air, Water and Energy Resources*, 163-183.

Emadi, A., Khademi, M., Movahhed, S. A., & Nouri, M. R. (2012). A Comparison of simulated annealing (SA) optimization algorithm, yield model and standard operation policy in reservoir operation (Case study: Doroodzan Dam). *Iranian Water Researches Journal*, *6*(1), 187-196. (in Persian)

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20.

Hatami, S., Banihabib, M. E., & Soltani, J. (2020). Determination of optimal operation policy of reservoir with nonlinear model to reduce reservoir water losses. *Iranian journal of Ecohydrology*, *7*(1), 277-290. (in Persian)

Khodabandeh, F., Dehghani Darmian, M., Azhdary Moghaddam, M., & Hashemi Monfared, S. A. (2021). Reservoir quality management with CE-QUAL-W2/ANN surrogate model and PSO algorithm (case study: Pishin Dam, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-18.

Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. *Springer*. 624p.

Men, B., Wu, Z., Li, Y., & Liu, H. (2019). Reservoir operation policy based on joint hedging rules. *Water*, *11*(3), 419.

Mohammadi, A., Javadi, S., Yousefi, H., Pouraram, H., & Randhir, T. O. (2024). A Framework for Assessing Food Baskets Based on Water and Carbon Footprints. *Water*, *16*(9), 1196.

Saadatpour, M., Afshar, A., & Solis, S. S. (2020). Surrogate-based multiperiod, multiobjective reservoir operation optimization for quality and quantity management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *146*(8), 04020053.

Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H., & Sandoval-Solis, S. (2015). Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of hydrology*, *528*, 773-789.

Shih, J. S., & ReVelle, C. (1994). Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629.

Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M. M., Molanejad, M., ... & Martin, M. V. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *126*, 775-795.

Varyani, A., & Fatahi, P. (2014). Determination of the optimal amount of production in a two-level production system with potential demand. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management*, *24*(1), 56-66.

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.

Yousefi, H., Mohammadi, A., Mirzaaghabeik, M., & Noorollahi, Y. (2017). Virtual water evaluation for grains products in Iran Case study: pea and bean. *Journal of water land development*, *35*(1), 275-80.

Zarei, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2023). A framework for the forensic-engineering assessment of reservoir operation during floods based on a new standard operation policy. *Journal of Hydrology*, 129774.

Zolfagharpour, F., Saghafian, B., & Delavar, M. (2021). Adapting reservoir operation rules to hydrological drought state and environmental flow requirements. *Journal of Hydrology*, *600*, 126581.