Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Application of gray wolf multi-objective algorithm in optimal operation of dam reservoirs in low water areas

Sufia Bajelani[1] | Saeid Shabanlou[2]✉ | Fariborz Yosefvand[3] | Mohammad Ali Izadbakhsh[4] | Ahmad Rajabi[5]

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: maryam63.333@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: fariborzyosefvand@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com
5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: ahmad.rajabi1974@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 4, 2022

Revised: March. 16, 2023

Accepted: Apr. 8, 2023

Published online: Apr. 21, 2023

Keywords:
Dez Dam,
Gray wolf algorithm,
Optimal operation,
WEAP.

ABSTRACT

In this research, the simulation-optimization method was used with the integration of the WEAP simulator model and the multi-objective gray wolf optimization algorithm (MOGWO) for the optimal exploitation of the Dez Dam water resource systems. The main goal in this structure is to provide a solution in which, based on the resources and costs of the region, in addition to reducing the penalty due to the violation of the authorized capacities of the reservoir, the percentage of meeting the needs of various uses in the entire period, especially in the dry months, will also increase. The results showed that in the reference scenario, in many dry years, the percentage of meeting the demand in critical and low water months was close to zero. This will create instability in the system and create irreparable economic losses and will have many social consequences. Optimizing the system based on the proposed structure in this research has improved the percentage of demand supply in critical months so that the minimum percentage of demand supply in these months reaches 30% and there is no month with zero demand supply percentage. The proposed model in this research can lead to better management of the reservoir in dry areas by taking into account the allowed capacities of the reservoir with optimal release of flow in high water seasons and storing part of the flow in the reservoir and releasing it in low water seasons.

Cite this article: Bajelani, S., Shabanlou, S., Yosefvand, F., Izadbakhsh, M. A., & Rajabi, A. (2023). Application of gray wolf multi-objective algorithm in optimal operation of dam reservoirs in low water areas, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (2), 299-318. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350777.669388

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350777.669388

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۲ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

کاربرد الگوریتم چندهدفه گرگ خاکستری در بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها در مناطق کم آب

صوفیا باجلانی[۱] | سعید شعبانلو[۲]✉ | فریبرز یوسفوند[۳] | محمد علی ایزدبخش[۴] | احمد رجبی[۵]

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: maryam63.333@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com

۳. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: fariborzyosefvand@gmail.com

۴. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com

۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ahmad.rajabi1974@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۲/۱

واژه‌های کلیدی:
WEAP،
بهره‌برداری بهینه،
خاکستری،
سد دز،
الگوریتم گرگ.

چکیده

بهره‌برداری از مخازن سدها در مناطق خشک و کم آب به دلیل تغییرات شدید فصلی جریانات ورودی به مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب سد دز از روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با تلفیق مدل شبیه‌ساز WEAP و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری (MOGWO) استفاده گردید. هدف اصلی در این ساختار ارائه راه حلی است که در آن بر اساس منابع و مصارف منطقه، علاوه بر کاهش جریمه ناشی از تخطی از ظرفیت‌های مجاز مخزن، درصد تامین نیاز مصارف مختلف در کل دوره بخصوص در ماه‌های خشک نیز افزایش یابد. برای بررسی قابلیت مدل پیشنهادی دو سناریوی مرجع (بر اساس وضع موجود) و سناریوی بهینه‌سازی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در سناریوی مرجع در بسیاری از سال‌های خشک درصد تامین نیاز در ماه‌های بحرانی و کم آب نزدیک به صفر بود. این امر باعث ایجاد ناپایداری در سیستم و ایجاد خسارات جبران‌ناپذیر اقتصادی شده و تبعات اجتماعی زیادی به دنبال خواهد داشت. بهینه‌سازی سیستم بر اساس ساختار پیشنهادی در این تحقیق باعث بهبود درصد تامین نیاز در ماه‌های بحرانی شده به گونه‌ای که حداقل درصد تامین نیاز در این ماه‌ها به ۳۰ درصد می رسد و هیچ ماهی با درصد تامین نیاز صفر باقی نمی‌ماند. مدل پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند با در نظر گرفتن ظرفیت‌های مجاز مخزن با رهاسازی بهینه جریان در فصول پرآب و ذخیره بخشی از جریان در مخزن و رهاسازی آن در فصول کم آب باعث مدیریت بهتر مخزن در مناطق خشک گردد.

استناد: باجلانی؛ صوفیا، شعبانلو؛ سعید، یوسفوند؛ فریبرز، ایزدبخش؛ محمدعلی، رجبی؛ احمد، (۱۴۰۲). کاربرد الگوریتم چندهدفه گرگ خاکستری در بهره برداری بهینه از مخازن سدها در مناطق کم آب، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۲)، ۳۱۸-۲۹۹. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350777.669388

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350777.669388

مقدمه

با توجه به کمبود منابع آبی و تغییر در الگوی مصرف به دلیل افزایش جمعیت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از طرفی به دلیل قرار گرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه خشک، بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب و مدیریت بهتر در شرایط کم آبی ضروری می‌باشد. از جمله ابزارهای مناسب در حوزه مدیریت منابع آب استفاده از روش های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب شبیه‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد. در روش‌های شبیه‌سازی می‌توان سیستم منابع آب موجود را با تمامی جزئیات مدل نمود و با سرعت بیشتری به یک دید کلی از سیستم مورد نظر رسید (Zeinali *et al*., 2021a). در فرآیند بهینه‌سازی مناسب ترین مقدارهای ممکن برای متغیرهای مورد نظر در یک مسئله پیدا شده، طوری که به ازای مقدارهای یافت شده، اهداف مسئله با بهترین مطلوبیت ممکن حاصل شود. روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه در بسیاری از مسائل پیچیده سیستم‌های منابع آب مورد استفاده قرار گرفته و باعث بهبود بهره‌برداری از سیستم شده است (Karamian et al., 2023; Zarei et al., 2022; Jalilian et al., 2022). استفاده از سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) در شرایطی که هدف مینیمم کردن مجموع کمبودها در طول دوره بهره‌برداری باشد، یکی از روش‌های متداول می‌باشد. اما اجرای (SOP) در شرایط کم آبی، منجر به ایجاد کمبود شدید و وقوع ماکزیمم آسیب‌پذیری[۱] در دوره زمانی خشک خواهد شد. از این رو استفاده از قوانین جیره‌بندی در شرایط خشکسالی سیاستی کارامد می‌باشد (Neelakantan & Sasireka, 2015).

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر مطالعاتی با استفاده از این روش برای تعیین قواعد بهره‌برداری و منحنی فرمان مخازن برای دستیابی به یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری انجام شده است (Koutsoyiannis *et al*. 2002; Celeste & Billib 2009; Efstratiadis *et al*. 2012). در روش جیره بندی، بخشی از آب در دسترس و قابل استفاده در گام زمانی جاری، برای کاهش کمبودهای شدید در آینده ذخیره می‌شود (Bayazit & Unal, 1990; Labadie, 2004; Koutsoyiannis, 2003). Taghian *et al*., (2013) به توسعه یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای جستجوی مستقیم و هم زمان رقوم آستانه ماهانه مخازن و ضرایب جیره بندی پرداختند و مقادیر بهینه ضرایب جیره بندی برای اهداف مختلف را بدست آوردند که نتایج به دست آمده نشان از کارایی روش مورد استفاده در کنترل و بهبود کمبودهای شدید در کل دوره آماری داشت.

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن بر اساس روشهای جیره بندی مبتنی بر ناحیه بندی مخزن یکی از راهکارهای موثر برای بهره‌برداری بهینه از سیستم در مناطق نیمه خشک و کم آب است (Azari *et al*. 2018; Bayesteh & Azari, 2021; Goorani & Shabanlou, 2021). در میان روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی توانایی بالایی در حل مسائل خطی و غیر خطی دارند که به همین دلیل می‌توانند از پس مسائل بهره‌برداری از مخازن که پیچیده و غیرخطی می‌باشند، برآیند. Oliveira & Loucks (1997) از الگوریتم ژنتیک برای برای ارزیابی منحنی‌های فرمان سیستم‌های چند مخزنی استفاده کردند. Jalali et al. (2006) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده کردند. Moeini & Afshar (2009) کاربرد الگوریتم مورچگان ماکزیمم–مینیمم را با سه فرمول بندی مختلف در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز مورد بررسی قرار دادند. Zhang *et al*. (2011) برای بهینه‌سازی توان برقابی در یک سیستم چند مخزنه از الگوریتم PSO بهبود یافته (IPSO) که از ترکیب الگوریتم‌های PSO و ژنتیک ایجاد کردند استفاده نمودند. Garousi-Nejad *et al*. (2016) از الگوریتم کرم شب تاب برای بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف کشاورزی و تولید برق استفاده نمودند.

ترکیب روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک روش قدرتمند در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب است که بر اساس آن در هربار بهینه‌سازی تصمیم‌گیران منابع آب می‌توانند از طریق شبیه‌سازی، نتایج اجرای حالت بهینه را مشاهده کنند تا بتوانند رفتار سیستم تحت این شرایط را تحلیل نمایند و میزان حصول اهداف مختلف را ارزیابی نمایند. این روش در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله Shourian *et al*. (2008) یک روش برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از بالادست حوضه رودخانه سیروان در ایران ارائه کردند. برای اینکار، مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم PSO را با هم ادغام نمودند که در آن هدف حداکثرسازی سود حاصل از تامین آب مورد نیاز بود. Rafiee Anzab et al. (2016) یک مدل شبیه‌سازی–بهینه‌سازی بوسیله‌ی لینک کردن مدل WEAP و الگوریتم PSO تک هدفه بمنظور طراحی و بهره‌برداری بهینه برای پروژه انتقال آب کارون به زهره در ایران ارائه کردند. *et*

---

[۱] Vulnerability

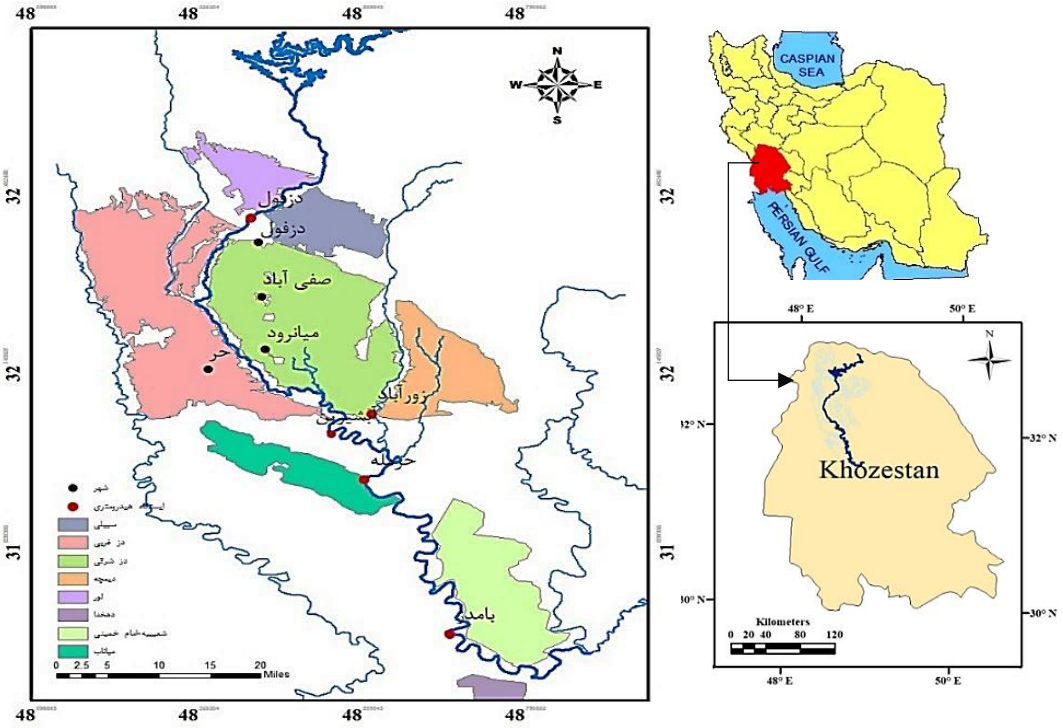
Zeinali *al*., (2021b) با ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای مناطق کم آب و نیمه خشک ارائه نمودند. بررسی منابع نشان می‌دهد بیشتر مدل‌های ارائه شده قادر به ارائه راهکار مناسب در مدیریت منابع آب موجود در سال‌های خشک یا کم آب نیست. چنین مدل‌هایی تنها برای افزایش اطمینان پذیری تامین نیاز در کل دوره بهره‌برداری طراحی شده است و در آن مجموع ماه‌های تامین نیاز شده در کل دوره ملاک محاسبه اطمینان پذیری تامین نیاز در کل دوره است. چنین برنامه‌ریزی، توجهی به میزان و مقدار کمبود آب در ماه‌های شکست یا ماه‌های با کمبود آب شدید ندارد که به هیچ وجه مطلوب مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک نیست.

در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و استفاده از ناحیه بندی مخزن و اعمال قواعد جیره بندی سعی در ارائه روشی شده است تا بجای افزایش اطمینان پذیری بر اساس تامین نیاز صددرصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌ها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده تا با استفاده در ماه‌های کم آب شدت شکست تعدیل گردد. جهت نیل به اهداف فوق و به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در حوضه دز، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گرگ خاکستری (MOGWO) به مدل شبیه ساز WEAP متصل گردید تا با به دست آوردن مقادیر بهینه رهاسازی آب از مخازن سدهای دز و جره، ساختار جدیدی جهت مدیریت منابع آب بخصوص در دوره‌های کم آب ارائه گردد. هدف اصلی در چنین ساختاری ارائه راه حلی است که در آن با توجه به ظرفیت بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر رسیدن به اطمینان پذیری تامین نیاز قابل قبول در کل دوره، درصد تامین نیاز در ماه‌های خشک نیز افزایش یابد.

روش شناسی پژوهش

معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه سد مخزنی دز بر روی رودخانه دز و دشت‌های پایین دست آن است که بخشی از آب مورد نیاز آنها توسط این سد تامین می‌شود. سد دز در شمال خوزستان و قسمت جنوبی ایران قرار دارد. جانمایی رودخانه‌ها و مصارف موجود در منطقه در شکل (۱) آمده است. سد دز با اهداف تامین آب کشاورزی شبکه آبیاری و زهکشی دز، اراضی پایین دست، تامین آب شرب و صنعت و تولید انرژی برقابی طراحی شده است. بخشی از نیازهای اراضی دشت دز توسط چاه‌های بهره‌برداری تامین می‌گردد. در سال‌های اخیر به دلیل کاهش جریان ورودی به سد و همچنین افت تراز آبخوان در محدوده مطالعاتی دشت دز، تامین نیاز مصارف پایین دست سد بخصوص در دوره‌های کم آب با مشکل مواجه شده و باعث ایجاد شکست‌های متوالی در تامین آب در برخی سال‌ها می‌گردد. لذا ارایه یک راهکار جامع برای تامین آب منطقه با کاهش شدت شکست در طول دوره بهره‌برداری از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

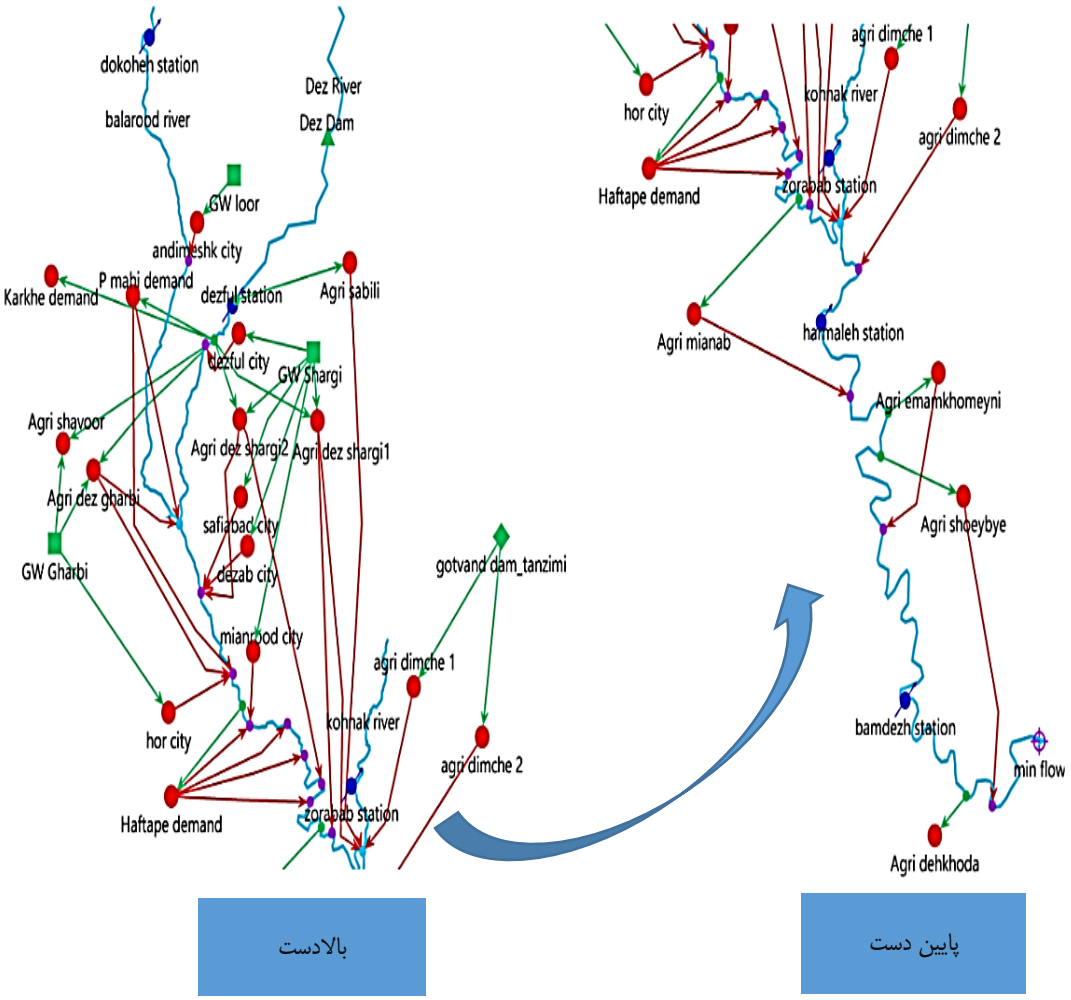


شکل ۱. جانمایی رودخانه‌ها، منابع و مصارف در منطقه مطالعاتی

ساختار مدل شبیه ساز WEAP

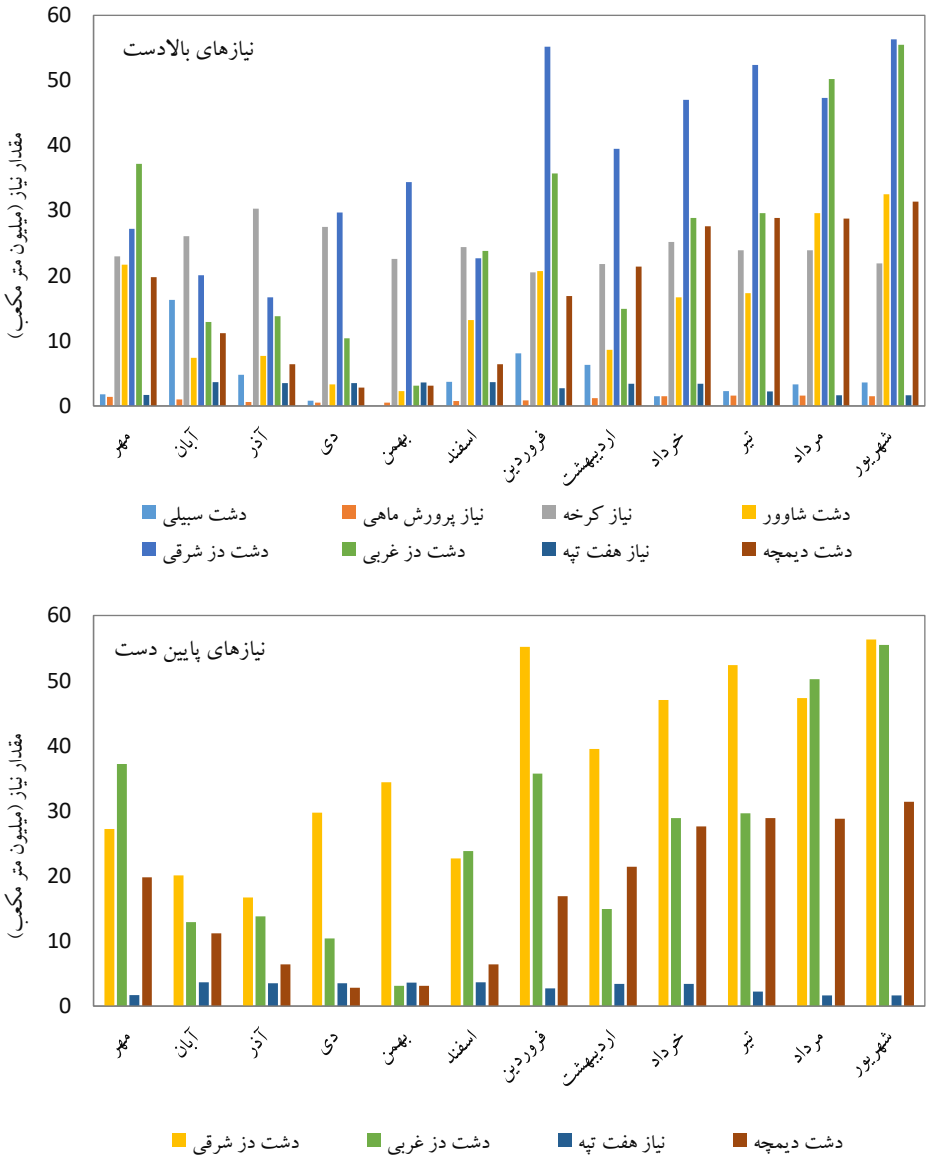
در منطقه مطالعاتی به منظور مدلسازی آب موجود منطقه ابتدا نقشه‌های پایه منطقه از جمله مسیر رودخانه‌ها، جانمایی منابع و مصارف از جمله محل سد، منابع آب زیرزمینی، نیازها و هم چنین جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در نرم افزار GIS تهیه گردید و در محیط شبیه ساز WEAP فراخوانی شد. یک دوره آماری ۳۰ ساله ثبت شده (مشاهداتی) در ایستگاه بالادست سد مطالعاتی که شامل دوره‌های خشک و تر بوده به عنوان جریان ورودی به مخزن در نظر گرفته شد. بر اساس ماهیت روش بهینه‌سازی معین که در این تحقیق از آن بهره گرفته شده است، فرض شده که این دوره مشاهداتی در آینده تکر ار شود.

سپس اطلاعات مربوط به تمامی منابع و مصارف شامل مشخصات کلی سد و نیروگاه، مقدار برداشت از آب سطحی و زیرزمینی برای هر کدام از مصارف اعم از شرب و صنعت، کشاورزی، حقابه سنتی و زیست محیطی و ... ، مقدار برگشت آب از هر کدام از مصارف و آبدهی ثبت شده در هر کدام از ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در مدل تعریف گردید. بر اساس آمار و اطلاعات کسب شده از خروجی زهکش‌های کشاورزی و پساب‌های شهری، مقدار آب برگشتی در مصارف کشاورزی و شهری بطور متوسط به ترتیب در حدود ۲۰ درصد و ۸۳ درصد در نظر گرفته شد. در شکل (۲) شماتیک مدل مربوط به منطقه مطالعاتی آورده شده است.



شکل ۲. شماتیک منطقه مطالعاتی در مدل آب سطحی

سپس اطلاعات بهره‌برداری سدهای دز شامل ظرفیت مخزن، حجم مخزن در تراز حداقل و حداکثر و مرده، مشخصات نیروگاه و غیره در مدل وارد شد. همچنین مقادیر آبدهی رودخانه دز در محل ورودی به سد در طول دوره شبیه‌سازی در مدل تعریف شد. مطابق با شکل (۳) نیاز آبی ماهیانه اراضی منطقه براساس الگوی کشت دشت‌ها محاسبه شده و در مدل تعریف گردید.



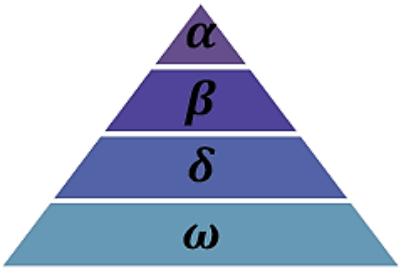
شکل ۳. میزان نیاز آبی دشت‌های مورد مطالعه در ماه‌های مختلف (MCM)

جهت محاسبه آب شرب و صنعت مورد نیاز شهری در دوره ۳۰ ساله آتی، از آمار و اطلاعات جمعیتی شهرها و با در نظر گرفتن نرخ رشد جمعیت در سال‌های آتی و همچنین اطلاعات مربوط به میزان مصرف سرانه در مناطق مذکور استفاده گردید. میزان مصرف سرانه شهری بر اساس اطلاعات ثبت شده در حدود ۲۲۰ لیتر در روز در نظر گرفته شد. در نهایت با توجه به افزایش جمعیت در هر دوره زمانی نیاز شرب ماهیانه در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه شد. در این تحقیق برای تعیین جریان زیست محیطی، گره مربوط به حداقل جریان زیست محیطی در پایین دست رودخانه دز در مدل ایجاد شد. از روش تنانت که از جمله روش‌های درجه‌بندی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود، برای تخمین حداقل جریان زیست محیطی پایین دست بر اساس جریان طبیعی رودخانه استفاده شد (Tennant, 1976). با توجه به اطلاعات تبخیر از سطح آزاد مخزن سد دز و در نظر گرفتن میزان بارندگی روی سطح مخزن، تبخیر خالص ماهیانه از سطح آزاد مخزن محاسبه شده و در مدل وارد شد.

ساختار مدل بهینه ساز چند هدفه پیشنهادی

در این تحقیق از مدل الگوریتم چند هدفه بهینه‌سازی گرگ خاکستری (MOGWO) استفاده گردید که به صورت چند هدفه تدوین شده است. مدل شبیه‌سازی WEAP پس از تکمیل، به الگوریتم multi-objective grey wolf optimizer (MOGWO) متصل شد. الگوریتم GWO، بر اساس جستجو ، رفتار شکار و سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری توسط Mirjalili et al. (2014) ارائه‌شده

است. بعدها الگوریتم چندهدفه MOGWO توسط Mirjalili et al. (2016) ارایه شد. در بهینه‌ساز گرگ خاکستریGWO ، مناسب‌ترین راه حل را به عنوان آلفا در نظر گرفته و راه حل‌های دوم و سوم مناسب به ترتیب بتا و دلتا نام‌گذاری می‌شوند. بقیه راه حل‌ها امگا در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۴). در الگوریتم GWO ، شکار توسط α β و δ هدایت می‌شود. راه حل ω از این سه گرگ پیروی می‌کند. وقتی شکار توسط گرگ‌ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ alpha شروع می‌شود. مدل کردن این فرآیند با استفاده از کاهش بردار a انجام می‌شود. از آنجا که A برداری تصادفی در بازه [-2a,2a] است، با کاهشa ، بردار ضرایب A هم کاهش می‌یابد. اگر |A|<1باشد، گرگ alpha به شکار (و بقیه گرگ‌ها) نزدیک می‌شود و اگر |A|>1 گرگ از شکار (و بقیه گرگ‌ها) دور خواهد شد. الگوریتم گرگ خاکستری الزام دارد که تمام گرگ‌ها موقعت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های alpha, beta, delta آپدیت کنند (شکل (۵)).



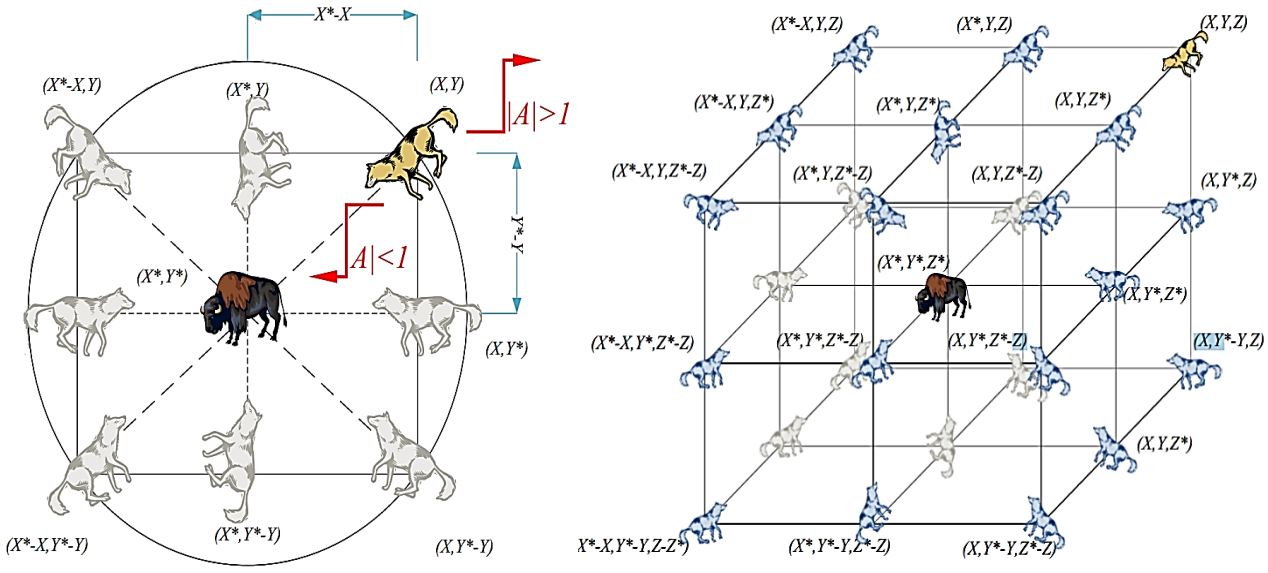
شکل ٤. ساختار هرمی رده‌بندی گرگ‌های خاکستری

گرگ‌های رهبر گروه alpha نامیده می‌شوند که می‌توانند مذکر یا مونث باشند. این گرگ‌ها بر گله تسلط دارند.

گرگ‌های :beta کمک به گرگ‌های alpha در فرایند تصمیم‌گیری بوده و همچنین مستعد انتخاب شدن به جای آن‌ها هستند.

گرگ‌های :delta پایین تر از گرگ‌های beta و شامل گرگ‌های پیر، شکارچی‌ها و گرگ‌های مراقبت‌کننده از نوزادان

گرگ‌های :omega پایین‌ترین مرتبه در هرم سلسله مراتب که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گروه دارند. بعد از همه غذا می‌خورند و در فرایند تصمیم‌گیری مشارکتی ندارند.



شکل ۵. مکانیسم به‌روزرسانی موقعیت دو بعدی و سه بعدی عوامل جستجو و تأثیرات A بر روی آن در الگوریتم گرگ خاکستری (Mirjalili *et al.* (2014, 2016))

همانطور که گفته شد مدل بهینه ساز این تحقیق به صورت چند هدفه تعریف شد که در آن تابع هدف اول حداکثر سازی درصد تامین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف در مقابل تابع هدف دوم یعنی حداقل نمودن میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن قرار

گرفت. توابع هدف و قیود در این تحقیق به صورت زیر تعریف شدند.

توابع هدف:

۱- حداکثر سازی درصد تامین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف:

رابطه ۱)
$$F_1 = Maximize(\sum_{t=1}^{n}\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}(COV_{tzd})) = Maximize(\sum_{t=1}^{n}\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}(\frac{TDW_{tzd}}{DM_{tzd}}))$$

به دلیل اینکه الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده به دنبال کمینه کردن توابع هدف است می‌توان تابع فوق را به صورت زیر تعریف نمود :

رابطه ۲)
$$F_1 = Minimize(\sum_{t=1}^{n}\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}(1 - COV_{tzd})) = Minimize(\sum_{t=1}^{n}\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}(1 - \frac{TDW_{tzd}}{DM_{tzd}})$$

که در این فرمول :

COV_{tzd}: نسبت تامین نیاز d در دوره t در منطقه z

TDW_{tzd}: حجم کل آب تحویلی به نیاز d در دوره t در منطقه z

DM_{tzd}: حجم کل آب مورد نیاز، نیاز d در دوره t در منطقه z

۲-حداقل نمودن میزان تخطی از ظرفیت مجاز بهره‌برداری مخزن:

رابطه ۳)
$$F_2 = Minimize(\sum_{t=1}^{n} Max(\left(1 - \frac{S_t}{S_{min}}\right), 0)$$

که در آن:

S_t : حجم مخزن سد در تراز نرمال در دوره t

S_{min} : حجم مخزن سد در تراز حداقل در دوره t

در تمامی مراحل بهینه‌سازی برای جلوگیری از کشیدگی فضای تصمیم و افزایش سرعت همگرایی الگوریتم در هر تکرار هر کدام از توابع هدف بر اساس رابطه زیر به دامنه صفر و یک تبدیل شدند. این امر باعث می‌شود توابع هدف در دامنه‌ی کوتاه‌تری قرار گیرند و مدل بهتر آموزش ببیند.

رابطه ۴)
$$F_i = \frac{F_i - F_{min}}{F_{max} - F_{min}}$$

در این رابطه F_i تابع هدف شماره i و F_{max} و F_{min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تابع هدف مورد نظر می‌باشد.

محدودیت‌ها

رابطه ۵)
$$TDW_{tzd} = RS_{tzd} + RG_{tzd} \qquad t = 1, \dots, n \times y \qquad z = 1, \dots, z \qquad d = 1, \dots, d$$

RS_{tzd} : مقدار آب سطحی تخصیص یافته به منطقه z در دوره t برای نیاز d

RG_{tzd} : مقدار آب زیرزمینی تخصیص یافته به منطقه z در دوره t برای نیازd

n: تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی در سال

y : تعداد سال‌های برنامه‌ریزی

رابطه ۶)
$$TSR_t = R_t + R_{e-l} + R_{e-r} + R_{in} + R_g + R_m + R_{em} + R_{sh} + R_h + R_d + R_{f-r}$$

TSR_t: میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده در دوره t

R_t : حجم آب برداشتی از سد تنظیمی دزفول توسط کانال سبیلی در دوره t

R_{e-l} : حجم آب برداشتی از سد انحرافی دزفول توسط کانال غربی در دوره t

R_{e-r} : حجم آب برداشتی از سد انحرافی دزفول توسط کانال شرقی در دوره t

R_{in}: حجم آب برداشتی از رود دز بطور مستقیم برای مصارف صنعتی در دوره t

R_g: حجم آب برداشتی از سد تنظیمی گتوند توسط کانال انتقالی دیمچه در دوره t

R_m: حجم آب برداشتی از دز توسط اراضی نیشکر میاناب

R_{em}: حجم آب برداشتی از دز توسط اراضی نیشکر امام خمینی

R_{sh}: حجم آب برداشتی از دز توسط اراضی شعیبیه غربی

R_h: حجم آب برداشتی از دز توسط اراضی دارای حقابه‌های سنتی

R_d: حجم آب برداشتی از دز توسط اراضی نیشکر دهخدا

R_{f-r}: آب تخصیص داده شده برای مصارف زیست محیطی

محدودیت برداشت از منابع آب سطحی بصورت معادله زیر تعریف شد. قسمت اول این معادله بیان می‌کند در صورتی به نیاز d در منطقه z و در زمان t به همان اندازه نیازش، آب سطحی تخصیص داده می‌شود که مقدار آب سطحی باقیمانده (بعد از تخصیص به نیازهای دیگر در سایر مناطق با اولویت بالاتر) بیشتر از نیاز d باشد. در غیر این صورت طبق قسمت دوم معادله به همان مقدار آب سطحی باقیمانده، به نیاز d مربوط به منطقه z داده می‌شود و مابقی نیاز طبق معادله ۶ و ۷ باید از آب زیرزمینی تامین شود. در خصوص تخصیص از آب زیرزمینی نیز همین قانون رعایت می‌شود که در معادله ۷ بخوبی بیان شده است.

رابطه ۷)
$$RS_{tzd}=\begin{cases} DM_{tzd} & if\left(TSR_t-\sum_{z=1}^{z-1}\sum_{d=1}^{d}DM_{tzd}-\sum_{z=1}^{z}\sum_{d=1}^{d-1}DM_{tzd}\right)\geq DM_{tzd} \\ \left(TSR_t-\sum_{z=1}^{z-1}\sum_{d=1}^{d}DM_{tzd}-\sum_{z=1}^{z}\sum_{d=1}^{d-1}DM_{tzd}\right) & Otherwise \end{cases}$$

RS_{tzd}: میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخشd در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویت های منابع تامین و اولویت نیاز مصارف)

رابطه ۸)
$$TDF_{tdz}=DM_{tdz}-RS_{tdz}$$

TDF_{tdz}: مقدار کمبود آبی که توسط آب‌های سطحی تامین نمی‌شود

محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی بصورت معادله زیر تعریف شد.

رابطه ۹)
$$RG_{tzd}=\begin{cases} TDF_{tzd} & if\left(G_{t-Max}-\sum_{z=1}^{z}\sum_{d=1}^{d-1}TDF_{tzd}\right)\geq TDF_{tzd} \\ \left(G_{t-Max}-\sum_{z=1}^{z}\sum_{d=1}^{d-1}TDF_{tzd}\right) & Otherwise \end{cases}$$

RG_{tzd}: میزان کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخشd در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویت‌های منابع تامین و اولویت نیاز مصارف)

G_{t-Max}: محدودیت برداشت آب زیرزمینی (این محدودیت برابر با حداکثر برداشت فعلی در نظر گرفته شد و باید از این مقدار تجاوز نکند)

با تعریف روابطه فوق در یک VBScript متصل به بدنه مدل WEAP، مدل بهره‌برداری از مخزن با پارامتریزه کردن آن و اعمال قواعد رهاسازی جریان در محیط شبیه‌ساز WEAP توسعه داده شد. این روش شامل دو پارامتر مهم hdg(τ) (حجم ذخیره مخزن در تراز بافر) و (α) (ضریب بافر (Hedging fraction)) است که مقادیر بهینه این دو پارامتر در ماه‌های مختلف به عنوان متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم بهینه ساز تعیین می‌شوند و سپس به عنوان متغیرهای بهره‌برداری از مخزن وارد نرم افزار WEAP می‌شوند. در هر ماه یک متغیر مربوط به تراز بافر و یک متغیر مربوط به ضریب بافر تولید شده است بنابراین با در نظر گرفتن ۱۲ ماه سال، تعداد متغیرهای تصمیم در این روش ۲۴ متغیر می‌باشد.

در این روش مخزن به چهار منطقه تقسیم می‌شود. منطقه کنترل سیل که بین تراز مربوط به حداکثر ظرفیت مخزن و تراز حداکثر

بهره‌برداری می‌افتد. منطقه حفاظت (conservation) که بین تراز حداکثر بهره‌برداری و تراز بافر قرار دارد. منطقه جیره بندی که بین تراز بافر و تراز مرده قرار دارد و منطقه غیرفعال که پایین تر از تراز مرده است. هر گاه تراز آب در منطقه حفاظت باشد، سیستم اجازه می‌دهد مخزن بطور آزادانه تمامی آب موجود در این ناحیه را برای تامین تمامی برداشت‌ها و مصارف پایین دست رها کند. هنگامی که تراز ذخیره آب در مخزن پایین تر از تراز بافر و داخل محدوه بافر (buffer zone) می‌افتد، میزان رهاسازی جریان با استفاده از ضریب بافر که عددی بین صفر و یک است محدود می‌شود تا مقداری از آب موجود را برای شرایط بحرانی و کم آبی در مخزن ذخیره کند. پارامترهای این روش حجم ذخیره مخزن در تراز بافر (hdg(τ)) و ضریب بافر (Hedging fraction) (α) می‌باشند. هرگاه حجم آب در مخزن پایین تر از تراز بافر (حجم آب در تراز بافر) بیفتد، سیستم با استفاده از ضریب بافر (buffer coefficient) مقدار رهاسازی را کاهش می‌دهد. ضریب بافر، جزعی (fraction) از آب موجود در ناحیه بافر (buffer zone) در هر ماه است که توسط سیستم رها می‌شود. هرچه ضریب بافر به یک نزدیک‌تر باشد مقدار بیشتری آب رهاسازی شده و هرچه این ضریب به صفر نزدیک باشد مقادیر رهاسازی از مخزن کاهش یافته و مقدار بیشتر آب موجود در مخزن ذخیره می‌شود. به این ترتیب با تغییر این پارامترها در ماه‌های مختلف مقدار رهاسازی بهینه از مخزن در طول دوره بهره‌برداری به دست می‌آید.

ساختار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

در این تحقیق الگوریتم گرگ خاکستری چند هدفه (MOGWO) در نرم افزار MATLAB نوشته شده و به مدل WEAP متصل گردید. در این مدل لینک شده ابتدا توسط الگوریتم MOGWO بر اساس محدودیت های نوشته شده در مدل، مقادیر متغیرهای تصمیم ایجاد شده و وارد مدل شبیه ساز WEAP گشته و مدل اجرا می‌گردد. سپس نتایج حاصل از آن بر اساس توابع هدف تعریف شده توسط مدل بهینه ساز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و منحنی تبادل اهداف ترسیم می‌گردد. در صورت عدم تامین اهداف مورد نظر، دوباره مدل بهینه ساز اجرا شده و جمعیت جدیدی تولید شده و وارد مدل شبیه ساز می‌گردد و این چرخه تا رسیدن به جوابهای نزدیک به بهینه ادامه می‌یابد.

مفروضات و سناریوهای مدل

با توجه به قابلیت مدل‌های شبیه ساز، شرایط آینده را می‌توان تحت سیاست‌های بهره‌برداری مختلف با سناریوهای مختلف ارزیابی کرد.

سناریوی مرجع: سناریوی مرجع بیانگر تداوم شرایط موجود بدون تغییر عمده در سیاست‌های مدیریتی آتی است که در آن شبیه-سازی‌های کمی-کیفی برای یک دوره ۳۰ ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ انجام شده است. در این سناریو، تقاضای آب کشاورزی در منطقه مورد مطالعه بر اساس الگوی کشت هر دشت محاسبه و در سال‌های بعد ثابت در نظر گرفته شد. تقاضای شرب در سال‌های بعد با توجه به نرخ رشد جمعیت محاسبه و وارد مدل شد. با توجه به وضعیت بهره‌برداری فعلی، دبی زیست محیطی پایین دست رودخانه برابر با دبی‌های ثبت شده در انتهای مسیر رودخانه در نظر گرفته شد. در این سناریو، آب شرب به طور کامل از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. تقاضاهای صنعتی، زیست محیطی، کشاورزی و تقاضای کرخه به ترتیب به عنوان اولویت اول، دوم و سوم برداشت آب‌های سطحی به مدل تعریف شدند.

سناریوی بهینه: این سناریو برای بهینه‌سازی رهاسازی از مخزن، برداشت بهینه از رودخانه و برداشت بهینه از آب‌های زیرزمینی و همچنین کاهش شدت شکست در ماه‌های کم آب طراحی شده است. آخرین گره رودخانه (بنده‌گیر) به‌عنوان نقطه کنترل بهینه‌سازی برای تأمین تقاضای محیطی در نظر گرفته شد. در این سناریو تمامی تقاضاها، اولویت‌های عرضه و تخصیص‌ها مشابه سناریوی اول بود. در پایان فرآیند بهینه‌سازی، از مقادیر بهینه رهاسازی جریان از سد دز حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی برای مدیریت بهره‌برداری از منابع آبی منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

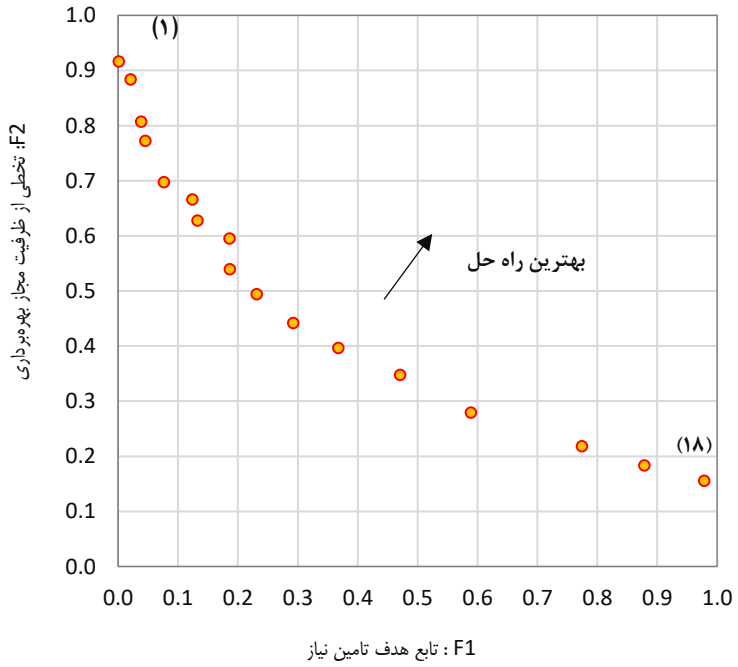
نتایج سناریوهای بهینه و مرجع مقایسه شد. با توجه به محدودیت زمان اجرا مدل پیوندی، بهینه‌سازی دوره ۳۰ ساله از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ در این سناریوها در نظر گرفته شد. همانطور که در بالا ذکر شد، فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از MOGWO انجام شد. در این فرآیند، ۲۴ متغیر تصمیم‌گیری با استفاده از یک تابع چند هدفه بهینه شدند. اجرای مکرر مدل نشان داد که برای بهترین نتایج، تعداد اولیه جمعیت باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد. از این رو جمعیت اولیه ۴۸ تنظیم شد. پس از اجراهای متوالی مدل و بررسی نحوه همگرایی الگوریتم MOGWO در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سد دز، پارامترهای بهینه تنظیم شده برای اجرای الگوریتم بصورت جدول (۱) در

نظر گرفته شد

جدول ۱. پارامترهای نهایی تنظیم شده در بدنه الگوریتم MOGWO

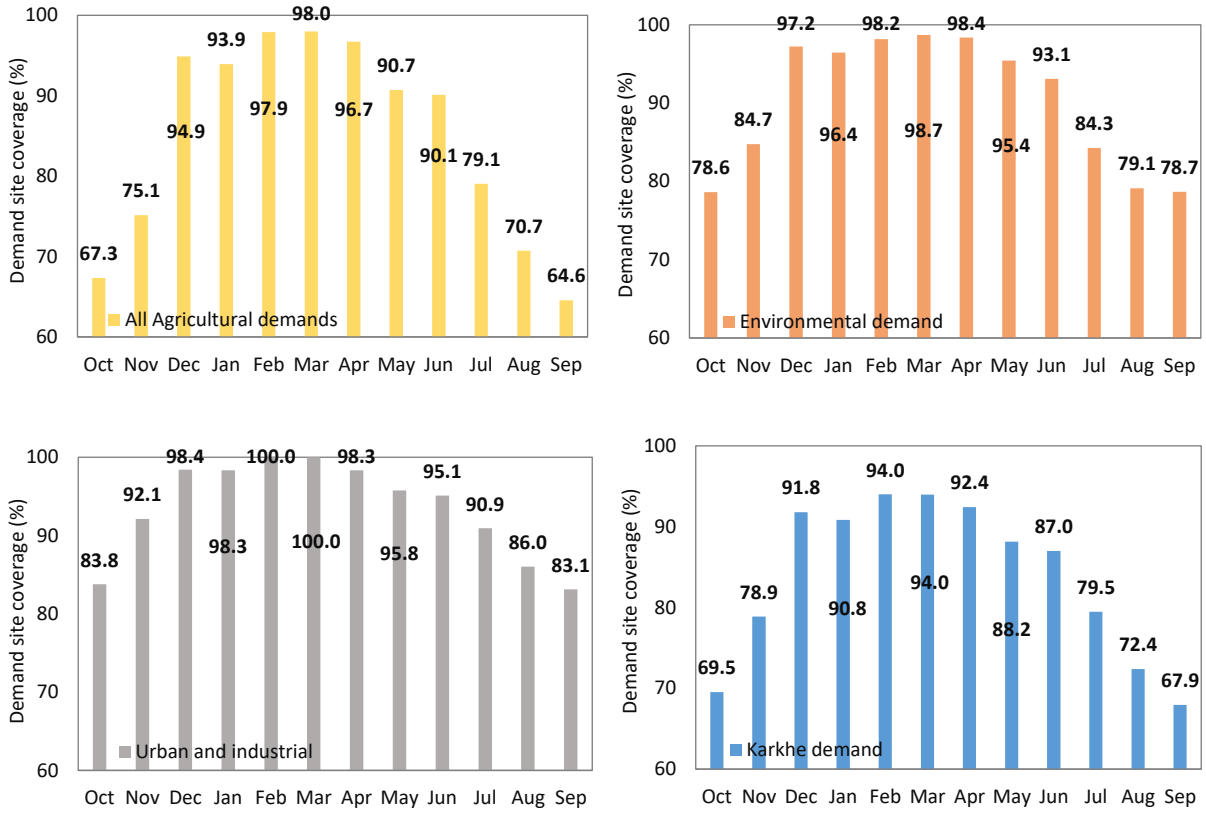
پارامتر	مقدار
تعداد تکرار	۱۰۰۰
جمعیت اولیه	۴۸
پارامتر کاهشی بروزرسانی موقعیت گرگ‌ها	$a = 2 - iteration \times (\frac{2}{Max\ iteration})$
پارامترهای تصادفی بروزرسانی موقعیت گرگ‌ها	-1<r1 and r2<1
تعداد متغیرهای تصمیم	۲۴

لذا تعداد تکرار الگوریتم برای دستیابی به همگرایی حدود ۱۰۰۰ تخمین زده شد. با توجه به جمعیت اولیه (۴۸)، مدل در مجموع ۴۸۰۰۰ بار اجرا شد. در الگوریتم MOGWO، بهترین راه حل‌ها در هر تکرار بر اساس ارزیابی توابع هدف انتخاب شده و به عنوان یک مخزن بهینه برای انتقال به مرحله بعدی ذخیره می‌شوند. در آخرین تکرار، منحنی بهینه جبهه پارتو بین اهداف بهینه‌سازی به دست آمد. شکل ۶ نمودار جبهه بهینه پارتو را نشان می دهد که در آن نقاط، جواب‌های بهینه مدل را نشان می‌دهند و محورها مقدار توابع هدف را نشان می‌دهند. در آخرین تکرار مدل ۱۸ راه حل بهینه تولید شد که از بین آنها بهترین راه حل (راه حل شماره ۱۳) با بیشترین درصد پوشش و کمترین تخطی از ظرفیت مجاز بهره‌برداری مخزن با توجه به ارزیابی توابع هدف انتخاب شده و نتایج حاصل از اجرای این راه حل آن مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ٦. منحنی تبادل اهداف نرمال شده (جبهه پارتو نرمال) در آخرین تکرار الگوریتم (تکرار ۱۰۰۰)

در سناریوی مرجع میانگین درصد پوشش ماهانه تقاضای آب برای هر تقاضای پایین دست سد در شکل ۷ نشان داده شده است. از آنجایی که اولویت اول این سناریو پاسخگویی به تقاضای شهری و صنعتی است، این تقاضاها بیشترین درصد پوشش در تمام ماه‌ها. با این حال، در برخی از ماه‌های تابستان و پاییز که به طور همزمان از آب‌های سطحی و زیرزمینی تامین می‌شود، کمبودی در تامین نیاز زمین‌های کشاورزی وجود داشته است. کمترین درصد پوشش مربوط به آب مورد نیاز کرخه (۶۷/۹ درصد) است که فقط از رودخانه دز تامین می‌شود. شکل ۷ نشان می‌دهد کمترین مقدار میانگین درصد تامین نیاز برای اکثر مصارف مربوط به ماه‌های جولای تا نوامبر است. در سایر ماه‌های پرآب، میانگین درصد تامین نیاز در بیشتر مصارف بیش از ۹۲ درصد است.

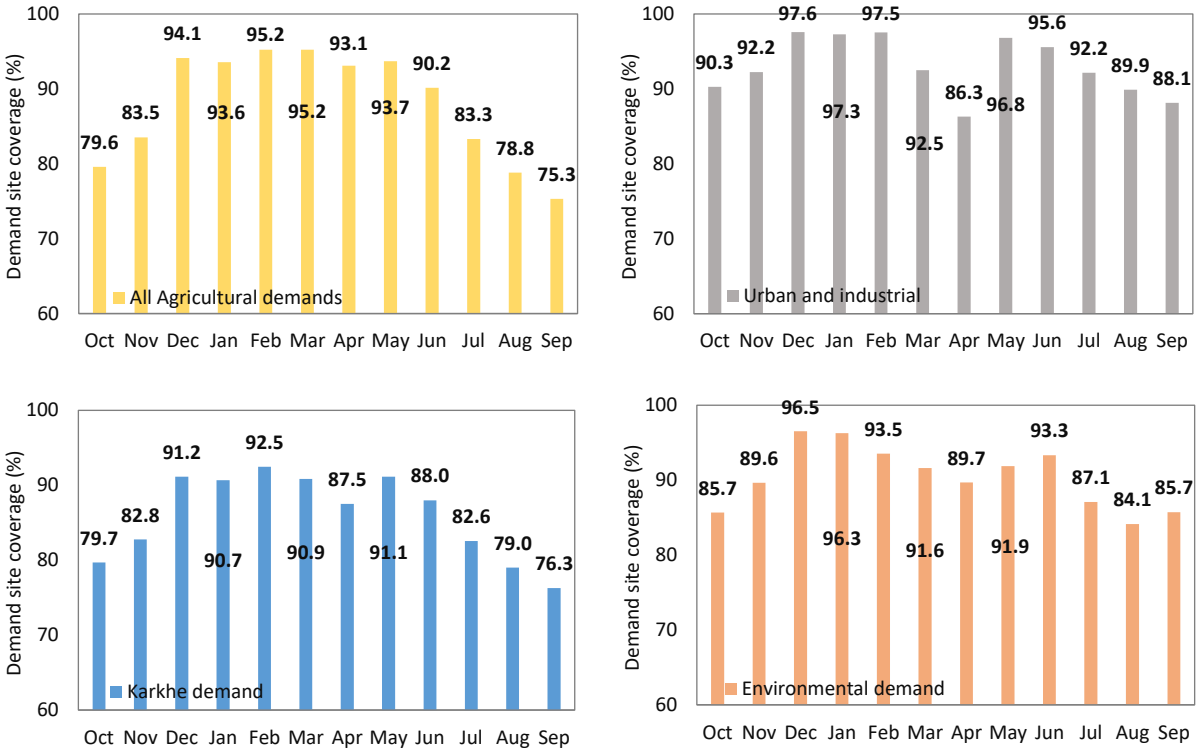


شکل ۷. درصد پوشش تقاضای کشاورزی (الف)، شهری و صنعتی (ب)، تقاضای کرخه (ج)، زیست‌محیطی (د) - سناریوی مرجع

میانگین درصد پوشش ماهانه برای نیازهای بالادست و پایین دست دشت دز در شکل ۸ برای سناریوی بهینه نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد در سناریوی بهینه‌سازی، بر اساس ایده ناحیه بندی مخزن و اعمال سیاست جیره بندی و رهاسازی جریان بر اساس الگوی بهینه بدست آمده، مقدار میانگین درصد تامین نیاز در ماه‌های خشک و کم آب پیشرفت قابل توجهی داشته است. در این روش مقداری از درصد تامین نیاز ماه‌های پرآب کاسته شده است. علت این موضوع ذخیره مقداری از آب موجود در مخزن در ماه‌های پرآب است تا در ماههای خشک برای تامین بخشی از نیازهای پایین دست رهاسازی شود. طوری که میانگین درصد تامین نیاز اکثر مصارف در ماههای خشک (از جولای تا نوامبر) بین ۳ تا ۱۲ درصد افزایش یافته است تا از بروز کم آبی شدید در این ماه‌ها جلوگیری شود.

قابلیت اطمینان تامین آب منطقه مورد مطالعه اعم از استفاده کنندگان شهری، صنعتی و کشاورزی و همچنین انتقال آب به خارج از دشت (تقاضای کرخه) که به طور همزمان از آب‌های سطحی و زیرزمینی تامین می‌شود، در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان تامین آب در اکثر موارد در سناریوی بهینه نسبت به سناریوی مرجع تا حدودی کاسته شده است. علت این امر اعمال سیاست جیره بندی مخزن در مدل بهینه ساز است. در این ساختار با توجه به عدم رهاسازی بخشی از آب مورد نیاز پایین دست در ماه‌های پرآب و ذخیره آن در مخزن برای استفاده در ماه‌های خشک، درصد تامین نیاز ماه‌های پرآب تا حدودی پایین می‌آید. به دلیل اینکه این سیاست باعث می‌شود تعداد ماه‌های با تامین نیاز ۱۰۰ درصد در کل دوره کاهش یابد لذا مقدار اطمینان پذیری تامین نیاز در کل دوره کاهش می‌یابد. این عمل باعث می‌شود درصد تامین نیاز ماه‌های خشک بخصوص در سال‌های کم آب بهبود یابد و از بوجود آمدن ماه‌های کاملا خشک و بدون آب با تامین نیاز صفر جلوگیری شود.

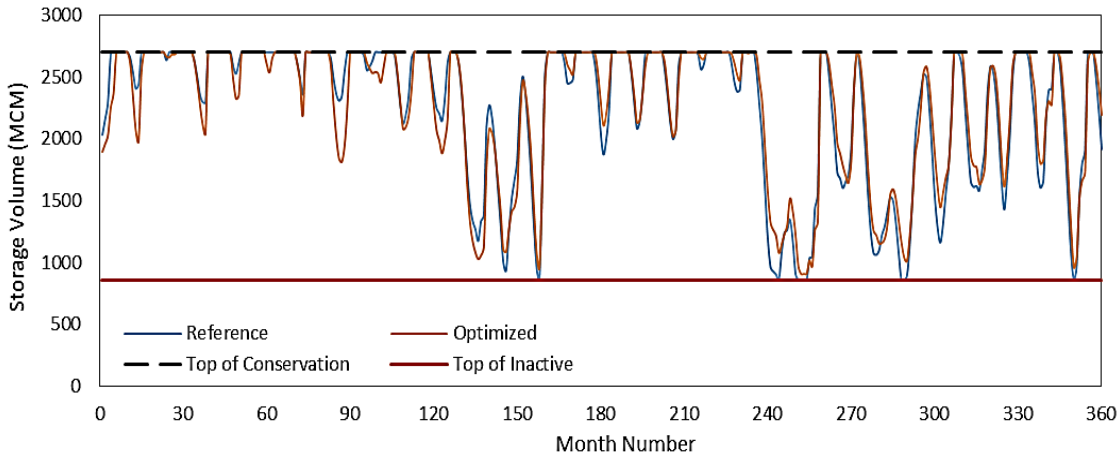
نوسانات حجم ذخیره مخزن سد دز در سناریوی بهینه با نوسانات در سناریوی مرجع مقایسه شد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، به دلیل اعمال محدودیت عدم تخطی از حداقل سطح ذخیره سازی مخزن در طول دوره برنامه ریزی، ذخیره مخزن در سناریوی بهینه هرگز با حجم غیرفعال مخزن تماس نداشته است. این به مدیریت حجم ذخیره سازی مخزن در شرایط خشکسالی شدید کمک می‌کند. اما در سناریوی مرجع، سطح آب در برخی ماه‌ها به دلیل عدم وجود این محدودیت به سطح حجم غیرفعال می‌رسد.



شکل ۸. درصد پوشش تقاضای کشاورزی (الف)، شهری و صنعتی (ب)، تقاضای کرخه (ج)، زیست‌محیطی (د)- سناریوی بهینه

جدول ۲. قابلیت اطمینان تامین آب مصارف مختلف در دشت دز

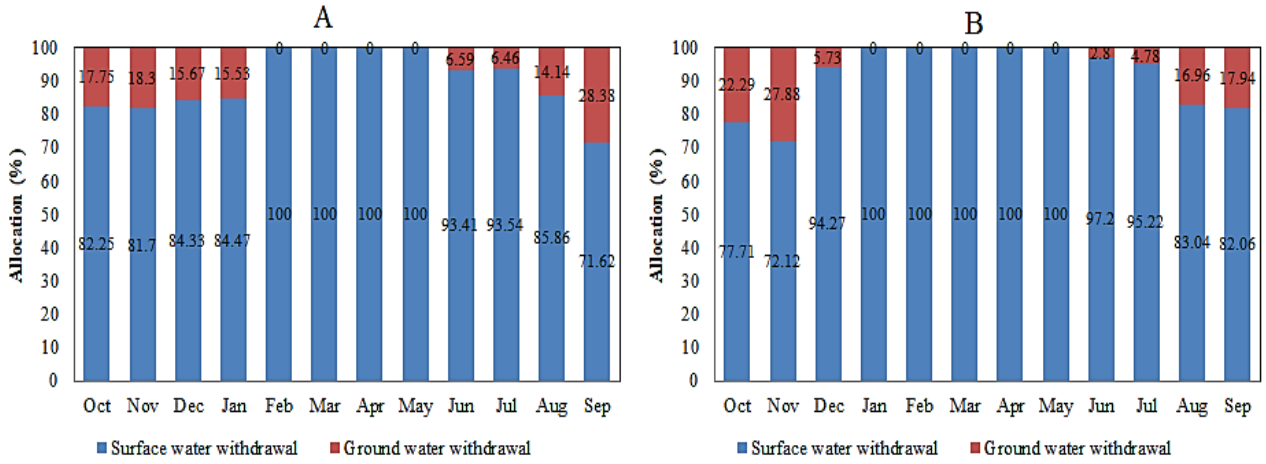
نام تقاضا	سناریوی بهینه	سناریوی مرجع
دشت دز شرقی و سبیلی	۸۳/۲۱	۹۰/۳۳
دشت دز غربی و شاوور	۷۹/۹۴	۸۸/۷۲
دشت میان آب	۸۴/۳۴	۹۱/۹۴
اراضی شعیبیه و امام خمینی	۷۶/۷۲	۸۵
دشت دهخدا	۸۹/۹۴	۹۷/۵
شهری و صنعتی	۹۳/۳۱	۹۷/۵
نیاز کرخه	۶۵/۸۳	۷۱/۵۶
نیاز زیست محیطی	۹۲/۰۵	۹۵/۵



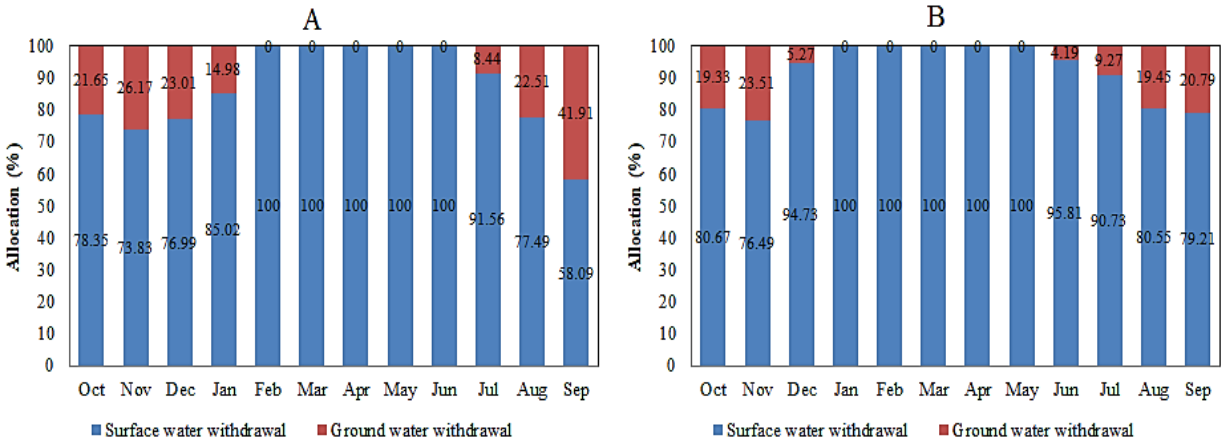
شکل ۹. نوسانات حجم ذخیره مخزن سد دز در دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله برای سناریوهای مرجع و بهینه

همانطور که قبلا ذکر شد، از میان اراضی کشاورزی بالادست، دشت‌های دز شرقی، دز غربی و شاوور به طور همزمان آب را از منابع

آب سطحی و زیرزمینی خارج می‌کنند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ درصد تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی تحت سناریوهای مرجع و بهینه در هر یک از دشت‌های دز شرقی و دز غربی به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به رهاسازی جریان مطابق با الگوی بهینه بدست آمده در سناریوی بهینه، سیستم میزان برداشت منابع آب سطحی و زیرزمینی را بر اساس توابع هدف تعریف شده در فصل خشک یا مرطوب در مقایسه با سناریوی مرجع بهبود بخشید.

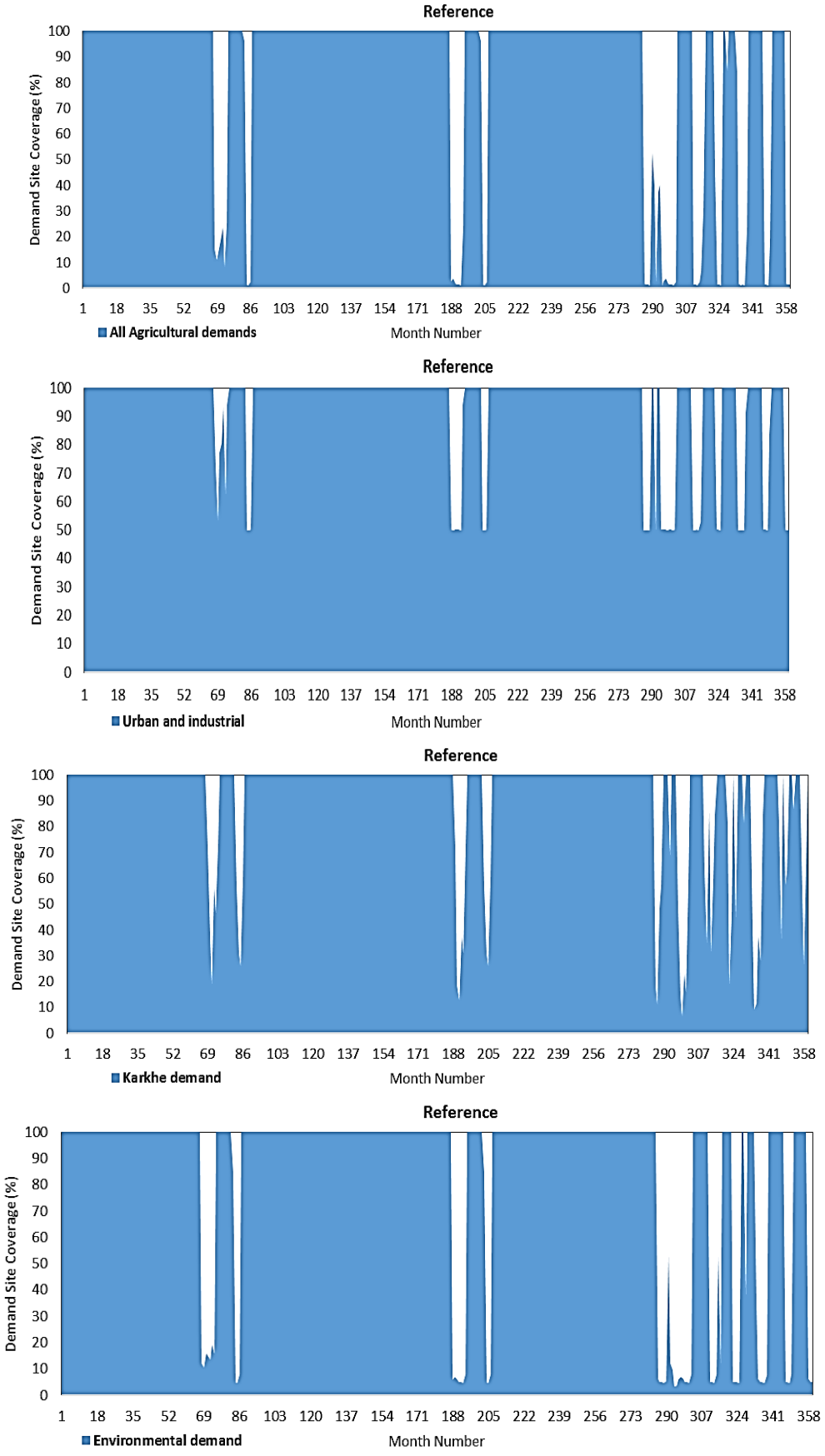


شکل ۱۰. درصد تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی تقاضای دز شرقی تحت سناریوهای مرجع (الف) و بهینه (ب)

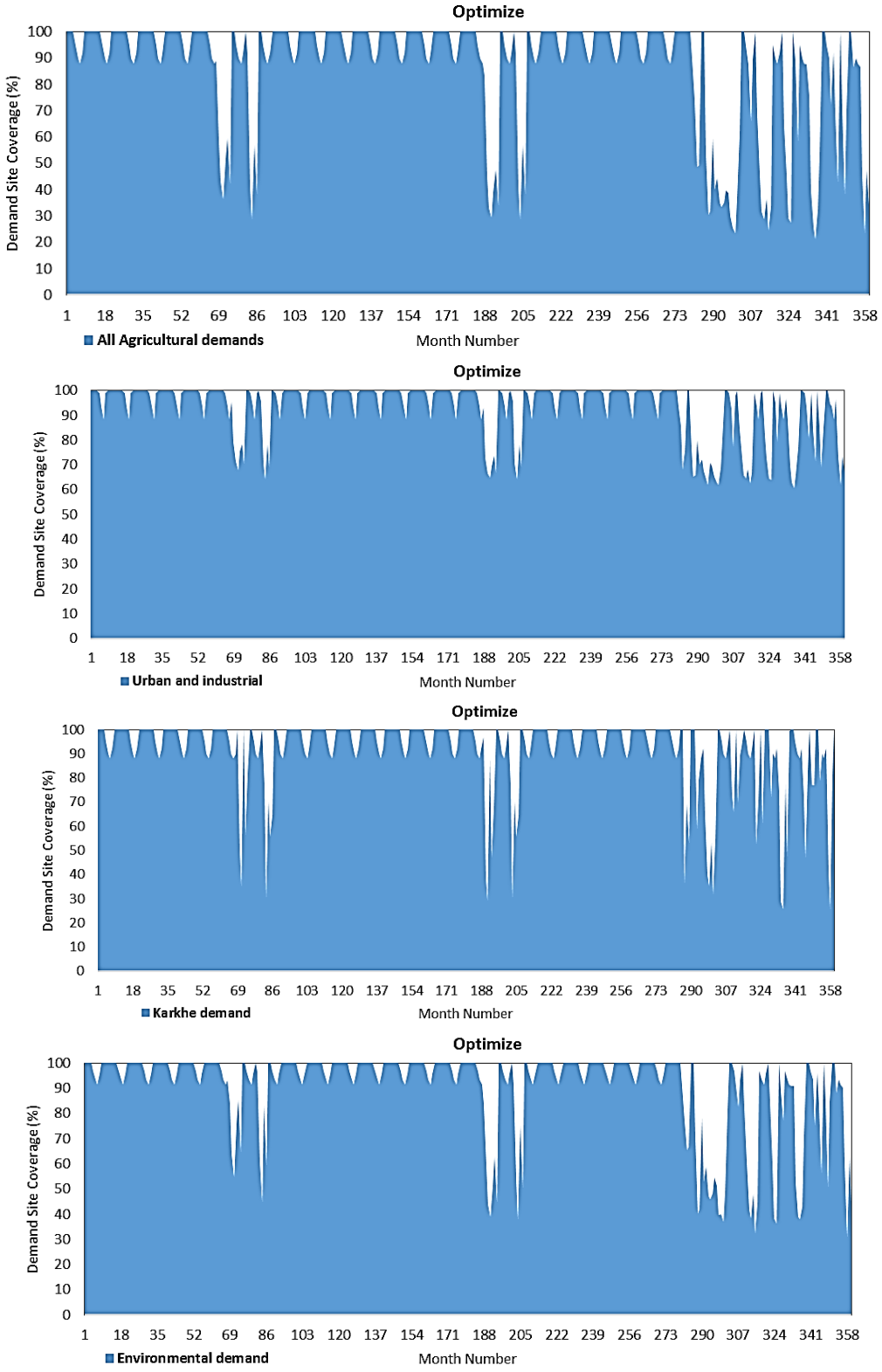


شکل ۱۱. درصد تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی تقاضای دز غربی تحت سناریوهای مرجع (الف) و بهینه (ب)

نکته قابل توجه این است که مدل بهینه تعریف شده سعی در کاهش شدت شکست در ماه‌های کم آب داشته لذا مطابق با نتایج به دست آمده مقداری از آب در ماه‌های پرآب ژانویه تا آوریل در مخزن ذخیره شده و بسته به میزان کمبود بین ماه‌های کم آب بخصوص جولای تا نوامبر گشته است. پس مقدار درصد تامین نیاز ماه‌های پر آب مقداری کاهش داشته است اما همچنان از درصد تامین بسیار خوبی برخوردار است. جهت بررسی و مقایسه این موضوع درصد تامین نیازهای کشاورزی محدوده مطالعاتی در کل دوره برنامه ریزی (۳۶۰ ماه) در دو سناریوی مرجع و بهینه به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی سال‌های آخر برنامه ریزی (۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰) در اکثر مصارف بخصوص مصارف کشاورزی در سه تا شش ماه خشک متوالی درصد تامین نیاز صفر یا نزدیک به صفر است. در برخی از ماه‌های خشک درصد تامین نیاز کمتر از پنج درصد است. این امر خسارات جبران‌ناپذیر اقتصادی و تبعات منفی اجتماعی در منطقه به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱۲. درصد تامین نیاز مصارف مختلف در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی مرجع



شکل ۱۳. درصد تامین نیاز مصارف مختلف در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی بهینه‌سازی

بحث

مطابق با شکل (۱۳) با اجرای مدل بهینه درصد تامین نیاز در ماه‌هایی که در سناریوی قبل صفر یا نزدیک به صفر بود به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد می رسد و در اکثر ماه‌های خشک بیش از ۴۵ درصد است. این امر نشان می‌دهد که مدل بهینه به خوبی توانسته شدت شکست را در بدترین حالت و در سال‌هایی با سه تا شش ماه خشک متوالی کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه ساز بر اساس توابع هدف تعریف شده در آن است. در این مدل بهینه ساز، قسمتی از آب در ماه‌های پرآب در مخزن ذخیره شده و بر اساس قواعد جیره‌بندی

مخزن در ماه‌های کم آب برای تامین مصارف پایین دست رهاسازی می‌شود. از طرفی این امر باعث شده اطمینان پذیری تامین نیازها در کل دوره حدود ۳ تا ۸/۵ درصد کاهش یافته و بخصوص در مصارف کشاورزی از حدود ۹۰ به ۸۳ درصد برسد. با توجه به سیاست جیره بندی در مدل، در ماه‌های پرآب مقداری از آب موردنیاز پایین دست رهاسازی نشده تا در ماه‌های کم آب مصرف شود. لذا درصد تامین نیاز ماه‌های پر آب کمتر از صد درصد می‌شود و نهایتا درکل دوره اطمینان پذیری پایین می‌آید.

بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن بر اساس ناحیه بندی مخزن به عنوان یک راهکار موثر در بهره‌برداری بهینه از مخازن در مناطق نیمه خشک و کم آب مورد توجه بسیاری از محققان بوده است که باعث بهبود وضع موجود بهره‌برداری و افزایش بهره وری آب و تامین حداکثرث نیازها شده است (Azari et al. 2018; Bayesteh & Azari, 2021; Goorani & Shabanlou, 2021; Jalilian et al., 2022). تفاوت تحقیق حاضر با مطالعات انجام شده توسط این محققین در نوع الگوریتم مورد استفاده و نحوه انتخاب جواب‌های برتر و همچنین فرمول بندی توابع هدف است. در تحقیق دیگری توسط Azari and Arman, 2020 از مدل هیبرید SVM و NSGAII برای استخراج مقادیر رهاسازی بهینه جریان از سد در زمان واقعی استفاده شده است. تفاوت تحقیق حاضر با تحقیق Azari and Arman, 2020 در فرمول بندی توابع هدف است. توابع هدف ارایه شده در تحقیق آنها مناسب مناطق بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی نیست. از طرفی تابع هدف اطمینان پذیری مورد استفاده در تحقیق آنها مقدار اطمینان پذیری در کل دوره را بالا می‌برد و توجهی به ماه‌های کم آب یا خشک ندارد که باعث می‌شود شدت شکست در این ماه‌ها افزایش یابد. اما در تحقیق حاضر تابع هدف درصد تامین نیاز سعی در بالا بردن درصد تامین نیاز در کل ماه‌ها بخصوص ماه‌های کم آب دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و استفاده از ناحیه بندی مخزن و اعمال سیاست جیره بندی، راهکاری ارائه شده است که در آن بجای افزایش اطمینان پذیری بر اساس تامین نیاز صددرصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌ها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده و رهاسازی آن در ماه‌های کم آب شدت شکست این ماه‌ها تعدیل گردد. در این ساختار برخلاف الگوریتم تکه هدفه ارائه شده توسط Rafiee Anzab *et al*. (2016)، از یک تابع چندهدفه بهره گرفته شده و همچنین برای اجرای اتوماتیک WEAP، با استفاده از کدنویسی در محیط متلب و همچنین یک میان برنامه در محیط ویژوال بیسیک ساختار بهینه ساز (MOGWO) و شبیه ساز (WEAP) به هم متصل شد. پس از انجام بهینه‌سازی، با توجه به اندازه جمعیت ۴۸ و اجرای مدل MOGWO پس از ۱۰۰۰ تکرار جواب‌های بهینه حاصل شد. نتایج مدل بهینه نشان داد میانگین درصد تامین نیاز مصارف کشاورزی منطقه مربوط به ماه‌های کم آب (جولای تا نوامبر) حدود ۶۴/۵ تا ۷۹ درصد بوده که نسبت به سناریوی توسعه اراضی حدود ۴ تا ۱۲/۳ درصد ارتقاء یافته است. مطابق با نتایج در سناریوی مرجع در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی سال‌های آخر برنامه ریزی (۲۰۴۴ تا ۲۰۵۰) در اکثر مصارف بخصوص مصارف کشاورزی درصد تامین نیاز در سه تا شش ماه خشک متوالی نزدیک به صفر است. همچنین در بقیه سال‌های خشک درصد تامین نیاز این ماه‌ها کمتر از پنج درصد است که این شرایط به هیچ وجه مطلوب نیست. اما با اجرای مدل بهینه ساز درصد تامین نیاز در ماه‌هایی که در سناریوی قبل صفر درصد بود به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد رسید و در اکثر ماه‌های خشک حدود ۴۵ درصد محاسبه شد. این امر نشان داد که مدل بهینه ساز به خوبی توانسته شدت شکست را در بدترین حالت و در سال‌هایی با سه تا شش ماه خشک متوالی کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه ساز با توجه به توابع هدف تعریف شده در آن است. نتایج نشان داد با توجه به رهاسازی جریان مطابق با الگوی بهینه مستخرج از الگوریتم بهینه‌سازی و اعمال سیاست جیره بندی در مدل بهینه ساز، مقداری از آب در ماه‌های پرآب در مخزن ذخیره گشته تا در ماه‌های کم آب بصورت جیره بندی مصرف شود. به همین دلیل درصد تامین ماه‌های پر آب کمتر از صد درصد می‌شود و نهایتا درکل دوره اطمینان پذیری پایین می‌آید. اما این راهکار با تامین بخشی از نیاز در ماه‌های بحرانی، باعث کاهش مقدار شکست و شدت شکست در ماه‌های خشک و کم آب شده و از آسیب جدی به سیستم جلوگیری می‌کند. این پژوهش نشان داد برنامه ریزی منابع آب و تخصیص به مصارف موجود تنها با تکیه بر حداکثر نمودن اطمینان‌پذیری تامین نیاز در کل دوره بخصوص در مناطق با اقلیم خشک که به ناچار در چند ماه از سال با کم آبی شدید مواجه هستیم راهکار مناسبی نبوده و منجر به ایجاد خسارات مالی و تبعات اجتماعی جبران‌ناپذیر می‌گردد. در عوض استفاده از راهکار این تحقیق منجر به مدیریت بهتر مخزن و کاهش شدت شکست در تامین مصارف در ماه‌های کم آب خواهد شد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Azari, A., Arman, A. (2020). Optimal Utilization of Water Resources in Real Time Based on NSGA-II Algorithms and Support Vector Machines (Case Study: Gavoshan Dam). Irrigation Sciences and Engineering (JISE), 43(1), 189-204.

Azari, A., Hamzeh, S., & Naderi. S. (2018). Multi-objective optimization of the reservoir system operation by using the hedging policy. *Water Resources Management*. 32(6), 2061–2078.

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

Bayesteh, M., & Azari, A. (2021). Stochastic Optimization of Reservoir Operation by Applying Hedging Rules. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 147(2): 04020099. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001312.

Celeste, A.B., & Billib, M. (2009). Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Advances in Water Resources*, 32(9), 1429-1443.

Efstratiadis, A., Bouziotas, D., & Koutsoyiannis, D. (2012). The parameterization-simulation-optimisation framework for the management of hydroelectric reservoir systems. In Hydrology and Society, *EGU Leonardo Topical Conference Series on the hydrological cycle*.

Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H.A., & Mari˜no, M.A. (2016). Application of the Firefly Algorithm to Optimal Operation of Reservoirs with the Purpose of Irrigation Supply and Hydropower Production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(10), 04016041.

Goorani, Z., & Shabanlou, S. (2021). Multi-objective optimization of quantitative-qualitative operation of water resources systems with approach of supplying environmental demands of Shadegan Wetland, Journal of Environmental Management, 292(6), 112769. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112769.

Jalali, M.R., Afshar, A., & Marino, M.A. (2006). Reservoir Operation by Ant Colony Optimization Algorithms, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 30(1), 107-117.

Jalilian, A., Heydari, M., Azari, A. and Shabanlou, S. (2022). Extracting Optimal Rule Curve of Dam Reservoir Base on Stochastic Inflow. Water Resources Management. 36 (6): 1763–1782. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03087-3.

Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., Azari, A. 2023. Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus framework. Science of The Total Environment. 860: 160419. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160419.

Koutsoyiannis, D., & Economou, A. (2003). Evaluation of the parameterization- simulation- optimization approach for the control of reservoir systems. *Water Resources Research*, 39(6), 1-17.

Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., & Karavokiros, G. (2002). A Decision support tool for the management of multi-reservoir systems. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958.

Labadie, J.W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*, 13(2), 93-111.

Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.

Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S.M., & Coelho, L.S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization, *Expert Systems with Applications*, 47, 106-119.

Moeini, R., & Afshar, M.H. (2009). Application of an Ant Colony Optimization Algorithm for Optimal Operation of Reservoirs: A Comparativ Study of Three Proposed Formulations. *Transaction A: Civil Engineering*, 16(4), 273-285.

Neelakantan, T.R., & Sasireka, K. (2015). Review of hedging rules applied to reservoir operation. *International Journal of Engineering Technology*, 7(5), 1571-1580.

Oliveira, R., & Loucks, D. (1997). Operating rules for multi-reservoir systems. *Water Resource Research*, 33(4), 839–852.

Rafiee Anzab, N., Mousavi, S.J., Rousta, B.A., & Kim, J.H. (2016). *Simulation Optimization for Optimal Sizing of Water Transfer Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 365-375.

Shourian, m., Mousavi, S.J., & Tahershamsi, A. (2008). Basin-wide Water Resources Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM. *Water Resources Management*, 22, 1347–1366.

Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghighi, A., & Madsen, H. (2013). Optimization of conventional rule curves coupled with hedging rules for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 693-698.

Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.

Zarei, N., Azari, A., & Heidari, M. M. (2022). Improvement of the performance of NSGA-II and MOPSO algorithms in multi-objective optimization of urban water distribution networks based on modification of decision space. Applied Water Science, 12(6), 133. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01610-w.

Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C., & Zhang, S. (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*, 4(1), 61-73.

Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020a). Simulating Unsaturated Zone of Soil for Estimating the Recharge Rate and Flow Exchange Between a River and an Aquifer. *Water Resources Management*, 34, 425–443.

Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020b). Multi-objective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model. *Journal of Water Resource Planning and Management (ASCE*), 146(5), 04020020.

Application of gray wolf multi-objective algorithm in optimal operation of dam reservoirs in low water areas

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The most effective use of water resources has drawn the attention of many experts because of the scarcity of water resources and the alteration in consumption habits brought on by population increase. Owing to Iran's location in a dry and semi-arid climate, better management of water scarcity conditions and the optimal operation of water resource systems are required. In dry months, significant water shortages result from reservoir water being released with the intention of boosting reliability based on full demand supply in some months.

Materials and Methods

In this study, a method is proposed in which some rainy season water is retained in the reservoir to be released in dry months to alleviate the failure in such times, based on the reservoir zoning and a multi-objective optimization system. In order to achieve this, the WEAP simulator model and the multi-objective gray wolf optimizer (MOGWO) algorithm are linked. In the linked model, the MOGWO algorithm first generates the values for the decision variables based on the model's written constraints, which are then imported into the WEAP simulator model, where the model is then performed. The objective exchange curve is then generated after the results are reviewed using the goal functions specified by the optimizer model. If the intended objectives are not achieved, the optimizer model is run once again, a fresh population is created, and it is then inserted into the simulator model. This cycle is repeated until the result is closed to the optimum value. The algorithm in such a system looks for a solution where, in terms of reservoir operation capacity, in addition to achieving adequate reliability of demand supply over the entire time, the proportion of supply of demands in dry months also increases.

Results and discussion

Finally, the role curve was assessed based on the outcomes of two scenarios, including the Reference System (RS) (based on existing conditions) and the Optimized System (OS). The RS results show that the proportion of demand supply in most uses for three to five consecutive months is equal to zero in many dry years, particularly the last years of planning, and that it is less than 5% in the remaining low-water years. The percentage of meeting the demands in such months rises to 28% to 60%, nevertheless, thanks to role curve optimization based on reservoir zoning. Also, the OS increases its percentage of meeting downstream environmental demands during months with low water levels. Based on the established objective functions in the low water and high water periods, the system enhances the withdrawal rate of the surface water and groundwater resources in comparison to the RS, given the ideal role curve performance in the OS. This study demonstrates how using this strategy improves reservoir management and lessens the severity of failure in meeting diverse demands during dry months.

Conclusion

The findings demonstrated that the optimizer model might lessen the degree of failure in the worst-case scenario and in years with three to six consecutive months without precipitation. This problem results from the optimizer model's use of the given goal functions. The findings demonstrated that some water was kept in the reservoir during the rainy seasons in order to be released as hedging during the dry months, in accordance with the application of the optimal role curve and the application of the hedging policy in the optimizer model. By meeting a portion of the demand in crucial months, this method decreased the frequency and severity of failure in dry and low-water months and guarded against significant system damage. In areas with dry climates where we ineluctably experience severe water shortages in several months of the year, this research demonstrated that planning water resources and allocating them to existing uses solely by relying on maximizing the reliability of supply over the entire period is not a suitable solution and results in irreparable financial losses and social consequences. Instead, putting the research's answer to use improves reservoir management and lessens the severity of failure to meet demand during dry months.

Keywords: Dez Dam, Gray wolf algorithm, Optimal operation, WEAP.