نشریه آب و توسعه پایدار
سال دوازدهم . شماره اول . خردادماه ۱۴۰۴ . صفحات ۱۶۰ تا ۱۷۸

Journal of Water and sustainable development
Volume 12, Issue 1 [Serial No. 35], June 2025,pages 160 to178

CC BY

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با به‌کارگیری الگوریتم خفاش

سعید محمدحسینی[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

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 نه‌تنها 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.

Article Type Applied Article

Exploitation of Multi-Reservoir Systems Using the Bat Algorithm

S. Mohammad Hosseini[1], A.P. Sarraf[2]*, B. Aminnejad[2]

1, 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen 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

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

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 - 179. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i1.2410-1371

مقدمه

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 به‌وجود می‌آورد که مساله بحران آب در آینده‌ای نه چندان دور را در ذهن متبلور می‌سازد (Afshar و Hajiabadi، 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 به‌صورت برگشت‌پذیر و طبیعی مطرح است (Tan و همکاران، ۲۰۱۷). فلات ایران زمین به‌دلیل 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 به‌کارگیری سیاست‌های ویژه به‌دنبال 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 را به جیره‌بندی گسسته چندگانه 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 به‌کار 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 کاربردند. در این حالت شبکه عصبی در نقش یک مدل شبیه‌ساز به‌کار رفته است. در مطالعه‌ای دیگر، Abdollahi و Ahmadianfar (۲۰۲۱) ضرایب جیره‌بندی را به‌عنوان 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 به‌کار رفته، ذخایر این مخازن به‌صورت 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 به‌کار گرفتند، بهاین ترتیب منحنی مورد نظر نرخ کمبود قابل قبول بین بخش‌های ذکر شده را نشان داد. در این راستا الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک (MOGA) را به‌عنوان الگوریتم بهینه‌ساز برای به‌دست آوردن منحنی تجاری در نظر گرفتند. Moradifar و همکاران (۲۰۲۴) نیز به‌منظور بهینه‌سازی عملیات بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش (استان آذربایجان شرقی، ایران) از الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA) استفاده کردند. همچنین نتایج عملیات مخزن MPA با نتایج به‌دست آمده با الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه نمودند. مقایسه رهاسازی آب مخزن، کمبود تامین 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 تامین تقاضای آب پایین‌دست 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 باتوجه 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 کارامد 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 تامین نیاز موجود باشد، خروجی مخزن به گونه‌ای تنظیم می‌شود که کل نیاز را تامین نماید. چنانچه برای تامین 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.

$$R_t = \begin{cases} S_t + I_t & if \quad S_t + I_t \le D_t \\ D_t & if \quad D_t \le S_t + I_t \le D_t + C \\ S_t + I_t - C & if \quad S_t + I_t \ge D_t + C \end{cases}$$

که در آن Rt رها سازی مخزن در دوره t، It آبدهی ورودی به مخزن در دوره t، St میزان ذخیره مخزن در ابتدای دوره t، Dt 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 تامین 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 اینترتیب 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 کاهشی 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 قبلا 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:

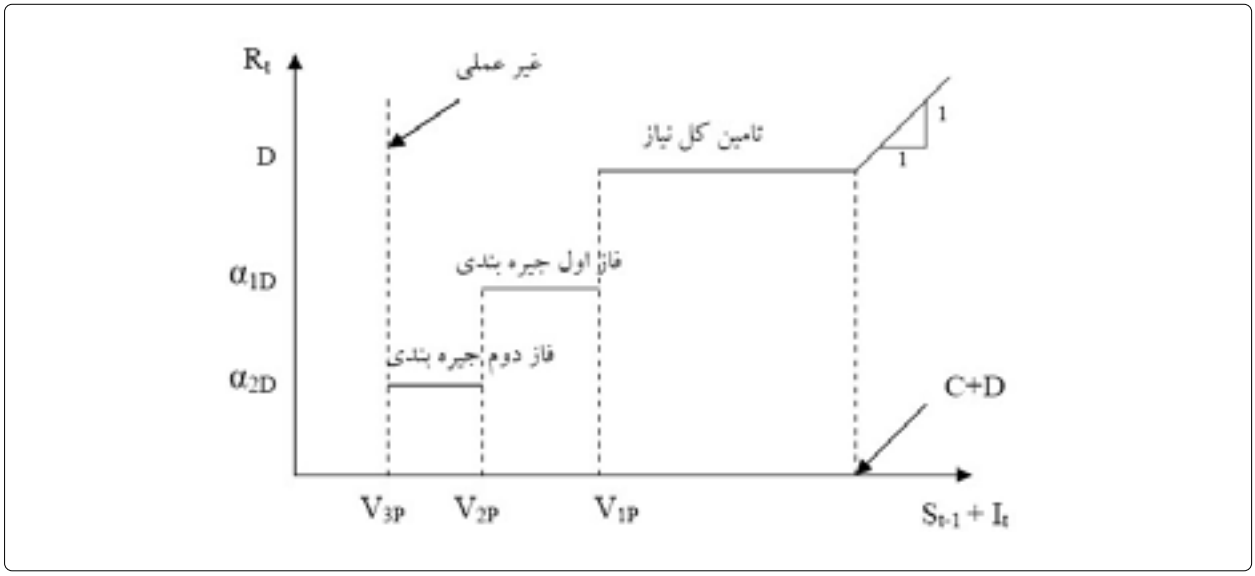
۱. از چه زمانی و در چه سطحی از ذخیره و ورودی پیش‌بینی شده، باید جیره‌بندی آغاز شود؟
۲. میزان و اندازه کاهش خروجی در طول هر دوره جیره‌بندی چه اندازه باید باشد؟

به منظور پاسخ به سوالات فوق،Shih و ReVelle (۱۹۹۵) مدل برنامهریزی مختلط عدد صحیح و غیر خطی (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 خورداری 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 به‌صورت شفاف نخواهند شد. در حالت پیوسته، دو سوال مذکور به‌صورت همزمان پاسخ داده می‌شوند. اما برای افزایش انعطاف در مدیریت بهره‌برداری مخازن نیاز است که این سوالات به‌طور مستقل از یکدیگر پاسخ داده شوند. بر این اساس جیره‌بندی گسسته در شرایط بهره‌برداری واقعی مناسب‌تر می‌باشد. در این حالت سوال اول به‌وسیله رقوم آستانه ماهانه مخازن (منحنی فرمان بهره‌برداری) و سوال دوام به‌وسیله 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 به‌کار 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 $\alpha 1$ از نیازها را برای شرایط خشکسالی خفیف و کسر $\alpha 2$ 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 $V1p$ و مجموع ظرفیت مخزن و نیاز باشد، کل نیاز تامین می‌شود.

اگر حجم مخزن بین $V1p$ تا $V2p$ باشد کسر $\alpha 1$ از نیازها تامین می‌شود و هرگاه حجم مخزن کمتر از $V2p$ و بیشتر از $V3p$ باشد مخزن وارد مرحله شدیدتری از جیره‌بندی شده و کسر کمتری از نیازها که همان $\alpha 2$ باشد، تامین می‌شود (Nair و Sasikumar، ۲۰۲۱)



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

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

$$Max \left[\sum_{t=1}^{T} y_{1t} - \omega \sum_{p=1}^{12(V_{1p}+V_{2p}+V_{3p})} (V_{1p} + V_{2p} + V_{3p})\right] \quad (۲)$$

$$y_{1t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{1p} - \varepsilon)}{M} \quad (۳)$$

$$y_{1t} \leq 1 - \frac{V_{1p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{M} \quad (٤)$$

$$y_{2t} \geq \frac{(S_{t-1} + \hat{I}_t) - (V_{2p} - \varepsilon)}{M} \quad (٥)$$

$$y_{2t} \leq 1 - \frac{V_{2p} - (S_{t-1} + \hat{I}_t)}{M} \quad (٦)$$

$$R_t = (1 - \alpha_1) \times D \times y_{1t} + (\alpha_1 - \alpha_2) \times D \times y_{2t} + \alpha_2 \times D \quad (٧)$$

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - W_t \quad (٨)$$

$$S_t \leq C_0 \quad (٩)$$

$$S_0 \leq S_T \quad (١٠)$$

$$U_t \leq \frac{S_t}{C} \quad (١١)$$

$$W_t \leq M \times U_t \quad (١٢)$$

$$V_{1p} \geq (1 + \beta_1) \times V_{2p} \quad (١٣)$$

$$V_{2p} \geq (1 + \beta_2) \times V_{3p} \quad (١٤)$$

$$V_{3p} \geq \alpha_2 \times D \quad (١٥)$$

$$S_{t-1} + \hat{I}_t \geq V_{3p} + \varepsilon \quad (١٦)$$

$$y_{1t-1} + y_{1t+1} \leq 1 + y_{1t} \quad (١٧)$$

$$y_{1t} \leq y_{2t+1} \quad (١٨)$$

$$\sum_{t=1}^{N} y_{2t} = N - n \quad (١٩)$$

که در آن y1t 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. y2t 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، St حجم مخزن در انتهای دوره t و نامعلوم، Rt خروجی مخزن در دوره t و نامعلوم، V1P مقدار مجموع ذخیره و ورودی آستانه بالا برای شروع جیره‌بندی در ماه p (براساس شکل ۱) و نامعلوم، V2P مقدار مجموع ذخیره و ورودی آستانه بالا برای شروع فاز دوم جیره‌بندی در ماه p (براساس شکل ۱) و نامعلوم، V3p پایین‌ترین حد مجموع ذخیره و ورودی در ماه p (براساس شکل ۱) و معلوم، p عضو {۱،۲،۳....۱۲} براساس موقعیت هر ماه از سال در دوره آماری،

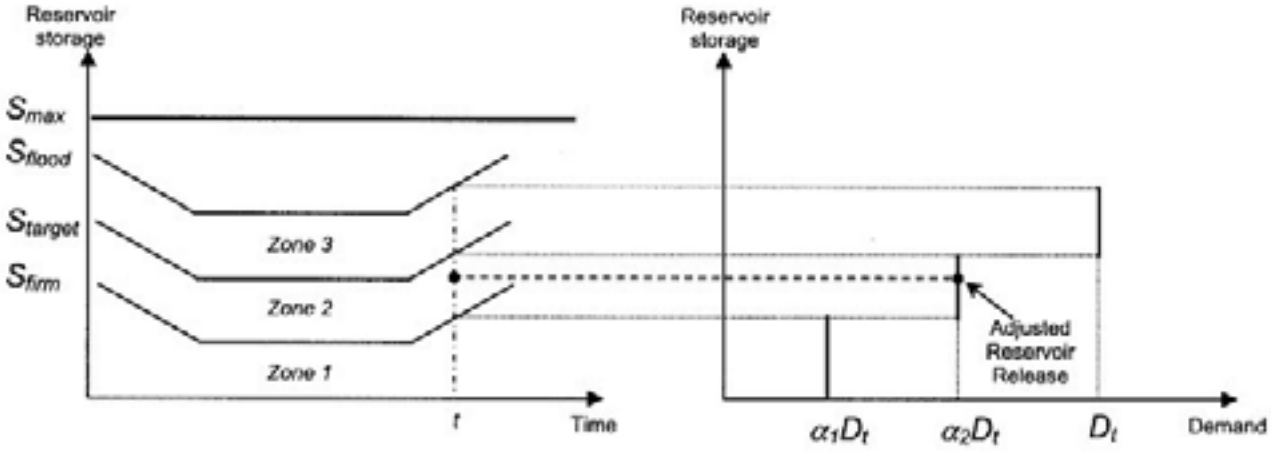
$$t\ ,P = t - \left[\frac{1}{12}(t-1)\right]$$

عبارت است از ماه در افق زمانی، It عبارت است از آبدهی ورودی در ابتدای دوره t و معلوم، عبارت است از آبدهی ورودی در دوره t و معلوم، C ظرفیت مخزن و معلوم، Wt سرریز در دوره t و نامعلوم، D نیاز که در طول سال یکسان فرض شده و معلوم، Ut 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 یک عدد کوچک است که هر دو جز داده‌های ورودی هستند، عبارت است از درصد تامین نیازها در فاز اول جیره‌بندی و به‌عنوان پارامتر معلوم وارد می‌شود، 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، و مقادیر کوچک جدا کننده که ۰/۰۵ 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. ازاین 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.

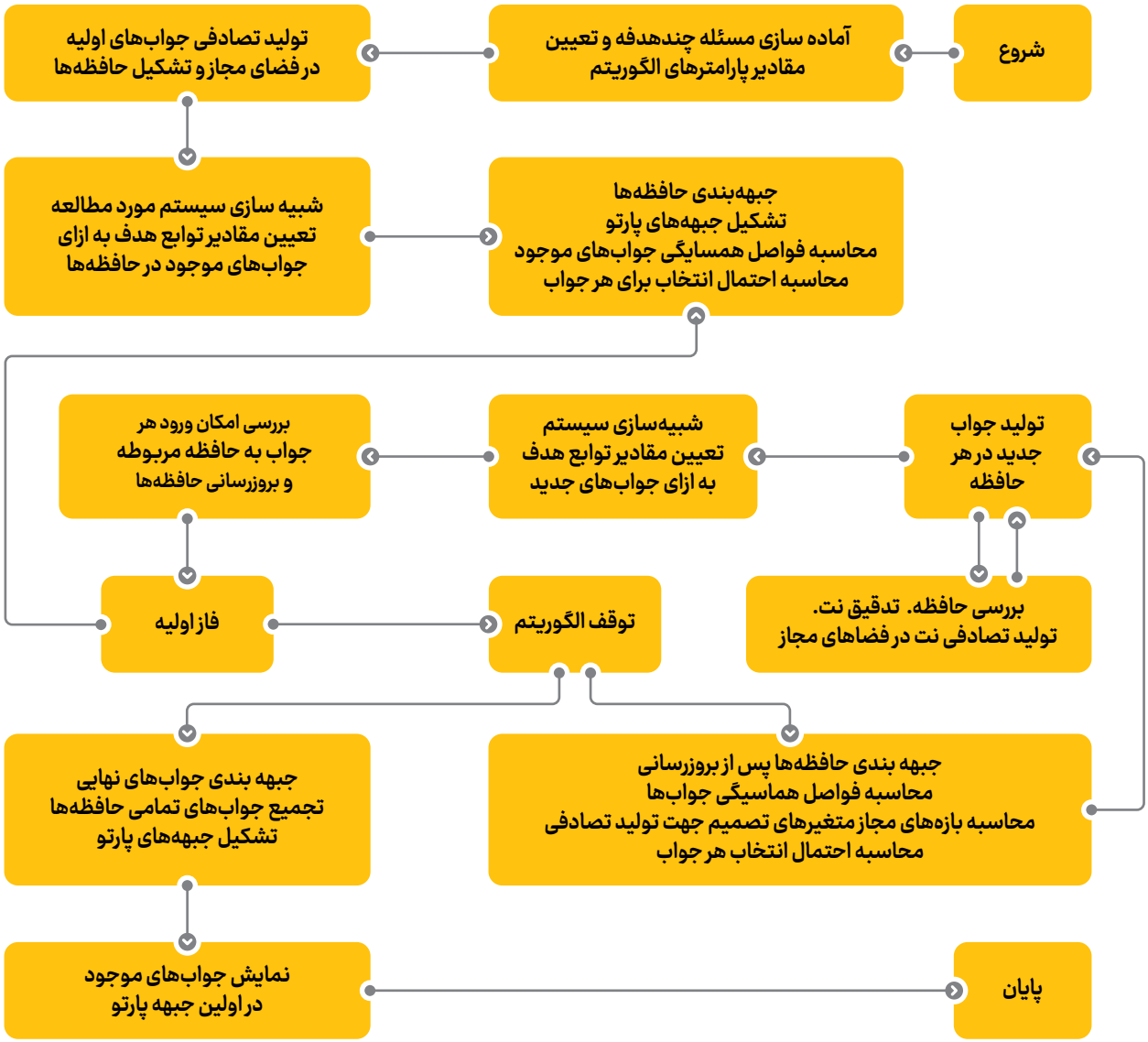


شکل ۲- منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن با رویه جیره‌بندی گسسته (Nair وSasikumar، ۲۰۲۱)

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، ۲) برنامه‌ریزی غیرخطی و ۳) برنامه‌ریزی پویا.

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. اخیرا 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 تصمیم گیرندگان 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 به‌دلیل 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 کیلومترمربع است.
- **نوع سد:** بتنی قوسی که طراحی آن باعث افزایش پایداری و مقاومت در برابر فشار آب می‌شود.

نتایج و بحث

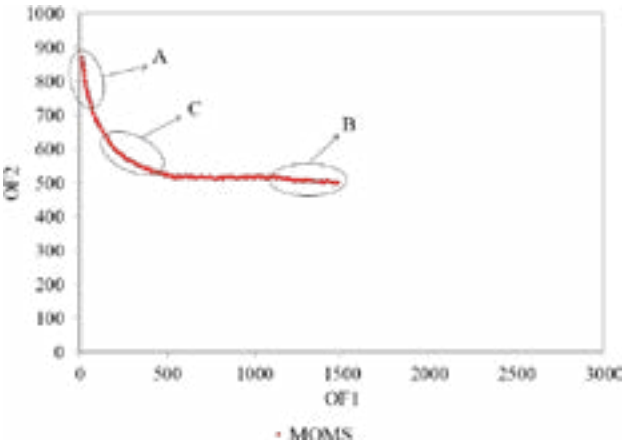
برای مدل‌سازی دوهدفه سیستم تک مخزنی دز، یک مدل بلندمدت ۴۲ ساله با اهداف تأمین نیاز و تولید انرژی گسترش یافته و جهت برآورد کارآیی الگوریتم، نتایج حاصل از آن با نتایج یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه بر مبنای روش خفاش مقایسه شده است. مقادیر بهینه پارامترهای هر دو الگوریتم با استفاده از تحلیل حساسیت در اجراهای 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 به‌صورت قید و تولید انرژی و تأمین نیاز به‌صورت 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 تامین 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.

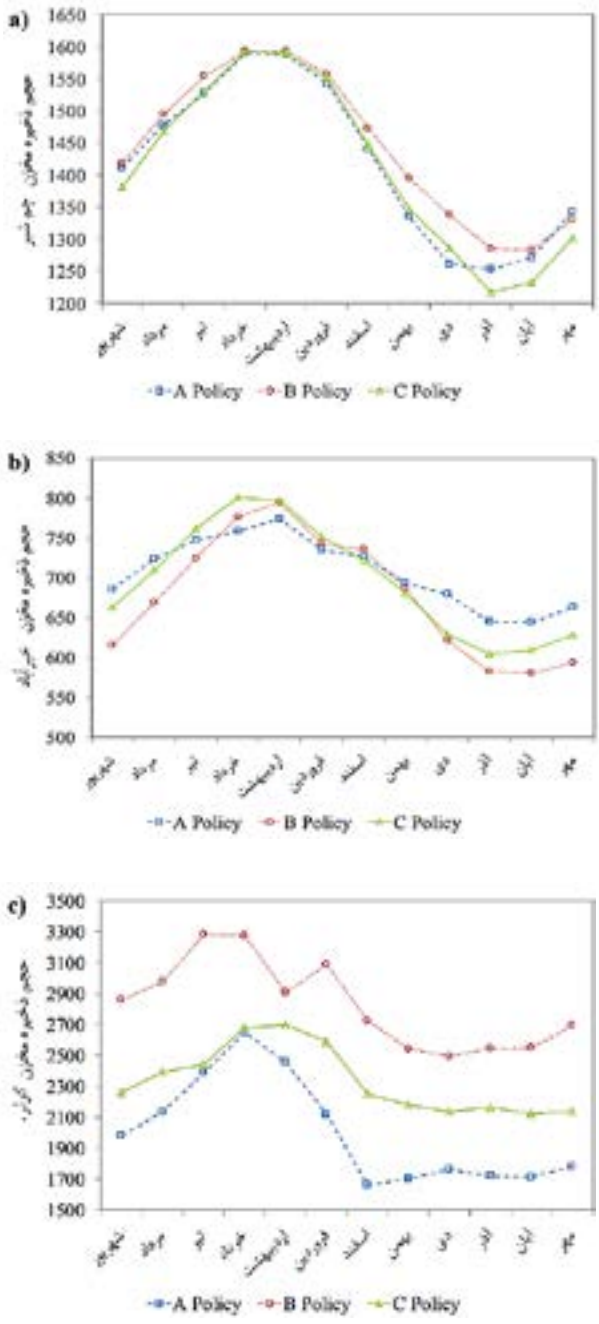
شکل (۵) میانگین ماهانه احجام ذخیره مخازن در کل دوره را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت



شکل ۴- سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از سیستم

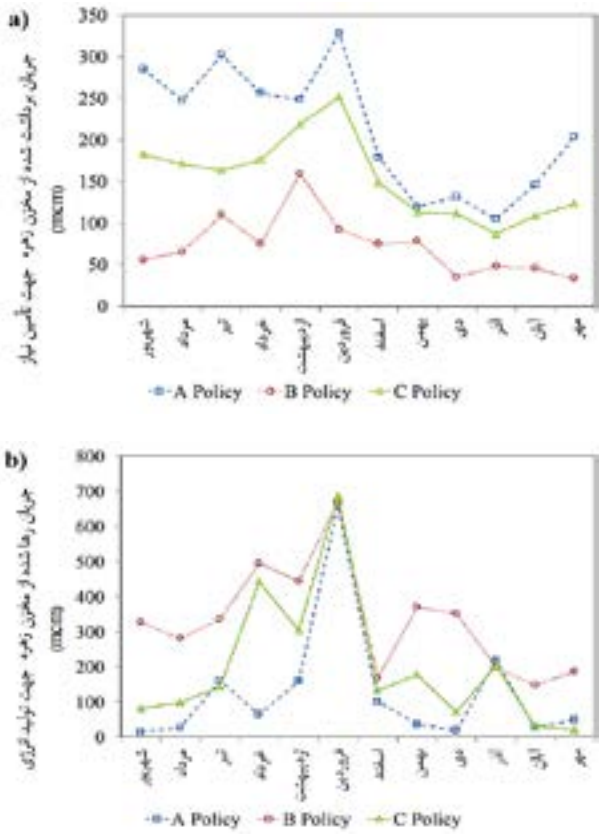
میانگین احجام ذخیره ماهانه مخزن زهره حاصل از اعمال سیاست‌های مختلف بسیار محسوس است. این امر دو علت عمده می‌تواند داشته باشد. اول اینکه، ظرفیت فعال مخازن دیگر در مقابل ظرفیت فعال مخزن زهره کوچک‌تر هستند و دوم اینکه، جریان‌های قابل دسترس در محل محور زهره بسیار بیشتر از جریان‌های ورودی به مخازن بالادست است.

شکل (۶) مقدار میانگین ماهانه جریان‌های برداشت شده از



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

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.



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

شرح اصلاحات الگوریتم خفاش جهت افزایش کارآیی 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 است، از روشی مشابه روش پیشنهادی Rozos (۲۰۱۹) استفاده شده است. در این روش که به‌عنوان روش تسلط مقید 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 جزیی بر کارآیی الگوریتم و سرعت حذف جواب‌های غیر موجه 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.

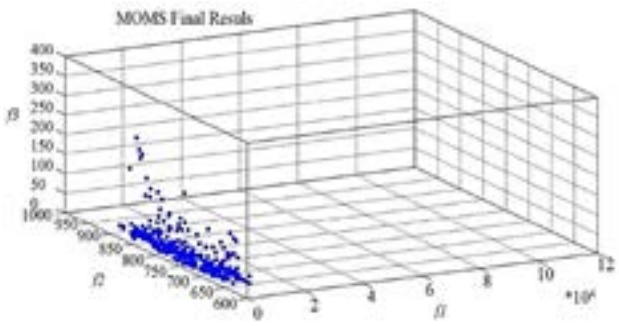
مسئله بهینه‌سازی سه هدفه

مسئله پیشرو همان مسئله مطرح شده در بخش دو هدفه به‌علاوه بحث کنترل سیلاب می‌باشد. در نتیجه می‌توان تأمین نیازهای کشاورزی، تولید انرژی برقابی و کنترل سیلاب را به‌عنوان اهداف سیستم مورد نظر برشمرد. تأمین حداقل‌های محیط زیستی در بازه‌های مختلف رودخانه به‌صورت قید مدل شده‌اند. در این رویکرد خاص، که در این مقاله به‌عنوان اولین رویکرد مدل‌سازی سه هدفه مطرح می‌شود، تابع هدف مربوط به کنترل سیلاب به‌صورت 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.

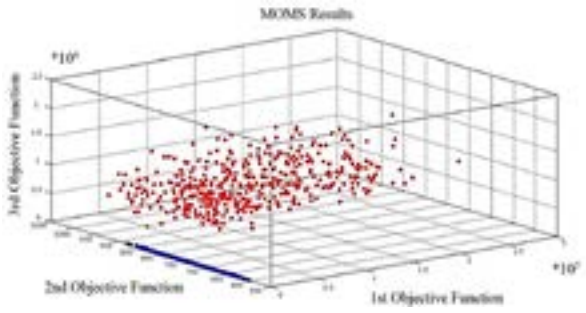
برای بررسی دقت و کارآیی الگوریتم بهینه‌سازی اصلاح شده ابتدا سیستم سه‌مخزنی مورد نظر را با الگوریتم پیشنهادی بهینه کرده و نتایج حاصل با نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش مقایسه می‌شود.

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 به‌دست آید و همچنین معیار دیگری که به‌وسیله 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 به‌عنوان 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 ۲۵۰۰۰۰۰ تولید پژواک جدید را در فضای سه بعدی اهداف نشان می‌دهد.

جواب‌های اولیه مدل که به‌صورت 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 تشکیل‌دهنده 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. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که نتایج نهایی (نقاط آبی رنگ) در یک قسمت بسیار کوچک از کل فضای سه بعدی اهداف



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

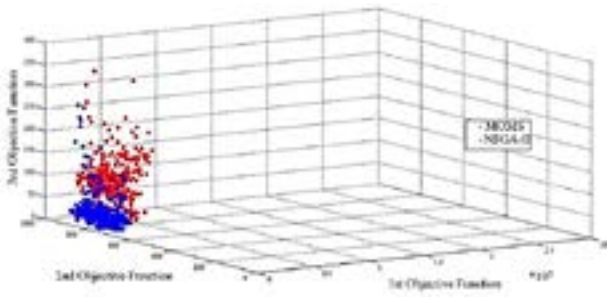


شکل ۸- جواب‌های اولیه تصادفی در کنار جواب‌های نهایی حاصل از مدل در فضای سه بعدی اهداف

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.

در انتها، جهت مقایسه کمی نتایج حاصل از الگوریتم چند هدفه پیشنهادی (BAT) با نتایج حاصل از الگوریتم NSGA_II از معیار



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

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 بهآن 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 بهآن 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 درنظر گرفتن مسئله کنترل سیلاب و دستیابی به یک مدل کاربردی، رویکردی جدید در این پژوهشارائه شده که منجر به بررسی سه هدفه بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی با در نظر گرفتن اهداف موردنظر به نحوی مطلوب شده است.

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 (۱۰a)، 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 (۱۰b)، 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 (۱۰c)، 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.

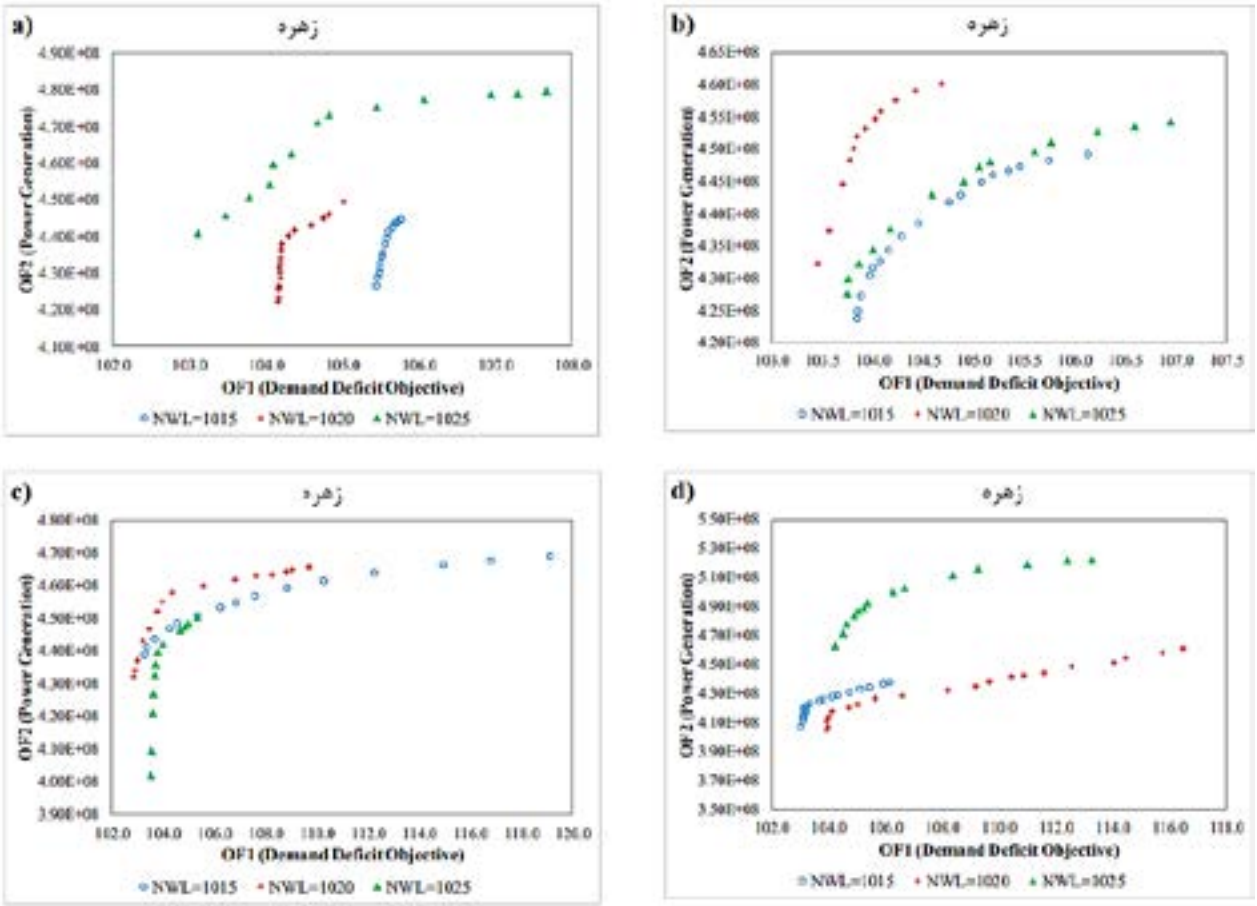
شکل (d۱۰)، نشان‌دهنده منحنی‌های تبادل اهداف در حالتی است که در آن، مخازن چم‌شیر، خیرآباد و کوثر بیشترین ظرفیت ذخیره فعال خود می‌باشندرا دارند. در این حالت اثرگذاری نسبی مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم کمترین مقدار خود را دارد و به‌همین دلیل روند تغییرات مشخصی در منحنی‌های تبادل دیده نمی‌شود. اما باید دقت داشت شرایطی که تراز کنترل سیلاب این مخزن برابر با بیشترین مقدار خود باشد، دقیقاً همان حالتی است 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 شده‌اند. 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 (۱۱) نشان دهنده چگونگی تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب مخزن چم‌شیر بر عملکرد کلی سیستم می‌باشند.

شکل (a۱۱) تبادل اهداف را در حالتی نشان می‌دهد که در آن مخازن سد زهره، چم‌شیر و کوثر کمترین ظرفیت ذخیره فعال را دارند. در نتیجه مقدار ظرفیت فعال مخزن چم‌شیر بیشترین تأثیر را بر تولید انرژی کلی و تأمین نیاز در کل سیستم دارد. در این نمودار دیده می‌شود که با انتخاب مقادیر حجم کنترل سیلاب کوچک‌تر در این مخزن، منحنی‌های تبادل نشان‌دهنده تأمین نیاز و تولید انرژی بیشتری برای کل سیستم می‌باشند.

شکل (b۱۱) نشان‌دهنده 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. می‌توان مشاهده کرد که در این حالت خاص ظرفیت ذخیره مخزن چم‌شیر بر تولید انرژی سیستم تأثیر بیشتری دارد تا بر تأمین نیاز آن. این نتایج، منطبق بر خصوصیات هندسی مخازن و نشان‌دهنده صحت عملکرد سیستمی مدل پیشنهادی می‌باشد.

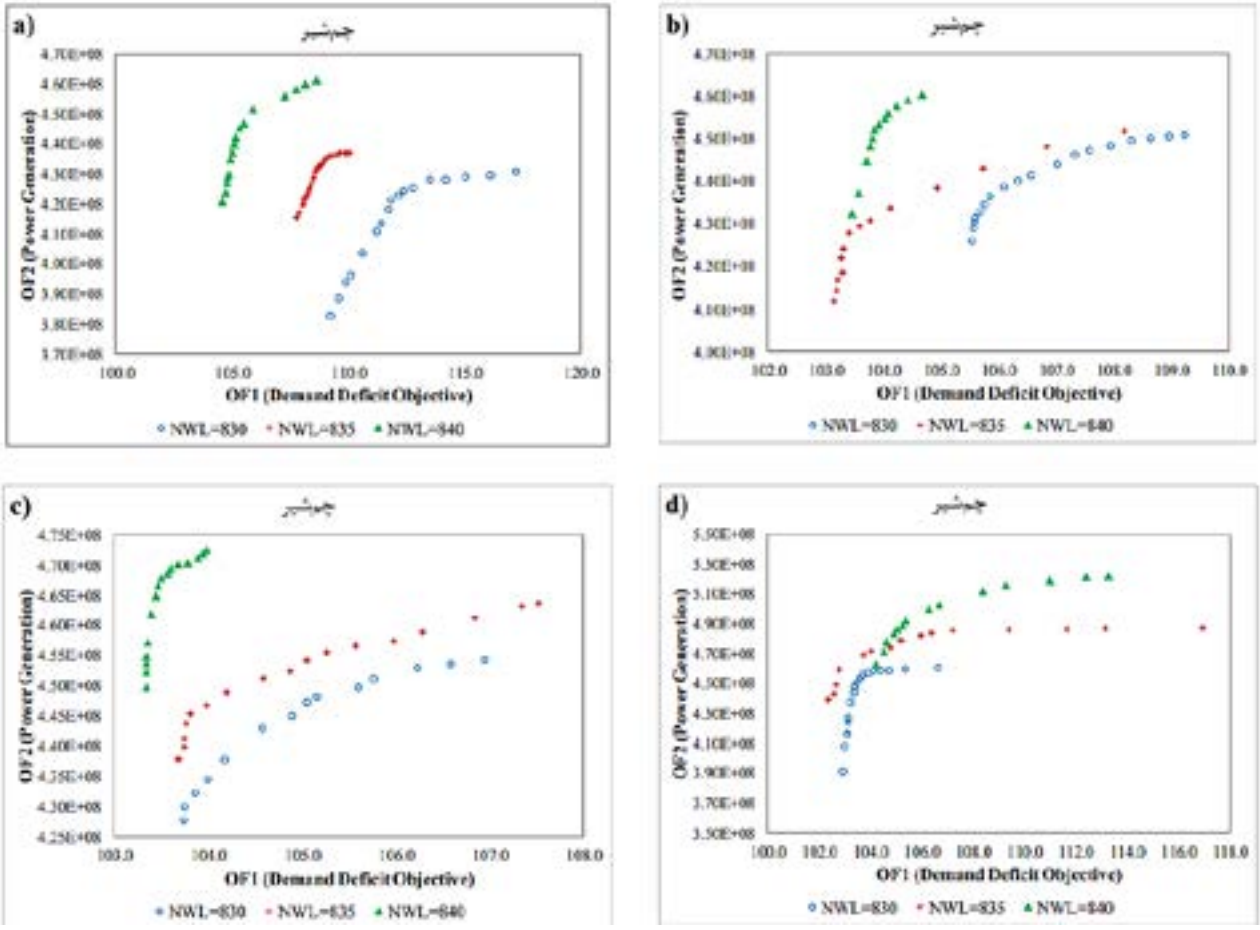


شکل ۱۰- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن سد زهره بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول۲- 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)

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

شکل (c۱۱) نشان‌دهنده تبادل اهداف در حالتی است که در آن از ظرفیت ذخیره فعال مخازن سد زهره و کوثر نسبت به حالت اول (شکل ۱۱ a) کاسته شده و تأثیر ظرفیت مخزن چم‌شیر بر تولید انرژی کلی سیستم بیش‌تر شده است. می‌توان مشاهده کرد که در این حالت با تغییر ظرفیت فعال مخزن چم‌شیر تغییر چندانی در تأمین نیاز کلی سیستم ایجاد نمی نمی‌شود، اما مقادیر تولید انرژی دچار تغییرات قابل توجهی می‌شوند.
شکل (d۱۱) حالتی را نشان می‌دهد که در آن مخازن سد زهره، خیرآباد و کوثر بیشترین ظرفیت ذخیره فعال خود را دارند. در نتیجه تأثیر ظرفیت چم‌شیر بر عملکرد کلی سیستم به حداقل خود رسیده است. در این حالت نیز مشاهده می‌شود که ظرفیت این مخزن تأثیر قابل ملاحظه‌ای را بر تولید انرژی در کل سیستم داشته و می‌توان با کاهش حجم کنترل سیلاب در این مخزن توان تولید انرژی را در کل سیستم افزایش داد.



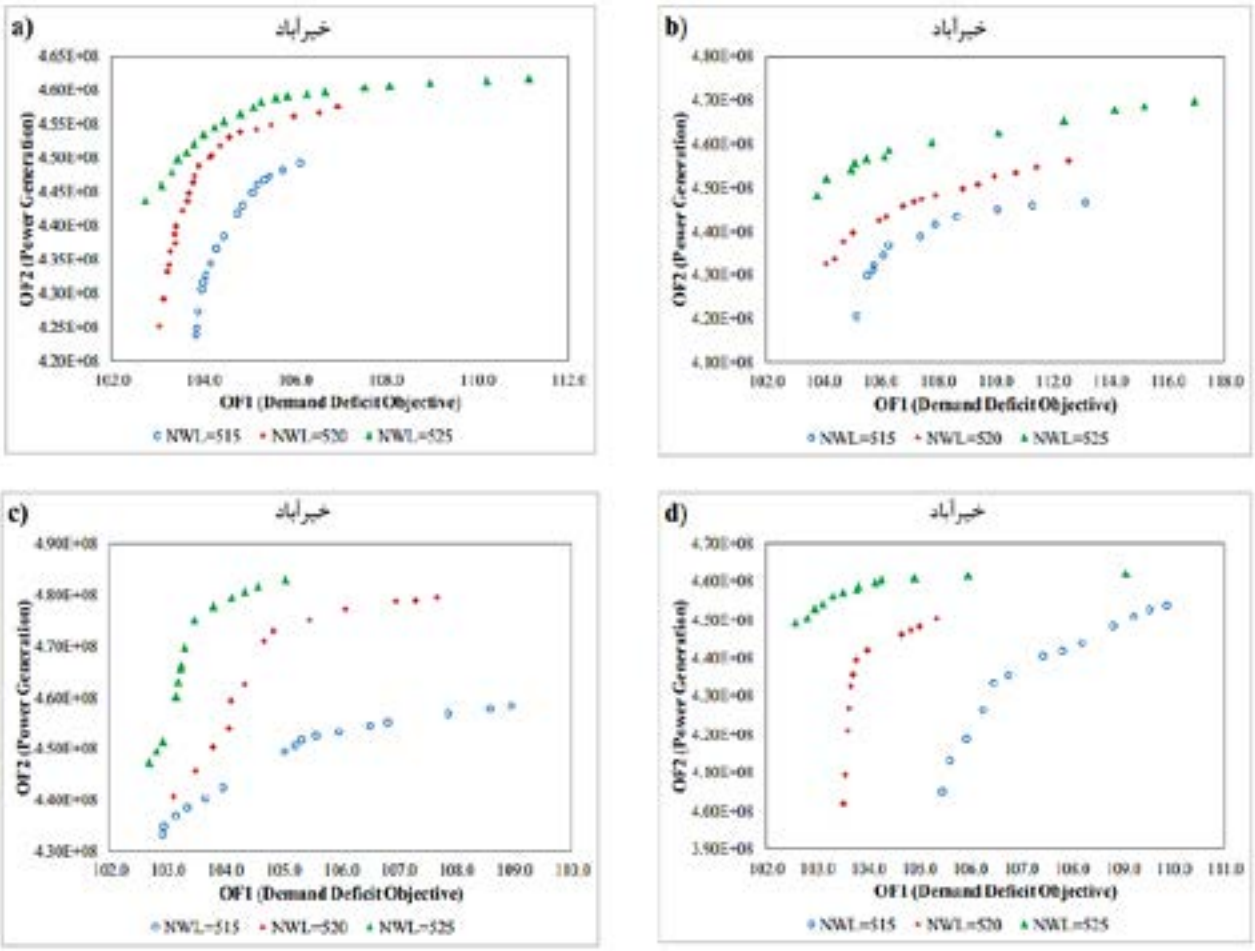
شکل ۱۱- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن چم‌شیر بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

جدول۳- پیک سیلاب خروجی از سیستم به ازای ترازهای مختلف کنترل سیلاب در مخزن چم‌شیر (cms) برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله (مترمکعب بر ثانیه)

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

مقادیر حداکثر دبی سیلاب‌های خروجی از مخزن چم‌شیر به‌عنوان خروجی‌های سیستم برای هر یک از حالات ارائه شده در شکل (۱۱)، در جدول (۳) آورده شده‌اند. از میان حالات بررسی شده در این قسمت، کم‌ترین پیک سیلاب خروجی برابر ۷۲۰۱ مترمکعب بر ثانیه بوده و هنگامی رخ می‌دهد که تراز کنترل سیلاب در مخزن چم‌شیر برابر ۸۳۰ متر از سطح دریا باشد.

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.



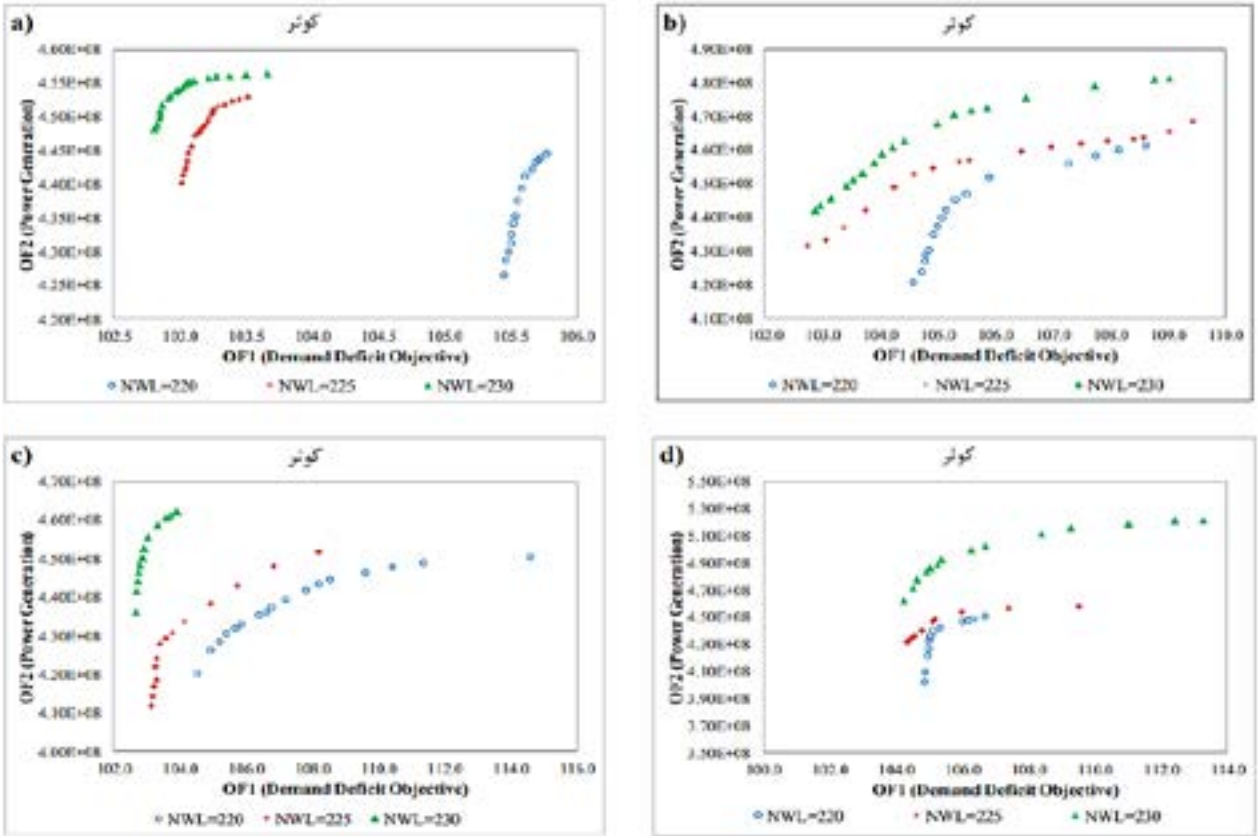
شکل ۱۲- تأثیر مقادیر مختلف حجم کنترل سیلاب در مخزن خیرآباد بر عملکرد کلی سیستم در برآورده نمودن اهداف دیگر

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)

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

مقادیر حداکثر دبی سیلاب‌های خروجی از مخزن چم‌شیر به‌عنوان خروجی‌های سیستم مورد بررسی، برای هر یک از 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 (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.



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)

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

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 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.

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 برازش و انتخاب مدل مناسب، از این 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.

جدول۶- نتایج مقادیر پیش‌بینی بهره‌برداری سالانه ا یستگاه دز با استفاده از مدل (۱) AR برای سال‌های ۱۴۰۳ - ۱۴۱۲

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

جدول۷- نتایج مقادیر پیش‌بینی بهره‌برداری سالانه ایستگاه زهره با استفاده از مدل (۱) AR برای سال‌های ۱۴۰۳ - ۱۴۱۲

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

جدول۸- 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

جدول۹- 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

نتیجه‌گیری

در خصوص مسائل مطرح در حوزه صنعت آب، در سال‌های اخیر بیشترین تمرکز کارهای پژوهشی بر بهبود سیاست‌های بهره‌برداری و افزایش کارآیی 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. کارآیی 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 جستجوی‌هارمونی 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 کارآیی 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 پژوهش 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 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 درنظر 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 درصورت 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

منابع

- 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., & Buhan, 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 freeware 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)
- 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
- 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.