

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

اسماعیل مسیبی^۱

سعید فرزین^{۲*}

چکیده

بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنی، 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 چهار مخزنی و ده مخزنی بهمنظور حداکثرسازی رهاسازی و تولید انرژی برق آبی 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 سیستم چهار مخزنی، AVOA و GWO با بهینه‌ی بدست آمده بهترین 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 بهترین برابر ۲۶۴/۹۲ و ۲۵۴/۳ قرار گرفتند. در سیستم ده مخزنی نیز، AVOA با میانگین مقادیر تابع هدف برابر ۱۰۵۹/۴۲ در رتبه‌ی اول و پس از آن WOA و HHO با بهینه‌ی بهترین برابر ۹۶۳/۶ و ۱۰۳۱/۸۹ مطابقت داشتند. لذا AVOA توانست ۹۶/۲۷٪ و ۸۸/۷٪ از بهینه مطلق توابع هدف سیستم‌های چهار مخزنی و ده مخزنی که بهترین برابر 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 چند مخزنی

^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

مقدمه

مذکور داشته است. قادری^{۱۲} و همکاران (۱۳۹۳)، مدلی را بر مبنای الگوریتم تکامل رقابتی جوامع^{۱۳} (SCE) برای بهره‌برداری بهینه از سیستم چندمخزنی واقع در حوضه آبریز کرخه توسعه دادند. نتایج نشان داد عملکرد SCE نسبت به GA برتری داشته است. یاسار^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۶)، از الگوریتم جستجوی فاخته^{۱۵} (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 ۱۶۰۰۰ مگاوات ساعت افزایش می‌دهد. محمدی^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۹، الگوریتم هیبریدی وال-ژنتیک (HWGA)^{۱۸} را برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چهارمخزن و ده‌مخزن 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 بهره‌برداری بهینه از سد آبدوغموش 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 افشاری گل (FPA)^{۲۳} برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم‌های تک و چندمخزنی استفاده کردند. نتایج بدست آمده، حاکی از برتری FPA بر PSO و روش برنامه‌ریزی حسینی مغاری^{۲۴} و همکاران (۲۰۱۳)، از الگوریتم کرم شبتاب^{۲۵} (FA) برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بازفت، برای یک بازه ۱۲۰ ماهه مربوط به سال‌های آبی ۶۵-۷۵ تا ۷۴-۷۵ استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد برتر FA در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک^۷ (GA) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۸ (PSO) 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 برق آبی 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 امروزه با توجه به اهمیت تولید انرژی برق آبی به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر، مدیریت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها بخصوص در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، اهمیت روزافزونی دارد (غمبری^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های مختلف برای حل مسائل بهینه‌سازی وجود دارند. یکی از این روش‌ها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است و یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فرآبتكاری می‌باشند (یانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۲).

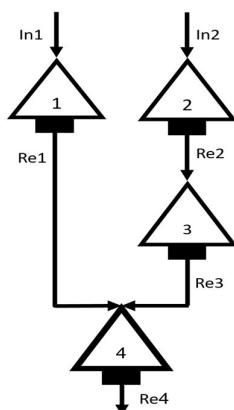
از آنجاییکه بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های تک و چندمخزنی سدها، از مسائل مهم در مهندسی آب می‌باشند (احدیانفر^۳ و همکاران، ۲۰۱۶)، در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های فرآبتكاری^۴ برای بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها رشد فراوانی داشته است. برخی از این تحقیقات به شرح زیر است:

¹³ Shuffled Complex Evolution¹Ghambari¹⁴ Yasar²Yang¹⁵ Cuckoo Search³Ahmadianfar¹⁶ Adiguzel⁴Metaheuristic¹⁷ Mohammadi⁵Hosseini-Moghari¹⁸ Hybrid Whale Genetic Algorithm⁶ Firefly Algorithm¹⁹ echnique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution⁷ Genetic Algorithm²⁰ Whale Optimization Algorithm⁸ Paricle Swarm Optimization Algorithm²¹ Kidney Algorithm⁹ Yaseen²² Bozorg-Haddad¹⁰ Artificial Fish Swarm Algorithm²³ Flower Pollination Algorithm¹¹ Hybrid Algorithm¹² Ghaderi

با استفاده از آزمون فریدمن^{۱۰} مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور از دو سیستم چهارمخزنه^{۱۱} و دهمخزنه^{۱۲} برای ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد الگوریتم‌های مذکور استفاده شده است.

مواد و روش‌ها سیستم چهارمخزنه:

سیستم مورد نظر توسط چاو^{۱۳} و همکاران در سال ۱۹۷۴ معرفی شد. در این سیستم، چهار مخزن سری و موازی وجود دارد که سه مخزن اول برای تولید انرژی برق آبی و مخزن چهارم برای اهداف آبیاری استفاده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱): طرح شماتیک سیستم چهارمخزنه

سیستم دهمخزنه:

این سیستم، اولین بار توسط موری^{۱۴} و همکاران تعریف شد. شمای کلی این سیستم در شکل ۲ ترسیم شده است. در این سیستم، به مخازن ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ جریان وارد می‌شود و از همه ۱۰ مخزن برای تولید انرژی برق آبی استفاده می‌شود.

غیرخطی (NLP)^۱ 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^۲ پرداختند. نتایج به دست آمده از این روش، نشان داد عملکرد WOA و GA، NLP و WOا-ژنتیک برتر از (GA) (NLP) هیبریدی وال-ژنتیک (GA) بوده است. دوانی مطلق^۳ و همکاران (۱۴۰۰) به بهره‌برداری از مخزن سد طالقان با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)^۴ و هیبرید آن با الگوریتم ژنتیک (GA) پرداختند. نتایج حاکی از عملکرد برتر الگوریتم هیبریدی گرگ خاکستری-ژنتیک (GWOGA) نسبت به دو الگوریتم مذکور بوده است. پرهیزکاری^۵ و همکاران (۱۴۰۰)، عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه NSGA-II^۶ و MOPSO^۷ را برای بهره‌برداری برداری بهینه چندهدفه از مخزن سد کارون^۸ شامل بیشینه‌سازی درآمد سالانه و بیشینه‌سازی تولید انرژی برق آبی 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 فرالاتکاری جدید در حل مسائل مهندسی از جمله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، با توجه به دقت بالاتر و کاربرپسند بودن به عنوان یک چالش مطرح است و باystsی موردن توجه بیشتری قرار گیرد. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA)^۸ 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)^۹، وال (WOA)^{۱۰} و گرگ‌های خاکستری (GWO)

⁸ African Vulture Optimization Algorithm

⁹ Harris Hawks Optimization

¹⁰ Friedman test

¹¹ Four_Reservoir_system

¹² Ten_Reservoir_system

¹³ Chow

¹⁴ Murray

¹ Non linear programming

² Multiple-Criteria Decision Analysis

³Davani motlagh

⁴ Grey Wolf Optimization Algorithm

⁵Parhizkari

⁶ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

⁷ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm

$$\begin{aligned}
 1 \leq Re_{(1)}(t) \leq 4 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(2)}(t) \leq 4.5 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 0.3 \leq Re_{(3)}(t) \leq 2.12 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(4)}(t) \leq 7 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(5)}(t) \leq 6.43 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(6)}(t) \leq 4.21 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(7)}(t) \leq 17 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(8)}(t) \leq 3.1 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 0.5 \leq Re_{(9)}(t) \leq 4.2 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 1 \leq Re_{(10)}(t) \leq 18.9 & \quad t = 1, \dots, NT
 \end{aligned} \tag{۳}$$

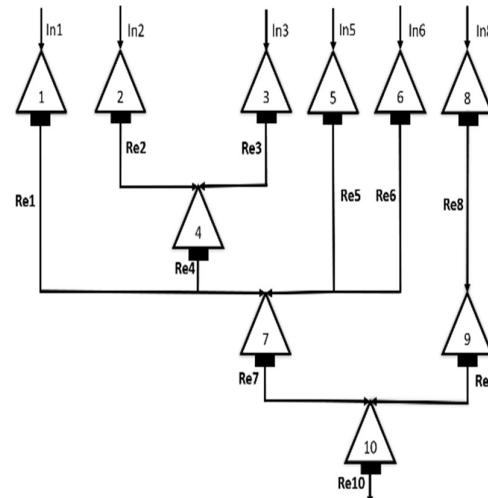
۲- محدودیت معادله پیوستگی^۱: این محدودیت به صورت

رابطه (۴) تعریف می‌شود (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$s_n(t+1) = s_n(t) + I_n(t) + M_n \times R_n(t) \tag{۴}$$

معادله 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) (t) جریان ورودی به مخزن n ام، $I_n(t)$ حجم ذخیره مخزن n ام در دوره زمانی (t)، $R_n(t)$ مجموع خروجی‌های مخزن n و مخازن بالا درست آن در دوره‌ی زمانی t ام و ماتریس پیوستگی $M_{n,n}$ دهنده‌ی نحوه‌ی ارتباط مخازن می‌باشد که مخازن مقصد در سطراها و مخازن مبدأ در ستون‌های این ماتریس قرار گرفته‌اند. این ماتریس‌ها برای سیستم‌های چهارمخزنه و ده‌مخزنه به ترتیب در روابط ۵ و ۶ نشان داده شده است.

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



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 برق آبی در ۱۲ دوره دوساعتی تعریف می‌شود. رابطه‌ی ۱، نمایانگر تابع هدف مذکور است (محمدی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$F = \underset{n=1}{\max} \underset{t=1}{\sum} \sum^{NR} \sum^{NT} benf_{(n)}(t) \times Re_{(n)}(t) \tag{۱}$$

در این فرمول، $benf_{(n)}(t)$ ، معرف ضرایب سود در هر دوره‌ی زمانی برای هر مخزن (چاو و همکاران، ۱۹۷۴)، $Re_{(n)}(t)$ نیز میزان رهاسازی و NR و NT به ترتیب تعداد دوره‌های زمانی و تعداد مخازن می‌باشد. محدودیت‌ها به شرح زیر می‌باشند:

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

$$\begin{aligned}
 0.005 \leq Re_{(1)}(t) \leq 4 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 0.005 \leq Re_{(2)}(t) \leq 4.5 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 0.005 \leq Re_{(3)}(t) \leq 4.5 & \quad t = 1, \dots, NT \\
 0.005 \leq Re_{(4)}(t) \leq 8 & \quad t = 1, \dots, NT
 \end{aligned} \tag{۲}$$

^۱ continuity equation

$$F = \underset{n=1}{\text{maximize}} \sum_{t=1}^{NR} \sum_{n=1}^{NT} \text{benf}_{(n)}(t) \times \text{Re}_{(n)}(t) - \text{penalty} \quad (10)$$

(محمدی و همکاران، ۲۰۱۹)

الگوریتم بهینهسازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA): الگوریتم بهینهسازی کرکس‌های آفریقایی (AVOA)، یک فرآیند کاری جدید با الهام از طبیعت است که در سال ۲۰۲۱ توسط عبدالله زاده^۲ 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 می‌شوند. گروه سوم شامل بقیه کرکس‌ها می‌شود.

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):

$$t = h \times (\sin^{\omega}(\frac{\pi}{2} \times \frac{iter_i}{\max_{iter}}) + \cos(\frac{\pi}{2} \times \frac{iter_i}{\max_{iter}}) - 1) \quad (11)$$

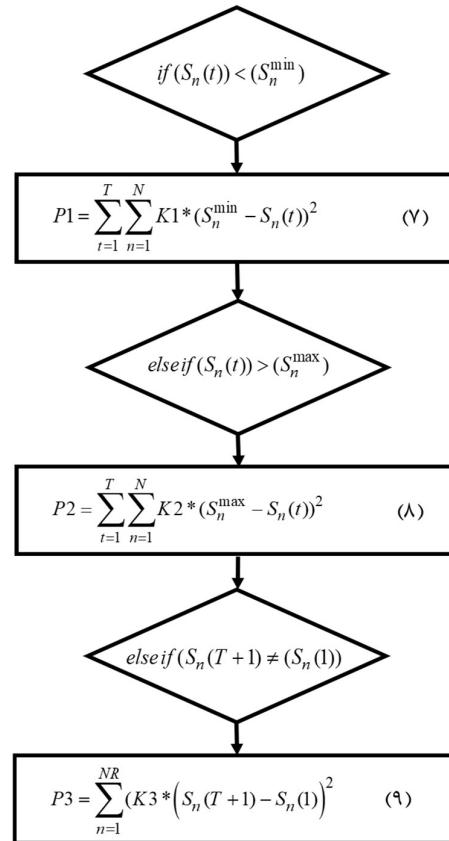
$$F = (2 \times \mu + p1) \times z \times (1 - \frac{iter_i}{\max_{iter}}) + t \quad (12)$$

نشان دهنده‌ی یک ثابت برای تعیین عملیات بهینهسازی و $iter_i$ معرف تکرار جاری می‌باشد. μ یک عدد بین $[-1, 1]$ نیز یک عدد در بازه $[0, 1]$ و k یک عدد بین $[-2, 2]$ می‌باشد. همچنین \max_{iter} تعداد کل تکرارها را مشخص می‌کند. فاز اکتشاف^۳:

$$M_{n,n} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

در صورتی که شرط احجام ذخیره ارضاء شود،تابع جریمه به صورت روابط ۷ تا ۹ که در شکل ۳ نشان داده شده است، اعمال می‌شود (ربیعی^۱ و همکاران، ۲۰۱۸):



شکل (۳): سناریوهای اعمال شده برای تابع جریمه

بنابراین تابع هدف نهایی عبارت است از:

³ Exploration

¹ Rabiei

² Abdollahzadeh

شوند. اگر $|F| < 1$ باشد، ابتدا بر اساس پارامتر P_3 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 $P_3 < rand_{P_3}$

$$A_1 = BestVulture_1(i) - \frac{BestVulture_1(i) \times P(i)}{BestVulture_1(i) - P(i)^2} \times F \quad (19)$$

$$A_2 = BestVulture_2(i) - \frac{BestVulture_2(i) \times P(i)}{BestVulture_2(i) - P(i)^2} \times F \quad (20)$$

$$P(i+1) = \frac{1}{2} \times (A_1 + A_2) \quad (21)$$

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 $P_3 \geq rand_{P_3}$

$$P(i+1) = BV(i) - |d(t)| \times F \times Levy(d) \quad (22)$$

الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO):
این الگوریتم، در سال ۲۰۱۹ توسط حیدری^۲ و همکاران معرفی شد. مبنای کار این الگوریتم، از طریق 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 می‌کنند به طور مشترک از جهات مختلف به طعمه که معمولاً یک خرگوش در نظر گرفته می‌شود، حمله کنند و روی طعمه همگرا شوند.

فاز اکتشاف:

انرژی طعمه نیز به صورت رابطه ۲۳ بدست می‌آید:

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \quad (23)$$

اگر $F \geq 1$ 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 مقایسه این پارامترها، بر اساس روابط ۱۳ و ۱۴ به صورت زیر انجام می‌شود (عبدالله زاده و همکاران، ۲۰۲۱).

If $P_1 \geq rand_{P_1}$:

$$P(i+1) = BV(i) - |2 \times rand \times BV(i) - P(i)| \times F \quad (13)$$

If $P_1 < rand_{P_1}$:

$$P(i+1) = BV(i) - F + rand_2 \times ((ub - lb) \times rand_3 + lb) \quad (14)$$

در روابط فوق، lb ، BV ، ub ، بهترین کرکس بوده و $rand_{P_3}$ و $rand_2$ دو کران بالا و بهترین کرکس بوده و $rand_{P_1}$ عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ می‌باشند.
فاز بهره‌برداری^۱:

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 مقایسه پارامترهای انجام می‌شود (عبدالله زاده و همکاران، ۲۰۲۱):

if $P_2 \geq rand_{P_2}$

$$P(i+1) = D(i) \times (F + rand_4) - BV(i) + P(i) \quad (15)$$

if $P_2 < rand_{P_2}$

$$S_1 = BV(i) \times \left(\frac{rand_5 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \cos(P(i)) \quad (16)$$

$$S_2 = BV(i) \times \left(\frac{rand_6 \times P(i)}{2\pi} \right) \times \sin(P(i)) \quad (17)$$

$$P(i+1) = BV(i) - (S_1 + S_2) \quad (18)$$

هنگام یافتن غذا، کرکس‌ها به سمت منبع غذایی جذب می‌شوند، که باعث می‌شود برای یافتن غذا دچار مشکل

۲۸ انجام می‌شود که در روابط 29 و 30 ، روابط تابعه آورده شده است.

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (28)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E[2(1-r_5)X_{rabbit} - X(t)] \quad (29)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (30)$$

۴) محاصره‌ی سخت با شیرجه‌های سریع پیشرونده:
وقتی $|E| < 0.5$ و $r < 0.5$ باشد، قانون زیر در رابطه 31 به کار گرفته می‌شود:

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (31)$$

$$Y = X_{rabbit}(t) - E[JX_{rabbit}(t) - X_m(t)] \quad (32)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (33)$$

الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA):
الگوریتم بهینه‌سازی وال که با الهام از سلسله مراتب اجتماعی وال‌های گوژپشت توسعه و فرموله شده است، در سال 2016 توسط میرجلیلی^۴ و همکاران معرفی شد (میرجلیلی و همکاران، 2016). در این الگوریتم پس از تولید مجموعه‌ای از راه حل‌های 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 راه حل حاضر در نظر گرفته می‌شود. سایر عوامل جستجو نیز با استفاده از روابط 34 و 35 نسبت به بهترین عامل جستجو، بروز می‌شوند.

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (34)$$

$$X(t+1) = X_{rand} - A \cdot D \quad (35)$$

در معادلات فوق، t بیانگر تکرار جاری، $X^*(t)$ نمایانگر بردار مکان بهترین راه حل بدست آمده تاکنون و $X(t)$ معرف بردار مکان طعمه می‌باشد. بردارهای A و C نیز توسط روابط (36) و (37) محاسبه می‌شوند:

$$A = 2ar - a \quad (36)$$

در این رابطه، T حداکثر تعداد تکرارها و $E0$ انرژی اولیه طعمه است. هنگامیکه $|E| > 1$ الگوریتم وارد فاز اکتشاف می‌شود.

شاهین‌های هریس دارای قدرت بینایی خارق العاده‌ای هستند و می‌توانند طعمه را با بینایی خود شناسایی کنند. برخی موقع نیز شاهین‌ها مجبور هستند تا مدت‌ها بنشینند و منتظر طعمه بمانند. بر این اساس مطابق با احتمال p دو استراتژی مطابق با روابط 24 و 25 وجود دارد:

$$\text{if } p < 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) \quad (24)$$

$$\text{if } p \geq 0.5 \\ X(t+1) = X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| \quad (25)$$

در روابط فوق، $X(t+1)$ بردار مکان شاهین‌ها در تکرار $t+1$ ، $X_{rabbit}(t)$ مکان طعمه، $X(t)$ بردار مکان فعلی شاهین‌ها، $X_{rand}(t)$ تا r_4 و p اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند، r_1 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 غافلگیر کننده را انجام می‌دهند با توجه به رفتارهای فرار طعمه و استراتژی‌های تعقیب و گریز شاهین‌های هریس، چهار استراتژی در الگوریتم HHO برای مدل سازی مرحله حمله وجود خواهد داشت. اگر s شанс فرار موفقیت آمیز یک طعمه فرض شود:

۱) محاصره نرم^۵: زمانی که $|E| > 0.5$ و $s > 0.5$ ، از رابطه (26) استفاده می‌شود:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E[2(1-r_5)X_{rabbit} - X(t)] \quad (26)$$

۲) محاصره سخت^۶: وقتی $s < 0.5$ و $|E| < 0.5$ باشد، موقعیت‌های فعلی با استفاده از رابطه (27) بروز می‌شوند:

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E|\Delta X(t)| \quad (27)$$

۳) محاصره نرم با شیرجه‌های سریع پیشرونده:
هنگامی که $|E| > 0.5$ و $s < 0.5$ است بروزرسانی با رابطه (28)

⁴ Hard besiege with progressive rapid dives

⁵ Mirjalili

¹ Soft Besiege

² Hard Besiege

³ Soft Besiege With Progressive Rapid Dives

محاصره‌ی شکار توسط گرگ‌های خاکستری توسط روابط

$$C = \frac{r}{2r_1} \quad (37)$$

۴۰ و ۴۱ مدل می‌شود (میرجلیلی و همکاران، ۲۰۱۴):

$$X(t+1) = X_p(t) - a(2r_1 - 1) * D(t) \quad (40)$$

$$D(t) = |2r_2 * X_p(t) - X(t)| \quad (41)$$

در این معادلات:

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

در فضای جستجو، اطلاعاتی درباره موقعیت شکار وجود ندارد، بنابراین موقعیت شکار برای 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):

$$X_1(t) = X_\alpha(t) - A_1 * D_\alpha(t) \quad (42)$$

$$X_2(t) = X_\beta(t) - A_2 * D_\beta(t) \quad (43)$$

$$X_3(t) = X_\delta(t) - A_3 * D_\delta(t) \quad (44)$$

$$X(t+1) = \left(\frac{X_1(t) + X_2(t) + X_3(t)}{3} \right) \quad (45)$$

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

آزمون فریدمن:^۳

آزمون فریدمن یک آزمون ناپارامتریک آماری^۴ می‌باشد که برای مقایسه شاخص‌های مرکزی چندین جامعه به کار می‌رود. ناپارامتریک بودن بدین معناست که این آزمون برای اجراء، نیاز به تعیین پارامتر خاصی ندارد. از آنجایی که میلتون فریدمن^۵ اقتصاددان آمریکایی، در سال ۱۹۳۷ برای اولین بار چنین روشنی را مورد بررسی قرار داد، این آزمون را به نام او می‌شناسند. مقادیر فریدمن رنک بدست آمده برای یک الگوریتم، هرچه قدر کمتر باشد به معنای عملکرد برتر آن الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشد.

نتایج و بحث:

تنظیم پارامترها برای الگوریتم‌های مورد استفاده:

در روابط فوق، a^I به صورت خطی از 2 به 0 در طول تکرارها کاهش می‌یابد (در هر دو مرحله اکتشاف و بهره‌برداری) و r^I 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 می‌کنند. در روابط ۳۸ و ۳۹ مدل ریاضی این رفتارها فرموله شده است.

$$X^{III}(t+1) = X^{III}(t) - A.D^{III} \quad \text{if } p < 0.5 \quad (38)$$

$$X^{III}(t+1) = D.e^{b^I \cos(2\pi l)} + X^*(t) \quad \text{if } p \geq 0.5 \quad (39)$$

در معادلات فوق بر اساس پارامتر p که یک عدد تصادفی بین $[0,1]$ می‌باشد از یکی از دو فرمول فوق استفاده می‌گردد. D^I 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^۱ 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 سلسه 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 حل‌ها را (ω)

می‌نامند.

³ Non-Parametric Statistical Test

⁴ Milton Friedman

¹ Mirjalili

² Friedman test

به معنای قابل اطمینان تر 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 $296/67$ ، انحراف معیار و ضریب تغییرات بهتری مساوی با $2/71$ و $0/0091$ بوده است. مقدار فریدمن رنک نیز برای این الگوریتم ۱ بدست آمد. همچنین بعد از AVOA، در رتبه دوم، GWO با مقدار فریدمن رنک $2/33$ جای گرفت که مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این الگوریتم به ترتیب $283/65$ ، $283/32$ و $0/026$ بودند. در رتبه سوم HHO و WOA با عملکرد یکسان قرار گرفتند. علی‌رغم برتری میانگین مقدار تابع هدف برای WOA، بدليل کمتر بودن انحراف معیار و ضریب تغییرات HHO، مقادیر فریدمن رنک برای هر دو الگوریتم $3/33$ بدست آمد. مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز برای WOA به ترتیب برابر $264/92$ ، $5/63$ و $0/021$ و برای HHO به ترتیب $254/3$ ، $4/29$ و $0/016$ بودند. نمودار همگرایی الگوریتم‌های مذکور در شکل (۶) نشان داده شده است.

کلیه پارامترهای مورد استفاده برای الگوریتم‌های مختلف موجود در تحقیق مطابق با بهینه‌ی در نظر گرفته شده در مقالات اصلی این الگوریتم‌ها برای حل توابع بنج‌مارک 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).

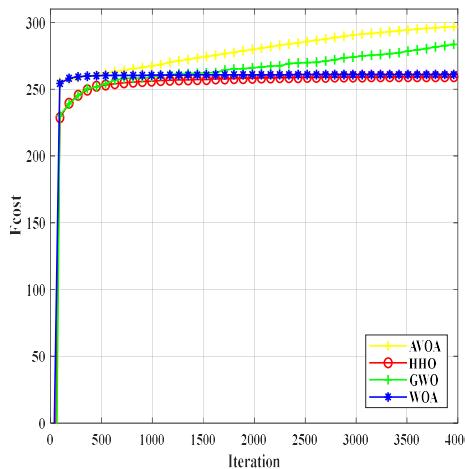
جدول (۱) : تنظیم پارامترها برای الگوریتم‌های مورد استفاده

الگوریتم‌ها	پارامترها
AVOA	تعداد عوامل جستجو = 300 حداکثر تعداد تکرارها = 4000 $f=[2,0]$ $w1=0/8$ $w2=0/2$ $\lambda=2/5$
HHO	تعداد عوامل جستجو = 300 حداکثر تعداد تکرارها = 4000
GWO	$a=[2,0]$ تعداد عوامل جستجو = 300 حداکثر تعداد تکرارها = 4000
WOA	$b=1$ $a1=[2,0]$ $a2=[-2,-1]$ تعداد عوامل جستجو = 300 حداکثر تعداد تکرارها = 4000

نتایج حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چهارمخزن:

در این بخش از الگوریتم AVOA برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چهارمخزن استفاده شده است. سپس عملکرد الگوریتم مذکور با سه الگوریتم بهینه‌سازی HHO، GWO و WOA مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همه الگوریتم‌ها برای 300 عامل جستجو 4000 تکرار در نظر گرفته 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،

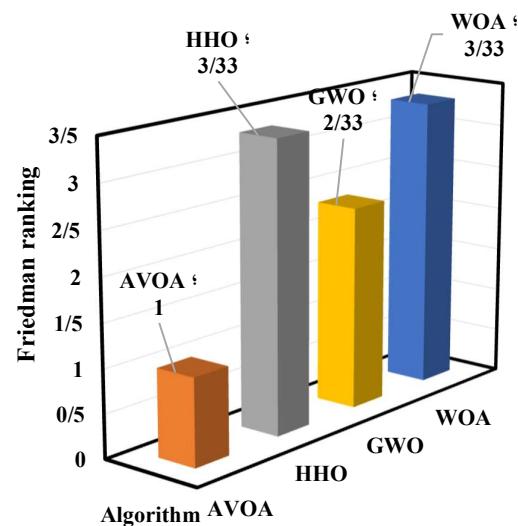
مقدار بهینه مطلق بدست آمده برای تابع هدف با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم افزار لینگو برای سیستم چهارمخزنی ۳۰۸/۲۹۲ بدست آمد (ربیعی و همکاران، ۲۰۱۸) بنابراین AVOA با میانگین مقدار تابع هدف ۲۹۶/۸۴ قادر خواهد بود به ۹۶٪/۲۷ از جواب بهینه مطلق^۱ برای تابع هدف سیستم چهارمخزنی پس از حداکثر ۴۰۰۰ تکرار و ۳۰۰ عامل جستجو برسد. الگوریتم‌های WOA، GWO و HHO نیز پتانسیل رسیدن به ۹۲٪/۰، ۸۵٪/۹ و ۸۲٪/۵ بهینه مطلق تابع هدف سیستم چهارمخزنی 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 تقریباً یکسان است که بیانگر عملکرد تقریباً یکسان فاز اکتشاف یا جستجوی جواب‌ها در همه الگوریتم‌ها مذکور می‌باشد. سپس بهینه مطلق نزدیک‌تر 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.

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



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

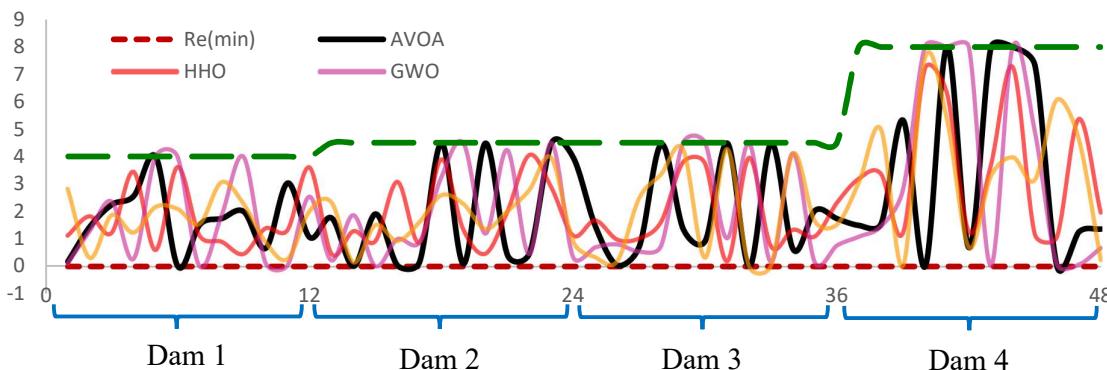
جدول (۲): جواب‌های بدست آمده برای الگوریتم‌ها برای ۱۰ بار اجرا

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	۱/۰۲۶	۰/۰۲۱

^۱ Global optimum

در همه الگوریتم‌ها محدودیت‌های مربوط به احجام رهاسازی رعایت شده است و احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف بین یا مساوی $Re(\max)$ و $Re(\min)$ قرار گرفته‌اند.

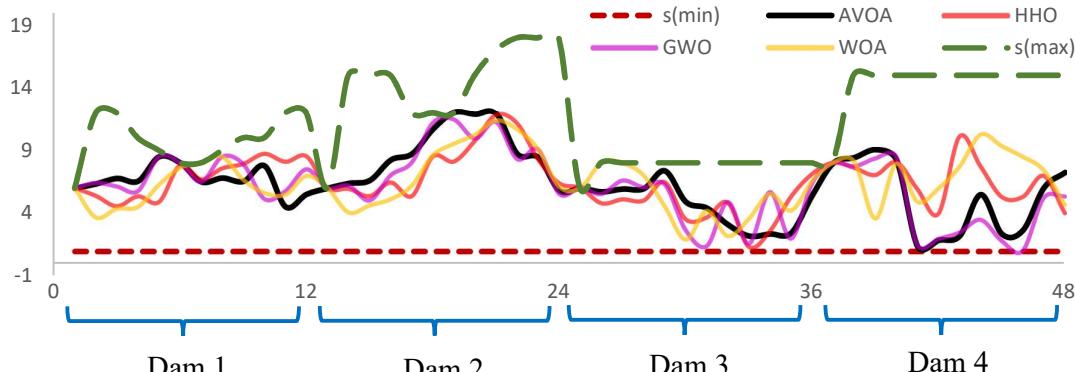
نشان داده شده است. در این نمودارها $Re^1(\min)$ و $Re(\max)$ به ترتیب حداقل و حداقل احجام رهاسازی مجاز می‌باشند. در محور افقی نیز بازه‌های زمانی نشان داده شده است که هر چهار بازه متعلق به یک مخزن به ترتیب از مخزن اول تا چهارم دارد. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود،



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

همچنین مقادیر احجام ذخیره مطابق با الگوریتم‌های مذکور 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 گرفته‌اند.

در شکل (۸) به صورت شماتیک نشان داده شده است. در نمودارهای شکل مذکور $s(\min)$ و $s(\max)$ به ترتیب نمایانگر حداقل و حداقل احجام مجاز ذخیره مخازن گرفته‌اند.



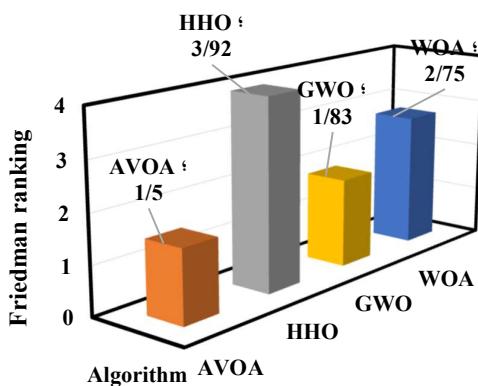
شکل (۸): احجام رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف

میانگین جواب‌های بدست آمده و انحراف معیار و ضریب تغییرات به ترتیب برابر با $9/67$, $10.59/42$, 0.009 و 0.009 بهترین عملکرد را داشته است و همچنین انحراف معیار و ضریب تغییرات کمتری از سه الگوریتم دیگر دارد. مقدار فریدمن رنک این الگوریتم نیز $1/5$ بدست آمد. در رتبه‌ی دوم GWO با مقدار فریدمن رنک $1/83$ و میانگین جواب‌های

سیستم دهمخزنی:

در این بخش، نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های AVOA, HHO و WOA برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم دهمخزنی گزارش شده است (جدول ۳). مقدادرنک برای الگوریتم‌های مذکور نیز در شکل (۹) ارائه شده است. نتایج نشان داد AVOA با مقادیر

شماره اجرا	AVOA	HHO	GWO	WOA
کمترین مقادیر تابع هدف	۱۰۳۸/۰۷	۸۷۹/۵۳	۱۰۱۴/۹۳	۱۰۱۲/۲۲
بیشترین مقادیر تابع هدف	۱۰۷۲/۳۴	۱۰۳۳/۴۳	۱۰۷۷/۰۶	۱۰۵۸/۳۶
انحراف معیار	۹/۶۷	۳۸/۷۱	۲۱/۵۰	۱۲/۶۰
ضریب تغییرات	۰/۰۰۹	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱۲



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 فرآبتكاری بازی

برابر با $1051/54$ ۱ جای گرفت. مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات این الگوریتم به ترتیب برابر با $21/5$ و $۰/۰۲۰$ بدست آمد که نسبت به WOA با مقادیر بهترین ترتیب برابر $۱۲/۶$ و $۰/۰۲۰$ برای انحراف معیار و ضریب تغییرات، مقادیر بیشتری دارد اما میانگین مقادار جواب‌های بدست آمده برای GWO با مقدار $1051/54$ ، نسبت به WOA که برابر $1031/89$ می‌باشد، تفاوت قابل توجهی دارد، لذا فریدمن رنک این الگوریتم از WOA که برابر $2/75$ بوده است، کمتر شد و GWO در رتبه دوم و WOA در رتبه سوم قرار گرفت. در رتبه چهارم نیز HHO با مقدار فریدمن رنک برابر $۳/۹۲$ و مقادیر میانگین مقادار تابع هدف برابر $۹۶۳/۹۶$ ، انحراف معیار و ضریب تغییرات بهترین ترتیب مساوی با $۰/۰۴$ و $۳۸/۷۱$ جای گرفت.

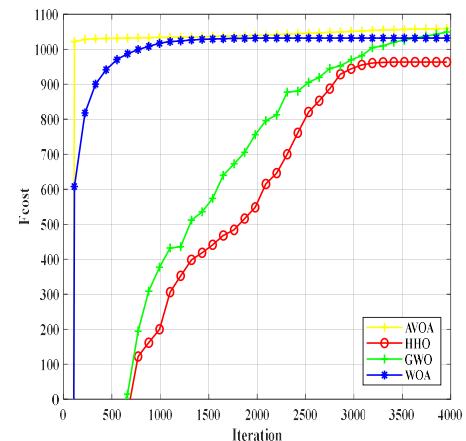
مقادیر بهینه مطلق بدست آمده برای تابع هدف مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره‌سازی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی و نرم افزار لینگو برابر $۱۱۹۲/۴۱۴$ بدست آمده است (ربیعی و همکاران، ۱۸). لذا با توجه به این موضوع، الگوریتم‌های AVOA، GWO، HHO و WOA به ترتیب، پتانسیل رسیدن به $۸۸/۷٪$ ، $۸۸/۷٪$ ، $۸۶/۴٪$ و $۸۰/۶٪$ 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

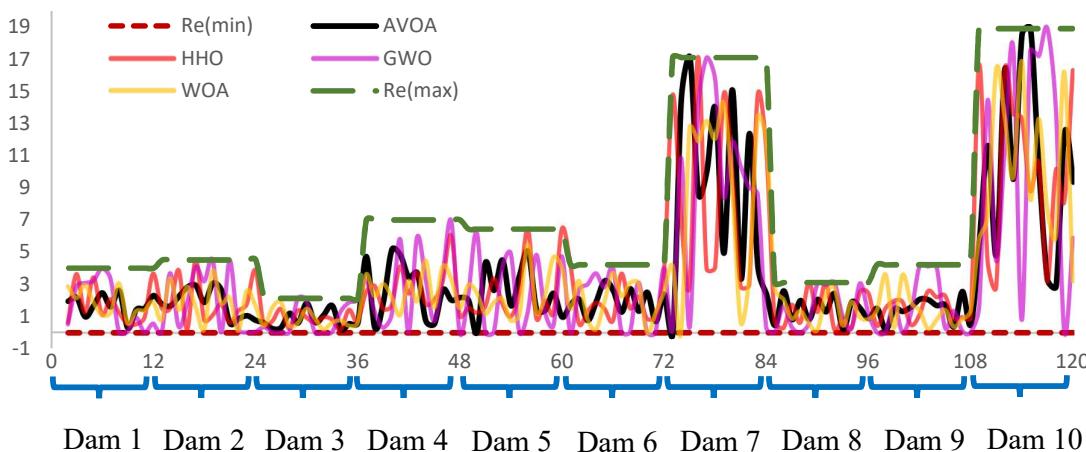
شماره اجرا	AVOA	HHO	GWO	WOA
۱	۱۰۵۹/۸۵	۹۶۲/۶۴	۱۰۶۷/۴۸	۱۰۴۵/۰۵
۲	۱۰۷۱/۹۷	۸۷۹/۵۳	۱۰۱۴/۹۳	۱۰۲۲/۴
۳	۱۰۵۹/۷۷	۹۶۱/۱۱	۱۰۳۱/۳۹	۱۰۲۸/۵۵
۴	۱۰۷۲/۳۴	۹۶۰/۲۳	۱۰۳۸/۰۴	۱۰۲۸/۰۲
۵	۱۰۵۲/۱۸	۹۳۴/۴۸	۱۰۷۷/۰۶	۱۰۳۸/۶۲
۶	۱۰۵۶/۲	۹۴۹/۷۳	۱۰۴۳/۲۷	۱۰۲۰/۱۶
۷	۱۰۳۸/۰۷	۹۷۸/۳۲	۱۰۲۹/۲۳	۱۰۱۲/۲۲
۸	۱۰۵۷/۸۸	۹۷۱/۵۴	۱۰۷۵/۹	۱۰۳۶/۲۷
۹	۱۰۶۸/۶۱	۱۰۳۳/۴۳	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

مقادیر احجام رهاسازی مطابق با الگوریتم‌های AVOA، WOA و HHO برای سیستم دامخزنی 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 هر مخزن به ترتیب 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 $Re(\max)$ و $Re(\min)$ یا حداقل و حداکثر احجام رهاسازی مجاز قرار دارند.

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



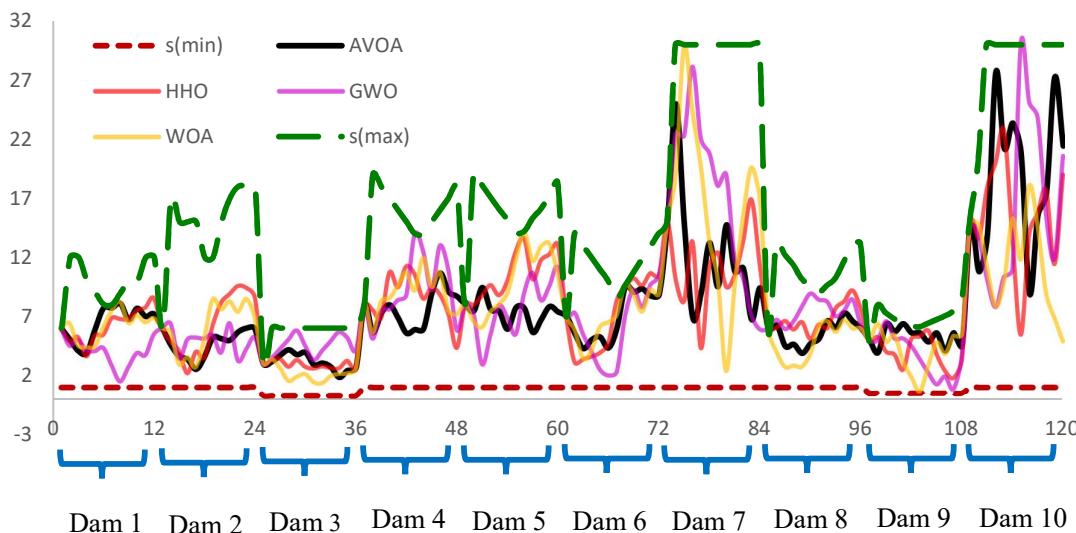
شکل (۱۰) : نمودار همگرایی الگوریتم‌های مختلف



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

همچنین در شکل (۱۲) مقادیر احجام ذخیره مطابق با موجود در تحقیق در بازه‌های زمانی مختلف بین یا مساوی $s(\max)$ و $s(\min)$ یا حداقل و حداکثر احجام ذخیره مجاز قرار دارند. بنابراین محدودیت‌های مربوط به احجام ذخیره مخازن نیز رعایت شده است.

همچنین در شکل (۱۲) مقادیر احجام ذخیره مطابق با الگوریتم‌های مختلف به صورت شماتیک نمایش داده شده است. با استناد برنامه‌رایی این شکل، می‌توان متوجه شد که همه احجام ذخیره‌ی بدست آمده از الگوریتم‌های



شکل (۱۲) : احجام ذخیره بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف

و 0.026 جای گرفت و در رتبه سوم نیز HHO و WOA دارای عملکرد یکسان با میانگین مقدار تابع هدف، انحراف معیار، ضریب تغییرات بهترتیب برابر $264/92$, $5/63$ و 0.021 برای WOA و 0.016 برای HHO و فریدمن رنک برابر و مساوی $3/33$ قرار گرفتند. ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فوق با حل مسئله سیستم ۵دمخزنی نیز نشان داد در رتبه های اول تا چهارم بهترتیب الگوریتم‌های AVOA, GWO, WOA و HHO با میانگین مقادیر بدست آمده بهترتیب $10.59/42$, $10.51/54$, $10.31/88$ و $9.63/59$ برای تابع هدف و $1/83$, $1/5$, $2/75$ و $3/92$ برای فریدمن رنک و $9/67$, $21/50$, $12/60$ و $38/71$ برای انحراف معیار و $0/009$, $0/002$, $0/012$ و $0/004$ برای ضریب تغییرات، قرار گرفتند. لذا الگوریتم مذکور پتانسیل رسیدن به $96/27$ ٪ و $88/7$ ٪ از بهینه مطلق توابع هدف سیستم‌های چهارمخزنی و ۵دمخزنی که بهترتیب برابر با $1192/414$ و $308/292$ هستند را پس از 4000 تکرار و 300 عامل جستجو دارا می‌باشد.

نتیجه‌گیری:

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها برای تولید انرژی برق آبی 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 چهارمخزنی و ۵دمخزنی سنجیده شد و با استفاده از آزمون فریدمن با سه الگوریتم بهینه‌سازی شاهمنهای هریس (HHO)، وال (WOA) و گرگ‌های خاکستری (GWO) یکدیگر مقایسه گردید. نتایج در حل مسئله سیستم چهارمخزنی حاکی از برتری AVOA با میانگین مقدار تابع هدف برابر $296/67$, $2/71$, انحراف معیار و ضریب تغییرات و فریدمن رنک بهترتیب مساوی با $0/0091$ و 1 بوده است. سپس در رتبه دوم GWO با مقدار فریدمن رنک $2/33$ و مقادیر میانگین تابع هدف و انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این الگوریتم بهترتیب $283/65$, $7/32$ می‌باشد.

مراجع

- 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) 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
- (۱) حسینی مغاری, 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, ۳۱-۱۷.
- (۲) قادری, ک., زلقی, آ., & بختیاری, ب. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم تکامل رقابتی جوامع (SCE) (مطالعه موردی: حوضه کرخه). مدیریت آب و آبیاری, ۲۲۸-۲۱۵.
- (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, ۲۹۳-۲۸۱.
- (۴) دوانی مطلق, ا., صادقیان, م.ص., جاوید, اح. & عسگری, م.ص. (۱۴۰۰). بهینه سازی بهره‌برداری 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 برقلابی مطالعه موردی: سد کارون ۵. نشریه سد و نیروگاه‌های برق آبی ایران, ۳۲-۲۴.
- 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.

- 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 .

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

Esmaeil Mosayebi¹

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