

## Reservoir Hedging Approach in Optimal Operation of Water Resources Systems of Doiraj Dam Reservoir Using MOICA Algorithm

EHSAN YARMOHAMMADI<sup>1</sup>, MOHAMMAD ALI IZADBAKSH<sup>1\*</sup>, AHMAD RAJABI<sup>1</sup>, FARIBORZ YOSEFVAND<sup>1</sup>,  
SAEID SHABANLOU<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

(Received: Feb. 8, 2021- Revised: March. 11, 2021- Accepted: Apr. 30, 2021)

### ABSTRACT

In this research, the simulation and optimization models are integrated to apply the reservoir hedging policy. Simulation of the studied basin was executed using the WEAP model to operate the Doiraj Dam reservoir located on the Doiraj River. In addition, the multi-objective MOICA model was utilized to optimize the system, in which the first objective function (maximizing the percentage of supplying demands), and the second one (minimizing the violation of allowable capacities of the reservoir during the operation period) were considered. In this regard, the operation modeling from the reservoir was carried out based on the current condition for a 720-month period (October 1960 to September 2019). Finally, by defining the optimization scenario and applying the reservoir hedging policy, the operation optimization of the reservoir was done and the results were compared with the reference scenario results. 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 did not occurred in any periods of the optimization scenario, while in the reference scenario the reservoir level 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 optimization scenario, the percentage of supplying the demands in the critical months is increased between 20 to 35% as compared to the reference scenario, which indicates a significant reduction in the failure rate in such months.

**Keywords:** Multiobjective Optimization, Imperialist Competitive Algorithm, Hedging Policy, Simulation, WEAP.

## رویکرد جیره‌بندی مخزن در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب مخزن سد دویرج با استفاده از الگوریتم MOICA

احسان یارمحمدی<sup>۱</sup>، محمد علی ایزدبخش<sup>۱\*</sup>، احمد رجیبی<sup>۱</sup>، فریبرز یوسفوند<sup>۱</sup>، سعید شعبانلو<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۱۴)

### 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 دویرج واقع بر رودخانه دویرج انجام شد و برای انجام بهینه‌سازی سیستم، از مدل چند هدفه MOICA استفاده شد. بطوریکه 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 مد نظر قرار گرفت. در این راستا مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن با وضع موجود بهره‌برداری منطقه و برای یک بازه ۷۲۰ ماهه (اکتبر ۱۹۶۰ تا سپتامبر ۲۰۱۹) انجام شد. در نهایت با تعریف سناریوی بهینه و اعمال سیاست جیره‌بندی مخزن، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم انجام 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 نیفتاده اما برای سناریوی مرجع زمانی که کمبود آب بیشتری وجود داشت در ماه‌های متوالی تراز مخزن به تراز مرده رسید که باعث عدم تأمین نیاز در این ماه‌ها و آسیب جدی به سیستم می‌گردد. با اعمال سیاست جیره‌بندی در سناریوی بهینه، درصد تأمین نیاز در ماه‌های بحرانی بین ۲۰ تا ۲۵ درصد نسبت به سناریوی مرجع افزایش می‌یابد که حاکی از کاهش قابل توجه شدت شکست در ماه‌های مذکور نسبت به سناریوی مرجع می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم رقابت استعماری، سیاست جیره‌بندی، شبیه‌سازی، WEAP.

### مقدمه

صحیح‌تر و بهتر منابع آبی جهت کمک به تصمیم‌گیرندگان در این زمینه و کاهش خطرات آتی مطرح نمودند. در سیاست بهره‌برداری (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 فراکاوشی به طور عام و روش الگوریتم رقابت استعماری (ICA) به طور خاص، بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن وارد مرحله تازه‌ای شده است. با توجه به گستردگی مباحث مربوط به منابع آب، مطالعات گوناگونی در رابطه با کاربرد الگوریتم ICA نظیر تحقیقات Karamouz et al., 2014; Acharya et al., 2010; Hosseini-Moghari et al., 2015; Afshar et al., 2015; Biyanto et al., 2015 صورت پذیرفته است.

هرچند الگوریتم ICA قادر به حل مسائل پیچیده غیرخطی، غیر محدب و چند هدفه بصورت جمع وزنی اهداف

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 می‌باشد. بررسی مطالعات انجام شده 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 طراحی شده اند استفاده می‌کنند. از جمله Li et al. (2015) با استفاده از مدل WEAP وضعیت آینده آب را در منطقه‌ای واقع در چین با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و پیشنهادهای را برای برنامه‌ریزی و مدیریت

می‌باشد اما دارای بعضی اشکالات مانند در نظر نگرفتن تبادل و تضاد بین اهداف مختلف است. در روش بهینه رقابت استعماری چندهدفه (MOICA)، در نظر گرفتن اهداف متضاد بصورت جداگانه باعث می‌شود در آخرین تکرار بجای یک راه حل، چندین راه حل بر روی منحنی پارتو ازایه شود که اجرای هر کدام از این راه حل‌ها بستگی به اهداف مورد انتظار دارد (Sherinov and Ünveren, 2017).

به همین دلیل الگوریتم MOICA در سال‌های اخیر در زمینه‌های مختلف منابع آب بکار گرفته شده است. برخی از توابع این الگوریتم مانند تابع crowding distance بر اساس الگوریتم (NSGA-II Deb et al., 2002) توسعه یافته است. به دلیل ساختار مناسب این مدل و گزینش راه حل‌های برتر در هر بار تکرار معادلات بر اساس ارزیابی هر دو تابع هدف متناقض، این الگوریتم دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل الگوریتم ICA معمولی است (Enayatifar et al., 2013). به دلیل مشکلات ذکر شده در خصوص الگوریتم ICA معمولی و به دلیل کارایی الگوریتم MOICA در حل مسائل پیچیده مختلف بر اساس اهداف مورد انتظار (Gohardani et al., 2019; Bayesteh and Azari, 2021)، در فرآیند بهینه‌سازی در این تحقیق از الگوریتم MOICA 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. به عبارت دیگر 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, 2019).

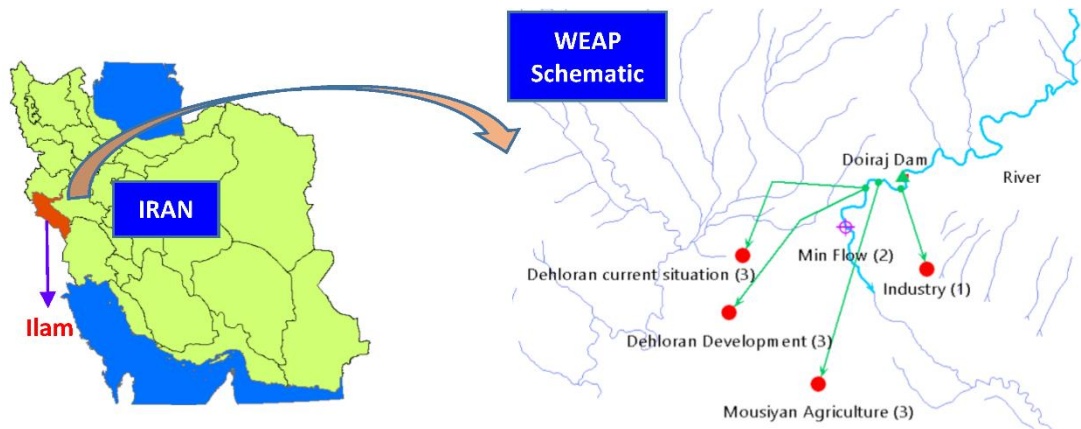
اهمیت این تحقیق در ارائه یک مدل ترکیبی مناسب (تلفیق شبیه‌سازی - بهینه‌سازی) بر اساس سیاست جیره بندی، برای بهره‌برداری بهینه مخزن در مناطق کم آب می‌باشد. با استفاده از این روش، شدت شکست در تامین نیازهای منطقه می‌تواند به طور قابل توجهی در طول دوره عملیات کاهش یابد. برای دستیابی به این هدف از ترکیب الگوریتم MOICA با مدل شبیه‌سازی سیستمی WEAP استفاده شد. هدف این تحقیق، استفاده از ترکیب معادلات ناحیه بندی مخزن در WEAP با توابع چندهدفه متضاد با هم در محیط MATLAB برای اعمال قواعد جیره بندی مخزن با تعریف دو پارامتر تراز جیره بندی (حجم مفید مخزن در این تراز) و ضریب (درصد) جیره‌بندی مخزن به عنوان متغیرهای تصمیم می‌باشد. در این راستا ساختاری نوین به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی توسعه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ساختار چندهدفه برخلاف ساختار رایج برنامه‌ریزی در ایران (رهاسازی جریان تنها بر اساس منحنی فرمان سد)، دوره های خشکسالی یا کم آبی شناسایی و با اعمال سیاست جیره‌بندی در مدل ترکیبی WEAP-MOICA 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 تامین نیازها و حداقل جریمه تخطی ناشی از عدم تأمین نیازها و تخطی از ظرفیت بهره‌برداری مخزن باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبخیز سد دوبرج در غرب ایران و جنوب شرقی استان ایلام قرار دارد. رودخانه اصلی این حوضه رودخانه دوبرج می‌باشد که از اتصال دو رودخانه گل‌گل و دره‌شور تشکیل شده است (شکل ۱). سد دوبرج منبع اصلی تأمین آب مصارف صنعتی پایین دست و اراضی کشاورزی دهلران و موسیان است. در مدل WEAP با استفاده از ابزارهای موجود و با توجه به نقشه‌های پایه GIS، مسیر رودخانه‌ها، محل سد و مصارف مختلف رقمی شدند. شماتیک و چارچوب مدل تهیه شده در WEAP در شکل (۱)

نشان داده شده است.



شکل ۱- منطقه مطالعاتی، شماتیک و اجزای مدل WEAP

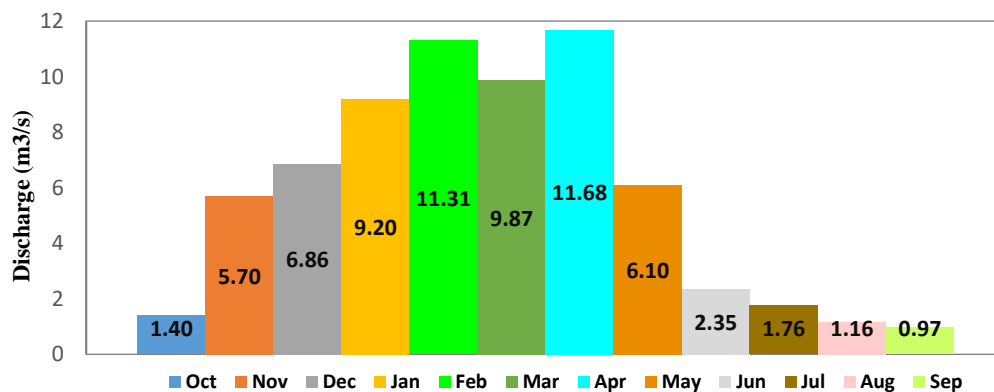
اطلاعات مخزن و محل‌های برداشت، ضرایب و پارامترهای مورد نیاز و غیره به صورت فایل‌های متنی با پسوند CSV به مدل معرفی گردیدند. سپس اطلاعات بهره‌برداری سد دویرج مطابق با جدول (۱) در مدل وارد شد.

مقادیر آبدهی رودخانه در محل ورودی به سد بر اساس آبدهی رودخانه در محل ایستگاه پل دویرج واقع در نزدیکی سد محاسبه شده و در مدل تعریف گردید. میانگین آبدهی ورودی به سد در طول دوره شبیه سازی در شکل (۲) ارائه شده است.

یک دوره آماری ۶۰ ساله آبدهی ثبت شده در ورودی سد دویرج که شامل دوره‌های خشک و تر بوده به عنوان جریان ورودی به مخزن سد در نظر گرفته شد. این دوره آماری برای مقایسه وضعیت بهره‌برداری از مخزن در دو سناریوی مرجع (ادامه وضع موجود) و سناریوی بهینه سازی استفاده شد. گام‌های زمانی شبیه‌سازی، ماهانه و واحد محاسباتی، متریک در نظر گرفته شد. سری‌های زمانی داده‌های ثبت شده هیدرولوژیکی و هواشناسی و اطلاعات مربوط به نیاز ماهانه مصارف (کشاورزی و شرب)،

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

پارامتر	سد دویرج
بیشترین تراز بهره برداری	۲۲۶/۵ متر
کمترین تراز بهره برداری	۲۰۱ متر
ظرفیت ذخیره در بیشترین تراز بهره برداری	۲۰۵ میلیون متر مکعب
حجم غیرفعال	۳۲/۳ میلیون متر مکعب
حجم فعال	۱۷۲/۷ میلیون متر مکعب
حجم ذخیره اولیه (اکتبر ۱۹۹۰)	۱۲۰ میلیون متر مکعب



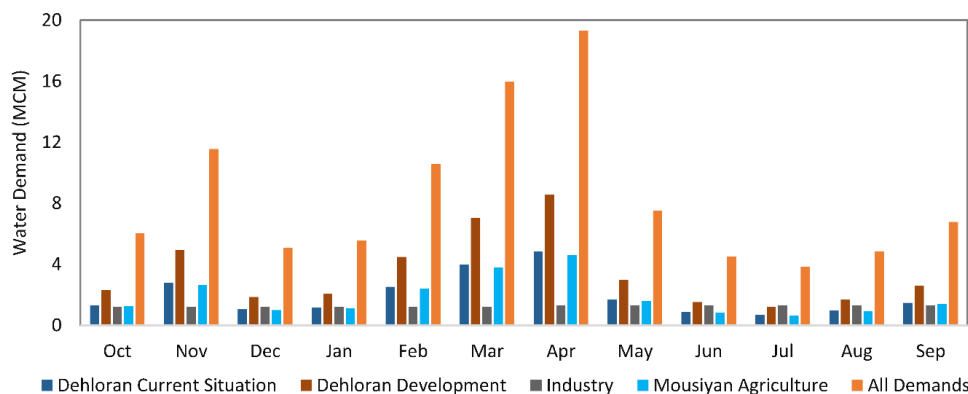
شکل ۲- میانگین آبدهی ماهیانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در بالادست سد

دست سد به عنوان مصارف سیستم در مدل تعریف شدند. مقادیر ماهانه این مصارف در شکل (۳) ارائه شده است.

نیاز آبی اراضی دشت‌های تحت پوشش سد دویرج (دهلران و موسیان) و همچنین مصارف صنعتی و نیاز زیست محیطی پایین

پایین دست بر اساس جریان طبیعی رودخانه استفاده شد. با توجه به اطلاعات تبخیر از سطح آزاد مخزن سد دوبرج 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.

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



شکل ۳- میزان نیاز آبی کشاورزی، شرب و زیست محیطی منطقه در ماههای مختلف (MCM)

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

Sum	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	ماه
۲۰۷۷/۱	۲۲۶/۲	۳۱۸/۵	۳۰۵/۱	۲۷۳/۷	۱۸۵/۵	۱۳۴/۴	۹۱/۶	۶۰/۸	۵۲/۲	۷۷/۹	۱۳۹	۲۱۲/۲	تبخیر خالص (mm)

همسان‌سازی، رقابت استعماری و انقلاب تشکیل می‌دهند. همانند دیگر الگوریتم‌ها این الگوریتم با یک جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود و هر فرد از جمعیت یک کشور نامیده می‌شود که مجموعه‌ای از مقادیر متغیر را تشکیل می‌دهد. اصطلاح کشور در این الگوریتم بیانگر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک است. در رقابت استعماری هر امپراطوری تلاش می‌کند مستعمره‌های امپراطوری‌های دیگر را اداره کند در نتیجه به تدریج از قدرت امپراطوری‌های ضعیف کاسته شده و به قدرت امپراطوری‌های قوی افزوده می‌شود. این رقابت با برداشتن یکی از کشورهای ضعیف در امپراطوری‌های ضعیف و رقابت بین دیگر امپراطوری‌ها برای تصاحب آن شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند قدرت خود را افزایش دهد یا از کاهش قدرت خود جلوگیری کند حذف خواهد شد. در واقع این رقابت باعث افزایش قدرت امپراطوری‌های بزرگ و کاهش قدرت امپراطوری‌های ضعیف و سقوط تدریجی آنها خواهد شد و مستعمرات مربوط به آنها بین دیگر امپراطوری‌ها تقسیم می‌شود. رویه‌های فوق باعث می‌شود که در جهان تنها یک امپراطور وجود داشته باشد و بقیه کشورها مستعمره آن باشند (Shenava and Shourian, 2018).

بررسی و مرور مطالعات مربوط به این الگوریتم موید توانایی بالای این الگوریتم در رسیدن به نقطه بهینه نهایی و همگرایی بالا است (Rajabioun et al., 2008).

### ساختار مدل بهره‌برداری چندهدفه پیشنهادی

در این تحقیق برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری چندهدفه (MOICA) استفاده شد. برای بهینه‌سازی سیستم، این الگوریتم با استفاده از یک VBScript که توسط نویسندگان توسعه داده شده با مدل ویب تلفیق شد. با اجرای این اسکریپت، متغیرهای تصمیم‌گیری تولید شده توسط MOICA 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 هدف ادامه یافت. در نهایت پس از همگرایی الگوریتم و رسیدن به راه حل بهینه، WEAP به طور خودکار بسته و تغییرات در منطقه فعال WEAP ذخیره گردید.

### الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه (MOICA)

الگوریتم رقابت استعماری توسط Atashpaz-Gargari and Lucas (2007) معرفی شد. این روش یک الگوریتم فراکاشی است که براساس تکامل اجتماعی، سیاسی و اقتصادی کشورها فرایندهایی را به صورت مدون و مرتب ارائه می‌دهد و به کمک آن مسائل پیچیده بهینه‌سازی را در زمینه‌های مختلف از جمله بهینه‌سازی مخزن حل می‌کند. پایه‌های اصلی این الگوریتم را سیاست

در این تحقیق با توجه به اهداف پیش‌رو از الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه جهت بهره‌برداری بهینه از سد دویرج و پیدا کردن راه حل‌های بهینه استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد سیستم در صورت اجرای راه حل‌های 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

$$F_1 = \text{Maximize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (COV_{zdt})) = \text{Maximize}(\sum_{z=1}^m \sum_{d=1}^k \sum_{t=1}^n (\frac{TDW_{zdt}}{MD_{zdt}})) \quad (\text{رابطه ۱})$$

به دلیل اینکه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه MOICA به دنبال یافتن کمینه توابع هدف است، می‌توان معادله (1) را به صورت معادله (2) تعریف کرد:

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

که در این فرمول:

$COV_{zdt}$ : 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 مورد نیاز، نیاز  $d$  در دوره  $t$  در منطقه  $z$

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

$$F_2 = \text{Minimize}(\sum_{R=1}^k \sum_{t=1}^n \text{Max}((1 - \frac{S_{tR}}{S_{minR}}), 0)) \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن:

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

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

محدودیت‌ها:

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs}, \quad t = 1, \dots, m \times y, \quad z = 1, \dots, nz, \quad s = 1, \dots, ns \quad (\text{رابطه ۴})$$

$RS_{tzs}$ : 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 ۵)

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

$$Z = IZ(1), \dots, IZ(nz) \quad S = IS(1), \dots, IS(ns)$$

$ARS_{tzs}$ : میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش  $s$

در دوره  $t$  از منطقه  $z$  (با در نظر گرفتن اولویت نیاز مصارف)

$$TDF_{tzs} = DM_{tzs} - ARS_{tzs} \quad (\text{رابطه ۶})$$

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

$$M1 < Tb1 < N1 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$Tb1$ : تراز جیره‌بندی سد دویرج (متر)

$M1$ : تراز غیرفعال سد دویرج (متر)

$N1$ : تراز حداکثر سد دویرج (متر)

در بدنه مدل بهینه‌سازی MOICA، برای ناحیه‌بندی مخزن ۱۲ متغیر تراز جیره‌بندی در مخزن و ۱۲ متغیر ضریب جیره‌بندی به صورت ماهانه 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:

۱- شروع سال شبیه‌سازی در آن از اکتبر ۱۹۶۰ تا سپتامبر ۲۰۱۹ می‌باشد.

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

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

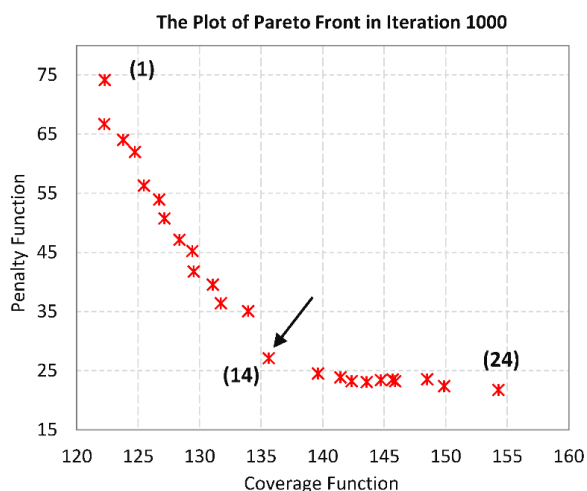
#### سناریوی بهینه‌سازی:

این سناریو بر اساس سناریو مرجع پایه‌گذاری شده و دارای ویژگی‌های 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 می‌باشد.

که بطور نسبی در مقایسه با سایر راه‌حل‌ها دارای مناسب‌ترین مقدار برای هر دو تابع هدف بود به عنوان جواب برتر انتخاب شد (راه حل شماره ۱۴). متغیرهای تصمیم بهینه پیشنهادی توسط این راه حل در مدل آب سطحی WEAP وارد شده و نتایج حاصل از آن بررسی شد.



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

شکل (۵) مقدار اطمینان‌پذیری و شکل‌های (۶) و (۷) درصد تامین نیاز هر کدام از مصارف در سناریوهای رفرنس و بهینه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۵) کمترین مقدار اطمینان‌پذیری مربوط به مصارف صنعتی و نیاز زیست محیطی می‌باشد که در سناریوی رفرنس به ترتیب در حدود  $۹۵/۶$  و  $۹۴/۳$  و در سناریوی بهینه به ترتیب در حدود  $۹۹/۶$  و  $۹۸/۷$  درصد می‌باشد. علت اینکه میزان اطمینان‌پذیری این نیازها در سناریوی بهینه تا حدودی بهبود یافته این است که با توجه به چند هدفه بودن تابع هدف در الگوریتم بهینه‌ساز و اعمال قواعد جیره‌بندی، مقداری از جریان رودخانه در ماه‌های پرآب در مخزن ذخیره شده و رهاسازی نمی‌شود تا برای افزایش درصد تامین نیاز مصارف در ماه‌های کم آب و بحرانی اختصاص یابد. این امر باعث پایین آمدن درصد تامین نیاز کشاورزی در ماه‌های پرآب و افزایش درصد تامین نیازهای صنعت و زیست محیطی در ماه‌های کم آب (با توجه به اولویت تخصیص بالاتر این نیازها) می‌گردد. لذا تا حدودی اطمینان‌پذیری تامین نیاز مصارف صنعت و زیست محیطی افزایش یافته است. بهینه‌سازی سیستم با اعمال سیاست جیره‌بندی در نهایت سبب افزایش درصد تامین نیاز در ماه‌های بحرانی و کم آب و کاهش شدت شکست در این ماه‌ها می‌گردد.

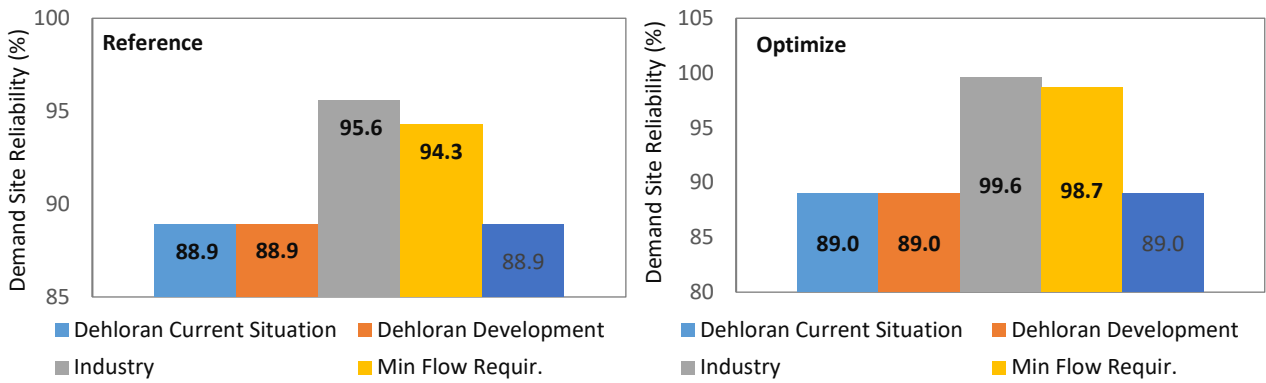
۳- در این سناریو از ضرایب جیره‌بندی بهینه‌شده در مقیاس ماهیانه استفاده شد.

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

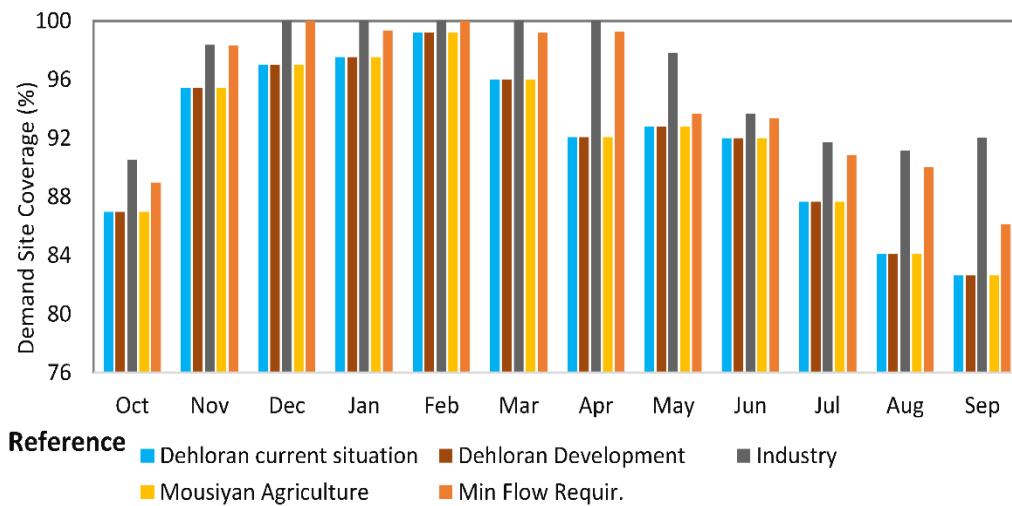
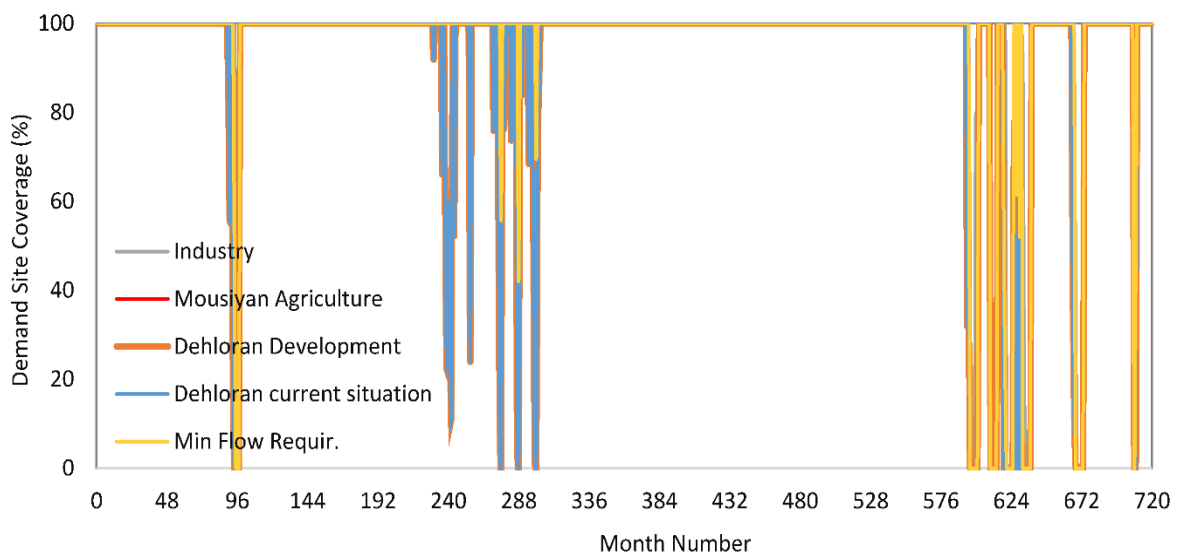
## نتایج و بحث

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 عضو 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 مسأله 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 و اجرای مدل MOICA برای ۱۰۰۰ تکرار، جواب‌های بهینه حاصل شد و منحنی تبادل بهینه (گراف پارتو) بین اهداف بهینه‌سازی (حداکثرسازی درصد تامین نیاز و حداقل-سازی جریمه ناشی از تخطی سیستم از ظرفیت‌های مجاز مخزن) به دست آمد. مطابق با روش الگوریتم MOICA، 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.

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 می‌باشد. لذا بر اساس ارزش‌گذاری توابع هدف، راه حلی

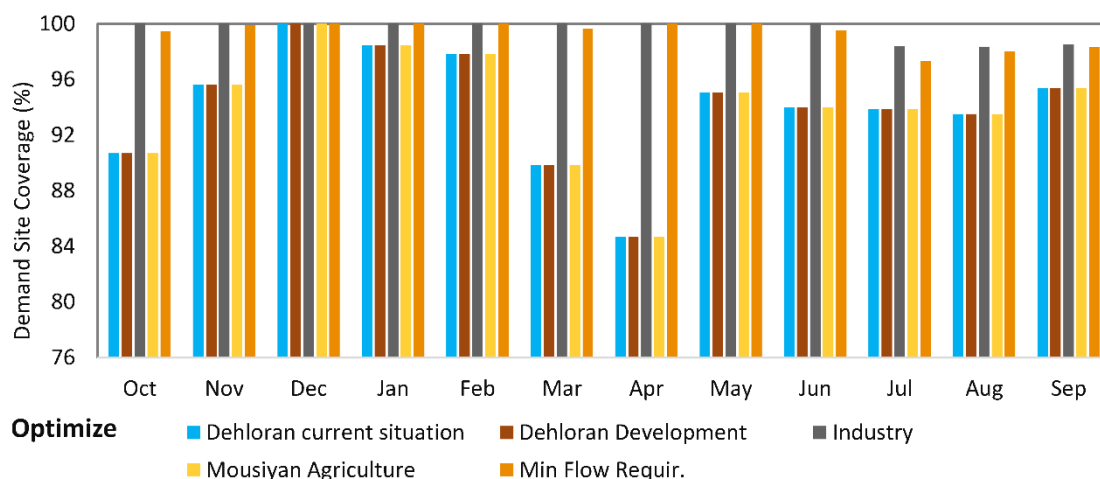
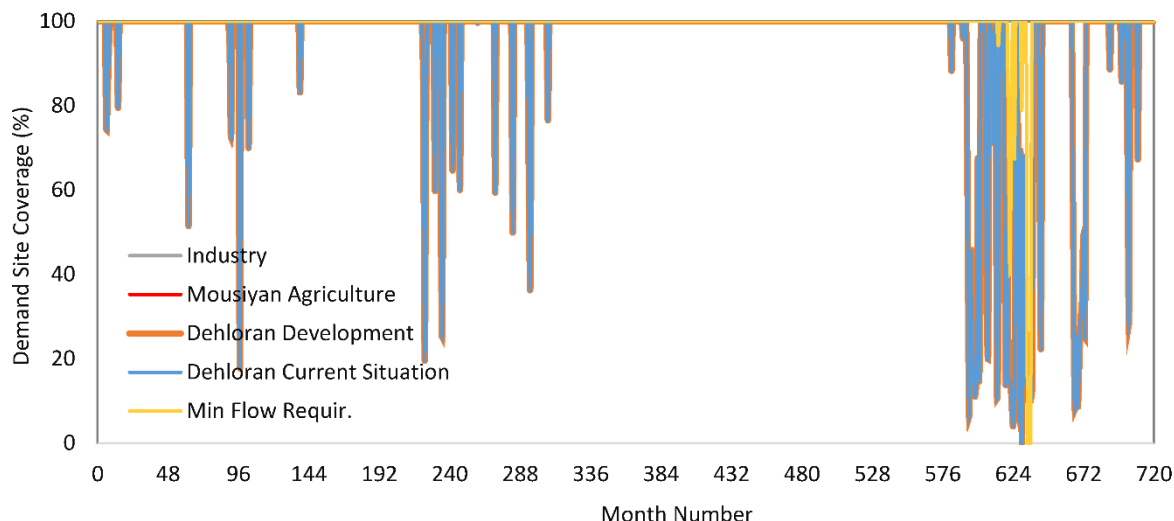


شکل ۵- مقادیر اطمینان پذیری تامین نیاز هر کدام از مصارف مختلف در سناریوهای مرجع و بهینه (MOICA)



شکل ۶- پوشش محل تقاضا و قابلیت اطمینان در سناریوی مرجع





شکل ۷- پوشش محل تقاضا و قابلیت اطمینان در سناریوی بهینه سازی

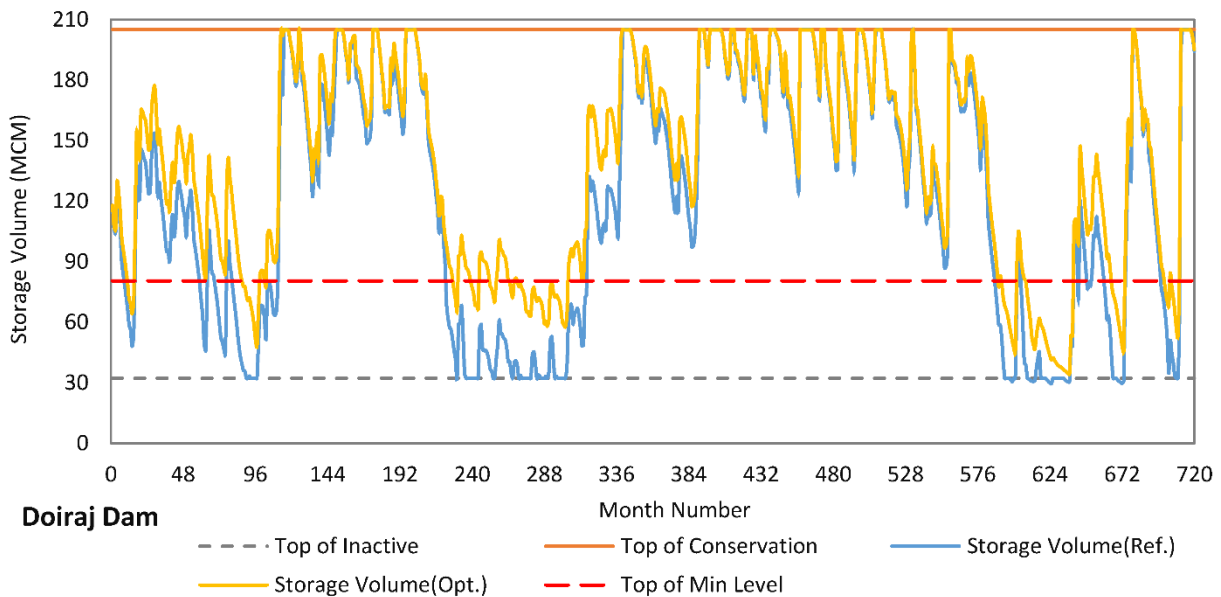
خود را در افزایش درصد تامین نیاز در ماه‌های کم آب داشته تا از شکست کامل در این ماه‌ها جلوگیری کند. نتایج نشان می‌دهد مدل کوپل شده شبیه‌ساز-بهینه‌ساز تنها به دنبال افزایش درصد تامین نیاز نبوده و علاوه بر در نظر داشتن حداکثرسازی تامین نیاز در کل دوره بهره‌برداری، هدف حداقل‌سازی جریمه ناشی از تخطی از ظرفیت‌های مجاز مخزن را نیز در نظر داشته است. طوری که سیستم پس از افزایش درصد تامین نیازها تا حد امکان کمترین میزان تخطی از تراز حداقل بهره‌برداری را داشته باشد.

شکل (۸) عملکرد مخزن در دو سناریوی رفرنس و بهینه را در طول دوره بهره‌برداری (۷۲۰ ماه) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در سناریوی بهینه بر اساس اهداف تعریف شده و با در نظر گرفتن اهداف بهینه‌سازی، در برخی از ماه‌ها که نیاز کمتری به رهاسازی جریان برای مصارف پایین دست بوده، مقداری آب را در مخزن سد ذخیره نموده است تا در ماه‌های کم آب رهاسازی گردد. همچنین جریمه در نظر گرفته شده در کل سیستم در تابع هدف دوم باعث شده تا مخزن کمترین تعدی

مقایسه درصد تامین 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 MOICA (راه حل شماره ۱۴)، با توجه به اعمال سیاست جیره‌بندی در سیستم، مقدار درصد تامین نیاز مصارف مختلف در ماه‌های بحرانی و کم آب نسبت به سناریوی رفرنس تا حدودی افزایش یافته است و از تعداد ماه‌های با درصد تامین 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 تامین نیاز در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد کمترین مقدار متوسط درصد تامین نیاز در سناریوی بهینه مربوط به ماه‌های سپتامبر و اکتبر به میزان ۹۵/۳ و ۹۰/۷ درصد بوده که نسبت به سناریوی رفرنس به ترتیب به میزان ۱۲/۷ و ۳/۷ درصد افزایش یافته است. لذا در کل دوره بهره‌برداری، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر قواعد جیره‌بندی، بیشترین کارایی

مخزن رسیده است. این در حالی است که در سناریوی بهینه در کل دوره بهره‌برداری تراز آب در مخزن هیچ گاه به تراز مرده نرسیده است.

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 ۶۰ ساله بارها به تراز مرده



شکل ۸- میزان تغییرات ذخیره مخزن سد دویرج در طول دوره بهره‌برداری در سناریوهای مرجع و بهینه (MCM)

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 قابل توجهی کاهش داده است. در این تحقیق سعی گردید که برای آزمودن عملکرد مدل ترکیبی مبتنی بر قواعد جیره‌بندی بجای داده‌های تصادفی، از داده‌های واقعی ثبت شده استفاده شود. در این صورت پس از اتمام الگوریتم و استخراج متغیرهای بهینه، ارتباط معنی‌داری بین جریان‌ات ماهانه ورودی به مخزن، حجم ذخیره آب در مخزن، نیازهای پایین دست (به عنوان متغیرهای مستقل) و متغیر میزان رهاسازی بهینه (به عنوان متغیر وابسته) وجود خواهد داشت. از روش ارائه شده در این پژوهش 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 بخوبی کاهش می‌دهد و از طرفی از خالی شدن مخزن در این ماه‌ها نیز جلوگیری می‌کند. می‌توان گفت اگرچه درصد بالای اعتمادپذیری همواره از نظر بهره‌برداران یک امتیاز مثبت به شمار می‌رود، اما در شرایط

همچنین در سناریوی بهینه، به دلیل اعمال ضریب جیره‌بندی و اجرای تابع جریمه در طول دوره برنامه‌ریزی، تا حد امکان به جز 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 کمبود شدید آب وجود دارد، 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 داشته و در طول دوره بهره‌برداری منجر به کاهش تعداد ماه‌های شکست و شدت شکست در تأمین نیازها خواهد شد. این امر در مخزن سد دویرج با تعیین مقدار بهینه این پارامترها با استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی MOICA با مدل شبیه‌ساز WEAP به خوبی اثبات شد. در اصل با استفاده از این روش با پارامتریزه کردن مخزن بر اساس این متغیرها، می‌توان رهاسازی مخزن را در شرایط کم آبی بهینه کرد.

### نتیجه‌گیری

مدل توسعه داده شده بر اساس ترکیب الگوریتم چند هدفه MOICA و مدل شبیه‌سازی مبتنی بر سیاست جیره‌بندی قابلیت

در مخزن از وقوع شرایط بحرانی مانند خالی شدن مخزن در سال های کم آب جلوگیری نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERECES

- Afshar, A., Emami Skardi, M. J., and Masoumi, F. (2015). Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: an imperialist competitive algorithm approach. *Engineering Optimization*, 47(9), 1208-1225.
- Atashpaz-Gargari, E., and Lucas, C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In: *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 4661-4667.
- 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.
- Acharya, D.P., Panda, G., and Lakshmi, Y.V.S. (2010). Effects of finite register length on fast ICA, bacterial foraging optimization-based ICA and constrained genetic algorithm-based ICA algorithm. *Digital Signal Processing*. 20, 964-975.
- 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.
- Biyanto, T.R., Khairansyah, M.D., Bayuaji, R., Firmanto, H., and Haksoro, T. (2015). Imperialist Competitive Algorithm (ICA) for Heat Exchanger Network (HEN) Cleaning Schedule Optimization. *Procedia Computer Science*. 72, 5 - 12.
- Deb, k., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evolutionary Computing*, 6(2), 182-197.
- Draper, A.J., and Lund, J.R. (2004). Optimal hedging and carry over storage value. *Water Resource Planning and Management*, ASCE, 130(1), 83-87.
- Enayatifar, R., Yousefi, M., Abdullah, A. H., and Darus, A.N. (2013). MOICA: A novel multi-objective approach based on imperialist competitive algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 219(17), 8829-8841.
- 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.
- Gohardani, S.A., Bagherian, M. and Vaziri, H. (2019). A multi-objective imperialist competitive algorithm (MOICA) for finding motifs in DNA sequences. *Mathematical biosciences and engineering*: MBE, 16(3), 1575-1596.
- Hosseini-Moghari, S.M., Morovati, R., Moghadas, M., and Araghinejad, S. (2015). Optimum operation of reservoir using two evolutionary algorithms: imperialist competitive algorithm (ICA) and cuckoo optimization algorithm (COA). *Water resources management*, 29(10), 3749-3769.
- Karamouz, M., Nazif, S., Sherafat, M.A., and Zahmatkesh, Z. (2014). Development of an Optimal Reservoir Operation Scheme Using Extended Evolutionary Computing Algorithms Based on Conflict Resolution Approach: A Case Study. *Water Resources Management*, 28, 3539-54.
- 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 and 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.
- Neelakantan, T.R. and Pundarikanthan, N. V. (1999). Hedging rule optimization for water supply reservoirs system. *Water Resources Management*, 13(6), 409-426.
- Rajabioun, R., Hashemzadeh, F., Atashpaz-Gargari, E., Mesgari, B., and Salmasi, F.R. (2008). Identification of a MIMO evaporator and its decentralized PID controller tuning using colonial competitive algorithm. In be presented in IFAC World Congress.
- Shenava, N., and Shourian, M. (2018). Optimal Reservoir Operation with Water Supply Enhancement and Flood Mitigation Objectives Using an Optimization-Simulation Approach. *Water resources management*, 32(13), 4393-4407.
- Sherinov, Z. and Ünveren, A. (2017). Multi-Objective Imperialistic Competitive Algorithm with Multiple Non-Dominated Sets for the Solution of Global Optimization Problems. *Soft Computing*, 22(24), Springer Nature America, Inc, pp. 8273-88.
- Shih, J.S., and ReVelle, C. (1994). Water-supply operations during drought: Continuous hedging rule. *Water Resource Planning and Management*, 120(5), 613-629.
- Taghian, M., Rosbjerg, D., Haghghi, 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.
- Tenant, D.L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.