

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی با استفاده از الگوریتم‌های گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ بر اساس حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

علیرضا دنیائی، امیرپویا صراف* و حسن احمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۲۵)

چکیده

بهینه‌سازی استفاده از منابع آب به ویژه در بخش کشاورزی که بیشترین سهم را در استحصال منابع آب دارد از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این پژوهش ضمن معرفی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ، عملکرد آنها در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزنه سد گلستان با هدف تأمین نیاز آبی اراضی پایین دست، بر اساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا تابع هدف به صورت کمینه‌سازی کل کمبود طی دوره بهره‌برداری تعریف و محدودیت‌های معادله پیوستگی، حجم سرریز، حجم ذخیره و حجم رهاسازی از مخزن بر تابع هدف مسئله اعمال شد. سپس نتایج با پاسخ بهینه مطلق بر اساس روش برنامه‌ریزی غیرخطی حاصل از نرم‌افزار GAMS مقایسه شد و در نهایت بر اساس توسعه مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره رتبه‌بندی الگوریتم‌ها از لحاظ عملکرد صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم گرگ خاکستری در بهینه‌سازی تابع هدف بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند به گونه‌ای که میانگین پاسخ‌ها در الگوریتم‌های گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ به ترتیب ۹۲، ۸۴ و ۶۷ درصد پاسخ بهینه مطلق است به علاوه، الگوریتم گرگ خاکستری در کلیه شاخص‌ها از عملکرد مناسب‌تری نسبت به الگوریتم‌های جستجوی کلاغ و نهنگ برخوردار است. همچنین ضریب تغییرات پاسخ‌های به دست آمده توسط الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به الگوریتم‌های جستجوی کلاغ و نهنگ به ترتیب به میزان ۲ و ۱/۴۳ برابر کوچک‌تر است. در نهایت نتایج حاصل از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مشخص کرد که الگوریتم گرگ خاکستری دارای رتبه نخست نسبت به دو الگوریتم دیگر مورد بررسی در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد گلستان است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری بهینه از مخزن سد گلستان، بهینه مطلق، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدیریت منابع آب

۱- گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: sarraf@riau.ac.ir

مقدمه

مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب در بخش های مختلف به ویژه در بخش کشاورزی که بیشترین سهم استفاده از منابع آب را به خود اختصاص می دهد، اهمیت فوق العاده ای دارد. لذا با توجه به هزینه بر بودن ساخت سدها برای تأمین آب، ضرورت بهینه سازی بهره برداری از مخازن سدها در راستای مدیریت منابع آب بیش از پیش است. از این رو، با پیشرفت در علوم رایانه ای در سال های اخیر، اقبال به کاربرد روش های نوین بهینه سازی فراابتکاری در بهره برداری از مخازن سدها نیز در ایران و خارج از ایران افزایش چشمگیری داشته است. بزرگ حداد و همکاران (۶) از الگوریتم چرخه آب برای بهره برداری بهینه از مخزن سد کارون ۴ استفاده کردند. آنها در همان سال در پژوهشی مشابه (۵) ضمن استفاده از الگوریتم خفاش (BA) در بهره برداری بهینه از سیستم های تک مخزنه سد کارون ۴، همچنین سیستم ۴ و ۱۰ مخزنه برای افزایش میزان انرژی برقایی، دریافتند که الگوریتم خفاش نسبت به سایر روش ها از همگرایی سریع تر و پاسخ های دقیق تری در قیاس با پاسخ بهینه مطلق برخوردار است. افشار و همکاران (۱) ترکیبی از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) و منحنی های فرمان خطی را در بهره برداری از مخزن سد دز با دو هدف تأمین آب و انرژی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی توانایی بهره برداری بهینه از مخزن در دوره های کوتاه مدت تا نسبتاً طولانی را دارا است. اکبری فرد و همکاران (۲) از الگوریتم فراابتکاری جستجوی گرگ (GWO) برای یافتن استراتژی های تخصیص بهینه منابع آب در سیستم دو مخزنه سدهای گلستان استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم جستجوی گرگ در مقایسه با الگوریتم ژنتیک در تخصیص بهینه سیستم مخازن بود. لیو و همکاران (۱۰) از ترکیب الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) و ماشین یادگیری افراطی (ELM) برای ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی استفاده کرده و نتایج حاکی از آن بود که ارزیابی دقیق و قابلیت تعمیم مدل هیبریدی جستجوی کلاغ - ماشین یادگیری افراطی

(ELM-CSA) به سطح بالایی رسیده و می تواند برای ارزیابی های جامع از کیفیت آب های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. فلاح مهدی پور و بزرگ حداد (۷) کاربرد الگوریتم جمعیت پرندگان چندهدفه را در مسئله بهره برداری بهینه از مخزن بازفت، با اهداف تولید انرژی برقایی، تأمین نیاز پایین دست (شرب، صنعت و کشاورزی)، کنترل سیلاب و تفریحات مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاکی از برتری جواب های الگوریتم جمعیت پرندگان چندهدفه با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف نسبت به برنامه ریزی غیرخطی بود. قادری و همکاران (۲۰) ضمن مقایسه الگوریتم چرخه آب با الگوریتم های ژنتیک، جستجوی هارمونی، ازدحام ذرات و الگوریتم رقابتی استعماری در بهره برداری در یک سیستم چند مخزنی شامل سدهای گلستان و وشگیر به این نتیجه رسیدند که الگوریتم چرخه آب بهترین عملکرد را دارد. کرمی و همکاران (۹) ضمن بررسی و مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه سازی علف های هرز با الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات برای بهینه سازی مخزن سد آیدوغموش در راستای کاهش کمبودهای نیاز آبی کشاورزی پایین دست مخزن، دریافتند که الگوریتم بهینه سازی علف های هرز عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها دارد. یاسین و همکاران (۲۲) به منظور به حداقل رساندن کاهش تأمین آب در مخازن سد گلستان و وشمگیر، عملکرد الگوریتم هیبریدی خفاش ازدحام ذرات (HB-SA) را با الگوریتم های تشکیل دهنده آن مقایسه کرد. نتایج آنها نشان داد که HB-SA بهتر از سایر الگوریتم های بهینه سازی است. صادقی مقدم و همکاران (۲۱) ضمن استفاده از سه الگوریتم بهینه ساز ژنتیک، تبرید شبیه سازی شده (SA) و نهنگ در طراحی و ارائه روشی برای حل مسئله حمل و نقل با هزینه ثابت، دریافتند که الگوریتم بهینه سازی نهنگ از کارایی بهتری نسبت به سایرین برخوردار است. هو و همکاران (۸) ضمن ترکیب الگوریتم ترکیب جستجوی هارمونی (HS) و برنامه نویسی افزایشی پویا (IDP) و دست یابی به یک الگوریتم هیبریدی جدید، کاربرد الگوریتم جدیدی را در بهینه سازی یک سد هیدروالکترونیک واقع

که در آن De_t ، نیاز پایین‌دست مخزن سد در دوره t ، Re_t ، خروجی سد در دوره t و De_{max} ، نیاز بیشینه سد گلستان است. کلیه نیازهای پایین‌دست به صورت یک مجموعه در نظر گرفته شده‌اند.

محدودیت معادله پیوستگی: معادله پیوستگی نیز از اساسی‌ترین روابط مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن است که به صورت زیر تعریف می‌شود (۱۸):

$$A(t) = aS(t)^3 + bS(t)^2 + cS(t) + d \quad (2)$$

$$\bar{A}(t) = (A(t) + A(t+1)) / 2 \quad (3)$$

$$Loss(t) = \bar{A}(t) \times Ev(t) \quad (4)$$

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) - Re(t) - Sp(t) - Loss(t) \quad (5)$$

که در این روابط، $S(t)$ و $S(t+1)$ به ترتیب حجم مخزن ابتدا و انتهای دوره t ، $Q(t)$ جریان ورودی به مخزن در طول دوره t ، $Sp(t)$ مقدار سرریز از مخزن در طول دوره t ، $Ev(t)$ میزان تبخیر از سطح مخزن در طول دوره t ، $Loss(t)$ میزان تلفات ناشی از تبخیر سطح مخزن در طول دوره t و $\bar{A}(t)$ متوسط سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره t است. a ، b ، c و d هم ضرایب معادله سطح-حجم مخزن هستند. سرریز از مخزن قیدهایی را در محاسبات اعمال می‌کند، به طوری که (۱۸):

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - Loss(t) - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Loss(t) > S_{max} \\ 0 & \text{if } S_t + Q_t - Re_t \leq S_{max} \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق S_{max} حجم بیشینه مخزن است (۱۸).

محدودیت حجم ذخیره مخزن: این محدودیت بیان می‌کند که در تمام مراحل بهره‌برداری از مخزن می‌بایست حجم ذخیره مخزن بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم ذخیره مخزن قرار داشته باشد. محدودیت حجم ذخیره مخزن به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (7)$$

در رابطه فوق S_{min} حجم کمینه مخزن است. به منظور اعمال محدودیت حجم ذخیره مخزن از تابع جریمه P1 استفاده

در حوضه Hue در مرکز ویتنام مورد استفاده قرار دادند. ایشان دریافتند که الگوریتم هیبریدی عملکرد مناسب تری را نسبت به الگوریتم‌های تشکیل دهنده دارد. اکبری‌فرد و همکاران (۳) ضمن استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام پروانه (MSA)، ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاه برقابی کارون ۴ دریافتند که الگوریتم MSA در عملکرد بهینه مخزن برق آبی نسبت به الگوریتم‌های GA و PSO برتر بود.

در این پژوهش ضمن معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ، جستجوی کلاغ و گرگ خاکستری عملکرد آنها در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی گلستان با هدف تأمین نیاز اراضی پایین‌دست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف و نوآوری این پژوهش معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید نهنگ، جستجوی کلاغ و گرگ خاکستری در زمینه مدیریت منابع آب، حل یک مسئله با تابع هدف پیچیده غیرخطی و همچنین معرفی یک شاخص تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسئله بهینه‌سازی مخزن سد گلستان است.

مواد و روش‌ها

مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

افق برنامه‌ریزی شامل یک دوره زمانی ۱۵۰ ماهه از اسفند ۱۳۸۴ تا تیر ۱۳۹۷ در نظر گرفته شده است. اطلاعات ورودی به مدل شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای پایین‌دست سد است. حجم رهاسازی از مخزن به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی تعیین شده است. تابع هدف مدل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی کل کمبود تأمین آب طی دوره آماری تعریف شده است. تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف مقدار تقاضای آب پایین‌دست از میزان رهاسازی آب مطابق رابطه ۱، تعریف می‌شود (۱۸):

$$\text{Minimize } F_{(\text{Release})} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{De_t - Re_t}{De_{max}} \right)^2 \quad (1)$$

می شود (۱۶):

$$P_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^T \left(\frac{S_t - S_{\min}}{S_{\min}} \right) & \text{if } S_t < S_{\min} \\ \sum_{i=1}^T \left(\frac{S_t - S_{\max}}{S_{\max}} \right) & \text{if } S_t > S_{\max} \\ 0 & \text{if } S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

محدودیت حجم رهاسازی از مخزن: به این معنی که در تمام مراحل بهره برداری از مخزن باید حجم رهاسازی از مخزن علاوه بر مثبت بودن، بین مقادیر حداقل و حداکثر حجم مورد نیاز پایین دست قرار داشته باشد که به صورت زیر تعریف می شود (۱۶):

$$De_{\min, t} \leq Re_t \leq De_{\max, t} \quad (9)$$

که در رابطه فوق $De_{\min, t}$ و $De_{\max, t}$ به ترتیب حداقل و حداکثر حجم آب مورد نیاز پایین دست طی ماه t هستند. به منظور اعمال محدودیت حجم رهاسازی از مخزن تابع جریمه P_2 اعمال می شود که به صورت رابطه زیر تعریف می شود (۱۶):

$$P_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{\min}}{De_{\min}} \right) & \text{if } Re_t < De_{\min} \\ \sum_{i=1}^T \left(\frac{Re_t - De_{\max}}{De_{\max}} \right) & \text{if } Re_t > De_{\max} \\ 0 & \text{if } De_{\min} \leq Re_t \leq De_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

برای مقایسه نتایج، علاوه بر الگوریتم بهینه سازی نهنگ و گرگ خاکستری از نتایج حاصل از روش برنامه ریزی غیرخطی نیز استفاده شده است. همچنین برای ارزیابی مدل های مذکور از شاخص های زیر استفاده شده است (۱۱):

اطمینان پذیری حجمی: این شاخص (رابطه شماره ۶) عبارت است از مقادیر حجم آب رهاسازی شده در کل دوره به مقدار کل نیاز:

$$\alpha_V = \frac{\sum_{t=1}^T Re_t}{\sum_{t=1}^T De_t} \times 100 \quad (11)$$

که در آن α_V : اطمینان پذیری حجمی سیستم و T : کل دوره رهاسازی یا تقاضا است. بدیهی است که با افزایش اطمینان پذیری حجمی، قابلیت اطمینان سیستم بیشتر می شود.

اطمینان پذیری زمانی: این شاخص درصد دوره هایی است که سیستم به طور کامل نیاز موجود را تأمین کرده و به صورت رابطه زیر تعریف می شود (۱۱):

$$\alpha_T = \left(1 - \frac{NDef}{T} \right) \times 100 \quad (12)$$

که در آن $NDef$: تعداد کل شکست های رخ داده است. با افزایش اطمینان پذیری زمانی، عملکرد سیستم مطلوب تر می شود.

برگشت پذیری: نشان دهنده این است که سیستم در مواجهه با شکست با چه سرعتی از آن خارج می شود (۱۱):

$$\gamma_i = \frac{fs_i}{F_i} \quad (13)$$

که γ_i : شاخص برگشت پذیری سیستم، fs_i : تعداد سری های شکست و F_i : تعداد دوره های شکست ایجاد شده در مخزن است.

آسیب پذیری: آسیب پذیری به عنوان نسبت مجموع کل کمبودها به تعداد گام هایی که در آنها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل نیاز بوده که می تواند سالانه و یا بر اساس طول دوره هایی که نیاز بر اساس آن سنجیده می شود تعریف شود (۱۱):

$$Vul = \frac{\sum_{t=1}^T \left(\alpha \cdot De(t) - Re(t) \mid Re(t) < \alpha \cdot De(t), 0 \mid Re(t) \geq \alpha \cdot De(t) \right)}{\sum_{t=1}^T \alpha \cdot De(t)} \quad (14)$$

همچنین برای تصمیم گیری در انتخاب بهترین روش، از یک مدل تصمیم گیری چند معیاره استفاده شده است. مدل مذکور بر اساس مجموع باقیمانده وزنی و حاصل ضرب وزنی عمل می کند. ابتدا مقادیر شاخص های به دست آمده برای هر یک از الگوریتم ها نرمال سازی شده و سپس بر اساس وزن اختصاص داده شده به هر شاخص (روابط ۱۵ و ۱۶)، مجموع ϕ_e^1 و

$$\varphi_e^1 = \sum_{f=1}^{nc} \bar{X}_{ef} W_f \quad (15)$$

$$\varphi_e^2 = \prod_{f=1}^{nc} (\bar{X}_{ef})^{W_f} \quad (16)$$

که در آن \bar{X}_{ef} : مقدار هر شاخص در روش f ام، nc : تعداد روش‌های مورد ارزیابی و W_f : ضابطه وزنی بوده و در نهایت رابطه زیر، نتیجه خواهد شد (۱۱):

$$\varphi = \lambda \varphi_e^1 + (1 - \lambda) \varphi_e^2 \quad (17)$$

که مقدار λ از صفر تا یک در نظر گرفته می‌شود (۱۱).

برنامه‌ریزی غیرخطی

برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه شده در این مقاله از محیط برنامه‌نویسی AMS (General Algebraic Modeling System) و به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد گلستان استفاده شده است. در واقع می‌توان از گمز به عنوان بهترین نرم‌افزار حل مسائل بهینه‌سازی بسیار بزرگ و پیچیده برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی، صحیح مختلط، غیرخطی صحیح مختلط و مسائل مکمل خطی یاد کرد. روش‌های حلی که در این محیط وجود دارد، بیشتر مبتنی بر روش‌های گرادیان هستند (۱۲). از دیگر مزایای این نرم‌افزار در اختیار داشتن تمامی حل‌کننده‌ها در یک محیط به صورت همزمان و امکان ارتباط با نرم‌افزارهای صفحه گسترده نظیر اکسل است. لذا در این مقاله نیز از روش BARON به دلیل توانایی آن در دسترسی به مقادیر بهینه مطلق و همچنین سرعت و دقت بالا در حل مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی، صحیح مختلط و غیرخطی صحیح مختلط استفاده شده است (۱۷ و ۱۹). برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به روش کلاسیک، کدنویسی بر اساس تابع هدف مربوطه و اعمال قیدها و محدودیت‌های مربوطه در محیط گمز انجام شده و سپس اجرا شده که نتایج آن در بخش‌های آتی برای مقایسه

با نتایج حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری به کار گرفته شده در این مقاله آمده است.

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (Whale Optimization Algorithm)

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ، رفتار اجتماعی نهنگ‌های گوژپشت را به تصویر می‌کشد، به طوری که با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی شروع به کار کرده و با استفاده از سه عملگر محاصره طعمه، روش حمله تور حبابی (مرحله استخراج) و جستجوی طعمه (مرحله اکتشاف) بروزرسانی موقعیت عوامل جستجو در هر تکرار صورت می‌پذیرد. در فاز محاصره طعمه، نهنگ‌ها با فرض اینکه بهترین راه حل در حال حاضر طعمه است، طعمه را محاصره کرده و پس از اینکه بهترین عامل جستجو شناسایی شد، سایر عوامل جستجو مکان خود را نسبت به بهترین عامل بروزرسانی می‌کنند (روابط ۱۸ و ۱۹) (۱۳):

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - X(t) \right| \quad (18)$$

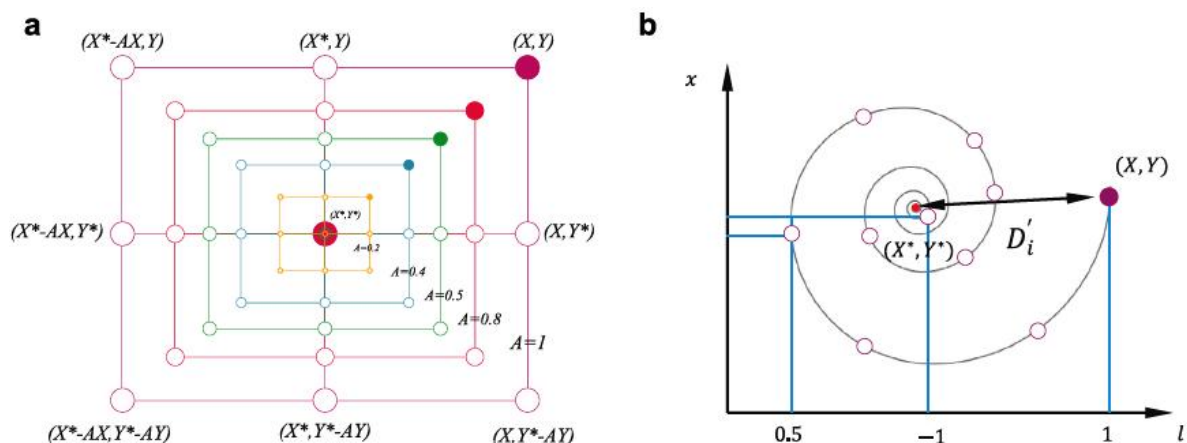
$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (19)$$

به طوری که t تکرار جاری، \bar{A} و \bar{C} بردارهای ضرایب، \bar{X}^* بردار مکان بهترین راه حل به دست آمده در حال حاضر، \bar{X} بردار مکان، \bar{D} : علامت قدر مطلق و ضرب نقطه‌ای المان در المان است. گفتنی است که در صورت وجود راه حل بهتر، نیاز است که در هر تکرار \bar{X}^* بروزرسانی شود. بردارهای \bar{A} و \bar{C} با روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شوند (۱۳):

$$\bar{A} = 2a \cdot \bar{r} - a \quad (20)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r} \quad (21)$$

که در آنها a به صورت خطی از مقدار ۲ تا صفر طی تکرارها کاهش یافته و \bar{r} بردار تصادفی در فاصله صفر تا یک است. در روش حمله تور حبابی، نهنگ‌های گوژپشت در اطراف طعمه در امتداد یک دایره انقباضی و به طور همزمان در مسیر مارپیچی شکل ۱ شنا می‌کنند. برای مدل‌سازی این رفتار



شکل ۱. مکانیسم جستجوی شبکه جاب پیاپی شده در WOA (۱۳)

کمتر از ۱- به کار گرفته می شود تا عامل جستجو مجبور به دور شدن از نهنگ مرجع شود (۱۳).

الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimization Algorithm)

در الگوریتم گرگ خاکستری که از ساختار رفتار اجتماعی گرگ ها در هنگام شکار الهام گرفته، همه اعضای گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیقی هستند به طوری که شامل چهار رتبه اصلی بوده و در یک ساختار هرمی مانند شکل ۲ با کاهش تسلط از بالا به پایین مدل می شوند. این چهار دسته شامل گرگ های رهبر یا آلفا (Alpha) - که نحوه شکار را مدیریت می کنند، گرگ های بتا (Beta) - که در فرایند تصمیم گیری به دسته آلفا کمک می کنند، گرگ های دلتا (Delta) - شامل گرگ های مراقبت کننده از توله ها هستند و گرگ های اُمگا (Omega) که کمترین حق را نسبت به بقیه اعضای گله داشته و به عنوان قربانی در گله ایفای نقش می کنند- هستند (۱۴).

مدل سازی فرایند محاصره طعمه توسط گرگ های خاکستری
مدل ریاضی رفتار محاصره در معادلات زیر ارائه می شود. در روابط زیر t: شماره تکرار، A و C: بردارهای ضریب، Xprey: بردار موقعیت مکانی طعمه و XG Wolf: بردار موقعیت مکانی هر یک از گرگ های خاکستری را نشان می دهد (۱۴).

فرض می شود که نهنگ با احتمال ۵۰ درصد از بین سازوکار محاصره انقباضی و یا مدل مارپیچی یکی از آنها را انتخاب می کند. لذا مدل ریاضی این مرحله به صورت رابطه ۲۲، تعریف می شود (۱۳):

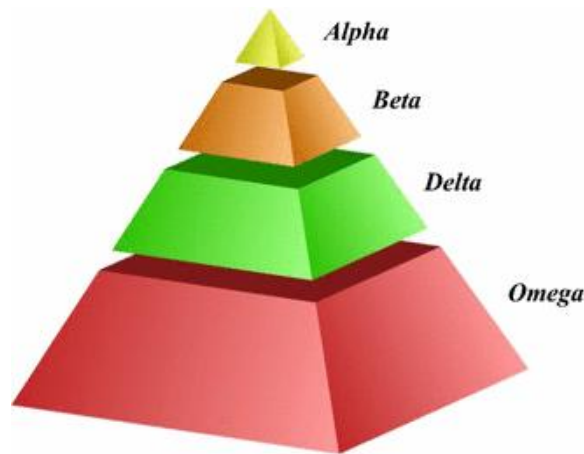
$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \bar{D} \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + \bar{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (22)$$

به طوری که \bar{D} از رابطه $|\bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - X(t)|$ به دست می آید و به فاصله i امین نهنگ تا طعمه اشاره دارد، b: ثابتی برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی، l: عددی تصادفی بین -۱ تا +۱ و P: عددی تصادفی بین صفر و یک است. در ضمن \bar{A} با مقادیر تصادفی بین -۱ تا +۱ نشانگر نزدیکی عامل جستجو به نهنگ مرجع است. در جستجو برای طعمه برای بروزرسانی موقعیت عامل جستجو، به جای استفاده از داده های بهترین عامل جستجو، انتخاب تصادفی عامل مدنظر قرار می گیرد به طوری که مدل ریاضی آن به صورت روابط ۲۳ و ۲۴ تعریف می شود (۱۳):

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_{rand}(t) - \bar{X}(t)| \quad (23)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{rand} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (24)$$

که در آن، \bar{X}_{rand} بردار موقعیت تصادفی منتخب از جمعیت جاری بوده و بردار \bar{A} با مقادیر تصادفی بزرگ تر از +۱ و یا



شکل ۲. ساختار هرمی اجتماع گرگ‌های خاکستری (۱۳)

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\alpha), & \bar{X}_2 &= \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot (\bar{D}_\beta), \\ \bar{X}_3 &= \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot (\bar{D}_\delta) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (32)$$

هنگامی که شکار توسط گرگ‌ها محاصره شد و از حرکت ایستاد، حمله به رهبری گرگ آلفا آغاز می‌شود. مدل کردن این فرایند با استفاده از کاهش بردار a انجام می‌شود. از آنجا که \bar{A} در رابطه ۲۸، برداری تصادفی در بازه مابین $[-2a]$ و $[2a]$ است، در حالت $|A| < 1$ ، گرگ آلفا به شکار نزدیک شده و در حالت $|A| > 1$ گرگ از شکار دور خواهد شد. در این الگوریتم الزام آن است که تمامی گرگ‌ها موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا بروزرسانی کنند (۱۴).

مرحله جستجوی شکار

مرحله جستجو سازوکاری دقیقاً عکس فرایند حمله دارد، به طوری که در هنگام جستجو گرگ‌ها از یکدیگر دور شده تا شکار را ردیابی کنند ($|A| > 1$) و این در حالی است که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| < 1$). به این استراتژی، سازوکار واگرایی در جستجو و همگرایی در حمله اطلاق می‌شود (۱۴).

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}_{\text{prey}}(t) - \bar{X}_{G \text{ Wolf}}(t) \right| \quad (25)$$

$$\bar{X}_{G \text{ Wolf}}(t+1) = \bar{X}_{\text{prey}}(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (26)$$

همچنین بردارهای A و C نیز به شرح زیر محاسبه می‌شوند (۱۴):

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (27)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2 \quad (28)$$

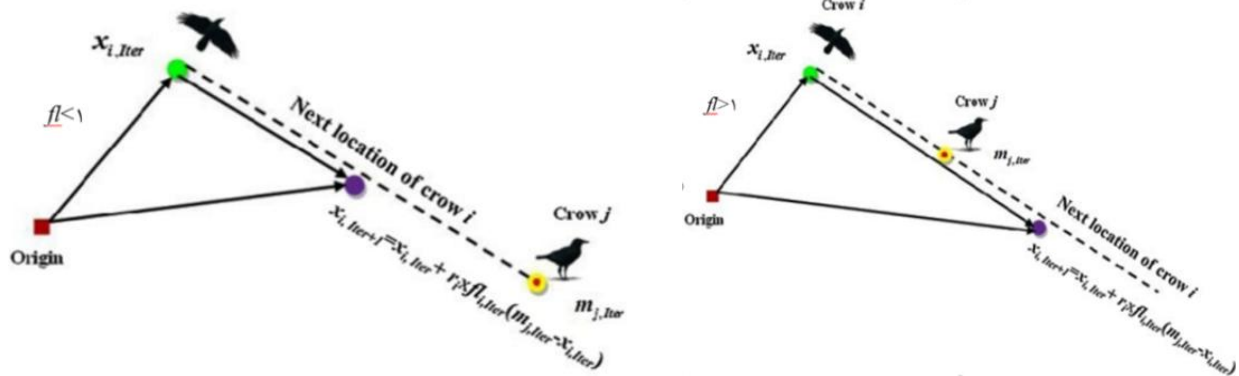
$$a = 2 - \text{iter} \times \left(\frac{2}{\text{Max} - \text{iter}} \right) \quad (29)$$

که در آن مؤلفه‌های a به صورت خطی و در طی تکرارهای متوالی از ۲ تا صفر کاهش می‌یابد. همچنین ۲۱ و ۲۲ بردارهای تصادفی در فاصله بین صفر و یک هستند (۱۴).

مدل‌سازی فرایند شکار

در این فرایند، با فرض اینکه گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه طعمه دارند. سایر عوامل جستجو از جمله آمگا- مطابق روابط ۳۰ تا ۳۲ ملزم به بروزرسانی موقعیت مکانی خود با توجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو هستند (۱۴):

$$\bar{D}_\alpha = \left| \bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X} \right|, \bar{D}_\beta = \left| \bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X} \right|, \bar{D}_\delta = \left| \bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X} \right| \quad (30)$$



شکل ۳. توصیف تصویری الگوریتم جستجوی کلاغ در دو حالت پارامتر fl کوچک تر و بزرگ تر از یک (۴)

کلاغ اُم تصمیم می‌گیرد تا کلاغ اُم را تعقیب کرده تا به محل غذای او دسترسی پیدا کند، لذا در این شرایط دو حالت زیر محتمل خواهد بود (۴):

۱- کلاغ اُم نمی‌داند که کلاغ اُم وی را تعقیب کرده و لذا کلاغ اُم به مکان کلاغ اُم دسترسی پیدا می‌کند. بنابراین، موقعیت جدید کلاغ اُم بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید (۴):

$$X^{i, iter+1} = X^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times (m^{j, iter} - X^{i, iter}) \quad (33)$$

به طوری که r_j عددی تصادفی با توزیع یکنواخت بوده و $0 < r_j < 1$ و $fl^{i, iter}$ طول پرواز کلاغ اُم است. شکل ۳، اثر $fl^{i, iter}$ را بر قابلیت جستجوی الگوریتم نشان می‌دهد.

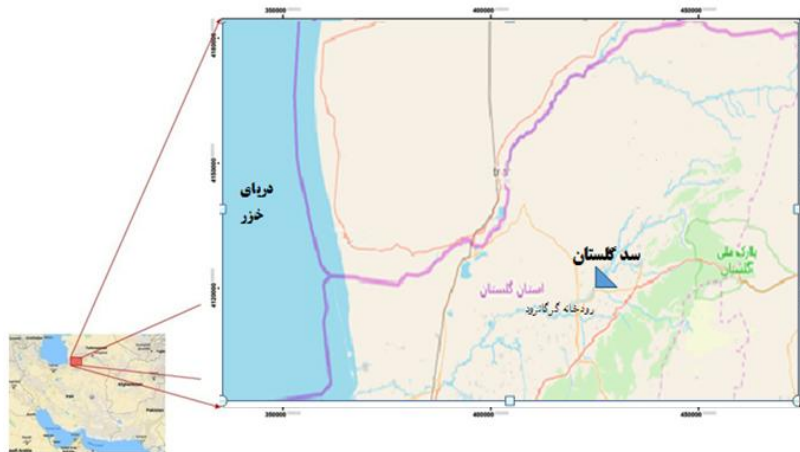
مقادیر کوچک پارامتر مذکور منجر به جستجوی محلی و مقادیر بزرگ آن منجر به جستجوی بهینه مطلق می‌شود. شکل ۳، نشان می‌دهد که اگر مقدار fl کمتر از یک باشد، موقعیت بعدی کلاغ اُم بین $X^{i, iter}$ و $m^{j, iter}$ در امتداد خط فاصله مشخص می‌شود. همچنین، چنانچه پارامتر مذکور بزرگ‌تر از یک باشد، آنگاه موقعیت جدید کلاغ ممکن است روی خط فاصله و بعد از $m^{j, iter}$ باشد که در شکل ۸، مشخص شده است (۴):

۲- کلاغ j می‌داند که کلاغ i در تعقیبش است. در نتیجه کلاغ j سعی می‌کند که کلاغ i را فریب داده و به موقعیت دیگری برود. بنابراین، حالت‌های ۱ و ۲ با روابط ریاضی زیر بیان

الگوریتم جستجوی کلاغ (Crow Search Algorithm)

کلاغ‌ها از باهوش‌ترین پرندگان محسوب شده به طوری که می‌توانند ضمن برقراری ارتباط با یکدیگر، مخفی کردن غذای خود و به یادآوری مکان اختفا، حتی تا چند ماه بعد، با تماشای پرندگان دیگر، می‌توانند دریابند که پرندگان دیگر غذای خود را چگونه مخفی کرده و پس از ترک آن پرندگان از محل، غذای آنها را برابند. توصیف روند الگوریتم جستجوی کلاغ به شرح زیر است (۴).

در ابتدا فرض بر این است که فضای محیط پیرامون شامل d بُعد و N کلاغ است. موقعیت هر کلاغ در هر مرحله از تکرار بر اساس بردار $X^{i, iter} = [X_1^{i, iter}, \dots, X_d^{i, iter}]$ تعریف می‌شود. از آنجایی که هر کلاغ دارای حافظه‌ای است که محل پنهان کردن غذا را به ذهن می‌سپارد لذا در هر مرحله از تکرار، موقعیت مکان پنهان کلاغ به صورت $m^{j, iter}$ مشخص می‌شود. موقعیت مذکور به عنوان بهترین موقعیتی است که کلاغ برای پنهان کردن غذا انتخاب کرده است. در ضمن، بهترین مکان پنهان کردن غذا در حافظه کلاغ ذخیره شده و همچنان در محیط پیرامونی به جستجو ادامه می‌دهند تا بهترین مکان برای مخفی کردن غذا در مواقع ضرورت را بیابند. به تعبیری دیگر، در این مرحله کلاغ اُم تصمیم می‌گیرد که کلاغ اُم را تعقیب کند. فرض کنید در هر مرحله، کلاغ اُم می‌خواهد محل پنهان کردن غذای خود ($m^{j, iter}$) را مشاهده کند. در این مرحله،



شکل ۴. موقعیت سد گلستان در حوضه آبریز گرگانرود

$$\text{Memory} = \begin{bmatrix} m_1^1 & \dots & m_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1^N & \dots & m_d^N \end{bmatrix}$$

کلاغ‌ها تثبیت می‌شوند.

۳- در مرحله سوم، ارزیابی تابع هدف انجام پذیرفته و مقادیر تابع هدف برای هر کلاغ محاسبه می‌شود.

۴- حافظه کلاغ‌ها بر اساس رابطه زیر بروزرسانی می‌شود:

$$m^{i, \text{iter}+1} = \begin{cases} X^{i, \text{iter}+1} \leftarrow f(x^{i, \text{iter}}) \text{ is (better)} \\ \text{than } (f(m^{i, \text{iter}})) \\ m^{i, \text{iter}} \leftarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

۵- در این مرحله، شرط همگرایی کنترل شده و در صورتی که رضایت‌بخش بود، الگوریتم به اتمام رسیده است (۴).

منطقه مطالعه شده و اطلاعات آماری

سد مخزنی گلستان روی رودخانه گرگانرود در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر گنبد احداث شده است (شکل ۴). این سد از نوع خاکی همگن بوده و هدف از احداث آن تأمین نیازهای کشاورزی، بهبود و توسعه اراضی ساحل راست گرگانرود با ایجاد شبکه آبیاری و زهکشی تحت فشار به وسعت خالص ۸۶۰۰ هکتار، گرگانرود، تأمین نیازهای آبی بخش صنعت، حقایبه‌های زیست‌محیطی، بهبود عملکرد فعلی شبکه آبیاری و زهکشی سد و شمشگیر، افزایش عمر مفید باقیمانده این سد از ۲۵ به ۴۰ سال و کنترل و مهار سیلاب بوده است حجم این مخزن در تراز نرمال ۱۰۰ متر از سطح دریا ۴۸

می‌شوند (۴):

$$X^{i, \text{iter}+1} = \begin{cases} X^{i, \text{iter}} + r_j \times fl^{i, \text{iter}} \times \\ (m^{j, \text{iter}} - X^{i, \text{iter}}) \leftarrow r_j \geq AP^{i, \text{iter}} \\ \text{a random(Position)} \leftarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

که r_j یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک و $AP^{i, \text{iter}}$ احتمال حضور کلاغ زدر هر مرحله از تکرار است. در الگوریتم مذکور، قابلیت تنوع و تشدید بر اساس پارامتر AP کنترل می‌شود. بدین شکل که مقادیر کوچک AP ، مقدار تشدید و مقادیر بزرگ AP تنوع‌گرایی را افزایش می‌دهد (۴).

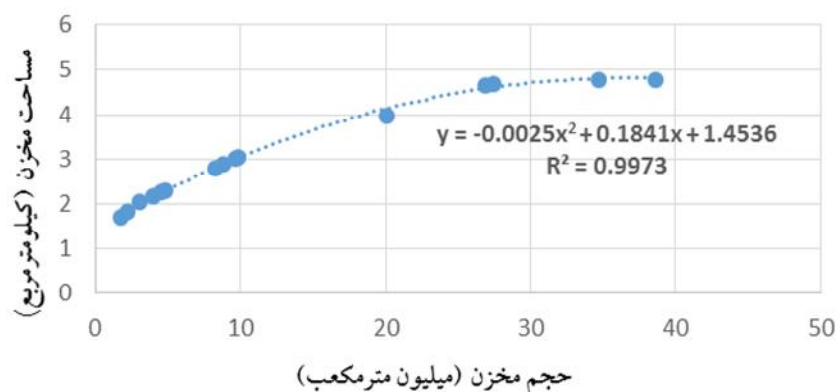
مراحل اجرای الگوریتم کلاغ به ترتیب زیر است (۴):

۱- متغیرهای تصمیم و قیود تعریف شده و تعداد کلاغ‌ها (N)، طول پرواز (fl)، ماکزیمم تکرار و AP مشخص می‌شوند.

۲- از آنجا که در تکرار اول، کلاغ‌ها هیچ تجربه‌ای ندارند، فرض بر این است که آنها غذاهای خود را در موقعیت‌های اولیه خود پنهان کرده‌اند. لذا به طور تصادفی در یک فضای جستجوی D بعدی قرار می‌گیرند به طوری که هر کلاغ مبین یک راه حل امکان‌پذیر از مسئله بوده و d تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری است. بنابراین

$$\text{Crows} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & \dots & x_d^N \end{bmatrix}$$

در این مرحله جمعیت و حافظه



شکل ۵. منحنی سطح- حجم مخزن سد گلستان

میانگین پاسخ الگوریتم‌های نهنگ و جستجوی کلاغ به ترتیب ۶۷ و ۸۴ درصد پاسخ بهینه مطلق است. مضاف بر این، ضریب تغییرات الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به الگوریتم نهنگ و جستجوی کلاغ به ترتیب به میزان ۲ و ۱/۴۳ برابر کوچک‌تر است. این یافته‌ها مبین عملکرد و کیفیت بهتر پاسخ‌های حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری در دست‌یابی به مقادیر بهینه نسبی است.

با توجه به شکل ۶ از آنجایی که حداقل مقادیر حاصل از بهینه‌سازی الگوریتم گرگ خاکستری بسیار مناسب‌تر از مقادیر حاصل از بهینه‌سازی با سایر الگوریتم‌ها است، می‌توان ارتقای عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری را در رسیدن به مقادیر کمینه‌تر به‌وضوح مشاهده کرد. در جدول ۲، شاخص‌های مختلف ارزیابی مدل‌ها، در دو حالت درصدی و نرمال شده برای الگوریتم‌های سه‌گانه یاد شده نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در تمامی پارامترهای ارزیابی مدل اعم از اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، عملکرد بهینه‌ساز گرگ خاکستری بهتر از سایر الگوریتم‌ها است، به طوری که الگوریتم‌های جستجوی کلاغ و نهنگ پس از آن به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

همچنین در جدول ۳، مقادیر پارامترهای ϕ^1 و ϕ^2 برای الگوریتم‌های به‌کار گرفته شده درج و خیلی مشخص حاکی از برتری الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به دو الگوریتم دیگر است. با توجه به جدول ۴، عملکرد مدل‌های سه‌گانه به‌زای مقادیر

میلیون متر مکعب و در تراز سرریز ۸۶ میلیون متر مکعب است. سد مخزنی گلستان در حوضه آبریز گرگانرود - قره‌سو در بخش جنوب شرقی دریای خزر قرار داشته و در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، جزئی از آبریز دریای خزر به‌شمار می‌رود.

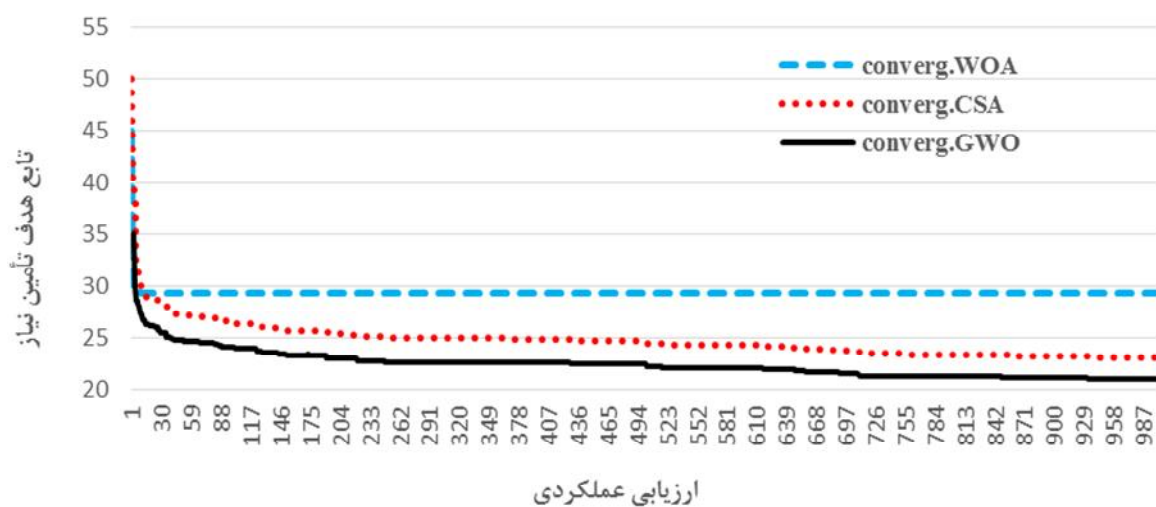
برای دستیابی به منحنی سطح- حجم مخزن سد گلستان از آمار و اطلاعات سایت Iran Dams وابسته به وزارت نیرو، طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ استفاده شد. پس از برآزش دادن داده‌های مربوط به مساحت مخزن در مقایسه با حجم متناظر آن در ماه‌ها و سال‌های مختلف رابطه این دو پارامتر بر اساس شکل ۵ با ضریب همبستگی $R^2 = 0.997$ به‌دست آمد.

$$Y = -0.002X^2 + 0.184X + 1.435 \quad (36)$$

نتایج و بحث

در این مطالعه برای بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم‌های گفته شده، کدنویسی الگوریتم‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت که نتایج حاصل از آن با ۱۰ مرحله اجرا و ۱۰۰ تکرار در هر مرحله در جدول ۱ آمده است. گفتنی است که این مقادیر با یکدیگر و در قیاس با پاسخ بهینه مطلق (۱۹/۴۱) حاصل از روش برنامه ریزی غیرخطی توسط نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است. لذا میانگین پاسخ حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری ۹۲ درصد پاسخ بهینه مطلق و

الگوریتم گرگ خاکستری		الگوریتم جستجوی کلاغ		الگوریتم نهنگ		گام اجرا در نرم‌افزار
زمان اجرا به ثانیه	مقادیر بهینه	زمان اجرا به ثانیه	مقادیر بهینه	زمان اجرا به ثانیه	مقادیر بهینه	
۱۸۰	۲۱/۲۰	۱۸۵	۲۲/۹۰	۱۸۲	۲۹/۳۱	۱
۱۷۹	۲۰/۹۰	۱۸۳	۲۳/۱۰	۱۸۳	۲۸/۸۸	۲
۱۸۱	۲۱/۳۴	۱۸۴	۲۳/۱۱	۱۸۵	۲۹/۷۸	۳
۱۷۹	۲۱/۱۶	۱۸۳	۲۳/۰۹	۱۸۲	۲۸/۲۶	۴
۱۷۹	۲۱/۱۰	۱۸۵	۲۳/۰۸	۱۸۳	۲۹/۱۰	۵
۱۷۸	۲۱/۲۰	۱۸۵	۲۳/۱۲	۱۸۴	۲۹/۲۳	۶
۱۸۰	۲۱/۹۰	۱۸۶	۲۳/۰۹	۱۸۳	۲۸/۹۰	۷
۱۷۹	۲۱/۱۵	۱۸۲	۲۳/۸۰	۱۸۲	۲۸/۹۲	۸
۱۷۸	۲۱/۰۰	۱۸۵	۲۳/۱۰	۱۸۲	۲۸/۸۶	۹
۱۷۹	۲۱/۹۸	۱۸۵	۲۳/۱۱	۱۸۳	۲۸/۷۵	۱۰
۱۷۹/۲	۲۱/۰۹	۱۸۴/۳	۲۳/۱۵	۱۸۲/۹	۲۹/۰۰	میانگین
۱۸۱	۲۱/۳۴	۱۸۶	۲۳/۸۰	۱۸۵	۲۹/۷۸	بدترین جواب
۱۷۸	۲۱/۹۰	۱۸۲	۲۲/۹۰	۱۸۲	۲۸/۲۶	بهترین جواب
	۰/۰۰۷		۰/۰۱۰		۰/۰۱۴	ضریب تغییرات
		۱۹/۴۱				جواب بهینه مطلق
	٪۹۲		٪۸۴		٪۶۷	درصد نزدیکی به پاسخ بهینه مطلق



شکل ۶. نحوه هم‌گرایی پاسخ‌ها در الگوریتم‌های تکاملی به کار گرفته شده

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های به‌دست آمده به‌وسیله الگوریتم‌های تکاملی به‌کار گرفته شده

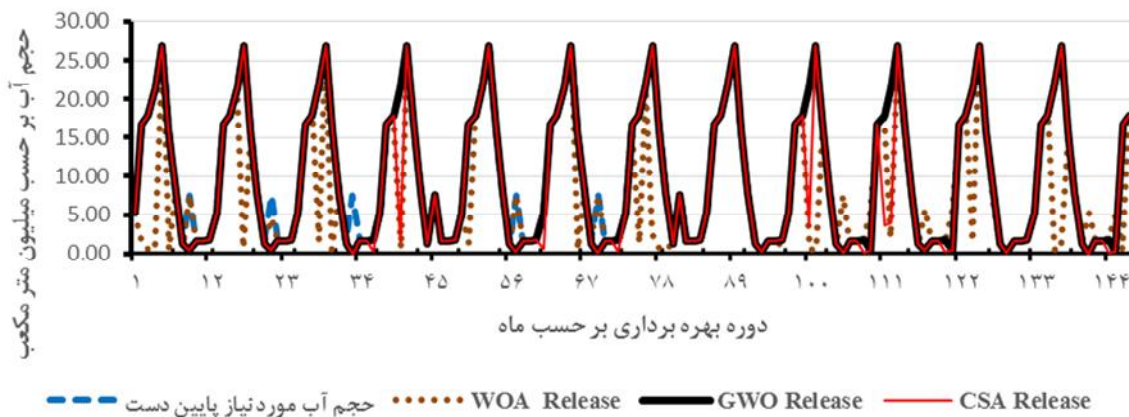
الگوریتم	اطمینان‌پذیری حجمی	اطمینان‌پذیری زمانی	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری	تابع هدف
ماتریس تصمیم (درصد)					
نهنگ (WOA)	۰/۷۳	۰/۸	۰/۷	۰/۲	۲۹
گرگ خاکستری (GWO)	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۰۹	۲۱/۰۹
جستجوی کلاغ (CSA)	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۷۶	۰/۱۷	۲۳/۱۵
ماتریس تصمیم نرمال					
نهنگ (WOA)	۰/۷۷۶۶	۰/۸۷۹۱	۰/۷۳۶۸	۰/۳۵۲۹	۰/۶۲۴۹
گرگ خاکستری (GWO)	۱	۱	۱	۱	۱
جستجوی کلاغ (CSA)	۰/۹۲۵۵	۰/۹۱۲۱	۰/۸۰۰۰	۰/۵۲۹۴	۰/۹۰۲۳

جدول ۳. مقادیر ϕ^1 و ϕ^2 محاسبه شده برای الگوریتم‌های تکاملی به‌کار گرفته شده

پارامتر	گرگ خاکستری	جستجوی کلاغ	نهنگ
ϕ^1	۰/۹۸۷۰	۰/۸۱۸۹	۰/۷۱۵۷
ϕ^2	۰/۹۸۲۲	۰/۸۰۲۷	۰/۶۹۹۴

جدول ۴. بررسی عملکرد الگوریتم‌های تکاملی به‌کار گرفته شده بر اساس مقادیر λ

مقدار λ	ϕ_{GWO}	ϕ_{CSA}	ϕ_{WOA}
$\lambda = ۰/۰$	۰/۹۸۲۲	۰/۸۰۲۷	۰/۶۹۹۴
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۲$	۰/۹۸۳۲	۰/۸۰۵۹	۰/۷۰۲۷
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۴$	۰/۹۸۴۱	۰/۸۰۹۲	۰/۷۰۵۹
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۶$	۰/۹۸۵۱	۰/۸۱۲۴	۰/۷۰۹۲
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۰/۸$	۰/۹۸۶۰	۰/۸۱۵۶	۰/۷۱۲۵
رتبه	۱	۲	۳
$\lambda = ۱/۰$	۰/۹۸۷۰	۰/۸۱۸۹	۰/۷۱۵۷
رتبه	۱	۲	۳



شکل ۷. مقایسه مقادیر رهاسازی آب به وسیله الگوریتم‌های تکاملی به کار گرفته شده در مقایسه با مقادیر نیاز

از آب در مخزن سد برای جبران میزان رهاسازی نیاز آبی اجتناب ناپذیر است. از سوی دیگر به نظر می‌رسد فرایند بهینه‌سازی در الگوریتم گرگ خاکستری به گونه‌ای طراحی و کدگذاری شده که توانایی بیشتری در کاهش تلفات از مخزن سد را از خود نشان می‌دهد که این مهم با کاهش بیشتر مقادیر سرریز در رابطه ۶ امکانپذیر خواهد بود.

همچنین علت اساسی این مطلب که چرا دو الگوریتم دیگر نتوانسته‌اند در این سطح از بهینه‌سازی ظاهر شوند را می‌توان در عدم توانایی آنها در رسیدن به بهینه نسبی مطلوب‌تر جستجو کرد. چرا که بهینه نامطلوب‌تر حاکی از عدم تأمین نیاز آبی اراضی پایین دست و در نهایت رهاسازی آب کمتر نسبت به نیاز آبی این اراضی است.

از آنجایی که بهینه ترین مقادیر مسئله مورد بحث در این مقاله در حقیقت مقادیر بهینه مطلق حاصل از برنامه ریزی غیرخطی است طبیعی است تمامی الگوریتم‌ها سعی دارند که به مقادیر مذکور نزدیک شوند. در مقادیر ماکزیمم الگوریتم‌های سه‌گانه توانایی دست‌یابی به مقادیر منطقی را بسیار گویا از خود نشان می‌دهند. در این بین، این الگوریتم گرگ خاکستری است که در این کارزار، گوی سبقت را از دو الگوریتم دیگر ربوده است. ولی در مقادیر مینیمم از آنجایی که حداقل مقادیر بایستی کمتر از بهینه مطلق نباشد. به نظر می‌رسد ضعف ساختاری الگوریتم‌های فراابتکاری سه‌گانه

مختلف λ از صفر تا یک مورد ارزیابی قرار گرفته و الگوریتم‌ها رتبه‌بندی شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در کلیه بازه‌های λ و مقادیر α محاسبه شده، رتبه الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری یک بوده و دو الگوریتم جستجوی کلاغ و نهنگ در مرتبه‌های دوم و سوم واقع شده‌اند.

همانگونه که در شکل ۷ به وضوح دیده می‌شود در مواقعی که حداکثر نیاز برای تأمین آب اراضی پایین دست وجود دارد، عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری به مراتب بهتر از دو الگوریتم دیگر است، به طوری که مقادیر رهاسازی آب بر اساس الگوریتم گرگ خاکستری انطباق بیشتری با مقادیر نیاز دارد. این مهم نه تنها از افزایش بی‌دلیل خروجی از مخزن در ماه‌هایی که نیاز آبی اراضی پایین دست حداقل بوده، می‌کاهد؛ بلکه به طور متوسط افزایش تأمین نیاز را در ماه‌هایی که نیاز آبی اراضی پایین دست حداکثر است به دنبال دارد.

لذا از آنجایی که الگوریتم گرگ خاکستری مقادیر بهینه بهتری از لحاظ نزدیکی به بهینه مطلق را از خود نشان می‌دهد. این موضوع در کاهش تلفات آب موجود در مخزن بسیار مؤثر بوده، به طوری که می‌توان تابع هدف کوچک‌تری را - با ثابت فرض کردن نیاز آبی حداکثر - در نظر گرفت که میزان رهاسازی از مخزن تا حد امکان به میزان نیاز اراضی پایین دست نزدیک شود و الگوریتم بتواند کلیه نیازهای اراضی پایین دست را جبران کند (رابطه ۲). در این صورت، داشتن حجم ذخیره قابل توجهی

در نهایت مطالعه حاضر که نشانگر برتری الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به دو الگوریتم دیگر بود در حقیقت تداوم تحقیق محققانی نظیر اکبری فرد و همکاران (۳) در سال ۲۰۲۰، قادری و همکاران (۲۰) در سال ۲۰۱۸ و کرمی و همکاران (۹) در سال ۲۰۱۸ و ... بوده که در بخش مقدمه این مقاله به تفصیل درخصوص نتایج تحقیق ایشان بحث شده است.

نتیجه گیری کلی

در پژوهش حاضر، مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ، جستجوی کلاغ و گرگ خاکستری به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری از یک سیستم تک‌مخزنه با تابع هدف تأمین نیازهای آبی پایین‌دست سد گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت به طوری که در مسئله بهینه‌سازی مذکور، تابع هدف به صورت کل کمبود طی دوره بهره‌برداری تعریف و قیود معادله پیوستگی، حجم سرریز، حجم ذخیره و حجم رهاسازی از مخزن بر آن اعمال شد. برای مقایسه میزان همگرایی و نحوه عملکرد الگوریتم‌های مذکور، هر الگوریتم به تعداد ۱۰ مرتبه اجرا و سپس پارامترهای آماری هر الگوریتم محاسبه و این مقادیر با یکدیگر، همچنین با مقدار بهینه مطلق (۱۹/۴۱) حاصل از برنامه ریزی غیرخطی، مقایسه شده و نتایج بیانگر آن است که میانگین پاسخ‌ها در الگوریتم‌های گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ به ترتیب ۹۲، ۸۴ و ۶۷ درصد پاسخ بهینه مطلق بوده و ضریب تغییرات پاسخ‌های به‌دست آمده توسط الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به سایرین به ترتیب به میزان ۲ و ۱/۴۳ برابر کوچک‌تر است. همچنین نتایج حاصل از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره حاکی از آن است که الگوریتم گرگ خاکستری دارای رتبه نخست نسبت به دو الگوریتم دیگر مورد بررسی در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد گلستان است. همچنین محاسبه شاخص‌های مختلف ارزیابی مدل برای الگوریتم‌های سه‌گانه نشان می‌دهد که در تمامی آنها از جمله اطمینان‌پذیری حجمی (۰/۹۴) و زمانی (۰/۹۱)، برگشت‌پذیری (۰/۹۵) و آسیب‌پذیری (۰/۰۹)، عملکرد الگوریتم تکاملی گرگ

باعث ایجاد مقادیری غیرطبیعی شده است. ولی با اندکی دقت می‌توان دریافت که با وجود ضعف موجود، مجدد این الگوریتم گرگ خاکستری است که مقادیری نزدیک به بهینه مطلق را از خود نمایان می‌کند.

با عنایت به بررسی صورت گرفته بر اساس مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مطرح شده در این مقاله از آنجایی که معیارهای ارزش‌یابی شامل معیارهای ارزیابی مدل (اعم از اطمینان‌پذیری حجمی و زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) به‌همراه تابع هدف حاصل از بهینه‌سازی بود. الگوریتم جستجوی کلاغ مقادیر بهینه بهتری نسبت به الگوریتم نهنگ از خود نشان داده است. که این موضوع حتی با مقایسه مقادیر مندرج در جدول ۲ به طور ضمنی نیز قابل ارزیابی بود. چرا که الگوریتم جستجوی کلاغ در معیارهای اطمینان‌پذیری حجمی و زمانی، برگشت‌پذیری مقادیر بیشتر و در معیارهای آسیب‌پذیری و تابع هدف هم مقادیر کمتری را نسبت به الگوریتم نهنگ از خود نشان داده که این مهم به‌نوعی مبین عملکرد بهتر الگوریتم جستجوی کلاغ است. جالب توجه است که این برتری الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به نهنگ در شکل ۶ به طرز واضحی خودنمایی می‌کند. همان‌گونه که گفته شد علت برتری الگوریتم جستجوی کلاغ نسبت به نهنگ را می‌توان توانایی این الگوریتم در یافتن مقادیر بهینه نزدیک تر به مقادیر بهینه مطلق جستجو کرد.

شکل ۱۲، نشان می‌دهد که نتایج الگوریتم گرگ خاکستری درخصوص ذخیره مخزن با روش برنامه‌ریزی غیرخطی حاصل از نرم افزار GAMS انطباق بیشتری داشته و همچنین حجم مخزن سد گلستان در طول دوره بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به سایر الگوریتم‌ها افزایش یافته و همین افزایش حجم مخزن باعث می‌شود تا مقادیر خروجی از سد و تأمین نیاز اراضی پایین‌دست افزایش یافته و یا به عبارتی تفاوت مجموع مربعات انحراف مقدار تقاضای آب پایین‌دست از میزان رهاسازی آب بیشتر، کمینه شود.

از سایر الگوریتم‌ها قوت یافته باشد (۱۶)، به طوری که چنین ویژگی منحصر به فردی در هیچ یک از دو الگوریتم دیگر دیده نمی‌شود. در نهایت، مقایسه مقادیر ذخیره مخزن به وسیله الگوریتم‌های سه‌گانه نیز حاکی از انطباق مناسب‌تر نتایج الگوریتم گرگ خاکستری در خصوص ذخیره مخزن با روش برنامه‌ریزی غیرخطی است. به طوری که حجم مخزن سد گلستان در دوره بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به سایر الگوریتم‌ها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر ارتقای عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری را می‌توان در افزایش فضای جستجو و عدم گرفتادان در بهینه‌های محلی دانست (۱۶). لذا برای مدیریت بهینه منابع آب و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد گلستان توصیه می‌شود از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در برآورد میزان رهاسازی از مخزن استفاده شود تا ضمن کنترل سیلاب‌های محتمل در فصول سیلابی سال و جلوگیری از هدررفت آب با استفاده بهینه از این ذخایر ارزشمند هستی در نیاز آبی اراضی کشاورزی پایین‌دست - که بیشترین سهم مصرف آب سطحی را از آن خود کرده‌اند- تأمین کنند. در نهایت پیشنهاد می‌شود که با بررسی الگوریتم‌های هیبریدی و سایر الگوریتم‌های نوظهور کارایی آنها نیز در زمینه مدیریت منابع آب به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گیرد.

خاکستری بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده و الگوریتم‌های جستجوی کلاغ و نهنگ پس از آن به ترتیب با برآورد حدود ۹۰ و ۷۷ درصد مقادیر شاخص‌های مختلف ارزیابی - نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری - در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

یکی از مشکلات و معضلاتی که الگوریتم‌های فراابتکاری با آن دست و پنجه نرم می‌کنند، سعی در به دام نیفتادن در بهینه‌های محلی و همگرایی زودرس است چرا که همگرایی زودرس باعث عدم انجام فرایند بهینه‌سازی به طور کامل می‌شود (۱۶). همانگونه که در تحقیقات موسوی و همکاران (۱۶) به صراحت بیان شده یکی از پارامترهایی که محققین و مبتکران الگوریتم‌های فراابتکاری سعی در توسعه آن دارند، وسعت دادن به فضای جستجوی عوامل جستجوگر الگوریتم و به نوعی توسعه فاز اکتشاف هستند. هرچه فاز اکتشاف بیشتر توسعه یابد احتمال گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی کمتر می‌شود. ولی چیزی که فاز اکتشاف را محدود می‌سازد فاز استخراج است به طوری که نیاز است الگوریتم به نوعی کدنویسی شود تا تعادل به نسبت مناسبی بین دو فاز اکتشاف و استخراج ایجاد شود. به نظر می‌رسد که در الگوریتم گرگ خاکستری به لحاظ هماهنگی و همکاری سه دسته گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا، الگوریتم از قدرت بیشتری به‌ویژه در فاز استخراج برخوردار باشد (روابط ۳۳-۳۱) و تعادل بین فاز اکتشاف و استخراج بیش

منابع مورد استفاده

1. Afshar, A., M. J. Emami Skardi and F. Masoumi. 2015. Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: An imperialist competitive algorithm approach. *Engineering Optimization* 47(9): 1208-1225.
2. Akbari Fard, S., K. Qaderi and B. Bakhtiari. 2015. Codification of optimal operation policies of reservoirs in the Gorganrood basin using Wolf Search Algorithm (WSA). *Journal of Irrigation and Water Engineering* 6(21): 75-90. (in Farsi).
3. Akbarifard, S., K. Qaderi and M. R. Sharifi. 2020. Data on Optimization of the Karun-4 Hydropower Reservoir Operation Using Evolutionary Algorithms. *Data in Brief* 29: 105048. DOI: 10.1016/j.dib.2019.105048.
4. Askarzadeh, A. 2016. A novel meta-heuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. *Computer Structure* 169: 1-12.
5. Bozorg Haddad, O., I. Karimirad, S. Seifollahi Aghmiani and H. Loáiciga. 2014b. Development and application of the bat algorithm for optimizing the operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(1): 66-80.
6. Bozorg Haddad, O., M. Moravej and H. Loáiciga. 2014a. Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 141(5): 570-584.

7. Fallah Mehdipour, E. and O. Bozorg. 2018. Optimization of multipurpose reservoir operation with application particle swarm optimization algorithm. *Journal of Water and Wastewater* 23(4): 97-105. (In Farsi).
8. Ho, V. H., I. Kougiyas and J. H. Kim. 2015. Reservoir operation using hybrid optimization algorithms. *Global NEST Journal* 17(1): 103-117.
9. Karami, H., M. Ehteram, S. F. Mousavi, S. Farzin, O. Kisi and A. El-Shafie. 2018. Optimization of energy management and conversion in the water systems based on evolutionary algorithms. *Neural Computing and Applications* 31(10): 5951-5964.
10. Liu, D., C. Liu, F. Qiang, L. Tianxiao, K. M. Imran, F. Songcui and M. Abrar. 2017. ELM evaluation model of regional groundwater quality based on the crow search algorithm. *Ecological Indicators* 81: 302-314.
11. Mansouri, R. and H. Torabi. 2015. Application of differential evolution (DE) algorithm for optimizing water distribution networks (case study: Ismail Abad pressurized irrigation network). *Journal of Water and Soil* 25(4.2): 81-95. (in Farsi).
12. Mays, L. W. and Y. K. Tung. 2002. Hydro-systems Engineering and Management. Business & Economics press. Appendix 3A GAMS (*General Algebraic Modeling System*).
13. Mirjalili, S. and A. Lewis. 2016. The Whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software* 1(95): 51-67.
14. Mirjalili, S. A. and S. M. Mirjalili. 2014. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software* 69: 46-61.
15. Mohammadi, M., S. F. Mousavi, S. Farzin and H. Karami. 2019. Optimal operation of dam reservoir using whale optimization algorithm and its hybrid with genetic algorithm based on multi-criteria decision making. *Eco Hydrology Journal* 6(2): 281-293. (in Farsi).
16. Mousavi, S. M. R., M. Khoisheh, A. Ghamgsar and M. J. Qalandari. 2016. Classification of sonar data using gray wolf optimization algorithm. *Electronic Industries Quarterly* 7(1): 45-62. (in Farsi).
17. Neumaier, A., O. Shcherbina and W. Huyer. 2005. A comparison of complete global optimization solvers. *Mathematical Programming* 103(2): 335-356.
18. Noori, M. 2015. Multi-reservoir multi-objective water resources systems management using optimization model terms of climate change. Ph.D Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, I.R. Iran. (In Farsi).
19. Pdamallu, C. S., L. Ozdamar, T. Csendes and T. Vinko. 2008. Efficient interval partitioning for constrained global optimization. *Journal of Global Optimization* 42(3): 369-384.
20. Qaderi, K., S. Akbarifard, M. R. Madadi and B. Bakhtiari. 2018. Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering* 171(4):179-190.
21. Sadeghi Moghaddam, M., H. Aghaie Kesteli and M. Mahmoud Janlou. 2019. Model designing and addressing a fixed charge transportation problem considering discount assumptions. *Transportation Engineering Quarterly* 10(3): 635-655. (in Farsi).
22. Yaseen, Z. M., M. F. Allawi, H. Karami, M. Ehteram, S. Farzin, A. N. Ahmed, S. Binti Koting, N. Syuhadaa Mohd, W. Z. Binti Jaafar, H. A. Afan and A. El-Shafie. 2019. A hybrid bat-swarm algorithm for optimizing dam and reservoir operation. *Neural Computing and Applications* 31(12): 8807-8821.

Optimization of Reservoir Dam Operation Using Gray Wolf, Crow Search and Whale Algorithms Based on the Solution of the Nonlinear Programming Model

A. Donyaii, A. Sarraf* and H. Ahmadi¹

(Received: May 02-2020 ; Accepted: July 15-2020)

Abstract

Optimizing the water resources operation, especially in the agricultural sector, which has the largest share in the water resources operation, is extremely important. Therefore, in this research, while introducing Whale, Gray Wolf and Crow Search Optimization Algorithms, their performance in the optimum operation of Golestan single-reservoir system Dam was evaluated with the aim of providing water demand for the downstream lands based on reliability, Reversibility, and vulnerability indices. In this optimization problem, the objective function was defined as the minimization of the total deficiency during the operation period. Meanwhile, the constraints of continuity equation, overflow, storage and reservoir release volume were applied to the objective function of the problem. Then, the results were compared with the absolute optimal value based on the nonlinear programming method obtained from GAMS software; finally, a multi-criteria decision-making model was developed to rank the optimization algorithms in terms of performance. The absolute optimal response obtained by the GAMS software based on the nonlinear programming method was 19.41. The results showed that the Gray Wolf algorithm performed better than the other algorithms in optimizing the objective function, so that the average responses in Gray Wolf, Crow Search and Whale algorithms were 92, 84 and 67% of the absolute optimal response, respectively. Furthermore, the Gray Wolf optimization algorithm performs better than the Whale and Crow Search algorithms in all parameters. In addition, the coefficient of variation of the responses obtained by the Gray Wolf algorithm is 2 and 1.43 times smaller than that in the Whale and Crow Search Algorithms, respectively. Finally, the results of the multi-criteria decision-making model showed that the gray wolf algorithm had the first rank, as compared to the other two algorithms studied in solving the problem of the optimal operation of the Golestan dam reservoir.

Keywords: Absolute optimum, Multi-Criteria decision making, Optimal operation of Golestan dam reservoir, Water resource management.

1. Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
Corresponding author, Email: sarraf@riau.ac.ir