تأثیر استراتژی‌های مدیریت سیستم‌های منابع آب بر شاخص‌های خشکسالی در سد جره

مهدی بشاورد[۱*]، آرش ادیب[۲]، سید محمد اشرفی[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. استاد، گروه عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. دانشیار، گروه عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۰۹/۲۵

چکیده

خشکسالی‌های ناشی از کمبود بارش و افزایش مصرف آب در سراسر جهان در حال افزایش است و از تبعات آن اثرات نامطلوب اقتصادی و زیست‌محیطی است. اثرات نامطلوب را می‌توان با استفاده از الگوهای بهره‌برداری بهینه و استفاده از قوانین جیره‌بندی در دوره‌های خشکسالی کاهش داد. در این روش‌ها با وجود امکان تأمین کل نیاز، گاهی تنها قسمتی از آن تأمین می‌شود؛ این عمل موجب ذخیره آب و پذیرش یک کمبود کوچک در بازه زمانی جاری برای کاهش کمبودهای شدید در آینده می‌شود. این پژوهش یک مطالعه موردی برای تعیین منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سد جره و بررسی تأثیر بهره‌برداری از سد با دو سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی بر شاخص‌های خشکسالی پایین دست است؛ که تاکنون از این نظر بررسی نشده است. به این منظور از طریق اتصال یک مدل بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه‌ساز، مقادیر بهینه منحنی‌های فرمان و ضرایب جیره‌بندی براساس داده‌های تاریخی جریان ورودی به مخزن مطالعه شد و کارایی مدل در سیستم منابع آب رودخانه الله ارزیابی گردید. همچنین شاخص خشکسالی SDI، عملکرد SOP و مدل جیره‌بندی در دوره پایه از طریق محاسبه مقدار تابع هدف یا شاخص اصلاح شده کمبود (MSI) و شاخص‌های اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری، بررسی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل جیره‌بندی، تابع MSI نسبت به SOP در دوره مورد نظر ۴۱ درصد بهبود یافته است. همچنین با اجرای سیاست جیره‌بندی، آسیب‌پذیری سیستم نسبت به روش SOP به مراتب بهبود یافته و از ۶۴ به ۲۶ درصد رسیده است.

کلید واژه‌ها: بهره‌برداری از مخزن سد، بهینه‌سازی، جیره‌بندی، خشکسالی، شبیه‌سازی، منحنی فرمان.

مقدمه

ارزیابی سیاست‌های مدیریتی، یکی از راه‌های غلبه بر مشکل کمبود منابع آب و کمک به توسعه پایدار در سیستم‌های منابع آب و تصمیم‌سازی در سطوح کلان است. در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های مختلف تحلیل سیستم هم در زمینه شبیه-سازی و هم در زمینه بهینه‌سازی به‌عنوان یک ابزار کارآمد در مدیریت منابع آب نقش ویژه‌ای در غلبه بر چالش‌های این حوزه

* نویسنده مسئول: Mhdbeshavard@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.3.1019811

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

داشته است (Simonovic, 2000). استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در حل مسائل مدیریت منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن، جایگاه بارزی در مطالعات گذشته داشته به‌گونه‌ای که مدل‌های مختلفی در سیر تکامل روش‌های بهینه‌سازی در این حوزه توسعه داده شده‌اند. اما آنچه سبب ارزیابی دقیق و اعمال مناسب تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در یک سیستم می‌شود، شبیه‌سازی مناسب سیستم مورد نظر است. علیرغم توسعه و استفاده زیاد از روش‌های بهینه‌سازی، توسعه یک مدل شبیه‌ساز که در کنار نمایشی صحیح و کارآمد از یک سیستم پیچیده و پویا، که قابلیت اعمال سیاست‌های مختلف تصمیم‌گیری در مدل را نیز داشته باشد همواره مورد تحقیق بسیاری از افراد در حوزه‌های مختلف به‌ویژه در مبحث تحلیل سیستم‌ها بوده است. در روش‌های بهینه‌سازی، اثر اعمال سیاست‌های مختلف بر عملکرد سیستم منابع آب مورد نظر، با توجه به توابع هدف و مجموعه نقاط جواب قابل ارزیابی است؛ این در حالی است که در روش‌های شبیه‌سازی، باید نتایج حاصل از اعمال سیاست-های مختلف را به‌گونه‌ای که امکان انتخاب سیاست بهتر فراهم شود، تفسیر کرد .

خشکسالی‌های ناشی از کمبود بارش و افزایش مصرف آب در سراسر جهان در حال افزایش است. از تبعات آن می‌توان به اثرات نامطلوب اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اشاره نمود. از آنجا که سدهای مخزنی نقش مهمی در مدیریت سیستم توزیع آب ایفا می‌نمایند، با استفاده از الگوهای بهره‌برداری بهینه می‌توان این اثرات نامطلوب را تا حد ممکن کاهش داد. در خلال دوره‌های خشکسالی، بهره‌برداران بیشتر تمایل دارند به‌جای یک کمبود شدید فاجعه‌آمیز، با یک دوره متوالی از کمبودهای کوچکتر مواجه شوند (Lund and Reed, 1995). به‌منظور تعدیل نمودن این کمبودهای شدید، محدودیت‌های آب یا جیره‌بندی (Hedging) به‌طور موقت برقرار می‌شوند تا ذخیره مخزن و جریان ورودی را برای مصارف آینده حفظ نمایند (Bayazit and Unal, 1990). در عمل با کاربرد قاعده جیره‌بندی، کمبود آب در افق طولانی‌تری توزیع گشته و راندمان بهره‌برداری از مخزن بهبود می‌یابد (Neelakantan and Pundarikanthan, 1999; Shih and ReVelle, 1994). سیاست جیره‌بندی بهینه برای تأمین آب از طریق بهره‌برداری مخزن، به تعادل بین منفعت آب رهاسازی شده و ارزش آب انتقال یافته به ذخیره، بستگی دارد (Draper and Lund, 2004). ایجاد یک قانون مؤثر و کارا جهت کاهش نیاز و جیره‌بندی، دست کم با دو سؤال زیر مواجه می‌گردد:

الف - از چه زمانی و در چه سطحی از ذخیره و ورودی پیش بینی‌شده، باید جیره‌بندی آغاز گردد؟

ب- میزان کاهش خروجی در طول هر دوره جیره‌بندی چه اندازه باید باشد؟

تحقیقات انجام شده برای پاسخ به سؤالات مذکور را می‌توان به دو دسته جیره‌بندی پیوسته و گسسته تقسیم نمود. این تحقیقات عمدتاً مبتنی بر استفاده از مدل‌های متنوع بهینه‌سازی می‌باشند. در جیره‌بندی پیوسته، رابطه بین مجموع آب موجود در مخزن و ورودی پیش‌بینی‌شده و خروجی مخزن در هر ماه با یک یا چند منحنی نمایش داده می‌شود (Bayazit and Unal, 1990; Shih and ReVelle, 1994; Srinivasan and Philipose, 1998). اما در جیره‌بندی گسسته، حجم مخزن به چند منطقه تقسیم می‌شود که هر منطقه دارای یک سیاست بهره‌برداری با ضرایب جیره‌بندی یکسان است (Chang et al., 2005; Neelakantan and Pundarikanthan, 1999, 2000; Shih and ReVelle, 1995; Tu et al., 2003, 2008). در حالت پیوسته، سؤالات مذکور به‌صورت هم‌زمان پاسخ داده می‌شوند اما برای افزایش انعطاف در مدیریت بهره‌برداری مخازن، نیاز است که این سؤالات به‌طور مستقل از یکدیگر پاسخ داده شوند. بر این اساس جیره‌بندی گسسته در شرایط

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

بهره‌برداری واقعی مناسب‌تر می‌باشد (Tu et al., 2008). در این حالت سؤال اول با مقدار آب موجود در مخزن بعلاوه ورودی پیش‌بینی شده ماهانه (منحنی فرمان بهره‌برداری) و سؤال دوم به‌وسیله ضرایب جیره‌بندی پاسخ داده می‌شود. در این راستا تحقیقاتی برای بهینه‌سازی هم‌زمان احجام آستانه و ضرایب جیره‌بندی انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات تو و همکاران اشاره کرد که به ترتیب با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مختلط عدد صحیح غیرخطی (Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)) و مختلط عدد صحیح درجه دوم (Mixed Integer Quadratic Programming (MIQP)) انجام شده است (Tu et al., 2003, 2008). لبادی در جمع‌بندی مروری بر روش‌های مختلف حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای مخزنی، یکی از سه کلید اصلی پیشنهادی برای بهبود و اصلاح مدل‌های بهینه‌سازی را اتصال آن به مدل‌های شبیه‌سازی مورد اعتماد بهره‌برداران عنوان می‌کند و در ادامه از توانایی اتصال مستقیم الگوریتم ژنتیک به مدل‌های شبیه‌سازی، به‌عنوان بزرگترین مزیت آن یاد می‌کند (Labadie, 2004). در این راستا می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط کانگرانگ و چالیراکتراکون، داریان و ممتحن اشاره نمود (Kangrang and Chaleeraktrakoon, 2007; Dariane and Momtahen, 2009).

در تحقیق حاضر از اتصال یک الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه‌ساز استفاده گردیده است تا به‌صورت هم‌زمان مقادیر آستانه (منحنی‌های فرمان) و ضرایب جیره‌بندی در سیستم مخزن سد جره را جستجو کند. در مدل شبیه‌ساز، معادلات بیلان جرمی مخزن و محاسبات تبخیر از سطح دریاچه، براساس روابط سطح – حجم و شدت تبخیر ماهانه، وارد شده است. از آنجایی که تاکنون چنین کاری در این مخزن انجام نشده است، نتایج این پژوهش می‌تواند گام مؤثری در جهت مدیریت بهینه منابع آب این منطقه باشد.

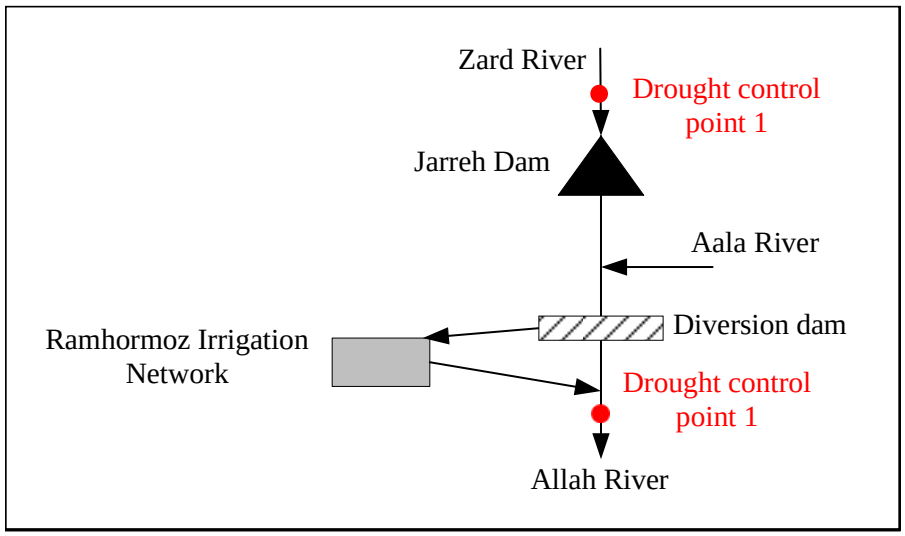
مواد و روش‌ها

مطالعهٔ موردی

محدوده طرح در جنوب غربی کشور و در استان خوزستان واقع گردیده است و رودخانه‌های مورد مطالعه در این محدوده، رودخانه‌های زرد ، اعلا و الله می‌باشند. سد جره با مساحت حوزه آبریز حدود ۸۴۰/۷ کیلومتر مربع، در موقعیت ۴۹ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است. بند انحرافی رامهرمز که در بالادست شبکه آبیاری رامهرمز قرار دارد در موقعیت ۴۹ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. شبکه آبیاری اراضی رامهرمز به صورت ثقلی و با استفاده از سد انحرافی رامهرمز که در حدود ۴ کیلومتری پایین‌دست روستای چم لیشان و حدود ۲۲ کیلومتری پائین دست سد مخزنی جره قرار دارد، تأمین آب می‌گردد. رودخانه زرد از دامنه‌های شرقی سفیدکوه و کوه منگشت سرچشمه می‌گیرد و در انتها به خلیج فارس می‌ریزد. این رودخانه در پایین‌دست سد جره با پیوستن به رودخانه اعلا تشکیل رودخانه الله را داده و در نهایت پس از تلاقی آن با رودخانه مارون به‌نام رودخانه جراحی ادامه مسیر می‌دهد. شکل ۱ پیکربندی سیستم منابع آب و انحراف و محل مصرف را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]



شکل ۱. پیکربندی شماتیک سیستم منابع و مصارف محدوده طرح
Fig. 1. Schematic configuration of the system of resources and uses of the scope of the project

سطح اراضی کشاورزی رامهرمز که در پایین دست سد جره واقع گردیده است ۲۱۴۰۰ هکتار می‌باشد و با در نظر گرفتن توزیع نیاز ناخالص واحد سطح اراضی تحت کشت دشت رامهرمز، مقادیر نیازهای آبی کشاورزی ماهانه و سالانه این اراضی مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. مقادیر نیازهای آبی کشاورزی اراضی رامهرمز بصورت ماهانه و سالانه - میلیون متر مکعب (ماه‌ها براساس تقویم فارسی است)
Table 1. Amounts of agricultural water needs of Ramhormoz lands monthly and annually - million cubic meters (the months are based on the Persian calendar)

Meh	Aba	Aza	Day	Bah	Esf	Far	Ord	Kho	Tir	Mor	Sha	Annual
15.45	8.43	12.65	2.10	6.72	29.57	43.53	46.59	42.74	35.89	27.48	23.01	294.16

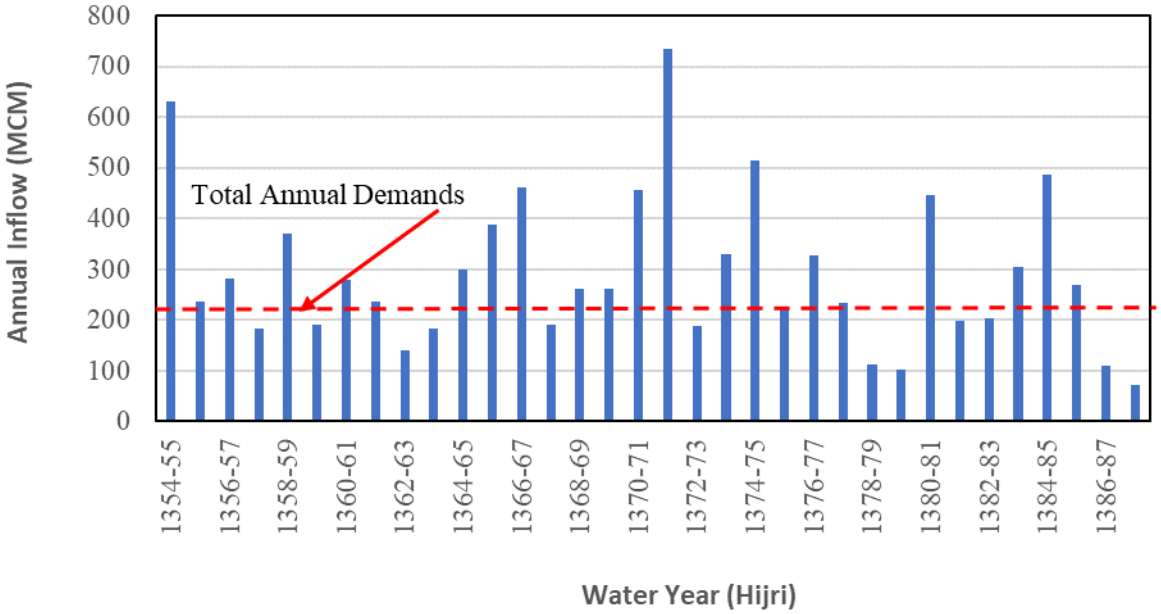
مشخصات سد مخزنی جره در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات سد جره
Table 2. Specifications of Jareh Dam

Useful Volume	Reservoir Total Volume	Dead Storage Level	Normal Water Level
Million Cubic Meter		meters above mean sea level	
30.73	236.06	453.3	502

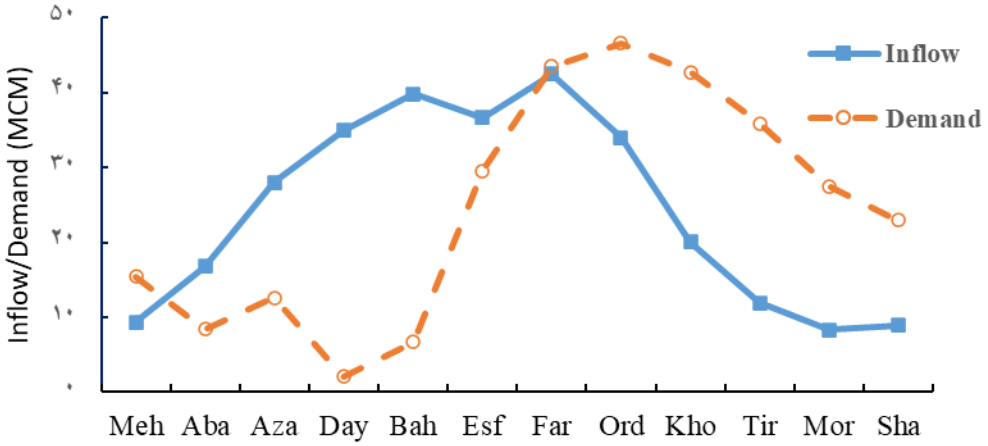
آمار آبدهی‌های ورودی به سیستم که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، مربوط به یک دوره ۳۴ ساله از سال آبی ۵۵-۱۳۵۴ تا سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ است. مقادیر آبدهی‌های سالانه در محل سد جره در دوره مورد نظر و مجموع نیازهای سالانه بر حسب میلیون متر مکعب (million cubic meters (MCM)) در شکل ۲ و آبدهی ورودی و نیاز کشاورزی متوسط ماهانه سد جره در شکل ۳ آمده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]



شکل ۲. آبدهی‌های سالانه ورودی به سد جره (محور افقی سال آبی بر حسب تقویم هجری شمسی و محور عمودی آبدهی سالانه بر حسب میلیون متر مکعب است)

Fig. 2. The annual inflows to Jareh Dam (the horizontal axis is the water year in solar Hijri calendar and the vertical axis is the annual inflow in million cubic meters)



شکل ۳. آبدهی ورودی و نیاز کشاورزی متوسط ماهانه سد جره (محور افقی، ماه‌های سال آبی بر حسب تقوم هجری شمسی است و محور عمودی، حجم ورودی و نیاز ماهانه بر حسب میلیون متر مکعب است)

Fig. 3. Inflow and average monthly agricultural demand of Jarreh dam (the horizontal axis is the months of the water year according to the Hijri solar calendar, and the vertical axis is the monthly inflow and demand in million cubic meters)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

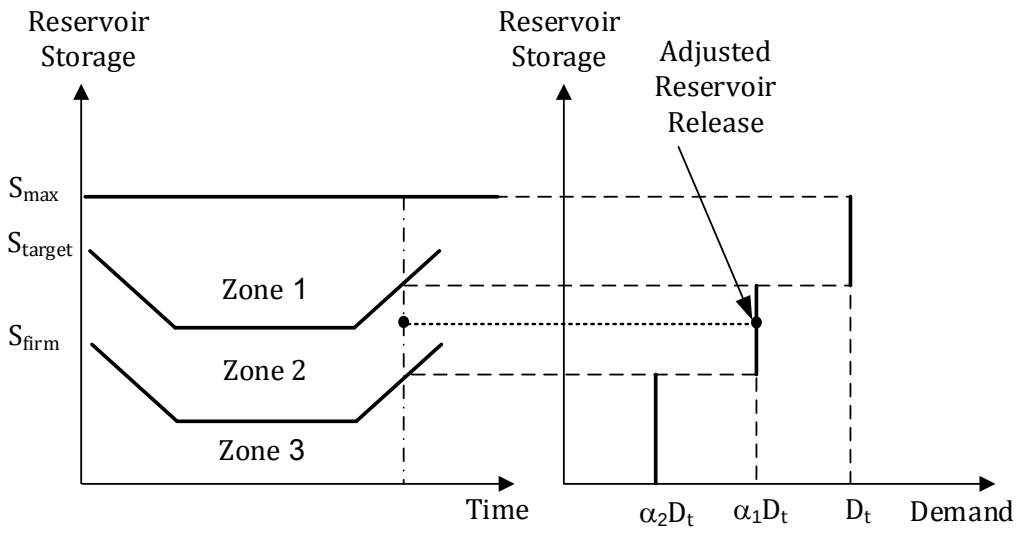
معرفی ساختار و مفاهیم قاعده جیره‌بندی

در خشکی‌های شدیدتر از خشکی طرح، عموماً مخازن در رهاسازی دبی مطمئن خود موفق عمل نمی‌کنند. در چنین وضعیتی، مدیران مسئول سیستم آبیاری و آبرسانی، کمبودهای متناوب اما کوچک را بر کمبودهای منفردِ شدید ترجیح می‌دهند. به‌عنوان مثال اعمال کمبودهای ناچیز در ماه‌های کشاورزی ممکن است تأثیر چندانی بر عملکرد محصول نگذارد اما در صورت وقوع کمبودهای شدید در یک ماه، به احتمال بسیار زیاد کل محصول از بین خواهد رفت. بنابر دلایل مذکور، اعمال محدودیت-های آبیاری و جیره‌بندی جهت کاهش موقت سطح نیاز و حفظ ذخیره برای دوره‌های آتی، یک روش معمول است. بدین‌ترتیب در طول دوره‌های مشرف به خشکی حتی اگر نیاز را بتوان از ذخیره فعلی و ورودی جاری به مخزن تأمین نمود، پیشنهاد کاهش نیاز مطرح است. چنین کاهشی مانع از کمبودهای بزرگتر در دوره‌های بعدی می‌شود. برای شروع جیره‌بندیِ خروجی از مخزن، یک حجم آستانه معرفی می‌شود که این حجم برای کلیه ماه‌های نیاز تعریف می‌گردد. زمانی که حاصل جمع ذخیره مخزن در ابتدای هر ماه و ورودی به مخزن در آن ماه کمتر از این حجم آستانه باشد، سیاست جیره‌بندی آغاز می‌شود و تابع هدف اصلی مدل مذکور، حداقل‌کردن میزان خسارات ناشی از کمبود در دوره بهره‌برداری است.

همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، حجم‌های آستانه برای شروع جیره‌بندی ممکن است در هر ماه یا در هر فصل متفاوت باشند که این منحنی‌ها راهنمایی برای بهره‌برداران و مدیران آب می‌باشند. موقعیت قرارگیری این حجم‌های آستانه در هر ماه وابسته به هیدرولوژی جریان ورودی و میزان آب ذخیره شده در اثر کاهش و جیره‌بندی نیازها است. در تحقیق حاضر از یک مدل جیره‌بندی جهت مدیریت رهاسازی آب در دوره‌های مشرف به خشکسالی جهت جلوگیری از کمبودهای آتی شدید استفاده شده است. در این مدل از دو منحنی فرمان بالا و پایین و دو ضریب جیره‌بندی α_1 و α_2 برای هر کدام از این منحنی‌ها استفاده است ($\alpha_2 < \alpha_1 < 1$). مطابق این مدل، هرگاه در ماه t (۱۲، ...،۲، ۱) درون سال مجموع حجم آب در مخزن و ورودی پیش‌بینی شده به مخزن در همان ماه بالاتر از منحنی فرمان بالا (منطقه ۱) قرار گیرد، تمام نیاز آن ماه (D_t) تأمین می‌شود؛ در صورتی که مجموع فوق بین منحنی فرمان بالا و پایین (منطقه ۲) قرار گیرد مقدار $\alpha_1 \times D_t$ رهاسازی می‌شود؛ و در صورتی که مجموع حجم آب در مخزن و ورودی پیش‌بینی شده به مخزن پایین‌تر از منحنی فرمان پایین (منطقه ۳) قرار گیرد، مقدار $\alpha_2 \times D_t$ رهاسازی خواهد شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]



شکل ۴. منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن با رویه جیره‌بندی گسسته (محور عمودی، مجموع حجم ذخیره و جریان ورودی ماهانه می‌باشد که تحت عنوان ذخیره‌ی در دسترس شناخته می‌شود)

Fig. 4. Discrete rationing reservoir operating rule curve (the vertical axis is the sum of the storage volume and the monthly inflow, which is known as reservoir storage)

خشکسالی و تعیین شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (Streamflow Drought Index (SDI))

خشکسالی به‌عنوان یکی از بی‌سروصداترین بلایای طبیعی، در مقابل سیلاب، به‌عنوان یکی از واضح ترین بلایای طبیعی قرار گرفته است. این در حالی است که خطر و خسارت‌های ناشی از خشکسالی به‌مراتب بیشتر از سایر بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان، آتش‌فشان و حتی زلزله است. ولی به‌دلیل اینکه مشاهده تأثیر تخریبی خشکسالی نیاز به زمانی نسبتاً طولانی دارد، مطالعه و تحقیق و نحوه برخورد با آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین مشکلاتی که بشر به‌خصوص در سال‌های اخیر با آن مواجه شده است، همین بحران آب و وقوع خشکسالی است و به‌همین دلیل بررسی وضعیت خشکسالی در مدیریت بهینه منابع آب اهمیت خیلی زیادی دارد.

کشور ایران به‌دلیل کم بودن ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن، در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد و به‌شدت از این بابت ضربه‌پذیر است. در سال‌های اخیر بنا به عللی که غالباً مربوط به تغییرات جهانی اقلیم هستند، ناهنجاری‌های بارش در نواحی مختلف کشورمان نیز فزونی یافته است. در استان خوزستان به‌دلیل دمای بالا و ارتفاع کم از سطح دریا (به‌دلیل جلگه‌ای بودن استان و نزدیکی آن به خلیج فارس)، میزان بارندگی در مقایسه با سایر استان‌های کشور کم بوده و مقدار آن به‌مراتب از متوسط مقدار بارندگی کشور، کمتر است. به این دلیل، مطالعات خشکسالی در این استان بسیار ضروری است.

در تحقیق حاضر، رژیم جریان طبیعی در محل سد جره بررسی شده و شاخص خشکسالی آن در دوره‌های مختلف زمانی بررسی شده است و همچنین اثرات بهره‌برداری از سد برای دو سیاست بهره‌برداری استاندارد (Standard Operation Policy (SOP)) و جیره‌بندی (Hedging) بر وضعیت خشکسالی پایین‌دست سد جره بررسی شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

اگر یک سری زمانی از احجام ماهانه جریان $Q_{i,j}$ موجود باشد که در آن i نمایانگر سال آبی و j ماه درون سال آبی است (۱ = j برای مهر و ۱۲ = j برای شهریور)، $V_{i,k}$ از رابطه زیر بدست می‌آید (Nalbantis, 2008) :

$$V_{I,k} = \sum_{j=3(k-1)+1}^{3k} Q_{I,j} \qquad i = 1, 2, \ldots \qquad k = 1, 2, 3, 4 \tag{۱}$$

$$V_{I,k} = \sum_{j=6(k-1)+1}^{6k} Q_{I,j} \qquad i = 1, 2, \ldots \qquad k = 1, 2 \tag{۲}$$

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{12} Q_{i,j} \qquad i = 1, 2, \ldots \tag{۳}$$

که در این روابط، $V_{i,k}$ حجم آبدهی تجمعی در دوره مرجع k ام از سال آبی i ام برای دوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه است. سپس شاخص SDI از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{S_k} \qquad i = 1, 2, \ldots \qquad k = 1, 2, 3, 4 \tag{۴}$$

در این رابطه $\overline{V_k}$ و S_k به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر $V_{i,k}$ می‌باشند.

تابع هدف

در سیستم‌های تأمین آب غالباً هدف بهره‌برداری، حداقل سازی خسارت ناشی از پایین آمدن توانایی سیستم در تأمین کل نیازها است. اما به دلیل مشکل بودن تخمین خسارت ناشی از کمبودهایی که هنوز مشاهده نشده‌اند، عموماً سایر اهدافی که اندازه‌گیری آنها ساده‌تر می‌باشد، از جمله حداقل سازی حداکثر کمبود مورد انتظار، توزیع و یکنواخت نمودن کمبودها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای حداقل کردن میزان و توزیع کمبود در نیازهای مصرفی می‌توان شاخص کمبود اصلاح شده‌ی سو و چنگ را به‌کار برد که در آن جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی لحاظ شده است و توسط سایر محققین از جمله چانگ و چن مورد استفاده قرار گرفته است (Chang et al., 2005; Hsu and Cheng, 2002):

$$MSI = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{TS_t}{TD_t}\right)^2 \tag{۵}$$

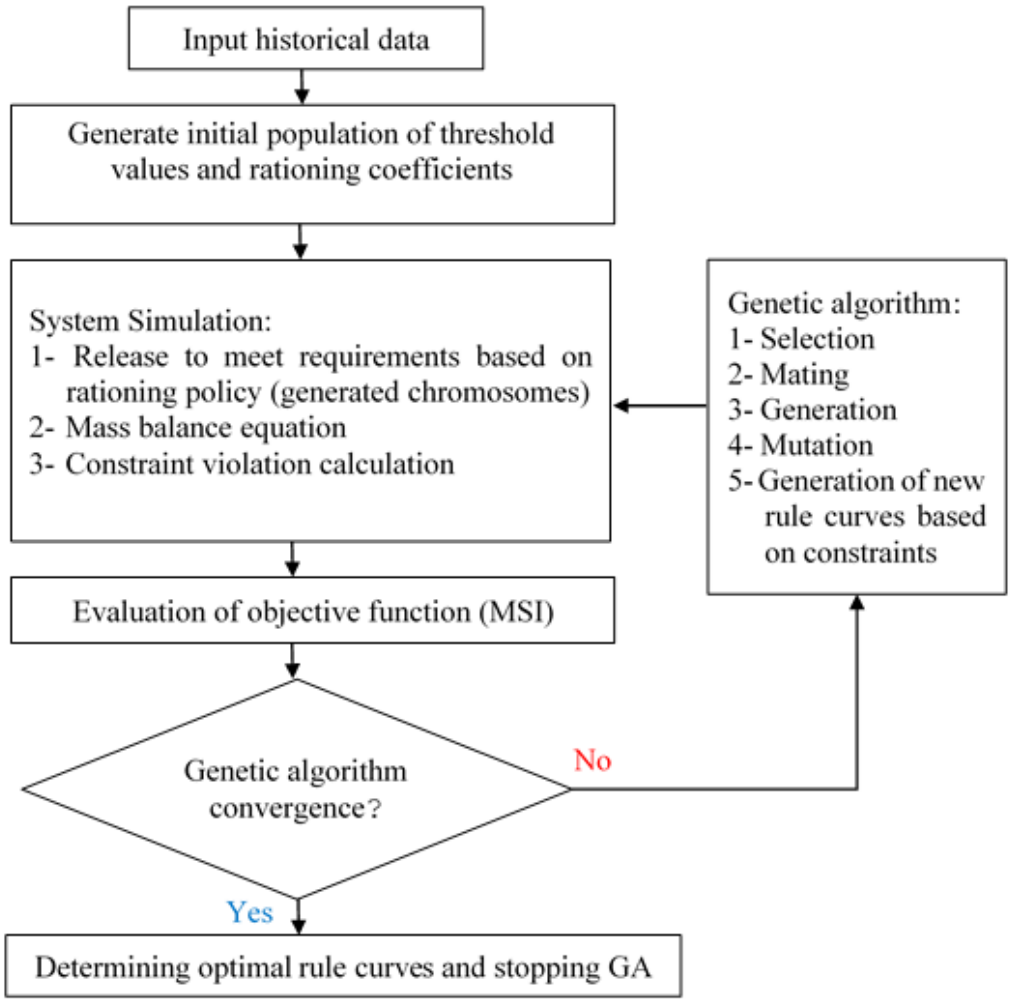
که در آن TS_t میزان کل کمبود در دوره زمانی t ، TD_t میزان کل نیاز در دوره t ، n تعداد کل دوره‌های زمانی (ماه) و MSI شاخص اصلاح شده کمبود (Modified Shortage Index) است. وجود توان دو در این رابطه باعث می‌شود جریمه بالاتری به کمبودهای شدیدتر تعلق گرفته و توزیع کمبودها بهتر صورت گیرد. از طرفی با قرار دادن میزان کل نیاز هر دوره در مخرج کسر، مدل به دنبال حداقل کردن کمبودهای نسبی است نه کمبود مطلق؛ بعبارت دیگر مقدار مطلق کمبود در یک ماه با همان کمبود در ماه دیگر دارای یک جریمه برابر نیست بلکه جریمه دوره‌ای بیشتر است که نیاز کمتری دارد.

تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

هدف از تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در این تحقیق، تعیین مقادیر بهینه سطوح آستانه مخزن (منحنی‌های فرمان بهره‌برداری) برای شروع جیره‌بندی در هر ماه و ضرایب مربوط به جیره‌بندی نیازها ($\alpha_۲$ و $\alpha_۱$) است. بدین منظور یک الگوریتم ژنتیک به یک مدل شبیه‌ساز متصل گردیده است. الگوریتم ژنتیک، یک رشته یا مجموعه‌ای از کروموزوم‌های مصنوعی شامل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

مقادیر ماهانه منحنی‌های فرمان (۲۴ متغیر) و ضرایب جیره‌بندی (۲ متغیر) را به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی تولید می‌کند. سپس شبیه‌سازی سیستم با فراخوانی مدل شبیه‌ساز برای نمایش عملکرد سیستم با آن مجموعه از کروموزوم‌ها، تشکیل می‌شود و میزان رهاسازی از مخزن بر اساس این کروموزوم‌ها که همان منحنی‌های فرمان و ضرایب جیره‌بندی هستند و همچنین با منظور کردن سایر معادلات از قبیل محاسبات تبخیر از سطح مخزن و بیلان جرمی و رعایت سایر محدودیت‌های مسأله محاسبه شده و بر این اساس با محاسبه مقدار تابع هدف به ازای هر کروموزوم، این مقادیر به مدل بهینه‌ساز جهت ادامه فرآیند بهینه‌سازی برگردانده می‌شود. در ادامه طی یک فرآیند تکامل تدریجی با اعمال عملگرهای تزویج و جهش و با تولید کروموزوم‌های بهتر، راه حل بهینه و نسل برتر تولید خواهد شد (Goldberg, 1989; Michalewicz, 1996). شکل ۵ طرح شماتیک تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. برنامه‌نویسی مذکور توسط نویسندگان و در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.



شکل ۵. الگوریتم کلی تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

Fig. 5. The general algorithm of combining the simulation and optimization model

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

ارزیابی عملکرد سیاست‌های بهره‌برداری

در این تحقیق چهار شاخص عملکردی اعتمادپذیری زمانی (Time-based Reliability)، اعتمادپذیری حجمی (Volume-based Reliability)، آسیب‌پذیری (Vulnerability) و برگشت‌پذیری (Resiliency) برای ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری مخزن به‌کار رفته‌اند. شرح شاخص‌های مورد مطالعه به صورت زیر است (McMahon and Adeloye, 2005; Sandoval-Soils et al., 2011):

- اعتمادپذیری:

$$Re_t = \frac{N_s}{N} \quad (۶)$$

$$Re_v = \frac{\sum_{t=1}^{N} I_t}{\sum_{t=1}^{N} D_t} \quad (۷)$$

که N تعداد کل ماه‌های دوره شبیه‌سازی، N_s تعداد ماه‌هایی که در آن‌ها تمام نیاز D_t تأمین شده است، I_t حجم آب رهاسازی شده، Re_t شاخص اعتمادپذیری زمانی و Re_v شاخص اعتمادپذیری حجمی است.

- برگشت‌پذیری :

$$\varphi = \frac{F_s}{F_d} \qquad 0 < \varphi \leq 1 \quad (۸)$$

که در این رابطه φ برگشت‌پذیری، F_s تعداد دوره‌های پیوسته شکست یا به‌عبارتی عدم تأمین کل نیاز و F_d مجموع دوره‌های شکست ($F_d = N-N_s$) است.

- آسیب‌پذیری :

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^{F_d}\left[\frac{D_t - I_t}{D_t}\right]}{F_d} \qquad t \in F_d \quad (۹)$$

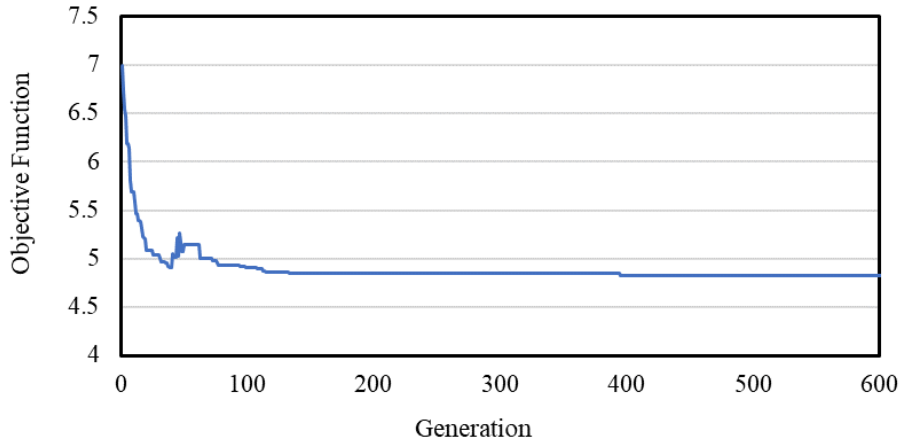
در این رابطه η معرف آسیب‌پذیری است و سایر پارامترها در روابط ۷ و ۸ تعریف شده‌اند.

نتایج و بحث

تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله حاضر، شامل ۲۴ مختصات (۱۲ عدد ماهانه برای هر منحنی فرمان) و دو ضریب جیره‌بندی برای نیازهای کشاورزی و در مجموع ۲۶ متغیر می‌باشد. عملگرهای الگوریتم ژنتیک که در بهینه‌سازی این سیستم درنظر گرفته شده، از این قرار بوده‌اند : اندازه جمعیت ۱۵۶ (حدود اندازه جمعیت معمولاً بین ۴ تا ۸ برابر تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری منظور می‌شود که در این تحقیق، ۶ برابر انتخاب شده است)، احتمال تزویج ۰/۵ (در هر تکرار الگوریتم ژنتیک ۵۰ درصد جمعیت حذف شده است) و احتمال جهش ۰/۰۱۵ (در هر تکرار ۱/۵ درصد ژن‌های جمعیت فرزندان دچار جهش می‌شود). چون در این تحقیق از روش BLX-α برای مخلوط کردن (Blending) و تولید نسل جدید استفاده شده است، مقدار α معادل ۰/۵ در نظر گرفته شده است. به‌منظور اخذ جزئیات این عملگرها می‌توان به منابع مربوطه مراجعه نمود (Haupt and Haupt, 2004). پس از انجام تنظیمات یاد شده، فرآیند تکامل در الگوریتم ژنتیک با فراخوانی مدل شبیه‌ساز

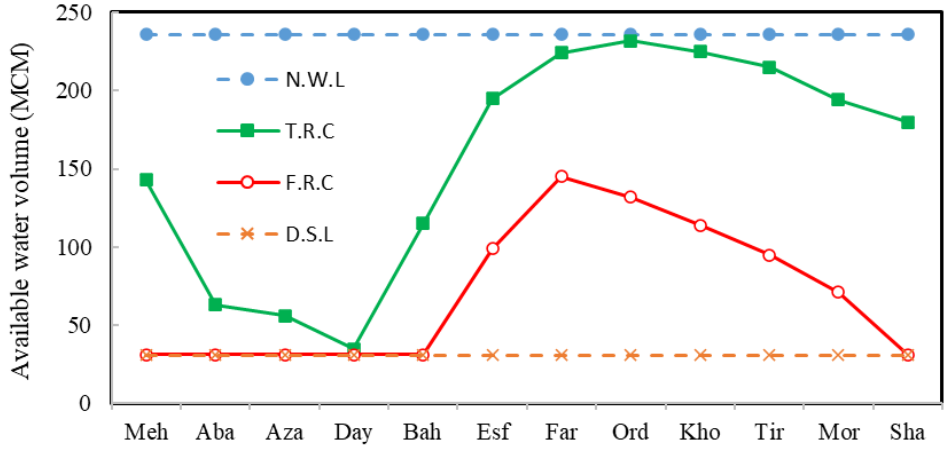
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

آغاز شده و بر این اساس، روند همگرایی مطابق شکل ۶ دنبال شد. در نهایت مقادیر آستانه جیره‌بندی مطابق شکل ۷ محاسبه گردید.



شکل ۶. روند تکامل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

Fig. 6. Evolution process of genetic algorithm optimization



شکل ۷. منحنی فرمان بهره برداری سد جره با سیاست جیره بندی دوگانه (محور افقی، ماه‌های سال آبی بر حسب تقوم هجری شمسی و محور عمودی حجم آب موجود بر حسب میلیون متر مکعب است)

Fig. 7. Operating rule curve of Jarreh dam with dual rationing policy (the horizontal axis is the months of the water year according to the Hijri solar calendar and the vertical axis is available water volume in million cubic meters)

همانگونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، مقادیر منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سد جره، حجم مخزن را به سه قسمت تقسیم کرده است. هر گاه میزان آب در دسترس (مجموع حجم مخزن سد در ابتدای هر ماه و مقدار ورودی پیش‌بینی شده به مخزن در همان ماه) ماهانه بالاتر از منحنی بالا باشد، کل نیاز ماهانه تأمین می‌گردد و اگر بین منحنی بالا و پایین قرار گیرد جیره‌بندی خفیف و درصورتی که پایین‌تر از منحنی پایین قرار گیرد جیره‌بندی شدید آغاز می‌شود. بر اساس محاسبات انجام شده توسط مدل شبیه‌ساز – بهینه‌ساز، ضرایب جیره‌بندی α_1 و α_2 به ترتیب برابر با ۰/۸۲ و ۰/۵ برآورد گردیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

پس از اجرای مدل و تعیین منحنی‌های فرمان بهینه بهره‌برداری، مقدار تابع هدف (MSI) بهینه بدست آمده در وضعیت جیره‌بندی با مقادیر متناظر در شرایط بهره‌برداری استاندارد (SOP) مقایسه گردید. سیاست بهره‌برداری استاندار به‌عنوان یک روش مبنا برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب مطرح است. لذا در این تحقیق شبیه‌سازی سیستم منابع آب سد جره با این سیاست بهره‌برداری نیز انجام گرفته است تا به‌عنوان یک معیار و مبنای مقایسه جهت بررسی کارایی و قابلیت‌های روش جیره‌بندی به‌کار رود. طبق این سیاست در هر شرایطی می‌توان از کل آب موجود در مخزن تا حد رقوم حداقل بهره‌برداری برای تأمین نیازها بهره جست و هیچ رویکردی برای حفظ ذخیره مخزن با تعدیل یا کسر نیاز وجود ندارد. لذا با استفاده از این سیاست بهره‌برداری، کمبود درازمدت نیازها در سیستم به حداقل می‌رسد اما بر روی شدت کمبودها کنترلی وجود ندارد. پس از تعیین نتایج استفاده از روش بهره‌برداری استاندارد و قاعده جیره‌بندی و محاسبه مقادیر تابع هدف، نتایج عملکرد این سیاست‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مقایسه عملکرد دو سیاست بهره‌برداری استاندارد و جیره‌بندی در شرایط فعلی

Table 3. Performance Comparison of SOP and Hedging Policy Under Current Conditions

Objective Function (MSI)	Operation Policy	Time Period (Water year)
8.24	SOP	1354-55 to 1387-88
4.83	Hedging	

همانطور که ملاحظه می‌گردد، با اجرای سیات جیره‌بندی، مقدار تابع هدف (شاخص اصلاح شده کمبود) در شرایط فعلی بیش از ۴۰ درصد کاهش یافته است (یعنی از ۸/۲۴ به ۴/۸۳ رسیده است) که نشان‌دهنده کارایی روش مورد استفاده در کنترل و تسکین کمبودهای شدید در کل دوره آماری مورد استفاده است.

علاوه بر محاسبات فوق، شاخص خشکسالی در محل سد و در پایین دست سد در دو وضعیت استفاده از روش استاندارد بهره‌برداری و قاعده جیره‌بندی در شرایط فعلی محاسبه شده و وضعیت خشکسالی در اثر بهره‌برداری‌های مختلف با وضعیت طبیعی در محل سد در شرایط فعلی بررسی شده و نتایج آن در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. این مقایسه براساس طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی (جدول ۴) صورت گرفته است.

جدول ۴. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی (نالبانتیس و تساکریس، ۲۰۰۹)

Table 4. Classification of drought state (Nalbantis and Tsakiris, 2009)

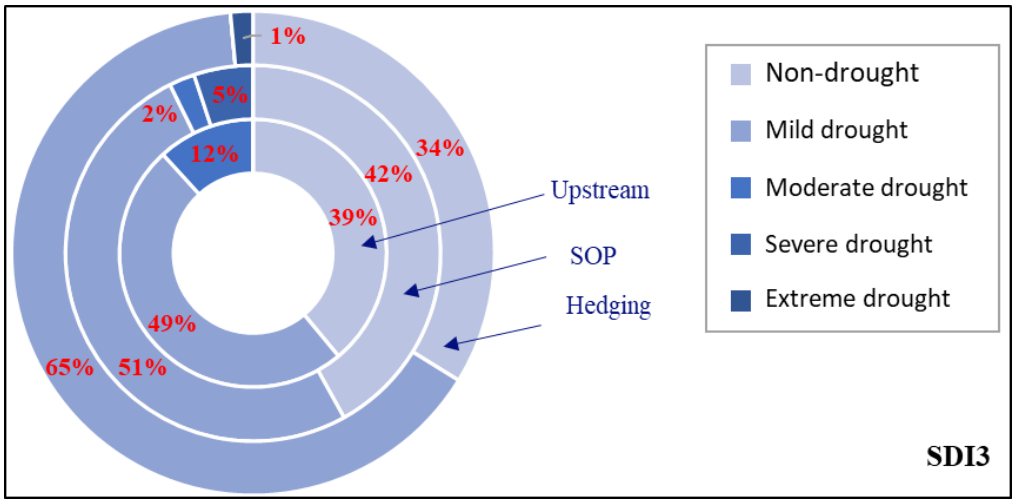
Description	Criterion
Non-drought	$\mathrm{SDI} \geq 0$
Mild drought	$-1 \leq \mathrm{SDI} < 0$
Moderate drought	$-1.5 \leq \mathrm{SDI} < -1$
Severe drought	$-2 \leq \mathrm{SDI} < -1.5$
Extreme drought	$\mathrm{SDI} < -2$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

تأثیر سیاست‌های مختلف بهره‌برداری بر شاخص خشکسالی ۳ ماهه جریان و مقایسه با جریان بالادست

در این قسمت، تأثیر بهره‌برداری از مخزن با دو سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی (Hedging) بر شاخص خشکسالی جریان سه ماهه (SDI3) پایین‌دست مطالعه شده و نتایج آن با مقادیر نظیر جریان طبیعی بالادست مخزن (Upstream) مقایسه شده است. بدین منظور برای بررسی SDI3 بالادست از نقطه کنترل خشکسالی شماره ۱ در بالادست سد جره و برای بررسی SDI3 پایین دست از نقطه شماره ۲ در محل برگشت آب کشاورزی شبکه آبیاری رامهرمز به رودخانه الله استفاده شده است (شکل ۱). شاخص خشکسالی SDI3 پایین‌دست سد جره در شکل ۸ نشان می‌دهد که با اِعمال سیاست جیره‌بندی نسبت به SOP، تعداد خشکسالی‌ها بیشتر شده است. استفاده از سیاست جیره‌بندی باعث کاهش تعداد دوره‌های بدون خشکسالی از ۴۲٪ به ۳۴٪ گردیده است. گرچه نتایج معرف افزایش تعداد خشکسالی‌ها است اما درواقع در این حالت تعداد خشکسالی‌های خفیف افزایش یافته و تعداد خشکسالی‌های متوسط و شدید کاهش یافته است. مجموع خشکسالی‌های متوسط و شدید از ۷٪ (مجموع ۲ و ۵ درصد در شکل ۸) به ۱٪ کاهش یافته است. همچنین مقایسه نتایج SDI3 پایین دست سد جره ناشی از اجرای سیاست جیره‌بندی با وضعیت خشکسالی بالادست سد، نشان می‌دهد که تعداد خشکسالی‌ها بیشتر شده است. سیاست جیره‌بندی باعث افزایش تعداد خشکسالی از ۶۱٪ (مجموع ۴۹ و ۱۲ درصد در شکل ۸) به ۶۶٪ (مجموع ۶۵ و ۱) شده است. در این حالت نیز تعداد خشکسالی‌های خفیف افزایش یافته و تعداد خشکسالی‌های متوسط و شدید کاهش یافته است. مجموع خشکسالی‌های متوسط و شدید از ۱۲٪ به ۱٪ کاهش یافته است (شکل ۸).



شکل ۸. شاخص ۳ ماهه خشکسالی جریان (SDI3) برای جریان بالادست (Upstream)، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی (Hedging)

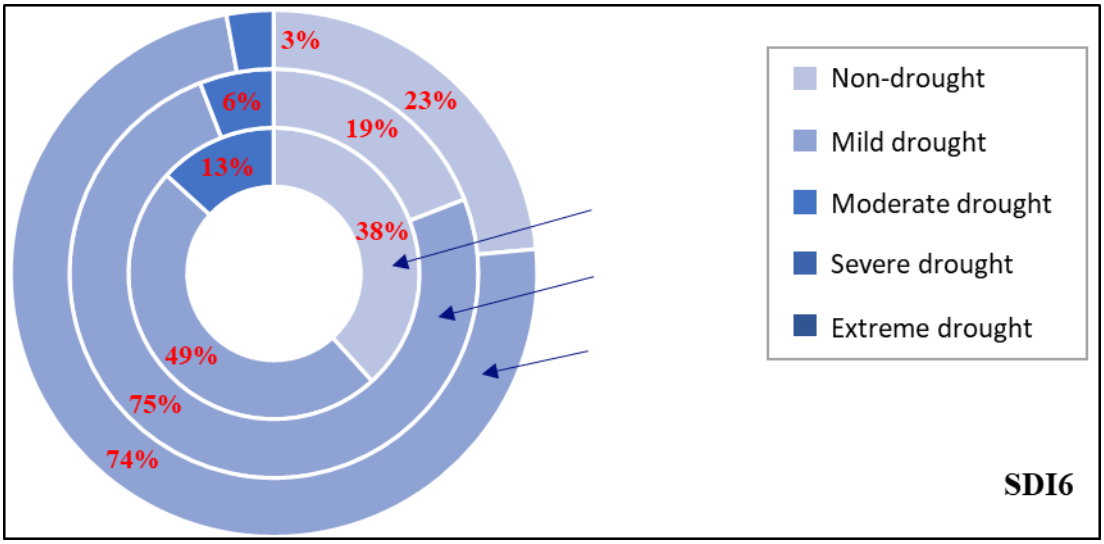
Fig. 8. The 3-month streamflow drought index (SDI3) for upstream, standard operating policy (SOP) and Hedging

تأثیر سیاست‌های مختلف بهره‌برداری بر شاخص خشکسالی ۶ ماهه جریان و مقایسه با جریان بالادست

شاخص خشکسالی SDI6 پایین‌دست سد جره در شکل ۹ نشان می‌دهد که با اِعمال سیاست جیره‌بندی نسبت به SOP، تعداد خشکسالی‌ها کاهش پیدا کرده است. اعمال سیاست جیره‌بندی، تعداد دوره‌های بدون خشکسالی را از ۱۹٪ به ۲۳٪

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

افزایش داده است. در این حالت تعداد خشکسالی‌های خفیف مشابه بوده اما خشکسالی‌های متوسط از ۶٪ به ۳٪ کاهش یافته است. با مقایسه نتایج SDI6 پایین دست سد جره ناشی از اجرای سیاست جیره‌بندی با وضعیت خشکسالی بالادست سد، مشخص می‌شود که تعداد خشکسالی‌ها بیشتر شده است. سیاست جیره‌بندی باعث افزایش تعداد خشکسالی از ۶۲٪ (مجموع ۴۹ و ۱۳ درصد) به ۷۷٪ (مجموع ۷۴ و ۳ در شکل ۹) شده است. در این حالت نیز تعداد خشکسالی‌های خفیف افزایش یافته و تعداد خشکسالی‌های متوسط از ۱۳٪ به ۳٪ کاهش یافته است (شکل ۹). در هر دو سیاست بهره‌برداری و جریان طبیعی بالادست، خشکسالی با درجه بالاتر از متوسط مشاهده نشده است.



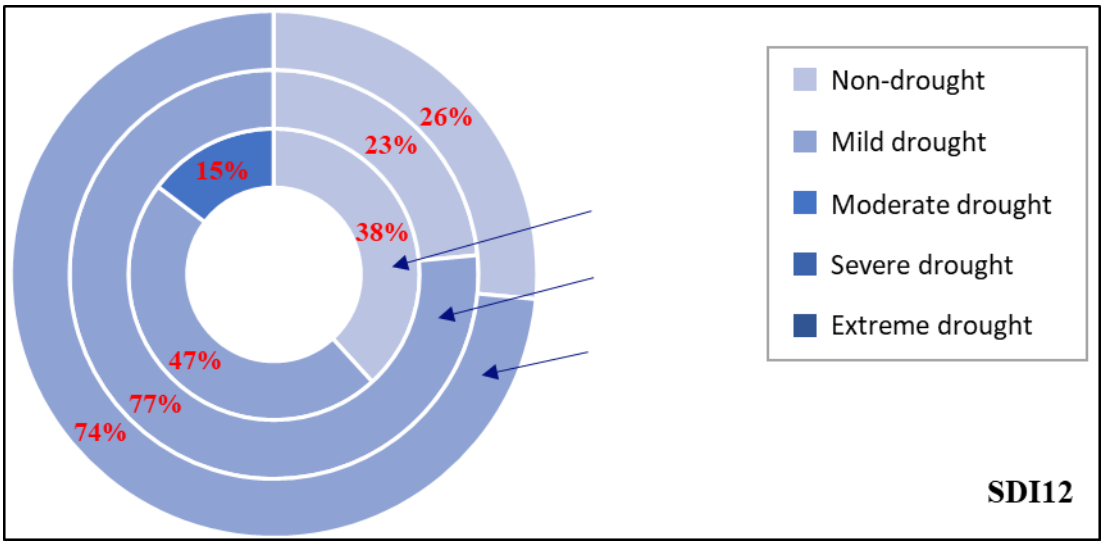
شکل ۹. شاخص ۶ ماهه خشکسالی جریان (SDI6) برای جریان بالادست (Upstream)، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی (Hedging)

Fig. 9. The 6-month streamflow drought index (SDI6) for upstream, standard operating policy (SOP) and Hedging

تأثیر سیاست‌های مختلف بهره‌برداری بر شاخص خشکسالی ۱۲ ماهه جریان و مقایسه با جریان بالادست

با ملاحظه شکل ۱۰ مشخص می‌شود که شاخص خشکسالی SDI12 پایین‌دست با اِعمال سیاست جیره‌بندی نسبت به SOP، تعداد خشکسالی‌ها از ۲۳٪ به ۲۶٪ کاهش پیدا کرده است. در این حالت تعداد خشکسالی‌های خفیف تقریبا مشابه بوده و در هر دو سیاست، خشکسالی با درجه بالاتر از خفیف مشاهده نشده است. همچنین نتایج SDI12 نشان می‌دهد که اعمال سیاست جیره‌بندی، باعث افزایش تعداد دوره‌های خشکسالی پایین دست سد جره در مقایسه با وضعیت خشکسالی بالادست سد شده است. به‌طوری که تعداد خشکسالی از ۶۲٪ (مجموع ۴۷ و ۱۵ درصد در شکل ۱۰) به ۷۴٪ افزایش پیدا کرده است. در این حالت با اعمال سیاست جیره‌بندی، تعداد خشکسالی‌های خفیف افزایش یافته و خشکسالی‌های متوسط نیز از ۱۵٪ به صفر رسیده است. همچنین نتایج معرف آن است که در هر دو وضعیت، خشکسالی با درجه بالاتر از متوسط مشاهده نشده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]



شکل ۱۰. شاخص ۱۲ ماهه خشکسالی جریان (SDI12) برای جریان بالادست (Upstream)، سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی (Hedging)

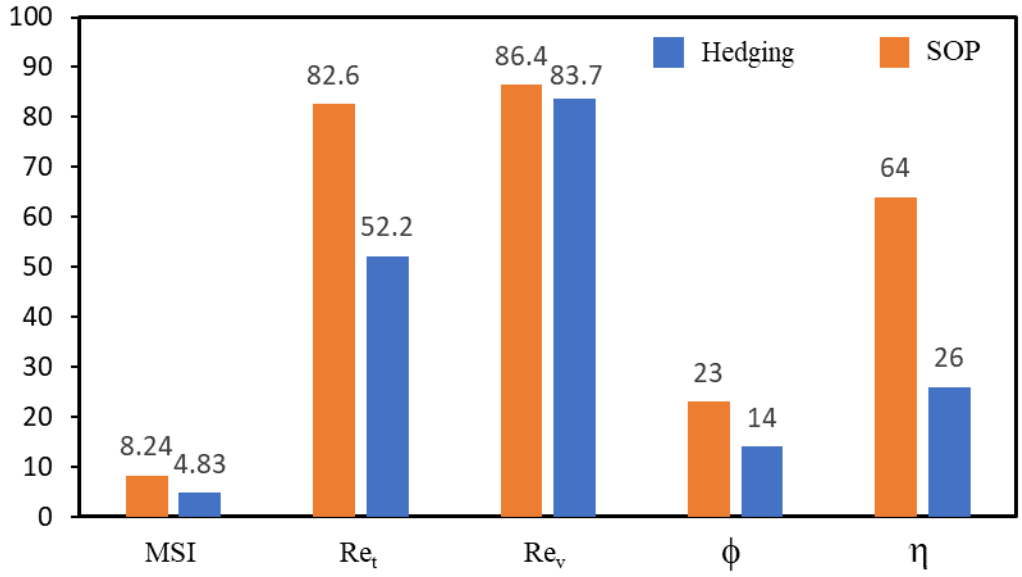
Fig. 9. The 12-month streamflow drought index (SDI12) for upstream, standard operating policy (SOP) and Hedging

شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم

کارایی سیستم با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل، MSI معرف تابع هدف، Re_t نشان دهنده شاخص اعتمادپذیری زمانی، Re_v بیانگر اعتمادپذیری حجمی، ϕ شاخص برگشت‌پذیری و η آسیب‌پذیری سیستم است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با اجرای سیاست جیره-بندی، مقدار تابع هدف (MSI) نسبت به روش SOP از ۸/۲۴ به ۴/۸۳ رسیده و حدوداً ۴۱ درصد کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده کارایی روش مورد استفاده در کنترل و تسکین کمبودهای شدید در کل دوره آماری مورد استفاده است. مقایسه نتایج سیاست جیره‌بندی و SOP نشان می‌دهد که اعتمادپذیری حجمی در هر دو روش، مشابه است ولی اعتمادپذیری زمانی در روش جیره‌بندی کمتر از روش SOP است و از ۸۲/۶ به ۵۲/۲ رسیده است. البته این نتیجه به‌دلیل طبیعت روش SOP قابل انتظار است. براساس شکل ۱۱، با استفاده از سیاست جیره‌بندی، آسیب‌پذیری سیستم منابع آب سد جره به‌طور قابل توجهی نسبت به روش SOP بهبود خواهد یافت؛ به‌طوری که از ۶۴ به ۲۶ درصد کاهش یافته است. این نتایج، مزیت استفاده از جیره‌بندی در ماه‌های عادی (بدون کمبود) برای تعدیل شدت‌های خشکسالی در ماه‌های دارای کمبود را نشان می‌دهد. با اعمال سیاست جیره‌بندی، برگشت‌پذیری سیستم در مقایسه با روش SOP کاهش یافته و از ۲۳ به ۱۴ درصد رسیده است. دلیل این امر آن است که در شرایط جیره‌بندی، شدت کمبودها کاهش پیدا می‌کند اما طول دوره‌های کمبود پیوسته افزایش خواهد یافت.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]



شکل ۱۱. مقایسه شاخص‌های عملکردی سیستم سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره‌بندی (Hedging)
Fig. 11. Comparison of system performance indicators under standard operating policy (SOP) and hedging

نتیجه گیری

به‌علت افزایش تدریجی دمای زمین در چند دهه اخیر تغییرات اقلیمی قابل توجهی در اکثر مناطق دنیا اتفاق افتاده و خشکسالی‌های ناشی از کمبود بارش و افزایش مصرف آب در سراسر جهان در حال افزایش است. کاهش تدریجی بارش و خشکسالی و تغییر اقلیم، اثرات نامطلوب اقتصادی و زیست‌محیطی و اجتماعی متعددی را باعث شده است. برای کاهش این اثرات نامطلوب نیازمند مطالعه دقیق‌تر و مدیریت بهینه‌ی منابع آب هستیم. یکی از ابزراهای مدیریت، استفاده از قوانین جیره‌بندی است. در این روش‌ها با وجود امکان تأمین کل نیاز، گاهی تنها قسمتی از آن تأمین می‌شود؛ این عمل موجب ذخیره آب و پذیرش یک کمبود کوچک در بازه زمانی جاری برای کاهش کمبودهای شدید در آینده می‌شود. در ایران چنین مطالعاتی در دهه اخیر برای تهیه منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سدها رایج شده و متناسب با تغییرات آب و هوایی به‌طور مداوم به‌روز می‌شوند و در برخی از آنها اثرات تغییر اقلیم هم لحاظ می‌گردد. از آنجایی که در سد جره در استان خوزستان چنین مطالعاتی کمتر انجام شده در این پژوهش یک مطالعه موردی برای تعیین منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سد مذکور صورت گرفته است. در این مطالعه بررسی تأثیر بهره‌برداری از سد با دو سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و جیره بندی بر شاخص های خشکسالی پایین دست بدون اثر تغییر اقلیم انجام گرفته است. به این منظور از طریق اتصال یک مدل بهینه‌ساز (که با روش الگوریتم ژنتیک در محیط MATLAB نوشته شده) به یک مدل شبیه‌ساز، مقادیر بهینه منحنی‌های فرمان و ضرایب جیره‌بندی براساس داده‌های تاریخی جریان ورودی به مخزن مطالعه و کارایی این مدل در سیستم منابع آب رودخانه الله ارزیابی گردید. همچنین شاخص خشکسالی جریان (SDI)، عملکرد سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) و مدل جیره‌بندی در دوره مورد نظر (سال آبی ۵۵-۱۳۵۴ تا ۸۸-۱۳۸۷) از طریق محاسبه مقدار تابع هدف یا شاخص اصلاح شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

کمبود (MSI) و شاخص‌های اعتمادپذیری زمانی (Re_t)، اعتمادپذیری حجمی (Re_v)، شاخص برگشت‌پذیری (ϕ) و شاخص آسیب‌پذیری (η) بررسی شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل جیره‌بندی، تابع MSI نسبت به روش SOP در دوره مورد نظر ۴۱ درصد بهبود یافته است. همچنین با اجرای سیاست جیره بندی، آسیب‌پذیری سیستم نسبت به روش SOP به مراتب بهبود یافته و از ۶۴ درصد به ۲۶ درصد رسیده است.

منابع

Bayazit, M., Unal, N. E., 1990. Effects of hedging on reservoir performance. Water Resources Research, 26(4): 713-719.

Chang, F. J., Chen, L., Chang, L. C., 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. Hydrological Processes, 19(11): 2277-2289.

Dariane, A. B., Momtahen, Sh., 2009. Optimization of multi-reservoir systems operation using modified direct search genetic algorithm. Water Resources Planning and Management, 135(3): 141-148.

Draper, A. J., Lund, J. R., 2004. Optimal hedging and carry over storage value. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 130(1): 83-87.

Goldberg, D. E., 1989. Genetic algorithms in Search, optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley.

Haupt, R. L., Haupt, S. E., 2004. Practical genetic algorithms. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Hsu, N. S., Cheng, K. W., 2002. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. Water Resources Planning and Management, 128(2): 102-112.

Kangrang, A., Chaleeraktrakoon, C., 2007. Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves. American Journal of Applied Sciences, 4: 73-79.

Labadie, J. W., 2004. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review. Water Resources Planning and Management, 130(2): 93-111.

Lund, J. R., Reed, R. U., 1995. Drought water rationing and transferable rations. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 121(6): 429-437.

McMahon, T. A., Adeloye, A. J., 2005.Water Resources Yield. Water Resources Publications, Littleton, CO, USA.

Michalewicz, Z., 1996. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. Springer-Verlag, New York. Third Edition.

Nalbantis, I., 2008. Drought and streamflow. Eur Water, 23/24: 65–76.

Nalbantis, I., Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management, 23, 881-897.

Neelakantan, T. R., Pundarikanthan, N. V., 1999. Hedging rule optimization for water supply reservoirs system. Water Resources Management, 13(6): 409-426.

Neelakantan, T. R., Pundarikanthan, N. V., 2000. Neural network-based simulation-optimization model for reservoir operation. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 126(2): 57-64.

Sandoval-Soils, S., Mckinney, D. C., Loucks, D. P., 2011. Sustainability index for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE) 137 (5), 381–389.

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

Shih, J. S., ReVelle, C., 1995. Water supply operations during drought: A discrete hedging rule. European Journal of Operational Research, 82(1): 163-175.

Simonovic, S. P., 2000. Tools for water management: One view of the future. International Water Resources Association, 25(1), 76-88.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

Srinivasan, K., Philipose, M. C., 1998. Effect of hedging on over-year reservoir performance. Water Resources Management, 12(2): 95-120.

Tu, M.Y., Hsu, N. S., Yeh, W. W. G., 2003. Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 129(2): 86-97.

Tu, M. Y., Hsu, N. S., Tsai, F. T. C., Yeh, W. W. G., 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 134(1): 3-13.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

The effect of management strategies of water resources systems on drought indicators in Jarreh Dam

Mahdi Beshavard[1*], Arash Adib[2], Seyed Mohammad Ashrafi[3]
1. PhD. Student, Department of Civil Engineering, Civil Engineering and Architecture Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Professor, Department of Civil Engineering, Civil Engineering and Architecture Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Civil Engineering and Architecture Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 28 Sep 2022 Accepted: 16 Dec 2022

Abstract

Droughts caused by precipitation deficits and increasing water consumption are intensifying worldwide, with negative economic and environmental consequences. The negative impacts can be mitigated by using optimized reservoir operation patterns and implementing rationing rules during droughts. These approaches involve meeting only a portion of total demand, allowing for water storage and accepting a small current deficit to mitigate severe future shortages. This research presents a case study to determine the operational command curves for Jareh Dam and to investigate the impact of reservoir operation under two management policies, Standard Operating Procedure (SOP) and rationing, on downstream drought indices, an aspect not previously studied. To achieve this, an optimization model coupled with a genetic algorithm was linked to a simulation model to determine the optimal values of command curves and rationing coefficients based on historical inflow data to the reservoir. The performance of the model was evaluated in the Allah River water resources system. In addition, the drought severity index (SDI), SOP performance, and rationing model performance during the base period were evaluated by calculating the objective function value or modified shortage index (MSI) and the resilience, vulnerability, and reversibility indices. The results showed that under the rationing model during the study period, the MSI value improved by 41% compared to the SOP method. In addition, the implementation of the rationing policy significantly improved the vulnerability of the system compared to the SOP method, reducing it from 64% to 26%.

Keywords: Drought, Hedging, Optimization, Reservoir Operation, Rule Curve, Simulation.

Introduction

The use of reservoir optimization methods has been prominent in past studies, and several optimization models have been developed in this area. Increasing droughts caused by lack of rainfall and increased water consumption all over the world have left negative economic, environmental and social impacts. As reservoirs play an important role in the management of the water distribution system, these adverse effects can be reduced as much as possible by applying optimal operating policies. During periods of drought, managers and operators are more likely to be faced with a series of minor shortages rather than a severe shortage. In practice, the application of discrete rationing spreads the water shortage over a longer time horizon and improves the efficiency of reservoir use. In discrete rationing, the volume of the reservoir is divided into several zones, with each region having

*Corresponding author: Mhdbeshavard@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.3.1019811

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

a rationing policy with the same rationing coefficients. In the present research, the combination of a genetic algorithm with a simulation model was used to simultaneously search for thresholds (rule curves) and rationing coefficients in the reservoir system of the Jarreh Dam. The simulation model included reservoir mass balance equations and evaporation calculations from the lake surface based on surface-volume relationships and monthly evaporation intensity.

Materials and Methods

A case study was carried out on the Jareh Dam, located in the southwest of Iran in the province of Khuzestan. The area of agricultural land in Ramhormoz, which is downstream of Jareh Dam, is 21,400 hectares. The monthly inflow to the reservoir is related to a 34-year period from the water year 1354-55 to the water year 1387-88. During periods of drought, even if demand can be met from current storage and reservoir inflow, consideration is given to reducing demand. Such a reduction will prevent larger deficits in the following periods. In order to start the rationing of releases from the reservoir, a threshold volume is introduced, which is defined for all required months. When the sum of the reservoir storage at the beginning of each month and the inflow to the reservoir in that month is less than this threshold volume, the rationing policy starts. The objective function of this model is to minimize the severity of water shortages during operation. In the present research, the natural flow regime at the Jarrah Dam site was studied and its stream flow drought index (SDI) was investigated in different time periods (3, 6 and 12 months) from 1354-55 to 1378-88. The effects of operating the reservoir under two different policies (SOP and hedging) on the drought situation downstream of Jarreh Dam were also studied. The purpose of integrating the simulation and optimization model was to determine the rationing rule curves and the coefficients related to the rationing of demand. For this purpose, a genetic algorithm is linked to a simulation model. In this research, four key performance indicators, namely time-based reliability, volume-based reliability, vulnerability and resilience, are used to evaluate reservoir operation policies.

Results and Discussion

The number of decision variables in this problem was 26. The parameters of the genetic algorithm were as follows: population size = 156; crossover fraction = 0.5; mutation rate = 0.015. The value of α in the BLX- α method is considered equal to 0.5. The rationing coefficients α_1 and α_2 were equal to 0.82 and 0.5 respectively. The value of the optimized objective function (MSI) in the hedging model was compared with the corresponding values in the SOP (Table 3). With the implementation of the rationing policy, the objective function decreased by more than 40%, indicating the effectiveness of the method used in controlling and alleviating severe shortages throughout the statistical period. The drought index (SDI3, SDI6 and SDI12) at the dam site and downstream of the dam for two SOPs and the rationing policy were calculated and compared (Fig. 8 to 10 and Table 4). It was found that with the application of the rationing policy compared to the SOP and also compared to the natural flow upstream of the dam, the number of mild droughts increased and the number of moderate and severe droughts decreased. With the implementation of the rationing policy, the value of the objective function (MSI) has decreased by about 41% compared to the SOP method (Fig. 11). The volume reliability is similar in both methods, but the time reliability in the rationing method is 37% lower than in the SOP method. The rationing policy has improved the vulnerability of the system compared

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]

to the SOP method, reducing it from 64% to 26%. The rationing policy has reduced the resilience of the system compared to the SOP method, increasing it from 23% to 14%.

Conclusions

In order to mitigate the adverse effects of drought and climate change, it is necessary to conduct further research and implementation of optimal water resource management strategies is needed. One such strategy is the use of rationing schemes. As no such studies have been conducted at the Jarreh Dam in Khuzestan province, this research presents a case study to determine the operating rule curves of the dam. In this study, the effect of operating the dam reservoir with two methods (standard operating policy (SOP) and hedging) on downstream drought indicators was investigated. For this purpose, by linkingan optimizer model (using genetic algorithm method) to a simulation model, the optimal values of the rule curves and rationing coefficients were determined and the efficiency of this model was evaluated in the water resources system of Jarah Dam. Also, the streamflow drought index (SDI), the performance of the SOP and the rationing model in the desired period (water year 1354-55 to 1387-88) were examined by calculating the value of the objective function or the Modified Shortage Index (MSI). In addition, indicators of time-based reliability, volume-based reliability, resilience and vulnerability were examined. The results showed that by using the rationing model, the MSI function has improved by 41% compared to the SOP method in the desired period. Also, with the implementation of the rationing policy, the vulnerability of the system compared to the SOP method has greatly improved from 64% to 26% compared to the SOP method.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.3.1019811]