DOI: 10.22059/ijswr.2021.319347.668901

تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۷، مهر ۱۴۰۰ (ص ۱۷۳۳-۱۷۲۱)

(علمی – پژوهشی)

Hedging approach in Multi-Objective Simulation-Optimization of operation of Ilam Dam Reservoir using MOPSO algorithm

SEDIGHE MANSOURI[1], HOSSEIN FATHIAN[1*], ALI REZA NIKBAKHT SHAHBAZI[1], MEHDI ASADI LOUR[2], ALI ASAREH[2],

1- Department of Water Resources Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2- Department of Irrigation and Drainage, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

(Received: Feb. 19, 2021- Revised: May. 12, 2021- Accepted: May. 29, 2021)

ABSTRACT

In this research, the simulation and optimization models are integrated to apply the reservoir hedging policy. The simulation of the studied basin is executed using the WEAP model to conduct the system optimization and the multi-objective MOPSO model is utilized so that the first purpose is to maximize the percentage of supplying demands, while the second one is to minimize the violation of allowable capacities of the reservoir during the operation period. In this regard, the operation modeling from the reservoir was carried out based on the current condition for a 360-month period. Finally, by defining the optimized scenario and applying the reservoir hedging policy, the optimization of the operation from the reservoir is conducted and the results were compared with the outcomes of the reference scenario. In this study, by considering 24 decision variables including 12 hedging level variables and 12 hedging coefficient variables, the optimal answers were achieved after 1000 iterations. The results showed that the violation of the allowable capacities has not occurred in any periods, while in the reference scenario the reservoir level has reached the dead level in sequent months with more water shortage which might lead to the lack of water supply in such months and serious damages to the system. Due to the application of hedging policy in the optimized scenario, the percentage of supply in the critical months has increased between 20-35% compared to the reference scenario, which indicates a significant reduction in the failure rate in such months compared to the reference scenario.

Keywords: Hedging Policy, MOPSO, Optimization, Simulation, WEAP.

*Corresponding Author’s Email: fathian.h58@gmail.com

رویکرد جیره‌بندی در شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن سد ایلام با استفاده از الگوریتم MOPSO

صدیقه منصوری[۱]، حسین فتحیان*[۱]، علیرضا نیکبخت شهبازی[۱]، مهدی اسدی لور[۲]، علی عصاره[۲]

۱. گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲. گروه آبیاری و زهکشی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۲۲- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۸)

چکیده

در این تحقیق از ترکیب مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای اعمال سیاست جیره‌بندی مخزن استفاده گردید. شبیه‌سازی حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل WEAP برای بهره‌برداری از مخزن سد ایلام واقع بر رودخانه کنجانچم انجام شد و برای انجام بهینه‌سازی سیستم، از مدل چند هدفه MOPSO استفاده شد. به‌طوری‌که در آن، هدف اول، حداکثر نمودن درصد تأمین نیازها در مقابل هدف دوم یعنی حداقل نمودن میزان تخطی از ظرفیت‌های مجاز مخزن در طول دوره بهره‌برداری قرار گرفت. در این راستا مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن بر اساس وضع موجود بهره‌برداری منطقه و برای یک بازه ۳۶۰-ماهه صورت گرفت. در نهایت با تعریف سناریوی بهینه و اعمال سیاست جیره‌بندی مخزن، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم انجام شد و نتایج با سناریوی مرجع مقایسه گردید. در این تحقیق با در نظر گرفتن ۲۴ متغیر تصمیم شامل ۱۲ متغیر تراز جیره‌بندی و ۱۲ متغیر ضریب جیره‌بندی پس از ۱۰۰۰ تکرار جواب‌های بهینه حاصل گردید. نتایج نشان داد در سناریوی بهینه تخطی از ظرفیت‌های مجاز مخزن در هیچ دوره‌ای اتفاق نیفتاد درحالی‌که در سناریوی مرجع در ماه‌هایی که کمبود آب بیشتری وجود داشت در ماه‌های متوالی تراز مخزن به تراز مرده رسید که باعث عدم تأمین نیاز سیستم در این ماه‌ها و آسیب جدی به سیستم می‌گردد. با توجه به اعمال سیاست جیره‌بندی در سناریوی بهینه، درصد تأمین نیاز در ماه‌های بحرانی بین ۲۰-۳۵ درصد نسبت به سناریوی مرجع افزایش یافت که حاکی از کاهش قابل‌توجه شدت شکست در ماه‌های مذکور نسبت به سناریوی مرجع است.

واژه‌های کلیدی: سیاست جیره‌بندی، MOPSO، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، WEAP.

مقدمه

به منظور افزایش کارایی استفاده از منابع آب موجود در تأمین اهداف مختلف، کاربرد سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سدهای مخزنی در قالب مدل‌سازی سیستم‌های چند مخزنه و چند هدفه در سطح حوضه‌های آبریز، امری ضروری است. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد در زمینه قواعد بهره‌برداری مخازن، سیستم‌های مختلفی چون سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)، مدل آبدهی و سیاست‌های جیره‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش بهره‌برداری استاندارد (SOP) به عنوان ساده‌ترین روش بهره‌برداری مخزن شناخته شده است که توسط Loucks and van Beek (2005) برای اولین بار مطرح و پایه‌ریزی شد. بسیاری از محققان نیز از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی که بر این اساس طراحی‌شده‌اند استفاده می‌کنند. از جمله Li et al. (2015) با استفاده از مدل WEAP[۱] وضعیت آینده آب را در منطقه‌ای واقع در چین با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و پیشنهاداتی را برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح‌تر و بهتر منابع آبی جهت کمک به تصمیم‌گیرندگان در این زمینه و کاهش خطرات آتی مطرح نمودند. در سیاست بهره‌برداری[۲] (SOP)، مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای تهیه منحنی فرمان یا تعیین استراتژی‌های بهره‌برداری از مخزن بر اساس حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره و پیش‌بینی حجم جریان در مخزن در طول دوره، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در چند سال اخیر با توسعه روش‌های بهینه‌سازی و معرفی روش‌های فرا کاوشی (فرا ابتکاری) به طور عام و روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۳] (PSO) به طور خاص، بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن وارد مرحله تازه‌ای شده است. با توجه به

* نویسنده مسئول: fathian.h58@gmail.com

۱- Water Evaluation And Planning System

۲- standard operating policies

۳- particle swarm optimization

گستردگی مباحث مربوط به منابع آب، مطالعات گوناگونی در رابطه با کاربرد الگوریتم PSO در زمینه بهره‌برداری از منابع آب نظیر تحقیقات Reddy ،Nagesh Kumar and Reddy (2007) Daraeikhah et ،Izquierdo et al. (2008) ،and Kumar (2007) al. (2009) ،Zhang et al. (2011) ،Vasan (2013) و Rafiee Anzab et al. (2016) صورت پذیرفته است.

هرچند الگوریتم PSO قادر به حل مسائل پیچیده غیرخطی، غیر محدب و چند هدفه به‌صورت جمع وزنی اهداف است اما دارای بعضی اشکالات مانند در نظر نگرفتن تبادل و تضاد بین اهداف مختلف است. بخصوص در نزدیکی رسیدن به جواب بهینه در نظر گرفتن اهداف متضاد به‌صورت جداگانه باعث می‌شود به‌جای یک راه‌حل، چندین راه‌حل بر روی منحنی پارتو[1] ارائه شود که اجرای هر کدام از این راه حل‌ها بستگی به اهداف مورد انتظار دارد (Bayesteh and Azari, 2021). به همین دلیل روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) در سال‌های اخیر در زمینه‌ای مختلف منابع آب بکار گرفته شده است. برخی از توابع این الگوریتم مانند تابع crowding distance بر اساس الگوریتم NSGA-II توسعه یافته است (Deb et al., 2002). به دلیل ساختار مناسب این مدل و گزینش راه‌حل‌های برتر در هر بار تکرار معادلات بر اساس ارزیابی هر دو تابع هدف متناقض، این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل الگوریتم PSO معمولی است (Sen et al., 2017). به‌دلیل مشکلات ذکرشده در خصوص الگوریتم PSO معمولی و به‌دلیل کارایی الگوریتم MOPSO در حل مسائل پیچیده مختلف بر اساس اهداف مورد انتظار (Rezaei et al., 2017; Mousavi et al., 2017; Xilin et al., 2019; Moghaddam et al., 2020; Rezaei et al. 2020) در فرآیند بهینه‌سازی در این تحقیق از الگوریتم MOPSO بهره گرفته شد.

در بهره‌برداری از مخزن بر اساس روش SOP میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود. هنگامی که مخزن نتواند نیاز را به طور کامل تأمین کند، درصدی از آن را تأمین می‌کند. در این سیاست میزان کمبود کل به حداقل می‌رسد ولی شدت کمبودها زیاد است. این روش در مواقع خشکسالی نیاز به پاره‌ای اصلاحات دارد. بدین منظور روش‌های گوناگونی مانند قاعده جیره‌بندی توصیه شده است. در طول دوره خشکسالی یا مشرف به خشکسالی، قاعده جیره‌بندی یک روش معمول در مدیریت منابع آب است. لذا علیرغم آنکه ممکن است گاهی، امکان تأمین کل و یا بخش بیش‌تری از نیاز فراهم باشد، تنها قسمتی از خروجی مطلوب رها می‌گردد. این عمل موجب ذخیره آب برای کمبودهای شدیدتر احتمالی آتی خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر در طول دوره‌های مشرف به خشکسالی، حتی اگر نیاز را بتوان از ذخیره فعلی و ورودی به مخزن در دوره جاری تأمین نمود، پیشنهاد کاهش نیاز مطرح است. چنین کاهشی مانع از کمبودهای بزرگ‌تر در دوره‌های بعدی می‌شود. بدین ترتیب پذیرفتن یک کمبود کوچک در بازه زمانی جاری به منظور کاهش مقدار یک کمبود شدید در دوره‌های زمانی بعدی، از جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی حائز اهمیت ارزیابی گردیده است (Draper and Lund, 2004). 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). تحقیقات زیادی در زمینه اعمال سیاست جیره‌بندی برای بهبود بهره‌برداری از سیستم و تعیین سطح ذخیره‌سازی آب در مخزن صورت گرفته است (Felfelani et al., 2013; Taghian et al., 2014; Azari et al., 2018; Bayesteh and Azari, 2021). در تحقیقات ارائه‌شده توسط Felfelani et al., 2013 و Taghian et al., 2014 سیاست جیره‌بندی بر اساس تابع بهینه‌سازی تک هدفه اعمال شده است. اما در تحقیقات ارائه‌شده توسط Azari et al., 2018 و Bayesteh and Azari, 2021 جیره‌بندی مخزن بر اساس پارامترهای بهره‌برداری از مخزن و بر اساس توابع چندهدفه صورت گرفته است که باعث عملکرد واقعی‌تر سیستم در برابر اهداف پیش رو خواهد شد.

اهمیت این تحقیق در ارائه یک مدل ترکیبی مناسب (کوپل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی) بر اساس سیاست جیره‌بندی، برای بهره‌برداری بهینه مخزن در مناطق کم آب است. با استفاده از این روش، شدت شکست در تأمین نیازهای منطقه می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی در طول دوره عملیات کاهش یابد. برای دستیابی به این هدف از ترکیب الگوریتم MOPSO با مدل شبیه‌سازی سیستمی WEAP استفاده شد. هدف این تحقیق، استفاده از ترکیب معادلات ناحیه‌بندی مخزن در WEAP با توابع چندهدفه متضاد با هم در محیط MATLAB برای اعمال قواعد جیره‌بندی مخزن با تعریف دو پارامتر تراز جیره‌بندی (حجم مفید مخزن در این تراز) و ضریب (درصد) جیره‌بندی مخزن به‌عنوان متغیرهای تصمیم می‌باشد. در این راستا ساختاری نوین به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی توسعه داده شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ساختار چندهدفه برخلاف ساختار رایج برنامه‌ریزی در ایران (رهاسازی جریان تنها بر اساس منحنی فرمان سد)، دوره‌های خشکسالی یا کم‌آبی شناسایی و با

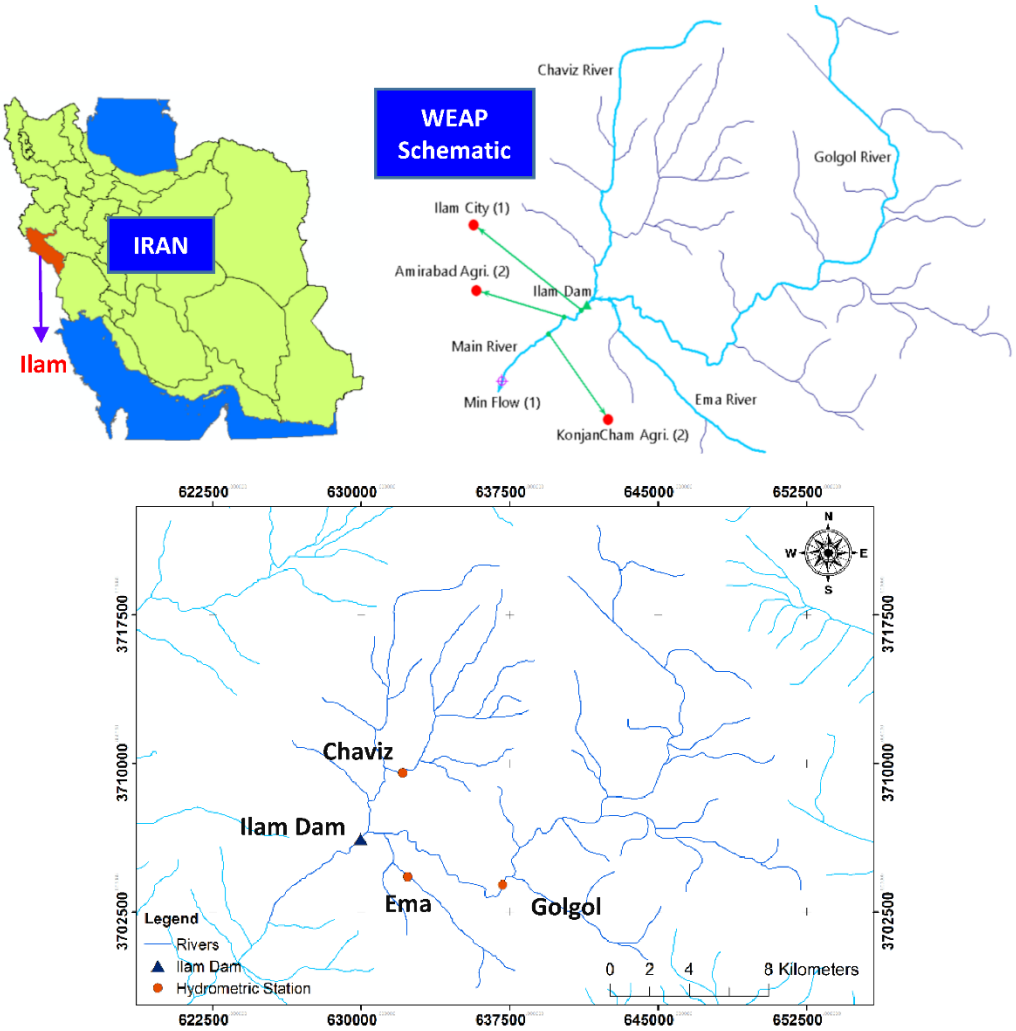
۱- Pareto curve

اعمال سیاست جیره‌بندی در مدل ترکیبی MOPSO-WEAP مقدار رهاسازی جریان از مخزن بهینه می‌گردد. با استفاده از این ساختار در بهره‌برداری واقعی مخزن می‌توان به سوالاتی چون زمان شروع و مقدار جیره‌بندی و چگونگی محدود شدن تخصیص آب در زمان‌های کم‌آبی بر مبنای وضعیت هیدرولوژی حوضه پاسخ داد طوری که سیستم دارای بالاترین میزان درصد تأمین نیازها و حداقل جریمه تخطی ناشی از عدم تأمین نیازها و تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

حوضه‌ی آبخیز سد ایلام در غرب ایران و جنوب شرقی شهرستان ایلام قرار دارد و از سه زیرحوضه گل گل و چاویز و اما تشکیل شده است. مهم‌ترین رود در این حوضه رودخانه کنجانچم می‌باشد که از اتصال دو رودخانه چاویز و گل گل تشکیل شده است (شکل ۱). سد ایلام منبع اصلی تأمین آب شرب شهر ایلام و اراضی کشاورزی امیرآباد و کنجانچم است. در مدل WEAP با استفاده از ابزارهای موجود و با توجه به نقشه‌های پایه GIS، مسیر رودخانه‌ها، محل ایستگاه‌های هیدرومتری، محل سد و مصارف مختلف رقومی شدند. شماتیک و چارچوب مدل تهیه‌شده در WEAP در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی، شماتیک و اجزای مدل WEAP

یک دوره آماری ۳۰ ساله آبدهی ثبت شده در ورودی سد ایلام که شامل دوره‌های خشک و تر بوده به عنوان جریان ورودی به مخزن سدها در نظر گرفته شد. این دوره آماری برای مقایسه وضعیت بهره‌برداری از مخزن در دو سناریوی رفرنس (ادامه وضع موجود) و سناریوی بهینه‌سازی استفاده شد. گام‌های زمانی شبیه‌سازی، ماهیانه و واحد محاسباتی، متریک در نظر گرفته شد. سری‌های زمانی داده‌های ثبت‌شده هیدرولوژیکی و هواشناسی و اطلاعات مربوط به نیاز ماهیانه مصارف (کشاورزی و شرب)،

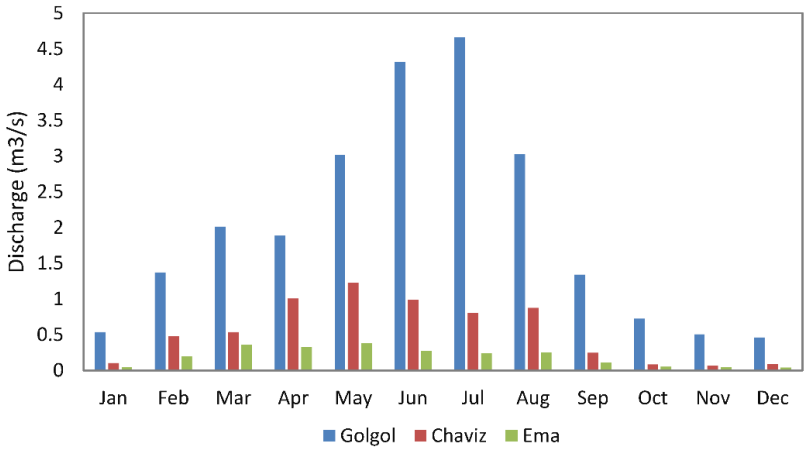
اطلاعات مخزن و محل‌های برداشت، ضرایب و پارامترهای موردنیاز و غیره به صورت فایل‌های متنی با پسوند CSV به مدل معرفی شدند. سپس اطلاعات بهره‌برداری سد ایلام مطابق با جدول (۱) در مدل وارد شد.

جدول ۱- مشخصات بهره‌برداری از سد ایلام در طول دوره بهره‌برداری

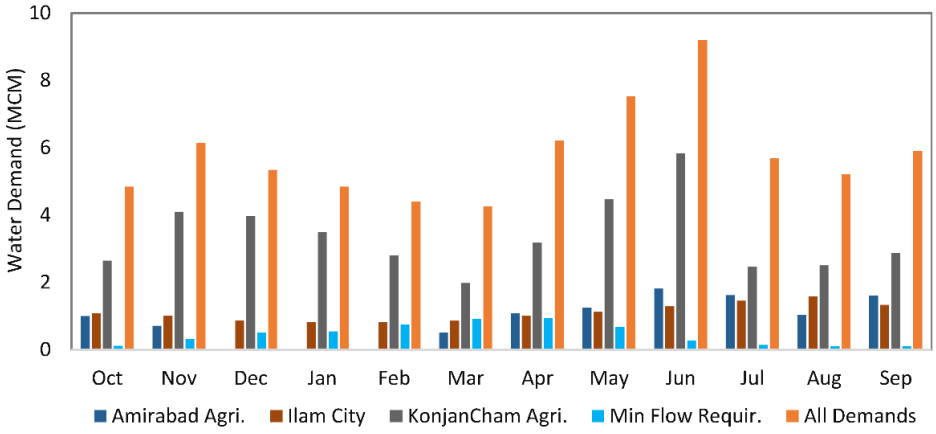
پارامتر	سد ایلام
بیشترین تراز بهره‌برداری	۹۶۰ متر
کمترین تراز بهره‌برداری	۹۳۲ متر
ظرفیت ذخیره در بیشترین تراز بهره‌برداری	۷۴/۲ میلیون مترمکعب
حجم غیرفعال	۵/۳ میلیون مترمکعب
حجم فعال	۶۸/۹ میلیون مترمکعب
حجم ذخیره اولیه (اکتبر ۱۹۹۰)	۵۰ میلیون مترمکعب

مقادیر آبدهی رودخانه در محل ورودی به سد بر اساس آبدهی رودخانه‌های واقع در بالادست سد در محل ایستگاه‌های هیدرومتری چاویز، گل گل و اما محاسبه شده و در مدل تعریف شد. میانگین آبدهی در این محل‌ها در طول دوره شبیه‌سازی در شکل (۲) ارائه شده است.

نیاز آبی اراضی دشت‌های تحت پوشش سد ایلام (دشت‌های امیرآباد و کنجانچم) و همچنین بخشی از آب شرب مورد نیاز شهر ایلام و نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست سد به عنوان مصارف سیستم در مدل تعریف شدند. مقادیر ماهیانه این مصارف در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- میانگین آبدهی ماهیانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در بالادست سد



شکل۳- میزان نیاز آبی کشاورزی، شرب و زیست‌محیطی منطقه در ماه‌های مختلف (MCM)

در این تحقیق برای تعیین جریان زیست‌محیطی، گره مربوط به حداقل جریان زیست‌محیطی در پایین دست سد مورد مطالعه و بر روی رودخانه اصلی در مدل ایجاد شد. از روش Tennant (1976) که از جمله روش‌های درجه‌بندی هیدرولوژیکی

محسوب می‌شود، برای تخمین حداقل جریان زیست‌محیطی پایین دست بر اساس جریان طبیعی رودخانه استفاده شد. با توجه به اطلاعات تبخیر از سطح آزاد مخزن سد ایلام و در نظر گرفتن میزان بارندگی روی سطح مخزن، تبخیر خالص از سطح آزاد مخزن محاسبه شد که در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- متوسط ماهیانه تبخیر خالص از سطح آزاد مخزن سد ایلام (میلی‌متر)

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum
تبخیر خالص (mm)	۱۴۴/۸	۹۲	۶۲	۳۴/۶	۳۵	۵۴/۶	۸۸/۶	۱۲۵/۳	۱۹۰/۵	۲۵۵/۷	۲۱۳/۸	۱۹۲/۲	۱۴۸۹/۱

ساختار مدل بهره‌برداری چندهدفه پیشنهادی

در این تحقیق برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) استفاده شد. برای بهینه‌سازی سیستم، این الگوریتم با استفاده از یک VBScript که توسط نویسندگان توسعه داده شده با مدل ویپ کوپل شد. با اجرای این اسکریپ، متغیرهای تصمیم‌گیری تولید شده توسط MOPSO در مسیر منطقه فعال WEAP قرار می‌گیرد. پس از آن سناریو فعال WEAP که همان سناریوی بهینه‌سازی بر اساس قواعد جیره‌بندی است به طور خودکار اجرا شد. نتایج WEAP برای ارزیابی نتایج به مسیر MATLAB منتقل شد. سپس متغیرهای جدید تولید شده و این فرآیند تا رسیدن به بهترین جواب بر اساس ارزیابی توابع هرف ادامه می‌یابد. در نهایت پس از همگرایی الگوریتم و رسیدن به راه حل بهینه، WEAP به طور خودکار بسته خواهد شد و تغییرات در منطقه فعال WEAP ذخیره خواهد شد.

الگوریتم چند هدفه ازدحام ذرات (MOPSO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یکی از روش‌های الگوریتم‌های هوش جمعی[۱]، است که برای حل مسائل تک هدفه، در سال ۱۹۵۵ توسط Kennedy and Eberhart معرفی گردید. در الگوریتم PSO، هر جواب به صورت یک ذره در نظر گرفته می‌شود که با توجه به سرعت‌های هر ذره و مجموعه در فضای تصمیم، به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند. در محیط مسئله در حال جست‌وجو است. حرکت هر ذره در این فرآیند، تحت تأثیر سه عامل موقعیت کنونی ذره، بهترین موقعیتی که ذره تا کنون به آن رسیده‌است (Pbest) و بهترین موقعیتی که بهترین عضو مجموعه تاکنون به آن رسیده است(Gbest)، است. در هر تکرار متناظر با هر ذره یک تابع هدف محاسبه می‌شود. در تکرار اول، موقعیت اولیه هر ذره به عنوان Pbest و ذره متناظر با بهترین مقدار تابع هدف، به عنوان Gbest انتخاب می‌شود. در تکرارهای بعدی چنانچه مقدار تابع هدف جدید هر ذره بهتر از مقدار قبلی باشد، موقعیت ذره جدید به عنوان Pbest انتخاب خواهد شد و درغیر این صورت، موقعیت ذره در تکرار قبلی به عنوان Pbest شناخته می‌شود. در مورد Gbest نیز محاسبه مشابهی صورت می‌گیرد با این تفاوت که این بار مقایسه بین کلیه ذرات مجموعه در کل تکرارها انجام خواهد شد. در فرآیند تکاملی این الگوریتم، هر ذره رفتار اجتماعی خود را با توجه به رفتار سایر ذرات تکامل می‌بخشد و به سوی مقصد بهینه حرکت می‌کند.

شکل اولیه الگوریتم PSO که در سال ۱۹۹۷ توسط Kennedy and Eberhart استفاده شد مطابق روابط (۱) و (۲) است. اگر در یک مسئله D بعدی، موقعیت i امین ذره جمعیت را با $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{iD})^T$ ، سرعت این ذره را با $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{iD})^T$ و شماره را با n نشان دهیم، آنگاه خواهیم داشت:

(رابطه ۱)

$$V_{id}^{n+1}=V_{id}^{n}+c_1 r_1^n\left(pbest_{id}^{n}-X_{id}^{n}\right)+c_2 r_2^n\left(gbest_{d}^{n}-X_{id}^{n}\right)$$

(رابطه ۲)

$$X_{id}^{n+1}=X_{id}^{n}+V_{id}^{n}$$

شی و ابرهارت در سال ۱۹۹۸ برای بهبود در همگرایی الگوریتم PSO، روابط فوق را به شکل ذیل تغییر دادند:

(رابطه ۳)

$$V_{id}^{n+1}=\chi.[w.V_{id}^{n}+c_1 r_1^n\left(pbest_{id}^{n}-X_{id}^{n}\right)+c_2 r_2^n\left(gbest_{d}^{n}-X_{id}^{n}\right)$$

(رابطه ۴)

$$X_{id}^{n+1}=X_{id}^{n}+V_{id}^{n}$$

که در آن، پارامتر χ ، به نام ثابت انقباض و برای کنترل اندازه سرعت است به‌طوری‌که مقادیر بزرگ آن باعث افزایش فضای تصمیم خواهد شد و بالعکس. c1 و c2، ضرایب ثابت و مثبتی می‌باشند که فاکتور وزنی نام دارند و معمولاً بین بازه ۱/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته می‌شوند. هر چه مقدار این ضرایب بزرگتر باشد، سرعت همگرایی افزایش خواهد یافت و بالعکس. r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰،۱) می‌باشند. پارامتر w، وزن اینرسی نامیده می‌شود که برای کنترل تأثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی الگوریتم است و تعادلی بین مقادیر بهینه کلی و محلی برقرار می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت همگرایی، شدیداً به این پارامتر بستگی دارد و هر چه پارامتر w مقدار

۱ Swarm Intelligence

بیشتری داشته باشد، جستجوی کلی افزایش می‌یابد و از طرفی با کاهش مقدار آن، میزان جستجوی محلی افزایش می‌یابد. مقدار w در هر تکرار طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$w= w_{max}-\frac{(w_{max}-w_{min})\times n}{Iter_{max}} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن، W_{max} وزن اینرسی در ابتدای جستجو، W_{min} وزن اینرسی در انتهای جستجو، n شماره تکرار فعلی و $Iter_{max}$ تعداد کل تکرارها است. همچنین برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم PSO، لازم است مقدار نهایی سرعت ذره به بازه $[-V_{max}$, $V_{max}]$ محدود شود. بعدها الگوریتم MOPSO بر اساس ساختار تک هدفه آن توسعه پیدا کرد.

برای ارزیابی عملکرد سیستم در صورت اجرای راه‌حل‌های پیشنهاد شده در هر تکرار الگوریتم، از یک تابع چندهدفه استفاده شد طوری که هدف اول، حداکثر نمودن درصد تأمین نیازهای طرح در طی دوره برنامه‌ریزی در مقابل هدف دوم، یعنی حداقل نمودن میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن (تابع خسارت) در طول دوره بهره‌برداری قرار گرفت.

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

توابع هدف:

۱- حداکثر نمودن درصد تأمین نیازها

$$F_1 = Maximize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(COV_{zdt})) = Maximize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(\frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}})) \quad \text{(رابطه۶)}$$

به دلیل اینکه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOPSO به دنبال یافتن کمینه توابع هدف است، می‌توان معادله (6) را به صورت معادله (۷) تعریف کرد:

$$F_1 = Minimize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(1 - COV_{zdt})) = Minimize(\sum_{z=1}^{m}\sum_{d=1}^{k}\sum_{t=1}^{n}(1 - \frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}}) \quad \text{(رابطه۷)}$$

که در رابطه (۷):

COV_{zdt}: درصد تأمین نیاز d در دوره t در منطقه z بصورت اعشاری

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

MD_{zdt}: حجم کل آب موردنیاز، نیاز d در دوره t در منطقه z

۲- تابع هدف دوم : حداقل نمودن میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن:

$$F_2 = Minimize(\sum_{R=1}^{k}\sum_{t=1}^{n} Max((1 - \frac{S_{tR}}{S_{min_R}}),0)) \quad \text{(رابطه۸)}$$

که در آن:

S_{tR} : حجم ذخیره مخزن سد R در زمان t

S_{min_R} : حجم مخزن سد R در تراز حداقل بهره‌برداری در دوره t

محدودیت‌ها:

(رابطه ۹)

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs} \quad , \quad t = 1,...,m\times y, \quad z = 1,...,nz \quad s = 1,...,ns$$

RS_{tzs} : حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z

nz: تعداد مناطق نیاز

ns: تعداد بخش‌های مصرف کننده آب در هر منطقه نیاز

m: تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی در هر سال

y : تعداد سال‌های دوره برنامه‌ریزی

(رابطه ۱۰)

$$ARS_{tzs} = \begin{cases} DM_{tzs} & \text{if } \left(TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs}\right) \geq DM_{tzs} \\ \left(TSR_t - \sum_{z=1}^{z-1}\sum_{s=1}^{s} DM_{tzs} - \sum_{z=1}^{z}\sum_{s=1}^{s-1} DM_{tzs}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z = IZ(1),...,IZ(nz) \qquad S = IS(1),...,IS(ns)$$

ARS_{tzs} : میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z (با در نظر گرفتن اولویت نیاز مصارف)

$$TDF_{tzs} = DM_{tzs} - ARS_{tzs} \quad \text{(رابطه۱۱)}$$

TDF_{tzs}: حجم کل کمبود آب بخش s در دوره t از منطقه z

$$M1 < Tb1 < N1 \quad \text{(رابطه۱۲)}$$

Tb1: تراز جیره‌بندی سد ایلام (متر)

M1: تراز غیرفعال سد ایلام (متر)

N1 : تراز حداکثر سد ایلام (متر)

در بدنه مدل بهینه‌سازی MOPSO، برای ناحیه بندی مخزن ۱۲ متغیر تراز جیره‌بندی در مخزن و ۱۲ متغیر ضریب جیره‌بندی به صورت ماهیانه تعریف شد. این ضرایب به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری (۲۴ متغیر) به مدل معرفی گردید. دو سناریو شامل سناریوهای مرجع (ادامه وضع موجود) و بهینه‌سازی در مدل اعمال گردید و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفت.

سناریوی مرجع: این سناریو بر اساس شرایط فعلی بهره‌برداری توسعه یافته است.

۱- شروع سال شبیه‌سازی در آن از اکتبر ۱۹۹۰ تا سپتامبر

۲۰۱۹ می‌باشد.

۲- بهره‌برداری از سیستم بر اساس وضع موجود و به روش SOP انجام گرفت.

۳- سیستم ملزم به رعایت حداقل جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست سد گردید و در نهایت، تأمین آب شرب، جریان زیست‌محیطی و مصارف کشاورزی دشت‌ها به ترتیب با اولویت‌های ۱، ۲ و ۳ در نظر گرفته شد.

سناریوی بهینه‌سازی:

این سناریو بر اساس سناریو مرجع پایه‌گذاری شده و دارای ویژگی های زیر است:

۱- طول دوره بهره‌برداری و اولویت‌های تخصیص مشابه سناریو مرجع در نظر گرفته شد.

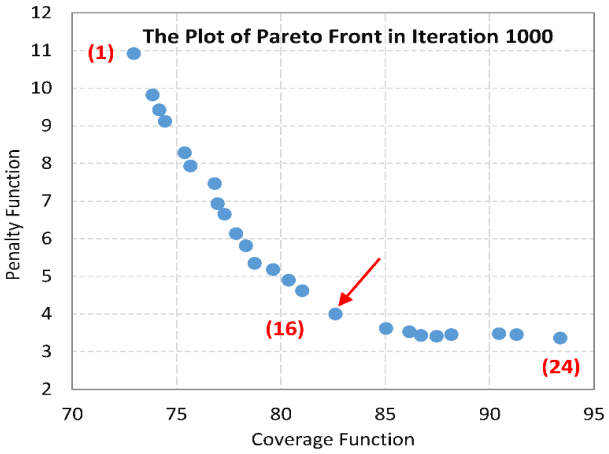
۲- نیازهای شرب و کشاورزی مطابق با سناریو مرجع لحاظ گردید و همچنین دبی‌های ورودی به سیستم مشابه با سناریو مرجع است.

۳- در این سناریو از ضرایب جیره‌بندی بهینه‌شده در مقیاس ماهیانه استفاده شد.

۴- مقادیر تخصیص به هرکدام از نیازها در ماه‌های مختلف، با توجه به مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و بر اساس توابع هدف مورد نظر، در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

در سناریوی بهینه، اجراهای مکرر مدل نشان داد برای رسیدن به نتایج بهتر، جمعیت اولیه کروموزوم‌ها باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد که در این تحقیق تعداد جمعیت اولیه در مدل در حدود ۴۸ انتخاب شد. نتایج نشان داد که در تکرارهای پایین‌تر میزان تابع Coverage و تابع خسارت (جریمه)، هر دو تغییرات محسوس دارند. اما در تکرارهای بالاتر دامنه تغییرات تابع Coverage ثابت شد و مدل بر روی کاهش جریمه متمرکز شد. با توجه به پیچیدگی مسئله و تعداد متغیرهای زیاد، تعداد تکرار الگوریتم جهت رسیدن به همگرایی در حدود ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. در نهایت پس از انجام بهینه‌سازی، با توجه به اندازه جمعیت ۴۸ و اجرای مدل MOPSO برای ۱۰۰۰ تکرار، جواب‌های بهینه حاصل شد و منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو[1]) بین اهداف بهینه‌سازی (حداکثرسازی درصد تامین نیاز و حداقل‌سازی جریمه ناشی از تخطی سیستم از ظرفیت‌های مجاز مخزن) به دست آمد. مطابق با روش الگوریتم MOPSO، در هر تکرار بهترین جواب‌ها بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف انتخاب می‌شوند و تحت عنوان مجموعه بهینه F_1 جهت انتقال به نسل بعد ذخیره می‌گردند. نقاط ترسیم شده در گراف پارتو همان جواب‌های بهینه مدل بوده و محورهای این گراف توابع هدف مورد نظر می‌باشند. این منحنی بر اساس مجموعه ۲۴ جواب بهینه بر اساس توابع هدف F_1 و F_2 در آخرین تکرار در شکل (۴) نشان داده شده است.



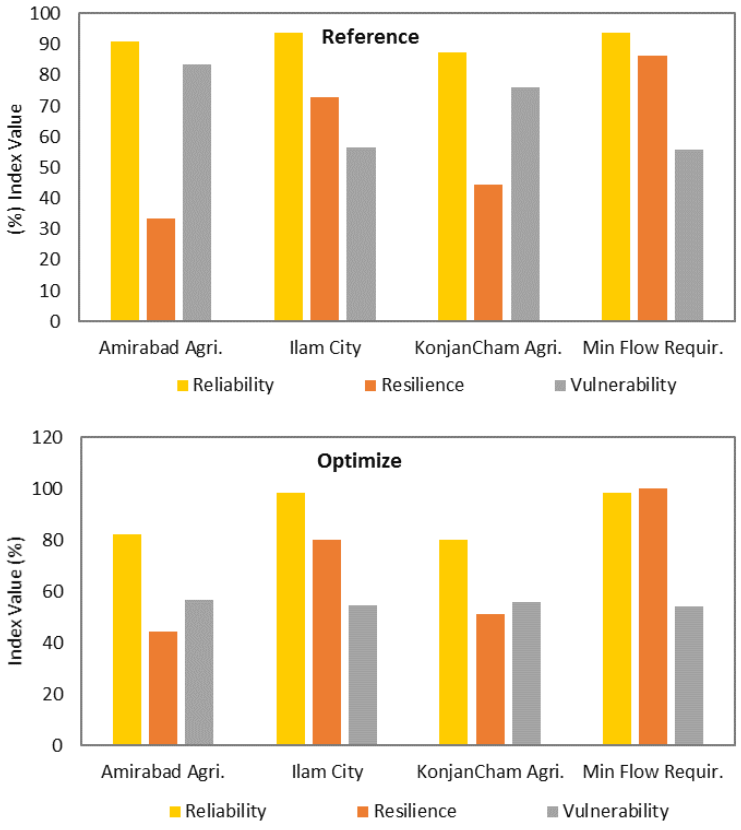
شکل ۴- منحنی تبادل بهینه بین اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو) در تکرار ۱۰۰۰

از بین ۲۴ جواب ارائه شده در منحنی پارتو در آخرین تکرار الگوریتم، با انتخاب جواب شماره ۱، مقدار Coverage Function دارای کمترین مقدار خواهد بود که مناسب است اما مقدار Penalty Function دارای بیشترین مقدار خواهد بود که به هیچ وجه مطلوب نیست. با انتخاب جواب شماره ۲۴، مقدار مطلوبیت این دو تابع برعکس خواهد بود و این بار مقدار Coverage Function دارای بیشترین مقدار خواهد شد که از این نظر نامطلوب است. لذا بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف، راه‌حلی که بطور نسبی در مقایسه با سایر راه‌حل‌ها دارای مناسب‌ترین مقدار برای هر دو تابع هدف بود به‌عنوان جواب برتر انتخاب شد (راه‌حل شماره ۱۶). متغیرهای تصمیم بهینه پیشنهادی توسط این راه‌حل در مدل آب سطحی ویپ وارد شده و نتایج حاصل از آن بررسی شد.

شکل (۵) مقادیر اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در سناریوهای رفرنس و بهینه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۵)کمترین مقدار اطمینان‌پذیری مربوط به مصارف کنجانچم و امیرآباد می‌باشد که در سناریوی رفرنس به ترتیب در حدود ۸۷/۵ و ۹۰/۸ و در سناریوی بهینه به‌ترتیب در حدود 80 و 82.5 درصد می‌باشد. علت اینکه میزان اطمینان‌پذیری نیازها در سناریوی بهینه تا حدودی کمتر شده است این است که

1 Pareto-optimal Front

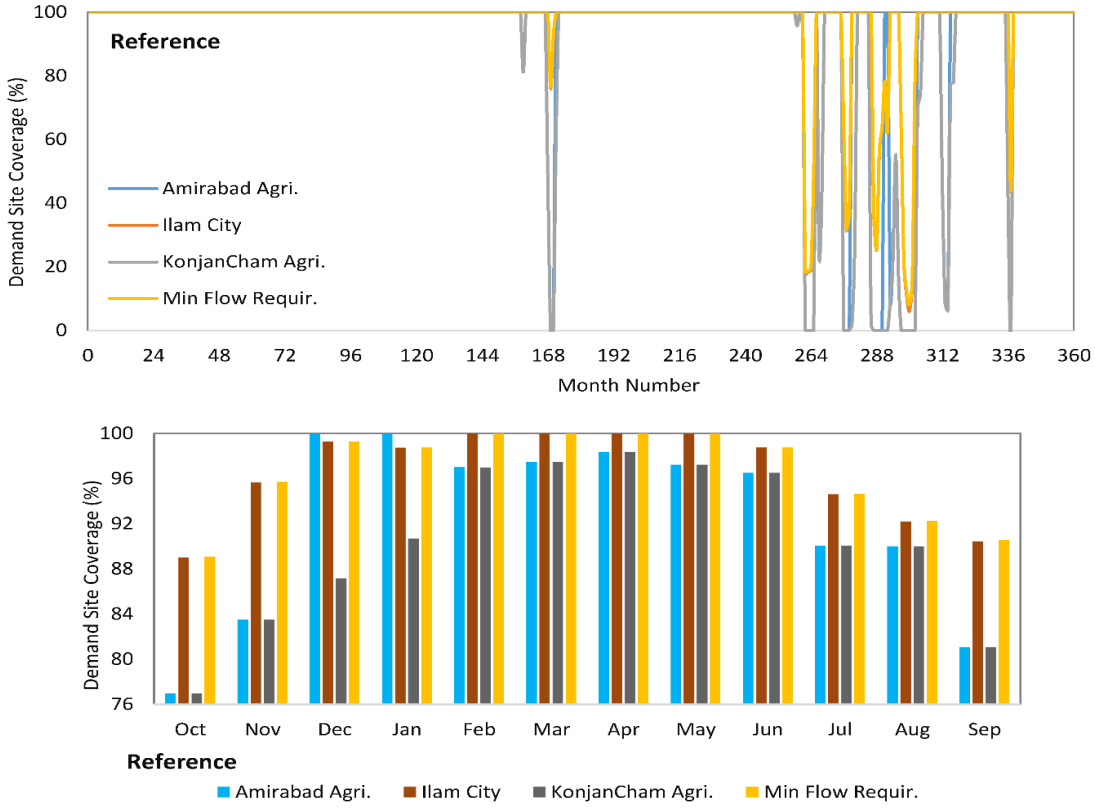
با توجه به چند هدفه بودن تابع هدف در الگوریتم بهینه‌ساز و اعمال قواعد جیره‌بندی، مقداری از جریان رودخانه در ماه‌های پرآب در مخزن ذخیره‌شده و رهاسازی نمی‌شود تا برای افزایش درصد تامین نیاز مصارف در ماه‌های کم آب و بحرانی اختصاص یابد. این امر باعث پایین آمدن درصد تأمین نیاز در ماه‌های پرآب و تا حدودی باعث کاهش اطمینان‌پذیری مصارف می‌شود اما در نهایت سبب افزایش درصد تأمین نیاز در ماه‌های بحرانی و کم آب و کاهش شدت شکست در این ماه‌ها می‌گردد. همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد بهینه‌سازی سیستم بر اساس قواعد جیره‌بندی باعث می‌شود برگشت‌پذیری سیستم بطور فراوان‌ای نسبت به سناریوی مرجع افزایش یابد و توانایی سیستم به برگشت از شرایط شکست به شرایط مطلوب بهبود پیدا کند. همچنین میزان آسیب‌پذیری سیستم در سناریوی بهینه پس از اعمال قواعد جیره‌بندی نسبت به سناریوی مرجع کاهش قابل‌توجهی دارد که این امر به دلیل تخصیص مقداری از آب ماه‌های پرآب به ماه‌های کم آب و کاهش شدت کمبود در این ماه‌ها در سناریوی بهینه است.



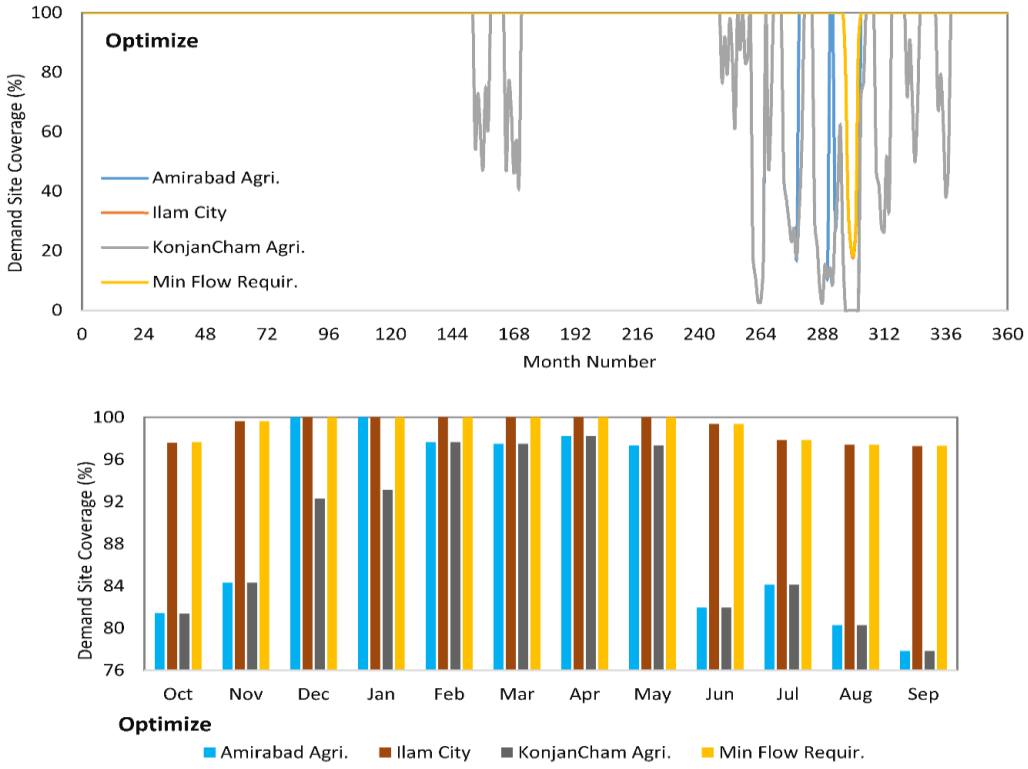
شکل ۵- مقادیر شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری هر کدام از مصارف مختلف در سناریوهای مرجع و بهینه (MOPSO)

مقایسه درصد تأمین نیاز مصارف مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) در سناریوهای رفرنس و بهینه نشان می‌دهد در سناریوی بهینه با اعمال جواب بهینه حاصل از الگوریتم MOPSO (راه حل شماره ۱۶)، با توجه به اعمال سیاست جیره‌بندی در سیستم، مقدار درصد تأمین نیاز مصارف مختلف در ماه‌های بحرانی و کم آب نسبت به سناریوی رفرنس تا حدودی افزایش یافته است و از تعداد ماه‌های با درصد تأمین نیاز صفر به شدت کاسته شده است. لذا اعمال سیاست جیره‌بندی در قالب الگوریتم بهینه‌سازی باعث کاهش شدت شکست در ماه‌های کم آب شده که باعث می‌شود از تحمیل خسارات زیاد به کل سیستم در این ماه‌ها اجتناب شود. بررسی میانگین درصد تأمین نیاز در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد کمترین مقدار درصد تأمین نیاز در سناریوی بهینه مربوط به ماه‌های سپتامبر و اکتبر به میزان ۸۱/۱ و ۸۱/۴ درصد بوده که نسبت به سناریوی رفرنس به ترتیب به میزان ۳ و ۴/۴ درصد افزایش یافته است. لذا در کل دوره بهره‌برداری، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر قواعد جیره‌بندی، بیشترین کارایی خود را در افزایش درصد تأمین نیاز در ماه‌های کم آب داشته تا از شکست کامل در این ماه‌ها جلوگیری کند. نتایج نشان می‌دهد مدل کوپل شده شبیه‌ساز-بهینه‌ساز تنها به دنبال افزایش درصد تأمین نیاز نبوده و علاوه بر در نظر داشتن حداکثرسازی تأمین نیاز در کل دوره بهره‌برداری، هدف حداقل سازی جریمه ناشی از تخطی از ظرفیت‌های مجاز مخزن را نیز در نظر داشته است. طوری که

سیستم پس از افزایش درصد تأمین نیازها تا حد امکان کمترین
میزان تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری را داشته باشد.



شکل ۶- درصد تأمین نیاز (پوشش تقاضا) در کل دوره بهره‌برداری در سناریوی مرجع

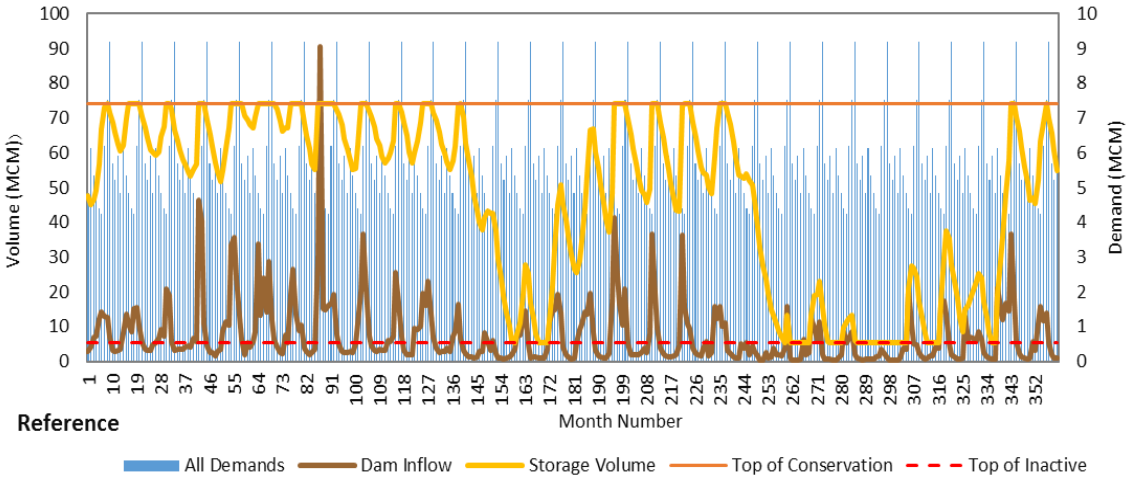


شکل ۷- درصد تأمین نیاز (پوشش تقاضا) در کل دوره بهره‌برداری در سناریوی بهینه‌سازی

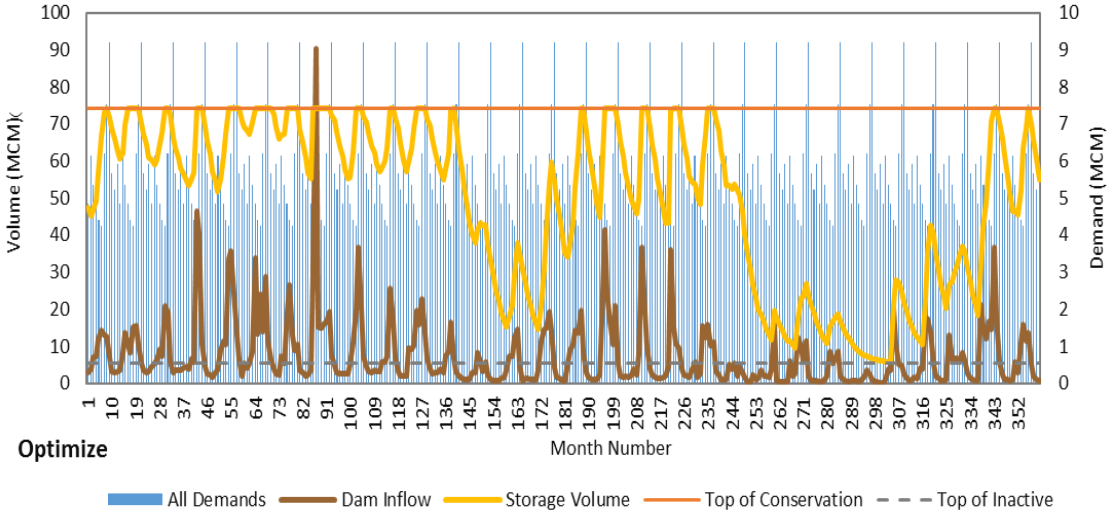
شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد در سناریوی مرجع که مربوط به اجرای سیاست بهره‌برداری استاندارد ((SOPاست با

توجه به جریان ورودی به مخزن و مجموع نیازها، حجم مخزن در طول دوره بهره‌برداری در ماه‌های متوالی در سال‌های کم آب به حجم مرده مخزن می‌رسد و عملاً جریانی برای رهاسازی در مخزن باقی نمی‌ماند. این امر با توجه به متوالی بودن این ماه‌های بحرانی، باعث ایجاد خسارات جبران‌ناپذیری در کل سیستم خواهد شد. در سناریوی بهینه با توجه به رهاسازی جریان بر اساس قواعد جیره‌بندی بهینه و ذخیره بخشی از جریان در مخزن در تمامی ماه‌های بحرانی، علاوه بر تأمین نیازها، از رسیدن تراز آب در مخزن به تراز مرده جلوگیری می‌گردد.

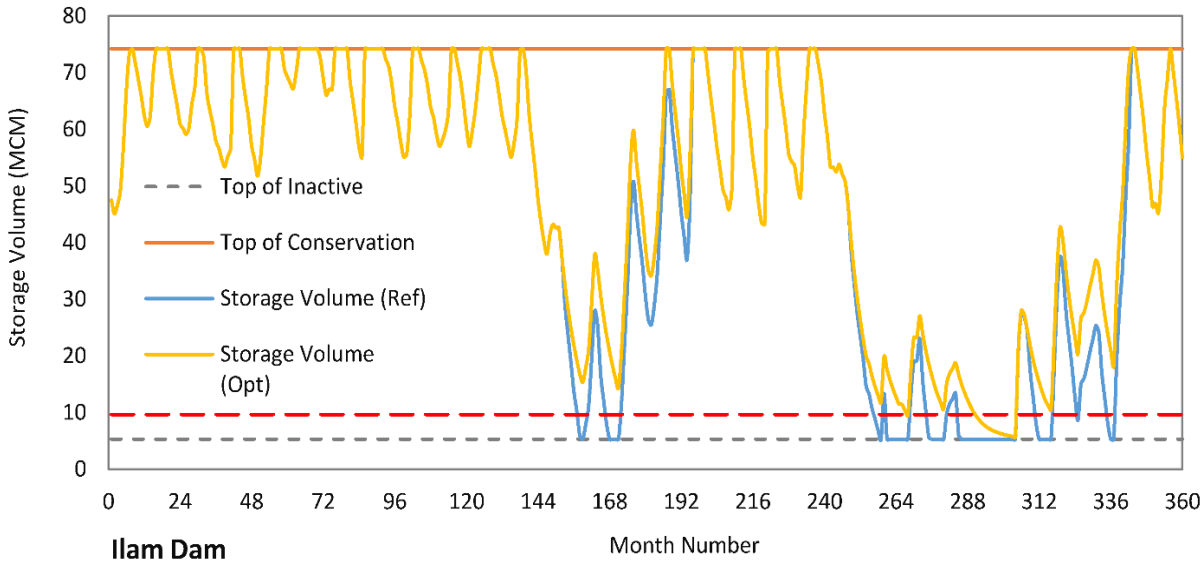
همچنین شکل (۱۰) عملکرد مخزن در دو سناریوی رفرنس و بهینه را در طول دوره بهره‌برداری (۳۶۰ ماه) نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در سناریوی بهینه بر اساس اهداف تعریف‌شده و با در نظر گرفتن اهداف بهینه‌سازی، در برخی از ماه‌ها که نیاز کمتری به رهاسازی جریان برای مصارف پایین‌دست بوده، مقداری آب را در مخزن سد ذخیره نموده است تا در ماه‌های کم آب رهاسازی گردد. همچنین جریمه در نظر گرفته‌شده در کل سیستم در تابع هدف دوم باعث شده تا مخزن کمترین تعدی را از تراز حداقل بهره‌برداری داشته باشد. شکل (۸) نشان می‌دهد بر اساس سیاست بهره‌برداری استاندارد در سناریوی رفرنس، تراز آب در مخزن در طول دوره بهره‌برداری ۳۰ ساله بارها و بارها به تراز مرده مخزن رسیده است. این در حالی است که در سناریوی بهینه در کل دوره بهره‌برداری تراز آب در مخزن هیچ‌گاه به تراز مرده نرسیده است.



شکل ۸- منحنی تغییرات حجم مخزن در قیاس با ورودی به سد و نیاز ماهیانه سیستم برحسب میلیون مترمکعب (سناریوی مرجع)



شکل ۹- منحنی تغییرات حجم مخزن در قیاس با ورودی به سد و نیاز ماهیانه سیستم برحسب میلیون مترمکعب (سناریوی بهینه‌سازی)



شکل ۱۰- میزان تغییرات ذخیره مخزن سد ایلام در طول دوره بهره‌برداری در سناریوهای مرجع و بهینه (MCM)

همچنین در سناریوی بهینه، به دلیل اعمال ضریب جیره‌بندی و اجرای تابع جریمه در طول دوره برنامه‌ریزی، تا حد امکان به‌جز چند ماه، میزان ذخیره مخزن از میزان ذخیره در حداقل تراز بهره‌برداری سد پایین‌تر نیامده است. این امر کمک می‌کند تا در شرایط خشکسالی شدید، با اعمال جیره‌بندی آب حجم ذخیره مخزن به خوبی مدیریت شود طوری که علاوه به رسیدن به اطمینان‌پذیری تأمین نیاز، شدت شکست‌ها در ماه‌هایی که با کمبود آب شدید مواجه هستیم کاهش یابد.

بر این اساس می‌توان اذعان کرد که اجرای سیاست جیره‌بندی در مخازن واقعی با استفاده از دو پارامتر تراز جیره‌بندی و ضریب جیره‌بندی نتایج رضایت بخشی به همراه خواهد داشت. طوری که در طول دوره بهره‌برداری منجر به کاهش تعداد ماه‌های شکست و شدت شکست در تأمین نیازها خواهد شد. تحقیقات انجام‌شده توسط Azari et al., 2018 و Bayesteh and Azari, 2021 نیز بر اساس همین رویکرد انجام گرفته است. در تحقیقات این محققان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II[1] و MOICA[2] استفاده شده است و نتایج حاکی از توانایی این روش در مدیریت بهتر مخزن در شرایط بحرانی و دوره‌های کم آب داشت. این امر در مخزن سد ایلام با تعیین مقدار بهینه این پارامترها با استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی MOPSO با مدل شبیه‌ساز WEAP به‌خوبی اثبات شد. در اصل با استفاده از این روش با پارامتریزه کردن مخزن بر اساس این متغیرها، می‌توان رهاسازی مخزن را در شرایط کم‌آبی بهینه کرد.

نتیجه‌گیری

مدل توسعه داده‌شده بر اساس ترکیب الگوریتم چند هدفه MOPSO و مدل شبیه‌سازی مبتنی بر سیاست جیره‌بندی قابلیت و کارایی مناسبی در حل مسائل پیچیده و کاملاً غیرخطی و ارائه جواب‌های بهینه دارد. نتایج نشان داد با در نظر گرفتن سیاست جیره‌بندی در سناریوی بهینه، درصد تأمین و اعتمادپذیری اکثر نیازها در مقایسه با سناریوی مرجع، افزایش داشته است. مدل کوپل شده این قابلیت را داشته که علاوه بر ارائه راهکار بهینه با حداکثر اطمینان‌پذیری و حداقل جریمه، شدت شکست در ماه‌های خشک را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده است. نویسندگان این تحقیق ترجیح دادند برای آزمودن عملکرد مدل ترکیبی مبتنی بر قواعد جیره‌بندی بجای داده‌های تصادفی، از داده‌های واقعی ثبت شده استفاده کنند. در این صورت پس از اتمام الگوریتم و استخراج متغیرهای بهینه، ارتباط معناداری بین جریانات ماهیانه ورودی به مخزن، حجم ذخیره آب در مخزن، نیازهای پایین‌دست (به‌عنوان متغیرهای مستقل) و متغیر میزان رهاسازی بهینه (به‌عنوان متغیر وابسته) وجود خواهد داشت. از روش ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان برای کنترل و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن در مناطق خشک و کم آب استفاده کرد. مزیت این مدل نسبت به مدل‌های بهینه‌سازی استوکستیک بدون قواعد جیره‌بندی در این است که علاوه بر تأمین نیاز مناسب ماه‌های پرآب، شدت شکست و میزان کمبود در ماه‌های خشک را به‌خوبی کاهش می‌دهد و از طرفی از خالی شدن مخزن در این ماه‌ها نیز جلوگیری می‌کند. می‌توان گفت اگرچه درصد بالای

۱- Non Dominated Sorting Genetic Algorithm

۲- Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm

اعتمادپذیری همواره از نظر بهره‌برداران یک امتیاز مثبت به شمار می‌رود، اما در شرایط خشکسالی کاملاً توجیه دارد که از درصد اعتمادپذیری سیستم کاسته و در سال‌های پرآب و قبل از شروع خشکسالی میزان آب کمتری را به نقاط مصرف تخصیص داد تا با ذخیره بخشی از آب در مخزن از وقوع شرایط بحرانی مانند خالی شدن مخزن در سال‌های کم آب جلوگیری نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

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

Bayesteh, M., and Azari, A. (2021). Stochastic Optimization of Reservoir Operation by Applying Hedging Rules. Journal of Water Resources Planning and Management, 147(2), 04020091-9.

Daraeikhah, M., Meraji, S.H., and Afshar, M.H. (2009). Application of Particle Swarm Optimization to Optimal Design of Cascade Stilling Basins. Scientia Iranica, 16(1), 50-57.

Deb, k., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Trans Evolutionary Computing, Indian. 6(2), 182–197.

Draper, A.J., and Lund, J.R. (2004). Optimal hedging and carry over storage value. Waterce Resource Planning and Management, ASCE, 130(1), 83–87.

Felfelani, F., Jalali Movahed, A., and Zarghami, M. (2013). simulating hedging rules for effective reservoir operation by using system dynamics: a case study of Dez Reservoir, Iran. Lake and Reservoir Management. 29(2), 126-140.

Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., and Fuertes, V. S. (2008). Design optimization of wastewater collection networks by PSO. Computers & Mathematics with Applications, 56(3), 777-784.

Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.L., and Wang, Y. (2015). Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. Ocean & Coastal Management. 106, 97-109.

Loucks, D.P., and van Beek, E. (2005). Water Resources Systems Planning and Management, An Introduction to Methods, Models and Applications. UNESCO Publication, PP: 677.

Moghaddam, A., Afsharnia, M., and Peirovi Minaee, R. (2020). Preparing the optimal emergency response protocols by MOPSO for a real-world water distribution network. Environmental Science and Pollution Research, 27(2), 30625–30637.

Mousavi, S.J., Anzab, N.R., Asl-Rousta, B., and Kim, J.H. (2017). Multi-Objective Optimization-Simulation for Reliability-Based Inter-Basin Water Allocation. Water resources management, 31(9), 1-20.

Nagesh Kumar, D., and Janga Reddy, M. (2007). Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, 133(3), 192-201.

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

Rafiee Anzab, N., Mousavi, S.J., Rousta, B.A., and Kim, J.H. (2016). Simulation optimization for optimal sizing of water transfer systems. In Harmony Search Algorithm (pp. 365-375): Springer.

Reddy, M.J., and Kumar, D.N. (2007). Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. Hydrological Sciences Journal, 52(4), 686-701.

Rezaei, F., Safavi, H.R. and Zekri, M. (2017). A Hybrid Fuzzy-Based Multi-Objective PSO Algorithm for Conjunctive Water Use and Optimal Multi-Crop Pattern Planning. Water resources management, 31, 1139–1155.

Rezaei, F. and Safavi, H.R. (2020). f-MOPSO/Div: an improved extreme-point-based multi-objective PSO algorithm applied to a socio-economic-environmental conjunctive water use problem. Environmental Monitoring Assessment. 192(12): 767. DOI: 10.1007/s10661-020-08727-y.

Sen, G.D., Sharma, J., Goyal, G.R., and Singh, A.K. (2017). A multi-objective PSO (MOPSO) algorithm for optimal active power dispatch with pollution control. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 4(3), 113-119.

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

Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghighi, A., and Madsen, H. (2014). Optimization of Conventional Rule Curves Coupled with Hedging Rules for Reservoir Operation. 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.

Xilin, Z., Yuejin, T., and Zhiwei, Y. (2019). Resource allocation optimization of equipment development task based on MOPSO algorithm. Journal of Systems Engineering and Electronics, 30(6), 1132– 1143.

Vasan, A. (2013). Optimal Reservoir Operation for Irrigation Planning Using the Swarm Intelligence Algorithm. Metaheuristics in water, Geotechnical and Transport Engineering, 147-165.

Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C.T., and Zhang, S.Q. (2011). Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. Water Science and Engineering, 4(1), 61-74.