

ارزیابی اثرات رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدهای سری و موازی در تأمین آب (مطالعه موردی): سیستم منابع آب هفت سدی رودخانه زهره)

مهرداد تقیان^{*۱}

چکیده

در سال‌های اخیر، دیدگاه جامع‌نگر و مدیریت یکپارچه، جایگزین دیدگاه سنتی و بخشی‌نگر در طرح‌های توسعه منابع آب شده است. در این راستا، یکی از سؤال‌های کلیدی بهره‌برداران در سیستم‌های چندمخزنه آن است که برای تأمین نیازهای مشترک پایاب، کدام یک از سدها بایستی زودتر از همه تخلیه شود، همچنین در هنگام پر شدن مجدد مخازن، کدام سدها بایستی زودتر از همه پر شود. بر این اساس، بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب چند مخزنی، بایستی به گونه‌ای باشد تا مجموع آب استحصال شده را حداکثر کند. در این راستا، یکی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم، رتبه‌بندی بهره‌برداری از مخازن در تأمین نیازهای مشترک پایاب است. در حقیقت، ترتیب پر و خالی شدن مخازن که به صورت سری یا موازی قرار گرفته‌اند، بر نحوه توزیع ظرفیت خالی ذخیره در بین مخازن مؤثر است و از آن‌جا، بر مجموع تلفات ناشی از سرریز و تبخیر و در نهایت مجموع آب تنظیمی از سدهای مخزنی اثر مستقیم دارد. در این مقاله، از یک مدل شبیه‌سازی شبکه جریان با موتور بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی برای رتبه‌بندی بهره‌برداری از مخازن در یک دوره درازمدت آبدی ماهانه استفاده شده است. به عنوان مطالعه موردی، سیستم هفت مخزنی منابع آب زهره در جنوب‌غربی کشور بررسی شده است و گزینه‌های مختلفی برای رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدهای مخزنی تعریف شده است که حدود ۶ درصد بر کاهش تلفات سیستم شامل سرریز و تبخیر از سطح مخزن مؤثر بوده است. در این حالت، کاهش تلفات مربوط به سرریز از سیستم منابع آب نقش مؤثرتری در مقایسه با تبخیر ایفا کرده است. همچنین بر اساس گزینه برتر رتبه‌بندی مخازن در مقایسه با گزینه پایه (اولویت یکسان)، شاخص اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری بهبود یافته است؛ اما شاخص سرعت برگشت‌پذیری اندکی افت داشته است و آثار رتبه‌بندی سدهای موازی، مؤثرتر از آثار رتبه‌بندی سدهای سری بوده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی، حوضه زهره، رتبه‌بندی مخازن، شبیه‌سازی.

ارجاع: تقیان م. ۱۳۹۵. ارزیابی آثار رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدهای سری و موازی در تأمین آب (مطالعه موردی): سیستم منابع آب هفت سدی رودخانه زهره). مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۱۳۲-۱۳۳.

۱- کارشناس سازمان آب و برق خوزستان.

* نویسنده مسئول: mehrdad.taghian@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۶

مقدمه

در سال‌های اخیر، محدودیت‌های کمی و کیفی و آثار مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از اجرای پروژه‌های مختلف، سبب تغییر در رویکردهای منابع آب در کل جهان شده است (گلیک، ۲۰۰۰). این تغییر نگرش که از آن به عنوان پارادایم^۱ جدید آب یاد می‌شود، مدیران، طراحان و برنامه‌ریزان آب را به سمت رویکردهای غیرسازهای متمایل کرده است که در آن برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، جایگزین اجرای طرح‌های توسعه جدید شده است؛ بنابراین، تدوین سیاست‌های کارآمد بهره‌برداری از مخازن نیز مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. یک سیاست بهره‌برداری، شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی شود، تعیین می‌کند (وربز، ۱۹۹۳). به عبارت دیگر، قواعد بهره‌برداری اغلب به عنوان یک راهنما برای رهاسازی آب از مخازن به کار می‌روند تا امکان تأمین نیازها را در شرایط عملی فراهم کنند (تو و همکاران، ۲۰۰۳).

در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب پیچیده شامل سدهای مخزنی سری و موازی، یکی از مسائل اساسی، ترتیب تخلیه و پر شدن مجدد مخازن است. هدف اصلی این پژوهش، پاسخ به سؤالات کلیدی ذیل است.

پس از تأمین نیازهای اختصاصی هر سد، ترتیب تخلیه سدها برای تأمین نیازهای مشترک پایاب بایستی چگونه باشد؟ یا به عبارت دیگر، در هنگام پر شدن مجدد سدها، اولویت با کدام سدها است؟ چرا و چگونه رتبه‌بندی بهره‌برداری در سدهای سری و موازی مهم است؟ اصولاً رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدها بر کدام پارامترهای تأمین آب می‌تواند مؤثر باشد و نقش آن چه میزان است؟ چگونه و با چه مدل‌هایی می‌توان رتبه‌بندی بهره‌برداری را مدل‌سازی کرد؟

مسئله فوق در ابتدا توسط کلارک (۱۹۵۶) مطرح شد. باور و همکاران (۱۹۶۶) با مدل معرف قاعده فضایی^۲ به حل آن پرداختند. لاند (۲۰۰۰) و پاردس و لاند (۲۰۰۶) قواعد مربوط به پر و خالی شدن مخازن در سیستم‌های چندمخزنه را توسعه دادند. در سال‌های اخیر با توسعه مدل‌های ریاضی، روش‌های جامع‌تری برای حل مسئله

فوق ارائه شده که از آن جمله می‌توان به مدل شبکه عصبی لیو و همکاران (۲۰۰۶) و مدل شبیه‌سازی بر مبنای بهینه‌سازی لیو و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد. اسفاو و هاشیم (۲۰۱۲) از طریق رتبه‌بندی بهره‌برداری مخازن در یک سیستم چهار سدی توانستند میزان انرژی برقایی تولید شده را حدود ۵ درصد افزایش دهند. با گسترش دانش بشر و ایجاد ابزارهای نوین و ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی با مدل‌های شبیه‌سازی موجود (کارآموز و همکاران، ۲۰۱۰؛ استاد رحیمی و همکاران، ۲۰۱۲ و تقیان و همکاران، ۲۰۱۴)، فرصت‌های جدیدی برای تصمیم‌گیری بهتر در توسعه، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب فراهم شده است. یکی از مدل‌های پایه شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی داخلی در سیستم‌های منابع آب مخازن، مدل‌های شبکه جریان^۳ است. از انواع مدل‌های فراگیر شبکه جریان می‌توان به SIMYLD (وانسونو موسلی، ۱۹۷۰)، ARSP (سیگواداسن، ۱۹۷۶)، MODSIM (لبادی و همکاران، ۱۹۸۶)، WASP (کوزرا و دایمنت، ۱۹۸۸)، KCOM (اندریوس و همکاران، ۱۹۹۳)، WRMM (آیلیچ، ۱۹۹۳)، CALSIM (درایر، ۲۰۰۴) اشاره کرد. یکی از مزایای مدل‌های شبکه جریان آن است که امکان اولویت‌بندی و رتبه‌بندی کمان‌ها به سادگی در آن‌ها امکان‌پذیر است (تقیان و همکاران، ۲۰۱۴). این اولویت‌بندی می‌تواند به اشکال مختلف، مطرح باشد:

- ❖ اولویت‌بندی در تأمین نیاز گره‌های مختلف بالادست و پایین‌دست.
 - ❖ اولویت‌بندی در تأمین اهداف مختلف مثل برقایی، کشاورزی و زیست‌محیطی.
 - ❖ اولویت‌بندی در ترتیب پر و خالی شدن مخازن برای تأمین نیازهای مشترک پایاب.
- بنابراین، مدل‌های فوق، متناسب با اهداف این پژوهش هستند.

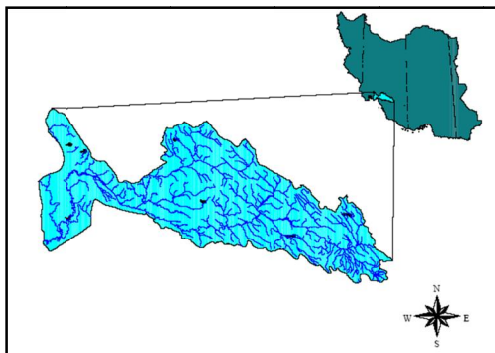
در پژوهش پیش‌رو از نرم‌افزار ARSP که یک مدل شبیه‌سازی شبکه جریان با موتور بهینه‌سازی داخلی است، برای رتبه‌بندی بهره‌برداری از سیستم هفت سدی رودخانه زهره در جنوب غربی ایران استفاده شد. در این نرم‌افزار، ترتیب پر و خالی شدن مخازن از طریق سیستم جریمه (پنالتی)^۴ به سادگی قابل تعریف است و حل آن از طریق

3- Flow network
4- Penalty

1- Paradigm
2- Space rule

جدول ۲- ظرفیت مخازن در سیستم - میلیون مترمکعب

نام سد	حجم کل مخزن
کوثر	۵۸۰
خیرآباد	۱۷۹
چم شیر	۱۸۶۳
ششپیر	۴۳
پارسیان	۶۲۰
زهره (۱)	۲۰۰
زهره (۲)	۱۰۹۰



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز زهره

شبیه‌سازی سیستم منابع آب

شبیه‌سازی در گام زمانی ماهانه و برای دوره آماری ۴۸ ساله آینده انجام شده است. در این مطالعات از برنامه شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب ایکرز^۱ استفاده به عمل آمده است (سیگواداسن، ۱۹۷۶) که در آن، سیستم منابع آب بایستی با یک شبکه بسته جریان^۲ به برنامه معرفی شود.

در این حالت، کلیه اجزاء سیستم به صورت گره^۳ و کمان^۴ معرفی می‌شود. گره‌ها شامل سدهای مخزنی، محل‌های برداشت و برگشت آب، شبکه‌های آبیاری و آبرسانی و هر گونه محل اتصال بازه‌های رودخانه یا آبراهه‌ها است. کمان‌ها انواع مختلف آبراهه‌ها، کانال‌ها، بازه‌های رودخانه و مناطق^۵ مختلف ظرفیت یک سد مخزنی را دربرمی‌گیرند. مجموعه گره‌ها و کمان‌ها یک شبکه بسته را تشکیل می‌دهند که چیدمان نهایی سیستم رودخانه را مشخص می‌کند. در این حالت، هر آبراهه و منطقه ذخیره در

بهینه‌سازی داخلی در هر گام زمانی منفرد (ماه) انجام خواهد گرفت. از دیگر مزایای این مدل‌ها امکان در نظر گرفتن جزئیات سیستم منابع آب با توجه به ماهیت شبیه‌سازی آن است.

مواد و روش‌ها

این قسمت از مقاله در سه بخش تهیه و تنظیم شده است که شامل مشخصات حوضه آبریز مورد مطالعه، شبیه‌سازی سیستم منابع آب و معیارهای ارزیابی سناریوهای مختلف بهره‌برداری است.

مشخصات حوضه آبریز مورد مطالعه

رودخانه زهره از اتصال رودخانه‌های فهلیان و شیو در استان‌های فارس و کهگیلویه و بویر احمد سرچشمه می‌گیرد و در محلی موسوم به حیدرکرار، شاخه مهم و اصلی خود به نام خیرآباد را دریافت می‌کند. این رودخانه، در نهایت با عبور از شهر هندیجان در استان خوزستان به خلیج فارس تخلیه می‌شود. مساحت حوضه آبریز زهره بالغ بر ۱۶۰۰۰ کیلومتر مربع است.

اطلاعات و داده‌های این پژوهش، شامل اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی، نیازهای آبی، مشخصات هندسی مخازن و همچنین سایر اطلاعات تکمیلی شناسایی سیستم منابع آب از وزارت نیرو (۱۳۹۲) دریافت شده است (جدول‌های ۱ و ۲، شکل ۱ و ۲). در جدول ۱ مقدار کل آبدی ورودی و نیازهای سیستم و شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز زهره در ایران را نشان می‌دهد. در جدول ۲ مقدار ظرفیت مخازن مشخص شده است و شکل ۲ پیکربندی شماتیک سیستم منابع آب زهره را نشان می‌دهد که شامل سدهای مخزنی شش پیر، پارسیان، چم شیر، زهره ۱ و ۲ به صورت سری روی شاخه زهره و موازی با سدهای سری کوثر و خیرآباد روی شاخه خیرآباد است.

جدول ۱- آبدی و نیاز سالانه سیستم - میلیون متر مکعب

پارامتر	حجم
کل آبدی ورودی به سیستم	۳۵۷۲
کل نیاز طرح‌های آبیاری و حقایه	۲۷۹۱
نیازهای شرب و صنعت	۲۸۸
نیاز زیست محیطی پایانه سیستم	۳۱۵
مجموع کل نیازها	۳۳۹۴

1- Acres Reservoir Simulation Program (ARSP)

2- Flow network

3- node

4- Arc

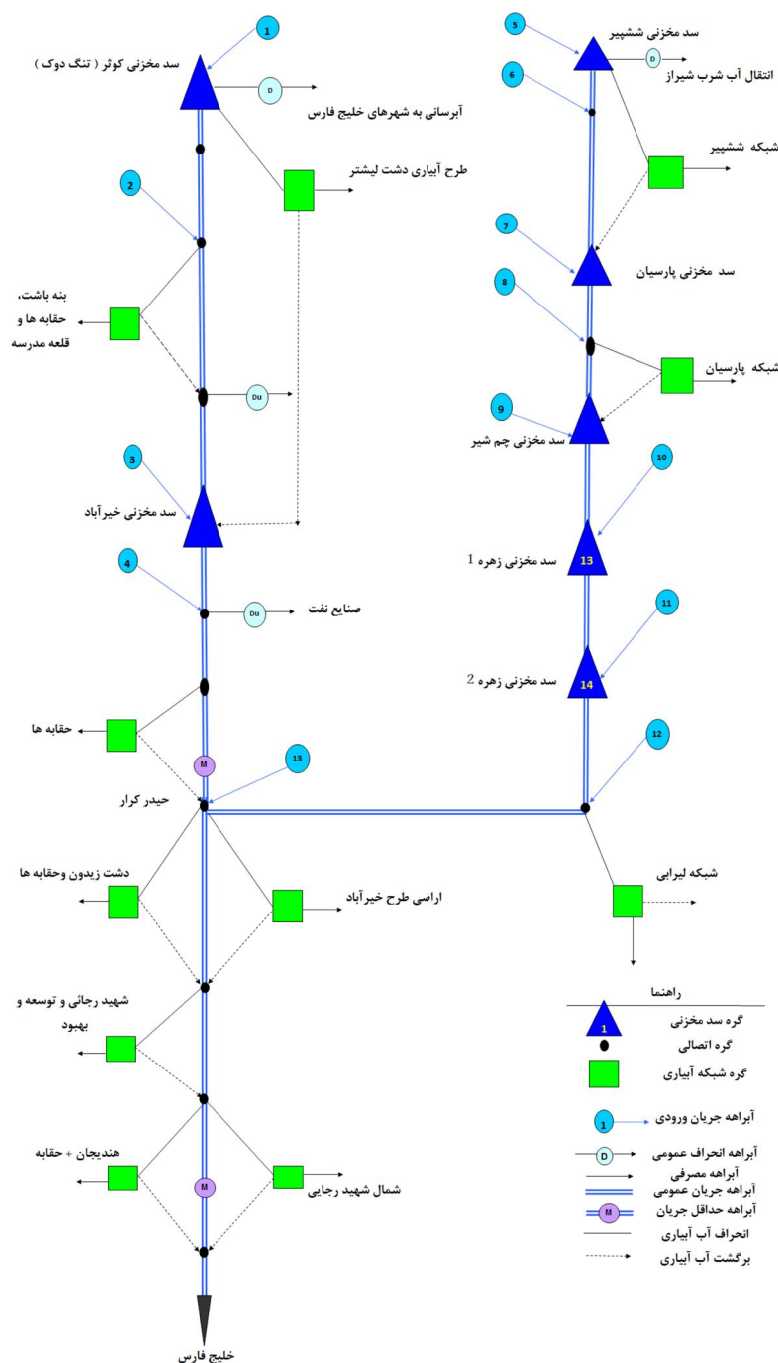
5- Zone

6- Penalty structure

7- Linear programming

از اعداد در اصطلاح ساختار هزینه‌ای^۶ نامیده می‌شود (سیگوداسن، ۱۹۷۶). برنامه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی^۷، بهترین راه حل تخصیص آب در شبکه را با رعایت شرایط و محدودیت‌های مفروض به نحوی ارائه می‌دهد که مجموع جریمه‌های (هزینه‌های) نسبی کل سیستم به کمترین مقدار خود برسد.

مخزن، با تعداد معینی کمان تعریف می‌شود. در واقع هر کمان، یک هدف بهره‌برداری را معرفی می‌کند و لازم است یک عدد جریمه نسبی که معرف اولویت نسبی هدف مورد نظر است، توسط کاربر به آن نسبت داده شود تا در صورت عدم تأمین جریان در کمان مورد نظر، جریمه نسبی به ازای هر واحد کمبود جریان اعمال شود. چنین مجموعه‌ای



شکل ۲- پیکربندی شماتیک سیستم منابع آب زهره

C_{ij}^R آن بیشتر است، دیرتر از همه تخلیه می‌شود و زودتر از همه پر می‌شود تا هزینه نسبی کمبود جریان در سیستم را حداقل کند. برای رتبه‌بندی تأمین نیازهای مختلف نیز نیازهایی که اولویت بالاتری دارند، بایستی C_{ij}^D در آن‌ها مقدار بالاتری توسط کاربر داده شود. در این مطالعات، تأمین نیازهای شرب و صنعت (n) در اولویت اول و پس از آن به ترتیب نیازهای زیست‌محیطی (e) و کشاورزی (a) قرار دارند؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$C_{ij}^n > C_{ij}^e > C_{ij}^a \quad (5)$$

معیارهای ارزیابی سناریوهای مختلف بهره‌برداری

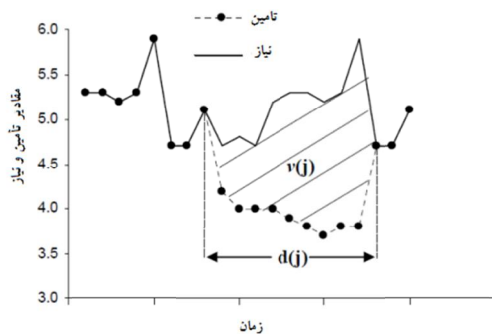
مخزن

ارزیابی سیستم منابع آب بر اساس شاخص‌های عملکردی اعتمادپذیری^۱، برگشت‌پذیری^۲، آسیب‌پذیری^۳ انجام می‌گیرد. این شاخص‌ها با هاشیماتو و همکاران (۱۹۸۲) پایه‌گذاری کرده‌اند.

اگر مدت زمانی که یک سیستم برای بار زام در یک دوره شکست^۴ (کمبود) قرار می‌گیرد با d_j مقدار نیاز^۵ در گام زمانی t با $D(t)$ و مقدار نیاز تأمین شده^۶ با $S(t)$ نشان داده شود، حجم کمبودی که سیستم در این مدت متحمل می‌شود V_j ، از معادله زیر برآورد می‌شود:

$$V_j = \sum_{t=1}^{d_j} [D(t) - S(t)] \quad (6)$$

پارامترهای اساسی معادله (۶) در شکل ۴ مشخص شده است.



شکل ۴- پارامترهای اساسی به کار رفته در معادله (۶)

بدین ترتیب راه حل بهینه تنها با رسیدن تابع هزینه نسبی به حداقل مقدار آن به دست می‌آید. روابط برنامه‌ریزی خطی برای یک مسیر منفرد (کمان) بین گره‌ها به شرح زیر است که در آن معادله (۱) تابع هدف و معادلات (۲) تا (۴) محدودیت‌هایی را بر تابع هدف اعمال می‌کنند:

$$\min Z = \sum_{ij} C_{ij} q_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_j q_{ij} - \sum_j q_{ji} = 0 \quad (2)$$

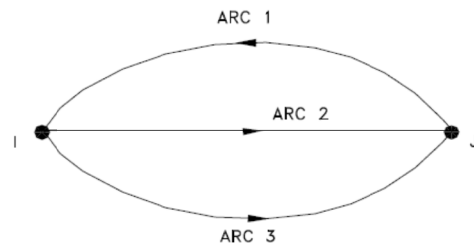
$$L_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij} \quad (3)$$

$$q_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

که در آن معادله (۱)، مجموع جریمه نسبی جریان در کمان‌ها را حداقل می‌کند. معادله (۲) اصل پیوستگی جریان و معادله (۳) امکان‌پذیری جریان را بیان می‌کند. معادله (۴) بیانگر آن است که دبی جریان در هر کمان، همواره مقداری مثبت یا صفر است. علائم به کار رفته در روابط فوق به شرح زیر است:

Z تابع هدف (مجموع جریمه‌های نسبی) که بایستی حداقل شود، q_{ij} جریان در کمان (مسیر اتصال) از گره i به گره j ، C_{ij} هزینه هر واحد جریان در کمان، L_{ij} جریان حداقل در کمان، U_{ij} جریان حداکثر در کمان.

در شکل ۳ یک حالت کلی از شیوه تعریف آبراهه‌ها و مناطق ذخیره مخزن با کمان‌ها نشان داده شده است. گره i در بالادست و گره j در پایین‌دست قرار دارد. جریان مطلوب و مورد انتظار با کمان ۲ تعریف می‌شود و میزان کمبود جریان با کمان ۱ و مازاد جریان از طریق کمان ۳ به برنامه معرفی می‌شود.



شکل ۳- یک مجموعه از کمان‌های شبکه جریان

تغییرات ذخیره در مخزن نیز از طریق مجموعه‌ای از کمان‌ها مانند شکل فوق، نشان داده می‌شود. در این حالت، رتبه‌بندی مخازن نیز بر مبنای هزینه نسبی (C_{ij}^R) هر واحد کمبود جریان از ظرفیت پر مخزن انجام شود. بر این اساس، برای تأمین نیازهای مشترک پایاب، مخزنی که

- 1- Reliability
- 2- Resiliency
- 3- Vulnerability
- 4- Failure
- 5- Demand
- 6- Supply

شدن مجدد است و رتبه پایین‌تر بیانگر اولویت در تخلیه است و سناریوهای مختلف بر اساس موقعیت نسبی سدها و شاخه‌های رودخانه به شرح زیر است:

- گزینه ۱: از سراب به پایاب حوضه، ابتدا شاخه خیرآباد
گزینه ۲: از پایاب به سراب حوضه، ابتدا شاخه خیرآباد
گزینه ۳: از سراب به پایاب حوضه، ابتدا شاخه زهره
گزینه ۴: از پایاب به سراب حوضه، ابتدا شاخه زهره
گزینه ۵: به ترتیب نزولی احجام سدهای مخزنی
گزینه ۶: به ترتیب صعودی احجام سدهای مخزنی
گزینه ۷: به ترتیب نزولی احجام مخازن هر شاخه
گزینه ۸: به ترتیب صعودی احجام مخازن هر شاخه
گزینه ۹: تمام اولویت‌ها یکسان (سناریو پایه)

شبیه‌سازی در گزینه‌های مختلف به منظور بررسی عملکرد رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدهای مخزنی کوثر، خیرآباد، شش‌سیر، پارسیان، چم شیر، زهره (۱) و زهره (۲) در سیستم منابع آب زهره انجام شد و با شبیه‌سازی سیستم، تعداد کل و سری دوره‌های شکست، مقدار کمبود و نیاز مربوط به هر طرح در گزینه‌های نه‌گانه استخراج و سپس شاخص‌های عملکرد مطابق جدول ۴ و شکل ۵ برآورد شد. همان‌گونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، رتبه‌بندی بهره‌برداری مخازن برای تأمین نیازهای مشترک پایاب بر کلیه شاخص‌های ارزیابی عملکرد مؤثر بوده است. در سناریو ۱ که به عنوان سناریو برتر مطالعات شناخته شده است، شاخص انعطاف‌پذیری در مقایسه با گزینه نه (عدم رتبه‌بندی مخازن) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. مقایسه دقیق‌تر دو گزینه نشان می‌دهد که شاخص اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری بهبود یافته است؛ اما شاخص سرعت برگشت‌پذیری اندکی افت داشته است.

مطابق شکل ۵ و با مقایسه گزینه‌های یک تا چهار می‌توان به سادگی استنباط نمود که رتبه‌بندی شاخه‌های موازی در مقایسه با رتبه‌بندی سدهای سری واقع در یک شاخه، اثر معنی‌دارتری بر شاخص انعطاف‌پذیری ایفا کرده است. همچنین پر شدن مجدد مخازن از سراب حوضه، عملکرد بهتر را در سیستم نشان داده است. همان‌طور که اشاره شد، رتبه‌بندی مخازن می‌تواند بر تلفات سیستم مانند سرریز و تبخیر از سطح آزاد مخزن مؤثر باشد. در جدول ۵ و شکل‌های ۶ و ۷ تلفات سالانه و ماهانه آب در گزینه‌های مورد بررسی آورده شده است. مطابق جدول ۵، مقایسه گزینه برتر مطالعات (گزینه ۱) با گزینه پایه

اعتمادپذیری

اعتمادپذیری قدیمی‌ترین و در عین حال پرکاربردترین شاخص در مسائل مدیریت منابع آب است (هاشیماتو و همکاران، ۱۹۸۲). اگر T کل گام‌های زمانی، Z شمارنده رویداد شکست (عدم تأمین کامل نیاز)، M تعداد رخداد‌های شکست و d_j مدت زمانی باشد که سیستم برای بار j ام در یک دوره شکست قرار می‌گیرد، اعتمادپذیری با استفاده از معادله زیر برآورد می‌شود:

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d_j}{T} \quad (7)$$

برگشت‌پذیری

این شاخص معیاری است برای تعیین این که اگر سیستمی وارد یک وضعیت شکست شد، با چه سرعتی از این شرایط عبور می‌کند و وارد وضعیت مطلوب می‌شود. این تعریف، عکس مدت زمانی است که سیستم به طور میانگین در وضعیت شکست قرار می‌گیرد.

$$l = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_j \right\}^{-1} \quad (8)$$

آسیب‌پذیری

این شاخص معیاری برای تعیین خسارت‌های احتمالی وارد بر سیستم ناشی از یک رویداد شکست است و به صورت زیر قابل تعریف که در آن h همان شاخص آسیب‌پذیری است.

$$h = \frac{\left(\sum_{t \in f} D_t - \sum_{t \in f} S_t \right)}{\sum_{t \in f} D_t} \quad (9)$$

انعطاف‌پذیری یا پایداری

لاکس (۱۹۹۷) به منظور تعیین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری^۱ (j) مخزن در طراحی و بهره‌برداری، سه شاخص قابلیت اعتماد زمانی، سرعت برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به صورت زیر با هم ترکیب کرد.

$$j = dl(1-h) \quad (10)$$

نتایج و بحث

بر اساس اولویت‌بندی مخازن در تأمین نیازهای پایین‌دست، نه گزینه مختلف مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شد. در این جدول، رتبه بالاتر بیانگر اولویت در پر

در گام زمانی ماهانه و در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که کاهش مجموع سرریز از سدهای مخزنی به ویژه در ماه‌های آذر تا اسفند، نقش مؤثرتری را در کاهش کل تلفات ایفا کرده است.

مطالعات (گزینه ۹) نشان می‌دهد که مجموع تلفات سالانه سرریز از سیستم و تبخیر از سطح آزاد آب مخازن از ۲۳/۵۳ مترمکعب در ثانیه به ۲۲/۰۷ مترمکعب در ثانیه (حدود ۶/۲ درصد) کاهش یافته است. بررسی دقیق‌تر آن

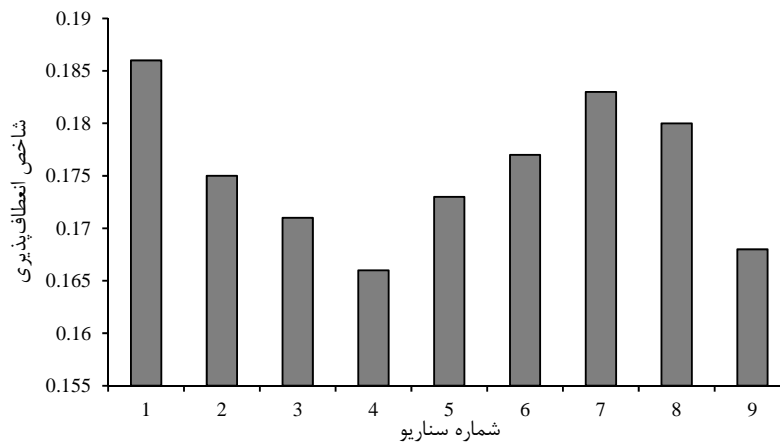
جدول ۳- رتبه‌بندی مخازن در گزینه‌های مختلف بهره‌برداری مخزن

نام سد	شماره گزینه								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
کوثر	۰	۱	۵	۶	۳	۳	۰	۱	۰
خیرآباد	۱	۰	۶	۵	۵	۱	۱	۰	۰
ششپیر	۲	۶	۰	۴	۶	۰	۶	۲	۰
پارسیان	۳	۵	۱	۳	۲	۴	۴	۴	۰
چمشیر	۴	۴	۲	۲	۰	۶	۲	۶	۰
زهره ۱	۵	۳	۳	۱	۴	۲	۵	۳	۰
زهره ۲	۶	۲	۴	۰	۱	۵	۳	۵	۰

رتبه ۰، اولین سد برای پر شدن مجدد و آخرین در تخلیه است. رتبه ۶، آخرین پر شدن و اولین تخلیه است.

جدول ۴- شاخص‌های عملکرد سیستم در گزینه‌های مختلف

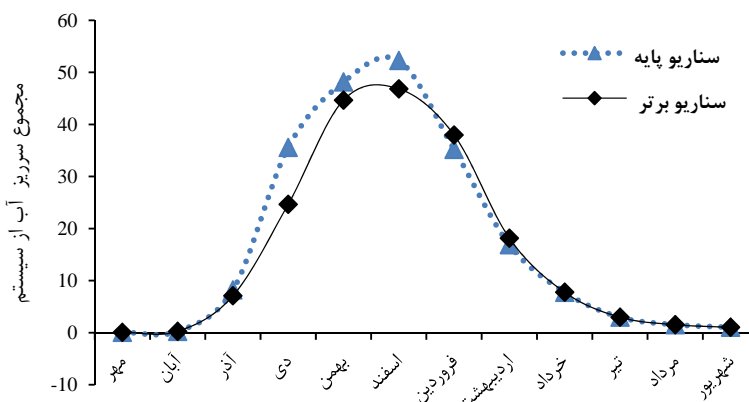
سناریوها	قابلیت اعتماد زمانی	شاخص سرعت برگشت پذیری	شاخص آسیب پذیری
گزینه ۱	۰/۸۸۲	۰/۲۳۵	۰/۱۱۶
گزینه ۲	۰/۸۶۴	۰/۲۳۰	۰/۱۲۹
گزینه ۳	۰/۸۳۲	۰/۲۳۸	۰/۱۶۰
گزینه ۴	۰/۸۲۰	۰/۲۴۱	۰/۱۷۰
گزینه ۵	۰/۸۳۱	۰/۲۴۳	۰/۱۵۸
گزینه ۶	۰/۸۷۸	۰/۲۲۵	۰/۱۱۹
گزینه ۷	۰/۸۷۱	۰/۲۳۶	۰/۱۲۴
گزینه ۸	۰/۸۸۰	۰/۲۲۸	۰/۱۱۷
گزینه ۹	۰/۸۲۲	۰/۲۴۲	۰/۱۶۷



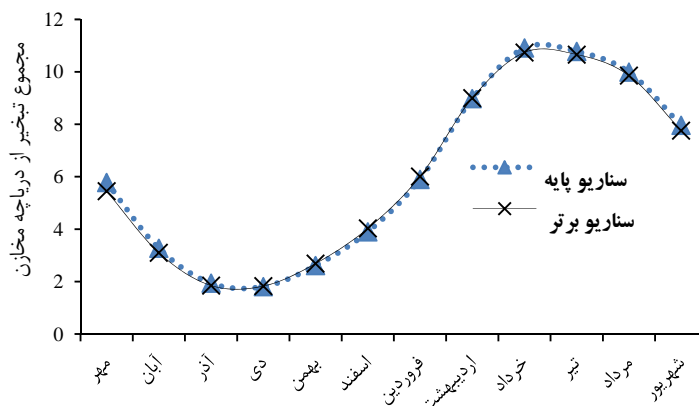
شکل ۵- شاخص انعطاف پذیری در گزینه‌های مختلف بهره‌برداری

جدول ۵- تلفات آب در حالت‌های مختلف رتبه‌بندی بهره‌برداری مخازن - مترمکعب در ثانیه

پارامتر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
تبخیر	۶/۱۳	۶/۳۷	۵/۸۱	۶/۱۶	۶/۰۳	۶/۲۹	۶/۲۲	۶/۲۸	۶/۲۲
سرریز	۱۵/۹۴	۱۷/۰۷	۱۶/۹۱	۱۷/۴۷	۱۷/۱۸	۱۵/۸۵	۱۶/۸۳	۱۵/۸۵	۱۷/۳۱
مجموع تلفات	۲۲/۰۷	۲۳/۴۴	۲۲/۷۲	۲۳/۶۳	۲۳/۲۱	۲۲/۱۴	۲۳/۰۵	۲۳/۱۳	۲۳/۵۳



شکل ۶- مجموع سرریز سیستم منابع آب



شکل ۷- مجموع تلفات تبخیر از سطح آزاد آب مخازن

نتیجه‌گیری

یکی از سؤال‌های کلیدی بهره‌برداران در سیستم‌های چندمخزنه آن است که برای تأمین نیازهای مشترک پایاب، کدام یک از سدها بایستی زودتر از همه تخلیه شود، همچنین در هنگام پر شدن مجدد مخازن، کدام سدها بایستی زودتر از همه پر شود. در حقیقت رتبه‌بندی بهره‌برداری از مخازن بایستی به گونه‌ای باشد تا مجموع آب تنظیمی را حداکثر یا به عبارت دیگر مجموع تلفات تبخیر از سطح آزاد آب مخازن و سرریز از سیستم منابع

آب را حداقل کنند. در این راستا، سیستم منابع آب هفت سدها در جنوب غرب کشور مورد ارزیابی قرار گرفت و نه گزینه مختلف برای رتبه‌بندی بهره‌برداری از سدهای مخزنی تعریف شد. این رتبه‌بندی در دو سطح سری و موازی اعمال شد. بدین مفهوم که هم سدهای موجود در یک شاخه و هم شاخه‌های اصلی رودخانه رتبه‌بندی شدند. شبیه سازی گزینه‌های مختلف نشان داد که می‌توان میانگین تلفات سالانه سیستم منابع آب را تا حدود ۶/۲ درصد نسبت به گزینه پایه که بیانگر عدم رتبه‌بندی

9. Hashimoto T. Loucks D. P. and Stedinger J. 1982. Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. *Water Resource Research*. 18(1): 14-20.
10. Ilich N. 1993. Improved of the return flow allocation in the water resource management model (WRMM) of Alberta environment. *Canadian Civil Engineering*. 20(4): 613-621.
11. Karamouz M. Mojahedi A. and Ahmadi A. 2010. Inter basin Water Transfer: Economic Water Quality-Based Model. *Irrigation and Drainage Engineering*. 136(2): 90-98.
12. Kuczera G. and Diment G. 1998. General water supply system simulation model: Wasp. *Water Resource Planning and Management*. 114(4): 365-382.
13. Labadie J. W. Bode D. A. and Pineda A. M. 1986. Network model for decision- support in municipal raw water supply. *Water Resources Bulletin*. 22(6): 927-940.
14. Liu X. Guo SH. Liu P. Chen L. and Li X. 2011. Deriving optimal refill rules for multi-purpose reservoir operation. *Water Resource Management*. 25: 431-448.
15. Liu P. Geo SH. Xiong L. Li W. and Zhang H. 2006. Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model. *Water Resources Management*. 20: 337-357.
16. Loucks D. P. 1997. Quantifying trends in system sustainability, *Hydrology Science*. 42(4): 513-530.
17. Lund J. R. 2000. Derived power production and energy drawdown rules for reservoirs, *Water Resource Planning and Management*. 126(2): 108-115.
18. Ostadrahimi L. Marino M. A. Afshar A. 2012. Multi-reservoir operation rule: multi-swarm PSO based optimization approach. *Water Resources Management*. 26: 407-427.
19. Paredes J. and Lund J. R. 2006. Refill and drawdown rules for parallel reservoirs: quantity and quality. *Water Resources Management*. 20: 359-376.
20. Sigvaldason O. T. 1976. A simulation model for operating a multipurpose multi-reservoir system. *Water Resource Research*. 12(2): 263-278.
21. Taghian M. Rosbjerg D. Haghghi A. and Madsen H. 2014. Optimization of conventional rule curve coupled with hedging rules for reservoir operation. *Water Resource Planning and Management*. 140(5): 693-698.
22. Tu M. Y. Hsu N. S. and Yeh W. W. G. 2003. Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. *Water Resource Planning and Management*. 129(2): 86-97.

مخازن است، کاهش داد. در این حالت، کاهش تلفات مربوط به سرریز از سیستم منابع آب نقش مؤثرتری در مقایسه با تبخیر ایفا کرده است. مقایسه بین گزینه‌های مختلف نشان داد که رتبه‌بندی مخازن بر کلیه شاخص‌های نوین عملکرد بهره‌برداری مؤثر بوده است و بر مبنای شاخص انعطاف‌پذیری، آثار رتبه‌بندی شاخه‌های موازی، مؤثرتر از آثار رتبه‌بندی سدهای سری در یک شاخه بوده است. در این میان، شاخص‌های اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری در گزینه برتر بهبود یافتند؛ اما سرعت برگشت‌پذیری اندکی تنزل نشان داد. علاوه بر آن، ترتیب پر شدن مجدد مخازن از سراب به پایاب حوضه در مقایسه با حالت عکس آن، عملکرد بهتری را ایفا کرده است؛ زیرا در این وضعیت، امکان کنترل سرریز در سدهای بعدی بیشتر مهیا بوده است.

منابع

۱. وزارت نیرو ۱۳۹۲. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، مطالعات تکمیلی سیستمی حوضه آبریز رودخانه زهره، گزارش مطالعات توجیهی تخصیص آب. ۱۵۴ ص.
2. Andrews E. S. Chung F. I. and Orlin J. B. 1993. Multi-layers priority-based simulation of conjunctive facilities. *Water Resource Planning and Management*. 118(1): 32-53.
3. Asfaw T. D. and Hashim A. M. 2012. Development of cascade hydropower reservoirs operating system rule using refill and deplete ranking orders. *Advance Material Research*. 433: 1735-1739.
4. Bower B.T. Hufschmidt M.M and Reedy W.W. 1966. Operating procedures: their role in the design of water-resource system by simulation analyses. Harvard University Press, Cambridge. 458 p.
5. Clark E. J. 1956. Impounding reservoirs. *American Water Works Association*. 48(4): 349-354.
6. Draper A. J. 2004. Calsim: Generalized model for reservoir system analyses. *Water Resource Planning and Management*. 130(6): 480-489.
7. Evanson D. E. and Moseley J. C. 1970. Simulation/Optimization techniques for multi-basin water resources planning. *Water Resource Bulletin*. 6(5): 725-736.
8. Gleick P. H. 2000. The changing water paradigm a look at twenty first century water resource development. *International Water Resource Association*. 25(1): 127-138.

23. Wurbs R. A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Water Resource Planning and Management*. 119(4): 455-472.