

تعیین روش بهره‌برداری بهینه از مخزن با مدل غیر خطی برای کاهش تلفات آب مخزن

سکینه حاتمی^۱، محمدابراهیم بنی حبیب^{۲*}، جابر سلطانی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۵؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی تلفات تبخیر و تراوش در روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخازن سدهاست. در تحقیق حاضر برای ارزیابی شاخص‌های تلفات آب و کمبود و شاخص‌های کارایی مخزن طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۷، ابتدا روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته تدوین شد. سپس، این شاخص‌ها به ازای روش‌های گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، بهره‌برداری فعلی و منحنی فرمان پیشنهادی برآورد شده و با هم مقایسه شدند. برای برآورد دقیق تراوش، از واسنجی مدل‌سازی عددی Seep/w با استفاده از پیزومترهای موجود استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته (GRG) نسبت به روش بهره‌برداری استاندارد از نظر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۶۷/۸۶، ۵۴/۲۴ و ۶۷/۶۸ درصد بهبود یافته است. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۳۶۸/۹۵، ۱۱۰/۲۶، ۶۷/۶۸ و ۴۷۵۰/۴۰ درصد بهبود یافته است. همچنین، این روش نسبت به روش بهره‌برداری فعلی از نظر شاخص‌های تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۱۵/۸۸ و ۴۱/۸۶ درصد بهبود یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۲۵/۵۴، ۳۰/۳۴، ۴۱/۸۶ و ۱۲۵/۱۵ درصد بهبود یافته و شاخص تراوش این روش نسبت به روش بهره‌برداری فعلی ۱۸/۶۵ درصد افزایش داشته است. بنابراین، روش بهره‌برداری بهینه گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته نسبت به دو روش بهره‌برداری منحنی فرمان و فعلی به صورت مطلوبی در بهبود شاخص‌های کمبود، تلفات تبخیر و انعطاف‌پذیری مخزن سد مؤثر بوده و پیشنهاد می‌شود برای کاهش تلفات تبخیر و کمبود تأمین و بهبود کارایی مخزن، از این روش در سایر مخازن استفاده شود.

کلیدواژگان: تبخیر، تراوش، سد پیشین، روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، منحنی فرمان.

مقدمه

با توجه به کارکرد حیاتی آب در حیات انسان‌ها، بهره‌برداری بهینه، صرفه‌جویی و اصلاح الگوی مصرف، امری مهم و ضروری است. حال آنکه تأثیر مخازن بر ذخیره‌سازی و تأمین آب در دوره‌های کم‌آبی و خشکی نیز بسیار برجسته و بااهمیت است. مدل‌های شبیه‌سازی ابزار بسیار مؤثری در تخمین کارایی طرح‌های پیشنهادی مدیریت منابع آب هستند. به دلیل اینکه کاهش تلفات آب مخزن برای بهره‌برداری بهینه مهم است، باید شاخص‌های عملکردی (تراوش، تبخیر و کمبود تأمین) در بهره‌برداری بهینه مخازن سدها نیز بررسی شود. همچنین، روش بهره‌برداری که بیشترین شاخص انعطاف‌پذیری را داشته باشد، به عنوان بهره‌برداری بهینه معرفی می‌شود [۱]. ارائه دادن روشی که علاوه بر برآورد اهداف، شاخص‌های عملکردی و کارایی مخزن را بهبود دهد، اهمیت دارد. بنابراین، در تحقیق حاضر یکی از مسائل بحث‌شده تأثیر شاخص‌های تراوش و تبخیر در روش‌های بهره‌برداری مختلف و نیز، بررسی و تحلیل روش‌هایی است که سبب بهبود این شاخص‌ها می‌شود. هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی تأثیر شاخص‌های مختلف تلفات آب (تراوش، تبخیر و کمبود) بر عملکرد بهینه مخزن سد پیشین به ازای روش‌های بهره‌برداری متفاوتی طی دوره (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهش‌یافته) و در نهایت، انتخاب روش بهینه بهره‌برداری است.

پیشینه تحقیق

تیجاواراپو^۱ و سیمونویک^۲ (۲۰۰۲) نوعی مدل ترکیبی NLP^۳ صحیح را برای بهره‌برداری کوتاه‌مدت مخازن برق‌آبی در Manotba کانادا توسعه دادند [۲]. سیواپراگاسام^۴ و همکاران (۲۰۰۹) یک رویکرد جایگزین مبتنی بر برنامه‌نویسی ژنتیک (GP^۵) ارائه دادند. در پژوهش یادشده نتایج مدل‌های GP و Penman برای برآورد تلفات تبخیر و برنامه‌ریزی مخزن مقایسه شده است. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در حالی که مدل ترکیبی GP و Penman برای برآورد تلفات تبخیر به یک

اندازه عملکرد خوبی دارند، GP قادر است مدل تلفات تراوش (یا سایر تلفات مخزن) را بهتر انجام دهد. همچنین، نشان داده شده است که برنامه‌ریزی (زمان‌بندی) مخزن بر اساس چگونگی مدل‌سازی تلفات مخزن در معادله تعادل آب مخزن تأثیرگذار است [۳]. بنی‌حبیب و همکاران (۲۰۱۵) مدل بهینه‌سازی یکنواخت مخزن و سیستم آبیاری با استفاده از کم‌آبیاری یکنواخت، با چهار روش ترکیب سیستم آبیاری قیمت آب انجام دادند. تجزیه و تحلیل حساسیت مدل نشان داد هزینه و قیمت سالانه کشت گوجه‌فرنگی حساس‌ترین پارامترها در بهینه‌سازی است [۴]. حسینی موعاری و بنی‌حبیب (۱۳۹۳) بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن برای تأمین آب کشاورزی با الگوریتم کرم شب‌تاب را انجام دادند. مقدار متوسط تابع هدف FA^6 ، GA^7 و PSO^8 به ترتیب معادل ۰/۴۰۸، ۰/۶۱۸ و ۰/۹۱۳ و FA و مقدار کمبودهای کمتر و خفیف‌تری نسبت به دو روش دیگر به دست آمد. بنابراین، الگوریتم کرم شب‌تاب نسبت به دو روش دیگر، در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن کارایی بیشتری داشت [۵]. بنی‌حبیب و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی چارچوب سازگاری بهره‌برداری مخزن با تغییرات آب‌وهوایی در منطقه خشک، از سه مدل ریزمقیاس، بارش رواناب و مدل‌های بهینه‌سازی مخزن استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها توانایی این چارچوب را نشان داد. همچنین، معلوم شد گرم شدن کره زمین بر شاخص تأمین آب تأثیر منفی طی سال‌های نرمال و مرطوب و تأثیر مثبتی طی سال‌های خشک داشته است. درضمن، روش یادشده قابلیت اطمینان مخزن را بهبود داده، اما نتوانسته است قابلیت اطمینان فعلی را بازیابی کند [۶]. بنی‌حبیب و همکاران (۲۰۱۷) مدل برنامه‌ریزی پویا برای سیستم کم‌آبیاری غیر یکنواخت و مخزن با دو مدل بهینه‌سازی برای کم‌آبیاری یکنواخت و غیر یکنواخت انجام دادند. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد مدل دوم برنامه‌ریزی پویا کم‌آبیاری غیر یکنواخت و سیستم مخزن برای افزایش بهره‌وری یکنواخت سد ذخیره‌ای و سیستم آبیاری توصیه شده است [۷]. بهشتی و حجتی (۱۳۹۳) به مدل برنامه‌ریزی خطی

1. Teegavarapu
2. Simonovic
3. Nonlinear programming
4. Sivapragasam
5. Genetic Programming

6. Firefly Algorithm
7. Genetic Algorithm
8. Particle Swarm Optimization

برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری) و کمبود نیز پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مطالعه موردی و داده‌های میدانی

برای ارزیابی اهداف تحقیق حاضر از داده‌های سد پیشین واقع در منطقه خشک در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران استفاده شده است. سد پیشین طول شرقی ۶۱/۶۹ درجه و عرض شمالی ۲۶/۰۳۰ درجه دارد. این سد، 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 [۱۴]. موقعیت سد پیشین در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور بررسی تأثیر شاخص‌های عملکردی و کارایی در روش‌های بهره‌برداری مختلف؛ داده‌های متوسط سالانه آبدهی ورودی و مصارف شامل نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ در جدول ۱ آمده است.

روش تحقیق

برای رسیدن به اهداف تحقیق حاضر، پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات سد، ابتدا واسنجی مدل عددی تراوش با استفاده از پیزومترهای تار مرتعش انجام شد. در گام بعدی، پس از برآورد تحلیل عددی تراوش سد پیشین و برآورد معادله تراوش، مدل بهینه‌سازی گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نیز تدوین شد. سپس، شاخص‌های عملکردی و کارایی به ازای روش‌های بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته، منحنی فرمان پیشنهادی و روش بهره‌برداری فعلی محاسبه و مقایسه می‌شود و در نهایت، روش بهره‌برداری برتر انتخاب می‌شود. مراحل انجام تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده است.

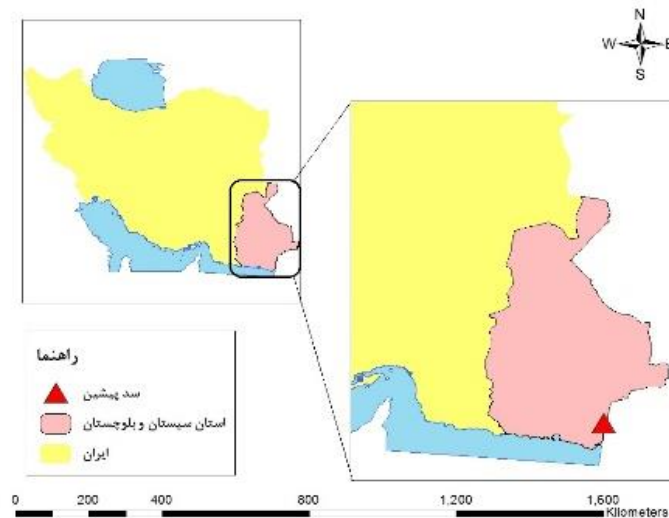
پیزومتر تار مرتعش^۴

درون هسته رسی پیزومترهای تار مرتعش که فقط فشار آب منفذی را اندازه‌گیری می‌کنند، نصب شده است. این نوع پیزومتر متشکل از یک «سر پیزومتر» است که از آن یک سیم منشعب و یا اتصال به نقطه اندازه‌گیری، ثبت داده‌ها را میسر می‌سازد. سر پیزومتر متشکل از یک قطعه

برای بهره‌برداری بهینه مخزن سد قردانلو به منظور برآورد نیازهای شرب، کشاورزی، صنعت و زیست‌محیطی توسعه پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده برآورد نیاز کامل طی سال‌های مرطوب و اعمال کم‌آبایی طی سال‌های خشک بود. در کل دوره ۸۵ درصد نیاز کشاورزی، ۹۸ درصد شرب و ۹۵ درصد نیاز صنعت برآورده شد [۸]. ترابی و همکاران (۱۳۹۵) طی پژوهشی به مطالعه درباره بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی در سد درودزن پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش بهره‌برداری کنونی مخزن فقط در ماه‌های پرآب توانایی تأمین نیازها را دارد. همچنین، میزان ذخیره مخزن با استفاده از برنامه‌ریزی خطی در روش SQ حدود ۲۳ درصد بیشتر از روش بهره‌برداری کنونی مخزن برآورد شد. در مجموع، نتایج پژوهش یادشده نشان داد استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی می‌تواند در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها مؤثر باشد [۹]. نودری و مژگان (۱۳۹۶) به مدیریت بهره‌برداری از آب مخزن سد امیرکبیر به کمک روش پویایی سیستم و مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پرداختند. مقایسه نتایج بهینه‌سازی و نتایج مدل نشان داد در شرایط بهینه‌سازی مقادیر کمبود و سرریزها طی تقسیم در ماه‌های مختلف، تعدیل شده و از خسارت‌های احتمالی جلوگیری می‌شود [۱۰]. لندسون^۱ و وارن^۲ (۱۹۷۸) به نرم‌افزار گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته برای مسائل خطی و غیرخطی پرداختند [۱۱]. لندسون و همکاران (۱۹۷۸) طراحی و تست کد گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته برای برنامه‌نویسی غیرخطی را انجام دادند [۱۲]. السی^۳ (۲۰۱۷) واسنجی نقشه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته را انجام داد [۱۳]. بررسی مطالعات یادشده نشان داد تأثیر شاخص‌های تلفات مخزن در روش‌های بهره‌برداری مختلف (روش بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته) ارزیابی نشده است. در مطالعه حاضر علاوه بر ارزیابی شاخص‌های تلفات مخزن (تبخیر و تراوش)، به ارزیابی شاخص‌های کارایی مخزن (انعطاف‌پذیری،

1. Lasdon
2. Warren
3. Elci

4. Vibrating Wire piezometer



شکل ۱. موقعیت سد پیشین

جدول ۱. اطلاعات مورد نیاز مخزن سد پیشین (MCM)

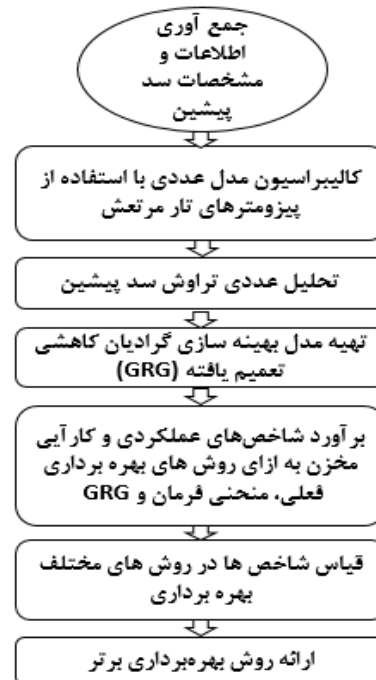
کل مصارف	کشاورزی	شرب	صنعت	تبخیر	ورودی	دوره بررسی شده (۱۳۹۰-۱۳۹۸)
۴/۰۶	۳/۷۲	۰/۳۴	۰/۰۰	۱/۱۰	۶/۹۳	

تغییر در فشار منفذی، دیافراگم تغییر شکل می‌دهد، کشش سیم متصل به آن تغییر می‌کند و از آنجا که فرکانس طبیعی سیم تابع کشش اعمال شده به آن است، با ثبت فرکانس در حالت جدید و واسنجی کردن سیستم، می‌توان فشار منفذی را اندازه‌گیری کرد [۱۵]. انجام قرائت در این پیژومترها آسان‌تر و سریع‌تر است و به یخزدگی حساس نیستند [۱۵]. داده‌های فشار پیژومترهای تار مرتعش برای واسنجی تحلیل عددی Seep/w استفاده شد.

معادلات حاکم در شبیه‌سازی نشت از سد خاکی معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پواسون است که شکل تعمیم‌یافته معادله معروف لاپلاس^۱ است:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = q \quad (1)$$

که در آن K_x و K_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر در ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی به توده خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است.



شکل ۲. فلوجارت انجام تحقیق

متخلخل و یک دیافراگم فلزی سخت است. دیافراگم از یک طرف به قطعه متخلخل و از طرف دیگر، به قطعه سیم‌پیچ کشیده متصل است که این دیافراگم آب حفره‌ای را از سیستم اندازه‌گیری جدا می‌کند. هنگامی که بر اثر

1. Laplace

بهره‌برداری‌های انجام‌شده طی دوره است. روش بهره‌برداری منحنی فرمان، روش بهره‌برداری پیشنهادی توسط شرکت مهندسی مشاور سد پیشین است و روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نیز روش بهره‌برداری بهینه غیرخطی است که در بخش‌های بعد به تفصیل بحث می‌شود.

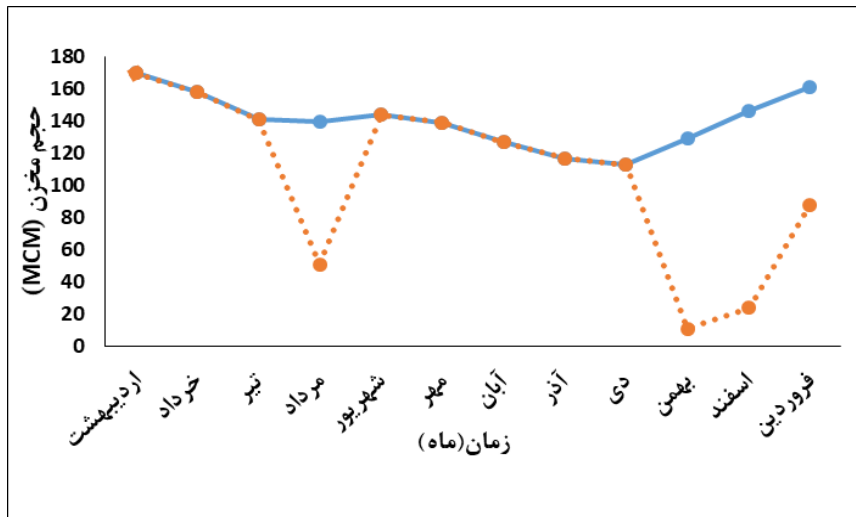
منحنی فرمان سد پیشین

منحنی فرمان سد پیشین برای شرایط مختلف بهره‌برداری در شکل ۳ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که حجم مخزن در حالت عادی و کنترل سیل تفاوت‌هایی دارد. دو منحنی یادشده در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، شهریور، مهر، آبان، آذر و دی مشابه‌اند. در صورتی که حجم مخزن در منحنی‌های یادشده، در ماه‌های مرداد، بهمن، اسفند و فروردین متفاوت‌اند [۱۴].

در مقاله حاضر برای مدل‌سازی و حل عددی معادلات حاکم در شبیه‌سازی نشت سد خاکی از نرم‌افزار Seep/w استفاده شده است. نرم‌افزار یادشده بر این پایه نهاده شده است که جریان آب داخل خاک اشباع و غیر اشباع از قانون دارسی تبعیت می‌کند. از جمله برنامه و یک مدل‌سازی عددی مبتنی بر المان محدود و از سری مجموعه‌های نرم‌افزار Geostudio است که توانایی مناسبی در ترسیم گرافیکی شبکه جریان، توزیع پتانسیل فشار و سطح آزاد جریان داخل پروفیل خاک دارد.

روش‌های بهره‌برداری منحنی فرمان

در تحقیق حاضر برای دستیابی به اهداف، از روش‌های بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته استفاده شده است. روش بهره‌برداری فعلی،



شکل ۳. منحنی فرمان سد پیشین [۱۴]

به برنامه یادشده اعمال می‌شوند [۱۶]. مراحل اعمال این روش به طور خلاصه به شرح زیر است:

الف) به دست آوردن مدل با نقاط عملیاتی و خطی کردن تمام محدودیت‌های تابع هدف حول نقاط عملیاتی به گونه‌ای که مسئله به شکل بهینه‌سازی خطی تبدیل شود. سپس، استفاده از بهینه‌سازی خطی برای حل مسئله خطی.

ب) تکرار روش بهینه‌سازی خطی برای رسیدن به جواب مناسب با خطی کردن توابع محدودیت‌ها و تابع هدف.

چنانچه به جواب مناسب دست نیافت، با خطی کردن

گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته^۱ (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 هستند. تابع هدف و یا هر یک از توابع قیدی می‌توانند غیرخطی باشند. همچنین، امکان معین نبودن محدوده‌ها وجود دارد. در صورتی که هیچ قیدی موجود نباشد، مسئله موجود نوعی بهینه‌سازی نامقید است. باید توجه داشت که حدود بالا و پایین برای متغیرها به عنوان قید اضافی عمل نمی‌کنند، بلکه به صورت مجزا

1. Generalized Reduced Gradient

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{((\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i))^2)}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (8)$$

در روابط یادشده O_i تراوش مشاهداتی به دست آمده از تحلیل عددی تراوش، P_i تراوش پیش‌بینی شده با استفاده از معادلات ارائه شده در برنامه اکسل، \bar{O}_i میانگین تراوش مشاهداتی، \bar{P}_i میانگین تراوش پیش‌بینی شده و N تعداد داده‌هاست.

تبخیر از حاصل ضرب عمق تبخیر در مساحت مخزن مطابق رابطه ۹ به دست آمد که در آن Et حجم تبخیر ماهانه بر حسب میلیون مترمکعب، A مساحت دریاچه مخزن بر حسب کیلومتر مربع و h نیز عمق تبخیر ماهانه بر حسب متر در ماه متناظر است.

$$Et = A * h \quad (9)$$

کمبود از تفاضل مقدار خروجی از مقدار نیاز مطابق رابطه زیر برآورد شد که در آن Def_t حجم کمبود ماهانه بر حسب میلیون مترمکعب، R_t حجم خروجی ماهانه بر حسب میلیون مترمکعب و D_t حجم نیاز ماهانه بر حسب میلیون مترمکعب است (رابطه ۱۰).

$$Def_t = R_t - D_t \quad (10)$$

اعتمادپذیری حجمی عبارت است از: نسبت مقدار حجم رهاشده در کل دوره (R_t) به مقدار کل حجم آب مورد نیاز پایین دست مخزن (D_t). برای محاسبه این شاخص از رابطه ۱۱ استفاده شد [۱۸].

$$\alpha_V = \frac{R_t}{D_t} \quad (11)$$

اگر شکست‌های اتفاق افتاده متوالی، طولانی مدت باشد و برگشت سیستم به وضعیت رضایت بخش به کندی صورت گیرد، ممکن است دلالت بر وضعیت خطرناک سیستم در ناتوانی آن به منظور برآوردن نیازهای طرح باشد [۱۸]. برگشت‌پذیری در سیستم مخزن به صورت رابطه ۱۲ تعریف شد که در آن β سرعت برگشت‌پذیری و r تعداد سری دوره‌های شکستی که بعد از آن پیروزی است. R نیز تعداد کل سال‌های شکست است.

$$\beta = \frac{r}{R} \quad (12)$$

دوباره محدودیت‌ها و توابع هدف حول نقطه جدید، مقدار بهینه مسئله پیدا می‌شود [۱۷]. برای بهینه‌سازی بهره‌برداری با روش گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته از نرم‌افزار GRG Solver که قابلیت نصب در اکسل را دارد، استفاده شده است. در این روش رهاسازی از مخزن به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد و تابع هدف حداقل‌سازی میانگین اختلاف بین نیاز آبی و خروجی طی دوره است، تابع هدف و محدودیت‌ها در زیر ارائه شده است. که در آن D_i نیاز آبی ماهانه، R_i میزان رهاسازی ماهانه، R_{max} میزان رهاسازی حداکثر ماهانه طی دوره، S_i حجم مخزن، S_{max} حجم نرمال مخزن و S_{min} حجم مرده مخزن است.

$$\sum_{i=1}^n (D_i - R_i) \text{Min} \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$S_t: S_i \geq S_{max} \quad (3)$$

$$S_i \leq S_{min} \quad (4)$$

$$R_i \geq 0 \quad (5)$$

$$R_i \leq R_{max} \quad (6)$$

شاخص‌های ارزیابی عملکرد و کارایی مخزن

برای مقایسه و ارزیابی روش‌های بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته، منحنی فرمان پیشنهادی و بهره‌برداری فعلی در تخصیص آب، از شاخص‌های اعتمادپذیری حجمی و آسیب‌پذیری به عنوان یک مبنا برای مقایسه روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن استفاده شد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی عملکرد مخزن از شاخص‌های تراوش (S_p)، تبخیر (Et) و کمبود ماهانه (Def_t) و همچنین برای ارزیابی کارایی مخزن، از معیارهای نظیر اعتمادپذیری (α_V)، برگشت‌پذیری (β)، آسیب‌پذیری (Y) و انعطاف‌پذیری (Ψ) استفاده شد که در ادامه تشریح شده است [۱۸].

پس از برآورد تحلیل عددی تراوش سد پیشین به ازای ترازهای مخزن، برای برآورد بهترین معادله بین تراز مخزن و تراوش سد پیشین، از پنج معادله در محیط اکسل استفاده شد. سپس، با محاسبه شاخص ضریب تعیین R^2 و شاخص خطا MARE، بهترین معادله انتخاب شد. روابط شاخص‌ها مطابق زیر است (معادله‌های ۷ و ۸).

$$D(\%) = \left| \frac{(A-B)}{A} * 100 \right| \quad (15)$$

یافته‌ها

واسنجی مدل Seep/w

در خصوص تحلیل عددی سد پیشین، بر اساس دو پیژومتر تارمرتعش C5 و C6 سد پیشین تحلیل انجام شده و مدل واسنجی شده است. تحلیل عددی به ازای قرائت‌های انجام شده طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ برای دو پیژومتر صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مقادیر میانگین ابزار دقیق و تحلیل عددی فشار پیژومتر C5 به ترتیب برابر ۱۵/۹۳ و ۱۵/۱۷ متر است و اختلاف این دو معادل ۶/۲۴ درصد شده است (جدول ۲). به همین ترتیب، مقادیر میانگین ابزار دقیق و تحلیل عددی فشار پیژومتر C6 به ترتیب برابر ۶/۰۷ و ۵/۵۷ متر است و اختلاف آنها به میزان ۸/۳۸ درصد است (جدول ۳). بنابراین، درصد اختلاف فشار میان مدل‌سازی عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده قابل قبول بود و نشان داد مدل Seep/w با متوسط خطای ۸ درصد، قابلیت زیادی در تخمین میزان فشار در سد پیشین دارد. از آنجا که مدل‌ها برای شبیه‌سازی واقعیت تا حد ممکن از فرضیاتی استفاده می‌کنند، بنابراین در این مدل نیز قبول خطا در شبیه‌سازی به علت در نظر نگرفتن تغییرات هدایت هیدرولیکی (به‌خصوص ناهمگنی و خاصیت غیر ایزوتروپ بودن خاک) منطقی به نظر می‌رسد که البته وجود این مشکل اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین، مقادیر درصد اختلاف نشان‌دهنده سازگاری و توافق بسیار خوب بین ابزار دقیق و تحلیل عددی است. نتایج ضرایب هدایت هیدرولیکی نواحی سد حاصل از واسنجی (مقادیر k) نیز در جدول ۴ آمده است.

آسیب‌پذیری، شدت شکست یک سیستم را بیان می‌کند. در هر سری از دوره‌های شکست متوالی که میزان کمبود متفاوت است، دوره‌ای که بیشترین مقدار کمبود را دارد بیشترین تأثیر را روی سیستم مصرف‌کننده آب دارد. شاخص آسیب‌پذیری مجموع کمبود طی دوره بهره‌برداری تقسیم بر مجموع نیاز همان دوره است که مطابق رابطه ۱۳ تعریف شد. در رابطه یادشده Y شاخص آسیب‌پذیری، Def_t کمبود ماهانه طی دوره بهره‌برداری و D_t نیز میزان نیاز ماهانه پایین‌دست در همان دوره است.

$$Y = \frac{\sum_{t=1}^n Def_t}{\sum_{t=1}^n D_t} \quad (13)$$

شاخص انعطاف‌پذیری از رابطه ۱۴ محاسبه شد [۱]. در این رابطه Ψ شاخص انعطاف‌پذیری، α شاخص اعتمادپذیری حجمی، β شاخص برگشت‌پذیری و Y شاخص آسیب‌پذیری است.

$$\Psi = \alpha * \beta * (1 - Y) \quad (14)$$

مقایسه و ارزیابی روش‌های بهره‌برداری

برای مقایسه و ارزیابی روش‌های بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، منحنی فرمان پیشنهادی و بهره‌برداری فعلی در تخصیص آب، پس از تعیین شاخص‌های اعتمادپذیری حجمی و آسیب‌پذیری به عنوان یک مبنا برای مقایسه روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن، از معادله ۱۵ نیز به منظور برآورد تغییرات شاخص‌های روش‌های بهره‌برداری نسبت به روش بهره‌برداری مبنا استفاده شد. در رابطه یادشده D درصد اختلاف، A شاخص مبنا و B شاخصی که نسبت به شاخص مبنا ارزیابی می‌شود.

جدول ۲. مقادیر ابزار دقیق و مدل عددی پیژومتر C5 و درصد اختلاف آنها

Reservoir water elevation (m.a.s.l)	Observed (m.a.s.l)	Simulation (m.a.s.l)	Error (%)
۲۴۳/۶۷	۱۵/۹۳	۱۵/۱۷	۶/۲۴

جدول ۳. مقادیر ابزار دقیق و مدل عددی پیژومتر C6 و درصد اختلاف آنها

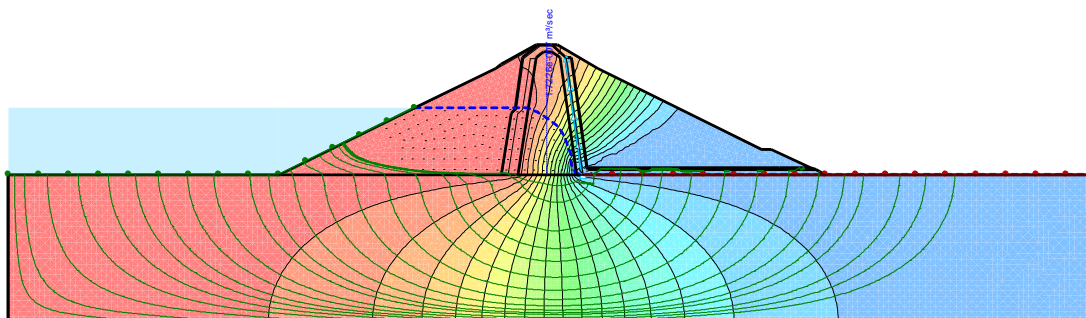
Reservoir water elevation (m.a.s.l)	Observed (m.a.s.l)	Simulation (m.a.s.l)	Error (%)
۲۴۲/۴	۶/۰۷	۵/۵۷	۸/۳۸

جدول ۴. ضرایب نفوذپذیری مصالح سد پیشین

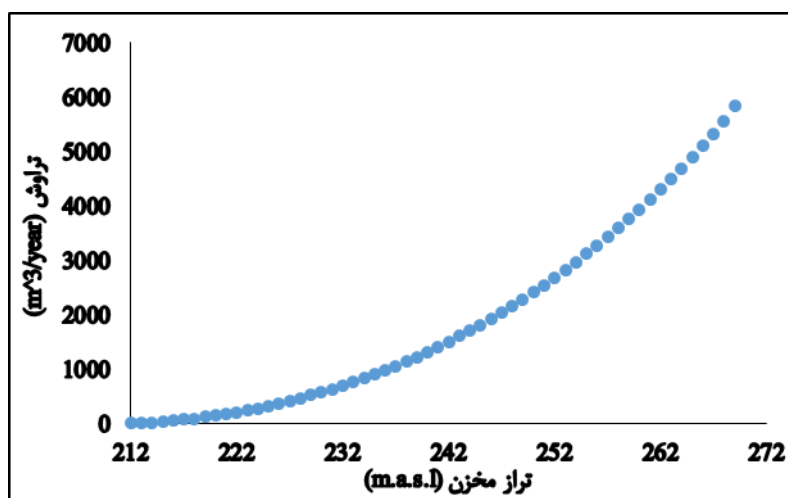
Material	$(m/s)k_x$	k_y/k_x
Core	8×10^{-9}	۱
Drainage	1×10^{-6}	۱
Filter	1×10^{-6}	۱
Foundation	1×10^{-11}	۱
Shell	4×10^{-5}	۱

استفاده شد و ضریب تبیین R^2 و شاخص خطای MARE به ازای هر معادله محاسبه شد. روابط و مقادیر شاخص‌های مربوط به هر معادله، در جدول ۵ ارائه شده است. مناسب‌ترین معادله، معادله‌ای است که شامل بزرگ‌ترین ضریب تعیین و کوچک‌ترین شاخص خطا باشد. با مقایسه مقادیر جدول ۵، معادله ۴ با ضریب تعیین ۰/۹۹ و شاخص خطای ۰/۰۴ به عنوان بهترین معادله برای بررسی پارامترهای تراز مخزن و تراوش انتخاب می‌شود.

تحلیل عددی تراوش سد پیشین و تعیین معادله تراوش در این قسمت، تحلیل عددی تراوش با نرم‌افزار Seep/w در مقطع حداکثر سد استخراج و مطابق شکل ۴ ترسیم شد. سپس، تحلیل عددی تراوش به ازای ترازهای مخزن سد انجام شده و نمودار تغییرات آن در شکل ۵ آمده است. سپس، برای برآورد معادله تراوش (شکل ۵)، با افزایش تراز مخزن، تراوش افزایش می‌یابد. شایان یادآوری است برای تعیین رابطه تراز مخزن و میزان تراوش باید روابط متفاوت آنالیز شود. به این ترتیب، از پنج معادله در محیط اکسل



شکل ۴. نمایی از نمایش نتایج تحلیل عددی تراوش سد پیشین در نرم‌افزار Seep/w



شکل ۵. نمودار تغییرات تراوش در مقطع حداکثر سد پیشین به ازای ترازهای مخزن

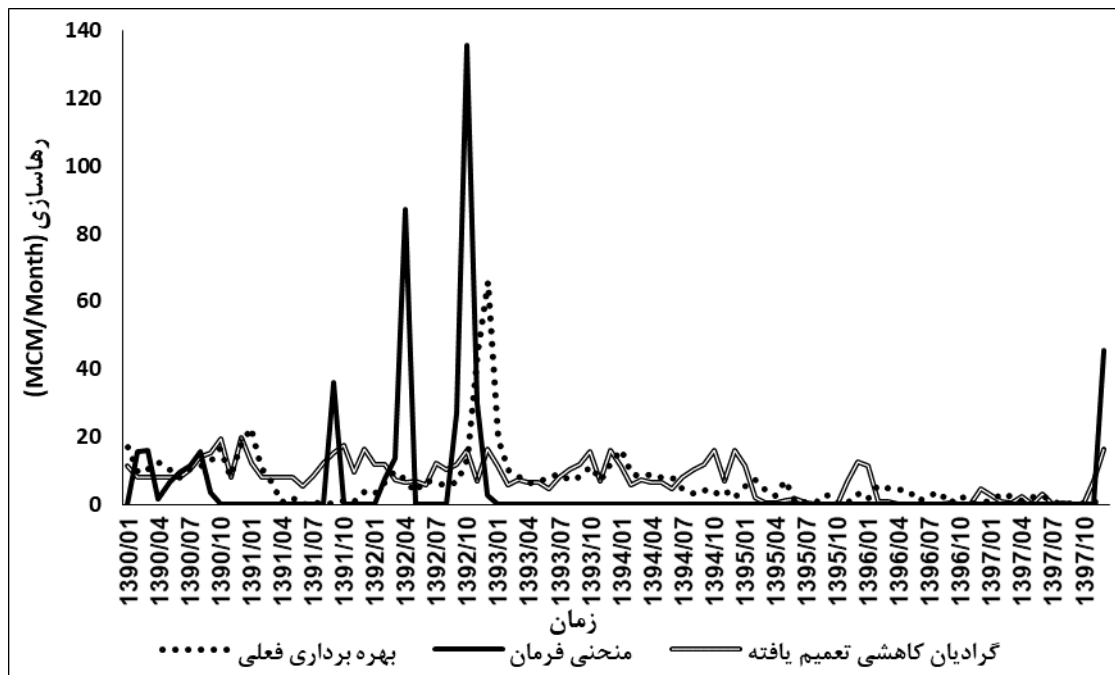
جدول ۵. بررسی و انتخاب بهترین معادله بین پارامترهای تراز مخزن و تراوش

Number	Equation	رابطه	R ²	MARE
۱	Exponential	$y = 1E-13e^{0.0596163306927x}$	۰/۹۸	۰/۰۷
۲	Linear	$y = 1.37E-8x - 3.12E-6$	۰/۹۷	۰/۰۹
۳	Logarithmic	$y = 3.37 E-6\ln(x) - 1.83E-5$	۰/۹۷	۰/۱۰
۴	Polynomial	$y = 2.33E-10x^2 - 1.01E-7x + 1.10E-5$	۰/۹۹	۰/۰۴
۵	Power	$y = 1E-42x^{14.734}$	۰/۹۹	۰/۱۹

رخ داد به طوری که حداکثر خروجی بین اواخر سال ۱۳۹۲ و اوایل سال ۱۳۹۳ رخ داد، در حالی که حداقل میزان خروجی در شهریورماه ۱۳۹۱ اتفاق افتاده و متوسط میزان خروجی معادل ۶/۶۸ میلیون مترمکعب بوده است. در روش بهره‌برداری منحنی فرمان نوسان‌ها از صفر تا ۱۴۰ میلیون مترمکعب تغییر کرد، به طوری که بیشترین میزان خروجی متعلق به دی‌ماه ۱۳۹۲ و متوسط میزان خروجی نیز به میزان ۳/۵۹ میلیون مترمکعب بود. همچنین، ملاحظه می‌شود در روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نیز حجم خروجی از سد بین صفر تا ۲۰ میلیون مترمکعب در حال نوسان بوده است. به طوری که بیشترین حجم خروجی در فروردین‌ماه ۱۳۹۰ رخ داد و خروجی متوسط نیز به میزان ۷/۳۷ میلیون مترمکعب بود.

ارزیابی شاخص‌های عملکردی مخزن روش‌های مختلف بهره‌برداری مختلف حجم رهاسازی

در خصوص جریان رهاسازی از مخزن در روش‌های بهره‌برداری مختلف طی دوره (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته) بررسی‌ها انجام و نوسان‌های این روش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. شایان یادآوری است در روش منحنی فرمان پیشنهادی سد پیشین؛ از آنجا که در سال ۱۳۹۲ سیلاب رخ داده است، منحنی فرمان سیلابی استفاده شده و در سایر سال‌های بررسی شده دوره منحنی فرمان حالت عادی در نظر گرفته شده است. براساس شکل ۶، در روش بهره‌برداری فعلی نوسان‌ها از صفر تا ۶۶ میلیون مترمکعب



شکل ۶. میزان رهاسازی ماهانه طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۷

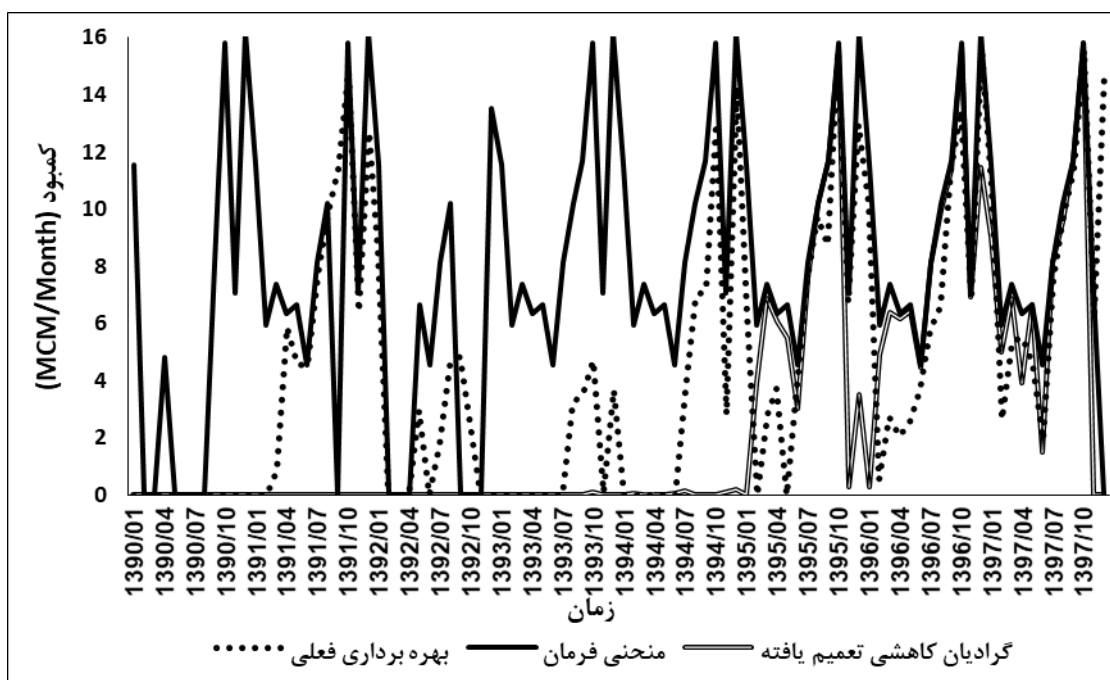
کمبود

در بازه صفر تا ۱۵/۹ میلیون مترمکعب طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ متغیر بوده است. به طوری که بیشترین کمبود معادل ۱۵/۸۲ میلیون مترمکعب در دی‌ماه ۱۳۹۷ و متوسط کمبود نیز معادل ۳/۰۲ میلیون مترمکعب بوده است. به این ترتیب، تغییرات کمبود در روش بهره‌برداری منحنی فرمان بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است. کمبود سالانه این روش نیز تأییدکننده این استنباط و برابر ۹۴/۸۸ میلیون مترمکعب است (جدول ۶). در حالی که مقدار کمبود سالانه در روش بهره‌برداری فعلی برابر ۵۲/۷۴ میلیون مترمکعب و در جایگاه بعدی قرار داشت. کمترین میزان کمبود متعلق به گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته معادل ۳۰/۶۶ میلیون مترمکعب بر سال بود. بنابراین، گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته با داشتن کمترین میزان کمبود به عنوان بهترین روش شاخص کمبود انتخاب شده است.

درخصوص تعیین کمبود ماهانه در روش‌های بهره‌برداری مختلف (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته) طی دوره بررسی شده مطابق شکل ۷ انجام شد. نتایج نشان می‌دهد در روش بهره‌برداری فعلی کمبود ماهانه بین صفر تا ۱۶ میلیون مترمکعب بوده و حداکثر کمبود در اسفندماه ۱۳۹۶ معادل ۱۵/۷۱ میلیون مترمکعب و متوسط کمبود معادل ۴/۵۳ میلیون مترمکعب بوده است. در روش بهره‌برداری منحنی فرمان کمبود طی دوره از صفر تا ۱۶/۲ میلیون مترمکعب در حال نوسان بوده است، در حالی که بیشترین کمبود معادل ۱۶/۱۷ میلیون مترمکعب در اسفندماه سال‌های عادی رخ داده است (به این معنا که به‌جز ۱۳۹۲، کل سال‌های دوره را شامل می‌شود) و متوسط کمبود معادل ۸/۰۷ میلیون مترمکعب بود. در روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نوسان‌های کمبود

جدول ۶. شاخص‌های عملکرد مخزن در روش‌های بهره‌برداری مختلف

GRG	منحنی فرمان	بهره‌برداری فعلی	شاخص‌های بررسی شده
۳۰/۶۶	۹۴/۸۸	۵۲/۷۴	کمبود (MCM/Year)
۱۱/۱۱	۲۴/۲۷	۱۳/۲۰	تبخیر (MCM/Year)
۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۲۳	تراوش (MCM/Year)

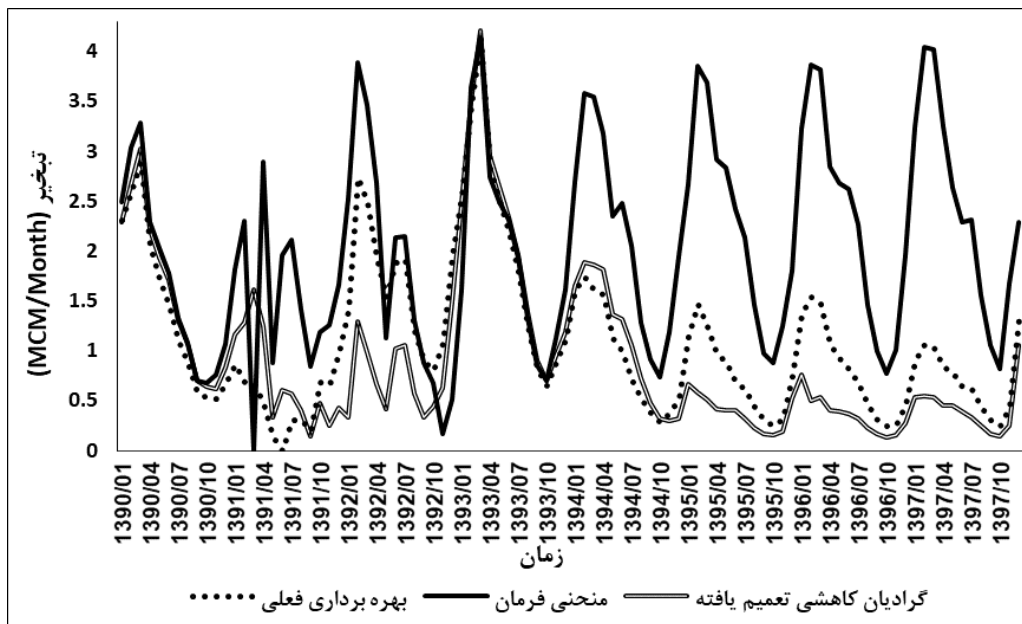


شکل ۷. میزان کمبود ماهانه طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۷

تبخیر

به منظور تعیین تبخیر ماهانه که از حاصل ضرب عمق تبخیر در مساحت مخزن در ماه مد نظر به دست آمد؛ در روش‌های بهره‌برداری مختلف (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته) طی دوره مطابق شکل ۸ بررسی صورت پذیرفت. به طوری که در روش بهره‌برداری فعلی نوسان‌ها بین صفر تا ۴/۵ میلیون مترمکعب رخ داد. به طوری که بیشترین میزان تبخیر در خردادماه ۱۳۹۳ برابر ۴/۱۱ میلیون مترمکعب و متوسط میزان تبخیر برابر ۱/۱ میلیون مترمکعب بوده است. در روش بهره‌برداری منحنی فرمان نوسان‌های تبخیر بین صفر تا ۴/۵ میلیون مترمکعب رخ داده است، به طوری که بیشترین میزان تبخیر متعلق به خردادماه ۱۳۹۳ و متوسط میزان تبخیر معادل ۲/۰۳ میلیون مترمکعب بوده است. همچنین، ملاحظه می‌شود در روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، نوسان‌های

تبخیر بین ۰/۱ تا ۴/۳ میلیون مترمکعب طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ رخ داد. به طوری که بیشترین و کمترین میزان تبخیر به ترتیب متعلق به خردادماه ۱۳۹۳ و اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۶ و متوسط میزان تبخیر نیز معادل ۰/۹۰ میلیون مترمکعب بود. به این ترتیب، تغییرات تبخیر در روش بهره‌برداری منحنی فرمان بیشترین میزان را به خود اختصاص داد (شکل ۸). تبخیر سالانه این روش نیز این استنباط را تأیید و معادل ۲۴/۲۷ میلیون مترمکعب بود (جدول ۶). میزان تبخیر روش بهره‌برداری فعلی در جایگاه بعدی با کمبود سالانه ۱۳/۲۰ میلیون مترمکعب قرار داشت، در حالی که کمترین میزان تبخیر متعلق به گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته با تبخیر سالانه ۱۱/۱۱ میلیون مترمکعب بود. بنابراین، گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته با کمترین میزان تبخیر سالانه به عنوان بهترین روش شاخص تبخیر انتخاب شد.



شکل ۸. میزان تبخیر ماهانه طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۷

تراوش

بررسی‌های انجام‌شده در خصوص تعیین تراوش ماهانه؛ که با جای‌گذاری تراز مخزن در معادله تراوش ارائه‌شده به دست آمد، در روش‌های بهره‌برداری مختلف طی دوره (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته) در شکل ۹ نشان داده شده است. در روش بهره‌برداری فعلی تراوش بین ۷۰ تا ۳۶۰ مترمکعب متغیر بود. حداقل تراوش

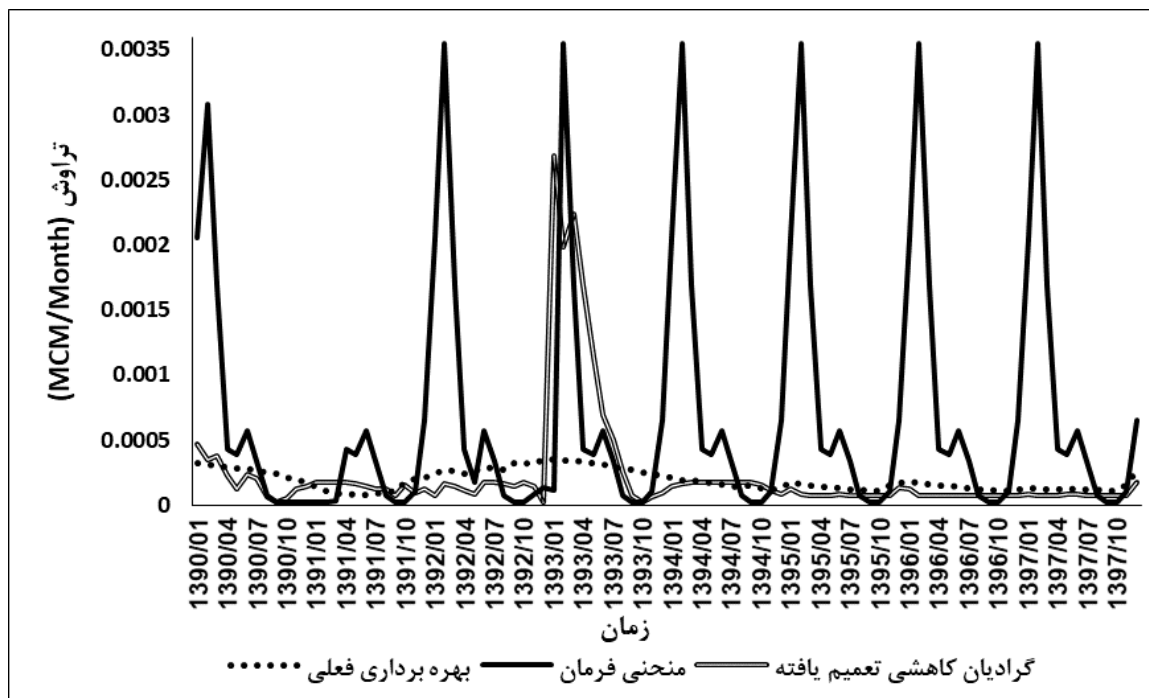
در شهریور ۱۳۹۱ و حداکثر تراوش در فروردین ۱۳۹۳ به ترتیب به میزان ۷۷/۲ و ۳۵۲ مترمکعب و متوسط تراوش به میزان ۱۹۰ مترمکعب بوده است. در روش بهره‌برداری منحنی فرمان، تراوش بین ۱۹ تا ۳۶۰ متر مکعب طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ متغیر بوده است. به طوری که حداقل تراوش در اسفندماه ۱۳۹۰ و حداکثر تراوش در اردیبهشت‌ماه سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ و متوسط تراوش به

تراوش سالانه ۲۳۰۰ مترمکعب بود. بنابراین، بهره‌برداری فعلی با کمترین میزان تراوش سالانه به عنوان بهترین روش شاخص تراوش انتخاب شد.

ارزیابی شاخص‌های کارایی مخزن روش‌های بهره‌برداری مختلف

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در تحقیق حاضر به منظور تعیین روش برتر بهره‌برداری مخزن سد طی دوره بهره‌برداری، علاوه بر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود از شاخص‌های کارایی مخزن نیز استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۷ ارائه شده و هر شاخص در روش‌های بهره‌برداری ارزیابی شده است.

میزان ۶۵۰ مترمکعب بوده است. همچنین، ملاحظه می‌شود در روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته، نوسان‌های تراوش در بازه ۱۹/۷ تا ۲۰۰۰ مترمکعب متغیر بوده است. حداکثر و حداقل تراوش متعلق به فروردین و دی ۱۳۹۳ و متوسط تراوش به میزان ۲۰۰ مترمکعب بوده است. به این ترتیب، تغییرات تراوش در روش بهره‌برداری منحنی فرمان بیشترین میزان را به خود اختصاص داد (شکل ۹). تبخیر سالانه این روش نیز این استنباط را تأیید و معادل ۸۵۰۰ متر مکعب بود (جدول ۶). نکته درخور توجه اینکه روش بهره‌برداری گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته در جایگاه بعدی با تراوش سالانه ۲۷۰۰ مترمکعب بود، در حالی که کمترین میزان تراوش متعلق به روش بهره‌برداری فعلی با



شکل ۹. میزان تراوش ماهانه طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۹۷

جدول ۷. شاخص‌های کارایی مخزن در روش‌های بهره‌برداری مختلف

شاخص‌های بررسی‌شده	بهره‌برداری فعلی	منحنی فرمان	GRG
اعتمادپذیری (/.)	۵۷/۲۴	۱۵/۳۲	۷۱/۸۶
برگشت‌پذیری (/.)	۹/۸۴	۶/۱۰	۱۲/۸۲
آسیب‌پذیری (/.)	۴۷/۳۲	۸۵/۱۳	۲۷/۵۱
انعطاف‌پذیری (/.)	۲/۹۷	۰/۱۴	۶/۶۸

تراوش معادل ۱۸/۶۵ درصد افزایش داشته است. به همین ترتیب، در خصوص قیاس روش بهره‌برداری منحنی فرمان نسبت به روش بهره‌برداری فعلی، از نظر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۲۶۹/۱۴، ۸۳/۸۰ و ۷۹/۹۰ درصد افزایش یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۷۳/۲۳، ۳۸، ۷۹/۹۰ و ۹۵/۳۱ درصد وضعیت بدتر شده است. بنابراین، از نظر شاخص‌های عملکردی و کارایی مخزن روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نسبت به روش بهره‌برداری منحنی فرمان و روش بهره‌برداری فعلی، به میزان بیشتری بهبود یافته است.

بحث و نتیجه‌گیری کلی

هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی تأثیر شاخص‌های مختلف تلفات آب (تراوش، تبخیر و کمبود) و شاخص‌های کارایی مخزن (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری) بر عملکرد بهینه مخزن به ازای روش‌های بهره‌برداری متفاوتی طی دوره (بهره‌برداری فعلی، منحنی فرمان و گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته) و در نهایت، انتخاب روش بهینه بهره‌برداری است. به این منظور، مخزن سد پیشین به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته و از داده‌های سد پیشین طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ استفاده شد.

نتایج به دست آمده نشان داد روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته (GRG) نسبت به روش بهره‌برداری منحنی فرمان از نظر شاخص‌های تراوش، تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۶۷/۸۶، ۵۴/۲۴ و ۶۷/۶۸ درصد بهبود یافته است. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۳۶۸/۹۵، ۱۱۰/۲۶، ۶۷/۶۸ و ۴۷۵۰/۴۰ درصد بهبود یافته است. همچنین، این روش نسبت به روش بهره‌برداری فعلی از نظر شاخص‌های تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۱۵/۸۸ و ۴۱/۸۶ درصد بهبود یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۲۵/۵۴، ۳۰/۳۴ و ۴۱/۸۶ درصد بهبود یافته است. نکتهٔ درخور توجه این است که این روش نسبت به روش

مطابق نتایج جدول ۷، در خصوص تعیین روش بهره‌برداری برتر از نظر شاخص اعتمادپذیری، روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته با اعتمادپذیری ۷۱/۸۶ درصد، قابل اعتمادترین روش بود. در حالی که روش بهره‌برداری فعلی با اعتمادپذیری ۵۷/۲۴ درصد در ردهٔ بعدی قرار گرفت. روش بهره‌برداری منحنی فرمان نیز با اعتمادپذیری ۵۷/۲۴ درصد در ردهٔ آخر قرار داشت. بنابراین، بیشترین اعتمادپذیری متعلق به گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته است.

از طرفی، در خصوص تعیین روش بهره‌برداری برتر از نظر شاخص برگشت‌پذیری (جدول ۷)؛ نتایج گویاست که روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته سریع‌ترین برگشت‌پذیری معادل ۱۲/۸۲ درصد را دارد.

همچنین، در خصوص تعیین روش بهره‌برداری برتر از نظر شاخص آسیب‌پذیری (جدول ۷)؛ نتایج نشان داد بهترین روش بهره‌برداری با کمترین آسیب‌پذیری متعلق به گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته با آسیب‌پذیری ۲۷/۵۱ درصد است.

در نهایت، در خصوص تعیین روش بهره‌برداری برتر از نظر شاخص انعطاف‌پذیری (جدول ۷)؛ نتایج به دست آمده نشان داد روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته با انعطاف‌پذیری ۶/۶۸ درصد، در اولویت نخست قرار گرفت. در حالی که روش بهره‌برداری فعلی و روش بهره‌برداری منحنی فرمان به ترتیب دارای انعطاف‌پذیری ۲/۹۷ و ۰/۱۴ درصد در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. بنابراین منعطف‌ترین روش، متعلق به روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته بود.

مقایسه روش‌های بهره‌برداری با روش بهره‌برداری فعلی

در خصوص قیاس روش بهره‌برداری گرادیان کاهشی تعمیم‌یافته نسبت به روش بهره‌برداری فعلی، از نظر شاخص‌های تبخیر و کمبود سالانه به ترتیب به میزان ۱۵/۸۸ و ۴۱/۸۶ درصد بهبود یافت. از نظر شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری به ترتیب به میزان ۲۵/۵۴، ۳۰/۳۴، ۴۱/۸۶ و ۱۲۵/۱۵ درصد بهبود یافته است. نکتهٔ جالب توجه این است که این روش نسبت به روش بهره‌برداری فعلی از نظر شاخص

- natural resources and environment. 2014. [Persian]
- [9]. Torabi H, Dehghani R, Godarzi A. Optimal operation of Reservoir using of linear programming model (Case study: Dorudzan dam). Human and environment. 2019; 17(1):27-37. [Persian]
- [10]. Nozari H, Moggan M. Operation Management of Amirkabir Dam Reservoir Water Management Using System Dynamics and Nonlinear Programming Model. Iranian Soil and Water Research. 2017; 48(2):335-347. [Persian]
- [11]. Lasdon LS, Warren AD. Generalized reduced gradient software for linearly and nonlinearly constrained problems. In: Greenberg HJ (ed) Design and implementation of optimization software. Sijthoff and Noordhoff. The Netherlands. 1987; 363-397.
- [12]. Lasdon LS, Warren AD, Jain A, Ratner M. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. ACM Trans Math Softw. 1978; 4:34-50.
- [13]. Elci A. Calibration of groundwater vulnerability mapping using the generalized reduced gradient method. Journal of contaminant hydrology. 2017; 207, 39-49.
- [14]. Pishin Dam Technical Reports, engineering Advisory company Pars Consulate. (1384-1387). [Persian]
- [15]. Dunicliff, J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Wiley, New York; 1988. 577 pp.
- [16]. Varyani A, Fatahi P. Determination of the optimal amount of production in a two-level production system with potential demand. International Journal of Industrial Engineering and Production Management. 2014; 24(1):56-66. [Persian]
- [17]. Lasdon LS, Fox RL, Ratner MW. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle. 1974; 8(3):73-103.
- [18]. Hashimoto T, Stediger JR, Loucks DP. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research. 1982; 18(1):14-20.
- بهره‌برداری فعلی ۱۸/۶۵ درصد شاخص تراوش افزایش داشته است. بنابراین، روش بهره‌برداری بهینه‌گرادیان کاهش‌ی تعمیم‌یافته نسبت به دو روش بهره‌برداری منحنی فرمان و فعلی به صورت مطلوبی در بهبود شاخص‌های کمبود، تلفات تبخیر و انعطاف‌پذیری مخزن سد مؤثر بوده است. در این روش به دلیل کاهش سطح مخزن، کاهش تبخیر را به دنبال داشته است و پیشنهاد می‌شود برای کاهش تلفات تبخیر و کمبود تأمین و بهبود کارایی مخزن از این روش در سایر مخازن ارزیابی شود.
- ### منابع
- [1]. Loucks DP, Van Beek A. Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). 2005.
- [2]. Teegavarapu RSV, Simonovic SP. Optimal operation of reservoir systems using simulated annealing. Water Resources Management. 2002; 16(5): 401- 428.
- [3]. Sivapragasam C, Vasudevan G, Maran J, Bose C, Kaza S, Ganesh N. Modeling evaporation-seepage losses for reservoir water balance in semi-arid regions. Water resources management. 2009; 23(5), 853.
- [4]. Banihabib ME, Zahraei A, Eslamian S. An integrated optimisation model of reservoir and irrigation system applying uniform deficit irrigation. International Journal of Hydrology Science and Technology. 2015; 5(4): 372-385.
- [5]. Hosseini-Moghari SM, Banihabib ME. Optimization of reservoir operation for agricultural water supply using firefly algorithm. 3 water and soil preservation. 2014; 3(4)17-31. [Persian]
- [6]. Banihabib ME, Hasani K, Bavani ARM, Asgari K. A framework for the assessment of reservoir operation adaptation to climate change in an arid region. International Journal of Global Warming. 2016; 9(3): 286-305.
- [7]. Banihabib ME, Zahraei A, Eslamian S. Dynamic Programming Model for the System of a Non-Uniform Deficit Irrigation and a Reservoir. Irrigation and drainage. 2017; 66(1):71-81.
- [8]. Beheshti AA, Hojati A. Optimization of Reservoir Operation of Qardanloo Dam Using Linear Programming. First National Conference on sustainable development of agricultural.