**نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران**
**سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲**

**Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant**
**10th Year/ No. 36/ March 2024**

# بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA)

اسماعیل مسیبی[۱]
سعید فرزین*[۲]

**چکیده**

بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه، از مسائل مهم در مدیریت منابع آب می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر، برای نخستین بار از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA) برای حل مسائل بهره‌برداری بهینه از دو سیستم چهارمخزنه و ده‌مخزنه به‌منظور حداکثرسازی رهاسازی و تولید انرژی برق‌آبی استفاده شده است. سپس عملکرد الگوریتم مذکور با سه الگوریتم بهینه‌سازی شاهین‌های هریس (HHO)، وال (WOA) و گرگ‌های خاکستری (GWO)، با استفاده از آزمون فریدمن برای ۱۰ بار اجرا، ۳۰۰ عامل جستجو و ۴۰۰۰ تکرار مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد در سیستم‌چهارمخزنه، AVOA و GWO با بهینه‌ی بدست آمده به‌ترتیب برابر ۲۹۶/۶۷ و ۲۸۳/۶۵ در رتبه‌های اول و دوم جای گرفتند. در رتبه بعدی، HHO و WOA با فریدمن رنک مساوی و برابر ۳/۳۳ و میانگین مقادیر تابع هدف به‌ترتیب برابر ۲۶۴/۹۲ و ۲۵۴/۳ قرار گرفتند. در سیستم ده‌مخزنه نیز، AVOA با میانگین مقادیر تابع هدف برابر ۱۰۵۹/۴۲ در رتبه‌ی اول و پس از آن GWO، WOA و HHO با بهینه به‌ترتیب ۱۰۵۱/۵۴، ۱۰۳۱/۸۹ و ۹۶۳/۶ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. لذا AVOA توانست ۹۶/۲۷٪ و ۸۸/۷٪ از بهینه مطلق توابع هدف سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه که به‌ترتیب برابر با ۳۰۸/۲۹۲ و ۱۱۹۲/۴۱۴ می‌باشند را برآورد نماید. همچنین الگوریتم مذکور پتانسیل خوبی در حل سایر مسائل بهینه‌سازی دارد.

**واژه‌های کلیدی**

بهره‌برداری بهینه از مخازن سد، بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی، سیستم‌های چندمخزنی

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
[۲*] دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.saeed.farzin@semnan.ac.ir

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

**مقدمه**

امروزه با توجه به اهمیت تولید انرژی برق‌آبی به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر، مدیریت منابع‌آب‌های سطحی و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها بخصوص در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، اهمیت روزافزونی دارد (غمبری[۱] و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های مختلفی برای حل مسائل بهینه‌سازی وجود دارند. یکی از این روش‌ها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است و یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشند (یانگ[۲] و همکاران، ۲۰۱۲).

از آنجاییکه بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های تک و چندمخزنی سدها، از مسائل مهم در مهندسی آب می‌باشند (احدیانفر[۳] و همکاران،۲۰۱۶)، در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری[۴] برای بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها رشد فراوانی داشته است. برخی از این تحقیقات به‌شرح زیر است:

حسینی موغاری[۵] و همکاران (۲۰۱۳)، از الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)[6] برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بازفت، برای یک بازه ۱۲۰ ماهه مربوط به سال‌های آبی ۶۶-۶۵ تا ۷۵-۷۴ استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد برتر FA در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)[7] و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[8] داشت. یاسین[۹] و همکاران (۲۰۱۷)، از ترکیب الگوریتم ازدحام ماهیان مصنوعی (AFS)[۱۰] و ازدحام ذرات (PSO) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن کارون ۴ برای افزایش تولید انرژی برق‌آبی و به حداقل رساندن کمبود آب در پایین دست استفاده کردند. نتایج حاکی از برتری عملکرد الگوریتم هیبریدی جدید (HA)[۱۱] نسبت به دو الگوریتم مذکور داشته است. قادری[۱۲] و همکاران (۱۳۹۳)، مدلی را بر مبنای الگوریتم تکامل رقابتی جوامع[13](SCE) برای بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنی واقع در حوضهٔ آبریز کرخه توسعه دادند. نتایج نشان داد عملکرد SCE نسبت به GA برتری داشته است. یاسار[۱۴] و همکاران (۲۰۱۶)، از الگوریتم جستجوی فاخته[15] (CS) برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخزن سد آدیگوزل[۱۶] در دنیزلی در غرب ترکیه که برای اهداف آبیاری ساخته شده بود، استفاده کردند. نتایج نشان داد که CS عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد و تولید انرژی را حدود ۱۰ درصد به مقدار ۱۶۰۰۰۰ مگاوات ساعت افزایش می‌دهد. محمدی[۱۷] و همکاران، ۲۰۱۹، الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک (HWGA)[۱۸] را برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه معرفی کردند و از روش TOPSIS[۱۹] برای مقایسه عملکرد الگوریتم ترکیبی با الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک بهتر از GA و الگوریتم وال (WOA)[۲۰] عمل می‌کند. احترام و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از الگوریتم کلیه (KA)[۲۱] به بهره برداری بهینه از سد آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی ایران که هدف آن کاهش کسری آبیاری در پایین دست سد بوده است، پرداختند. نتایج حاکی از عملکرد خوب این الگوریتم بوده است. بزرگ حداد[۲۲] و همکاران (۲۰۲۱)، از الگوریتم گرده افشانی گل (FPA)[۲۳] برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم‌های تک و چندمخزنی استفاده کردند. نتایج بدست آمده، حاکی از برتری FPA بر PSO و روش برنامه‌ریزی

[1] Ghambari
[2] Yang
[3] Ahmadianfar
[4] Metaheuristic
[5] Hosseini-Moghari
[6] Firefly Algorithm
[7] Genetic Algorithm
[8] Paricle Swarm Optimization Algorithm
[9] Yaseen
[10] Artificial Fish Swarm Algorithm
[11] Hybrid Algrithm
[12] Ghaderi
[13] Shuffled Complex Evolution
[14] Yasar
[15] Cuckoo Search
[16] Adiguzel
[17] Mohammadi
[18] Hybrid Whale_Genetic Algorithm
[19] echnique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
[20] Whale Optimization Algorithm
[21] Kidney Algorithm
[22] Bozorg-Haddad
[23] Flower Pollination Algorithm

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

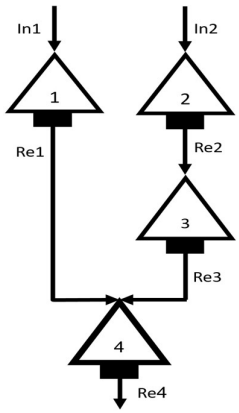
غیرخطی (NLP)[1] داشته است [10]. محمدی و همکاران (۱۳۹۸) به بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی با استفاده از الگوریتم وال (WOA) و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک (GA) بر اساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از این روش، نشان داد عملکرد الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک برتر از NLP ، GA و WOA بوده است. دوانی مطلق[3] و همکاران (۱۴۰۰) به بهره‌برداری از مخزن سد طالقان با استفاده از الگوریتم گرگ‌خاکستری (GWO)[4] و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک (GA) پرداختند. نتایج حاکی از عملکرد برتر الگوریتم هیبریدی گرگ‌خاکستری_ژنتیک (GWOGA) نسبت به دو الگوریتم مذکور بوده است. پرهیزکاری[5] و همکاران (۱۴۰۰)، عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)[6] و NSGA_II[7] را برای بهره‌برداری برداری بهینه چندهدفه از مخزن سد کارون ۵ شامل بیشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی تولید انرژی برق‌آبی روزانه مقایسه کردند. نتایج نشان داد الگوریتم NSGA_II به ترتیب ۱۸ و ۲۰ درصد از MOPSO در دو تابع هدف مذکور، عملکرد بهتری داشته است.

با بررسی مطالعات گذشته می‌توان دریافت که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید در حل مسائل مهندسی از جمله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، با توجه به دقت بالاتر و کاربرپسند بودن به‌عنوان یک چالش مطرح است و بایستی موردتوجه بیشتری قرار گیرد. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA)[8] که یک الگوریتم جدید بوده و سابقه استفاده از آن در حل مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها وجود ندارد، استفاده شد و عملکرد آن با الگوریتم‌های شاهین‌های هریس (HHO)[9]، وال (WOA) و گرگ‌های خاکستری (GWO) با استفاده از آزمون فریدمن[10] مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور از دو سیستم چهارمخزنه[11] و ده‌مخزنه[12] برای ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد الگوریتم‌های مذکور استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### سیستم چهارمخزنه:

سیستم مورد نظر توسط چاو[13] و همکاران در سال ۱۹۷۴ معرفی شد. در این سیستم، چهار مخزن سری و موازی وجود دارد که سه مخزن اول برای تولید انرژی برق‌آبی و مخزن چهارم برای اهداف آبیاری استفاده می‌شود (شکل ۱).



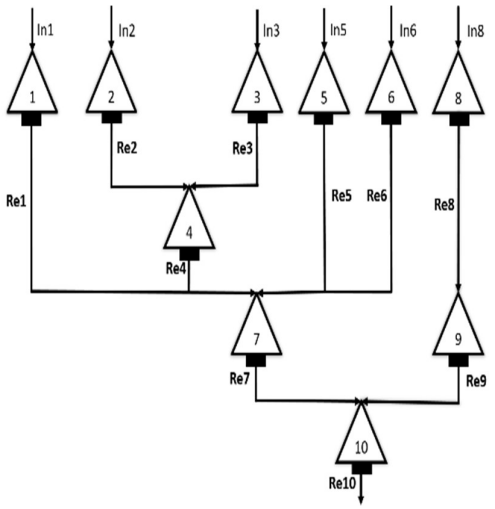

**شکل (۱): طرح شماتیک سیستم چهارمخزنه**

### سیستم ده‌مخزنه:

این سیستم، اولین بار توسط موری[14] و همکاران تعریف شد. شمای کلی این سیستم در شکل ۲ ترسیم شده است. در این سیستم، به مخازن ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۸ جریان وارد می‌شود و از همه ۱۰ مخزن برای تولید انرژی برق‌آبی استفاده می‌شود.

[1] Non linear programming
[2] Multiple-Criteria Decision Analysis
[3] Davani motlagh
[4] Grey Wolf Optimization Algorithm
[5] Parhizkari
[6] Multi-Objective Particle Swarm Optimization
[7] Non-Domitated Sorting Genetic Algorithm
[8] African Vulture Optimization Algorithm
[9] Harris Hawks Optimization
[10] Friedman test
[11] Four_Reservoir_system
[12] Ten_Reservoir_system
[13] Chow
[14] Murray

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]




**شکل (۲): طرح شماتیک سیستم ده‌مخزنه**

تابع هدف دو سیستم فوق به صورت بیشینه‌سازی رهاسازی آب با رعایت محدودیت‌های مربوطه، برای حداکثرسازی سود تولید انرژی برق‌آبی در ۱۲ دوره دوساعته تعریف می‌شود. رابطه‌ی ۱، نمایانگر تابع هدف مذکور است (محمدی و همکاران،۲۰۱۹):

$$F = maximize \sum_{n=1}^{NR} \sum_{t=1}^{NT} benf_{(n)}(t) \times \mathrm{Re}_{(n)}(t) \qquad (۱)$$

در این فرمول، $benf_{(n)}(t)$، معرف ضرایب سود در هر دوره‌ی زمانی برای هر مخزن (چاو و همکاران،۱۹۷۴)، $\mathrm{Re}_{(n)}(t)$ نیز میزان رهاسازی و $NT$ و $NR$ به ترتیب تعداد دوره‌های زمانی و تعداد مخازن می‌باشد.

محدودیت‌ها به شرح زیر می‌باشند:

۱- محدودیت‌های مربوط به رهاسازی : فرمول‌بندی ریاضی تعریف شده برای رهاسازی آب هر یک از مخازن در سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه به‌ترتیب در بازه‌های ذکرشده در روابط ۲ و ۳ تعریف شده است (چاو و همکاران، ۱۹۷۴).

$$\begin{aligned}
&0.005 \le \mathrm{Re}_{(1)}(t) \le 4 && t = 1, \ldots, NT \\
&0.005 \le \mathrm{Re}_{(2)}(t) \le 4.5 && t = 1, \ldots, NT \\
&0.005 \le \mathrm{Re}_{(3)}(t) \le 4.5 && t = 1, \ldots, NT \\
&0.005 \le \mathrm{Re}_{(4)}(t) \le 8 && t = 1, \ldots, NT
\end{aligned} \qquad (۲)$$

$$\begin{aligned}
&1 \le \mathrm{Re}_{(1)}(t) \le 4 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(2)}(t) \le 4.5 && t = 1, \ldots, NT \\
&0.3 \le \mathrm{Re}_{(3)}(t) \le 2.12 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(4)}(t) \le 7 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(5)}(t) \le 6.43 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(6)}(t) \le 4.21 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(7)}(t) \le 17 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(8)}(t) \le 3.1 && t = 1, \ldots, NT \\
&0.5 \le \mathrm{Re}_{(9)}(t) \le 4.2 && t = 1, \ldots, NT \\
&1 \le \mathrm{Re}_{(10)}(t) \le 18.9 && t = 1, \ldots, NT
\end{aligned} \qquad (۳)$$

۲- محدودیت معادله پیوستگی[1]: این محدودیت به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (محمدی و همکاران،۲۰۱۹):

$$s_n(t+1) = s_n(t) + I_n(t) + M_n \times R_n(t) \qquad (۴)$$

معادله‌ی پیوستگی یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌باشد. در این معادله، $s_n(t+1)$ حجم ذخیره مخزن n ام در دوره زمانی (t+1)، $I_n(t)$ جریان ورودی به مخزن n ام، $s_n(t)$ حجم ذخیره‌ی مخزن n ام در دوره زمانی (t)، $R_n(t)$ مجموع خروجی‌های مخزن n و مخازن بالادست آن در دوره‌ی زمانی t ام و $M_{n,n}$ ماتریس پیوستگی $NR*NR$ است که نشان دهنده‌ی نحوه‌ی ارتباط مخازن می‌باشد که مخازن مقصد در سطرها و مخازن مبدأ در ستون‌های این ماتریس قرار گرفته‌اند. این ماتریس‌ها برای سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه به‌ترتیب در روابط ۵ و ۶ نشان داده شده است.

$$M_{n,n} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

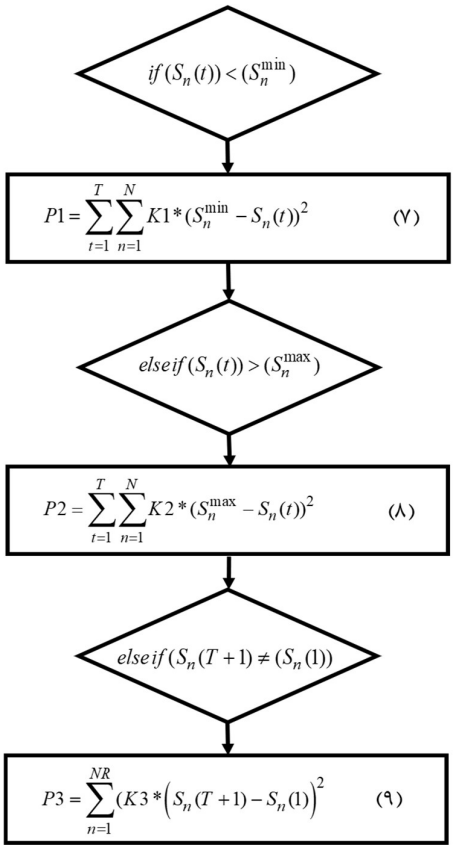
[1] continuity equation

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

$$M_{n,n}=\begin{bmatrix}-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&-1&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&-1&0&0&0&0&0&0&0\\0&1&1&-1&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0\\1&0&0&1&1&1&-1&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0\\0&0&0&0&0&0&0&1&-1&0\\0&0&0&0&0&0&1&0&1&-1\end{bmatrix} \quad (۶)$$

۳- شروط احجام ذخیره: ذخیره‌ی مخازن بایستی در بازه‌های مربوط برای هریک از مخازن قرار گیرند (چاو و همکاران،۱۹۷۴).

در صورتی که شروط احجام ذخیره ارضا نشود، تابع جریمه به صورت روابط ۷ تا ۹ که در شکل ۳ نشان داده شده است، اعمال می‌شود (ربیعی[1] و همکاران،۲۰۱۸):




**شکل (۳): سناریوهای اعمال شده برای تابع جریمه**

بنابراین تابع هدف نهایی عبارت است از:

$$F = maximize\sum_{n=1}^{NR}\sum_{t=1}^{NT} benf_{(n)}(t)\times \mathrm{Re}_{(n)}(t) - penalty \quad (۱۰)$$

(محمدی و همکاران،۲۰۱۹)

**الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA):**

الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA)، یک فراابتکاری جدید با الهام از طبیعت است که در سال ۲۰۲۱ توسط عبدالله زاده[2] و همکاران معرفی شد. این الگوریتم رفتارهای تغذیه و شکار کرکس‌های آفریقایی را شبیه‌سازی می‌کند. در این الگوریتم، کرکس‌های ضعیف اطراف کرکس‌های قوی را احاطه کرده و با خسته کردن آنها غذا دریافت می‌کنند. AVOA از این رفتارهای کرکس‌های آفریقایی الهام گرفته شده است.

در گام اول، مقداردهی اولیه صورت می‌گیرد و در مرحله دوم، بر اساس ارزش تناسب، کرکس‌ها به سه گروه تقسیم می‌شوند. بهترین کرکس به عنوان گروه اول و کرکس دوم به عنوان گروه دوم تقسیم می شوند. گروه سوم شامل بقیه کرکس‌ها می شود.

کرکس‌ها وقتی سیر هستند انرژی بالایی دارند و وقتی گرسنه هستند تهاجمی می‌شوند و نمی‌توانند در کنار کرکس‌های قوی‌تر حرکت کنند. مدل‌سازی این رفتارها با روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه می‌شوند (عبدالله زاده و همکاران،۲۰۲۱):

$$t = h\times(\sin^{\omega}(\frac{\pi}{2}\times\frac{iter_i}{\max_{iter}}) + \cos(\frac{\pi}{2}\times\frac{iter_i}{\max_{iter}}) - 1) \quad (۱۱)$$

$$F = (2\times\mu + p1)\times z\times(1-\frac{iter_i}{\max_{iter}}) + t \quad (۱۲)$$

$\omega$ نشان دهنده‌ی یک ثابت برای تعیین عملیات بهینه‌سازی و $iter_i$ معرف تکرار جاری می‌باشد. $\mu$ یک عدد بین [0,1]، $z$ نیز یک عدد در بازه [-1,1] و $k$ یک عدد بین [-2,2] می‌باشد. همچنین $\max_{iter}$ تعداد کل تکرارها را مشخص می‌کند.

**فاز اکتشاف[3]:**

[1] Rabiei
[2] Abdollahzadeh
[3] Exploration

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

اگر $If\ \mathrm{F} \geq 1$ باشد، این فاز انجام می‌شود و بر اساس پارامتر $p_1$، دو استراتژی انتخاب می‌شود. این پارامتر، مقداری بین صفر و یک دارد. پارامتر تصادفی دیگری به نام $rand_{p_1}$ نیز تعریف می‌شود. جستجوی غذا در کرکس‌ها بر اساس مقایسه‌ی این پارامترها، بر اساس روابط ۱۳ و ۱۴ به صورت زیر انجام می‌شود (عبدالله زاده و همکاران،۲۰۲۱).

$If\ \mathrm{p}_1 \geq rand_{p_1}$ :

$$P(i+1) = BV(i) - \left|2 \times rand \times BV(i) - P(i)\right| \times F \qquad (۱۳)$$

$If\ \mathrm{p}_1 < rand_{p_1}$ :

$$P(i+1) = BV(i) - F + rand_2 \times ((ub - lb) \times rand_3 + lb) \qquad (۱۴)$$

در روابط فوق $lb$، $u\,b$، BV، به‌ترتیب بیانگر کران پایین، کران بالا و بهترین کرکس بوده و $rand_2$ و $rand_{P3}$ دو عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ می‌باشند.

**فاز بهره‌برداری[1]:**

اگر $|F| < 1$ باشد، مرحله بهره‌برداری آغاز می‌شود. این مرحله، دو بخش را با دو استراتژی که از دو پارامتر $p_2$ و $p_3$ تشکیل شده است که مقادیری در بازه $[0,1]$ را در بر می‌گیرد، شامل می‌شود.

ابتدا فرض می‌کنیم $|F|$ در بازه $[0.5,1]$ باشد که دو استراتژی پرواز و جنگ محاصره انجام می‌شود. وقتی که $|F| \geq 0.5$ کرکس‌های سیر انرژی کافی داشته و کرکس‌های گرسنه، پس از خسته شدن این کرکس‌ها غذا دریافت می‌کنند. مدل‌سازی این رفتارها توسط روابط ۱۵ تا ۱۸ با مقایسه‌ی پارامترهای انجام می‌شود (عبدالله زاده و همکاران،۲۰۲۱):

$if\ P_2 \geq rand_{P_2}$

$$P(i+1) = D(i) \times (F + rand_4) - BV(i) + P(i) \qquad (۱۵)$$

$if\ P_2 < rand_{P_2}$

$$S_1 = BV(i) \times (\frac{rand_5 \times P(i)}{2\pi}) \times \cos(P(i)) \qquad (۱۶)$$

$$S_2 = BV(i) \times (\frac{rand_6 \times P(i)}{2\pi}) \times \sin(P(i)) \qquad (۱۷)$$

$$P(i+1) = BV(i) - (S_1 + S_2) \qquad (۱۸)$$

هنگام یافتن غذا، کرکس‌ها به سمت منبع غذایی جذب می‌شوند، که باعث می شود برای یافتن غذا دچار مشکل شوند. اگر $|F| < 1$ باشد. ابتدا بر اساس پارامتر $rand_{P3}$ که یک پارامتر در بازه $[0,1]$ می‌باشد، اگر این پارامتر بزرگتر از پارامتر $P_3$ باشد استراتژی این است که انواع مختلف کرکس‌ها روی منبع غذایی انباشته شوند و استراتژی محاصره و مبارزه خشونت آمیز ساخته شود. این رفتارها با روابط ۱۹ تا ۲۱ فرموله می‌شوند.

$if\ P_3 < rand_{P_3}$

$$A_1 = BestVilture_1(i) - \frac{BestVilture_1(i) \times P(i)}{BestVilture_1(i) - P(i)^2} \times F \qquad (۱۹)$$

$$A_2 = BestVilture_2(i) - \frac{BestVilture_2(i) \times P(i)}{BestVilture_2(i) - P(i)^2} \times F \qquad (۲۰)$$

$$P(i+1) = \frac{1}{2} \times (A_1 + A_2) \qquad (۲۱)$$

اگر $|F| < 0.5$ باشد، کرکس‌های سالم قبلی انرژی خود را از دست می‌دهند و گرسنگی می‌کشند به طوری که نمی‌توانند با کرکس‌های دیگر مبارزه کنند. مدل‌سازی این رفتار با استفاده از رابطه (۲۲) بیان شده است:

$if\ P_3 \geq rand_{P_3}$

$$P(i+1) = BV(i) - \left|d(t)\right| \times F \times Levy(d) \qquad (۲۲)$$

**الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO):**

این الگوریتم، در سال ۲۰۱۹ توسط حیدری[2] و همکاران معرفی شد. مبنای کار این الگوریتم، از طریقه شکاریابی شاهین‌های هریس در طبیعت الهام گرفته شده است. استراتژی اصلی شکار شاهین‌های هریس حمله (پرش) غافلگیرانه می‌باشد، به این صورت که چندین شاهین سعی می کنند به طور مشترک از جهات مختلف به طعمه که معمولا یک خرگوش در نظرگرفته می‌شود، حمله کنند و روی طعمه همگرا شوند.

**فاز اکتشاف:**

انرژی طعمه نیز به صورت رابطه ۲۳ بدست می‌آید:

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \qquad (۲۳)$$

[1] Exploitation

[2] Heidari

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

در این رابطه، T حداکثر تعداد تکرارها و E0 انرژی اولیه طعمه است. هنگامیکه ۱ =< |E| الگوریتم وارد فاز اکتشاف می‌شود.

شاهین‌های هریس دارای قدرت بینایی خارق العاده‌ای هستند و می‌توانند طعمه را با بینایی خود شناسایی کنند. برخی مواقع نیز شاهین‌ها مجبور هستند تا مدت‌ها بنشینند و منتظر طعمه بمانند. بر این اساس مطابق با احتمال p دو استراتژی مطابق با روابط ۲۴و ۲۵ وجود دارد:

if p < 0.5

$$(X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) \quad (۲۴)$$

if p >= 0.5

$$X(t+1) = X_{rand}(t) - r_1 \left| X_{rand}(t) - 2r_2 X(t) \right| \quad (۲۵)$$

در روابط فوق، X(t+1) بردار مکان شاهین‌ها در تکرار t+1 ، $X_{rabbit}(t)$ مکان طعمه، X(t) بردار مکان فعلی شاهین‌ها، $r_1$ تا $r_4$ و p اعداد تصادفی در بازه [۰و۱] هستند ، $X_{rand}(t)$ موقعیت یک شاهین تصادفی از جمعیت فعلی و $X_m$ میانگین موقعیت از جمعیت فعلی شاهین‌ها می‌باشد.

**مرحله‌ی بهره‌برداری:**

در این مرحله، شاهین‌های هریس، پرش غافلگیرکننده را انجام می‌دهند با توجه به رفتارهای فرار طعمه و استراتژی های تعقیب و گریز شاهین‌های هریس، چهار استراتژی در الگوریتم HHO برای مدل سازی مرحله حمله وجود خواهد داشت. اگر s شانس فرار موفقیت آمیز یک طعمه فرض شود:

**۱) محاصره نرم[1]:** زمانی که s>=0.5 و |E|>=0.5، از رابطه (۲۶) استفاده می‌شود:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E \left| 2(1 - r_5) X_{rabbit} - X(t) \right| \quad (۲۶)$$

**۲) محاصره سخت[2] :** وقتی s>=0.5 و |E|<0.5 باشد، موقعیت های فعلی با استفاده از رابطه (۲۷) بروز می شوند:

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E \left| \Delta X(t) \right| \quad (۲۷)$$

**۳) محاصره نرم با شیرجه های سریع پیشرونده[3]:** هنگامی که |E|>=0.5 اما s<0.5 است بروزرسانی با رابطه‌ی ۲۸ انجام می‌شود که در روابط ۲۹ و ۳۰، روابط تابعه آورده شده است.

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & if\ F(Y) < F(X(t)) \\ Z & if\ F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (۲۸)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E \left| 2(1 - r_5) X_{rabbit} - X(t) \right| \quad (۲۹)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (۳۰)$$

**۴) محاصره‌ی سخت با شیرجه های سریع پیشرونده[4]:** وقتی |E|<0.5 و r<0.5 باشد، قانون زیر در رابطه‌ی ۳۱ به‌کارگرفته می‌شود:

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & if\ F(Y) < F(X(t)) \\ Z & if\ F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (۳۱)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E \left| JX_{rabbit}(t) - X_m(t) \right| \quad (۳۲)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (۳۳)$$

**الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA):**

الگوریتم بهینه‌سازی وال که با الهام از سلسله مراتب اجتماعی وال‌های گوژپشت توسعه و فرموله شده است، در سال ۲۰۱۶ توسط میرجلیلی[5] و همکاران معرفی شد (میرجلیلی و همکاران،۲۰۱۶). در این الگوریتم پس از تولید مجموعه‌ای از راه‌حل های تصادفی، موقعیت عوامل جستجو بوسیله سه عملگر محاصره طعمه، روش حمله حباب-شبکه و جستجو برای طعمه بروز می‌گردد. در این الگوریتم، موقعیت طعمه به عنوان بهترین راه‌حل حاضر در نظر گرفته می‌شود. سایر عوامل جستجو نیز با استفاده از روابط ۳۴ و (۳۵) نسبت به بهترین عامل جستجو، به‌روز می‌شوند.

$$\vec{D} = \left| \vec{C} . \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (۳۴)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} . \vec{D} \quad (۳۵)$$

در معادلات فوق، $t$ بیانگر تکرار جاری، $\vec{X}^*(t)$ نمایانگر بردار مکان بهترین راه‌حل بدست آمده تاکنون و $\vec{X}(t)$ معرف بردار مکان طعمه می‌باشد. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ نیز توسط روابط (۳۶) و (۳۷) محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} . \vec{r} - \vec{a} \quad (۳۶)$$

[1] Soft Besiege
[2] Hard Besiege
[3] Soft Besiege With Progressive Rapid Dives
[4] Hard besiege with progressive rapid dives
[5] Mirjalili

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

$$\vec{C} = 2.\vec{r} \quad (۳۷)$$

در روابط فوق، $\vec{a}$ به صورت خطی از ۲ به ۰ در طول تکرارها کاهش می یابد (در هر دو مرحله اکتشاف و بهره برداری) و $\vec{r}$ یک بردار تصادفی بین [0,1] می‌باشد.

**فاز اکتشاف:**

اگر A>1 باشد، الگوریتم وارد فاز اکتشاف شده و از رابطه ۳۵ برای بروزرسانی موقعیت عوامل جستجو استفاده می‌شود.

**فاز بهره‌برداری: (روش حمله حباب شبکه)**

نهنگ‌ها به طور همزمان در یک دایره کوچک و در امتداد یک مسیر مارپیچی شکل در اطراف طعمه شنا می کنند. در روابط ۳۸ و ۳۹ مدل ریاضی این رفتارها فرموله شده است.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^{*} - \vec{A}.\vec{D} \qquad if\ p < 0.5 \quad (۳۸)$$

$$\vec{X}(t+1) = D'.e^{bl}.\cos(2\pi l) + \vec{X}^{*}(t) \qquad if\ p \geq 0.5 \quad (۳۹)$$

در معادلات فوق بر اساس پارامتر $p$ که یک عدد تصادفی بین [0,1] می‌باشد از یکی از دو فرمول فوق استفاده می‌گردد. $D'$ معرف فاصله میان وال و طعمه و $b$ ثابتی است که معرف شکل مارپیچ لگاریتمی می‌باشد. $l$ نیز یک عدد تصادفی در بازه [1,1-] می‌باشد.

**الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری (GWO):**

این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی[1] و همکاران ارائه شد که از نحوه شکار و محاصره شکار توسط گرگ‌های خاکستری الهام گرفته شده است. در این الگوریتم، گرگ‌های خاکستری دارای یک سلسله اجتماعی بسیار قوی می‌باشند. در سلسله مراتب اجتماعی این الگوریتم:

- بهترین راه حل(موقعیت) را آلفا (α)
- بهترین راه حل دوم را بتا (β)
- بهترین راه حل سوم را دلتا (δ)
- سایر راه حل ها را (ω)

می‌نامند.

محاصره‌ی شکار توسط گرگ‌های خاکستری توسط روابط ۴۰ و ۴۱ مدل می‌شود (میرجلیلی و همکاران،۲۰۱۴):

$$X(t+1) = X_p(t) - a(2r_1 - 1) * D(t) \quad (۴۰)$$

$$D(t) = \left|2r_2 * X_p(t) - X(t)\right| \quad (۴۱)$$

در این معادلات:

$X(t)$ موقعیت گرگ خاکستری در تکرار t ام و $X_p(t)$ موقعیت شکار در تکرار tام بوده و مولفه‌ی $a$ به طورخطی از صفر تا ۲ کاهش می‌یابد.

در فضای جستجو، اطلاعاتی درباره موقعیت شکار وجود ندارد، بنابراین موقعیت شکار برابر موقعیت آلفا در نظر گرفته می‌شود (بهترین راه حل بدست آمده). لذا روابط شکار به صورت معادلات ۴۲ تا ۴۵ بازنویسی می‌شوند (میرجلیلی و همکاران،۲۰۱۴):

$$X_1(t) = X_\alpha(t) - A_1 * D_\alpha(t) \quad (۴۲)$$

$$X_2(t) = X_\beta(t) - A_2 * D_\beta(t) \quad (۴۳)$$

$$X_3(t) = X_\delta(t) - A_2 * D_\delta(t) \quad (۴۴)$$

$$X(t+1) = \left(\frac{X1(t) + X2(t) + X3(t)}{3}\right) \quad (۴۵)$$

اگر $A > 1, A < -1$ باشد، الگوریتم در فاز اکتشاف و اگر $-1 < A < 1$ باشد، الگوریتم در فاز بهره‌برداری می‌باشد.

**آزمون فریدمن[2]:**

آزمون فریدمن یک آزمون ناپارامتریک آماری[3] می‌باشد که برای مقایسه شاخص‌های مرکزی چندین جامعه به کار می‌رود. ناپارامتریک بودن بدین معناست که این آزمون برای اجرا، نیاز به تعیین پارامتر خاصی ندارد. از آنجایی که میلتون فریدمن[4] اقتصاددان آمریکایی، در سال ۱۹۳۷ برای اولین بار چنین روشی را مورد بررسی قرار داد، این آزمون را به نام او می‌شناسند. مقادیر فریدمن رنک بدست آمده برای یک الگوریتم، هرچه قدر کمتر باشد به‌معنای عملکرد برتر آن الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشد.

**نتایج و بحث:**

**تنظیم پارامترها برای الگوریتم‌های مورد استفاده:**

[1] Mirjalili
[2] Friedman test
[3] Non-Parametric Statistical Test
[4] Milton Friedman

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

کلیه پارامترهای مورد استفاده برای الگوریتم‌های مختلف موجود در تحقیق مطابق با بهینه‌ی در نظرگرفته شده در مقالات اصلی این الگوریتم‌ها برای حل توابع بنچمارک و مسائل مهندسی می‌باشد و در جدول (۱) نشان داده شده است (عبدالله زاده و همکاران،۲۰۲۱)، (میرجلیلی و همکاران،۲۰۱۴)، (میرجلیلی و همکاران،۲۰۱۶)، (حیدری و همکاران،۲۰۱۹).

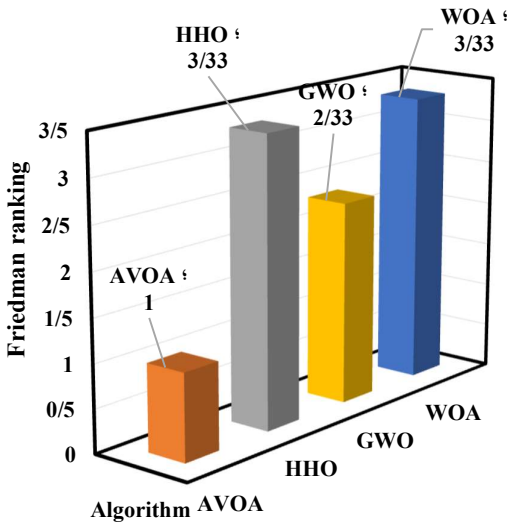
**جدول (۱) : تنظیم پارامترها برای الگوریتم‌های مورد استفاده**

| الگوریتم‌ها | پارامترها |
|---|---|
| **AVOA** | تعداد عوامل جستجو=۳۰۰<br>حداکثر تعداد تکرارها=۴۰۰۰<br>f=[۲,۰]<br>w1=۰/۸<br>w2=۰/۲<br>λ=۲/۵ |
| **HHO** | تعداد عوامل جستجو=۳۰۰<br>حداکثر تعداد تکرارها=۴۰۰۰ |
| **GWO** | a = [۲,۰]<br>تعداد عوامل جستجو=۳۰۰<br>حداکثر تعداد تکرارها=۴۰۰۰ |
| **WOA** | b=۱<br>a1= [۲,۰]<br>a2=[-۲,-۱]<br>تعداد عوامل جستجو=۳۰۰<br>حداکثر تعداد تکرارها=۴۰۰۰ |

## نتایج حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چهارمخزنه:

در این بخش از الگوریتم AVOA برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چهارمخزنه استفاده شده است. سپس عملکرد الگوریتم مذکور با سه الگوریتم بهینه‌سازی HHO، GWO و WOA مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همه الگوریتم‌ها برای ۳۰۰ عامل جستجو ۴۰۰۰ تکرار در نظرگرفته شده‌اند. مقادیر میانگین و مینیمم و ماکزیمم جواب‌ها نیز برای الگوریتم‌های مختلف در جدول (۲) همراه با مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات ارائه شده است. مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات هرچقدر کمتر باشند، به معنای قابل اطمینان‌تر بودن جواب‌های بهینه بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف و در بازه‌های کمتر در اجراهای مختلف می‌باشد. آزمون فریدمن نیز برای تعیین بهترین الگوریتم بر روی داده‌ها اعمال شد و مقادیر بدست آمده از این آزمون برای الگوریتم‌های مختلف در شکل (۵) نمایش داده شده است. نتایج حاکی از عملکرد برتر AVOA با میانگین مقدار تابع هدف برابر ۲۹۶/۶۷، انحراف معیار و ضریب تغییرات به‌ترتیب مساوی با ۲/۷۱ و ۰/۰۰۹۱ بوده است. مقدار فریدمن رنک نیز برای این الگوریتم ۱ بدست آمد. همچنین بعد از AVOA، در رتبه دوم، GWO با مقدار فریدمن رنک ۲/۳۳ جای گرفت که مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این الگوریتم به ترتیب ۲۸۳/۶۵، ۷/۳۲ و ۰/۰۲۶ بدست آمد. در رتبه سوم HHO و WOA با عملکرد یکسان قرار گرفتند. علی‌رقم برتری میانگین مقدار تابع هدف برای WOA، به‌دلیل کمتر بودن انحراف معیار و ضریب تغییرات HHO، مقادیر فریدمن رنک برای هر دو الگوریتم ۳/۳۳ بدست آمد. مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز برای WOA به ترتیب برابر ۲۶۴/۹۲، ۵/۶۳ و ۰/۰۲۱ و برای HHO به ترتیب ۲۵۴/۳، ۴/۲۹ و ۰/۰۱۶ بدست آمد. نمودار همگرایی الگوریتم‌های مذکور در شکل (۶) نشان داده شده است.

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

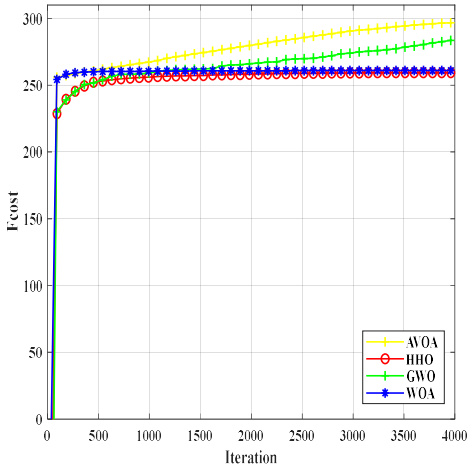



**شکل (۵) : مقادیر فریدمن رنک بدست آمده برای سیستم چهارمخزنه**

**جدول (۲) : جواب‌های بدست آمده برای الگوریتم‌ها برای ۱۰ بار اجرا**

| شماره اجرا | AVOA | HHO | GWO | WOA |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۹۹/۴۷ | ۲۵۵/۹۸ | ۲۷۵/۳۲ | ۲۶۲/۱۵ |
| ۲ | ۲۹۲/۶۹ | ۲۵۴/۹۵ | ۲۷۷/۱۳ | ۲۶۶/۸۶ |
| ۳ | ۲۹۸/۰۳ | ۲۵۸/۸۷ | ۲۷۸/۲۹ | ۲۵۵/۶۳ |
| ۴ | ۲۹۷/۴۸ | ۲۵۴/۴۳ | ۲۶۶/۵۰ | ۲۵۰/۸۹ |
| ۵ | ۳۰۱/۱۳ | ۲۵۸/۱۳ | ۲۹۲/۷۶ | ۲۵۴/۹۱ |
| ۶ | ۲۹۸/۶۹ | ۲۶۲/۲۰ | ۲۹۶/۲۵ | ۲۶۴/۷۶ |
| ۷ | ۲۹۴/۸۱ | ۲۵۶/۲۷ | ۲۷۸/۶۸ | ۲۵۷/۷۶ |
| ۸ | ۲۹۴/۵۷ | ۲۵۸/۸۲ | ۲۸۴/۴۱ | ۲۶۶/۶۸ |
| ۹ | ۲۹۲/۷۴ | ۲۶۷/۸۴ | ۲۹۰/۶۷ | ۲۶۸/۵۲ |
| ۱۰ | ۲۹۷/۱۳ | ۲۶۵/۴۹ | ۲۹۱/۵۵ | ۲۶۱/۰۱ |
| میانگین مقادیر تابع هدف | ۲۹۶/۶۸ | ۲۵۴/۳ | ۲۸۳/۶۵ | ۲۶۴/۹۲ |
| کمترین مقادیر تابع هدف | ۲۹۲/۶۹ | ۲۵۴/۴۳ | ۲۷۴/۵۰ | ۲۵۰/۹۰ |
| بیشترین مقادیر تابع هدف | ۳۰۱/۱۳ | ۲۶۷/۸۴ | ۲۹۳/۲۵ | ۲۶۸/۵۲ |
| انحراف معیار | ۲/۷۱ | ۴/۲۹ | ۷/۳۳ | ۵/۶۳ |
| ضریب تغییرات | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۰۱۶ | /۰۲۶ | ۰/۰۲۱ |

مقدار بهینه مطلق بدست آمده برای تابع هدف با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم افزار لینگو برای سیستم چهارمخزنه ۳۰۸/۲۹۲ بدست آمد (ربیعی و همکاران،۲۰۱۸) بنابراین AVOA با میانگین مقدار تابع هدف ۲۹۶/۶۸ قادر خواهد بود به ۹۶/۲۷٪ از جواب بهینه مطلق [1] برای تابع هدف سیستم چهارمخزنه پس از حداکثر ۴۰۰۰ تکرار و ۳۰۰ عامل جستجو برسد. الگوریتم‌های GWO، WOA و HHO نیز پتانسیل رسیدن به ۹۲٪، ۸۵/۹٪ و ۸۲/۵٪ بهینه مطلق تابع هدف سیستم چهارمخزنه را پس از حداکثر تعداد تکرار و عوامل جستجوی ذکر شده دارایند.




**شکل (۶) : نمودار همگرایی الگوریتم‌های مختلف**

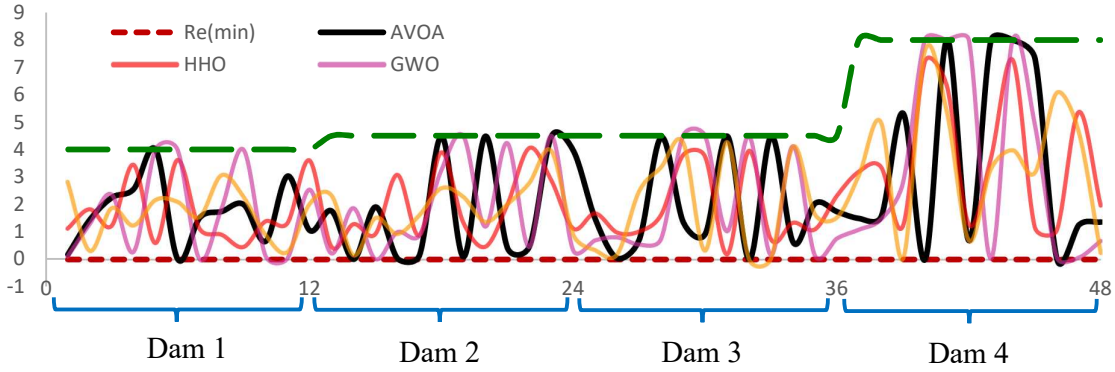
از شکل (۶) نتیجه می‌شود که سرعت همگرایی در تکرارهای اولیه، در تمام الگوریتم‌ها تقریبا یکسان است که بیانگر عملکرد تقریباً یکسان فاز اکتشاف یا جستجوی جواب‌ها در همه الگوریتم‌ها مذکور می‌باشند. سپس به‌تدریج در تکرارهای بعدی، AVOA به سمت بهینه مطلق نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین فاز بهره‌برداری یا قابلیت همگرا شدن به جواب بهینه مطلق به وضوح در AVOA دارای عملکرد برتری بوده و در کل سرعت همگرایی برتری نسبت به سه الگوریتم دیگر دارد.

مقادیر احجام رهاسازی مطابق با الگوریتم‌های AVOA، HHO، GWO و WOA در شکل (۷) به صورت شماتیک

[1] Global optimum

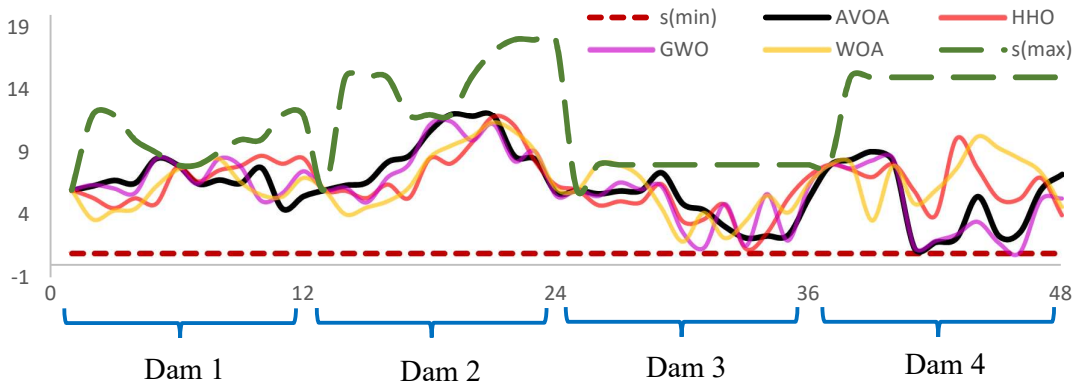
[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

نشان داده شده است. در این نمودارها Re[1](min) و Re(max) به‌ترتیب حداقل و حداکثر احجام رهاسازی مجاز می‌باشند. در محور افقی نیز بازه‌های زمانی نشان داده شده است که هر چهار بازه متعلق به یک مخزن به‌ترتیب از مخزن اول تا چهارم دارد. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود، در همه الگوریتم‌ها محدودیت‌های مربوط به احجام رهاسازی رعایت شده است و احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف بین یا مساوی Re(min) و Re(max) قرار گرفتند.




**شکل (۷): احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف برای سیستم چهارمخزنه**

همچنین مقادیر احجام ذخیره مطابق با الگوریتم‌های مذکور در شکل (۸) به صورت شماتیک نشان داده شده است. در نمودارهای شکل مذکور s[2](min) و s(max)، به‌ترتیب نمایانگر حداقل و حداکثر احجام مجاز ذخیره مخازن می‌باشند. در نمودارهای مذکور نیز تمامی محدودیت‌های احجام ذخیره مخازن ارضاء شده است و احجام ذخیره بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف بین یا مساوی احجام مجاز قرار گرفتند.




**شکل (۸): احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف**

**سیستم ده‌مخزنه:**

دراین بخش، نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های AVOA، HHO، GWO و WOA برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم ده‌مخزنه گزارش شده است (جدول ۳). مقادیر فریدمن رنک برای الگوریتم‌های مذکور نیز در شکل (۹) ارائه شده است. نتایج نشان داد AVOA با مقادیر میانگین جواب‌های بدست آمده و انحراف معیار و ضریب تغییرات به‌ترتیب برابر با ۱۰۵۹/۴۲، ۹/۶۷ و ۰/۰۰۹ بهترین عملکرد را داشته است و همچنین انحراف معیار و ضریب تغییرات کمتری از سه الگوریتم دیگر دارد. مقدار فریدمن رنک این الگوریتم نیز ۱/۵ بدست آمد. در رتبه‌ی دوم GWO با مقدار فریدمن رنک ۱/۸۳ و میانگین جواب‌های

[1] Release  [2] Storage

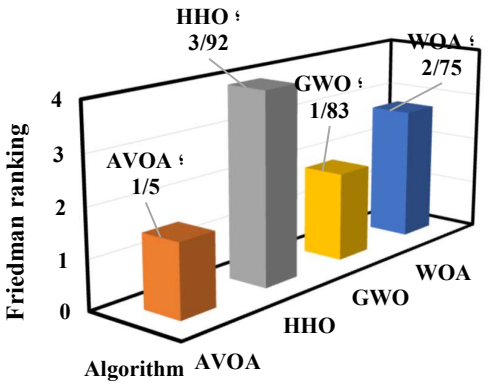
[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

برابر با ۱۰۵۱/۵۴ جای گرفت. مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات این الگوریتم به ترتیب برابر با ۲۱/۵ و ۰/۰۲۰ بدست آمد که نسبت به WOA با مقادیر به‌ترتیب برابر ۱۲/۶ و ۰/۰۲۰ برای انحراف معیار و ضریب تغییرات، مقادیر بیشتری دارد اما میانگین مقدار جواب‌های بدست آمده برای GWO با مقدار ۱۰۵۱/۵۴، نسبت به WOA که برابر ۱۰۳۱/۸۹ می‌باشد، تفاوت قابل توجهی دارد، لذا فریدمن رنک این الگوریتم از WOA که برابر ۲/۷۵ بوده است، کمتر شد و GWO در رتبه دوم و WOA در رتبه سوم قرارگرفت. در رتبه چهارم نیز HHO با مقدار فریدمن رنک برابر ۳/۹۲ و مقادیر میانگین مقدار تابع هدف برابر ۹۶۳/۹۶، انحراف معیار و ضریب تغییرات به‌ترتیب مساوی با ۳۸/۷۱ و ۰/۰۴ جای گرفت.

مقدار بهینه‌ی مطلق بدست آمده برای تابع هدف مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم ده‌مخزنه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم افزار لینگو برابر ۱۱۹۲/۴۱۴ بدست آمده است (ربیعی و همکاران،۲۰۱۸). لذا با توجه به این موضوع، الگوریتم‌های AVOA، GWO، WOA و HHO به ترتیب، پتانسیل رسیدن به ۸۸/۷٪، ۸۸٪، ۸۶/۴٪ و ۸۰/۶۷٪ از جواب بهینه مطلق تابع هدف مسئله مذکور را پس از ۴۰۰۰ تکرار و ۳۰۰ عامل جستجو دارند.

**جدول (۳) : جواب‌های بدست آمده برای الگوریتم‌ها برای ۱۰ بار اجرا**

| شماره اجرا | AVOA | HHO | GWO | WOA |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۰۵۹/۸۵ | ۹۶۲/۶۴ | ۱۰۶۷/۴۸ | ۱۰۴۵/۰۵ |
| ۲ | ۱۰۷۱/۹۷ | ۸۷۹/۵۳ | ۱۰۱۴/۹۳ | ۱۰۲۲/۴ |
| ۳ | ۱۰۵۹/۷۷ | ۹۶۱/۱۱ | ۱۰۳۱/۳۹ | ۱۰۲۸/۵۵ |
| ۴ | ۱۰۷۲/۳۴ | ۹۶۰/۲۳ | ۱۰۳۸/۰۴ | ۱۰۲۸/۰۲ |
| ۵ | ۱۰۵۲/۱۸ | ۹۳۴/۴۸ | ۱۰۷۷/۰۶ | ۱۰۳۸/۶۲ |
| ۶ | ۱۰۵۶/۲ | ۹۴۹/۷۳ | ۱۰۴۳/۲۷ | ۱۰۲۰/۱۶ |
| ۷ | ۱۰۳۸/۰۷ | ۹۷۸/۳۲ | ۱۰۲۹/۲۳ | ۱۰۱۲/۲۲ |
| ۸ | ۱۰۵۷/۸۸ | ۹۷۱/۵۴ | ۱۰۷۵/۹ | ۱۰۳۶/۲۷ |
| ۹ | ۱۰۶۸/۶۱ | ۱۰۳۳/۴۳ | ۱۰۷۱/۷۸ | ۱۰۲۹/۲ |
| ۱۰ | ۱۰۵۷/۳۰ | ۱۰۰۴/۸۳ | ۱۰۶۶/۳۲ | ۱۰۵۸/۳۷ |
| میانگین مقادیر تابع هدف | ۱۰۵۹/۴۲ | ۹۶۳/۵۹ | ۱۰۵۱/۵۴ | ۱۰۳۱/۸۹ |
| انحراف معیار | ۹/۶۷ | ۳۸/۷۱ | ۲۱/۵۰ | ۱۲/۶۰ |
| ضریب تغییرات | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱۲ |
| کمترین مقادیر تابع هدف | ۱۰۳۸/۰۷ | ۸۷۹/۵۳ | ۱۰۱۴/۹۳ | ۱۰۱۲/۲۲ |
| بیشترین مقادیر تابع هدف | ۱۰۷۲/۳۴ | ۱۰۳۳/۴۳ | ۱۰۷۷/۰۶ | ۱۰۵۸/۳۶ |

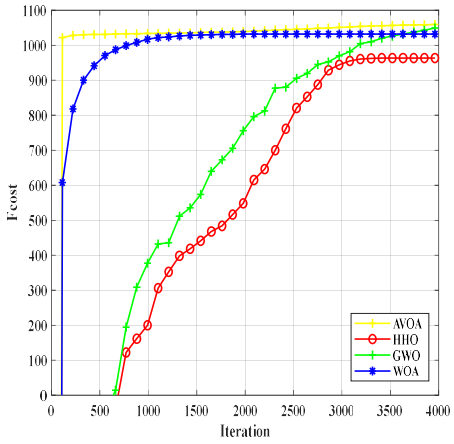



**شکل ۹) مقادیر فریدمن رنک بدست آمده برای الگوریتم‌های مختلف**

با بررسی نمودار همگرایی بدست آمده در شکل (۱۰) نیز می‌توان متوجه شد که سرعت همگرایی، هم در تکرارهای اولیه و سپس تکرارهای بعدی در AVOA نسبت به سه الگوریتم دیگر برتری داشته که بیانگر عملکرد برتر هر دو فاز اکتشاف و بهره‌برداری (استخراج) و همچنین تعادل بیشتر بین این دو فاز در الگوریتم مذکور می‌باشد که نقش مهمی را در مکانیسم ساز و کار و بهبود سرعت همگرایی و پیدا کردن جواب بهینه مطلق الگوریتم‌های فراابتکاری بازی

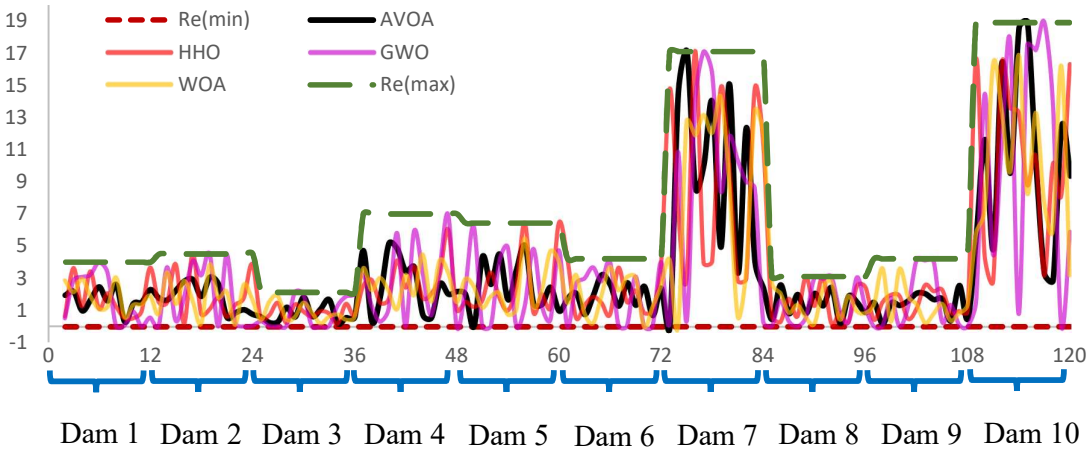
[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

می‌کند. پس از این الگوریتم، GWO که در رتبه دوم قرار گرفت نیز دارای سرعت همگرایی قابل قبولی بوده است.




**شکل (۱۰) : نمودار همگرایی الگوریتم‌های مختلف**

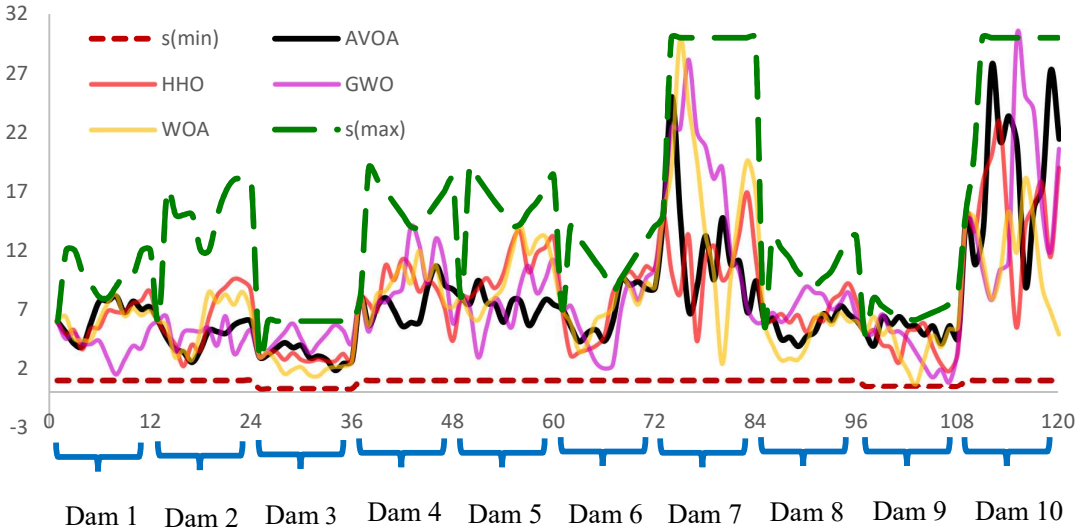
مقادیر احجام رهاسازی مطابق با الگوریتم‌های AVOA، HHO، GWO و WOA برای سیستم ده‌مخزنه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در محور افقی بازه‌های زمانی و در محور عمودی مقادیر رهاسازی نمایش داده شده است. هر ده بازه در محور افقی، متعلق به احجام رهاسازی در هرمخزن به‌ترتیب از مخزن اول تا دهم می‌باشد. نمودار احجام بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهند که محدودیت‌های مربوط به رهاسازی ارضاء شده است و تمام احجام رهاسازی بین یا مساوی Re(min) و Re(max) یا حداقل و حداکثر احجام رهاسازی مجاز قرار دارند.




**شکل (۱۱): احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف**

همچنین در شکل (۱۲) مقادیر احجام ذخیره مطابق با الگوریتم‌های مختلف به صورت شماتیک نمایش داده شده است. با استناد برنمودارهای این شکل، می‌توان متوجه شد که همه‌ی احجام ذخیره‌ی بدست آمده از الگوریتم‌های موجود در تحقیق در بازه‌های زمانی مختلف بین یا مساوی s(min) و s(max) یا حداقل و حداکثر احجام ذخیره مجاز قرار دارند. بنابراین محدودیت‌های مربوط به احجام ذخیره مخازن نیز رعایت شده است.

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]




**شکل (۱۲) : احجام ذخیره بدست آمده ازالگوریتم‌های مختلف**

## نتیجه‌گیری:

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها برای تولید انرژی برق‌آبی روز به روز مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد. با توجه کاربرد و عملکرد خوب الگوریتم‌های فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی و مهندسی، استفاده از الگوریتم‌های جدیدتر که دارای دقت بالاتری هستند، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در این مطالعه، عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA) برای حل دو مسئله معروف بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنی شامل دو سیستم چهارمخزنه و ده‌مخزنه سنجیده شد و با استفاده از آزمون فریدمن با سه الگوریتم بهینه‌سازی شاهین‌های هریس (HHO)، وال (WOA) و گرگ‌های خاکستری (GWO) یکدیگر مقایسه گردید. نتایج در حل مسئله سیستم چهارمخزنه حاکی از برتری AVOA با میانگین مقدار تابع هدف برابر ۲۹۶/۶۷، انحراف معیار و ضریب تغییرات و فریدمن رنک به‌ترتیب مساوی با ۲/۷۱، ۰/۰۰۹۱ و ۱ بوده است. سپس در رتبه دوم GWO با مقدار فریدمن رنک ۲/۳۳ و مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این الگوریتم به ترتیب ۲۸۳/۶۵، ۷/۳۲ و ۰/۰۲۶ جای گرفت و در رتبه سوم نیز HHO و WOA دارای عملکرد یکسان با میانگین مقدار تابع هدف، انحراف معیار، ضریب تغییرات به‌ترتیب برابر ۲۶۴/۹۲، ۵/۶۳ و ۰/۰۲۱ برای WOA و ۲۵۴/۳، ۴/۲۹ و ۰/۰۱۶ برای HHO و فریدمن رنک برابر و مساوی ۳/۳۳ قرار گرفتند. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فوق با حل مسئله سیستم ده‌مخزنه نیز نشان داد در رتبه های اول تا چهارم به‌ترتیب الگوریتم‌های AVOA، GWO، WOA و HHO با میانگین مقادیر بدست آمده به‌ترتیب ۱۰۵۹/۴۲، ۱۰۵۱/۵۴، ۱۰۳۱/۸۸ و ۹۶۳/۵۹ برای تابع هدف و ۱/۵، ۱/۸۳، ۲/۷۵ و ۳/۹۲ برای فریدمن رنک و ۹/۶۷، ۲۱/۵۰، ۱۲/۶۰ و ۳۸/۷۱ برای انحراف معیار و ۰/۰۰۹، ۰/۰۲، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۴ برای ضریب تغییرات، قرار گرفتند. لذا الگوریتم مذکور پتانسیل رسیدن به ۹۶/۲۷٪ و ۸۸/۷٪ از بهینه مطلق توابع هدف سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه که به‌ترتیب برابر با ۳۰۸/۲۹۲ و ۱۱۹۲/۴۱۴ هستند را پس از ۴۰۰۰ تکرار و ۳۰۰ عامل جستجو دارا می‌باشد.

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

## مراجع


۱) حسینی موغاری, س., & بنی حبیب, م. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب. نشریه حفاظت منابع آب و خاک, ۱۷-۳۱.

۲) قادری, ک., زلقی, آ., & بختیاری, ب. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ کرخه). مدیریت آب و آبیاری, ۲۱۵-۲۲۸.

۳) محمدی, م., موسوی, س., فرزین, س., & کرمی, ح. (۱۳۹۸). بهره‌برداری بهینه از مخزن سد سلمان فارسی با استفاده از الگوریتم وال و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک براساس روش تصمیم‌گیری چندمعیاره. اکوهیدرولوژی, ۲۸۱-۲۹۳.

۴) دوانی مطلق, ا., صادقیان, م ص., جاوید, اح. & عسگری, م ص. (۱۴۰۰). بهینه سازی بهره برداری از مخزن سد طالقان با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک. فصل‌نامه علمی تخصصی مهندسی آب, ۱-۱۶.

۵) پرهیزکاری, م., & مازندرانی زاده, ح. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخزن برقابی مطالعه موردی: سد کارون ۵. نشریه سد و نیروگاه‌های برق‌آبی ایران, ۲۴-۳۲.

6) Abdollahzadeh, B., Soleimanian Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. Computers & Industrial Engineering, 158, 107408.

7) Ahmadianfar, I., Adib, A., & Salarijazi, M. (2016). Optimizing Multireservoir Operation: Hybrid of Bat Algorithm and Differential Evolution . Ahmadianfar, I., Adib, A. and Salarijazi, M., 2016. Optimizing multireservoir operation: hybrid of bat algorithm and differential evolution. Journal of Water Resources Planning and Management, 05015010.

8) Bozorg-Haddad, O., Azad, M., Fallah-Mehdipour, E., Delpasand, M., & Chu, X. (2021). Verification of FPA and PSO algorithms for rule curve extraction and optimization of single- and multi-reservoir systems' operations considering their specific purposes . Water Supply, 166–188.

9) Chow, V., & Cortes-Rivera, G. (1974). Application of DDDP in water resources planning. Urbana-Champaign: University of Illinois.

10) Ehteram, M., Karami, H., Mousavi, S., Farzin, S., Alcigeimes B, C., & Shafie , A.-E. (2018). Reservoir Operation by a New Evolutionary Algorithm: Kidney Algorithm. Water Resources Management , 4681–4706.

11) Ghambari, S., & Rahati, A. (2018). An improved artificial bee colony algorithm and its application to reliability optimization problems. Applied Soft Computing, 736-767.

12) 12) Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M. and Chen, H., (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. Future generation computer systems, 97, 849-872.

13) Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm . Advances in Engineering Software, 51-67.

14) Mirjalili, S., Mirjalili, S., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. Advances in Engineering Software, 46-61.

15) Mohammadi, M., Farzin, S., Mousavi, S.-F., & Karami , H. (2019). Investigation of a New Hybrid Optimization Algorithm Performance in the Optimal Operation of Multi-Reservoir Benchmark Systems. Water Resources Management volume.

16) Murray, D., & Yakowitz, S. (1979). Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control. Water Resources Research , 1017-1027.

17) Rabiei, M., Alami, M., & Talatahari, S. (2018). Reservoir operation optimization using CBO, ECBO and


[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

VPS algorithms. . Iran University of Science & Technology, 489-509.

18) Yang, X.-S., & Gandomi , A. (2012). Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. Engineering Computations, 464-483.

19) Yasar, M. (2016). Optimization of Reservoir Operation Using Cuckoo Search Algorithm: Example of Adiguzel Dam, Denizli, Turkey. Mathematical Problems in Engineering .

20) Yaseen, Z., Karami, H., Ehteram, M., Mohd, N., Mousavi, S., Hin, L., . . . El-Shafie , A. (2018). Optimization of Reservoir Operation using New Hybrid Algorithm. KSCE Journal of Civil Engineering, 4668–4680 .

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲

**Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant**
**10th Year/ No. 36/ March 2024**

# Optimal Operation of multi-reservoir systems using African vulture optimization algorithm (AVOA)

Esmaeil Mosayebi[1]
Saeed Farzin*[2]

**Abstract**

Optimum operation of multi-reservoir systems is one of the important issues in water resources management. In the present study, for the first time, the optimization algorithm of African vultures (AVOA) has been used to solve the problems of optimal operation of two four- reservoir and ten- reservoir systems in order to maximize the release for the production of hydroelectric energy. then the performance of the aforementioned algorithm with three optimization algorithms of Harris's hawks (HHO), Whale (WOA) and Gray wolves (GWO) were compared using Friedman test for 10 runs, 300 search agents and 4000 iterations. The results showed that in the four- reservoir system, AVOA and GWO were ranked first and second with the optimal values of 296.67 and 283.65, respectively. In the next rank, HHO and WOA were placed with the same Friedman rank equal to 3.33 and the average values of the objective function equal to 264.92 and 254.3, respectively. In the ten- reservoir system, AVOA with the average objective function values of 1059.42 ranked first, followed by GWO, WOA, and HHO with optimal values of 1051.54, 1031.89, and 963.6, respectively. Therefore, AVOA was able to estimate 96.27% and 88.7% of the global optimum of the objective functions of the four-reservoir and ten- reservoir systems, which are equal to 308/292 and 1192/414, respectively. Also, the mentioned algorithm has a good potential in solving other optimization problems.

**Keywords**

Optimal operation of dam reservoirs, Optimization, African vulture's optimization algorithm, Multi-reservoir systems,

[1] Master's Student in Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University
[2]*Associate Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, saeed.farzin@semnan.ac.ir

Received: 2023/01/24 Accepted: 2024/01/30

[ Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18 ]