

Exploitation of Multi-Reservoir Systems Using the Bat Algorithm

S. Mohammad Hosseini¹, A.P. Saraf^{2*}, B. Aminnejad²

1, 2 - Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Rudehen Branch, Islamic Azad University, Rudehen, Iran.

Corresponding Author Email: amirpouya.sarraf@iau.ac.ir

Received 15-10-2024
Revised 29-01-2025
Accepted 11-02-2025
Available Online 12-06-2025

بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با به کارگیری الگوریتم خفاش

سعید محمد حسینی^۱، امیرپویا صراف^{۲*}، بابک امین‌نژاد^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: amirpouya.sarraf@iau.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۷/۲۴
تاریخ بازنگری ۱۴۰۳/۱۱/۱۰
تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۱۱/۲۳
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

Abstract

Optimal management of water resources, especially in multi-reservoir systems, is of great importance due to limited water resources, climate change, increasing demand, and unbalanced distribution of resources. The efficient operation of these systems requires consideration of different and conflicting objectives while maintaining the safety and stability of the reservoirs. The complexity of this problem, especially in large systems with several interconnected reservoirs, necessitates the use of advanced multi-objective optimization methods. This study presents a bat-based multi-objective optimization model for the operation of multi-reservoir systems. The main objectives of the model include: 1) maximizing the supply of water needs in different sectors, 2) minimizing the costs associated with reservoir management, and 3) maintaining environmental balance through control of releases. Constraints such as reservoir capacity, operation rules, and inflow and outflow conditions are considered in the modeling process. The results obtained from the simulations show that the BAT Algorithm can provide a set of optimal solutions from which decision-makers can choose the most appropriate option according to their priorities. Also, a quantitative comparison of the results of the proposed multi-objective Algorithm (BAT) with the results of the NSGA-II Algorithm showed that the average C(BAT, NSGA-II) values from 20 independent comparisons were 79.53%. Therefore, this approach not only increases the efficiency of multi-reservoir systems but also helps in effective decision-making in water resources management and improves the flexibility of the system in the face of variable and critical conditions. Since the objectives above are important in most multi-reservoir systems, the use of this model can be a great help for decision-makers in the exploitation of such systems.

Keywords: Multi-Reservoir System, Drought, Multi-Objective Algorithm, Water Resources

چکیده

مدیریت بهینه منابع آب، به دلیل محدودیت منابع آب، تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضا و توزیع نامتوازن منابع، اهمیت بسیاری دارد. بهره‌برداری کارآمد از این سیستم‌ها نیازمند در نظر گرفتن اهداف مختلف و متضاد، در کنار حفظ سطح ایمنی و پایداری مخازن است. پیچیدگی این مسئله، نیاز به استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی چندهدفه را ضروری می‌سازد. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر خفاش برای بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی ارائه شده است. اهداف اصلی مدل شامل: ۱) حداکثرسازی تامین نیازهای آبی در بخش‌های مختلف، ۲) حداقل‌سازی هزینه‌های مرتبط با مدیریت مخازن و ۳) حفظ تعادل محیط زیستی از طریق کنترل رهاسازی‌ها است. در فرآیند مدل‌سازی، محدودیت‌هایی نظیر ظرفیت مخازن، قوانین بهره‌برداری و شرایط جریان ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم خفاش توانایی ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه را دارد که تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با توجه به اولویت‌های خود، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب کنند. همچنین، مقایسه کمی نتایج حاصل از الگوریتم چندهدفه پیشنهادی (BAT) با نتایج حاصل از الگوریتم NSGA-II نشان داد که میانگین مقادیر C(BAT, NSGA-II) حاصل از ۲۰ مقایسه مستقل از هم، برابر ۷۹/۵۳٪ بوده است. ازاین رو، این رویکرد نه تنها کارایی سیستم‌های چند مخزنی را افزایش می‌دهد، بلکه به تصمیم‌گیری مؤثر در مدیریت منابع آب کمک کرده و در مواجهه با شرایط متغیر و بحرانی، انعطاف‌پذیری سیستم را بهبود می‌بخشد. از آنجایی که اهداف یاد شده در بیشتر سیستم‌های چند مخزنی مهم مطرح می‌باشند، استفاده از این مدل می‌تواند تا حد زیادی راهگشای تصمیم‌گیران در بهره‌برداری از چنین سیستم‌هایی باشد.

کلمات کلیدی: سیستم چند مخزنی، خشکسالی، الگوریتم چندهدفه، منابع آب.

HomePage: <https://jwsd.um.ac.ir>

How to cite this article: Mohammad Hosseini, S., Saraf, A.P. & Aminnejad, B. (2025). Exploitation of Multi-Reservoir Systems Using the Bat Algorithm. Journal of Water and Sustainable Development, 12(1), 160-178. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i1.2410-1371>

محدودیت منابع آب، افزایش جمعیت و رشد اقتصاد، روند صنعتی شدن شهرها و متعاقب آن روند روز افزون رشد تقاضا در زمینه‌های مختلف، مجموعه‌ای از عوامل مرتبط به هم را به وجود می‌آورد که مساله بحران آب در آینده‌ای نه چندان دور را در ذهن متبلور می‌سازد (Hajiabadi و Afshar، ۲۰۱۸). از پیامدهای آن می‌توان به اثرات نامطلوب اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی اشاره نمود. در این راستا مدیریت کارا و بهره‌برداری بهینه از امکانات موجود اهمیت ویژه‌ای دارد (Thechamani و همکاران، ۲۰۱۷).

از طرف دیگر پدیده خشکسالی در اثر کمبود نزولات جوی نیز در هر منطقه و با هر نوع آب و هوایی می‌تواند روی دهد و تقریباً در تمامی رژیم‌های اقلیمی به صورت برگشت‌پذیر و طبیعی مطرح است (Tan و همکاران، ۲۰۱۷). فلات ایران زمین به دلیل واقع شدن در مناطق جغرافیایی خشک و نیمه خشک از جنبه‌های مختلف کمی و کیفی منابع آب با محدودیت‌های فراوانی روبه‌رو است. این مهم بهره‌برداری اصولی و بهینه از منابع آب موجود را بیش از پیش ضروری ساخته است (Chou و همکاران، ۲۰۲۰). با پیشرفت علم و استفاده از ابزارهای نوین و کارآمد، روش‌های بهره‌برداری از منابع آب نیز به سرعت در حال توسعه می‌باشند (Shaikh، ۲۰۲۰؛ Moridi و Yazdi، ۲۰۱۷؛ Akbarifard و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از ملزومات اساسی بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، تعیین و تدوین یک سیاست بهره‌برداری کارآمد است که مشتمل بر چندین قانون بهره‌برداری بوده و مجموعاً در هر دوره زمانی مشخص می‌سازد که آب موجود، چگونه و به چه میزان به نقاط مصرف تخصیص داده شود (Ahmadianfar و همکاران، ۲۰۱۷).

در ارتباط با این موضوع مطالعاتی انجام گرفته که هرکدام با ارائه مدل‌هایی با در نظر گرفتن روابط حاکم بر سیستم‌های منابع آب و بهره‌گیری از تکنیک‌های بهینه‌سازی و با به کارگیری سیاست‌های ویژه به دنبال افزایش کارایی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از مخازن هستند. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه Afshar و Hajiabadi (۲۰۱۸) اشاره نمود که در مطالعه‌ای برای بهینه‌سازی یک سیستم چند مخزنه در تایوان از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده کردند. آن‌ها یک مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری روزانه را برای تعیین رهاسازی از یک سیستم دو مخزنه در تایوان توسعه دادند. سپس از شاخص کمبود (SI) به عنوان تابع هدف برای هر دو مخزن در طول یک دوره شبیه‌سازی طولانی مدت استفاده کردند. در نهایت نتایج نشان داد الگوریتم NSGA-II می‌تواند

حالات مختلف سیاست‌های بهره‌برداری را برای هر دو مخزن در نظر گرفته و هم‌زمان آن‌ها را بهینه کند. همچنین، Ashrafi و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود نشان دادند که در جیره‌بندی گسسته می‌توان جیره‌بندی را در گام‌های جداگانه بر اساس احجام آستانه مخزن اعلام کرد. Yaseen و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعه‌ای قاعده جیره‌بندی پیوسته^۱ را به جیره‌بندی گسسته چندگانه^۲ تبدیل نمودند که برای بهره‌برداری در شرایط واقعی و عملی مناسب‌تر است. مدل ریاضی جیره‌بندی گسسته مذکور با کاربرد برنامه‌ریزی اعداد صحیح برای تأمین یک سیستم تک مخزنی به کار رفت. هدف اولیه این مدل کاهش تعداد ماه‌هایی بوده که در آن‌ها جیره‌بندی نیاز بوده است. Moeini و Soghrati (۲۰۲۰) از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II برای بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری یک سیستم تک مخزنه در ایران استفاده کردند. حداکثرسازی اعتمادپذیری و کمینه کردن آسیب‌پذیری تولید انرژی نیز توابع هدف مورد نظر بودند. همچنین Güvengir و همکاران (۲۰۲۱) ترکیب یک شبکه عصبی و برنامه‌ریزی غیرخطی را برای جیره‌بندی گسسته در یک سیستم منابع آب با هدف تأمین آب شرب به کار بردند. در این حالت شبکه عصبی در نقش یک مدل شبیه‌ساز به کار رفته است. در مطالعه‌ای دیگر، Abdollahi و Ahmadianfar (۲۰۲۱) ضرایب جیره‌بندی را به عنوان داده‌های معلوم در مرحله برنامه‌ریزی تعیین نمودند و تنها به بهینه‌سازی احجام آستانه مخزن برای شروع جیره‌بندی اکتفا نمودند. هر چند مطالعه موردی آن‌ها دارای چند سد مخزنی بود اما در مدل ریاضی به کار رفته، ذخایر این مخازن به صورت یک مخزن یکپارچه فرض شد. Nair و Sasikumar (۲۰۲۱) یک مدل مدیریت منابع آب چند هدفه را توسعه دادند و مدل مورد نظر را برای ارزیابی و ارائه منحنی تجاری اثر کمبود آب بین بخش‌های کشاورزی و مصرف عمومی به کار گرفتند، به این ترتیب منحنی مورد نظر نرخ کمبود قابل قبول بین بخش‌های ذکر شده را نشان داد. در این راستا الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک (MOGA)^۳ را به عنوان الگوریتم بهینه‌ساز برای به دست آوردن منحنی تجاری در نظر گرفتند. Moradifar و همکاران (۲۰۲۴) نیز به منظور بهینه‌سازی عملیات بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش (استان آذربایجان شرقی، ایران) از الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA)^۴ استفاده کردند. همچنین نتایج عملیات مخزن MPA با نتایج به دست آمده با الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه نمودند. مقایسه رهاسازی آب مخزن، کمبود تأمین آب و ذخیره‌سازی مخزن از پنج دوره در دوره‌های پایه و تغییرات آب و هوایی نشان‌دهنده عملکرد بهتر عملیات مخزن محاسبه شده با MPA نسبت به GAS در تأمین

تقاضای آب پایین دست بود.

در این راستا، موضوع این مقاله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی چندمنظوره با بهره‌گیری از قوانین جیره‌بندی فازی و الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد. در واقع هدف مطالعه حاضر، بهبود روش‌های شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با در نظر گرفتن پیش‌بینی جریان در گام‌های زمانی آینده جهت بهبود اثر شدت پدیده خشکسالی است که جهت بهبود عملکرد مخازن، اعمال سیاست بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم خفاش بر روی جیره‌بندی صورت پذیرفت. لذا به منظور تأمین نیازهای مرتبط در پایین دست، اثرات جیره‌بندی در دو حالت بدون اعمال الگوریتم خفاش و با اعمال آن بر رویکرد جیره‌بندی ارزیابی خواهد شد و انتظار می‌رود که ترکیب این دو روش، کارآمدتر از روش جیره‌بندی گسسته به تنهایی بوده و سیاست‌گذاری بهره‌برداری از منابع آب را بهبود بخشد. شایان توجه است در این روند، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی انجام و پس از مقایسه نتایج آن‌ها، مدل برتر انتخاب می‌شود.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی عبارت است از یک روش مدل‌سازی که عموماً برای آزمایش و ارزیابی عملکرد سیستم‌های پیچیده منابع آب استفاده می‌شود. این روش اغلب در مواردی مفید واقع می‌شود که به دلیل محدودیت روش‌های بهینه‌سازی نمی‌توان به‌طور مستقیم یا به تنهایی از آن‌ها استفاده نمود. اگر چه این روش یک فرآیند بهینه‌سازی نیست اما برای گروهی از پارامترهای سیاست‌گذاری و طراحی، این روش ابزاری سریع در ارزیابی عملکرد مورد انتظار سیستم می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای که برای مسائل خاصی نوشته شده‌اند، قابل پیاده‌سازی و اجرا می‌باشد.

ورودی‌ها، روابط فیزیکی، قیود، قوانین بهره‌برداری و خروجی‌ها اجزای مدل شبیه‌سازی را تشکیل می‌دهند. ورودی‌ها داده‌هایی هستند که به‌طور اساسی مدل را ایجاد می‌کنند. مدل با توجه به یکسری روابط فیزیکی که به‌صورت ریاضی تعریف شده‌اند، ورودی‌ها را به خروجی‌ها تبدیل می‌کند. به عنوان مثال در شبیه‌سازی مخزن، جریان ورودی به مخزن، نرخ تبخیر و نیاز آب آبیاری از جمله ورودی‌های مدل به شمار می‌روند. روابط فیزیکی و قیود بیان‌کننده روابط بین متغیرهای فیزیکی سیستم مثل رابطه سطح-حجم-ارتفاع مخزن و روابط پیوستگی حجم آب و ... می‌باشند. قوانین بهره‌برداری بیان‌کننده نحوه بهره‌برداری سیستم می‌باشند، مثل سیاست‌های تخلیه مخزن و منحنی

فرمان. خروجی‌ها معیاری از واکنش سیستم هستند که از بهره‌برداری سیستم طبق قوانین معلوم و معین قیود نتیجه می‌شوند. مانند: مقدار تخلیه مخزن برای آبیاری و سایر اهداف بهره‌برداری از مخزن.

ساختارها و مدل‌های بهره‌برداری از مخزن

در این بخش، سیاست استاندارد به‌عنوان یک روش پایه و مبنا برای بهره‌برداری مخازن معرفی شده است.

در ادامه مدل جیره‌بندی به‌عنوان سیاست بهره‌برداری مبتنی بر منحنی فرمان که در این پژوهش اهمیت دارد، به‌صورت کلی و برای ساده‌ترین حالت ممکن معرفی شده‌اند. سپس مدل‌های پیش‌بینی جریان توضیح داده می‌شود و در انتها با تلفیق سیستم‌های خفاش و الگوریتم‌های بهینه‌سازی یک مدل بهره‌برداری کارآمد استخراج می‌شود. بنابراین آنچه در این پژوهش اهمیت دارد توجه به ساختار و مفاهیم روش‌های جدید برای ارائه یک ساختار تلفیقی از آن‌ها با یک تکنیک برتر و متفاوت است.

سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)

این روش به‌طور استاندارد برای شبیه‌سازی بهره‌برداری مخازن به‌کار می‌رود. اما در شرایط عملی و واقعی استفاده از آن متداول نیست. در این سیاست رها سازی از مخزن فقط بر اساس نیاز هر دوره انجام می‌پذیرد. اگر آب کافی جهت تأمین نیاز باشد، خروجی مخزن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که کل نیاز را تأمین نماید. چنانچه برای تأمین نیاز آب کافی در دسترس نباشد، کل ذخیره مخزن رها می‌شود. همچنین اگر آب موجود بیش از اندازه نیاز باشد، مخزن شروع به پر شدن نموده و در صورت لزوم آب مازاد به صورت سرریز خارج می‌شود. نمایش ریاضی این قاعده بهره‌برداری به شرح معادله (۱) است.

$$R_t = \begin{cases} S_t + I_t & \text{if } S_t + I_t \leq D_t \\ D_t & \text{if } D_t \leq S_t + I_t \leq D_t + C \\ S_t + I_t - C & \text{if } S_t + I_t \geq D_t + C \end{cases} \quad (1)$$

که در آن R_t رها سازی مخزن در دوره t ، I_t آبدی ورودی به مخزن در دوره t ، S_t میزان ذخیره مخزن در ابتدای دوره t ، D_t میزان نیاز در دوره t ، C ظرفیت مخزن می‌باشد.

در سیاست بهره‌برداری استاندارد معمولاً فراوانی کمبودها در سیستم منابع آب کمتر بوده و متوسط کمبود دراز مدت در دوره شبیه‌سازی شده حداقل می‌شود. اما بر روی شدت کمبودها کنترلی وجود ندارد. در حقیقت این روش برای مواقعی قابل کاربرد است که آب کافی برای تأمین نیازهای برنامه‌ریزی وجود داشته باشد. اما در مواقع خشکسالی باید تغییراتی در ساختار این سیاست داده شود (Tan و همکاران، ۲۰۱۷).

سیاست بهره‌برداری براساس قاعده جیره‌بندی

در خشکی‌های شدیدتر از خشکی طرح، بیشتر مخازن در رهاسازی دبی مورد اطمینان و مطابق برنامه‌ریزی خود دچار شکست می‌شوند. در چنین وضعیتی، مدیران مسئول سیستم آبیاری و آبرسانی، کمبودهای متناوب اما کوچک را بر کمبودهای منفرد شدید ترجیح می‌دهند. به عنوان مثال اعمال کمبودهای ناچیز تخصیص آب در ماه‌های کشاورزی ممکن است تاثیر چندانی بر عملکرد محصول نگذارد اما در صورت وقوع کمبودهای شدید در یک ماه، به احتمال بسیار زیاد کل محصول از بین خواهد رفت. بنابر دلایل بیان شده، اعمال محدودیت‌های آبیاری و جیره‌بندی برای کاهش موقت سطح نیاز و حفظ ذخیره برای دوره‌های آینده، یک روش معمول است. به این ترتیب در طول دوره‌های مشرف به خشکی حتی اگر نیاز را بتوان از ذخیره فعلی و ورودی جاری به مخزن تامین نمود، پیشنهاد کاهش نیاز مطرح است. چنین کاهش مانع از کمبودهای بزرگ‌تر در دوره‌های بعدی می‌شود. علاوه بر جنبه‌های اجتماعی، از لحاظ اقتصادی نیز پذیرفتن یک سری کمبود کوچک متناوب در بازه زمانی جاری به منظور کاهش مقدار یک کمبود شدید در آینده، مثبت ارزیابی شده است.

برای شروع جیره‌بندی خروجی از مخزن، یک حجم آستانه معرفی می‌شود که این حجم برای کلیه ماه‌هایی با شرایط کم آبی تعریف می‌شود. زمانی که حاصل جمع ذخیره مخزن در ابتدای هر ماه و ورودی به مخزن در آن ماه کمتر از این حجم آستانه باشد، سیاست جیره‌بندی آغاز می‌شود که تابع هدف اصلی مدل مذکور، حداقل کردن میزان خسارات ناشی از کمبود در دوره بهره‌برداری است. باتوجه به تعیین این حجم آستانه دو روش زیرتعریف می‌شود:

۱. استفاده از ذخیره مخزن جهت شروع کاهش نیاز (S) (Type)

۲. استفاده از مجموع ذخیره و جریان ورودی مخزن در بازه زمانی جاری (SQ Type)

به این ترتیب همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، ایجاد یک قانون موثر و کارا برای کاهش نیاز مصرف آب و لذا کاهش خروجی در طول دوره خشکی و شرایط پیش از آن، دست کم با دو سوال زیر مواجه می‌شود:

۱. از چه زمانی و در چه سطحی از ذخیره و ورودی پیش‌بینی شده، باید جیره‌بندی آغاز شود؟

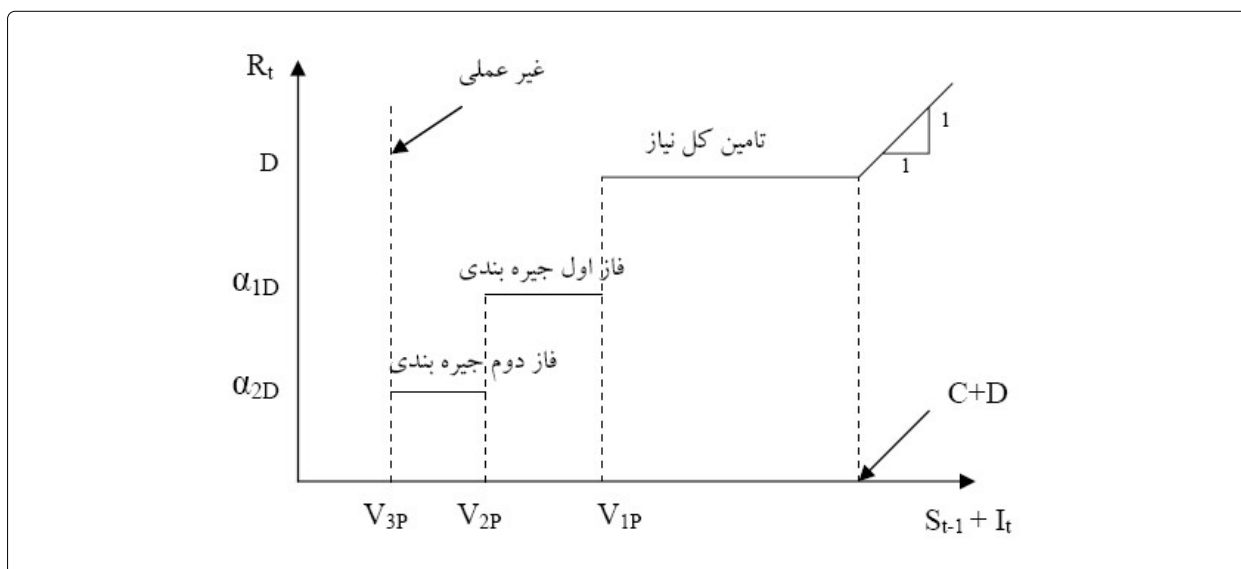
۲. میزان و اندازه کاهش خروجی در طول هر دوره جیره‌بندی چه اندازه باید باشد؟

به منظور پاسخ به سوالات فوق، Shih و ReVelle (۱۹۹۵) مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح و غیرخطی (MINLP) را برای بهره‌برداری از یک مخزن منفرد در دوره خشکسالی ارائه دادند که حل آن منجر به اعمال سیاست‌های جیره‌بندی پیوسته در بهره‌برداری می‌شود. در این حالت، چون اندازه‌گیری خسارات ماهانه در عمل امکان‌پذیر نبوده است از تابع هدف جایگزین که حداقل کردن حداکثر کمبود است، استفاده شده است. در اینجا باتوجه به اینکه سیاست جیره‌بندی پیوسته هدف این مطالعه نیست، از پرداختن به روابط مربوط به آن خودداری شده است (Abdollahi و Ahmadianfar، ۲۰۲۱).

در جیره‌بندی پیوسته باتوجه به اینکه بهره‌برداران یک درجه‌بندی از گزینه‌های آب موجود ندارند، متوجه وضعیت خشکسالی و نزدیک شدن آن به صورت شفاف نخواهند شد. در حالت پیوسته، دو سوال مذکور به صورت هم‌زمان پاسخ داده می‌شوند. اما برای افزایش انعطاف در مدیریت بهره‌برداری مخازن نیاز است که این سوالات به طور مستقل از یکدیگر پاسخ داده شوند. بر این اساس جیره‌بندی گسسته در شرایط بهره‌برداری واقعی مناسب‌تر می‌باشد. در این حالت سوال اول به وسیله رقوم آستانه ماهانه مخازن (منحنی فرمان بهره‌برداری) و سوال دوم به وسیله ضرایب جیره‌بندی پاسخ داده می‌شود (Afshar و Hajiabadi، ۲۰۱۸).

بنابراین Shih و ReVelle (۱۹۹۵) قاعده جیره‌بندی پیوسته را به جیره‌بندی گسسته چندگانه تبدیل نمودند که برای کارهای عملی مناسب‌تر است. مدل ریاضی جیره‌بندی گسسته مذکور با کاربرد برنامه‌ریزی اعداد صحیح (MI) برای تامین یک سیستم تک سدی به کار رفت. هدف اولیه این مدل کاهش تعداد ماه‌هایی است که در آن‌ها جیره‌بندی نیاز بود. بر این اساس در جیره‌بندی گسسته می‌توان جیره‌بندی را در گام‌های جداگانه اعلام کرد، مثلاً می‌توان دو یا چند مرحله برای جیره‌بندی در نظر گرفت و کسر α_1 از نیازها را برای شرایط خشکسالی خفیف و کسر α_2 از نیازها را برای خشکسالی شدید رها سازی نمود ($\alpha_2 < \alpha_1$). باتوجه به شکل (۱) برای یک ماه مشخص مثل p ، هرگاه حجم مخزن بین V_{1p} و مجموع ظرفیت مخزن و نیاز باشد، کل نیاز تامین می‌شود.

اگر حجم مخزن بین V_{1p} تا V_{2p} باشد کسر α_1 از نیازها تامین می‌شود و هرگاه حجم مخزن کمتر از V_{2p} و بیشتر از V_{3p} باشد مخزن وارد مرحله شدیدتری از جیره‌بندی شده و کسر کمتری از نیازها که همان α_2 باشد، تامین می‌شود (Nair و Sasikumar، ۲۰۲۱).



شکل ۱- قاعده بهره‌برداری مخزن با رویه جیره‌بندی گسسته (Sasikumar و Nair، ۲۰۲۱)

روابط به کار رفته در مدل مذکور به شرح زیر است:

$$\text{Max} \left[\sum_{t=1}^T y_{1t} - \omega \sum_{p=1}^{12(V_{1p}+V_{2p}+V_{3p})} (V_{1p} + V_{2p} + V_{3p}) \right] \quad (2)$$

$$y_{1t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{1p} - \varepsilon)}{M} \quad (3)$$

$$y_{1t} \leq 1 - \frac{V_{1p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{M} \quad (4)$$

$$y_{2t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{2p} - \varepsilon)}{M} \quad (5)$$

$$y_{2t} \leq 1 - \frac{V_{2p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{M} \quad (6)$$

$$R_t = (1 - \alpha_1) \times D \times y_{1t} + (\alpha_1 - \alpha_2) \times D \times y_{2t} + \alpha_2 \times D \quad (7)$$

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - W_t \quad (8)$$

$$S_t \leq C_0 \quad (9)$$

$$S_0 \leq S_T \quad (10)$$

$$U_t \leq \frac{S_t}{C} \quad (11)$$

$$W_t \leq M \times U_t \quad (12)$$

$$V_{1p} \geq (1 + \beta_1) \times V_{2p} \quad (13)$$

$$V_{2p} \geq (1 + \beta_2) \times V_{3p} \quad (14)$$

$$V_{3p} \geq \alpha_2 \times D \quad (15)$$

$$S_{t-1} + \hat{I}_t \geq V_{3p} + \varepsilon \quad (16)$$

$$y_{1t-1} + y_{1t+1} \leq 1 + y_{1t} \quad (17)$$

$$y_{1t} \leq y_{2t+1} \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^N y_{2t} = N - n \quad (19)$$

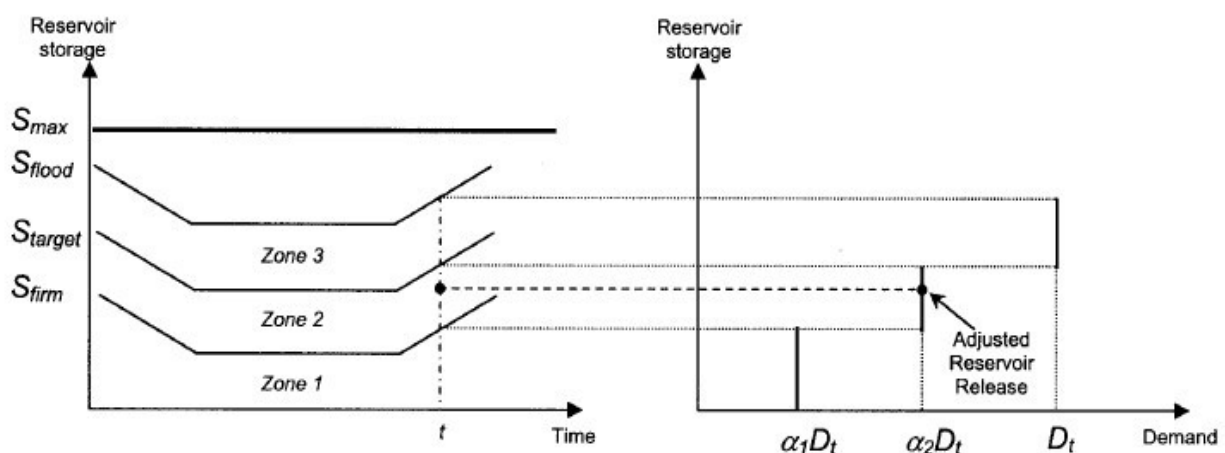
که در آن y_{1t} برابر یک است اگر محدودیتی برای تامین کل نیاز در دوره t موجود نباشد، در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود و جز پارامترهای نامعلوم است. y_{2t} برابر یک است اگر در فاز اول جیره‌بندی یا در محدوده تامین کل نیاز باشیم در غیر این صورت برابر با صفر است و پارامتری نامعلوم است. عدد کوچکی است که وزن را می‌دهد و معلوم، S_t حجم مخزن در انتهای دوره t و نامعلوم، R_t خروجی مخزن در دوره t و نامعلوم، V_{IP} مقدار مجموع ذخیره و ورودی آستانه بالا برای شروع جیره‌بندی در ماه p (براساس شکل ۱) و نامعلوم، V_{2p} مقدار مجموع ذخیره و ورودی آستانه بالا برای شروع فاز دوم جیره‌بندی در ماه p (براساس شکل ۱) و نامعلوم، V_{3p} پایین‌ترین حد مجموع ذخیره و ورودی در ماه p (براساس شکل ۱) و معلوم، p عضو $\{1, 2, 3, \dots, 12\}$ براساس موقعیت هر ماه از سال در دوره آماری $\left[1 - \frac{1}{12}(t-1)\right]$ ، t, p عبارت است از ماه در افق زمانی، I_t عبارت است از آبدهی ورودی در ابتدای دوره t و معلوم، $\hat{I}_t$ عبارت است از آبدهی ورودی در دوره t و معلوم، C ظرفیت مخزن و معلوم، W_t سرریز در دوره t و نامعلوم، D نیاز که در طول سال یکسان فرض شده و معلوم، U_t برابر با یک است اگر حجم مخزن در انتهای دوره t برابر با ظرفیت مخزن باشد و در غیر اینصورت صفر است و پارامتری نامعلوم است، M یک عدد بزرگ و ε یک عدد کوچک است که هر دو جز داده‌های ورودی هستند، α_1 عبارت است از درصد تامین نیازها در فاز اول جیره‌بندی و به‌عنوان پارامتر معلوم وارد می‌شود، α_2 عبارت است از درصد تامین نیازها در فاز دوم جیره‌بندی و به‌عنوان پارامتر معلوم وارد می‌شود، N تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری و معلوم، n تعداد کل دوره‌های مجاز برای فاز دوم جیره‌بندی و به‌صورت متغیر وارد می‌شود، β_1 و

β_2 مقادیر کوچک جدا کننده که $0.5/0$ در نظر گرفته شده‌اند. هدف ثانویه در این مدل حداکثر نمودن تعداد ماه‌هایی است که در آن جیره‌بندی نیاز نمی‌باشد. به‌منظور اجتناب از راه حل تک گزینه‌ای، قسمت دوم تابع هدف به‌صورت حداقل نمودن مجموع احجام آستانه، به تابع هدف مذکور اضافه می‌شود. در حالت کلی احجام آستانه کوچک تر به مفهوم کاهش فراوانی جیره‌بندی است. از این رو باعث می‌شود که احجام آستانه به حد امکان کوچک شده و یک پارامتر وزنی نیز بر روی این احجام اعمال شود. این پارامتر وزنی به اندازه‌ای کوچک است که از تاثیر بر روی قسمت دیگر تابع هدف، جلوگیری نماید.

با توجه به اینکه در این مدل، ضرایب جیره‌بندی توسط کاربر تعیین می‌شود، هدف نمی‌تواند حداقل نمودن حداکثر کمبود باشد. هدف اصلی در این مدل، کم نمودن تعداد ماه‌های جیره‌بندی است. همچنین کاهش تعداد ماه‌هایی که فاز دوم جیره‌بندی اعمال می‌شود. در این راستا یک منحنی تبادل بین دو هدف مذکور می‌تواند از نکات ویژه و قابل ارائه باشد.

در شکل (۲) که محور افقی بیانگر زمان و دبی مورد نیاز و محور عمودی حجم مخزن را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود این حجم‌های آستانه برای شروع جیره‌بندی ممکن است در هر ماه یا در هر فصل متفاوت باشند که این منحنی‌ها راهنمایی برای بهره‌برداران و مدیران آب می‌باشند. موقعیت قرارگیری این حجم‌های آستانه در هرماه وابسته به هیدرولوژی جریان ورودی و میزان آب ذخیره شده در اثر کاهش و جیره‌بندی نیازها است.

مفهوم مدل جیره‌بندی بعدها توسط سایر پژوهشگران توسعه یافته و برای سیستم‌های چند مخزنه و پیچیده‌تر با کاربرد برخی از فرضیات ساده کننده به‌کار رفته است.



شکل ۲- منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن با رویه جیره‌بندی گسسته (Sasikumar و Nair, ۲۰۲۱)

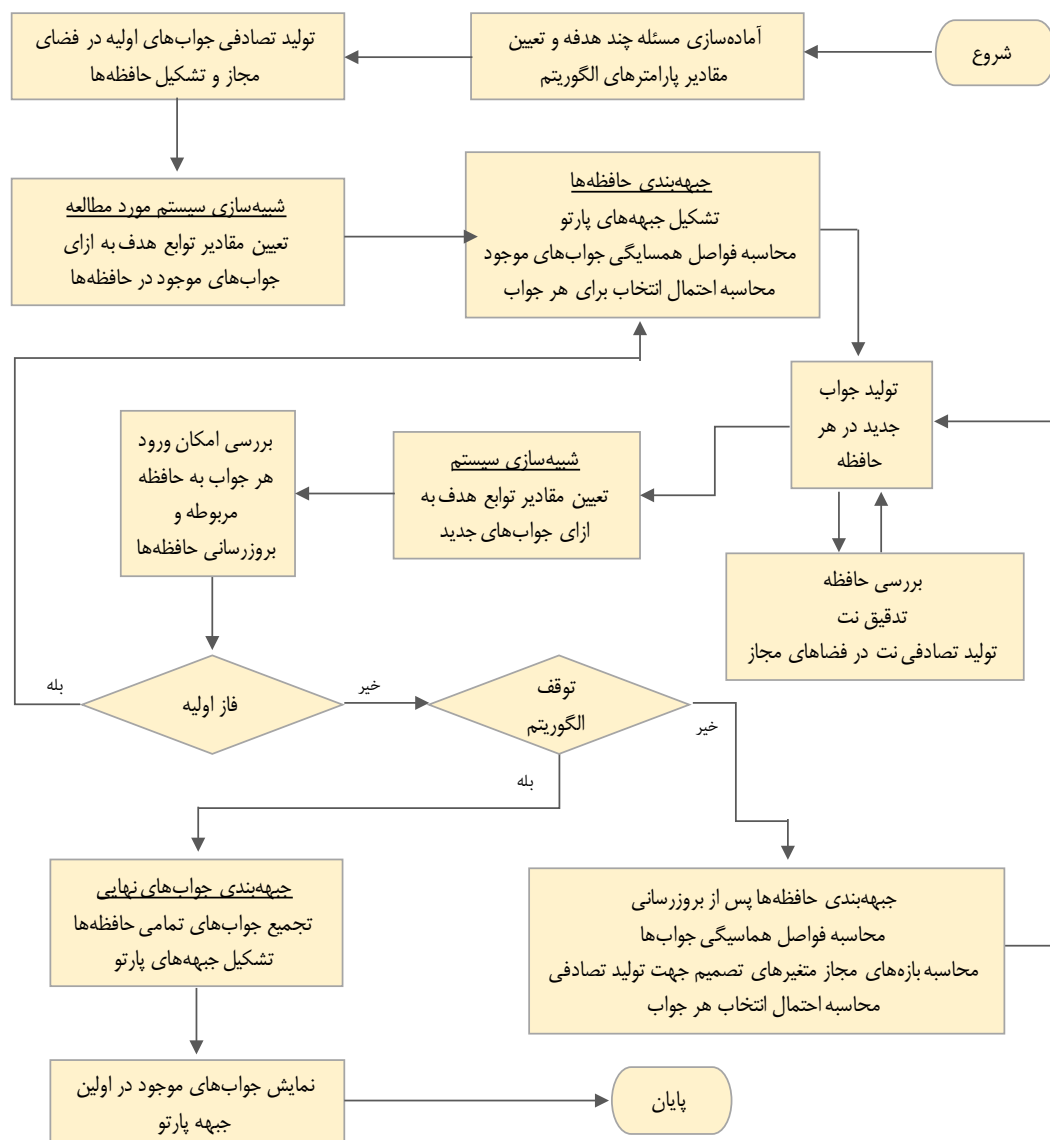
چنانچه مدل شبیه‌ساز حوضه با تمام روابط، معادلات و ساختارهای خود، به همان شکل درون مدل بهینه‌سازی استفاده شوند، کاربرد روش‌های کاوشی و فراکاوشی بهینه‌سازی و روش‌های جستجوی تصادفی تکاملی بسیار مفید است. در این راستا در پژوهش حاضر از روش فراکاوشی الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی به‌عنوان مرسوم‌ترین الگوریتم‌های موجود در تحقیقات قبلی، استفاده شده است.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در زمینه مدیریت منابع آب شامل چند هدف هستند که باهم در حال رقابت می‌باشند. برای حل اینگونه مسائل دو راه‌حل وجود دارد، (۱) روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک (۲) روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی. بعضی از روش‌های کلاسیک عبارتند از: (۱) برنامه‌ریزی خطی^۶، (۲) برنامه‌ریزی غیرخطی^۷

و (۳) برنامه‌ریزی پویا^۸.

در روش‌های کلاسیک یکی از روش‌های متداول برای بهینه‌سازی اهداف مختلف روش وزن‌دهی بود که یکی از معایب اساسی این روش هم‌زمان بهینه نشدن اهداف مختلف می‌باشد. اخیراً برای رفع این مشکل الگوریتم‌های فراکاوشی مورد توجه قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های فراکاوشی مجموعه‌ای از جواب‌ها را ارائه می‌دهند که به آن‌ها جبهه جواب‌های نامغلوب گفته می‌شود، این مجموعه جواب به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد انعطاف بیشتری در انتخاب جواب متناسب با وضعیت مورد نظرشان داشته باشند.

مراحل مختلف محاسباتی الگوریتم پیشنهادی به‌ترتیب زیر در یازده گام اصلی در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۳) فلوچارت کامل الگوریتم خفاش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم چندهدفه پیشنهادی

سد و مخزن دز یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین پروژه‌های آبی ایران است که بر روی رودخانه دز در استان خوزستان ساخته شده است. این سد به دلیل موقعیت جغرافیایی و اهداف متنوع بهره‌برداری، اهمیت زیادی در مدیریت منابع آب منطقه دارد. در ادامه ویژگی‌های اصلی این مخزن ذکر شده است:

- **ارتفاع سد:** ۲۰۳ متر که آن را به یکی از بلندترین سدهای بتنی در ایران و خاورمیانه تبدیل کرده است.
- **ظرفیت مخزن:** حدود ۳/۳۴ میلیارد مترمکعب که ظرفیت قابل توجهی برای ذخیره‌سازی آب فراهم می‌کند.
- **مساحت مخزن:** مساحت سطحی مخزن در تراز حداکثر حدود ۶۳ کیلومتر مربع است.
- **نوع سد:** بتنی قوسی که طراحی آن باعث افزایش پایداری و مقاومت در برابر فشار آب می‌شود.

نتایج و بحث

برای مدل‌سازی دودهنه سیستم تک مخزنی دز، یک مدل بلندمدت ۴۲ ساله با اهداف تأمین نیاز و تولید انرژی گسترش یافته و جهت برآورد کارایی الگوریتم، نتایج حاصل از آن با نتایج یک مدل بهینه‌سازی دودهنه بر مبنای روش خفاش مقایسه شده است. مقادیر بهینه پارامترهای هر دو الگوریتم با استفاده از تحلیل حساسیت در اجراهای متعدد تعیین شده است. در این مدل‌سازی متغیرهای تصمیم پارامترهای منحنی فرمان مخزن و حجم ذخیره مخزن در شروع محاسبات می‌باشند.

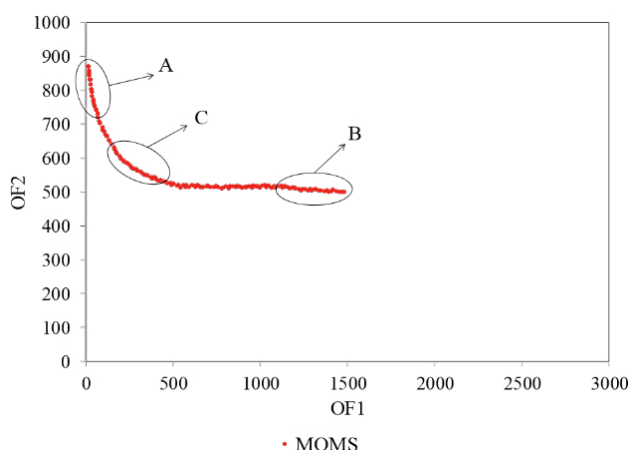
پس از آن که الگوریتم خفاش در سیستم تک مخزنی عملکرد بسیار خوبی را از خود نشان داد، برای برآورد بهتر توانایی‌های الگوریتم، عملکرد آن در بهینه‌سازی یک سیستم سه مخزنی نسبتاً پیچیده برای یک دوره بلند مدت ۴۷ ساله بررسی شد. مسئله مورد بررسی یک مسئله دو هدفه برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سه مخزنی زهره با اهداف تولید انرژی و تأمین نیاز آبی مناطق کشاورزی زهره بوده است. در بخش حاضر دو نیروگاه تولید انرژی برقابی واقع در پایین دست مخازن چم شیر و زهره نیز به این سیستم افزوده شد. ظرفیت نصب این نیروگاه‌ها به ترتیب برابر ۳۷۵ مگاوات برای نیروگاه چم شیر و ۴۰۰ مگاوات برای نیروگاه زهره می‌باشد.

لازم به ذکر است در این مدل‌سازی، تأمین حداقل‌های محیط زیستی در بازه‌های مختلف رودخانه به صورت قید

و تولید انرژی و تأمین نیاز به صورت اهداف اصلی مسئله مدل شدند.

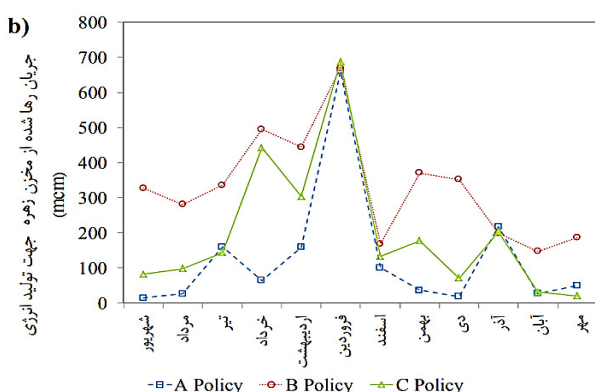
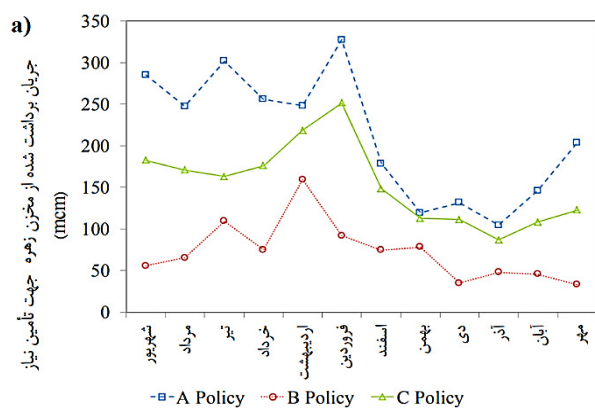
پس از حل یک مسئله چند هدفه و تعیین منحنی تبادل اهداف نکته مهم چگونگی استفاده از نتایج حاصل است. در شکل (۴) هر یک از نقاط موجود بر روی منحنی تبادل اهداف که محور افقی نشان دهنده تولید انرژی برقابی (OF_1) و محور عمود تأمین نیاز آبی (OF_2) می‌باشند، نشان‌دهنده یک سیاست خاص بهره‌برداری است.

شکل (۴) سه دسته سیاست مختلف قابل استحصال از منحنی تبادل مسئله مورد نظر را نمایش می‌دهد. چنانچه هدف اصلی تصمیم‌گیران سیستم، تأمین نیازهای کشاورزی باشد باید از نقاط نشان داده شده در ناحیه A شکل (۴) برای مدیریت سیستم استفاده نمایند. چنانچه هدف اصلی تولید انرژی برقابی باشد بهره بردن از سیاست‌های نشان داده شده در ناحیه B، برای مدیریت سیستم مناسب می‌باشد. چنانچه هر دو هدف اولویت تقریباً یکسانی داشته باشند، بهترین سیاست بهره‌برداری، یکی از سیاست‌های واقع در ناحیه C منحنی تبادل می‌باشد.



شکل ۴- سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از سیستم

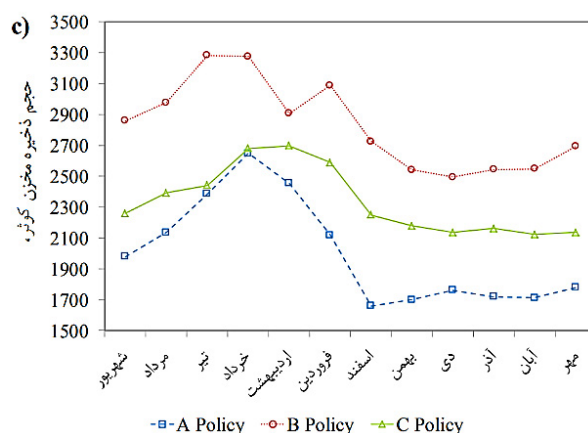
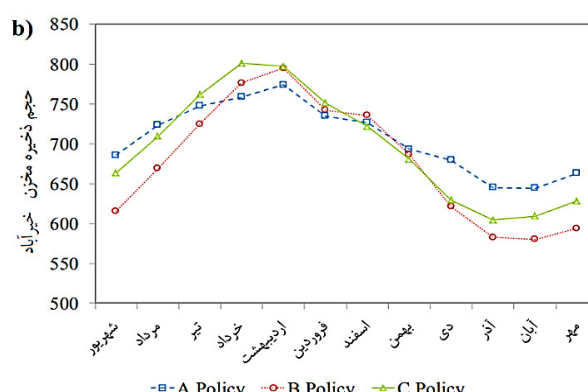
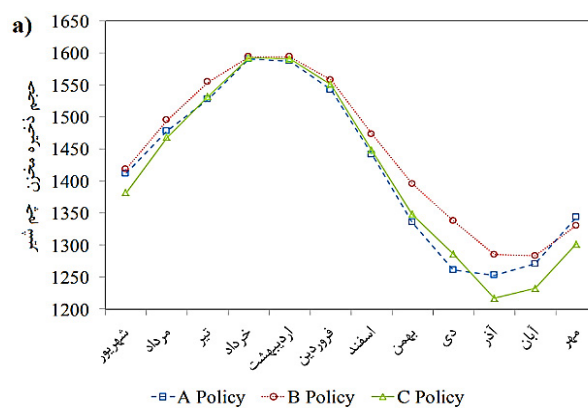
شکل (۵) میانگین ماهانه احجام ذخیره مخازن در کل دوره را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت میانگین احجام ذخیره ماهانه مخزن زهره حاصل از اعمال سیاست‌های مختلف بسیار محسوس است. این امر دو علت عمده می‌تواند داشته باشد. اول اینکه، ظرفیت فعال مخازن دیگر در مقابل ظرفیت فعال مخزن زهره کوچک‌تر هستند و دوم اینکه، جریان‌های قابل دسترس در محل محور زهره بسیار بیشتر از جریان‌های ورودی به مخازن بالادست است.



شکل ۶- میانگین ماهانه جریان‌های برداشت شده از مخزن زهره جهت تأمین نیاز و تولید انرژی (میلیون متر مکعب)

شرح اصلاحات الگوریتم خفاش جهت افزایش کارایی در بهینه‌سازی سه هدفه

در اصلاحات جدید صورت گرفته بر الگوریتم چند هدفه، به‌جای استفاده از روش تابع جریمه، که مستلزم تعیین مقادیر پارامتر جریمه^۹ است، از روشی مشابه روش پیشنهادی Rozos (۲۰۱۹) استفاده شده است. در این روش که به‌عنوان روش تسلط مقید^{۱۰} شناخته شده است، در هنگام تشخیص تسلط یک جواب بر جواب دیگر مقادیر تخطی از قیود نیز نقش داشته و در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به ساختار مسئله مورد نظر در این پژوهش استفاده از این روش با اندکی تغییرات جزئی بر کارایی الگوریتم و سرعت حذف جواب‌های غیرموجه از حافظه‌ها می‌افزاید. در مدل پیشنهادی برتری جواب‌ها بر یکدیگر به ترتیب بر اساس معیارهای درجه تخطی از قیود سیستم، موجه بودن جواب‌ها، تسلط بر حسب مقادیر توابع هدف و مقدار فاصله همسایگی جواب‌ها مشخص می‌شود.



شکل ۵- میانگین ماهانه بلندمدت احجام ذخیره مخازن سیستم (میلیون متر مکعب)

شکل (۶) مقدار میانگین ماهانه جریان‌های برداشت شده از مخزن زهره جهت تأمین نیاز و تولید انرژی را حاصل از اعمال سیاست‌های سه‌گانه بیان شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین مقادیر جریان برداشت شده برای تأمین نیاز در هنگام اعمال سیاست A صورت گرفته است و در ماه‌هایی از سال که مقادیر نیاز بیشتر است اختلاف میان عملکرد سیاست‌های مختلف در تأمین نیازها، ملموس‌تر می‌باشد.

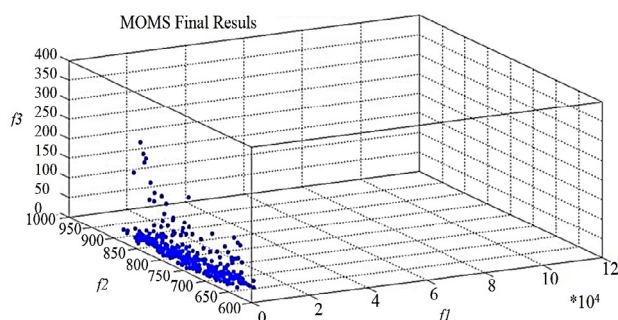
مسئله بهینه‌سازی سه هدفه

مسئله پیشرو همان مسئله مطرح شده در بخش دو هدفه به علاوه بحث کنترل سیلاب می‌باشد. در نتیجه می‌توان تأمین نیازهای کشاورزی، تولید انرژی برقی و کنترل سیلاب را به عنوان اهداف سیستم مورد نظر برشمرد. تأمین حداقل‌های محیط زیستی در بازه‌های مختلف رودخانه به صورت قید مدل شده‌اند.

در این رویکرد خاص، که در این مقاله به عنوان اولین رویکرد مدل‌سازی سه هدفه مطرح می‌شود، تابع هدف مربوط به کنترل سیلاب به صورت مجموع مربعات نسبی تفاوت احجام ذخیره مخازن با مقادیر مطلوب آن‌ها در گام‌های زمانی ماهانه تعریف شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، پارامترهای منحنی‌های فرمان بهره‌برداری از سیستم می‌باشند.

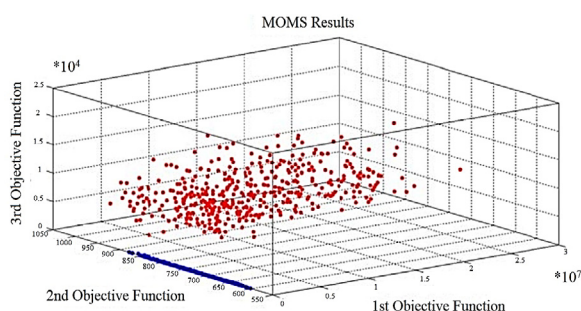
برای بررسی دقت و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی اصلاح شده ابتدا سیستم سه‌مخزنی مورد نظر را با الگوریتم پیشنهادی بهینه کرده و نتایج حاصل با نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش مقایسه می‌شود.

دو هدف اصلی برای تمامی الگوریتم‌های خفاشی فراکاوشی می‌توان نام برد، الف) کشف جواب‌های بهینه پارتو یا نزدیک به آن ب) پیدا کردن جواب‌هایی با تنوع و گوناگونی مناسب. یک الگوریتم بهینه‌یابی خفاش را الگوریتم خوبی گویند اگر هر دو هدف ذکر شده را برآورده سازد. اگر بتوان معیاری پیدا نمود که به وسیله آن میزان نزدیک بودن جواب‌های نهایی را به جواب‌های پارتو به دست آید و همچنین معیار دیگری که به وسیله آن میزان توزیع جواب‌ها تشخیص داده شود، آنگاه می‌توان عملکرد دو الگوریتم را از نظر برتر بودن یکی نسبت به دیگری سنجید. در نتیجه به دو معیار عملکرد برای ارزیابی مناسب الگوریتم‌های بهینه‌یابی چند هدفه نیاز است. باتوجه به اینکه مسئله مورد بررسی یک مسئله مقید است و در چنین مسائلی اعمال قیود مسئله جزء چالش‌های اصلی عملکرد الگوریتم می‌باشد، می‌توان از قابلیت الگوریتم در یافتن جواب‌های موجه مسئله به عنوان یک معیار پراهمیت بهره جست. لذا جهت مقایسه نتایج الگوریتم NSGA-II و خفاش پس از انجام تحلیل حساسیت نسبت به پارامترها و با استفاده از پیشنهادات مراجع اصلی با جمعیتی برابر با ۵۰۰ کروموزوم، نسبت ترکیب ۰/۸۸ و احتمال جهش ۰/۱ با ۵۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. شکل (۷) نتایج نهایی حاصل از مدل پیشنهادی پس از ۳۱۲۵۰۰ تکرار و یا ۲۵۰۰۰۰ تولید پژواک جدید را در فضای سه بعدی اهداف نشان می‌دهد.



شکل ۷- نتایج نهایی حاصل از مدل سه هدفه در فضای سه بعدی اهداف

جواب‌های اولیه مدل که به صورت کاملاً تصادفی در فضای اهداف مسئله پخش شده‌اند، نه تنها بهینه نیستند بلکه در فضای غیرموجه مسئله قرار گرفته‌اند. با پیشروی فرآیند حل به تدریج جواب‌های غیر موجه حذف شده و الگوریتم با حفظ جواب‌های موجه به سمت تولید جواب‌های بهینه پیش می‌رود و در نهایت جواب‌هایی که تشکیل دهنده جبهه پارتوی مسئله هستند، حاصل می‌شوند. در شکل (۸) نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و جواب‌های اولیه کاملاً تصادفی در کنار یکدیگر برای بررسی چگونگی پیشرفت الگوریتم ارائه شده‌اند.



شکل ۸- جواب‌های اولیه تصادفی در کنار جواب‌های نهایی حاصل از مدل در فضای سه بعدی اهداف

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که نتایج نهایی (نقاط آبی رنگ) در یک قسمت بسیار کوچک از کل فضای سه بعدی اهداف واقع شده و گستردگی آن‌ها به مراتب کمتر از جواب‌های اولیه تصادفی (نقاط قرمز رنگ) می‌باشد.

در شکل (۹) نتایج نهایی حاصل از الگوریتم سه هدفه پیشنهادی در مقایسه با نتایج نهایی حاصل از الگوریتم NSGA-II نمایش داده شده است. این مقایسه در تعداد برآوردهای یکسان صورت گرفته است. همانگونه که مشاهده می‌شود الگوریتم BAT به جواب‌های بسیار بهتری دست یافته است. در حقیقت جواب‌های حاصل از NSGA-II در این تعداد برآورد تابع هدف هنوز نتوانسته‌اند به یک جبهه پارتوی کاملاً یکنواخت برسند.

بررسی نقش مخازن در عملکرد سیستمی

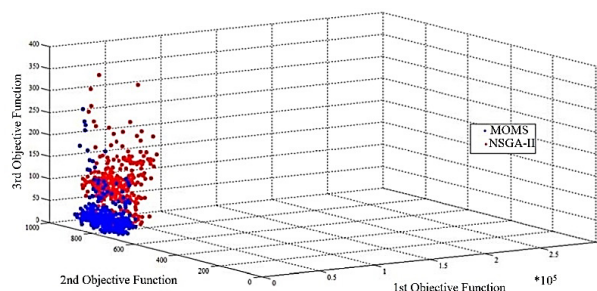
در این بخش تا حدودی به بررسی منحنی‌های تبادل به‌دست آمده برای اهداف تولید انرژی و تأمین نیاز (به ترتیب محور عمودی و محور افقی در شکل ۱۰) در حالات مختلف پرداخته شده و تأثیر مقادیر مختلف احجام در نظر گرفته شده برای کنترل سیلاب در مخازن مختلف سیستم بر برآورده نمودن اهداف دیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. از میان کلیه حالات مختلف مدل شده در این تحقیق نتایج ۴۸ حالت جهت بررسی تأثیر مقادیر مختلف احجام کنترل سیلاب بر چگونگی عملکرد سیستم ارائه شده است که در ادامه به شرح مشخصات هر حالت خاص و نتایج حاصل از آن پرداخته شده است.

شکل (۱۰) تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب مخزن سد چندمخزنی زهره را در قالب ۴ دسته نمودار مختلف نشان می‌دهد. در هر نمودار حجم کنترل سیلاب در سایر مخازن ثابت فرض شده و برای مخزن سد زهره، سه مقدار مختلف به‌عنوان تراز حداکثر ذخیره در ماه‌های سیلابی که در واقع تعیین کننده حجم قابل استفاده جهت کنترل سیلاب می‌باشند، فرض شده است. نمودارهای ارائه شده در هر حالت، منحنی‌های تبادل اهداف تولید انرژی و تأمین نیاز به‌دست آمده توسط مدل پیشنهادی می‌باشند.

شکل (۱۰-ا)، حالتی را نشان می‌دهد که در آن مخازن چم‌شیر و کوثر بیشترین حجم کنترل سیلاب را دارند و کمترین حجم فعال، در میان حالات مورد بررسی می‌باشند. در چنین حالاتی نقش ظرفیت فعال مخزن سد زهره در برآورده نمودن اهداف دیگر به‌خصوص تأمین انرژی بسیار پر اهمیت‌تر خواهد بود. همان‌طور که در این نمودار مشخص است با افزایش تراز کنترل سیلاب (کاهش حجم کنترل سیلاب) این مخزن، کل سیستم قادر به تولید انرژی و تأمین نیاز بیشتری می‌باشد.

شکل (۱۰-ب)، تبادل اهداف را در حالتی نشان می‌دهد که در آن نسبت به حالت قبل مقادیر حجم فعال مخازن چم‌شیر و کوثر که مخازن بزرگ‌تری می‌باشند، افزایش یافته است. این تغییر منجر به کم شدن تأثیر ظرفیت ذخیره فعال مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم به میزان قابل ملاحظه‌ای شده است. در نتیجه، منحنی‌های تبادل به‌دست آمده نسبت به تغییر حجم کنترل سیلاب در مخزن سد زهره روند افزایشی یا کاهشی خاصی را دنبال نمی‌کنند.

شکل (۱۰-ج)، نیز نشان‌دهنده شرایط مشابهی می‌باشد. در این حالت، مخازن چم‌شیر و خیرآباد بیشترین ظرفیت ذخیره فعال خود را دارند که همین موضوع از نسبت تأثیر عملکرد مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم می‌کاهد.



شکل ۹- نتایج نهایی حاصل از مدل BAT و الگوریتم NSGA-II در فضای سه بعدی اهداف

در انتها، جهت مقایسه کمی نتایج حاصل از الگوریتم چند هدفه پیشنهادی (BAT) با نتایج حاصل از الگوریتم NSGA-II از معیار پوشش مجموعه استفاده شده است. از آنجا که هر دو الگوریتم مورد نظر بر اساس جستجوی تصادفی عمل می‌نمایند، نتایج ۲۰ اجرای مستقل هر یک از آن‌ها به‌صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و معیار پوشش مجموعه برای نتایج نهایی حاصل محاسبه شده است. خلاصه این نتایج در جدول (۱) ارائه شد.

جدول ۱- نتایج برآورد معیار پوشش مجموعه برای مدل سه هدفه-سه مخزنی کرخه

	Min	Mean	Max
C (BAT, NSGA-II)	% ۵۶/۳۷	% ۷۹/۵۳	% ۹۰/۸۶
C (NSGA-II, BAT)	% ۰	% ۳۶/۷۲	% ۶۰/۹۴

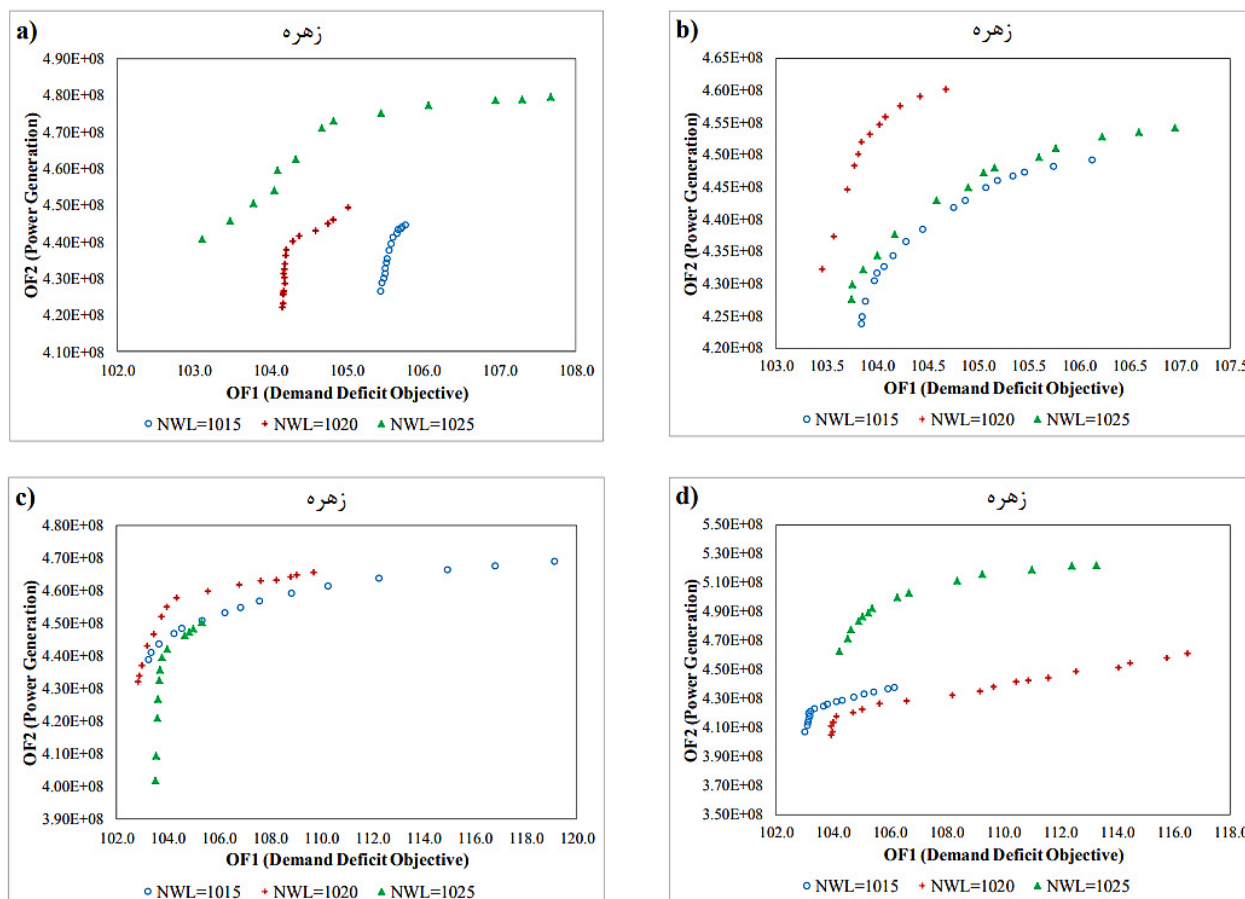
در این نتایج مشاهده می‌شود که میانگین مقادیر C(BAT, NSGA-II) حاصل از ۲۰ مقایسه مستقل از هم، برابر % ۷۹/۵۳ بوده است. این به آن معنی است که به‌طور میانگین بیش از ۷۹٪ از جواب‌های نهایی حاصل از الگوریتم NSGA-II توسط جواب‌های نهایی حاصل از الگوریتم BAT در اجراهای متناظر غلبه ضعیف شده‌اند. این معیار در بهترین حالت عملکرد NSGA-II حدود % ۵۶ می‌باشد. همچنین کمترین مقدار C(NSGA-II, BAT) برابر صفر است و این به آن معنی است که در میان اجراهای صورت گرفته حداقل یک بار هیچ‌یک از جواب‌های نهایی مدل BAT توسط جواب‌های نهایی NSGA-II غلبه ضعیف نشدند.

همان‌گونه که مشخص است بزرگ‌ترین مشکل مفهومی این رویکرد در برخورد با مسئله کنترل سیلاب، چگونگی مدل‌سازی آن است. جهت بهینه‌سازی هرچه دقیق‌تر بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با در نظر گرفتن مسئله کنترل سیلاب و دستیابی به یک مدل کاربردی، رویکردی جدید در این پژوهش ارائه شده که منجر به بررسی سه هدفه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی با در نظر گرفتن اهداف موردنظر به نحوی مطلوب شده است.

که منجر به تولید بیشترین مقدار انرژی در کل سیستم شده است.

مقادیر حداکثر دبی سیلاب خروجی از کل سیستم برای هر یک از حالات ارائه شده در شکل (۱۰)، در جدول (۲) آورده شده است. از میان حالات بررسی شده در این قسمت، کمترین پیک سیلاب خروجی از سیستم برابر ۷۳۷۹ مترمکعب بر ثانیه بوده و هنگامی رخ می‌دهد که تراز کنترل سیلاب در مخزن سد زهره برابر ۱۰۱۵ متر از سطح دریا باشد.

شکل (۱۰-d)، نشان‌دهنده منحنی‌های تبادل اهداف در حالتی است که در آن، مخازن چم‌شیر، خیرآباد و کوثر بیشترین ظرفیت ذخیره فعال خود می‌باشند را دارند. در این حالت اثرگذاری نسبی مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم کمترین مقدار خود را دارد و به‌همین دلیل روند تغییرات مشخصی در منحنی‌های تبادل دیده نمی‌شود. اما باید دقت داشت شرایطی که تراز کنترل سیلاب این مخزن برابر با بیشترین مقدار خود باشد، دقیقاً همان حالتی است



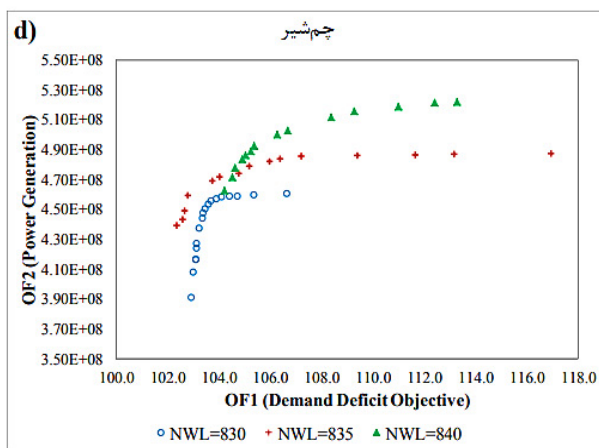
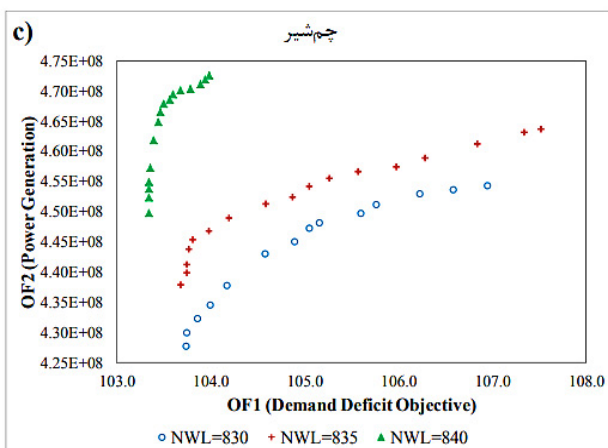
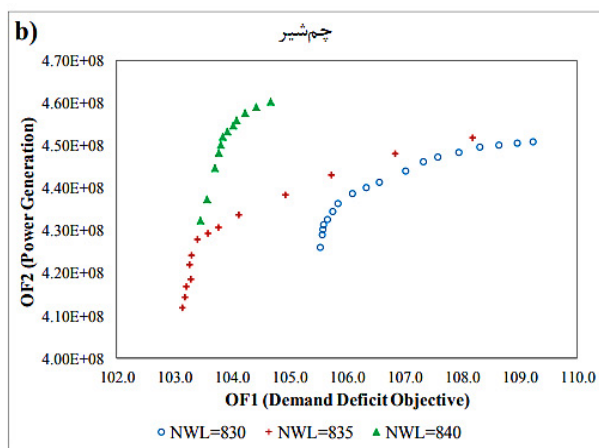
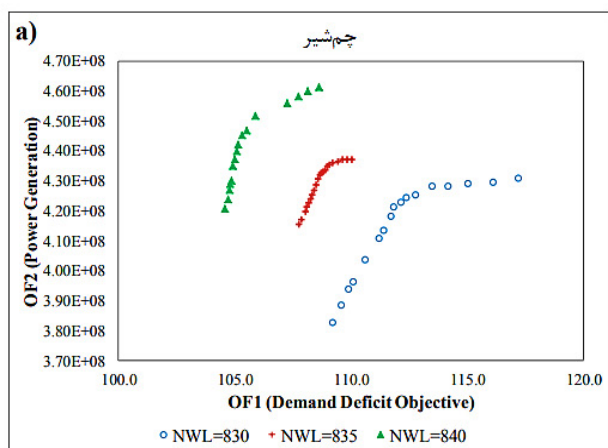
شکل ۱۰- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول ۲- پیک سیلاب خروجی از سیستم به ازای ترازهای مختلف کنترل سیلاب در مخزن سد زهره (cms) برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (مترمکعب بر ثانیه)

حالات مختلف حجم کنترل سیلاب				تراز کنترل سیلاب (NWL) در مخزن سد زهره
a	b	c	d	
۷۳۷۹	۷۶۳۲	۸۴۵۷	۱۰۵۸۱	۱۰۱۵
۷۸۵۷	۸۴۰۵	۸۵۵۹	۱۰۶۶۶	۱۰۲۰
۷۹۲۸	۸۴۹۴	۸۶۵۴	۱۰۷۷۸	۱۰۲۵

اول (شکل ۱۱-a) کاسته شده و تأثیر ظرفیت مخزن چم شیر بر تولید انرژی کلی سیستم بیش تر شده است. می توان مشاهده کرد که در این حالت با تغییر ظرفیت فعال مخزن چم شیر تغییر چندانی در تأمین نیاز کلی سیستم ایجاد نمی شود، اما مقادیر تولید انرژی دچار تغییرات قابل توجهی می شوند. شکل (۱۱-d) حالتی را نشان می دهد که در آن مخازن سد زهره، خیرآباد و کوثر بیشترین ظرفیت ذخیره فعال خود را دارند. در نتیجه تأثیر ظرفیت چم شیر بر عملکرد کلی سیستم به حداقل خود رسیده است. در این حالت نیز مشاهده می شود که ظرفیت این مخزن تأثیر قابل ملاحظه ای را بر تولید انرژی در کل سیستم داشته و می توان با کاهش حجم کنترل سیلاب در این مخزن توان تولید انرژی را در کل سیستم افزایش داد. مقادیر حداکثر دبی سیلاب های خروجی از مخزن چم شیر به عنوان خروجی های سیستم برای هر یک از حالات ارائه شده در شکل (۱۱)، در جدول (۳) آورده شده اند. از میان حالات بررسی شده در این قسمت، کمترین پیک سیلاب خروجی برابر ۷۲۰۱ مترمکعب بر ثانیه بوده و هنگامی رخ می دهد که تراز کنترل سیلاب در مخزن چم شیر برابر ۸۳۰ متر از سطح دریا باشد.

شکل (۱۱) نشان دهنده چگونگی تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب مخزن چم شیر بر عملکرد کلی سیستم می باشند. شکل (۱۱-a) تبادل اهداف را در حالتی نشان می دهد که در آن مخازن سد زهره، چم شیر و کوثر کمترین ظرفیت ذخیره فعال را دارند. در نتیجه مقدار ظرفیت فعال مخزن چم شیر بیشترین تأثیر را بر تولید انرژی کلی و تأمین نیاز در کل سیستم دارد. در این نمودار دیده می شود که با انتخاب مقادیر حجم کنترل سیلاب کوچک تر در این مخزن، منحنی های تبادل نشان دهنده تأمین نیاز و تولید انرژی بیشتری برای کل سیستم می باشند. شکل (۱۱-b) نشان دهنده تبادل اهداف در حالتی است که در آن از ظرفیت ذخیره فعال مخازن سد زهره، خیرآباد و کوثر نسبت به حالت قبل کاسته شده است. می توان مشاهده کرد که در این حالت خاص ظرفیت ذخیره مخزن چم شیر بر تولید انرژی سیستم تأثیر بیشتری دارد تا بر تأمین نیاز آن. این نتایج، منطبق بر خصوصیات هندسی مخازن و نشان دهنده صحت عملکرد سیستمی مدل پیشنهادی می باشد. شکل (۱۱-c) نشان دهنده تبادل اهداف در حالتی است که در آن از ظرفیت ذخیره فعال مخازن سد زهره و کوثر نسبت به حالت



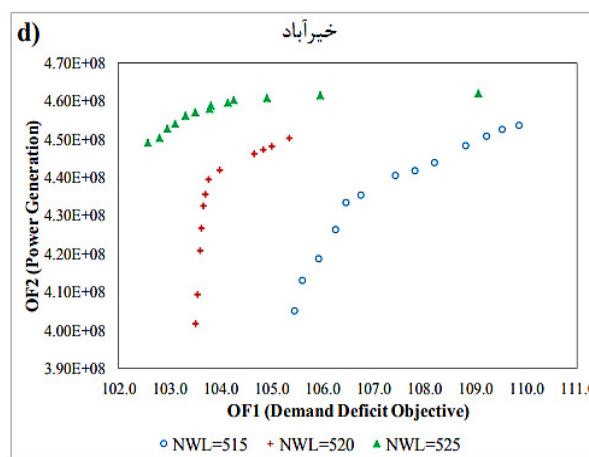
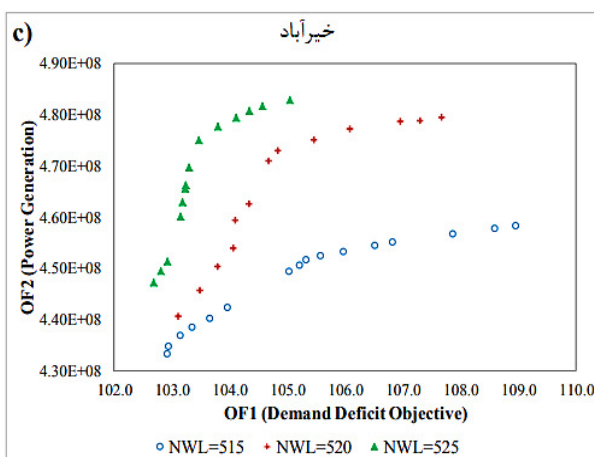
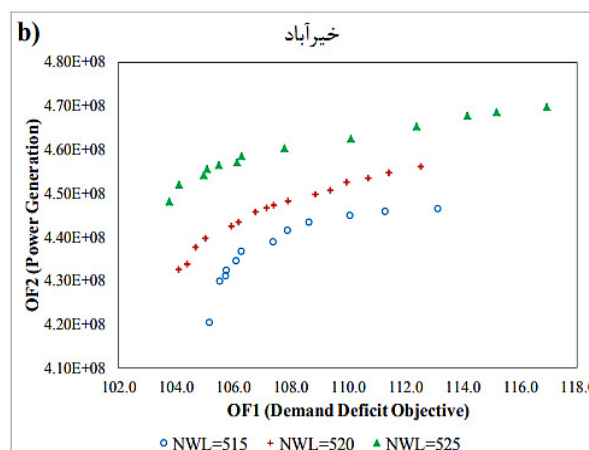
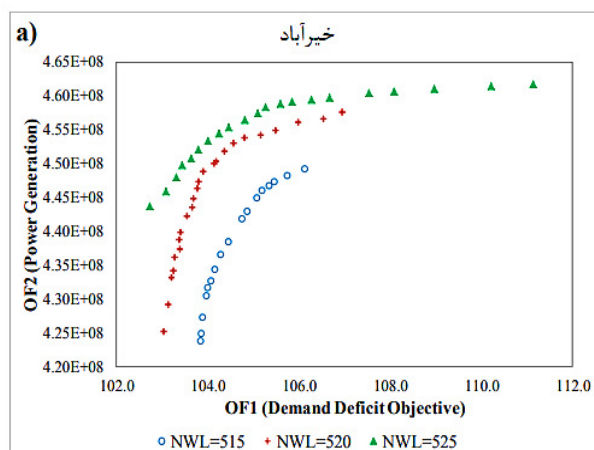
شکل ۱۱- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن چم شیر بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول ۳- پیک سیلاب خروجی از سیستم به ازای ترازهای مختلف کنترل سیلاب در مخزن چم شیر (cms)
برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (مترمکعب بر ثانیه)

حالت‌های مختلف حجم کنترل سیلاب				تراز کنترل سیلاب (NWL) در مخزن چم شیر
a	b	c	D	
۷۲۰۱	۸۵۰۸	۸۳۰۳	۱۹۴۹۴	۸۳۰
۷۳۹۱	۸۷۰۹	۸۴۹۴	۱۰۶۲۲	۸۳۵
۷۸۸۴	۸۹۱۷	۸۶۵۷	۱۰۷۷۸	۸۴۰

حالات ارائه شده در شکل (۱۲)، در جدول (۴) ارائه شدند. از میان حالات بررسی شده، کمترین پیک سیلاب خروجی برابر ۷۶۳۲ مترمکعب بر ثانیه بوده و هنگامی رخ می‌دهد که تراز کنترل سیلاب در مخزن خیرآباد برابر ۵۱۵ متر از سطح دریا باشد. همچنین کمترین استهلاک سیلاب در سیستم، هنگامی اتفاق می‌افتد که تراز کنترل سیلاب در این مخزن برابر ۵۲۵ متر از سطح دریا باشد که در این حالت خاص، پیک سیلاب خروجی از سیستم برابر ۱۰۳۸۹ مترمکعب بر ثانیه است.

شکل (۱۲) چگونگی تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب مخزن خیرآباد را بر عملکرد کلی سیستم نشان می‌دهند. همان‌طور که در هر چهار حالت مختلف ارائه شده در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، ظرفیت ذخیره فعال مخزن خیرآباد هم در تأمین نیازهای کلی منطقه و هم در تولید انرژی استخراج شده از نتایج مدل نقش دارد. مقادیر حداکثر دبی سیلاب‌های خروجی از مخزن چم شیر به‌عنوان خروجی‌های سیستم مورد بررسی، برای هر یک از



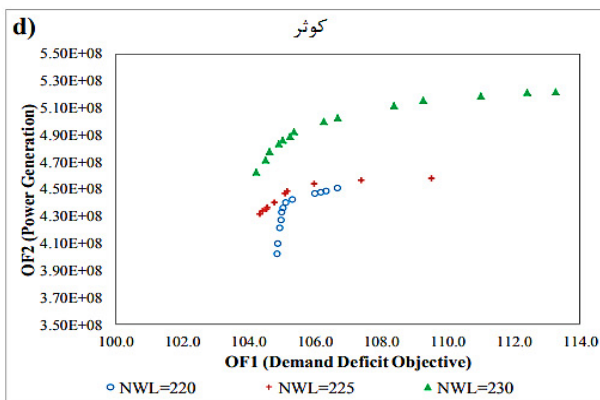
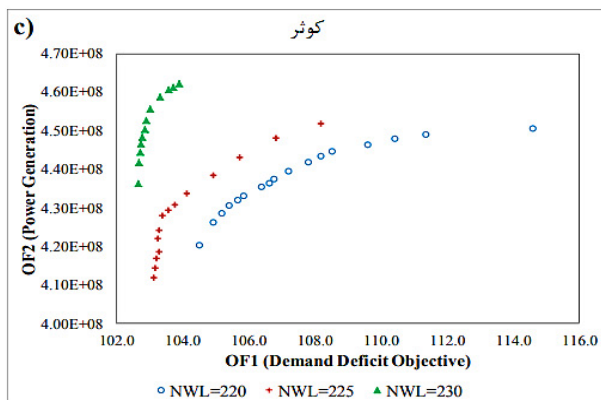
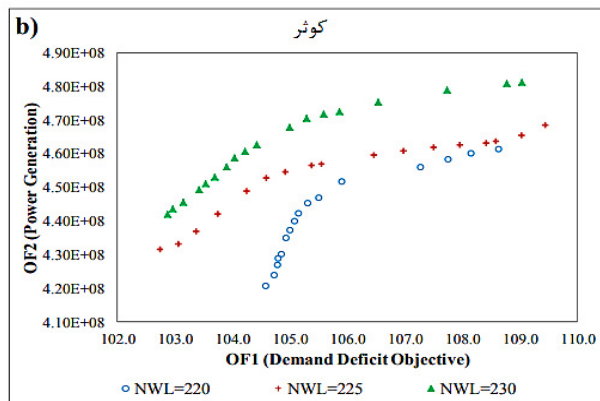
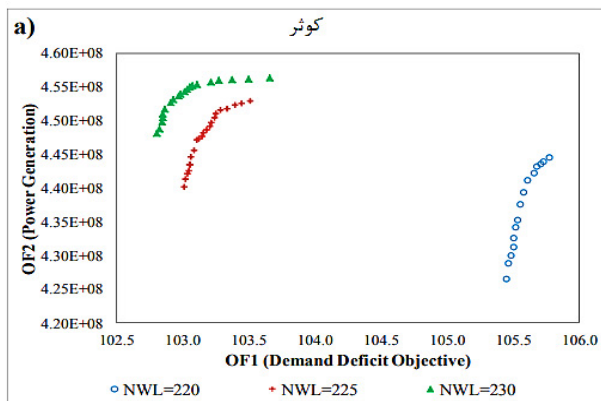
شکل ۱۲- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن خیرآباد بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول ۴- پیک سیلاب خروجی از سیستم به ازای ترازهای مختلف کنترل سیلاب در مخزن خیرآباد (cms)
برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (مترمکعب بر ثانیه)

حالت‌های مختلف حجم کنترل سیلاب				تراز کنترل سیلاب (NWL) در مخزن خیرآباد
a	b	c	D	
۷۶۳۲	۹۷۴۵	۸۰۴۵	۸۱۳۴	۵۱۵
۸۶۳۳	۹۹۶۹	۸۳۸۹	۸۳۹۷	۵۲۰
۸۹۹۸	۱۰۶۰۲	۸۶۵۴	۱۰۳۸۹	۵۲۵

حالات بررسی شده، کم‌ترین پیک سیلاب خروجی برابر ۷۲۰۱ مترمکعب بر ثانیه بوده و هنگامی رخ می‌دهد که تراز کنترل کمترین در مخزن کوثر برابر ۲۲۰ متر از سطح دریا باشد. این حالت در حقیقت همان حالتی است که به‌عنوان بهترین گزینه کنترل سیلاب تشریح شد. همچنین کمترین استهلاک سیلاب در سیستم، هنگامی اتفاق می‌افتد که تراز کنترل سیلاب در این مخزن برابر ۲۳۰ متر از سطح دریا باشد. در این حالت مقدار پیک سیلاب خروجی از سیستم برابر ۱۰۷۷۸ مترمکعب بر ثانیه است. با این مقادیر مشخص از احجام کنترل سیلاب در مخازن می‌توان با اعمال سیاست مناسب بهره‌برداری از سیستم به بیشترین مقدار تولید انرژی دست یافت.

شکل (۱۳) چگونگی تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب مخزن کوثر را بر عملکرد سیستم در تأمین نیازهای منطقه و تولید انرژی نشان می‌دهند. در تمامی حالات نشان داده شده در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش حجم کنترل سیلاب در این مخزن توان کل سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر کاهش می‌یابد. باید دقت داشت که مخزن کوثر دارای بزرگ‌ترین حجم ذخیره فعال و بیشترین مقادیر جریان‌های ورودی در سیستم مورد نظر می‌باشد. مقادیر حداکثر دبی سیلاب‌های خروجی از سیستم چهار مخزنی مورد نظر در پایین دست مخزن کوثر، برای هر یک از حالات ارائه شده در شکل (۱۳)، در جدول (۵) نمایش داده شدند. از میان



شکل ۱۳- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن کوثر بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول ۵- پیک سیلاب خروجی از سیستم به ازای ترازهای مختلف کنترل سیلاب در مخزن کوثر (cms)
برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (مترمکعب بر ثانیه)

حالت‌های مختلف حجم کنترل سیلاب				تراز کنترل سیلاب (NWL) در مخزن کوثر
a	b	C	D	
۷۲۰۱	۸۱۸۸	۷۹۵۴	۸۶۵۴	۲۲۰
۷۴۳۲	۸۸۴۴	۸۵۹۰	۹۳۶۶	۲۲۵
۸۱۳۷	۱۰۲۶۸	۱۰۰۵۹	۱۰۷۷۸	۲۳۰

مدل‌ها جهت تولید آمار و پیش‌بینی بهره‌برداری از سطح آزاد تا حدود یک سوم آمار موجود به مدت ۱۰ سال استفاده شد که نتایج حاصل در جداول (۶) تا (۹) ارائه شده است. در این پژوهش نیز جهت تولید آمار مصنوعی بهره‌برداری از مخزن و پیش‌بینی، پارامترهای تصادفی مدل (ε_t) با استفاده از نرم‌افزار Excel به‌دست آمده است.

مجموع این تحلیل‌ها و تطابق آن‌ها با شرایط واقعی سیستم، خصوصیات هندسی مخازن و قابلیت آن‌ها در برآورده ساختن اهداف مختلف نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل پیشنهادی در تجزیه و تحلیل سیستم چند مخزنی مورد نظر می‌باشد.

پس از آزمون نکویی برآزش و انتخاب مدل مناسب، از این

جدول ۷- نتایج مقادیر پیش‌بینی بهره‌برداری سالانه ایستگاه زهره با استفاده از مدل (۱) AR برای سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۱۲

سال	مقادیر پیش‌بینی (مترمکعب بر ثانیه)
۱۴۰۳	۱۰۵۳/۶۹۶
۱۴۰۴	۱۰۸۹/۹۶۳
۱۴۰۵	۱۱۶۲/۱۴۷
۱۴۰۶	۱۱۸۱/۴۲۲
۱۴۰۷	۱۱۷۰/۷۰۱
۱۴۰۸	۱۰۹۸/۰۸۶
۱۴۰۹	۱۱۰۳/۸۳۳
۱۴۱۰	۱۱۴۲/۸۶۸
۱۴۱۱	۱۱۱۵/۲۸
۱۴۱۲	۱۰۴۹/۰۱

جدول ۶- نتایج مقادیر پیش‌بینی بهره‌برداری سالانه ایستگاه دز با استفاده از مدل (۱) AR برای سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۱۲

سال	مقادیر پیش‌بینی (مترمکعب بر ثانیه)
۱۴۰۳	۱۲۱۲/۹۵
۱۴۰۴	۱۱۶۹/۸۲
۱۴۰۵	۱۲۲۹/۹۲۹
۱۴۰۶	۱۳۲۶/۴۱۸
۱۴۰۷	۱۳۷۰/۴۷۳
۱۴۰۸	۱۴۳۲/۰۹۲
۱۴۰۹	۱۲۰۰/۷۳۷
۱۴۱۰	۱۲۱۶/۶۹۴
۱۴۱۱	۱۳۰۸/۲۲۹
۱۴۱۲	۱۲۱۷/۳۴۸

جدول ۸- بهره‌برداری ماهانه پیش‌بینی شده ایستگاه زهره با استفاده از مدل ARMA (2,5)
برای سال‌های ۱۴۰۳ - ۱۴۱۲ (مترمکعب بر ثانیه)

سال	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۴۰۵	۱۴۰۶	۱۴۰۷	۱۴۰۸	۱۴۰۹	۱۴۱۰	۱۴۱۱	۱۴۱۲
مهر	۸۰/۴۶	۸۶/۴۳	۸۰/۳۶	۷۸/۸۷	۸۸/۹۳	۷/۹۹	۱۰۰/۹	۸۵/۶۴	۹۴/۸۲	۷۴/۰۲
آبان	۲۹/۷۹	۲۷/۲۴	۴۳/۷۱	۵۱/۸۲	۴۶/۳۹	۳۵/۵۵	۳۸/۹۲	۳۷/۵۱	۳۶/۰۵	۱۴/۶۴
آذر	۴/۹۴	۳/۷۲	۱/۶۸۳	۱۱/۸۵	۶/۴۲۲	۲/۹۱	۸/۷۳۱	۴/۴۱۸	۴/۴۶۳	۲/۱۸
دی	۱/۷۴	۲/۴۷	۲/۱۹۹	۲/۵۰۳	۲/۲۶۲	۲/۰۴۴	۲/۱۵۵	۲/۴۸	۲/۴۸	۱/۲۳۵
بهمن	۲/۳۱	۲/۶۲	۲/۵۹	۲/۵۲۵	۲/۳۹۵	۲/۱۹	۲/۱۵۴	۲/۳۹۶	۲/۶۵	۲
اسفند	۱۰/۲۱	۶/۲۶	۰/۱۴۶	۳/۶۴۸	۱۹/۱	۴/۶۰۷	۱/۹۶	۲/۳۶۵	۱۳/۸۲	۵/۶۶
فروردین	۱۰۱/۰	۱۱۰/۱۲	۸۶/۱۵	۸۹/۸	۹۶/۴۶	۱۰۹/۳۵	۵۰/۲۶	۳۸/۹۱	۸۱/۴۷	۸۹/۵
اردیبهشت	۱۷۳/۸	۱۲۷/۷۶	۱۲۳/۶	۱۳۲	۱۰۷/۳	۱۳۲/۴	۹۷/۳۵	۸۲/۹۳	۱۳۸/۶	۱۳۶/۷
خرداد	۱۷۷/۸	۱۷۳/۷	۱۵۶/۷	۱۵۰/۲	۱۵۸/۹	۱۵۸	۱۳۸/۳	۱۵۲/۱	۱۸۱/۱	۱۶۹/۸
تیر	۱۹۸/۳	۲۰۲/۱	۱۹۸/۸	۱۷۳/۸	۱۹۲/۱	۱۹۲/۸۴	۱۸۷/۶	۱۶۹/۴	۱۹۶/۵	۱۷۰/۱
مرداد	۲۰۴/۳	۱۹۷/۷	۱۷۵/۲	۱۸۴/۶	۲۱۵/۹	۲۰۱/۵	۱۷۱/۳	۱۹۸/۵	۱۹۷	۱۷۸
شهریور	۱۴۷/۸	۱۶۰/۷	۱۴۳/۳	۱۴۹/۳	۱۷۴/۸	۱۴۷/۹	۱۵۷/۳	۱۵۲/۳	۱۶۹/۶	۱۳۷/۱

جدول ۹- بهره‌برداری ماهانه پیش‌بینی شده ایستگاه دز با استفاده از مدل ARMA (1,5)
برای سال‌های ۱۴۰۳ - ۱۴۱۲ (مترمکعب بر ثانیه)

سال	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۴۰۵	۱۴۰۶	۱۴۰۷	۱۴۰۸	۱۴۰۹	۱۴۱۰	۱۴۱۱	۱۴۱۲
مهر	۱۳۱/۳۲	۱۱۶/۹۶	۱۵۱/۸۲	۱۰۵/۸۸	۱۵۰/۳۱	۱۰۲/۱۴	۱۶۴/۰۷	۱۱۶/۴۵	۱۳۳/۵۲	۱۰۳/۰۸
آبان	۶۱/۱۷	۱۰۴/۶۷	۶۶/۵۷	۲۳/۰۸	۷۵/۹۵	۴۱/۷۸	۷۰/۰۷	۵۴/۲	۳۷/۷۷	۴۹/۷۳
آذر	۰/۴۴	۲۰/۶۵	۲۱/۱۸	۱۳/۸	۵/۳۴۴	۱/۵۶۹	۱۷/۶۴	۳/۶۰۴	۰/۶۷۷	۲/۳۳۲
دی	۲/۲۵۱	۲/۳۴۷	۲/۴۶	۲/۹۶	۱/۷۵	۲/۲۴۳	۱/۹۹۴	۲/۲	۲/۲۳۴	۲/۵۳۵
بهمن	۲/۲۲۲	۲/۵۷۲	۱/۹۸۸	۲/۴۹	۲/۰۷۹	۲/۶۵۳	۱/۸۴۶	۲/۰۸۴	۲/۳۰۲	۲/۵۳۸
اسفند	۲/۰۹۲	۲/۲۸۷	۲/۲۹۸	۲/۴۲	۱/۹۷۴	۲/۳۰۸	۱/۹۹۴	۲/۲۰۵	۲/۳۰۸	۲/۴۸۳
فروردین	۶۲/۷۲	۲۵/۳۱	۱۵/۵۲	۱۱۲/۷	۵۰/۴۱	۲۳/۳۸	۳۲/۰۷	۶۰/۸۳	۸۱/۱۶	۱۱۰/۹۹
اردیبهشت	۱۶۲/۴	۱۲۸/۴۲	۱۲۲/۸	۱۷۱/۴۶	۱۳۸/۰۷	۱۱۸/۹۲	۱۴۱/۰۸	۱۵۲/۱۳	۱۰۷/۳۳	۱۳۵/۷۷
خرداد	۱۶۹/۲	۱۵۶/۹۲	۱۴۸/۸	۱۶۴/۸۴	۱۸۲/۲۲	۱۹۱/۱۶	۲۲۱	۲۲۸	۲۱۹/۲۲	۱۸۳/۰۲
تیر	۲۳۰/۸	۲۴۶/۴	۲۷۱/۱	۲۳۵/۹۱	۲۳۸/۹	۲۲۶/۵	۲۷۲/۹	۲۵۵/۵۱	۲۴۵/۸۷	۲۴۳/۲۹
مرداد	۲۱۶/۷۷	۲۳۱/۷	۲۴۳/۲	۲۳۹/۸۴	۲۵۵/۴۱	۲۳۸/۲۴	۲۷۸/۶۲	۲۵۹/۴	۲۶۲/۱۳	۲۴۸/۸۶
شهریور	۱۸۴/۶۷	۲۰۰/۲	۱۸۵/۷	۲۱۶/۷۳	۲۰۱/۹۹	۲۰۶/۵۶	۲۵۰/۷۴	۲۲۹/۸۵	۲۰۶	۲۳۴/۹۷

مطرح در این زمینه مقایسه شده‌اند. فاصله فاحش نتایج حاصل، نشان دهنده عملکرد بسیار مناسب الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

همچنین به‌عنوان یکی از اهداف اصلی این پژوهش، راهکاری مناسب برای تجزیه و تحلیل و استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با در نظر گرفتن اهدافی همانند تأمین نیازهای محیط زیستی و کشاورزی و تولید انرژی برقابی در کنار مسئله کنترل سیلاب ارائه شده است. از آنجایی که اهداف یاد شده در بیشتر سیستم‌های چند مخزنی مهم مطرح می‌باشند، استفاده از این مدل می‌تواند تا حد زیادی راه‌گشای تصمیم‌گیران در بهره‌برداری از چنین سیستم‌هایی باشد. در مطالعه Moeini و Soghrati (۲۰۲۰) توابع هدف مورد استفاده مشتمل بر حداکثرسازی اعتمادپذیری و کمینه کردن آسیب‌پذیری تولید انرژی بوده است.

باتوجه به اینکه تاثیر افزایش جمعیت و تغییر نیازها و نیز تغییر در کاربری اراضی در این مطالعه در نظر گرفته نشده است، می‌توان مطالعات بعدی را با در نظر گرفتن سناریوی سیستم مخازن به صورت موازی تحت تاثیر این تغییرات انجام داد. همچنین بررسی تاثیرات سیستم مخازن به صورت موازی در آینده دور و افق ۲۱۰۰ می‌تواند نتایج و تغییرات مشهودتری نسبت به نتایج این مطالعه به‌دست دهد و متناسب با آن می‌توان سیاست‌های سازگاری با شرایط جدید را اتخاذ نمود. همچنین، در پژوهش حاضر تنها یکی از مدل‌های بهینه‌سازی مخزن بررسی و ارزیابی شده است. برای بررسی بیشتر می‌توان از مدل‌های دیگر جهت تهیه منحنی فرمان مخزن استفاده کرد. همچنین روش برنامه‌ریزی پویا به‌دلیل زمان بر بودن نسبت به سایر روش‌ها برتری ندارد و می‌توان در صورت اهمیت پارامتر زمان، از دیگر روش‌های مناسب استفاده کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. Continuous Hedging Rule
2. Discrete Hedging Rule
3. Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA)
4. Marine Predators Algorithm (MPA)
5. Standard Operation Policy
6. Linear Programming
7. Non-linear Programming
8. Dynamic Programming (DP)
9. Penalty Factor
10. Constrained-domination

در خصوص مسائل مطرح در حوزه صنعت آب، در سال‌های اخیر بیشترین تمرکز کارهای پژوهشی بر بهبود سیاست‌های بهره‌برداری و افزایش کارایی سیستم‌های موجود بوده است. با در نظر گرفتن هزینه‌های هنگفت احداث و نگهداری، حالت مطلوب در بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنی هنگامی است که برآورده نمودن چندین هدف مختلف را محقق سازد. این حقیقت را نمی‌توان نادیده گرفت که سیستم‌های چند مخزنی منابع آب غالباً جهت تأمین چندین هدف مختلف که گاه در تضاد با یکدیگر هستند باید مدیریت شوند. مدیران منابع آب همواره برای ایجاد توازن بین اهداف مختلف یک سیستم، در بهره‌برداری و تخصیص آب دچار چالش بوده‌اند. در نتیجه تلاش‌های صورت گرفته در راستای گسترش الگوریتم‌هایی که بتوانند در اتخاذ تصمیمات مناسب یاریرسان تصمیم‌گیران باشند بسیار ارزنده می‌باشند.

در این پژوهش، یک الگوریتم چندهدفه فراکاوشی (خفاش و NSGA-II) با دقت عملکرد بالا جهت یافتن سیاست بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی گسترش یافته و در حل مسائل تک مخزنی و چند مخزنی استفاده می‌شود. کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل این مسائل بسیار مناسب بوده و می‌توان استفاده از آن را در زمینه‌های کاربردی مشابه توصیه نمود. در واقع اصلاحاتی ساختاری بر روی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی صورت گرفته که منجر به ارائه الگوریتمی کارآمد در مسائل با ابعاد بالا و بازه‌های جستجوی وسیع تحت عنوان الگوریتم جستجوی ملودی شده است. همچنین، الگوریتم حاصل در حل تعدادی از مسائل بهینه‌سازی پایه مورد استفاده قرار گرفته و کارایی آن در ابعاد مختلف بررسی شده است. حساسیت الگوریتم جدید نسبت به افزایش ابعاد مسائل در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بررسی شده کمتر بوده و در نتیجه اختلاف دقت نتایج آن با سایر الگوریتم‌ها در ابعاد بالا بیشتر نمایان می‌شود. بررسی سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد پژوهش Afshar و Hajiabadi (۲۰۱۸) و Moeini و Soghrati (۲۰۲۰) از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II برای بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری استفاده کردند.

الگوریتم تک‌هدفه پیشنهادی در حل مسائل برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم‌های تک مخزنی و چند مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل‌سازی‌ها از منحنی‌های بهره‌برداری استفاده شده و الگوریتم پیشنهادی برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای این منحنی‌ها به‌کار گرفته شده است. نتایج حاصل با نتایج حاصل از دیگر الگوریتم‌های

- Abdollahi, A., & Ahmadianfar, I. (2021). Multi-mechanism ensemble interior search algorithm to derive optimal hedging rule curves in multi-reservoir systems. *Journal of Hydrology*, 598, 126211.
- Afshar, M. H., & Hajiabadi, R. (2018). A novel parallel cellular automata algorithm for multi-objective reservoir operation optimization. *Water resources management*, 32(2), 785-803.
- Ahmadianfar, I., Samadi-Koucheksaraee, A., & Bozorg-Haddad, O. (2017). Extracting optimal policies of hydropower multi-reservoir systems utilizing enhanced differential evolution algorithm. *Water resources management*, 31(14), 4375-4397.
- Akbarifard, S., Sharifi, M. R., Qaderi, K., & Madadi, M. R. (2021). Optimal operation of multi-reservoir systems: comparative study of three robust metaheuristic algorithms. *Water Supply*, 21(2), 941-958.
- Chou, F. N. F., Linh, N. T. T., & Wu, C. W. (2020). Optimizing the management strategies of a multi-purpose multi-reservoir system in Vietnam. *Water*, 12(4), 938.
- Güvengir, U., Savasaneril, S., Altan-Sakarya, A. B., & Buhhan, S. (2021). Short-term flood control and long-term energy maximization in multi-reservoir systems using improved particle swarm optimization. *Water Resources Management*, 35(13), 4293-4307.
- Moeini, R., & Soghrati, F. (2020). Optimum outflow determination of the multi-reservoir system using constrained improved artificial bee colony algorithm. *Soft Computing*, 24(14), 10739-10754.
- Moradi-Far, S., Ashofteh, P. S., & Loáiciga, H. A. (2024). Development of the marine predator's algorithm for optimizing the performance of water supply reservoirs. *Environment, Development and Sustainability*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04450-z>
- Moridi, A., & Yazdi, J. (2017). Optimal allocation of flood control capacity for multi-reservoir systems using multi-objective optimization approach. *Water Resources Management*, 31(14), 4521-4538.
- Nair, S. J., & Sasikumar, K. (2021). Optimisation model for multi-reservoir systems based on profust reliability. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 174(5), 225-235.
- Rozos, E. (2019). An assessment of the operational free-ware management tools for multi-reservoir systems. *Water Supply*, 19(4), 995-1007.
- Shaikh, S. A. (2020). Application of artificial neural network for optimal operation of a multi-purpose multi-reservoir system, I: initial solution and selection of input variables. *Sustainable Water Resources Management*, 6(4), 1-14.
- Shih, J.S. and ReVelle, C.S. (1995). Water Supply Operations during Drought: Continuous Hedging Rule. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:5\(613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:5(613))
- Tan, Q. F., Wang, X., Wang, H., Wang, C., Lei, X. H., Xiong, Y. S., & Zhang, W. (2017). Derivation of optimal joint operating rules for multi-purpose multi-reservoir water-supply system. *Journal of Hydrology*, 551, 253-264.
- Thechamani, I., Visessri, S., & Jarumaneeroj, P. (2017). Modeling of Multi-Reservoir Systems Operation in the Chao Phraya River Basin. *International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA)*. Seoul, South Korea. IEEE. doi: [10.1109/ICIEAM40534.2017](https://doi.org/10.1109/ICIEAM40534.2017)
- Yaseen, Z. M., Ehteram, M., Hossain, M., Fai, C. M., Binti Koting, S., Mohd, N. S., & El-Shafie, A. (2019). A novel hybrid evolutionary data-intelligence algorithm for irrigation and power production management: application to multi-purpose reservoir systems. *Sustainability*, 11(7), 1953.