



Pareto front analysis in multi-objective optimal water resources allocation using the MOHO algorithm

Leila Shakarami¹ | Parisa-Sadat Ashofteh^{2✉}

1. Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: l.shakarami@stu.qom.ac.ir
 2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 8 November 2025
 Received in revised form
 4 December 2025
 Accepted 6 May 2026
 Published online 22 June 2026

Keywords:

MOGA model
MOHO algorithm
Multi-objective optimization
Water resource allocation

ABSTRACT

Water resources management in semi-arid regions is challenged by climate variability, supply–demand imbalances, and environmental constraints. In this study, the Multi-Objective Horse Optimization (MOHO) algorithm was developed to optimize the operation of the Garanqo Reservoir in northwestern Iran. Two main objectives were considered: (1) minimizing vulnerability caused by water shortages and (2) maximizing reliability in meeting downstream water demands. The performance of MOHO was compared with the reference Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) using the Fonseca–Fleming test function. Results showed that MOHO achieved a well-distributed Pareto front and maintained solution diversity effectively. Analysis of the base period (1971–2000) revealed that vulnerability ranged from 15% to 36%, while reliability ranged from 29% to 70% across the set of Pareto-optimal solutions. The compromise zone was identified within vulnerability levels of 31–33% and reliability levels of 40–55%, highlighting the trade-off between the two conflicting objectives. Reservoir performance analysis also showed a significant temporal mismatch between natural inflows and human water demand, emphasizing the need for accurate release planning and storage management. Finally, several management strategies were proposed to reduce shortages, prevent spill losses, and enhance system resilience under variable hydrological conditions.

Cite this article: Shakarami, L., & Ashofteh, P. S. (2026). Pareto front analysis in multi-objective optimal water resources allocation using the MOHO algorithm. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 163-177. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.401208.1254>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.401208.1254>

Publisher: University of Tehran Press.



تحلیل جبهه پارتو در تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از الگوریتم چندهدفه اسب (MOHO)

لیلا شاکرمی^۱ | پریساسادات آشفته^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: I.shakarami@stu.qom.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک با چالش‌هایی همچون نوسانات اقلیمی، تضاد عرضه و تقاضا و محدودیت‌های محیط‌زیستی همراه است. در این پژوهش، الگوریتم چندهدفه اسب (MOHO) برای نخستین بار جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن قرنقو توسعه داده شد. دو هدف اصلی شامل کاهش آسیب‌پذیری ناشی از کمبود آب و افزایش اطمینان‌پذیری تأمین تقاضا موردبررسی قرار گرفت. مقایسه عملکرد MOHO با مدل مرجع MOGA و تابع آزمون فونسکا-فلمینگ نشان داد که الگوریتم جدید توانایی مناسبی در دستیابی به جبهه پارتو و حفظ تنوع پاسخ دارد. تحلیل نتایج دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) نشان داد که مقدار آسیب‌پذیری در طیف راه‌حل‌ها بین حدود ۱۵ تا ۳۶ درصد و اطمینان‌پذیری بین حدود ۲۹ تا ۷۰ درصد تغییر می‌کند. نقطه سازشی جبهه پارتو در محدوده آسیب‌پذیری ۳۱ تا ۳۳ درصد و اطمینان‌پذیری ۴۰ تا ۵۵ درصد قرار گرفت. هم‌چنین بررسی رفتار مخزن بیان‌گر وجود عدم‌تطابق زمانی میان ورود طبیعی و تقاضای انسانی بوده و ضرورت برنامه‌ریزی دقیق رهاسازی و مدیریت ذخیره را نشان می‌دهد. در نهایت، مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی برای کاهش کسری، کنترل سرریز و افزایش تاب‌آوری سامانه پیشنهاد شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	
کلیدواژه‌ها: الگوریتم MOHO بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص منابع آب مدل MOGA	

استناد: شاکرمی، لیلا و آشفته، پریساسادات (۱۴۰۵). تحلیل جبهه پارتو در تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از الگوریتم چندهدفه اسب (MOHO). *تشریح مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۱)، ۱۶۳-۱۷۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.401208.1254>



۱. مقدمه

مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک با پیچیدگی‌های قابل توجهی همراه است. زیرا محدودیت‌های طبیعی، نوسانات اقلیمی، تضاد میان عرضه و تقاضا و فشارهای محیط‌زیستی همواره تصمیم‌گیری را با عدم قطعیت روبه‌رو می‌کنند. در چنین شرایطی، استفاده از رویکردهای پیشرفته و چندهدفه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این روش‌ها امکان برقراری توازن میان اهداف متعارضی همچون تأمین آب، کاهش مخاطرات کمیابی، کنترل سیلاب و حفاظت محیط‌زیست را فراهم می‌کنند (Garcia & Alamanos, 2024; Najafi et al., 2024). رویکردهای چندهدفه با شناسایی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتویی، ابزار قدرتمندی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده و چندبخشی مدیریت آب محسوب می‌شوند (Han et al., 2025). این ویژگی انعطاف‌پذیری بالاتری به مدیران می‌دهد تا در شرایط پویا، گزینه‌های مناسب‌تری انتخاب کنند. در این چارچوب اغلب از الگوریتم‌های تکاملی و هوش مصنوعی نظیر الگوریتم‌های ژنتیک، روش‌های شبیه‌سازی و مدل‌های نوین بهینه‌سازی استفاده می‌شود (Zhang & Zhang, 2020).

بهینه‌سازی چندهدفه در مدیریت سامانه‌های تأمین آب، به‌ویژه در مخازن مناطق نیمه‌خشک، یکی از مهم‌ترین ابزارها برای ایجاد توازن میان اهداف متعارض نظیر کاهش کمبود، افزایش اطمینان‌پذیری و کنترل سرریز است. در دهه اخیر، استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مسائل چندهدفه گسترش یافته است و پژوهش‌های متعددی کارآمدی این رویکردها را گزارش کرده‌اند. برای نمونه، Fallah-Mehdipour (2011) نشان نشان دادند که الگوریتم‌های چندهدفه مبتنی بر جستجوی جمعیتی می‌توانند جبهه‌های پارتوی گسترده‌تری در مسائل تخصیص آب تولید کنند. همچنین Ashofteh et al. (2015) با تحلیل رفتار عملکردی شاخص‌های قابلیت اطمینان و آسیب‌پذیری در بهینه‌سازی مخازن نشان دادند که روش‌های تکاملی قادرند روابط ساختاری میان این معیارها را بهتر آشکار سازند. مطالعات Li et al. (2017) و Yu et al. (2023) نیز تأکید کرده‌اند که استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه می‌تواند موجب بهبود هم‌زمان کیفیت راه‌حل و یکنواختی جبهه پارتو در شرایط تغییرپذیری هیدرولوژیک شود.

در کنار روش‌های کلاسیک‌تر همچون MOGA، نسل جدیدی از الگوریتم‌های الهام‌گرفته از رفتار جانوری مطرح شده‌اند که کارایی مطلوبی در حل مسائل با ابعاد بالا دارند. MiariNaeimi et al. (2021) عملکرد موفق این دسته از الگوریتم‌ها را در تولید راه‌حل‌های متنوع و جلوگیری از همگرایی زودهنگام گزارش کرده‌اند. افزون بر این، Pournali Dougaheh & Ashofteh (2025) نشان داده‌اند که استفاده از ساختارهای ترکیبی مبتنی بر رفتار جمعی می‌تواند فرایند اکتشاف و استخراج را در مسائل چندهدفه به‌صورت هم‌زمان تقویت کرده و کیفیت نهایی جبهه پارتو را افزایش دهد. به‌طور کلی، مرور مطالعات پیشین حاکی از آن است که استفاده از الگوریتم‌های نوین چندهدفه در مدیریت مخازن، ضمن کاهش حساسیت به شرایط اولیه، امکان ایجاد راه‌کارهای سازگارتر با ناهمگنی زمانی ورودی‌ها را فراهم می‌کند. بدین ترتیب، ارزیابی عملکرد الگوریتم MOHO در چارچوب مدیریت مخزن قرقو می‌تواند گامی مهم در سنجش قابلیت این روش در مسائل واقعی بهره‌برداری از آب باشد.

در این پژوهش با هدف بهبود بهره‌برداری از مخزن قرقو در استان آذربایجان شرقی، یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی اسب چندهدفه^۱ (MOHO) توسعه داده شده است. برای اعتبارسنجی اولیه، یک تابع معیار (فونسکا^۲-فلمینگ^۳) به کار گرفته شد اهداف اصلی بهبود بهره‌برداری از مخزن شامل ۱- کاهش آسیب‌پذیری ناشی از کمبود آب و ۲- افزایش اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا هستند. هدف فرعی تحقیق نیز ارزیابی توان الگوریتم MOHO در مقایسه با یک الگوریتم مرجع (MOGA) در دستیابی به جبهه پارتو و حفظ تنوع پاسخ‌ها است.

سؤال اصلی پژوهش این است که آیا الگوریتم MOHO می‌تواند نسبت به روش‌های مرجع، راه‌حل‌های کارآمدتری برای مدیریت مخزن و ایجاد توازن میان آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری ارائه دهد؟

فرض‌های پژوهش نیز بر این اساس استوار است که ۱- تضاد ساختاری میان دو شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری وجود دارد، ۲- الگوریتم‌های طبیعت‌محور قادرند با حفظ تنوع جمعیت، راه‌حل‌هایی نزدیک‌تر به جبهه پارتوی واقعی فراهم کنند و ۳- استفاده از رویکرد چندهدفه می‌تواند تصویر دقیق‌تری از رفتار سامانه مخزن تحت نوسانات ورودی و تقاضا ارائه دهد. این چارچوب، زمینه لازم برای توسعه مدل و تحلیل نتایج را فراهم می‌کند.

۲. روش‌شناسی پژوهش

در این بخش به تشریح روش‌های مورداستفاده پرداخته می‌شود که شامل سه گام اصلی است:

- ۱- محاسبه و تحلیل پارامترهای اقلیمی، آب‌شناسی و نیاز آبیاری به‌منظور برآورد جریان ورودی به مخزن و حجم تقاضای آب در دوره مینا (۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰)؛
- ۲- طراحی و توسعه الگوریتم MOHO و استفاده از آن در مسئله تخصیص منابع آب؛
- ۳- بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تخصیص بهینه در حالت‌های چندهدفه (MOHO و MOGA) برای بازه زمانی پایه.

۲.۱. منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز قرنقو در جنوب‌غرب شهرستان هشترود (استان آذربایجان شرقی) و در دامنه‌های شمالی سپهند واقع شده است. توپوگرافی منطقه کوهستانی با شیب‌های تند است و ارتفاعات تا ۳۷۰۷ متر در قله سپهند می‌رسد. ساختار زمین‌شناسی متشکل از سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی و آهکی است که در تغذیه منابع آب نقش دارند. رودخانه اصلی حوضه به سمت شمال‌غرب جریان یافته و در نهایت به قزل‌اوزن ملحق می‌شود. چشمه‌ها و سفره‌های زیرزمینی نیز منابع مهم تأمین آب شرب و کشاورزی محسوب می‌شوند. جریان رودخانه فصلی است و در تابستان کاهش شدیدی دارد.

اقلیم منطقه نیمه‌خشک و سرد است. میانگین بارش سالانه حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است که بیش‌تر در پاییز و زمستان رخ می‌دهد. تابستان‌ها گرم و خشک و زمستان‌ها سرد و برفی هستند. کاهش بارندگی‌های سالانه و تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر باعث افت منابع آب و آسیب به کشاورزی شده است. فعالیت اصلی اقتصادی منطقه کشاورزی است. محصولات عمده شامل گندم، جو، ذرت، یونجه، سویا، سیب‌زمینی و گردو می‌شود. حدود ۱۴،۵۰۰ هکتار زمین زراعی تحت کشت قرار دارد که درصد سه‌م هر محصول متفاوت است. مراتع نیز برای دامداری سنتی مورداستفاده قرار می‌گیرند.

سد قرنقو برای تأمین آب این اراضی ساخته شده است. مساحت حوضه ۳۵۹۰ کیلومتر مربع و متوسط جریان سالانه آن ۱۴۹ میلیون مترمکعب است. حجم کل، مفید و مرده مخزن به‌ترتیب ۱۶۵، ۱۳۵ و ۱۷ میلیون مترمکعب است. در این پژوهش داده‌های پایه شامل آمار ایستگاه هیدرومتری تونل هفت (به‌عنوان خروجی حوضه) و اطلاعات بارش و دمای ایستگاه میانه در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ است. موقعیت مکانی حوضه در شکل (۱) ارائه شده است.

داده‌های ورودی مورداستفاده در این پژوهش شامل سری زمانی جریان ورودی به مخزن، آمار روزانه تبخیر، نیاز آبی اراضی پایین‌دست و مشخصات هندسی مخزن قرنقو است. داده‌های هیدرولوژیک شامل جریان ورودی و تبخیر از طریق شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی (دفتر مطالعات پایه منابع آب) برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۴ تهیه شده‌اند. اطلاعات مربوط به نیاز آبی از گزارش‌های طرح‌های توسعه و بهره‌برداری دشت‌های پایین‌دست مخزن استخراج شده و مشخصات

فنی مخزن (ظرفیت اسمی، حجم مفید، منحنی تراز-حجم و تلفات تبخیر) از اسناد مهندسی و گزارش‌های مطالعاتی شرکت آب منطقه‌ای گردآوری شده است. مقادیر میانگین بلندمدت ماهانه دما، بارندگی، رواناب رودخانه و تقاضای پایین‌دست مخزن محاسبه و در شکل (۲) آورده شده است.

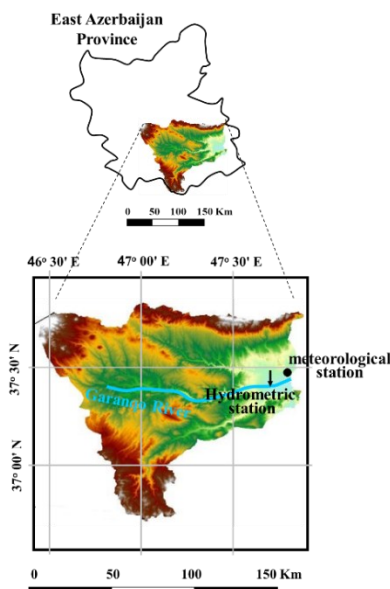


Figure 1. Geographical location of the basin

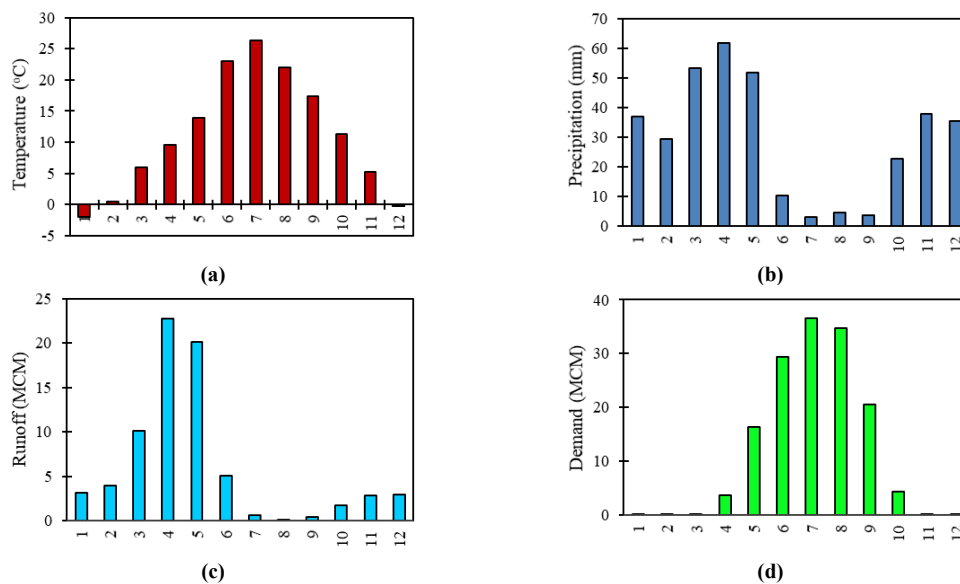


Figure 2. Comparison of long-term monthly average values of (a) temperature, (b) precipitation, (c) runoff, (d) water demand for the base period

تفسیر شکل (۲) که شامل چهار نمودار مقایسه‌ای از میانگین بلندمدت ماهانه برای دوره پایه است، می‌تواند به درک الگوهای اقلیمی و آب‌شناسی منطقه کمک کند. شکل (۲-ا) افزایش دما در ماه‌های گرم (معمولاً خردادماه تا مردادماه) و کاهش در ماه‌های سرد (آذرماه تا بهمن‌ماه) را نشان می‌دهد. اوج دما در تیرماه نشان‌دهنده تابستان گرم منطقه و کمینه

دما در دی ماه معرف زمستان سرد است. شناسایی این الگو برای بررسی تبخیر و تعرق و تأثیر آن بر منابع آب سطحی و زیرزمینی حیاتی است. شکل (۲-b) پراکنش نامتقارن بارندگی را نشان می‌دهد. بارندگی بیش‌تر در فصل‌های سرد (پاییز و زمستان) و کاهش شدید در تابستان رخ می‌دهد. اوج بارندگی به‌طور معمول در فروردین ماه است. کاهش بارندگی در ماه‌های تیر و مرداد، می‌تواند منجر به تنش آبی شود. این الگو برای طراحی سامانه‌های ذخیره‌سازی و مدیریت سیلاب اهمیت دارد. شکل (۲-c) همبستگی رواناب با بارندگی را نشان می‌دهد. افزایش رواناب در ماه‌هایی رخ داده است که بارندگی زیاد است. ممکن است رواناب کمی با تأخیر نسبت به بارندگی ظاهر شود، بسته به نفوذپذیری خاک و پوشش گیاهی. کاهش رواناب در تابستان به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش تبخیر است. بررسی نسبت رواناب به بارندگی می‌تواند در ارزیابی بهره‌وری حوضه آبریز مؤثر باشد. شکل (۲-d) تقاضای آب را نشان می‌دهد. اوج تقاضا در تابستان است، به‌دلیل افزایش دما، تبخیر، و نیاز کشاورزی یا شهری. کمینه تقاضا در زمستان است، هم‌زمان با کاهش فعالیت‌های کشاورزی و دمای پایین. بیش‌ترین تقاضا در زمانی رخ می‌دهد که بارندگی و رواناب کم‌ترین مقدار را دارند. این تضاد زمانی بین عرضه و تقاضا، ضرورت برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازی و انتقال آب را نشان می‌دهد.

۲.۲. الگوریتم بهینه‌سازی اسب چندهدفه (MOHO)

الگوریتم MOHO نسخه توسعه‌یافته‌ای از مدل پایه الگوریتم بهینه‌سازی اسب^۴ (HO) (MiarNaeimi et al., 2021) است که به‌طور ویژه برای حل مسائل چندهدفه ارائه شده است. در این دسته از مسائل، هدف دستیابی به مجموعه‌ای از پاسخ‌هاست که هم‌زمان چندین معیار بهینه‌سازی را برآورده کنند. این الگوریتم با الگوبرداری از رفتار جمعی اسب‌ها، تعادل میان جستجوی گسترده در فضای جواب (اکتشاف) و تمرکز بر بهبود پاسخ‌های به‌دست‌آمده (استخراج) را برقرار می‌سازد. مهم‌ترین خصوصیات MOHO عبارتند از:

- ۱- **جبهه پارتو:** خروجی الگوریتم مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها روی جبهه پارتو است، جایی که هیچ پاسخ واحدی به‌طور مطلق بر دیگری برتری ندارد.
 - ۲- **انتخاب رهبران:** بهترین اعضای جمعیت براساس معیار غیرمغلوب بودن و تنوع پاسخ‌ها تعیین شده و نقش هدایت‌کننده را ایفا می‌کنند.
 - ۳- **موازنه اکتشاف و استخراج:** رفتارهایی مانند چرای گروهی و حرکت‌های تصادفی موجب گسترش جستجو در فضای پاسخ می‌شوند، درحالی‌که سازوکارهایی هم‌چون تقلید و یادگیری، دقت و کیفیت پاسخ‌های نزدیک به جبهه پارتو را افزایش می‌دهند.
 - ۴- **حفظ تنوع جمعیت:** الگوریتم با روش‌هایی مانند پراکندگی مناسب پاسخ‌ها در سطح جبهه پارتو، از همگرایی زودهنگام جلوگیری می‌کند.
- فرایند اجرای MOHO در چند گام زیر خلاصه می‌شود:
- **مرحله آغازین:** جمعیتی اولیه از اسب‌ها به‌طور تصادفی در فضای جستجو تولید می‌شود و مقادیر توابع هدف برای آن‌ها محاسبه می‌گردد.
 - **محاسبه جبهه پارتو:** براساس معیار غیرمغلوب بودن، راه‌حل‌ها رتبه‌بندی شده و بهترین نقاط به‌عنوان رهبران انتخاب می‌شوند.
 - **به‌روزرسانی موقعیت:** جایگاه هر اسب با ترکیبی از حرکت به سمت رهبران و استفاده از رفتارهای اکتشافی تغییر می‌کند.

- **ارزیابی پاسخها:** کیفیت نتایج از نظر همگرایی به جبهه پارتو و توزیع یکنواخت بررسی می شود.
 - **شرط توقف:** الگوریتم تا رسیدن به تعداد مشخصی از تکرارها یا دستیابی به کیفیت مطلوب ادامه می یابد.
- در شکل (۳) روند اجرای الگوریتم MOHO نمایش داده شده است.

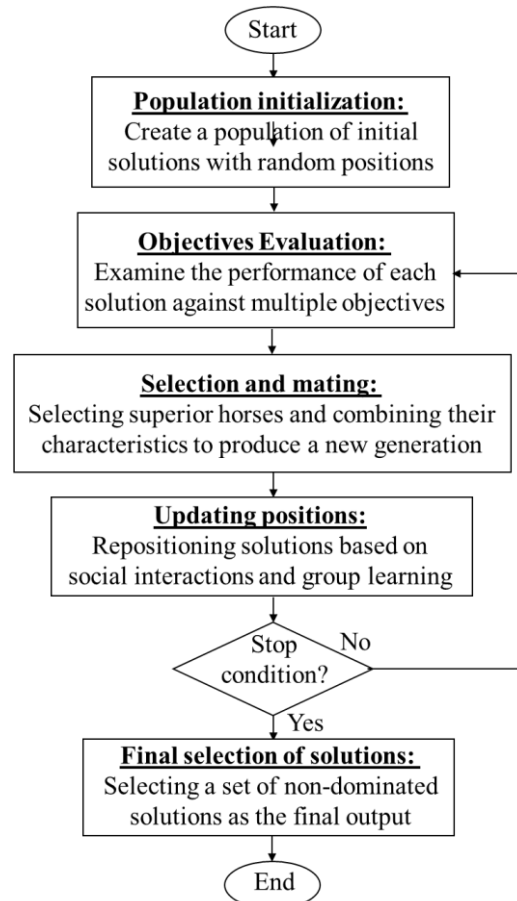


Figure 3. MOHO algorithm flowchart

۳.۲. ارزیابی الگوریتم MOHO با تابع استاندارد چندهدفه

برای سنجش کیفیت عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، به‌طور معمول از مجموعه‌ای از توابع استاندارد استفاده می‌شود. این توابع امکان مقایسه الگوریتم‌ها را از نظر شاخص‌هایی هم‌چون همگرایی به جبهه پارتو، دقت جواب‌ها و پراکندگی مناسب راه‌حل‌ها فراهم می‌کنند. در واقع، تضاد میان اهداف در این توابع، دشواری مسأله را شبیه‌سازی می‌کند و موجب می‌شود قابلیت الگوریتم‌ها در شرایط مختلف بررسی گردد. برخی از این توابع به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که جواب‌های بهینه به‌صورت یکنواخت در مرز پارتو قرار گیرند.

در این مطالعه، برای ارزیابی الگوریتم MOHO، دو تابع شناخته‌شده مورد استفاده قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده با مدل MOGA مقایسه شد. به‌منظور حفظ شرایط عادلانه، اندازه جمعیت در همه مدل‌ها برابر ۱۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. هم‌چنین هر آزمایش ۱۰ بار اجرا گردید و نتایج میانگین به‌عنوان خروجی نهایی گزارش شد. مشخصات توابع آزمون در جدول (۱) آورده شده است.

Table 1. Test functions used to evaluate the MOHO algorithm

Function name	Equation	Figure
F1: (Fonseca and Fleming Function)	$f_1(x) = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right]$ $f_2(x) = 1 - \exp\left[-\sum_{i=1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right]$ $-4 \leq x_i \leq 4$ $1 \leq i \leq n$	

۴.۲. بهینه‌سازی چندهدفه در تخصیص منابع آب

پس از آن که کارایی الگوریتم MOHO با توابع آزمون تأیید شد، این روش برای مسأله تخصیص آب به کار گرفته شد. در اینجا دو تابع هدف اصلی مدنظر قرار گرفت:

۱- کاهش آسیب‌پذیری ناشی از کمبود آب (Z_1)

۲- افزایش قابلیت اطمینان در تأمین تقاضا (Z_2)

روابط مربوط به توابع هدف و قیود آن‌ها به صورت روابط (۱) تا (۵) تعریف شدند:

$$Z_1 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - R_t | R_t < D_t)}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad \forall t = 1.2. \dots T \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Z_2 = \frac{N_{t=1}^T (D_t \leq R_t)}{T} \quad \forall t = 1.2. \dots T \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall t = 1.2 \dots 360 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad \forall t = 1.2 \dots 360 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - (E_t * A_t / 1000) - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - (E_t * A_t / 1000) \geq S_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن، Z_1 = تابع هدف اول؛ Z_2 = تابع هدف دوم؛ D_t = تقاضای آب در هر دوره t ؛ R_t = مقدار آب رهاسازی شده در هر دوره t ؛ $N_{t=1}^T (D_t \leq R_t)$ = تعداد دوره‌های تأمین آب؛ S_t و S_{t+1} = حجم ذخیره مخزن به ترتیب در ابتدا و انتهای هر دوره t ؛ Q_t = حجم جریان ورودی به مخزن در دوره t ؛ E_t = ارتفاع تبخیر مخزن در دوره t ؛ S_{max} و S_{min} = به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین حجم ذخیره مخزن در کل دوره بهره‌برداری؛ Sp_t = حجم سرریز از مخزن در دوره t ؛ T = طول دوره بهره‌برداری ماهانه (۱۹۷۱-۲۰۰۰)؛ A_t = مساحت دریاچه مخزن در شروع دوره t هستند.

در مدل بهینه‌سازی مخزن، قیود مسئله به گونه‌ای تعریف شده‌اند که رفتار دینامیک ذخیره‌سازی و رهاسازی آب را در طول دوره بهره‌برداری ماهانه T در بازه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) به درستی نمایش دهند. در این چارچوب، متغیر S_t حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t را نشان می‌دهد و مقدار آن در پایان دوره، یعنی S_{t+1} ، توسط معادله توازن جرم تعیین می‌شود که شامل جریان ورودی Q_t ، مقدار رهاسازی شده R_t و تلفات تبخیر (که حاصل ضرب میزان تبخیر E_t و مساحت دریاچه مخزن A_t می‌باشد) است. محدودیت‌های فیزیکی مخزن نیز از طریق اعمال کمینه و بیشینه ذخیره مجاز یعنی S_{min} و S_{max} لحاظ شده‌اند. همچنین سازگاری میان عرضه و تقاضا، مقدار رهاسازی نمی‌تواند از تقاضای دوره یعنی D_t تجاوز کند. جریان سرریز مخزن که با Sp_t نشان داده می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که مجموع ذخیره، ورودی و تلفات تبخیر از ظرفیت فعال مخزن بیش‌تر شود. تمامی این متغیرها در طول بازه زمانی بهره‌برداری T محاسبه می‌شوند تا رفتار مخزن در شرایط هیدرولوژیک مختلف به‌طور کامل بازنمایی گردد.

دلیل انتخاب این توابع هدف بدین شرح است که شاخص آسیب‌پذیری (Z_1) شدت کمبود آب را در دوره‌هایی که رهاسازی کمتر از تقاضاست، نشان می‌دهد. این شاخص یکی از معیارهای کلیدی در مدیریت مخازن در شرایط نیمه‌خشک است، زیرا تمرکز آن بر شدت و بزرگی کسری است نه فقط وقوع آن. همچنین، شاخص اطمینان‌پذیری (Z_2) فراوانی دوره‌هایی را نشان می‌دهد که در آن تقاضا به‌طور کامل تأمین شده است. این شاخص یکی از پرکاربردترین معیارهای ارزیابی عملکرد سامانه‌های تأمین آب است و میزان پایداری تأمین را منعکس می‌کند. ترکیب این دو شاخص امکان بررسی دقیق تضاد ساختاری میان شدت کمبود و فراوانی تأمین را فراهم می‌کند و مبنای تحلیل جبهه پارتو در مسئله حاضر است. انتخاب این دو تابع همچنین سبب می‌شود رفتار سامانه مخزن در سناریوهای مختلف نیاز-ورودی با دقت بیشتری نمایان شود.

برای اجرای الگوریتم MOHO، اندازه جمعیت برابر با ۸۰، تعداد تکرارها ۵۰۰ و دامنه موقعیت اولیه براساس حدود مجاز تصمیم‌گیری مسئله تعریف شد. ضریب حرکت فردی (α) و ضریب هم‌گرایی جمعی (β) به ترتیب ۰/۶ و ۱/۲ در نظر گرفته شدند که این مقادیر براساس مطالعات پیشین و چند مرحله آزمون اولیه انتخاب شدند. پارامتر وزن جستجوی تصادفی (ω) مقدار ۰/۴ و ضریب کاهش تدریجی اکتشاف در طول تکرارها برابر با ۰/۹۸ تعیین شد. همچنین احتمال جهش محلی مقدار ۰/۱۵ و دامنه آن ۵ درصد از حدود متغیرهای تصمیم بود. معیار توقف براساس رسیدن به ۵۰۰ تکرار یا عدم بهبود جبهه پارتو طی ۴۰ تکرار متوالی در نظر گرفته شد. تمامی تنظیمات برای الگوریتم‌های مقایسه‌ای (MOGA) نیز به‌صورت مشابه و با رعایت شرایط یکسان‌سازی انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش

۳.۱. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با توابع آزمون چندهدفه

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، در فرایند توسعه الگوریتم اسب چندهدفه تغییراتی در کدنویسی اعمال گردید. در نسخه نخست، به‌منظور افزایش دقت، از عملگر جهش استفاده شد که نتایج آن در شکل (۴) تحت عنوان MOHO نمایش داده شده است.

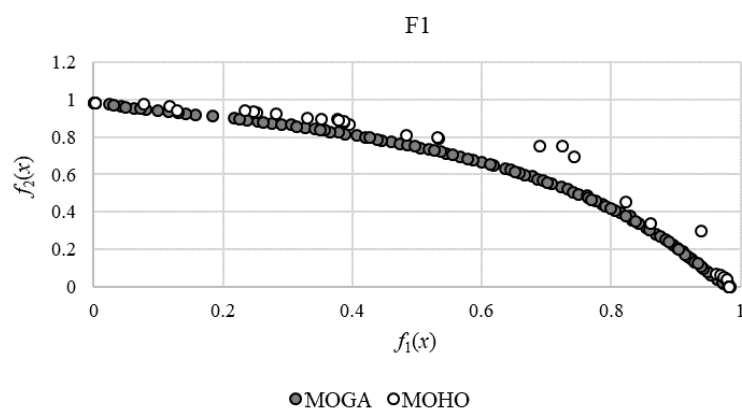


Figure 4. Comparison of the performance of the MOHO and MOGA models on the standard F1 function

شکل (۴) مقایسه عملکرد دو الگوریتم MOHO و MOGA را در حل تابع استاندارد فونسکا-فلمینگ نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، هر دو الگوریتم قادر به بازتولید جبهه پارتو هستند، اما کیفیت و یکنواختی

پراکندگی نقاط در دو مدل متفاوت است. در بخش‌های میانی جبهه پارتو، الگوریتم MOHO توانسته است به نقاط نزدیک‌تری نسبت به حد بهینه برسد و تراکم راه‌حل‌های آن در این ناحیه قابل قبول است؛ موضوعی که نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم در مراحل استخراج می‌باشد.

با این حال، در انتهای جبهه پارتو، یعنی نواحی مربوط به بیشینه‌سازی یکی از توابع هدف، پراکندگی نقاط تولیدشده توسط MOHO کم‌تر از MOGA است و بخشی از یکنواختی موردانتظار دیده نمی‌شود. این مسئله بیانگر آن است که فرایند اکتشاف الگوریتم هنوز در برخی نواحی فضای جستجو به اندازه کافی گسترده عمل نمی‌کند. هم‌چنین تعدادی از پاسخ‌های MOHO نسبت به لبه واقعی پارتو دارای فاصله بیش‌تری هستند که می‌تواند ناشی از حساسیت الگوریتم به مقدار اولیه پارامترهای جمعیت یا سرعت همگرایی باشد.

در مجموع، نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که MOHO در تولید نقاط دقیق در بخش مرکزی جبهه پارتو عملکرد مناسبی دارد، اما برای بهبود در نواحی انتهایی جبهه، افزایش تنوع جمعیت اولیه، تقویت سازوکارهای اکتشافی و به‌روزرسانی برخی پارامترهای رفتاری الگوریتم می‌تواند ضروری باشد. این موضوع در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (برای مثال، مقایسه‌های ارائه‌شده توسط (2021) Miaraeimi *et al.* و (2011) Fallah-Mehdipour *et al.*)).

۲.۳. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص منابع آب

در این پژوهش، دو تابع هدف شامل کاهش آسیب‌پذیری ناشی از کمبود آب و افزایش میزان اطمینان از تأمین تقاضا موردبررسی قرار گرفتند. مقادیر این دو شاخص برای بازه زمانی پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱) در شکل (۵) ترسیم شده است.

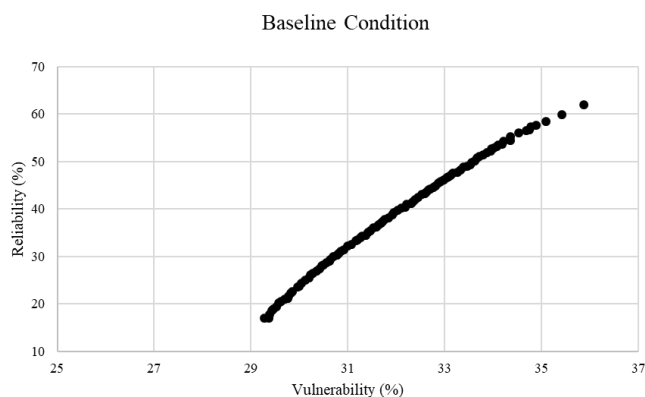


Figure 5. Values of objective functions in the multi-objective optimization process in the base period

شکل (۵) رابطه میان دو شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری را بر روی جبهه پارتو نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آسیب‌پذیری در میان راه‌حل‌های بهینه بین ۱۵ تا ۳۶ درصد و اطمینان‌پذیری در بازه ۲۹ تا ۷۰ درصد تغییر می‌کند. برای تحلیل کمی، دامنه تغییرات این دو شاخص به سه ناحیه مجزا تفکیک شده است:

۱- ناحیه آسیب‌پذیری کم (۱۵ تا ۲۹ درصد) و اطمینان‌پذیری پایین (۱۵ تا ۲۹ درصد)

این بخش از جبهه پارتو راه‌حلهایی را نشان می‌دهد که در آن‌ها شدت کمبود پایین است، اما اطمینان‌پذیری نیز کم‌تر از ۳۰ درصد است. به عبارت دیگر، سامانه در تعداد زیادی از دوره‌ها قادر به تأمین تقاضا نیست، هرچند کسری در دوره‌های کمبود زیاد نیست. این شرایط به‌طور معمول زمانی رخ می‌دهد که الگوریتم ره‌سازی‌های محتاطانه و ذخیره‌محور پیشنهاد می‌دهد.

۲- ناحیه سازش یا متوسط (۳۱ تا ۳۳ درصد آسیب‌پذیری و ۴۰ تا ۵۵ درصد اطمینان‌پذیری)

در این ناحیه که به‌طور تقریبی ۲۰ درصد از کل نقاط پارتو را تشکیل می‌دهد، توازن مناسبی بین فراوانی تأمین و شدت کمبود مشاهده می‌شود. به‌طور کمی، اگر آسیب‌پذیری را براساس میانگین شدت کمبود در دوره‌های کسری بنگریم، مقدار آن در این ناحیه حدود ۵ تا ۷ واحد درصد کم‌تر از ناحیه پرتراکم انتهای پارتو است، درحالی‌که اطمینان‌پذیری حدود ۱۵ تا ۲۰ واحد درصد بیش از ناحیه نخست افزایش یافته است. این ناحیه همان حوزه «مصالحه مدیریتی» است که به‌طور معمول برای سیاست‌گذاری توصیه می‌شود.

۳- ناحیه اطمینان‌پذیری بالا (۶۵ تا ۷۰ درصد) و آسیب‌پذیری زیاد (۳۵ تا ۳۶ درصد)

این بخش از جبهه پارتو نشان می‌دهد که با افزایش فراوانی تأمین به بیش از ۶۵ درصد، شدت کمبود نیز افزایش یافته و به حدود ۳۵ درصد یا بیش‌تر رسیده است. این الگو به‌طور کمی نشان می‌دهد که به‌ازای هر ۱۰ واحد درصد افزایش در اطمینان‌پذیری (در بخش انتهایی پارتو)، حدود ۳ تا ۴ واحد درصد افزایش در آسیب‌پذیری ایجاد می‌شود. بنابراین این ناحیه نماد راه‌بردهایی است که در آن تأمین بیشینه تقاضا اولویت دارد، حتی به قیمت بروز کمبودهای شدید در دوره‌های خشک. این تقسیم‌بندی کمی به‌روشنی نشان می‌دهد که رابطه میان دو شاخص به‌طور کامل متضاد و صعودی است. به‌طوری‌که با حرکت از ناحیه نخست به سمت ناحیه سوم، شیب افزایش آسیب‌پذیری به‌طور تقریبی $0/3$ تا $0/4$ برای هر واحد افزایش در اطمینان‌پذیری است. این رفتار کمی پایه محکمی برای انتخاب نقطه سازگار مدیریتی در حوضه فراهم می‌کند. برای تحلیل دقیق‌تر شرایط، در شکل (۶) مقادیر جریان ورودی به مخزن، حجم تقاضای آب و حجم سرریز برای دوره پایه برای سطح اطمینان‌پذیری ۵۰ درصد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

شکل (۶-a) سه مؤلفه مهم را در طول ماه‌های سال مقایسه می‌کند. ۱- تقاضای آب نشان‌دهنده نیاز مصرف‌کنندگان در هر ماه است. این مؤلفه در ماه‌های گرم‌تر مثل تیرماه افزایش دارد؛ ۲- رهاسازی از مخزن، مقدار آبی است که از مخزن برای تأمین تقاضا آزاد شده است. اگر این مقدار کم‌تر از تقاضا باشد، ممکن است کمبود رخ دهد؛ ۳- جریان ورودی، حجم آبی است که وارد مخزن شده است که به‌طور معمول در ماه‌های پرآب مثل اسفند، فروردین و اردیبهشت افزایش دارد. قابل ذکر است که در برخی ماه‌ها، ورودی بیش‌تر از تقاضا و رهاسازی است که می‌تواند منجر به سرریز شود. این مورد در شکل (۶-c) تایید می‌شود. در ماه‌هایی که تقاضا بالا و ورودی کم است، رهاسازی باید بهینه شود تا از کسری جلوگیری شود. تطابق یا عدم‌تطابق بین این سه مؤلفه، کارایی مدیریت مخزن را نشان می‌دهد.

شکل (۶-b) وضعیت حجم آب ذخیره‌شده در مخزن را در طول سال نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در این نمودار ذخیره پایه، مقدار واقعی ذخیره‌شده در سطح اطمینان‌پذیری ۵۰ درصد است. هم‌چنین ظرفیت ماکزیمم، بیشینه ظرفیت مخزن (۱۶۵ میلیون مترمکعب) است. ظرفیت مرده (۱۷ میلیون مترمکعب)، بخشی از مخزن بوده که قابل‌استفاده نیست (به‌عنوان مثال به‌دلیل رسوب‌گذاری یا محدودیت‌های فنی). اگر ذخیره پایه به ظرفیت مرده نزدیک شود، خطر کمبود جدی وجود دارد. در ماه‌هایی که ذخیره به ظرفیت بیشینه نزدیک می‌شود، احتمال سرریز بالا می‌رود. نوسانات ذخیره‌سازی نشان‌دهنده پاسخ سامانه به تغییرات ورودی و تقاضاست. شکل (۶-a, b) در کنار هم تصویری جامع از عملکرد مخزن ارائه می‌دهند. در سطح اطمینان‌پذیری ۵۰ درصد، سامانه در حالت متوسط قرار دارد، اما برای تصمیم‌گیری مدیریتی باید سناریوهای بدبینانه‌تر (به‌عنوان مثال، ۹۰ درصد) نیز بررسی شوند.

شکل (۶-c) سه مؤلفه تقاضا، سرریز و جریان ورودی را در طول سال مقایسه می‌کند. سرریز مقدار آبی است که از مخزن به‌دلیل پُرشدن بیش از ظرفیت، خارج شده است. در ماه‌هایی که ورودی بیش‌تر از تقاضاست، سرریز رخ داده است. به‌عنوان مثال، در زمستان که بارندگی زیاد است، اما مصرف کم‌تر. در تابستان، با وجود افزایش تقاضا، ورودی کاهش

یافته و سرریز به طور تقریبی صفر است. این نشان می‌دهد که مدیریت مخزن باید به گونه‌ای باشد که در ماه‌های پرباران، ذخیره‌سازی بهینه انجام شود تا در ماه‌های خشک پاسخ‌گویی تقاضا باشد. شکل (۶-d) مقدار آبی که نتوانسته تأمین شود و منجر به کمبود شده است را نشان می‌دهد. در ماه‌هایی مثل تیر، تقاضا بالا و ورودی پایین است، بنابراین کسری قابل توجهی دیده می‌شود. در ماه‌های زمستان، با وجود ورودی بالا، کسری تقریباً صفر است. این الگو نشان‌دهنده عدم تطابق زمانی بین عرضه طبیعی و تقاضای انسانی است؛ یعنی بیشترین نیاز در زمانی رخ می‌دهد که منابع طبیعی کمترین مقدار را دارند.

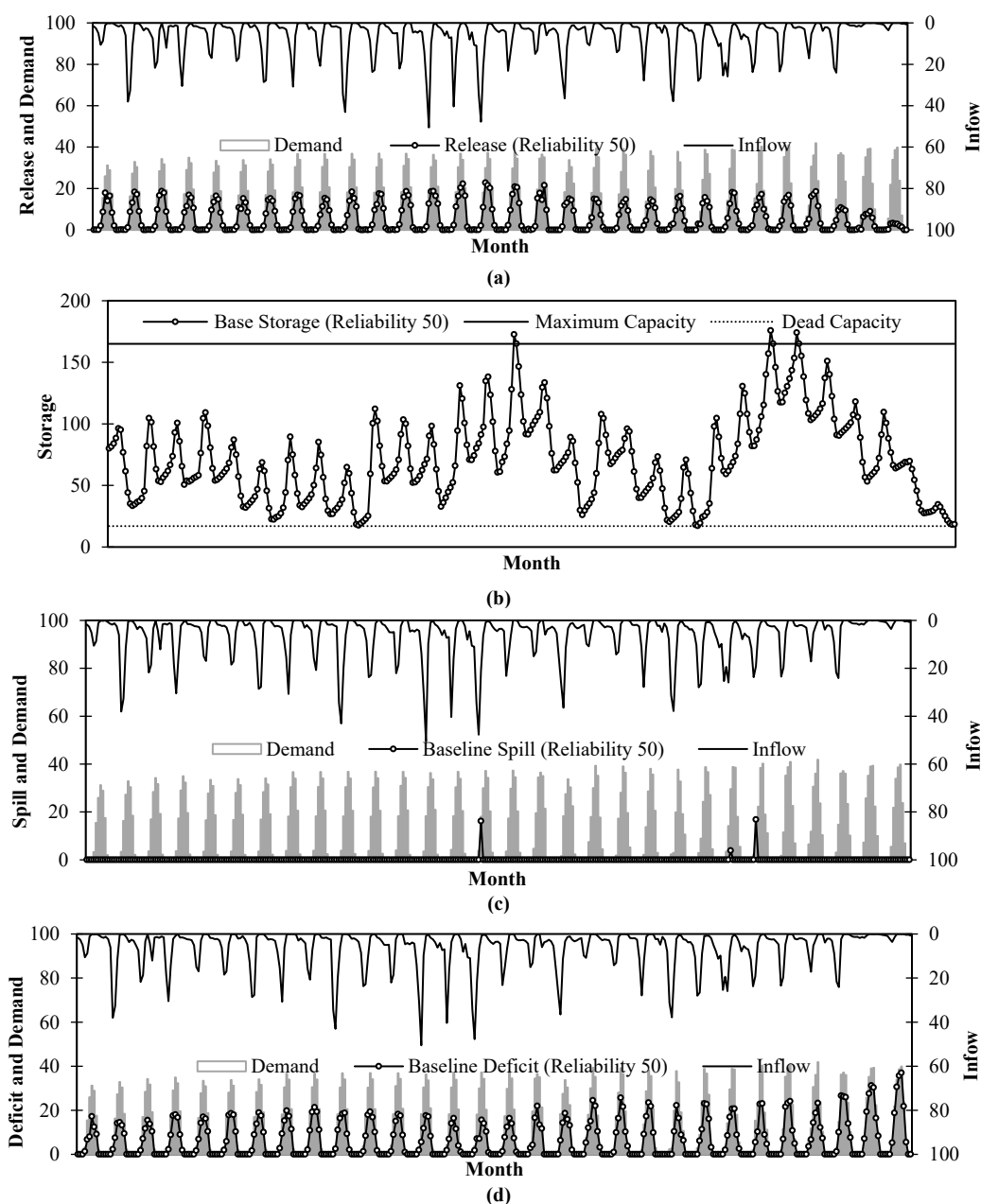


Figure 6. Volume of (a) released water, (b) reservoir water storage, (c) spill flow, (d) water supply deficit, along with the volume of inflow to the reservoir and the demand for water downstream of the reservoir in the base period (for a water supply reliability of 50%) - (in MCM)

بررسی رفتار مخزن در دوره پایه نشان می‌دهد که دو مسئله اصلی شامل وقوع کسری در دوره‌های با ورودی کم و شکل‌گیری سرریز در دوره‌های با ورودی بالا نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی سامانه دارند. برای بهبود عملکرد مخزن لازم است الگوی رهاسازی و ذخیره‌سازی با تمرکز بر هماهنگ‌سازی عرضه و تقاضا بازتنظیم شود. این امر از طریق اصلاح تدریجی قواعد رهاسازی در ماه‌های حساس، به‌ویژه دوره‌هایی که اختلاف میان ورودی طبیعی و نیاز مصرف‌کنندگان بیش‌ترین مقدار را دارد، امکان‌پذیر است. بهبود مدیریت ذخیره نیز از طریق بازنگری در حدود مجاز حجم فعال و تنظیم ظرفیت ذخیره میان‌مدت قابل دست‌یابی است تا فضای کافی برای جذب ورودی‌های ناگهانی فراهم شده و در عین حال ذخیره مؤثر برای دوره‌های کم‌آبی حفظ شود. از سوی دیگر، بازتعریف الگوی تقاضا در چارچوب برنامه‌ریزی بهره‌برداری می‌تواند نوسانات شدید در نیاز را کاهش داده و امکان تنظیم یکنواخت‌تری را برای مخزن فراهم کند. همچنین مدیریت متمرکز بر فصول، با هدف کاهش تنش‌های زمانی میان ورودی و مصرف، می‌تواند نقش مهمی در کاهش کسری‌های تجمعی و جلوگیری از وقوع سرریزهای غیرضروری داشته باشد. مجموعه این اقدامات، زمانی کارآمد خواهد بود که در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی سازگار با رفتار مخزن اجرا شود تا ظرفیت سامانه برای پاسخ‌گویی در برابر نوسانات هیدرولوژیک افزایش یابد.

۴. بحث و مقایسه با مطالعات پیشین

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم MOHO نشان دادند که این روش توانایی مناسبی در تولید جبهه پارتوی گسترده و یکنواخت برای دو هدف آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری دارد. مقایسه نتایج با الگوریتم مرجع MOGA نیز بیان‌گر آن است که MOHO در بخش‌هایی از فضای هدف، به‌ویژه در نزدیکی مقادیر پایین آسیب‌پذیری، تنوع بیش‌تری از راه‌حل‌ها ارائه کرده و از همگرایی زود هنگام جلوگیری کرده است. این یافته با گزارش‌های *MirNaeimi et al.* (2021) درباره عملکرد بهتر الگوریتم‌های الهام‌گرفته از رفتار جانوری در مسائل پیچیده بهینه‌سازی همخوان است.

الگوی مشاهده‌شده از رابطه معکوس میان دو شاخص آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری نیز با نتایج مطالعاتی مانند *Ashofteh et al.* (2015) و *Li et al.* (2017) همسو است. این پژوهش‌ها نیز نشان داده‌اند که با افزایش فراوانی تأمین نیاز، شدت کمبود در دوره‌های خشک افزایش می‌یابد و انتخاب نقطه سازش در جبهه پارتو تابعی از اولویت‌های مدیریتی است. مطالعه *Yu et al.* (2023) نیز ضمن بررسی شرایط عدم قطعیت هیدرولوژیک، بر اهمیت انتخاب نقاطی تأکید می‌کند که از افزایش بیش از حد آسیب‌پذیری جلوگیری کنند؛ موضوعی که در نتایج حاضر نیز مشاهده شد.

بررسی رفتار مخزن قرنقو در دوره پایه نشان داد که نوسانات شدید جریان ورودی و تمرکز تقاضا در ماه‌های گرم، موجب بروز هم‌زمان کسری و سرریز شده و چالش مدیریت مخزن را تشدید می‌کند. الگوی مشابهی در مطالعات *Naghdi et al.* (2021) و *Khorsandi et al.* (2022) نیز گزارش شده است، به طوری که عدم هم‌زمانی ورودی طبیعی و تقاضای انسانی منجر به کاهش کارایی مخزن در تأمین نیاز می‌شود و لزوم بازتنظیم قواعد رهاسازی را تقویت می‌کند. علاوه بر این، یافته‌های پژوهش حاضر که نشان‌دهنده کارآمدی الگوریتم MOHO در حفظ تعادل میان اکتشاف و استخراج در فضای پاسخ است، با نتایج *Kalhari et al.* (2023) و *Pourali Dougaheh and Ashofteh* (2025) همخوان بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی، به‌ویژه در مسائل چندهدفه مرتبط با مدیریت منابع آب، عملکرد قابل‌اتکایی دارند.

در مجموع، نتایج این پژوهش ضمن تأیید کارایی الگوریتم MOHO، آن را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تحلیل سازش میان اهداف متعارض در بهره‌برداری مخزن معرفی می‌کند. این رویکرد می‌تواند همانند مطالعات *Jia et al.*

(2024) و Han *et al.* (2025) به عنوان بخشی از یک چارچوب تصمیم‌گیری برای مدیریت پایدار منابع آب، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، مورد استفاده قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم MOHO نشان می‌دهد که این روش توانسته است تعادل مناسبی میان دو هدف متضاد یعنی کاهش آسیب‌پذیری ناشی از کمبود آب و افزایش قابلیت اطمینان در تأمین تقاضا برقرار کند. تحلیل جبهه پارتو نشان داد که انتخاب نقطه بهینه نهایی به اولویت‌های مدیریتی بستگی دارد؛ به عبارت دیگر، اگر هدف اصلی کاهش شدت خسارت در زمان بحران باشد، باید به سمت نقاطی با آسیب‌پذیری پایین حرکت کرد، اما اگر تأمین پایدار و فراوان آب در اولویت باشد، نقاطی با اطمینان‌پذیری بالا مناسب‌تر خواهند بود.

مقایسه الگوریتم MOHO با روش مرجع MOGA نیز نشان داد که MOHO در همگرایی به جبهه پارتو و حفظ تنوع پاسخ‌ها عملکرد قابل‌قبولی دارد. استفاده از رفتارهای جمعی اسب‌ها در الگوریتم، موجب شده تا تعادل میان اکتشاف و استخراج به‌خوبی برقرار شود و از همگرایی زود هنگام جلوگیری گردد.

تحلیل‌ها نشان دادند که در سطح اطمینان‌پذیری ۵۰ درصد، سامانه در حالت تعادل نسبی قرار دارد، اما هم‌چنان نوسانات قابل‌توجهی در ذخیره‌سازی، رهاسازی، سرریز و کمبود مشاهده می‌شود. این نوسانات بیان‌گر پیچیدگی‌های زمانی و مکانی در مدیریت منابع آب هستند. به‌ویژه تضاد زمانی میان عرضه طبیعی (بارندگی و رواناب) و تقاضای انسانی (مصرف کشاورزی و شهری) چالشی اساسی در بهره‌برداری از مخزن قرنقو محسوب می‌شود. راه‌کارهای مدیریتی پیشنهادی مانند بهینه‌سازی زمان‌بندی رهاسازی، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر، مدیریت تقاضا و بهره‌برداری از سرریز می‌توانند نقش مهمی در کاهش کسری و افزایش تاب‌آوری سامانه ایفا کنند. هم‌چنین مدل‌سازی سناریوهای بحرانی و تحلیل عملکرد در سطوح اطمینان‌پذیری بالاتر، می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در تدوین سیاست‌های بلندمدت کمک کند.

پژوهش حاضر با توسعه و به‌کارگیری الگوریتم MOHO در مدیریت بهره‌برداری از مخزن قرنقو، نشان داد که بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند ابزاری مؤثر برای حل مسائل پیچیده منابع آب باشد. الگوریتم MOHO با بهره‌گیری از رفتارهای جمعی و سازوکارهای هوشمند، توانست عملکرد مناسبی در دستیابی به جبهه پارتو و ارائه گزینه‌های متنوع برای تصمیم‌گیری فراهم آورد.

در مجموع، استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه مانند MOHO می‌تواند مسیر جدیدی برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی فراهم کند و با تلفیق دانش فنی، داده‌های اقلیمی و رویکردهای هوشمند، به افزایش تاب‌آوری و بهره‌وری سامانه‌های آبی کمک نماید.

در این پژوهش تمرکز اصلی بر توسعه و ارزیابی عملکرد الگوریتم MOHO و مقایسه آن با MOGA در شرایط موجود مخزن بوده است، بنابراین تحلیل حساسیت پارامترها و سناریوهای تغییر اقلیم در چارچوب مطالعه حاضر اجرا نشده است. با این حال، با توجه به ماهیت نوسانی جریان‌های ورودی در مناطق نیمه‌خشک، انجام تحلیل حساسیت برای پارامترهای کلیدی مدل (مانند ضرایب الگوریتم، نیاز آبی و ورودی مخزن) و ارزیابی رفتار مدل تحت سناریوهای مختلف اقلیمی می‌تواند مسیر ارزشمندی برای توسعه آتی این تحقیق باشد. این موضوع به‌ویژه در شرایط افزایش تغییرپذیری منابع آب و لزوم برنامه‌ریزی پایدار مخازن اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Multi-Objective Herd-Horse Optimization
2. Fonseca
3. Fleming
4. Herd-Horse Optimization
5. Pareto Front
6. Trade-off Zone

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Ashofteh, P.-S., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2015). Evaluation of climatic-change impacts on multiobjective reservoir operation with multiobjective genetic programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11), DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000540.
- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., & Mariño, M. A. (2011). MOPSO algorithm and its application in multipurpose multireservoir operations. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 794-811, DOI: 10.2166/hydro.2010.105.
- Garcia, J. A., & Alamanos, A. (2023). A multi-objective optimization framework for water resources allocation considering stakeholder input. *Environmental Sciences Proceeding*, 25(1), 32, DOI: 10.3390/ECWS-7-14227.
- Han, Y., Dong, Z., Cui, C., Zhang, T., & Luo, Y. (2025). Multi-objective optimization scheduling for extensive plain lake water resources incorporating flood resource utilization. *Journal of Hydrology*, 651, 132584, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132584.
- Jia, D., Zhang, T., Wu, L., Su, X., Bai, T., & Huang, Q. (2024). Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model. *Journal of Hydrology*, 630, 130673, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130673.
- Kalhari, M., Ashofteh, P.-S., & Moghadam, S.-H. (2023). Development of the multi-objective invasive weed optimization algorithm in the integrated water resources allocation problem. *Water Resources Management*, 37, 4433-4458, DOI: 10.1007/s11269-023-03564-3.
- Khorsandi, M., Ashofteh, P.-S., Azadi, F., & Chu, X. (2022). Multi-objective firefly integration with the K-nearest neighbor to reduce simulation model calls to accelerate the optimal operation of multi-objective reservoirs. *Water Resources Management*, 36, 3283-3304, DOI: 10.1007/s11269-022-03201-5.
- Li, Y., Cui, Q., Li, Ch., Wang, X., Cai, Y., Cui, G., & Yang, Zh. (2017). An improved multi-objective optimization model for supporting reservoir operation of China's South-to-North Water Diversion Project. *Science of The Total Environment*, 575, 970-981, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.165.
- MiarNaeimi, F., Azizian, Gh., & Rashki, M. (2021). Horse herd optimization algorithm: A nature-inspired algorithm for high-dimensional optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 213, 106711.
- Naghdi, S., Bozorg-Haddad, O., Khorsandi, M., & Chu, X. (2021). Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. *Science of The Total Environment*, 776, 146026, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146026.
- Najafi, M., Najarchi, M., & Mirhosseini, S.-M. (2024). Multi-objective simulation-optimization for water resources management and uses in multi-dam systems in low-water regions. *Applied Water Science*, 14(238), DOI: 10.1007/s13201-024-02296-y.
- Pourali Dougaheh, M., & Ashofteh, P.-S. (2025). Development of multi-objective Harris hawks optimization (MOHHO) algorithm in low-impact development systems considering the effects of climate change. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 137, 103816, DOI: 10.1016/j.pce.2024.103816.
- Yu, X., Xu, Y.-P., Gu, H., & Guo, Y. (2023). Multi-objective robust optimization of reservoir operation for real-time flood control under forecasting uncertainty. *Journal of Hydrology*, 620, 129421, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129421.
- Zhang, F., & Zhang, Y. (2020). A multi-objective optimization prediction approach for water resources based on swarm intelligence. *Earth Science Informatics*, 14, 457-468, DOI: 10.1007/s12145-020-00521-1.