

Research Article

Multi-Objective Simulation-Optimization for Water Resources Management and Uses in Multi-dam Systems in Low-water Regions

M Najafi¹, M Najarchi^{2*}, S M Mirhosseini³

Received: December 26, 2022

Accepted: September 10, 2023

Revised: July 21, 2023

Published online: September 22, 2024

1- Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Arak Branch, Islamic Azad Univ., Arak, Iran.

2- Associ. Prof., Dept. of Civil Eng., Arak Branch, Islamic Azad Univ., Arak, Iran.

3- Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Arak Branch, Islamic Azad Univ., Arak, Iran.

*Corresponding Author, Email: m-najarchi@iau-arak.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Due to the location of Iran in an arid and semi-arid climate, the optimal use of water resources systems and better management in water shortage conditions are necessary. One of the appropriate tools in the field of water resources management is the use of simulation, optimization techniques and the combination of simulation and optimization methods. The main goal of this research is to provide a solution in which, according to the capacity of the reservoir, in addition to achieving the acceptable reliability of supplying demands in the whole period, the percentage of meeting the needs in dry months also increases.

Methodology

To achieve the optimal operation of the water resources in the Marun and Jareh dams located in the south of Iran, the multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm is linked to the WEAP model to provide a new structure for the water resources management, especially in periods of low water by obtaining the optimal values of water release from the reservoir. In this structure, the WEAP simulator is called directly in the MATLAB environment and executed by the optimization algorithm. In this research, for optimal operation of the system, the amount of water released from the reservoir every month is considered as a decision variable. However, due to the large number of available variables and the high volume of calculations, in the body of the MOPSO optimization model, the flow release coefficients that are considered on a monthly basis are used. Based on these coefficients, every month, a percentage of the water volume in the Marun and Jareh reservoirs is released to supply the needs of the downstream uses, and the rest is stored for the better management of the reservoir, especially in water shortage conditions. Therefore, according to the application of these coefficients on a monthly basis, 12 variables are considered for each dam and 24 decision variables in the whole multi-dam system in the entire next 30-year operation period.

Findings

The optimization process is carried out using the MOPSO multi-objective algorithm. The number of iterations of the algorithm to reach convergence is considered to be around 1000. Finally, after the optimization, according to the population size of 48 and the implementation of the MOPSO model for 1000 iterations, the solutions close to optimal are obtained, and the optimal exchange curve (Pareto-optimal front) between the optimization objectives (the function of maximizing the supplying percentage and the function of minimizing the violation of the minimum operation level) is achieved. In Pareto curve the solution with the least amount of penalty due to the violation of the reservoir operation capacity and the highest supplying percentage is chosen as the best answer. Then, these optimal variables are entered in the WEAP surface water model.



The average percentage of supplying the needs and the level of reliability of meeting the needs for different uses in optimization scenario. in this scenario, the drinking and industrial demands are fully provided in all months. Also, the average percentage of meeting the agricultural demands of the Marun and Jarrahi basins for August, September, October and November was improved by about 15 to 16%, which is significant and shows a decrease in the severity of failure in these low water months. The supplying percentage in July also increases by about 7%.

Conclusion

The results obtained from the implementation of the optimizer model showed that the percentage of demand supply in the months that was 0% in the reference scenario reached 30-60% and in most of the dry months, it was calculated around 45%. This showed that the optimizer model was able to reduce the failure severity in the worst case and in years with three to eight consecutive dry months. The results showed that according to the application of hedging in the model, some of the need is stored in the high-water months to be consumed in the low water months. This research showed that planning water resources and allocating them to existing uses only by relying on maximizing the reliability of supplying needs in the entire period, especially in areas with dry climates where we inevitably face severe water shortages in several months of the year, is not a suitable solution and leads to irreparable financial losses and social consequences. Instead, using the solution of this research will lead to better management of the reservoir and reduce the severity of the failure to supply the needs in the dry months of low water.

Keywords: Flow release pattern, Jareh, Marun, MOPSO, Optimization, WEAP

مقاله پژوهشی

استخراج الگوی بهینه رهاسازی جریان از مخزن سد مارون بر اساس الگوریتم چندهدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات

مسلم نجفی^۱، محسن نجارچی^{۲*}، سید محمد میرحسینی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۵

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

۱- دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m-najarchi@iau-arak.ac.ir

چکیده

افزایش اطمینان‌پذیری تأمین نیاز مصارف مختلف در سیستم‌های منابع آب همواره یکی از اهداف مورد تأکید برنامه‌ریزان بوده است. برای حصول به این هدف، مدل برنامه‌ریزی منابع آب سعی بر افزایش تعداد ماه‌های با درصد تأمین نیاز صددرد بدون توجه به تعداد ماه‌های خشک دارد. این امر منجر به بروز دوره‌های خشک با درصد تأمین نیاز نزدیک به صفر در برخی از سال‌ها می‌شود. هدف از این تحقیق استخراج منحنی فرمان بهینه سد است تا بتوان بر اساس آن در فصول پرآب بخشی از نیازهای پایین‌دست را رهاسازی کرد و بقیه آن در مخزن ذخیره شود تا در فصول کم آب مصرف شود تا شدت کمبود در ماه‌های کم آب کاسته شود. برای این منظور از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) و مدل شبیه‌ساز WEAP برای بهره‌برداری بهینه از سد مارون در یک دوره ۳۰ ساله تاریخی (مهر ۱۳۷۱ تا شهریور ۱۴۰۱) استفاده شد. در صورت بهره‌برداری از سیستم بر اساس الگوی موجود (سناریوی مبنا) در بسیاری از سال‌های خشک در اکثر مصارف، درصد تأمین نیاز در چندین ماه متوالی نزدیک به صفر است. با اجرای مدل بهینه‌سازی درصد تأمین نیاز در ماه‌های بحرانی به مقدار ۳۰ تا ۶۰ درصد رسید. همچنین درصد تأمین نیاز زیست‌محیطی در ماه‌های کم آب حدود ۷ تا ۱۵ درصد بیشتر شد. نتایج نشان داد استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق علاوه بر تأمین قابل قبول نیازهای زیست‌محیطی، منجر به کاهش شدت کمبود در تأمین مصارف شرب و کشاورزی و کاهش تعداد ماه‌های بحرانی با درصد تأمین بسیار کم خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: الگوی رهاسازی جریان، بهینه‌سازی، جره، مارون، WEAP، MOPSO.

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 سامانه‌های منابع آب و مدیریت بهتر در شرایط کم آبی ضروری می‌باشد. از جمله ابزارهای مناسب در حوزه مدیریت منابع آب استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب شبیه‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد (زینعلی و همکاران ۲۰۲۰b، گورانی و شعبانلو ۲۰۲۱، اکبری و همکاران ۲۰۱۸). در روش‌های شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های ریاضی یکپارچه می‌توان سامانه منابع آب موجود را با تمامی جزئیات مدل نمود و با سرعت بیشتری به یک دید کلی از سامانه مورد نظر رسید (زینعلی و همکاران ۲۰۲۰a). در فرآیند بهینه‌سازی مناسب‌ترین مقدارهای ممکن برای متغیرهای مورد نظر در یک مسئله با توجه به محدودیت‌های موجود پیدا می‌شود به طوری که به ازای مقدارهای یافت شده، اهداف مسئله با بهترین مطلوبیت ممکن حاصل شود. در میان روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی توانایی بالایی در حل مسائل خطی، غیر خطی و پیچیده دارند. از جمله الگوریتم‌های مطرح تکاملی می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک^۱ (GA)، کلونی مورچگان^۲ (ACO)، الگوریتم کرم شب تاب^۳ (FA) و الگوریتم ازدحام ذرات^۴ (PSO) اشاره نمود. این الگوریتم‌ها به صورت موفقیت آمیز برای مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن به کاربرده شده‌اند. فهمی و همکاران (۱۹۹۴) از الگوریتم ژنتیک برای بهره‌برداری بهینه از یک سامانه مخزنی استفاده نمودند. اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷) از الگوریتم ژنتیک برای ارزیابی منحنی‌های فرمان سامانه‌های چند مخزنی استفاده

کردند. جلالی و همکاران (۲۰۰۶) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده کردند. معینی و افشار (۲۰۰۹) کاربرد الگوریتم مورچگان پیشینه کمینه را با سه فرمول‌بندی مختلف در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز مورد بررسی قرار دادند. گروسی نژاد و همکاران (۲۰۱۶) از الگوریتم کرم شب تاب برای بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف کشاورزی و تولید برق استفاده نمودند. هر کدام از این روش‌ها مزیت‌هایی نسبت به هم دارند و محققان به منظور بررسی قابلیت هر کدام از آن‌ها برای حل مسائل بهره‌برداری از مخازن تحقیقاتی را انجام داده‌اند. از آن دست می‌توان به ارزیابی کاربرد الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک و کلونی مورچگان در بهره‌برداری بهینه از منابع آب توسط برهانی داریان و مرتضوی نائینی (۲۰۰۸) اشاره نمود که نتایج آن حاکی از برتری الگوریتم ژنتیک بود. تحقیقات صورت گرفته توسط داریانی و مرادی (۲۰۰۸) نیز موید این امر بود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) برای بهینه‌سازی توان برقایی در یک سامانه چند مخزنه از الگوریتم PSO بهبود یافته (IPSO) که از ترکیب الگوریتم‌های PSO و ژنتیک ایجاد شده بود، استفاده نمودند. آذرانزا و همکاران (۲۰۱۲) سه نوع الگوریتم PSO، ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی^۵ (SA) را به منظور استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری مخزن سد شهرچای مورد مقایسه قرار دادند. نتایج به دست آمده از الگوریتم PSO به صورت موثرتری نسبت به سایر روش‌ها در حل مسئله مخزن شهرچای عمل نمود. حجتی و همکاران (۲۰۱۳) در یک مطالعه موردی برای بهینه‌سازی یک سامانه دو مخزنه در حوضه آبریز قزل‌اوزن، با اهداف پیشینه کردن درآمد حاصل از فروش انرژی تولید شده در نیروگاه و افزایش حجم ذخیره سیلاب در حوضه مذکور، از الگوریتم‌های ژنتیک

⁴Particle Swarm Optimization

⁵ - Simulated Annealing

¹Genetic Algorithm

²Ant Colony Optimization Algorithm

³Firefly Algorithm

ترکیب روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک روش قدرتمند در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های منابع آب است که بر اساس آن در هر بار بهینه‌سازی تصمیم‌گیران منابع آب می‌توانند از طریق شبیه‌سازی، نتایج اجرای حالت بهینه را مشاهده کنند تا بتوانند رفتار سامانه تحت این شرایط را تحلیل کرده و میزان حصول اهداف مختلف را ارزیابی نمایند. این روش در چند دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از جمله شوریان و همکاران (۲۰۰۸) یک روش برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از بالادست حوضه رودخانه سیروان در ایران ارائه کردند. برای این کار، مدل شبیه‌سازی MODSIM و الگوریتم PSO را با هم ادغام نمودند که در آن هدف بیشینه‌سازی سود حاصل از تأمین آب مورد نیاز بود. نبی نژاد و همکاران (۲۰۱۳) از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل تخصیص منابع آب MODSIM با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای مدل‌سازی مسئله تخصیص منابع آب حوضه رودخانه اترک استفاده نمودند. آذری و همکاران (۲۰۱۵) با ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، یک مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی ارائه نمودند. برای این منظور بر اساس مدل چند هدفه NSGA-II و با اتصال دینامیک مدل‌های WEAP^۳ و MODFLOW^۴ اهداف بیشینه کردن اطمینان‌پذیری تأمین نیازها و کمینه نمودن افت تراز آب زیرزمینی را مورد ارزیابی قرار دادند. ابوطالبی و همکاران (۲۰۱۵) از ترکیب الگوریتم NSGAI و SVR بر پایه برنامه‌ریزی غیرخطی به منظور بهینه‌سازی قواعد بهره‌برداری ماهانه برای تولید انرژی برقابی در مخزن سد کارون ۴ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ترکیب SVR-NSGAI به منظور محاسبه قواعد بهره‌برداری بهینه برای تولید برقابی در زمان واقعی بسیار مناسب است. آشفته و همکاران (۲۰۱۵) به

ساده و الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیرمغلوب^۱ (NSGA-II) استفاده کردند و در نهایت با مقایسه نتایج حاصل، به این نتیجه رسیدند که الگوریتم NSGA-II با یافتن نقاط بهینه بهتر، منجر به دستیابی درآمد بیشتر و حجم ذخیره افزون‌تر در دو مخزن موردنظر شده است. آذری و آرمان (۲۰۲۰) برای بهره‌برداری بهینه منابع آب در زمان واقعی در سد گاوشان از ترکیب الگوریتم NSGA-II و ماشین‌های بردار پشتیبان^۲ استفاده کردند. دوانی مطلق و همکاران (۲۰۲۱) از ترکیب الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد طالقان استفاده کردند. فلاح مهدی پور و بزرگ حداد (۲۰۱۲) از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بازفت استفاده کردند و نتایج نشان داد عملکرد این الگوریتم هم از نظر کیفیت جوابها و هم از نظر زمان اجرا بهتر از روش برنامه‌ریزی غیرخطی است. صابر چناری و همکاران (۲۰۱۳) و دین پژوه و همکاران (۲۰۱۷) کارایی دو الگوریتم PSO و ژنتیک را در مسئله بهره‌برداری بهینه مخزن مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان دهنده برتری الگوریتم PSO بود.

همانطور که از بررسی منابع بر می‌آید الگوریتم ازدحام ذرات الگوریتمی کارآمد در بهره‌برداری بهینه از منابع آب می‌باشد. از سوی دیگر بسیاری از مدل‌ها که برای شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب توسعه داده شده اند از بهینه‌سازی تک دوره ای در هر دوره زمانی برای بهره‌برداری بهینه از مخازن استفاده می‌کنند. از آنجا که بسیاری از مسائل مربوط به منابع آب مانند مطالعات آذری و همکاران ۲۰۱۸، زینعلی و همکاران ۲۰۲۰b و گورانی و شعبانلو ۲۰۲۱ به صورت غیرخطی هستند لذا اتصال یک مدل بهینه ساز قوی مانند الگوریتم‌های تکاملی به آن می‌تواند در این راستا کارآمد باشد. لذا

³ - Water Evaluation And Planning System

⁴ - Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model

¹ - Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

² - Support Vector Machine

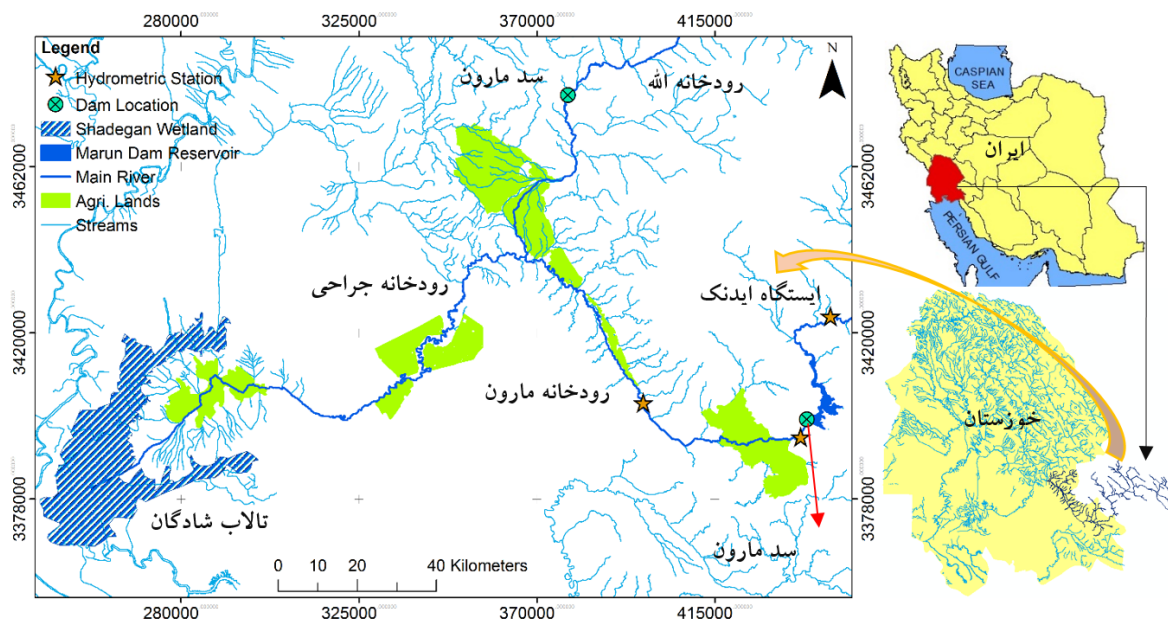
سدی صورت گرفته است (بایسته و آذری ۲۰۲۱؛ زینعلی و همکاران ۲۰۲۰b؛ آذری و همکاران ۲۰۱۸). بررسی منابع نشان می‌دهد در بیش‌تر تحقیقات انجام شده از الگوریتم‌های تک هدفه بهره گرفته شده است که کارایی کمتری نسبت به ساختارهای چندهدفه دارد. از طرفی مدل‌های ارائه شده قادر به ارائه راهکار مناسب در مدیریت منابع آب موجود در سال‌های خشک یا کم آب نیست. در چنین مدل‌هایی، اطمینان‌پذیری تأمین نیازها بر اساس ماه‌هایی است که در آن‌ها ۱۰۰ درصد نیاز تأمین شده‌اند و ماه‌های خشک که درصد تأمین نیاز نزدیک به صفر دارند نادیده گرفته می‌شوند و شدت کمبود در این ماه‌ها اهمیت ندارد. چنین برنامه‌ریزی، توجهی به میزان و مقدار کمبود آب در ماه‌های با کمبود آب شدید را 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 فرمول‌بندی‌های جدید سعی شده است تا بجای افزایش اطمینان‌پذیری بر اساس تأمین نیاز ۱۰۰ درصد در برخی ماه‌ها بدون توجه به ماه‌های خشک، مقداری از آب ماه‌های پرآب در مخزن ذخیره شده تا با استفاده در ماه‌های کم آب شدت کمبود تعدیل گردد. لذا جهت نیل به اهداف فوق و به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در حوضه مارون، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات^۱ (MOPSO) به مدل شبیه‌ساز WEAP متصل گردید تا با به‌دست آوردن مقادیر بهینه رهاسازی آب از مخازن سدهای مارون و جره، ساختار جدیدی جهت مدیریت منابع آب بخصوص در دوره‌های کم آب ارائه گردد. در این ساختار، بر خلاف روش ارائه شده توسط رفیعی انزاب و همکاران (۲۰۱۶)، شبیه‌ساز WEAP مستقیماً در محیط MATLAB فراخوانی و توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌گردد. هدف اصلی در چنین

منظور استحصال قواعد بهره‌برداری بهینه از مخزن سد آیدوغموش در شمال غرب ایران تحت شرایط آب و هوایی پایه و تغییر اقلیم از الگوریتم چند هدفه ژنتیک بهره گرفتند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی سامانه در شرایط تغییر اقلیم منجر به بهبود عملکرد مخزن نسبت به عملکرد آن در شرایط آب و هوایی پایه می‌گردد.

رفیعی انزاب و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به وسیله اتصال مدل WEAP و الگوریتم PSO تک‌هدفه با کمک محیط EXCEL به منظور طراحی و بهره‌برداری بهینه برای پروژه انتقال آب کارون به زهره در ایران ارائه کردند. نتایج نشان دادند که پروژه انتقال آب مورد بحث می‌تواند آب مورد نیاز برای توسعه زمین‌های کشاورزی ده دشت و چرام در مناطق توسعه نیافته واقع در استان کهگیلویه را تأمین کند. صابر چناری و همکاران (۲۰۱۶) از الگوریتم ازدحام ذرات به منظور حل مسئله بهره‌برداری از سد چند منظوره مهاباد بهره گرفتند. نتایج نشان داد که سیاست بهره‌برداری حاصل شده از الگوریتم PSO الگویی مناسب در شرایط خشکی برای مخزن است. رضایی و همکاران (۲۰۱۶) یک الگوریتم به اسم f-MOPSO به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی توسعه دادند و کاربرد آن را برای حوضه مطالعاتی خود مورد بررسی قرار دادند. در این روش از مدل فازی عصبی برای شبیه‌سازی ارتباط بین لایه‌های مختلف اطلاعاتی استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم توسعه داده شده توسط ایشان توانایی یافتن یک جواب بهینه در میان جواب‌های دیگر در مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ را دارد. بسیاری از تحقیقات جدیدتر در خصوص ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای بهره‌برداری اصولی از منابع آب صورت گرفته که اکثر این تحقیقات در سیستم‌های تک

^۱ - Multi-Objective Particle Swarm Optimization

تولید انرژی برقی طراحی شده است. رودخانه مارون از کوه‌های نیل و چشمه سارهای دامنه کوه‌های سادات از زاگرس سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت ۱۲۰ کیلومتر به دریاچه سد مارون می‌رسد. سپس از طریق تنگ تکاب وارد دشت بهبهان می‌شود و توسط سد انحرافی شهدا و شبکه آبیاری بهبهان، دشت بهبهان و سپس از طریق سد انحرافی جایزان، دشت جایزان و فجر را مشروب می‌کند. در ادامه با پیوستن رودخانه الله به آن نام جراحی به خود گرفته و دشت‌های رامشیر و شادگان را آبرسانی می‌کند. رودخانه الله از به هم پیوستن دو رود اعلا و رود زرد به وجود می‌آید. از سد مخزنی جره برای تأمین نیاز اراضی رامهرمز استفاده می‌شود. جانمایی رودخانه‌ها و مصارف موجود در منطقه در شکل ۱ آمده است.



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

گردید و در محیط شبیه‌ساز WEAP فراخوانی شد. سپس اطلاعات مربوط به تمامی منابع و مصارف شامل مشخصات کلی سد و نیروگاه‌ها، مقدار برداشت از آب سطحی و زیرزمینی برای هر کدام از مصارف اعم از شرب و صنعت، کشاورزی، حقایبه سنتی و زیست‌محیطی و ... ، مقدار برگشت آب از هر کدام از مصارف و آبدی

ساختاری ارائه راه حلی است که در آن با توجه به ظرفیت بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر رسیدن به اطمینان‌پذیری تأمین نیاز قابل قبول در کل دوره، درصد تأمین نیاز در ماه‌های خشک نیز افزایش یابد.

مواد و روش‌ها

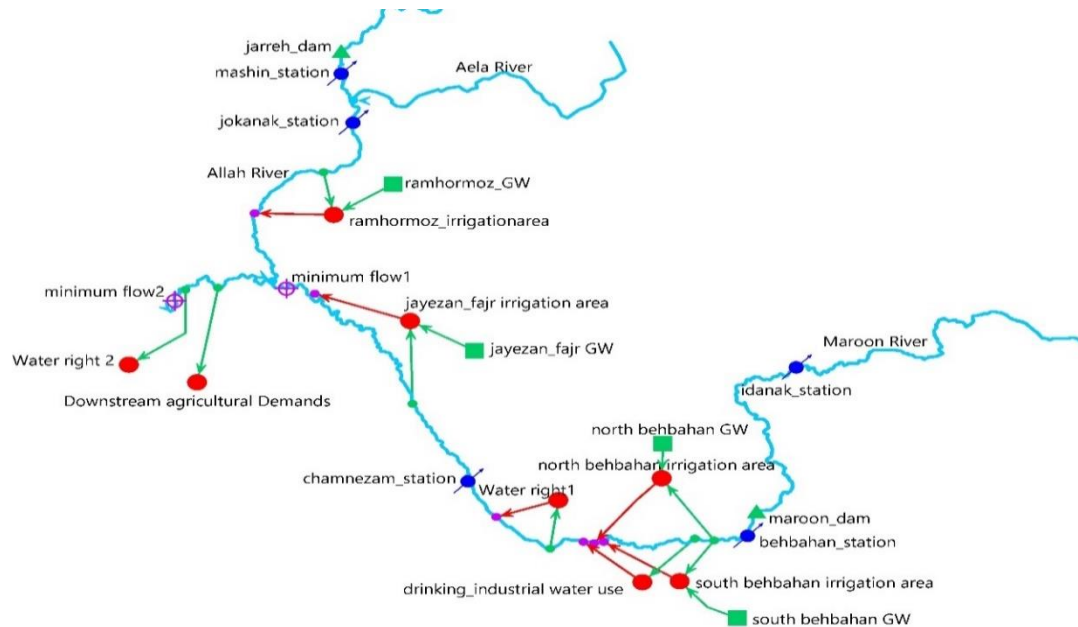
معرفی منطقه مطالعاتی

سد مخزنی مارون بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان و سد مخزنی جره بر روی رودخانه رود زرد در نزدیکی رامهرمز در استان خوزستان و قسمت جنوبی ایران واقع شده‌اند. سد مارون با اهداف تأمین آب کشاورزی شبکه‌های آبیاری و زهکشی بهبهان، جایزان و فجر، رامشیر و شادگان، کنترل سیلاب، تأمین آب شرب شهر بهبهان و

ساختار مدل شبیه‌ساز WEAP

به منظور مدل‌سازی سامانه منابع آب موجود در منطقه مطالعاتی، ابتدا نقشه‌های پایه منطقه از جمله مسیر رودخانه‌ها، جانمایی منابع و مصارف از جمله سدها، منابع آب زیرزمینی، نیازها و همچنین جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در نرم افزار GIS تهیه

ثبت شده در هر کدام از ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه در مدل تعریف گردید. در شکل ۲ شماتیک مدل مربوط به منطقه مطالعاتی آورده شده است.



شکل ۲- شماتیک منطقه مطالعاتی در مدل آب سطحی.

گردید. در این تحقیق برای تعیین جریان زیست محیطی، گره‌های مربوط به کمینه جریان زیست محیطی در پایین‌دست رودخانه‌های مارون و جراحی در مدل ایجاد شد. از روش تنانت^۲ که از جمله روش‌های درجه-بندی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود، برای تخمین کمینه جریان زیست محیطی پایین‌دست بر اساس جریان طبیعی رودخانه استفاده شد (تنانت ۱۹۷۶). مقادیر کمینه جریان زیست محیطی رودخانه در گره‌های مورد نظر طبق روش مذکور در شکل ۳ ارائه شده است. جهت محاسبه میزان آب مورد نیاز شرب و صنعت شهر بهبهان در دوره ۳۰ ساله آتی، از داده‌ها و اطلاعات جمعیتی، نرخ رشد جمعیت و همچنین اطلاعات مربوط به میزان مصرف سرانه اخذ شده از اداره آب و فاضلاب استان خوزستان استفاده گردید. در نهایت با توجه به افزایش جمعیت در هر دوره زمانی نیاز شرب ماهیانه در طول

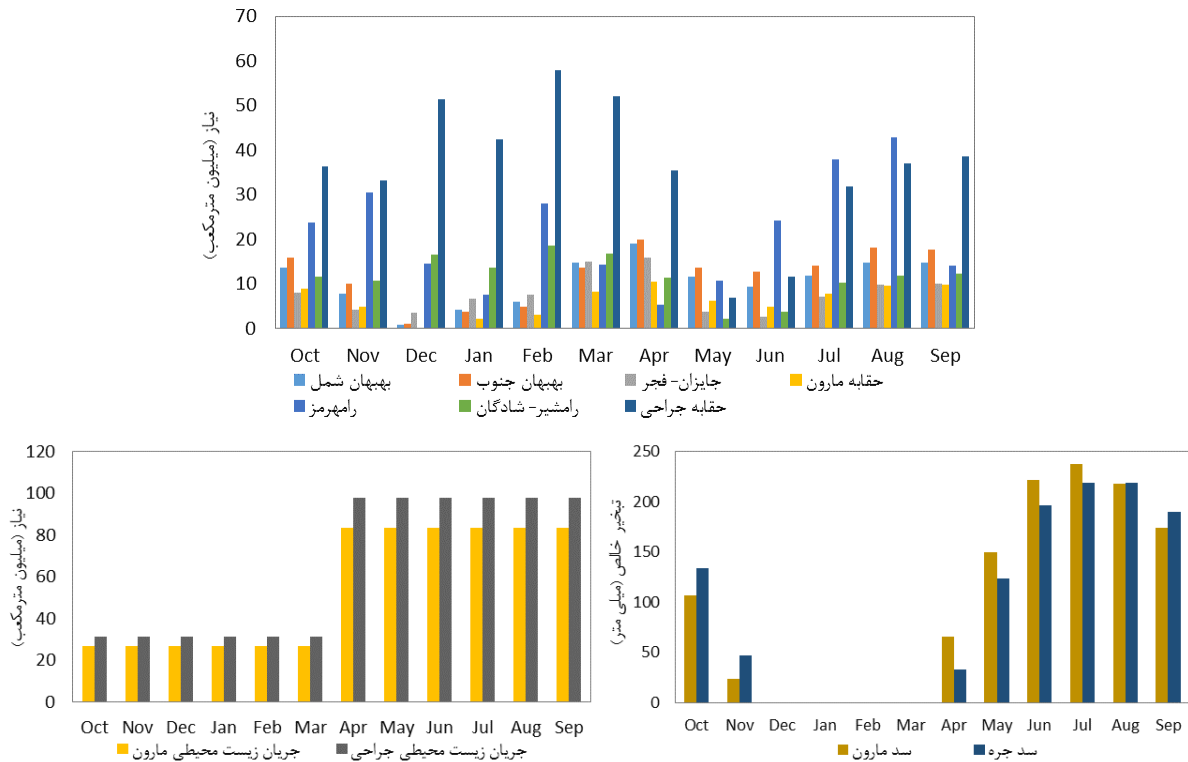
سپس اطلاعات بهره‌برداری سد‌های مارون و جره شامل ظرفیت مخزن، حجم مخزن در تراز کمینه و بیشینه و مرده، مشخصات نیروگاه و غیره بر اساس اطلاعات دریافتی از سازمان آب و برق خوزستان در مدل وارد WEAP شد. همچنین مقادیر آبدی رودخانه مارون و جره در محل ایستگاه‌های واقع بر آن در طول دوره شبیه‌سازی در مدل WEAP تعریف شد. برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مارون در سالهای آتی، یک دوره ۳۰ ساله (مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۳۱) جریان ورودی به سد در نظر گرفته شد. مطابق با شکل ۳ نیاز آبی اراضی منطقه براساس الگوی کشت اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی خوزستان و داده‌های هواشناسی اخذ شده از اداره کل هواشناسی خوزستان، بر اساس روش پنمن مانتیث فائو^۱ (آلن و همکاران ۱۹۹۸) محاسبه شده و در مدل WEAP تعریف

² - Tennant

¹ - FAO Penman-Monteith

مذکور، تبخیر خالص از سطح آزاد مخازن محاسبه شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

دوره شبیه سازی محاسبه شد. با توجه به اطلاعات تبخیر از سطح آزاد مخازن سدهای مارون و جره و در نظر گرفتن میزان بارندگی روی سطح مخزن سدهای



شکل ۳- نیاز آبی دشت های مورد مطالعه، نیاز زیست محیطی و تبخیر خالص از مخازن سدهای مارون و جره در ماه های مختلف.

محیط مساله در حال جست و جوست. در الگوریتم PSO فرآیند با یک مجموعه از جواب های تصادفی شروع می شود و با ارزیابی تابع برازش بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت تمام ذرات مشخص شده و در مرحله بعد با به روز کردن موقعیت و سرعت هر ذره برای یافتن جواب بهینه در محیط مساله به جست و جو می پردازد.

در یک مسئله D بعدی موقعیت i امین ذره در جمعیت با $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ و سرعت این ذره را با $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ نمایش می دهند. اگر شماره تکرار با n نمایش داده شود آنگاه می توان نوشت:

ساختار مدل بهینه ساز چند هدفه پیشنهادی

در این تحقیق از مدل الگوریتم چندهدفه بهینه سازی ازدحام ذرات^۱ (MOPSO) استفاده گردید که به صورت چندهدفه تدوین شده است (کوئلو و همکاران (۲۰۰۴)). الگوریتم تک هدفه PSO یکی از روش های الگوریتم های هوش جمعی^۲ می باشد که کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) آن را معرفی نمودند. کوئلو و همکاران (۲۰۰۴) برای اولین بار الگوریتم چندهدفه MOPSO را معرفی کردند. اساس این الگوریتم بر جستجو و تکرار در محیط مساله استوار است. در این الگوریتم هر جواب به صورت یک پرنده یا ذره در نظر گرفته می شود که در

²Swarm Intelligence

¹Multi Objective Particle Swarm Optimization

کمینه‌سازی میزان تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن قرار گرفت. توابع هدف و قیود در این تحقیق به صورت زیر تعریف شدند.

توابع هدف:

۱- بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف:

$$F_1 = \text{Maximize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (COV_{zdt})) = \text{Maximize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (\frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}})) \quad [4]$$

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

$$F_1 = \text{Minimize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (1 - COV_{zdt})) = \text{Minimize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (1 - \frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}})) \quad [5]$$

که در این فرمول :

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

به صورت اعشاری

TDW_{zdt} : حجم آب تحویل داده شده به نیاز d در دوره t در منطقه z بر حسب مترمکعب

MD_{zdt} : حجم کل آب مورد نیاز برای نیاز d در دوره t در منطقه z بر حسب مترمکعب

۲- کمینه نمودن میزان تخطی از تراز حداقل بهره برداری:

$$F_2 = \text{Minimize}(\sum_{R=1}^k \sum_{t=1}^n \text{Max}((1 - \frac{S_{tR}}{S_{minR}}, 0)) \quad [6]$$

که در آن:

S_{tR} : حجم مخزن سد R در تراز نرمال در دوره t بر حسب میلیون مترمکعب

S_{minR} : حجم مخزن سد R در تراز کمینه در دوره t بر حسب میلیون مترمکعب

محدودیت‌ها :

$$V_{id}^{n+1} = \chi \cdot [w \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) + c_2 r_2^n (gbest_d^n - X_{id}^n)] \quad [1]$$

$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1} \quad [2]$$

که در روابط ۱ و ۲ χ ثابت انقباض^۱ نام دارد، c_1 و c_2 ضرایب ثابت و مثبت می‌باشند که معمولاً مقدار آن‌ها بین ۱/۵ تا ۲ در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰,۱) می‌باشند. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم مقدار نهایی سرعت ذره در بازه $[-V_{max}, V_{max}]$ محدود می‌شود. X_{id}^n و X_{id}^{n+1} به ترتیب موقعیت ذره در زمان های n و $n+1$ هستند. V_{id}^n و V_{id}^{n+1} سرعت ذره در زمان های n و $n+1$ می‌باشند. $pbest_{id}^n$ بهترین موقعیت قبلی ذره و $gbest_d^n$ بهترین ذره در کل فضا است.

پارامتر w وزن اینرسی نامیده می‌شود که برای کنترل تاثیر سرعت‌های قبلی در همگرایی الگوریتم می‌باشد. در واقع تعادلی بین اکتشافات کلی و محلی برقرار می‌کند. لازم به ذکر است که همگرایی شدیداً به این پارامتر بستگی دارد و بهتر است به صورت دینامیک تعریف شود. هر چه مقدار بیشتر باشد جستجوی کلی افزایش می‌یابد و هر چه مقدار آن کم باشد میزان جستجوی محلی افزایش می‌یابد. مقدار w در هر تکرار طبق رابطه ۳ تعریف می‌گردد.

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{Iter_{max}} \quad [3]$$

در رابطه (۳) w_{max} وزن اینرسی در ابتدای جست و جو، w_{min} وزن اینرسی در انتهای جست و جو، n شماره تکرار فعلی و $Iter_{max}$ تعداد کل تکرارها می‌باشد.

همانطور که اشاره شد مدل بهینه‌ساز این تحقیق به صورت چندهدفه تعریف شد که در آن تابع هدف اول بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز تمام مصارف در ماه‌های مختلف در مقابل تابع هدف دوم یعنی

^۱ - contraction constant

متغیرهای پیش رو و حجم بالای محاسبات، در الگوریتم بهینه سازی MOPSO، از ضرایب رها سازی جریان که به صورت ماهیانه توسط این الگوریتم تولید شده و در بدنه مدل WEAP در قسمت تعریف ضریب ذخیره ساز ماهیانه در نظر گرفته شد، به عنوان متغیرهای تصمیم گیری استفاده گردید. بر اساس این ضرایب که بین صفر و ۱۰۰ درصد متغیر است، در هر ماه درصدی از حجم آب موجود در مخازن مارون و جره جهت تأمین نیاز مصارف پایین دست رها می‌گردد و مابقی جهت مدیریت بهتر مخزن بخصوص در شرایط کم آبی ذخیره می‌گردد. لذا با توجه به اعمال این ضرایب به صورت ماهیانه، برای هر سد ۱۲ متغیر ضریب رها سازی جریان از مخزن و برای دو سد مارون و جره تعداد ۲۴ متغیر تصمیم گیری در کل دوره بهره برداری ۳۰ ساله آتی (مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۳۱) در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن تابع چندهدفه در ساختار الگوریتم بهینه سازی این متغیرها بهینه گردیدند.

ساختار مدل شبیه سازی-بهینه سازی

در این تحقیق الگوریتم تجمع ذرات چندهدفه (MOPSO) در نرم افزار MATLAB نوشته شده و به مدل WEAP متصل گردید. در این مدل اتصال یافته ابتدا توسط الگوریتم MOPSO بر اساس محدودیت‌های نوشته شده در مدل، مقادیر متغیرهای تصمیم ایجاد شده و وارد مدل شبیه ساز WEAP گشته و مدل اجرا شد. سپس نتایج حاصل از آن بر اساس توابع هدف تعریف شده توسط مدل بهینه ساز مورد ارزیابی قرار گرفت و منحنی تبادل اهداف ترسیم شد. در صورت عدم تأمین اهداف مورد نظر، دوباره مدل بهینه ساز اجرا شده و جمعیت جدیدی تولید شده و وارد مدل شبیه ساز گردید و این چرخه تا رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه ادامه یافت. شرط توقف در این الگوریتم پس از اجراهای مختلف برنامه، در نهایت رسیدن به تعداد تکرار ۱۰۰۰ تعریف گردید. در هر تکرار الگوریتم، مدل WEAP

$$TDW_{zdt} = SW_{zdt} + GW_{zdt} \quad [V]$$

SW_{zdt} : حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره t در منطقه z بر حسب مترمکعب
 GW_{zdt} : حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به نیاز d در دوره t در منطقه z بر حسب مترمکعب

$$TSW_t = SW_{NB} + SW_{SB} + SW_{DI} + SW_{WRU} + SW_R + SW_{ADD} + SW_{WRD} + SW_{MIN} \quad [A]$$

TSW_t : کل آب سطحی برداشت شده بر حسب مترمکعب که از فرمول ۸ محاسبه می شود
 SW_{NB} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی شمال بهبهان بر حسب مترمکعب
 SW_{SB} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی جنوب بهبهان بر حسب مترمکعب
 SW_{DI} : کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز شرب و صنعت بر حسب مترمکعب
 SW_{WRU} : کل آب سطحی برداشت شده برای حقابه سنتی بالادست بر حسب مترمکعب
 SW_R : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی رامهرمز بر حسب مترمکعب
 SW_{ADD} : کل آب سطحی برداشت شده برای اراضی کشاورزی پایین دست بر حسب مترمکعب
 SW_{WRD} : کل آب سطحی برداشت شده برای حقابه سنتی پایین دست بر حسب مترمکعب
 SW_{MIN} : کل آب سطحی برداشت شده برای نیاز زیست محیطی بر حسب مترمکعب

$$Q_{ct} \leq Q_{cmax} \quad [9]$$

Q_{ct} : دبی کانال اصلی شبکه c در دوره t بر حسب مترمعب بر ثانیه

Q_{cmax} : ظرفیت کل انتقال کانال اصلی شبکه c در دوره t بر حسب مترمعب بر ثانیه

در این تحقیق جهت بهره برداری بهینه از سامانه، میزان رها سازی آب از مخزن در هر ماه به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. اما با توجه به تعداد زیاد

رها سازی شده در سیستم چند سدی مارون و جره با استفاده از الگوریتم چندهدفه ازدحام ذرات بهینه گردید. همچنین در این سناریو سامانه برای تامین آب مصارف حساس پایین دست مانند شرب مجاز به تخطی از تراز حداقل بهره برداری در ماه های با کم آبی شدید است ولی بخاطر اینکه تراز آب در این ماه ها به تراز مرده نزدیک نشود یکی از توابع هدف با تعیین جریمه، میزان تخطی را در طول دوره بهره برداری کمینه می کند. در هر دو سناریو شاخص اطمینان پذیری برای مقایسه نتایج اجرای این سناریوها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$Re = \frac{n_R}{n}$$

که در آن

Re درصد اطمینان پذیری

n_R تعداد گام های زمانی که تأمین نیاز مصارف به صورت ۱۰۰ درصد تأمین شده است

n تعداد کل گام های زمانی

نتایج و بحث

نتایج مربوط به سناریوی مبنا

درصد تأمین نیازها و میزان اطمینان پذیری تأمین نیازها در این سناریو برای مصارف مختلف توسط مدل محاسبه شد. مطابق با جدول ۱ به دلیل تعیین اولویت بالاتر برای نیاز شرب، نیاز شرب و صنعت در تمامی ماه ها به طور کامل تأمین می شود.

برای یک دوره آماری ۳۰ ساله آبدهی ورودی به سد که بر اساس داده های تاریخی تعریف شده (مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۳۱)، اجرا گردید.

سناریو های مورد بررسی

قبل از شروع فرآیند بهینه سازی، دو سناریوی مدیریتی در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد تا در ادامه نتایج آن ها با هم مقایسه گردد. در هر دو سناریو طول دوره شبیه سازی ۳۰ سال (مهر ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۳۱) در نظر گرفته شد. سناریوی نخست بر اساس وضع موجود بهره برداری و رها سازی جریان مطابق با دستورالعمل قبل در نظر گرفته شد که از این پس سناریوی مبنا نامیده می شود. در این سناریو در مناطق تحت پوشش سدهای مارون و جره، تخصیص آب شرب و صنعت به عنوان اولویت اول، نیاز زیست محیطی به عنوان اولویت دوم و نیاز کشاورزی دشت ها به عنوان اولویت سوم در نظر گرفته شد. همچنین عدم تخطی از تراز حداقل بهره برداری سد به عنوان قید در مدل تعریف شد که سامانه در تمام ماه ها ملزم به رعایت آن است. سناریوی دوم که از این پس با عنوان سناریوی بهینه سازی سامانه شناخته می شود بر اساس سناریوی مبنا پایه گذاری شده و اولویت های تخصیص در آن مشابه این سناریو در نظر گرفته شد. با این تفاوت که در این سناریو با هدف عملکرد بهتر سامانه، میزان آب

جدول ۱- میانگین شاخص‌های درصد تأمین و اطمینان‌پذیری نیازها (سناریوی مبنا).

اطمینان پذیری	درصد تأمین نیاز											نیازها	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱		
۷۸/۳	۵۵	۶۰	۷۳	۸۶	۹۰	۹۳/۱	۹۶/۴	۹۶/۱	۸۹/۷	۹۱/۱	۶۶/۷	۶۰	اراضی رامشیر و شادگان
۷۸/۳	۵۵	۶۰	۷۳	۸۶	۹۰	۹۳/۱	۹۶/۴	۹۶/۱	۸۹/۷	۹۱/۱	۶۶/۷	۶۰	حقابه سنتی جراحی
۸۲/۱	۵۵	۶۰	۷۵	۹۰	۹۰	۹۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۹۵/۳	۸۲	۶۰	حقابه سنتی مارون
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	شرب و صنعت بهبهان
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۲/۱	۸۷/۲	۹۱/۳	۹۰/۳	۹۱/۴	۹۵/۳	۸۶/۳	۹۲/۲	۶۸/۲	۶۱/۹	اراضی جایزان و فجر
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۱/۸	۸۵/۶	۹۰/۶	۹۰/۴	۹۱/۴	۹۵/۵	۸۷	۹۶/۵	۶۷/۷	۶۱/۹	اراضی بهبهان شمال
۷۹/۲	۸۰	۶۶/۵	۷۰/۸	۹۱/۱	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹	۹۶/۷	۱۰۰	۹۹/۱	۸۶/۷	۷۲/۲	اراضی رامهرمز
۷۷/۱	۵۷/۳	۶۰/۲	۷۱/۸	۸۵/۵	۹۰/۶	۹۰/۳	۹۱/۴	۹۵/۵	۸۶/۸	۹۵/۲	۶۷/۶	۶۱/۹	اراضی بهبهان جنوب
۸۴/۲	۶۵/۳	۷۱/۹	۸۵/۳	۹۲/۸	۹۵/۴	۹۹/۳	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۳	۹۷/۸	۹۶	۸۲/۸	زیست محیطی مارون
۸۳/۳	۶۵/۳	۷۲/۱	۸۴/۵	۹۲/۷	۹۵/۷	۹۹/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۵	۹۷/۸	۹۶	۸۲	زیست محیطی جراحی
۹۰/۴	۸۹/۹	۹۵/۷	۹۶/۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۱	۹۹/۱	۹۱/۱	نیاز برقایی مارون

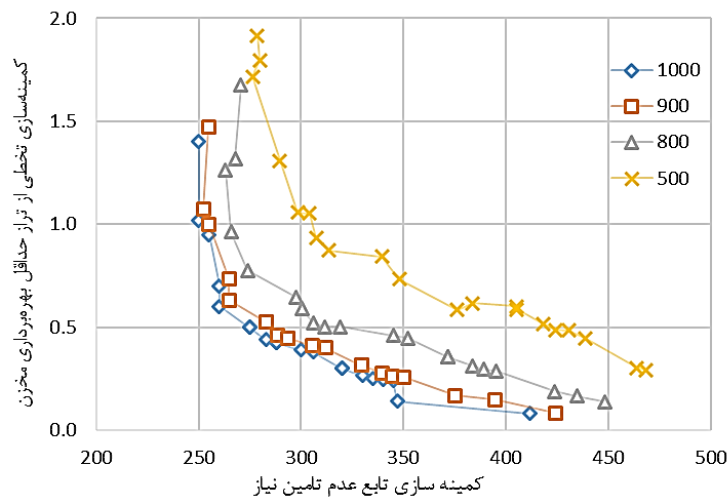
صنعت که هر کدام به ترتیب ۸۲ و ۱۰۰ درصد اوقات تأمین می‌شوند سایر نیازها بین ۷۷ تا ۷۹ درصد اوقات تأمین می‌گردند که در جدول ۱ قابل مشاهده است. اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای زیست‌محیطی مارون و جراحی نیز تقریباً به یک میزان و به ترتیب حدود ۸۴ و ۸۳ درصد می‌باشد. اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقایی سد مارون نیز در حدود ۹۰ درصد محاسبه شد. اما نکته قابل توجه در این سناریو وجود ماه‌های خشک متوالی با درصد تأمین صفر یا کمتر از ۶ درصد در طول دوره ۳۰ ساله بهره‌برداری است که باعث از بین رفتن یا کاهش عملکرد برخی محصولات و ایجاد خسارت به بخش کشاورزی خواهد شد. لذا سناریوی ارائه شده در ادامه تحقیق به دنبال راهکاری برای تعدیل شدت کمبود در چنین شرایطی می‌باشد.

نتایج حاصل از سناریوی بهینه‌سازی سامانه

در ساختار الگوریتم MOPSO مورد استفاده در این تحقیق برخلاف الگوریتم تک‌هدفه ارائه شده توسط رفیعی انزاب و همکاران (۲۰۱۶) از یک تابع چندهدفه بهره گرفته شده و همچنین بجای استفاده از نرم افزار

در سناریوی مبنا کمترین میزان متوسط درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی حوضه مارون و جراحی مربوط به ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و آبان می‌باشد طوری که درصد تأمین نیاز در اکثر مصارف در شهریور ماه بین ۵۵ تا ۵۷ درصد دارند و از این نظر اراضی رامشیر و شادگان و حقابه سنتی جراحی در بدترین وضعیت قرار دارند. کمترین متوسط درصد تأمین اراضی رامهرمز در پایین دست سد جره نیز در سناریوی مبنا مربوط به مردادماه به میزان ۶۶/۵ درصد می‌باشد. در ماه‌های دیگر تقریباً نیازها با درصدهای تأمین مناسبی تأمین می‌شوند. در این سناریو به دلیل تعریف اولویت تخصیص بالاتر نیاز زیست‌محیطی نسبت به کشاورزی در مدل، این نیاز حتی در ماه‌های کم‌آبی مانند مرداد و شهریورماه درصد تأمین بالاتری (حدود ۶۵ تا ۷۲ درصد) نسبت به اراضی کشاورزی منطقه دارد اما همچنان رضایت بخش نیست. درصد تأمین نیاز برقایی در بیش‌تر ماه‌ها بیش از ۹۰ درصد است که بسیار مطلوب ارزیابی می‌گردد. اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای کشاورزی و حقابه سنتی غالباً زیر ۸۰ درصد است. به غیر از حقابه سنتی مارون و نیاز شرب و

با توجه به اندازه جمعیت ۴۸ و اجرای مدل MOPSO برای ۱۰۰۰ تکرار، جواب‌های بهینه حاصل شد و منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو)^۱ بین اهداف بهینه‌سازی (تابع بیشینه‌سازی درصد تأمین نیاز مصارف و تابع کمینه‌سازی تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری مخزن) به دست آمد. برای مشاهده نحوه همگرایی الگوریتم، منحنی تبادل اهداف در تکرارهای متفاوت در مقایسه با آخرین تکرار در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- منحنی تبادل اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو) در تکرارهای متفاوت.

ظرفیت بهره‌برداری مخزن و بیش‌ترین میزان درصد تأمین نیاز بود به عنوان جواب برتر انتخاب شد. سپس این متغیرهای بهینه در مدل آب سطحی WEAP وارد شد. پس از انجام مراحل بهینه‌سازی در این سناریو متوسط درصد تأمین نیازها و میزان اطمینان‌پذیری تأمین نیازها مطابق با جدول ۲ برای مصارف مختلف توسط مدل محاسبه گردید.

مطابق با این جدول در این سناریو نیاز شرب و صنعت در تمامی ماه‌ها به طور کامل تأمین می‌شود. همچنین متوسط درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی حوضه مارون و جراحی مربوط به ماه‌های مرداد، شهریور، مهر و آبان حدود ۷۰/۴ تا ۸۲/۸ درصد است و

اکسل برای اجرای خودکار WEAP، با استفاده از کدنویسی در محیط متلب و همچنین یک میان برنامه در محیط ویژوال بیسیک ساختار بهینه ساز (MOPSO) و شبیه ساز (WEAP) به هم متصل شد. اجراهای مکرر مدل نشان داد برای رسیدن به نتایج بهتر، جمعیت اولیه نرات باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد که در این تحقیق تعداد جمعیت اولیه در الگوریتم در حدود ۴۸ انتخاب شد. در نهایت پس از انجام بهینه‌سازی،

مطابق با روش MOPSO، در هر تکرار بهترین جواب‌ها بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف انتخاب می‌شوند و تحت عنوان مجموعه ذخیره بهینه^۲ جهت انتقال به مرحله بعد ذخیره می‌گردند. نقاط به شکل ستاره ترسیم شده در گراف پارتو همان جواب‌های بهینه مدل بوده و دایره‌های سیاه نشان دهنده آخرین جمعیت تولید شده در فضای تصمیم مسئله در آخرین تکرار است. محورهای این گراف توابع هدف مورد نظر می‌باشند.

در آخرین تکرار مدل، ۲۰ جواب بهینه ارائه شد که از بین آن‌ها با توجه به ارزش‌گذاری توابع هدف، راه حلی که دارای کم‌ترین میزان جریمه ناشی از تخطی از

² Repository

¹Pareto-optimal Front

است. در تحقیقات یارمحمدی و همکاران (۲۰۲۲) درصد تأمین نیاز مصارف مختلف در سناریوی بهینه سازی بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد و در تحقیقات آذری و آرمان (۲۰۲۰) بین ۷۰/۸ تا ۱۰۰ درصد است و در تحقیقات گورانی و شعبانلو (۲۰۲۱) بین ۷۷/۹ تا ۱۰۰ و امان جلیلی و همکاران (۲۰۲۳) بین ۷۱/۸ تا ۱۰۰ گزارش شده است.

نسبت به سناریوی قبل حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد ارتقاء یافته است که قابل توجه بوده و نشان از کاهش شدت کمبود در این ماه‌های کم آب دارد. میزان تأمین نیاز تیرماه نیز حدود ۷ درصد افزایش یافته است. در اکثر ماه‌ها میزان درصد تأمین نیاز بین ۸۸ تا ۱۰۰ درصد است که در مقایسه با نتایج حاصل از سایر تحقیقات انجام گرفته در زمینه کاربرد الگوریتم‌های بهینه سازی برای بهره برداری بهینه از منابع آب کاملاً رضایت بخش

جدول ۲- میانگین شاخص‌های درصد تأمین و اطمینان‌پذیری نیازها (سناریوی بهینه‌سازی سامانه).

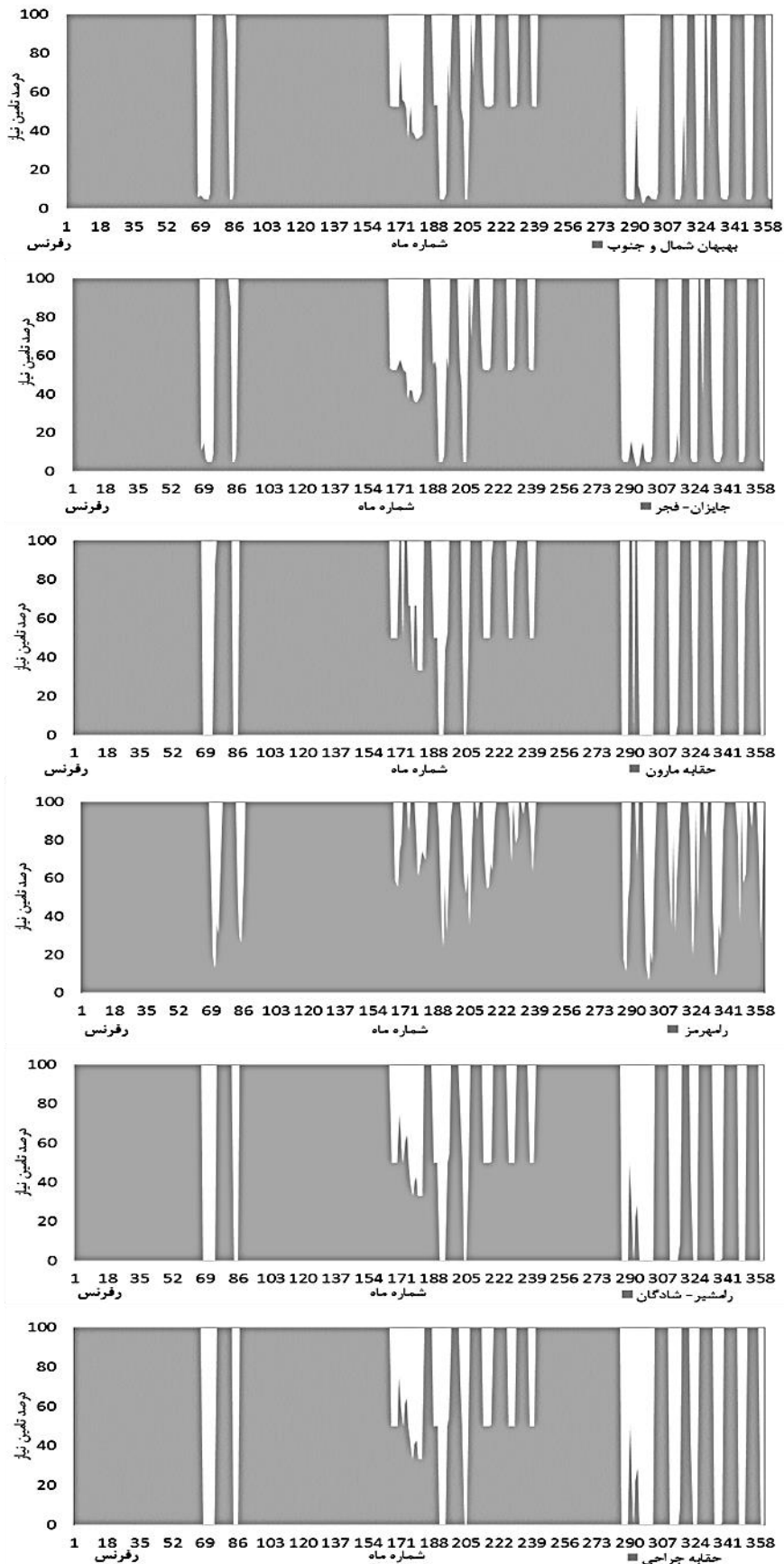
اطمینان پذیری	درصد تأمین نیاز												نیازها
	۱۰۰٪	۹۰٪	۸۰٪	۷۰٪	۶۰٪	۵۰٪	۴۰٪	۳۰٪	۲۰٪	۱۰٪	۰٪	۰٪	
۷۱/۳	۷۰/۵	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۹	۹۲/۷	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۷	۷۵/۱	اراضی رامشیر و شادگان
۷۱/۳	۷۰/۵	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۹	۹۲/۷	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۷	۷۵/۱	حقابه سنتی جراحی
۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۹	۹۵/۹	۹۱/۹	۹۲/۸	۸۲/۸	۷۵/۱	حقابه سنتی مارون
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	شرب و صنعت بهبهان
۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱	اراضی جایزان و فجر
۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱	اراضی بهبهان شمال
۸۰/۴	۹۲/۸	۷۸	۷۹/۲	۹۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۶/۱	۱۰۰	۹۹/۷	۹۲/۷	۸۲/۲	اراضی رامهرمز
۷۱/۳	۷۰/۴	۷۵/۸	۷۹/۷	۸۸/۸	۹۳/۵	۹۲/۶	۹۵/۸	۹۵/۹	۹۱/۸	۹۲/۷	۸۲/۸	۷۵/۱	اراضی بهبهان جنوب
۸۲/۹	۷۷/۵	۸۵/۶	۸۷/۷	۹۲/۲	۹۵	۹۸/۲	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۷/۹	۹۷/۷	۸۹/۲	زیست محیطی مارون
۸۶/۳	۸۰/۱	۸۷/۵	۸۷/۸	۹۲/۷	۹۶/۴	۹۹/۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۲	۱۰۰	۹۲/۹	زیست محیطی جراحی
۹۶/۳	۹۷/۵	۹۸/۱	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴	۹۹/۴	۹۴/۸	نیاز برقایی مارون

بهینه‌سازی سامانه به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشخص است در بسیاری از سال‌های خشک و در تمامی سال‌های آخر برنامه‌ریزی (۶ سال آخر) در بیش‌تر مصارف بخصوص اراضی رامشیر و شادگان و حقابه‌های سنتی مارون و جراحی درصد تأمین نیاز در سه تا هشت ماه خشک متوالی صفر است. در سال‌های ۱۴۰۵ و ۱۴۰۶ نیز به ترتیب در هفت و سه ماه متوالی درصد تأمین این نیاز صفر می‌باشد. در بقیه سال‌های خشک درصد تأمین نیاز این ماه‌ها کمتر از پنج درصد است. این امر خسارات جبران ناپذیر اقتصادی و تبعات منفی اجتماعی

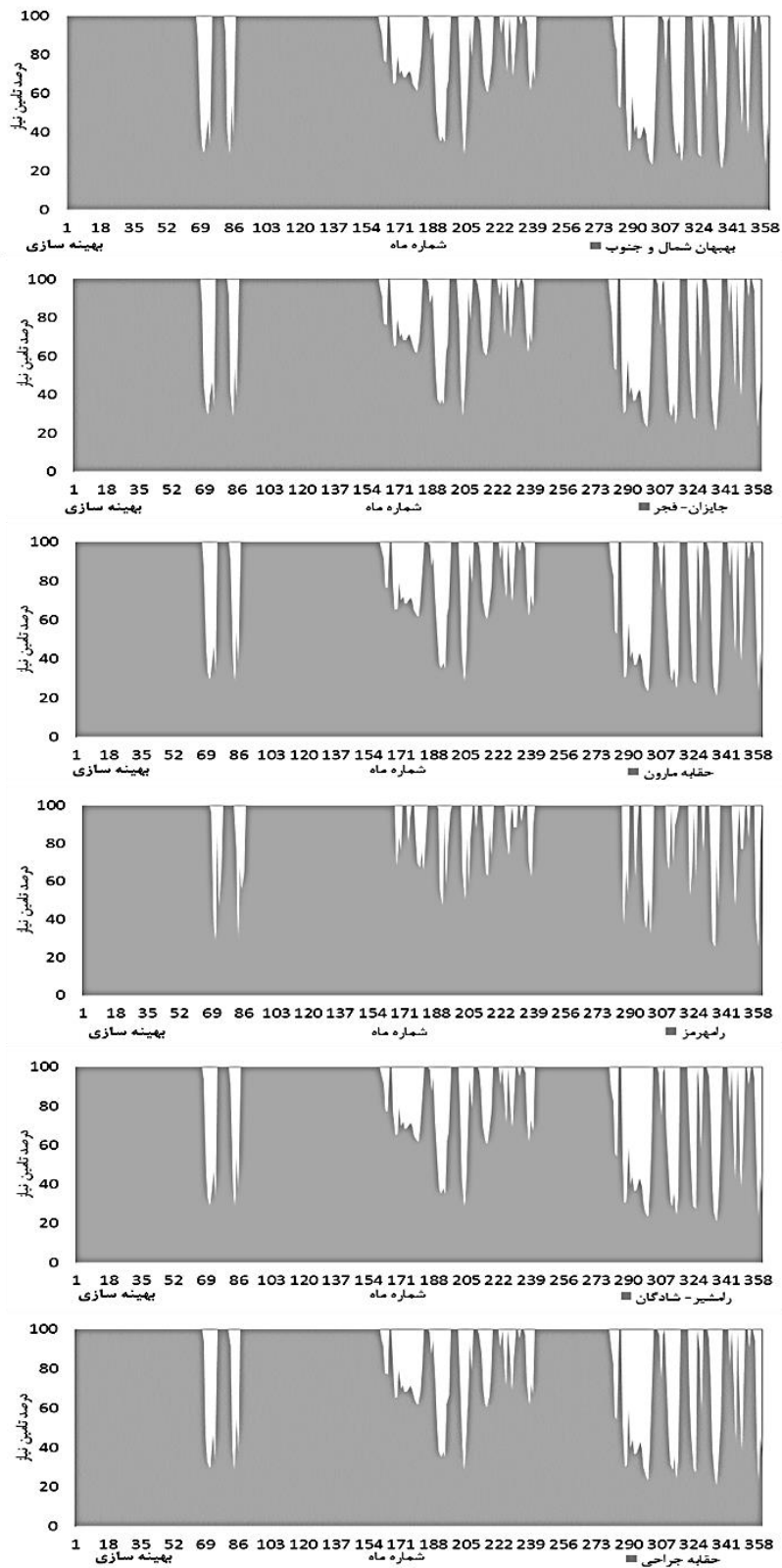
نکته قابل توجه این است که مدل بهینه‌ساز تعریف شده سعی در کاهش شدت کمبود در ماه‌های کم‌آب داشته لذا مطابق با نتایج به‌دست آمده مقداری از آب در ماه‌های پرآب بهمن تا فروردین در مخزن ذخیره شده و بسته به میزان کمبود بین ماه‌های کم آب بخصوص مرداد تا آبان تقسیم شده است. پس مقدار درصد تأمین نیاز ماه‌های پر آب مقداری کاهش داشته است اما همچنان از درصد تأمین بسیار خوبی برخوردار است. جهت بررسی و مقایسه این موضوع، درصد تأمین نیازهای کشاورزی محدوده مطالعاتی در کل دوره برنامه‌ریزی (۳۶۰ ماه) در دو سناریوی مبنا و

در منطقه به دنبال خواهد داشت. برخلاف روش مورد استفاده در تحقیق (بایسته و آذری ۲۰۲۱)، بجای استفاده از جریان ورودی تصادفی-احتمالاتی و بهره گیری از بهینه سازی استوکاستیک، از فن بهینه سازی معین در این تحقیق استفاده شد که در آن از جریات تاریخی ثبت شده ۳۰ ساله در ورودی سد به عنوان

جریان ورودی در سالهای آتی استفاده شد. مزیت این روش این است که بجای ورودی های احتمالاتی که ممکن است به خطا روبرو باشد از یک جریان تاریخی بلندمدت که شامل دوره های ترسالی و خشکسالی است استفاده شد.



شکل ۵- درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی مارون و جراحی در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی مبنا.



شکل ۶- درصد تأمین نیاز مصارف کشاورزی مارون و جراحی در ماه‌های بهره‌برداری - سناریوی بهینه‌سازی

سیستم.

در تحقیقات امان جلیلی و همکاران (۲۰۲۳) و یارمحمدی و همکاران (۲۰۲۰) به ترتیب در حدود ۷۹ و ۹۸ درصد بدست آمده است. علت بالاتر بودن اطمینان پذیری تأمین نیاز زیست محیطی در تحقیقات یارمحمدی و همکاران، اضافه شدن برخی جریانات میان حوضه ای به رودخانه و تأمین بخشی از نیاز زیست محیطی توسط این جریانات است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد در صورت ادامه سیاست بهره برداری بر اساس وضع موجود اکثر نیازها و مصارف در دو حوضه سدهای مارون و جره در حد قابل قبولی تأمین می‌گردد. اما با اجرایی شدن طرح‌ها و پروژه‌های جدید که برخی از آنها در شرف بهره برداری قرار دارند، سامانه در تأمین مصارف بخصوص در ماههای کم آب مشکل جدی خواهد داشت. این شرایط نیاز به طراحی الگویی مناسب برای بهره برداری بهتر و مناسب تر جهت نیل به اهداف مورد نظر دارد. در این پژوهش با استفاده از یک ساختار چندهدفه و بهره‌گیری از فرمول بندی‌های جدید روشی ارائه شده است که در آن بجای افزایش اطمینان پذیری بر اساس تأمین نیاز ۱۰۰ درصد در برخی ماهها بدون توجه به ماههای خشک، مقداری از آب ماهها یا فصول پرآب در مخزن ذخیره شده و با استفاده در ماههای کم آب شدت کمبود تعدیل گردید. با اجرای مدل بهینه‌ساز درصد تأمین نیاز در ماههای بحرانی و دوره های خشک بطور قابل توجهی افزایش یافت. نتایج نشان داد مدل بهینه‌ساز به خوبی توانسته شدت کمبود را در بدترین حالت و در سالهایی با سه تا هشت ماه خشک متوالی کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه‌ساز با توجه به توابع هدف تعریف شده در آن و ذخیره قسمتی از آب در ماههای پرآب و جیره‌بندی آن در ماههای کم آب بود. نتایج نشان داد با توجه به اعمال جیره‌بندی در مدل،

مطابق با شکل ۶ با اجرای مدل بهینه‌ساز درصد تأمین نیاز در ماههایی که در سناریوی قبل صفر درصد بود به مقدار ۲۸ تا ۶۰ درصد می‌رسد و در بیش‌تر ماههای خشک حدود ۴۵ درصد است. این امر نشان می‌دهد که مدل بهینه‌ساز به خوبی توانسته شدت کمبود را در بدترین حالت و در سالهایی با سه تا هشت ماه خشک متوالی که درصد تأمین صفر بوده را کاهش دهد. این موضوع به دلیل رویکرد مدل بهینه‌ساز با توجه به توابع هدف تعریف شده در آن در ذخیره قسمتی از آب در ماههای پرآب و جیره‌بندی آن در ماههای کم آب می‌باشد. از طرفی این امر باعث شده اطمینان‌پذیری تأمین نیاز در کل دوره حدود ۶ تا ۷ درصد کاهش یافته و بخصوص در مصارف کشاورزی از حدود ۷۸/۳ به ۷۱/۳ درصد برسد. با توجه به این که در این مدل اطمینان‌پذیری از نسبت تعداد ماههایی که درصد تأمین ۱۰۰ درصد است به کل ماههای دوره برنامه‌ریزی محاسبه می‌شود. بنابراین با توجه به اعمال جیره‌بندی در مدل مقداری از نیاز در ماههای پرآب ذخیره گشته تا در ماههای کم آب مصرف شود لذا درصد تأمین ماههای پرآب کمتر از ۱۰۰ درصد می‌شود لذا درکل دوره اطمینان‌پذیری پایین می‌آید. درصد تأمین نیاز برقابی نیز در این سناریو در بیش‌تر ماهها بیش از ۹۵ درصد است که بسیار مطلوب بوده و دست‌کم ۵ درصد افزایش را نسبت به سناریوی قبل نشان می‌دهد. اطمینان‌پذیری تأمین نیاز برقابی سد مارون نیز در حدود ۹۶ درصد محاسبه شد. درصد تأمین نیاز زیست‌محیطی در ماههای کم آب مرداد تا مهر حدود ۷ تا ۱۵ درصد بیش‌تر شده است. همچنین اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای زیست‌محیطی مارون و جراحی نیز به ترتیب حدود ۸۳ و ۸۶ درصد می‌باشد که حدود ۳ تا ۵ درصد بهبود یافته است و با توجه به مقادیر بدست آمده توسط سایر محققین این رقم قابل قبول است. اطمینان‌پذیری تأمین نیاز زیست محیطی در سناریوی بهینه سازی سیستم

های کم آب جلوگیری نمود. این پژوهش نشان داد برنامه‌ریزی منابع آب و تخصیص به مصارف موجود تنها با تکیه بر بیشینه نمودن اطمینان‌پذیری تأمین نیاز در کل دوره بخصوص در مناطق با اقلیم خشک که به ناچار در چند ماه از سال با کم آبی شدید همراه است 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 کمبود در تأمین مصارف در ماه‌های کم آب خواهد شد.

مقداری از نیاز در ماه‌های پرآب ذخیره گشته تا در ماه‌های کم آب مصرف شود لذا درصد تأمین ماه‌های پر آب کمتر از ۱۰۰ درصد می‌شود و درکل دوره بهره برداری میزان اطمینان‌پذیری پایین می‌آید. می‌توان گفت اگرچه درصد بالای 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 سال

منابع مورد استفاده

- Aboutalebi M, Bozorg Haddad O and Loáiciga HA, 2015. Optimal monthly reservoir operation rules for hydropower generation derived with SVR-NSGAI. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(11): 04015029-9.
- Akbari H, Soncini A, Dinpashoh Y, Fakheri Fard A, Talatahari S and Bocchiola D, 2018. Operation of two major reservoirs of Iran under IPCC scenarios during the XXI Century. *Hydrological Processes* 32(21): 3254-3271.
- Aman Jalili A, Najarchi M, Shabanlou S and Jafarinia R, 2023. Multi-objective optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines. *Environmental Science and Pollution Research* 30(6): 16464-16475.
- Ashofteh PS, Bozorg Haddad O and Loáiciga HA, 2015. Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with Mmultiobjective genetic programming. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(11): 04015030-9.
- Azarafza H, Rezaei H, Behmanesh J and Besharat S, 2012. Results comparison of employing PSO, GA and SA algorithms in optimizing reservoir operation (Case study: Shaharchai Dam, Urmia, Iran). *Journal of Water and Soil* 26(5): 1101-1108. (In Persian with English abstract)
- Azari A, Akhoond-Ali AM, Radmanesh F, and Haghghi A, 2015. Groundwater-surface water interaction simulation in terms of integrated Water Resource Management (Case study: Dez Plain). *Journal of Irrigation Science and Engineering* 38(2): 33-47. (In Persian with English abstract)
- Azari A and Arman A, 2020. Optimal utilization of water resources in real time based on Nsga-II algorithms and support vector machines (Case study: Gavoshan Dam). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 43(1): 189-204. (In Persian with English abstract)
- Azari A, Hamzeh S and Naderi S, 2018. multi-objective optimization of the reservoir system operation by using the hedging policy. *Water Resources 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): 04020099.
- Borhani Dariane A and Mortazavi Naeini SA, 2008. Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources. *Water and Waste Water* 19(4): 57-66. (In Persian with English abstract)
- Coello CA, Pulido GT and Lechuga MS, 2004. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation Journal* 8(3): 256 - 279.
- Dariane AB and Moradi AM, 2008. Reservoir operating by ant colony optimization for continuous domains (ACO_R) (Case study: Dez Reservoir). *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2(7): 136-140.

- Davani Motlagh A, Sadeghian MS, Javid AH and Asgari MS, 2021. Optimization of Taleghan dam reservoir operation using grey wolf algorithm and its hybrid with genetic algorithm. *Quarterly Journal on Water Engineering*. 9(2): 1-16. (In Persian with English abstract)
- Dinpazhoh Y, Sattari MT, Ebrahimi S and Darbandi D, 2017. Optimum operation of reservoir using the genetic algorithm and particle swarm optimization (Case study: Alavian Dam). *Water and Soil Science* 27(2): 17-29. (In Persian with English abstract)
- Fahmy HS, King JP, Wentzel MW and Seton JA, 1994. Economic optimization of river management using genetic algorithms. Paper No. 943034, ASAE 1994 International Summer Meeting, American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.
- Fallah Mehdipour E and Bozorg Haddad O, 2012. Optimization of multipurpose reservoir operation with application particle swarm optimization algorithm. *Journal of Water and Wastewater*. 23(4): 97-105. (In Persian with English abstract)
- Garousi-Nejad I, Bozorg-Haddad O, Loáiciga HA and Mariño MA, 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 and 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: 112769.
- Hojati A, Farid-Hoseini A, Ghahreman B and Alizadeh A, 2013. Comparison of heuristic techniques in multi-objective optimization of water resources systems. *Iran Water and Environmental Engineering*. 1(2): 9-14.
- Jalali MR, Afshar A and Marino MA, 2006. Reservoir operation by ant colony optimization algorithms. *Iranian Journal of Science & Technology*. 30(B1): 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.
- Kennedy J and Eberhart R, 1995. Particle swarm optimization. Pp.1942-1945. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia.
- Moeini R and Afshar MH, 2009. Application of an ant colony optimization algorithm for optimal operation of reservoirs: a comparative study of three proposed formulations. *Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering*. 16(4): 273-285.
- Nabi Nejad Sh and Mousavi SJ, 2013. Simulation-optimization for basin-wide optimum water allocation considering system's performance and equity measures. *Water and Waste Water*. 24(2): 70-79. (In Persian with English abstract)
- Oliveira R and Loucks D, 1997. Operating rules for multi-reservoir systems. *Water Resource Research*. 33(4): 839-852.
- Rafiee Anzab N, Mousavi SJ, Rousta BA and Kim JH, 2016. Simulation optimization for optimal sizing of water transfer systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA2015)* 382: 365-375.
- Rezaei F, Safavi HR, Mirchi A and Madani K, 2016. F-MOPSO: an alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Journal of Hydro-environment Research*. 14: 1-18.
- Saber Chenari K, Abghari H, Erfanian M and Gholizadeh S, 2013. Short-term model of optimization operation of water resources using particle swarm optimization and compared with genetic algorithm. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*. 97: 63-72. (In Persian with English abstract)
- Saber Chenari K, Abghari H and Tabari H, 2016. Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188-667.
- Shourian M, Mousavi SJ and Tahershamsi A, 2008. Basin-wide water resources planning by integrating PSO algorithm and MODSIM. *Water Resources Management*. 22: 1347-1366.
- Tennant DL, 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1(4): 6-10.
- Yarmohammadi E, Izadbakhsh MA, Rajabi A, Yosefvand F and Shabanlou S, 2022. Optimal operation of water resources systems using MOICA algorithm with reservoir hedging approach in low-water regions. *Irrigation and Drainage*. 71 (2): 406-417.
- Zeinali M, Azari A and 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 and Heidari MM, 2020b. Multi-objective optimization for water resource management in low flow areas based on a coupled surface water-groundwater model. *Water Resources Planning and Management*. 146(5): 04020020.
- Zhang J, Wu Z, Cheng C and Zhang S, 2011. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation. *Water Science and Engineering*. 4(1): 61-73.