

## ارزیابی الگوریتم‌های نهنگ، مگس میوه و فاخته در بهینه‌سازی بهره‌برداری چندهدفه از مخزن سد گلستان مبتنی بر روش تصمیم‌گیری چندمعیاره

علیرضا دنیایی<sup>۱</sup>، دکتر امیرپویا صراف<sup>۲\*</sup>، دکتر حسن احمدی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۷ تاریخ اولین بازنگری: ۹۹/۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۹ صص: ۸۵-۱۰۰

### چکیده

در این پژوهش، پس از معرفی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ، جست و جوی فاخته و مگس میوه عملکرد آن‌ها در قیاس با یکدیگر جهت بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد گلستان به صورت چند هدفه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در این راستا کاهش کمبودهای نیاز آبی اراضی پایین‌دست و مدیریت حجم ذخیره سیلاب به عنوان توابع هدف بهینه‌سازی پس از اعمال محدودیت‌های معادله پیوستگی تعریف شدند. سپس بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل مشتمل بر معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری و نتایج حاکی از الگوریتم‌های پیشنهادی در بهینه‌سازی توابع هدف نسبت به یکدیگر مورد ارزیابی قرار گرفت؛ به طوری که الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ، کمترین مقدار برآوردی در توابع هدف کمینه‌سازی، پایین‌ترین انحراف معیار و بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. همچنین هر دو الگوریتم جستجوی فاخته و نهنگ به مراتب از الگوریتم مگس میوه بهتر عمل نموده و در مدت زمان بسیار کمتری به همگرایی می‌رسند. در صورت مقایسه الگوریتم نهنگ به عنوان کارآمدترین الگوریتم با الگوریتم مگس میوه به عنوان ناکارآمدترین الگوریتم مقادیر شاخص‌های اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری مدل به ترتیب به میزان ۴۴ درصد و ۵۲ درصد افزایش و آسیب‌پذیری آن به میزان ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. مضاف بر این، نتایج حاصل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز حاکی از برتری الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ می‌باشد که این مهم، نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم نهنگ نسبت به سایر الگوریتم‌ها است. لذا الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ از عملکرد و همگرایی مناسب‌تری در مقایسه با سایرین برخوردار بوده و الگوریتم‌های چندهدفه جستجوی فاخته و مگس میوه در رده‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم‌های نهنگ، جست و جوی فاخته و مگس میوه، بهره‌برداری بهینه چندهدفه، کنترل سیلاب و تأمین نیاز پایین‌دست، روش تصمیم‌گیری چند معیاره، مخزن سد گلستان.

<sup>۱</sup> کاندیدای دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

\* نویسنده مسئول مقاله: Email: sarraf@riau.ac.ir

## مقدمه

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها از جمله مسائل مهم در علوم و مهندسی آب است که روش‌های بهینه‌سازی متعددی به منظور حل آن‌ها به کار گرفته شده است. شروع استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن به‌ویژه مخازن سدها با برنامه‌ریزی خطی بوده است. این روش‌ها به ترتیب دارای محدودیت خطی در نظر گرفتن مسائل، گسسته‌سازی و نفرین ابعادی هستند. نفرین ابعادی به مفهوم افزایش نمایی حجم محاسبات با افزایش متغیرهای تصمیم‌گیری است که با ظهور الگوریتم‌های فراکاوشی، بهینه‌سازی سمت و سوی جدیدی یافت. ویژگی الگوریتم‌های فراکاوشی این است که این الگوریتم‌ها نه وابسته به نوع مسئله از نظر خطی یا غیرخطی بودن می‌باشند و نه نیازی به گسسته‌سازی مسئله دارند (رانی و موریرا، ۲۰۱۰). لذا با عنایت به غیرخطی و پیچیده بودن مسئله بهره‌برداری از مخازن، نمی‌توان از هر روش بهینه‌سازی در این زمینه سود جست. از اینروست که استفاده از روش‌های فراکاوشی در این زمینه، بارها به صورت موفقیت‌آمیزی به کار گرفته شده است (حسینی‌موغاری، ۲۰۱۴). با معرفی الگوریتم جستجوی فاخته در سال ۲۰۱۱، استفاده از آن جهت بهینه‌سازی چندهدفه در قیاس با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه دیگر نظیر<sup>۱</sup> (NSGA-II) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن، حاکی از همگرایی بهتر الگوریتم جستجوی فاخته در رسیدن به جبهه پرتو علیرغم سادگی آن بوده است (کاوه و بخشی‌پور، ۲۰۱۶).

حسینی‌موغاری و همکاران (۲۰۱۷) کارایی الگوریتم فاخته را در سامانه‌های منابع آب به منظور استخراج سیاست‌های بهره‌وری بهینه برای یک مخزن با هدف برقرایی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که الگوریتم فاخته نه تنها توانایی بالاتری در رسیدن به جواب بهینه نسبت به الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) از خود نشان می‌دهد بلکه جواب‌های حاصله از آن فاصله کمی را با جواب بهینه مطلق دارد. ظاهر موندهر یاسین و همکاران (۲۰۱۸) از یک رویکرد ترکیبی جدید از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ماهی‌های مصنوعی<sup>۳</sup> (AFSA) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

<sup>۴</sup> (PSOA) برای بهینه‌سازی مخزن کارون ۴، با هدف افزایش تولید انرژی و به حداقل رساندن کمبود آب در پایین‌دست استفاده کردند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های الگوریتم ترکیبی در مقایسه با AFSA و PSOA قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری بالاتر را دارند. فلاح مهدی‌پور و بزرگ حداد در سال ۲۰۱۸، کاربرد الگوریتم<sup>۵</sup> MOPSO را در مسئله بهره‌برداری 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 جواب‌های الگوریتم MOPSO با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف نسبت به<sup>۶</sup> NLP بود. صمدیان‌فرد و همکاران (۲۰۱۹) ضمن بررسی دقت رگرسیون بردار پشتیبان و رگرسیون بردار پشتیبان تنظیم شده با الگوریتم بهینه‌سازی مگس‌میوه<sup>۷</sup> (FOASVR) و درخت مدل<sup>۸</sup> M5 در پیش‌بینی جریان رودخانه در دو ایستگاه حوضه دریاچه ارومیه دریافتند که اگرچه FOASVR و M5 هر دو جریان رودخانه را مطابق با جریان‌های مشاهده‌شده رودخانه پیش‌بینی می‌کنند، اما عملکرد FOASVR نسبتاً بهتر از M5 بود. آن‌ها FOASVR را به‌عنوان روش دقیق پیش‌بینی جریان رودخانه پیشنهاد دادند

بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، یکی از مسائل ضروری در مدیریت منابع آب به‌ویژه آب‌های سطحی به شمار می‌رود (حجتی و همکاران، ۲۰۱۳) و اغلب مسائل تصمیم‌گیری در دنیای واقعی به‌ویژه در زمینه مهندسی و مدیریت منابع آب، مسائل چندهدفه‌ای هستند که تصمیم‌گیری در آن‌ها بر اساس اهداف متفاوت و متضاد انجام می‌شود (پرهیزکاری و مازندرانی‌زاده، ۲۰۱۹). پورطبری و همکاران (۲۰۰۹) جهت ارزیابی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کرج با اهداف تأمین انرژی، تأمین نیاز پایین‌دست، کنترل سیلاب از الگوریتم NSGA-II استفاده نمودند. ایشان جهت ارزیابی پاسخ‌های به‌دست آمده، از معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری فازی استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب الگوریتم NSGA-II بود. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱۶)

<sup>۶</sup> Nonlinear Programming

<sup>۷</sup> Fruit Fly Optimization Algorithm Support Vector Regression

<sup>۸</sup> M5 Model Tree

<sup>۱</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

<sup>۲</sup> Genetic Algorithm

<sup>۳</sup> Artificial Fish Swarm Algorithm

<sup>۴</sup> Particle Swarm Optimization Algorithm

<sup>۵</sup> Multi-objective Particle Swarm Optimization

از آنجاییکه تا به حال در تحقیقات پیشین استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مگس میوه، چندهدفه نهنگ و چندهدفه جستجوی فاخته در بهره‌برداری از مخازن به صورت مقایسه‌ای در حل مسائل چندهدفه تامین نیاز آبی اراضی پایین دست سد و کنترل سیلاب مورد ارزیابی قرار نگرفته است، لذا در این پژوهش از الگوریتم‌های فوق‌الذکر جهت بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد گلستان با رویکرد کاهش کمبودهای نیاز آبی اراضی پایین دست و مدیریت حجم ذخیره سیلاب (با عنوان دوهدف) استفاده شد و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید که در نوع خود، نوآوری محسوب می‌شود

## مواد و روش‌ها

### مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

افق برنامه‌ریزی از مرداد ۱۳۹۰ الی خرداد ۱۳۹۸ به مدت ۹۵ ماه در نظر گرفته شده است. داده‌های ورودی به مدل حجم آورد ماهانه رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای پایین دست سد می‌باشد. میزان رهاسازی از مخزن به عنوان متغیر تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی تعیین شده است. توابع هدف مدل بهینه‌سازی به صورت (۱) کمینه‌سازی کمبود تأمین آب مورد نیاز پایین دست و (۲) کمینه‌سازی حجم مخزن از حجم ایده‌آل برای کنترل سیلاب تعریف شده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

### تابع هدف تأمین نیازهای کل

تابع هدف اول مربوط به تأمین نیازهای پایین دست می‌باشد که به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف مقدار تقاضای آب پایین دست از میزان رهاسازی آب تعریف می‌شود:

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

که در آن  $De_t$  نیاز پایین دست مخزن سد در دوره  $t$ ،  $Re_t$  خروجی سد در دوره  $t$  و  $De_{\max}$  نیاز بیشینه سد گلستان است.

سه تابع هدف اطمینان پذیری، برگشت پذیری و آسیب پذیری تولید انرژی برآبی در مخزن سد کارون 4 را با استفاده از الگوریتم چندهدفه NSGA-II بهینه‌سازی کردند. دشتی و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد الگوریتم تکامل تفاضلی در مقایسه با الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح شده و برنامه ریزی غیرخطی به منظور بهره برداری بهینه از مخزن سد در حوضه دریاچه ارومیه، مورد بررسی قرار دادند. ایشان جهت بررسی عملکرد الگوریتم های مذکور، از شاخص های عملکرد مخزن شامل قابلیت اعتماد، آسیب پذیری و شاخص پایداری مخزن استفاده نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای الگوریتم تکامل تفاضلی در مقایسه با دیگر روش های مورد بررسی در بهره برداری بهینه از سیستم تک مخزن سد علویان بود.

دنیاei و همکاران (۲۰۲۰a) ضمن معرفی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ (MOWOA)، عملکرد آن در مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بوستان با دو هدف کمینه‌سازی کمبودهای نیاز آبی اراضی پایین دست و کمینه‌سازی انحراف از حجم ایده‌آل کنترل سیل طی دوره بهره‌برداری بر اساس روش حل تعارض کالای و اشمورودینسکی ارزیابی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که MOWOA نسبت به NSGA-II از عملکرد بهتری برخوردار بوده و شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل حاکی از آن است که از دیدگاه اطمینان پذیری MOWOA از مقادیر بالاتری (۸۶ درصد) نسبت به الگوریتم NSGA-II برخوردار است. در پژوهشی دیگر در همان سال ضمن مقایسه الگوریتم های بهینه‌سازی گرگ خاکستری، جستجوی کلاغ و نهنگ، عملکرد آن‌ها را در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن سد گلستان با هدف تأمین نیاز آبی اراضی پایین دست، بر اساس شاخص‌های اطمینان پذیری، برگشت پذیری و آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان ضمن اینکه نتایج به دست آمده را با پاسخ بهینه مطلق به دست آمده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی حاصل از نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> مقایسه نمودند؛ از یک مدل تصمیم‌گیری چند معیاره رتبه‌بندی الگوریتم‌ها نیز استفاده نمودند. نتایج نشان داد که الگوریتم گرگ خاکستری در بهینه‌سازی تابع هدف بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌نماید (دنیاei و همکاران، ۲۰۲۰b)

<sup>1</sup> GAMS

### تابع هدف کنترل سیلاب

این تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف حجم مخزن از حجم ایده‌آل برای کنترل سیلاب تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } F_{(\text{Flood Control})} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{S_G - S_t}{S_G} \right)^2 \quad (2)$$

که در این رابطه  $S_G$  حجم ایده‌آل مخزن برای کنترل سیلاب،  $S_t$  حجم مخزن در دوره زمانی  $t$  می‌باشد. معادله پیوستگی نیز از اساسی‌ترین روابط مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{(t+1)} = S_{(t)} + Q_{(t)} - Re_{(t)} - Sp_{(t)} - Ev_{(t)} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $S_{(t)}$  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  $t$  است. سرریز از مخزن قیدهایی را در محاسبات اعمال می‌کند، به طوری که:

$$Sp_t = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - Ev_t - S_{max} & \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Ev_t - S_{max} > S_{max} \\ 0 & \text{if } S_t + Q_t - Re_t - Ev_t - S_{max} \leq S_{max} \end{cases} \quad (4)$$

سایر قیود نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (5)$$

$$Re_{min} \leq Re_t \leq Re_{max} \quad (6)$$

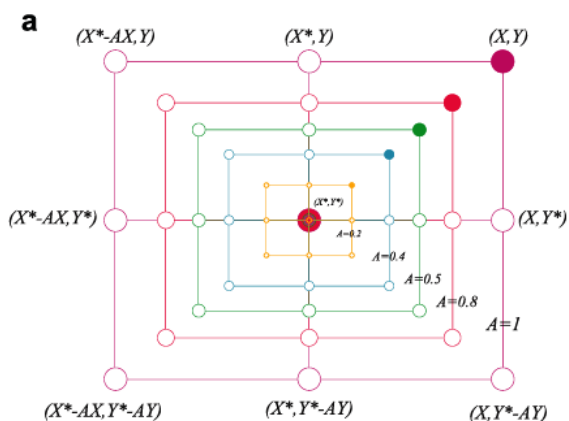
که در این روابط  $S_{min}$  و  $S_{max}$  به ترتیب حجم بیشینه و کمینه مخزن و  $Re_{min}$  و  $Re_{max}$  به ترتیب بیشینه و کمینه حجم قابل رهاسازی از مخزن می‌باشد.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (8)$$

### الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

میرجلیلی و لوییس (۲۰۱۶) برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ<sup>۱</sup> (WOA) را ارائه نمود. این الگوریتم همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری الهام‌گرفته از طبیعت، رفتار اجتماعی نهنگ‌های گوژپشت را به تصویر می‌کشد به طوری که با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های تصادفی شروع به کار می‌کند. با استفاده از سه عملگر محاصره طعمه، روش حمله حباب-تور (مرحله استخراج) و جستجوی طعمه (مرحله اکتشاف) به روزرسانی موقعیت عوامل جستجو در هر تکرار صورت می‌پذیرد. در فاز محاصره طعمه، نهنگ‌ها با فرض اینکه بهترین راه‌حل در حال حاضر طعمه است، طعمه را شناسایی و محاصره می‌کنند (شکل شماره ۱). پس از اینکه بهترین عامل جستجو شناسایی شد، سایر عوامل جستجو مکان خود را نسبت به بهترین عامل به‌روزرسانی می‌کنند (روابط ۷ و ۸).



شکل ۱- روش حمله حباب - تور (مکانیزم محاصره انقباضی)

در روابط (۷) و (۸)،  $t$  تکرار جاری،  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  بردارهای ضرایب،  $\vec{X}^*$  بردار مکان بهترین راه حل به دست آمده در حال حاضر،  $\vec{X}$  بردار مکان،  $I$  علامت قدرمطلق و ضرب نقطه‌ای المان در المان می‌باشد. شایان ذکر است که در صورت وجود راه حل بهتر، نیاز است که در هر تکرار  $\vec{X}^*$  به‌روزرسانی شود. بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{C}$  با روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌گردند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (9)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (10)$$

<sup>1</sup> Whale Optimization Algorithm

نموده و در آن هنگام الگوریتم از روابط ۷ و ۸ تبعیت می نماید و عوامل جستجو (نهنگ‌ها) موقعیت خود را نسبت به بهترین عامل جستجو به روز می نمایند. در صورتیکه اگر مقادیر قدر مطلق A بزرگتر یا مساوی یک باشد الگوریتم در فاز اکتشاف قرار گرفته و نهنگ‌ها در جستجوی طعمه از یکدیگر دور می شوند (روابط ۱۲ و ۱۳) که مدل ریاضی آن به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{D} = \left| C \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}(t) \right| \quad (12)$$

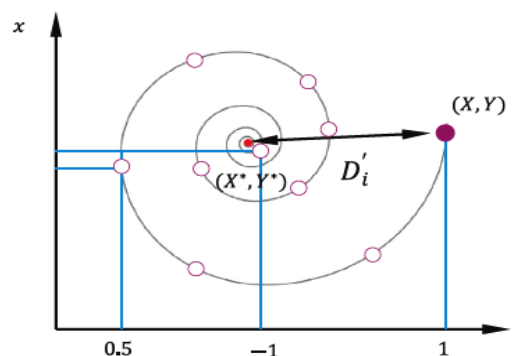
$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (13)$$

که  $\vec{X}_{rand}$  بردار موقعیت تصادفی منتخب از جمعیت جاری بوده و بردار  $\vec{A}$  با مقادیر تصادفی بزرگتر از +۱ و یا کمتر از -۱ به کار گرفته می شود تا عامل جستجو مجبور به دور شدن از نهنگ مرجع شود.

### الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه

پن (۲۰۱۱) برای اولین بار الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه<sup>۱</sup> (FOA) را ارائه نمود. این الگوریتم ساده و روان، بخشی از چالش‌های مرتبط با دشواری‌های الگوریتم‌های پیشین را برطرف نموده است. اهمیت این الگوریتم به این دلیل است که روشی آسان و کارا در بهینه‌سازی را معرفی می کند و با استفاده از آن، مسائل بسیار زیادی را می توان حل نمود. این الگوریتم مشابه بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر که بر اساس الهام از طبیعت طراحی شده‌اند، مبتنی بر رفتار طبیعی موجودات است. الگوریتم FOA مبتنی بر رفتار غذایی مگس میوه است. این حشره نسبت به حشرات دیگر دارای حس بویایی و بینایی قوی تری است، به طوری که می تواند بوی انواع میوه‌ها را در هوا تشخیص دهد. مگس میوه پس از اینکه بوی میوه را در هوا احساس کرد به موقعیت میوه نزدیک می شود. این حشره با استفاده از حس بینایی خود و همکاری با سایرین، موقعیت دقیق میوه را می یابد. این الگوریتم از چندین مرحله تشکیل شده که در زیر به شرح آن پرداخته می شود (حزیم و همکاران، ۲۰۱۴؛ پن، ۲۰۱۲).

که در آن‌ها  $\vec{a}$  به صورت خطی از مقدار ۲ تا صفر طی تکرارها کاهش می یابد و  $\vec{a}$  بردار تصادفی در فاصله صفر تا یک می باشد. در روش حمله حباب - تور، نهنگ‌های گوژپشت در اطراف طعمه در امتداد یک دایره انقباضی و بطور همزمان در مسیر مارپیچی شکل شنا می کنند (شکل شماره ۲). جهت مدل سازی این رفتار فرض می شود که نهنگ با احتمال ۵۰ درصد از بین ساز و کار محاصره انقباضی و یا مدل مارپیچی یکی از آن‌ها را انتخاب می کند تا موقعیت نهنگ‌ها طی فرآیند بهینه سازی به روز شود.



شکل ۲- روش حمله حباب - تور  
(مدل بروزرسانی مارپیچی)

مدل ریاضی این فاز به صورت رابطه (۱۱) تعریف می شود:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

به طوری که  $\vec{D}$  از رابطه (۷) بدست می آید و به فاصله امن نهنگ تا طعمه (بهترین راه حل بدست آمده تاکنون) اشاره دارد، b ثابتی برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی، 1 عددی تصادفی بین -۱ تا +۱ و P عددی تصادفی بین صفر و یک می باشد. ضمناً  $\vec{A}$  با مقادیر تصادفی بین -۱ تا +۱ نشانگر نزدیکی عامل جستجو به نهنگ مرجع است. در جستجو برای طعمه جهت به روزرسانی موقعیت عامل جستجو، به جای استفاده از داده‌های بهترین عامل جستجو، انتخاب تصادفی عامل مدنظر قرار می گیرد. در واقع اگر مقادیر قدر مطلق A کوچکتر از یک باشد الگوریتم در فاز حمله قرار گرفته و نهنگ‌ها اقدام به محاصره طعمه

<sup>1</sup> Fruit Fly Optimization Algorithm

مگس میوه‌ای که آن شدت بو را حس کرده است (bestIndex) نگه داشته‌شده و در این زمان است که حشره می‌تواند با توجه به قدرت بینایی خود به سمت میوه حرکت کند (روابط ۲۱ و ۲۲).

$$\text{Smell}_{\text{best}} = \text{bestSmell} \quad (20)$$

$$X_{\text{axis}} = X(\text{bestIndex}) \quad (21)$$

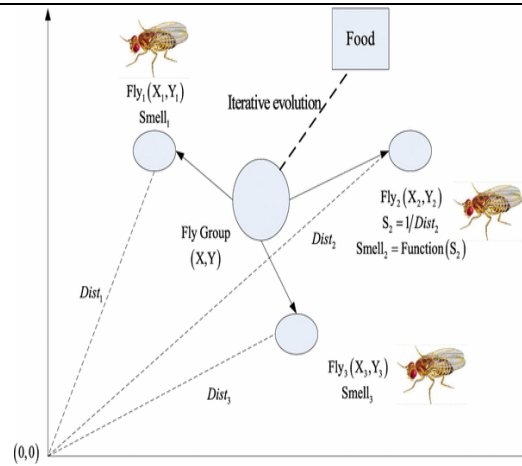
$$Y_{\text{axis}} = Y(\text{bestIndex}) \quad (22)$$

ز- مراحل "ب" تا "و" از بهینه‌سازی تا رسیدن به شرط توقف تکرار می‌شود.

### الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی فاخته

الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی فاخته ۱ یکی از جدیدترین و قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌باشد که تاکنون معرفی شده است. الگوریتم فاخته الهام‌گرفته از روش زندگی پرنده‌ای به نام فاخته است که در سال ۲۰۰۹ به‌وسیله شین او یانگ و دب‌ساوش، توسعه یافته است. این الگوریتم به‌وسیله پرواز levy به جای پیاده‌روی ایزوتروپیک ساده، توسعه یافته است. الگوریتم فاخته بعدها در سال ۲۰۱۱ به‌وسیله رجیبون به طور کامل با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفت (رجیبون، ۲۰۱۱؛ یانگ و دب، ۲۰۱۱).

همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند. جمعیتی که متشکل از فاخته‌هاست. این جمعیت از فاخته‌ها تعدادی تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده میزبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده میزبان دارند، شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها به‌وسیله پرنده میزبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هرچه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست بوده و نجات یابند، به همان اندازه سود (تمایل) بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند، پارامتری خواهد بود که الگوریتم فاخته قصد بهینه‌سازی آن را دارد (شکل شماره ۴).



شکل ۴- الگوریتم جست و جوی غذای مگس میوه (وانگ، ۲۰۱۵)

الف- موقعیت مگس میوه به‌صورت تصادفی مقداردهی می‌شود.

ب- جهتی تصادفی و مسافتی برای جست‌جوی غذا با استفاده از حس بویایی مگس تعریف می‌شود:

$$X_1 = X_{\text{axis}} + \text{Random Value} \quad (14)$$

$$Y_1 = Y_{\text{axis}} + \text{Random Value} \quad (15)$$

ج- فاصله تا مبدا (Dist) و شدت بو (S) محاسبه شده، به‌طوری که این دو مقدار نسبت عکس با هم دارند.

$$\text{Dist}_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (16)$$

$$S_i = 1/\text{Dist}_i \quad (17)$$

د- مقدار شدت بو در تابع برازندگی جایگزین گردیده و سپس شدت بوی موقعیت موجود (Smell<sub>i</sub>) بدست می‌آید.

$$\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i) \quad (18)$$

ه- یافتن مگس میوه با بیشترین شدت بو (یافتن بیشترین مقدار) صورت می‌پذیرد.

$$[\text{bestSmellbestIndex}] = \text{Max}(\text{Smell}) \quad (19)$$

در واقع سمت راست رابطه ۱۹ نشانه بیشترین بو و سمت چپ رابطه نشانگر مگسی است که بیشترین بو را حس کرده است.

و- اگر شدت بو در هر تکرار بیشتر از مقدار کنونی باشد (رابطه ۲۰)، آنگاه بیشترین مقدار شدت بو و مختصات

این الگوریتم از ترکیب متعادل بین جست و جوی محلی و جست و جوی اکتشافی منطقه‌ای که هر دو به صورت تصادفی اتفاق می‌افتند استفاده می‌کند. به طوری که به وسیله پارامتر Pa قابل کنترل است. همچنین جست و جوی محلی تصادفی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

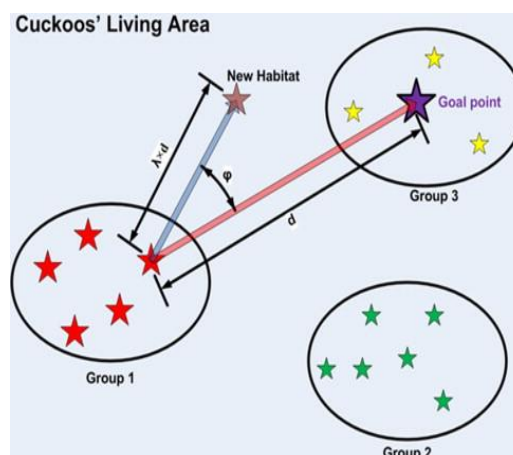
$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \otimes H(p_a - \varepsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (23)$$

که در آن،  $x_j^t$  و  $x_k^t$  دو راه حل متفاوت بوده که به صورت تصادفی انتخاب می‌گردند.  $H(u)$  تابع هوی ساید،  $\varepsilon$  یک عدد تصادفی منتج از توزیع یکنواخت و  $s$  اندازه پیمایش می‌باشد. درحالی که جستجوی تصادفی منطقه‌ای به واسطه پرواز لوی صورت می‌پذیرد که در زیر به رابطه آن اشاره می‌شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha L(s, \lambda) \quad (24)$$

$$L(s, \lambda) = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi \lambda / 2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad \begin{matrix} (s \\ >> s_0 \\ > 0) \end{matrix} \quad (25)$$

در رابطه فوق  $L(s, \lambda)$  بیانگر اندازه پیمایش و یا به عبارتی مقیاس جستجو است که ارتباط تنگاتنگ با منافع مسئله دارد. در بسیاری از موارد، می‌توان  $\alpha = O(L/10)$  در نظر گرفت به طوری که  $L$  معیاری نشانگر منافع مسئله بوده، درحالی که در دیگر موارد نظیر  $\alpha = O(L/100)$  می‌توان عملکرد مؤثرتری را از  $\alpha$  انتظار داشت چرا که از پرواز تا نواحی دور دست جلوگیری می‌نماید. از دیدگاه احتمال، رابطه ۲۵ ضرورتاً یک رابطه استوکاستیک جهت جستجوی تصادفی محسوب می‌شود. عموماً یک جستوی تصادفی می‌تواند شامل یک زنجیره مارکف باشد که مکان بعدی آن به مکان فعلی (بخش اول از رابطه ۲۵) و احتمال تدریجی (بخش دوم از رابطه ۲۵) مربوط است. بنابراین، یک بخش مهم و اساسی از راه‌حل‌های جدید می‌بایست از تصادفی‌سازی جستجوها تأمین شده و مکان آن‌ها بایستی به میزان کافی از راه‌حل‌های موجود دور بوده تا اینکه سیستم در بهینه‌های محلی، گیر نیفتد (یانگ و دب، ۲۰۰۹). مطالعات اخیر حکایت از کارایی بسیار خوب الگوریتم جست و جوی فاخته نسبت به سایر الگوریتم‌ها نظیر PSO و GA دارد (یانگ و دب، ۲۰۰۹).



شکل ۴- مهاجرت یک نمونه فاخته به سمت زیستگاه هدف

در فرآیند مدل‌سازی الگوریتم جستجوی فاخته، چند قانون را می‌بایست در نظر گرفت:

- ۱- هر فاخته در یک زمان مشخص تنها یک تخم می‌گذارد و آن را در لانه‌های پرند میزبان به صورت تصادفی قرار می‌دهد.
- ۲- لانه‌ای که حاوی تخم‌هایی با کیفیت بالا هستند، به‌عنوان بهترین لانه جهت انتقال به نسل‌های بعدی در نظر گرفته می‌شود.
- ۳- تعداد لانه‌های پرند میزبان ثابت در نظر گرفته شده و آن تعداد از تخم‌های فاخته که به وسیله پرند میزبان شناسایی می‌شوند دارای احتمال  $Pa[0,1]$  می‌باشند. در این صورت پرند میزبان یا لانه را ترک کرده و یا اینکه تخم بیگانه را از لانه خارج می‌سازد.

روش کار الگوریتم را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

- الف- هر تخم در هر لانه نشانگر یک راه حل است.
  - ب- هر فاخته تنها می‌تواند یک عدد تخم بگذارد که بیانگر یک راه حل است.
  - ج- هدف الگوریتم استفاده از راه حل بهتر و جایگزینی آن با راه حل نسبتاً بدتر می‌باشد.
- واضح است که این الگوریتم می‌تواند شامل موارد بسیار پیچیده‌تری باشد که در آن هر لانه حاوی تعداد زیادی تخم‌ها که هر کدام از آن‌ها بیانگر یک سری از راه حل‌هاست. بنابراین، ساده‌ترین راهکار زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هر لانه حاوی تنها یک تخم فاخته باشد. در این صورت، هیچ تمایزی بین تخم‌ها و لانه‌ها وجود ندارد.

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها

عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های اطمینان-پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی می‌شوند. برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی ابتدا پارامتر  $C_t$  به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_t = \left( \frac{S}{D} \right)_t \quad (26)$$

که در آن  $S$  میزان تأمین،  $D$  میزان نیاز،  $t=1, \dots, T$  طول دوره شبیه‌سازی است. در یک سیستم زمانیکه  $C_t$  در بین حد بالا و پایین محدوده قابل قبول واقع شود، آنگاه سیستم در حالت مطلوب قرار گرفته و در غیر این صورت، سیستم در حالت شکست قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر حدود بالا و پایین محدوده قابل قبول  $C_t$  به ترتیب یک و  $0/8$  در نظر گرفته شده است.

- شاخص اطمینان‌پذیری ( $R_E$ ): احتمال موفقیت سیستم طی دوره بهره‌برداری را نشان می‌دهد (نبی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۳). اطمینان‌پذیری عبارت است از تعداد دفعاتی که  $C_t$  در حالت مطلوب قرار دارد نسبت به کل دوره شبیه‌سازی (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵).  
- برگشت‌پذیری ( $R_S$ ): سرعت بازگشت از حالت شکست به حالت مطلوب را نشان می‌دهد (نبی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۳). برگشت‌پذیری عبارت است از تعداد دفعاتی که  $C_t$  از حالت شکست به حالت مطلوب می‌رسد نسبت به کل مقادیر شکست (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵)

- آسیب‌پذیری ( $V_t$ ): شدت بزرگی شکست سیستم را نشان می‌دهد (نبی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۳). آسیب‌پذیری عبارت است از مجموع مقادیر  $C_t$  در حالت شکست نسبت به تعداد کل مقادیر  $C_t$  در حالت شکست (حافظ‌پرست و همکاران، ۲۰۱۵).

- پایداری ( $S_I$ ): برای پایداری شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری حداکثر و آسیب‌پذیری حداقل است (ساندوال سولیس و همکاران، ۲۰۱۱).

$$S_I = \sqrt[3]{R_E \times R_S \times (1 - V_{IJ})} \quad (27)$$

در پژوهش حاضر، عملکرد مدل‌های مختلف بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه مگس‌میوه، جستجوی فاخته و نهنگ بر اساس

شاخص‌های فوق‌الذکر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و بر این اساس مدل‌های مختلف رتبه‌بندی شدند.

### روش آنتروپی شانون برای وزن‌دهی شاخص‌ها

روش آنتروپی (Entropy) یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن معیارها بر اساس ماتریس معیار-گزینه می‌باشد. این روش در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور ارائه شد. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (پارسامهر و خسروانی، ۲۰۱۷).

#### این روش دارای پنج مرحله است:

مرحله اول: ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود که در آن ستون‌ها معرف معیار و سطرها بیانگر گزینه‌ها هستند.

مرحله دوم یا نرمال‌سازی ماتریس؛ منظور از نرمال‌سازی این است که درایه هر ستون بر مجموع آن ستون تقسیم شود. هر درایه نرمال شده  $P_{ij}$  نامیده می‌شود.

مرحله سوم: محاسبه آنتروپی هر شاخص: آنتروپی  $E_j$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد و  $k = 1/\ln m$  به عنوان مقدار ثابت مقدار  $E_j$  را بین صفر و یک نگه می‌دارد.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m (P_{ij} * \ln P_{ij}) \quad (28)$$

مرحله چهارم: در ادامه مقدار  $d_j$  (درجه انحراف) محاسبه شده که بیان می‌کند شاخص مربوطه ( $d_j$ ) به چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد.

$$d_j = 1 - E_j \quad (29)$$

مرحله پنجم: مقدار وزن  $W_j$  محاسبه می‌گردد. در واقع وزن معیار برابر با هر  $d_j$  تقسیم بر مجموع  $d_j$  ها می‌باشد.

### تکنیک تاپسیس (TOPSIS)

روش تاپسیس یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخص‌هاست که به رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌پردازد. در این روش از دو مفهوم "حل ایده‌آل" و "شباهت به حل ایده‌آل" استفاده شده است. حل ایده‌آل همانگونه که از اسمش پیداست، حلی است که از هر جهت بهترین باشد که عموماً در عمل وجود ندارد. به منظور اندازه‌گیری شباهت یک



$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^-)^2} \quad (31)$$

#### ۶- محاسبه شاخص شباهت و رتبه‌بندی

**گزینه‌ها:** شاخص شباهت نشان دهنده امتیاز هر گزینه است و براساس رابطه زیر محاسبه می شود هرچقدر این شاخص به عدد یک نزدیکتر باشد، نشان از برتری آن گزینه می‌باشد.

$$cl_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (32)$$

#### منطقه مطالعه شده و اطلاعات آماری

سد مخزنی گلستان بر روی رودخانه گرگانرود در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر گنبد احداث شده است. 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، تأمین نیازهای آبی بخش صنعت،

حفاظت‌های زیست‌محیطی، بهبود عملکرد فعلی شبکه آبیاری و زهکشی سد و شمشیر، افزایش عمر مفید باقیمانده این سد از ۲۵ به ۴۰ سال و کنترل و مهار سیلاب بوده است. این حوضه در محدوده طول جغرافیایی ۵۴°۰۰' تا ۵۶°۲۹' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶°۳۶' تا ۳۷°۴۷' شمالی واقع شده است و از شمال و شرق به حوضه رودخانه اترک و از جنوب به حوضه های آبریز کویر نمک و از جنوب غربی به حوضه رودخانه نکا مطابق شکل شماره (۵) می-باشد.

ظرفیت مخزن سد در ابتدای بهره برداری حدود ۸۶ میلیون متر مکعب بوده که با توجه به نقش مهم ذخیره سازی سد گلستان در مهار سیلاب سال ۱۳۸۰، حجم ذخیره سد از ۸۶ به ۵۰ میلیون مترمکعب کاهش یافت. حجم مخزن در تراز نرمال ۴۸ میلیون متر مکعب و در تراز سرریز ۸۶ میلیون متر مکعب بوده، حجم آب قابل تنظیم ۱۰۱ میلیون متر مکعب و حجم رسوبات موجود در مخزن دو میلیون متر مکعب برآورد می‌گردد. بر این اساس حداکثر نیاز آبی اراضی پایین دست سد گلستان بالغ بر ۱۲۵ میلیون متر مکعب بوده که از حجم قابل تنظیم سالانه آن کمی بیشتر است.

طرح (یا گزینه) به حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل، فاصله آن طرح (یا گزینه) از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل اندازه‌گیری می‌شود (فلاچیو همکاران، ۲۰۱۷). سپس گزینه‌ها بر اساس نسبت فاصله از حل ضد ایده‌آل به مجموع فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند. جهت پیاده‌سازی و انجام روش تاپسیس گام‌های زیر اجرا می‌شوند (پهزاد، ۲۰۱۷).

۱- **تشکیل ماتریس تصمیم:** این روش شامل یکسری معیار و گزینه می‌باشد. ماتریس تصمیم ماتریسی است که معیارها در ستون‌ها قرار گرفته و گزینه‌ها در سطرها می‌باشند.

#### ۲- بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم (نرمال-)

**سازی ماتریس تصمیم):** بی‌مقیاس کردن در روش تاپسیس با استفاده از روش نرم صورت می‌گیرد و به این صورت انجام می‌شود که هر درایه بر جذر مجموع مربعات درایه‌های آن ستون معیار تقسیم می‌شود. در این گام در واقع ماتریس تصمیم، تبدیل به یک ماتریس بی‌بعد می-شود.

#### ۳- تعیین ماتریس بی‌مقیاس وزن دار: در این گام

باید وزن معیارها که از روش‌های دیگر بدست آمده در ماتریس نرمال ضرب شده تا ماتریس وزن دار حاصل شود. روش تاپسیس به تنهایی قادر به محاسبه وزن معیارها نبوده و بنابراین باید از روش‌های دیگر نظیر AHP، آنتروپی و ... وزن معیارها را محاسبه و به‌عنوان ورودی به این روش وارد نمود.

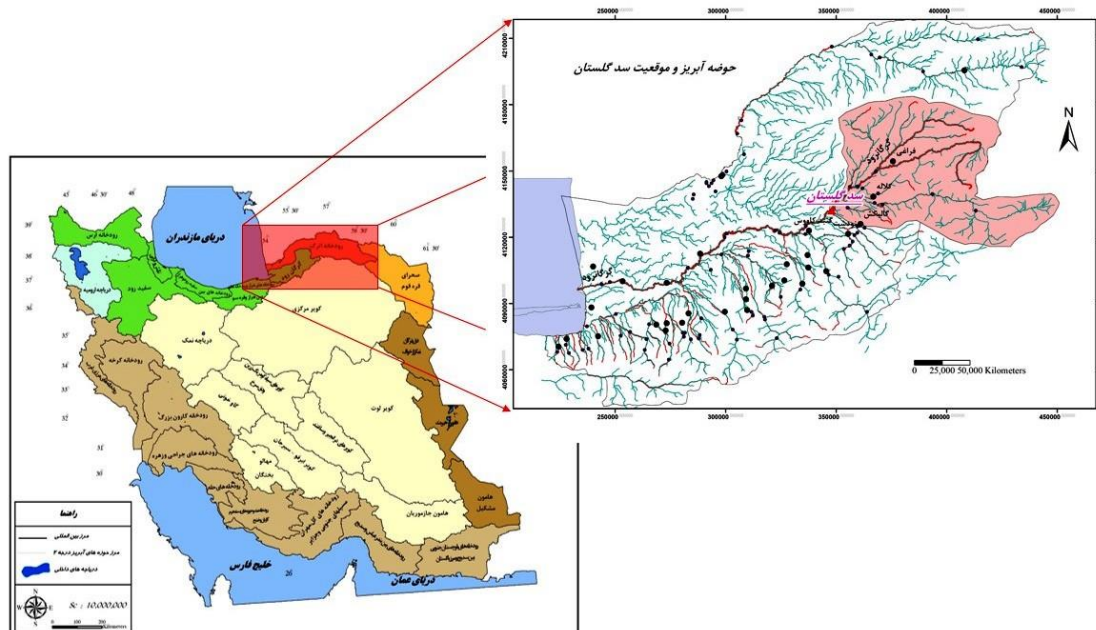
#### ۴- یافتن حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل: در این

قسمت باید نوع معیارها مشخص شود. معیارها یا جنبه مثبت دارند یا منفی. معیارهای مثبت، معیارهایی هستند که افزایش آن‌ها باعث بهبود در سیستم شده و حل ایده‌آل آن برابر با بزرگترین درایه ستون معیار و ضد ایده‌آل؛ برابر با کوچکترین درایه سلولستون معیار است. این مهم برای معیارهای منفی بالعکس می‌باشد.

#### ۵- محاسبه فاصله از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل:

در این گام بر اساس رابطه زیر، فاصله هر گزینه از ایده‌آل مثبت و منفی آن محاسبه می‌شود.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - A_j^+)^2} \quad (30)$$



شکل ۵- موقعیت سد گلستان در حوضه آبریز گرگانرود

### بحث و نتیجه گیری

گرفت جستجوی فاخته بسیار زیادتر از سایر الگوریتم‌ها است. نتایج حاصل از آن با ۱۰ مرحله اجرا و ۱۰۰ تکرار در هر مرحله برای هر یک از الگوریتم‌ها در مجموع ۳۰۰۰ مرتبه ارزیابی هر تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول شماره ۲). نتایج حاصل ارزیابی فوق‌الذکر حاکی از آن است که الگوریتم‌های پیشنهادی در بهینه‌سازی توابع هدف نسبت به یکدیگر متفاوت عمل می‌کنند. به طوری که الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ با کمترین مقدار برآوردی در توابع هدف و پایین‌ترین انحراف معیار، بهترین عملکرد را داراست. پس از آن، الگوریتم‌های جستجوی فاخته و مگس میوه به ترتیب رتبه‌های دوم و سوم را از آن خود می‌کنند. ضمناً الگوریتم جستجوی فاخته مدت زمان بیشتری را جهت انجام فرآیند بهینه‌سازی صرف می‌کند. به طوری که این مسأله را می‌توان به افزایش تعداد پارامترهای تنظیمی این الگوریتم، نسبت به سایر الگوریتم‌ها نسبت داد.

از آنجایی که مقدار مطلوب پارامترهای تنظیمی الگوریتم‌ها با توجه به نوع مسأله متفاوت می‌باشد و به دامنه داده‌ها و پیچیدگی مسائل بستگی دارد، تغییر هر یک از آن‌ها زمان اجرای الگوریتم و حتی مقادیر جواب بهینه توابع هدف را تغییر می‌دهد. به همین جهت مقادیر عددی مناسب پارامترهای الگوریتم‌های چندهدفه بهینه‌سازی مگس میوه، جست و جوی فاخته و نهنگ در بهینه‌سازی توابع هدف مخزن سد گلستان را که با روش آزمون و خطا تنظیم شده‌اند در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول شماره ۱ مشخص است که تعداد پارامترهای تنظیمی الگوریتم جهت بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فوق‌الذکر، کدنویسی الگوریتم‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB R2015 صورت

جدول ۱ - مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته، مگس میوه و نهنگ

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه	جمعیت اولیه	حداکثر تکرار	اندازه پیمایش $\alpha$	نرخ کشف تخم‌های بیگانه
جستجوی فاخته	۵۰	۱۰۰	۰/۲	۰/۲۵
مگس میوه	۵۰	۱۰۰		فاقد مقادیر تعریف شده در الگوریتم
نهنگ	۵۰	۱۰۰		فاقد مقادیر تعریف شده در الگوریتم

جدول ۲ - نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم‌های مگس‌میوه، جستجوی فاخته و نهنگ

الگوریتم	تابع	واحد	ماکزیمم	متوسط	مینیمم	انحراف معیار	تکرار	تعداد اجرای الگوریتم
	کنترل سیلاب	میلیون مترمکعب	۳۰۴۰	۹۲۱/۲	۲۵۴	۹۰۸.۲	۱۰۰	۱۰
مگس‌میوه	تأمین نیاز	میلیون مترمکعب	۱۳۱	۱۱۴	۱۰۶/۷	۸/۱۴	۱۰۰	۱۰
	زمان اجرای الگوریتم	ثانیه	۳۲/۵۲	۳۲/۴۵	۳۲/۴۴	۰/۰۰	۱۰۰	۱۰
	کنترل سیلاب	میلیون مترمکعب	۲۰۱	۱۷۰	۱۳۸	۲۲/۲	۱۰۰	۱۰
جست‌وجوی فاخته	تأمین نیاز	میلیون مترمکعب	۹۴/۹۵	۹۰/۷۷	۸۶/۹۷	۲/۴	۱۰۰	۱۰
	زمان اجرای الگوریتم	ثانیه	۵۲/۹	۵۱/۶۶	۵۱/۶	۰/۷۳	۱۰۰	۱۰
	کنترل سیلاب	میلیون مترمکعب	۶۵/۰۹	۵۵/۸۹	۴۸/۱۸	۵/۵۴	۱۰۰	۱۰
نهنگ	تأمین نیاز	میلیون مترمکعب	۸۸/۰۷	۸۰/۸۹	۷۸/۰۵	۲/۲۹	۱۰۰	۱۰
	زمان اجرای الگوریتم	ثانیه	۳۰/۹	۳۰/۵۹	۳۰/۱۷	۰/۰۰	۱۰۰	۱۰

بالاتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها به خود اختصاص می‌دهد. به طوری که در صورت مقایسه الگوریتم نهنگ به عنوان کارآمدترین الگوریتم با الگوریتم مگس‌میوه به عنوان ناکارآمدترین الگوریتم، مقادیر شاخص‌های اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری مدل به ترتیب به میزان ۴۴ درصد و ۵۲ درصد افزایش و آسیب‌پذیری آن به میزان ۲۳ درصد کاهش می‌یابد که این مسأله نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم نهنگ نسبت به سایر الگوریتم‌ها است (جدول شماره ۳).

در این پژوهش با ثابت فرض کردن پارامترهای طراحی مخزن اعم از حجم بیشینه و کمینه مخزن به بهینه‌سازی بهره‌برداری بهنگام در یک دوره ۹۵ ماهه از مرداد ۱۳۹۰ الی خرداد ۱۳۹۸ پرداخته شد. از این‌رو، قواعد ماهانه بهره‌برداری به صورت چندهدفه مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی و مقایسه الگوریتم‌ها از دیدگاه شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل نشان می‌دهد که از دیدگاه اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری الگوریتم چندهدفه نهنگ (MOWA) مقادیر

جدول ۳ - مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف سد مخزنی گلستان (درصد)

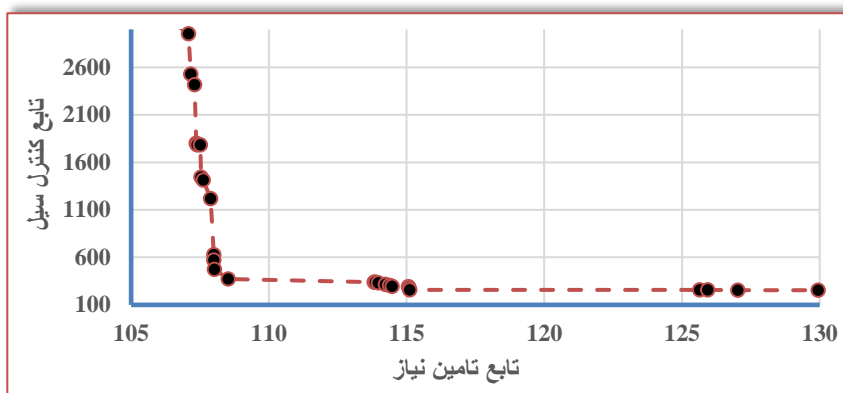
الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه	اطمینان‌پذیری	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری	پایداری
مگس‌میوه	۳۳	۳۱	۶۳	۱/۳
جستجوی فاخته	۴۳	۴۰	۵۰	۲/۹
نهنگ	۵۹	۶۴	۴۸	۶/۵

مگس‌میوه و نهنگ بسیار شبیه یکدیگر است، اما از آنجایی که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقادیر توابع هدف به دست آمده به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ کمتر است می‌توان عملکرد الگوریتم چندهدفه نهنگ را

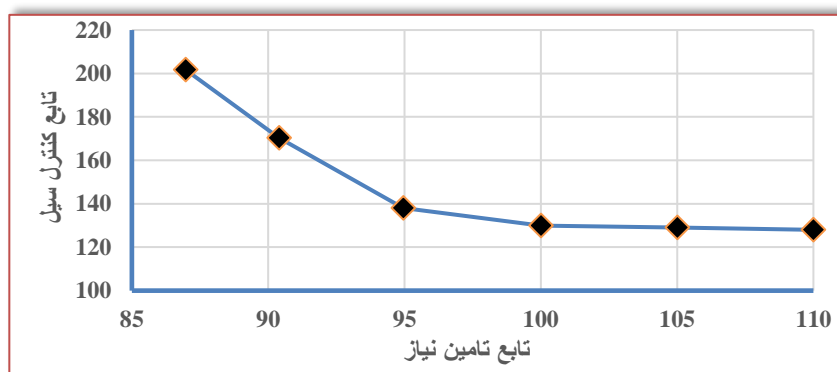
در بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به عنوان جواب به دست می‌آید که منحنی پرتو نامیده می‌شوند. منحنی‌های پرتوی شکل‌های ۶ تا ۸ نشان می‌دهند که اگرچه عملکرد الگوریتم‌های

مناسب‌تر و همگرایی بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برخوردار بوده و الگوریتم‌های چندهدفه جستجوی فاخته و مگس‌میوه در رده‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

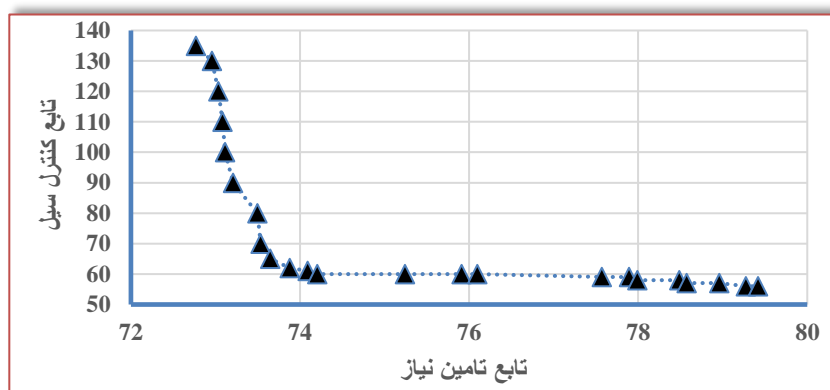
مناسب‌تر تشخیص داد. این برتری در مقایسه با عملکرد الگوریتم چندهدفه جستجوی فاخته نیز دیده می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم منهنگ از عملکرد



شکل ۶- منحنی پرتوی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مگس‌میوه



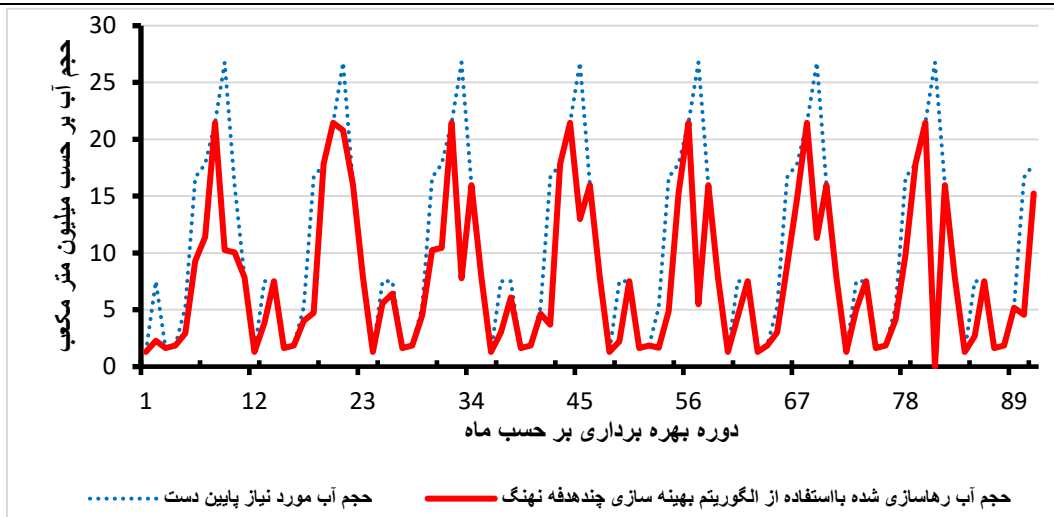
شکل ۷- منحنی پرتوی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته



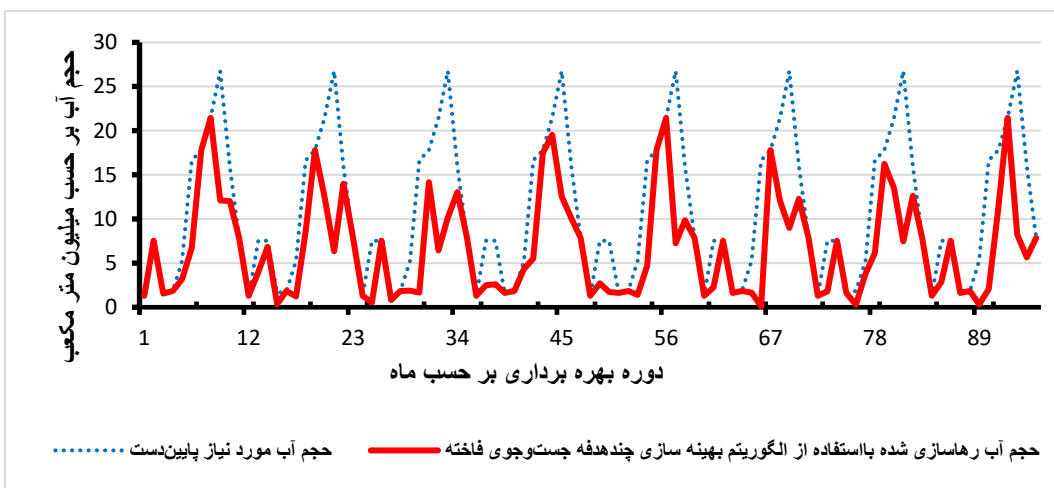
شکل ۸- منحنی پرتوی حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ

توجه به این مطلب که تفاوت میان منحنی نیاز و رهاسازی در ماه‌های مختلف به‌ویژه در ماه‌های اوج نیاز در الگوریتم نهنگ کمتر از سایر الگوریتم‌ها است، می‌توان کارایی بهتر الگوریتم نهنگ را نسبت به سایر الگوریتم‌ها تشخیص داد.

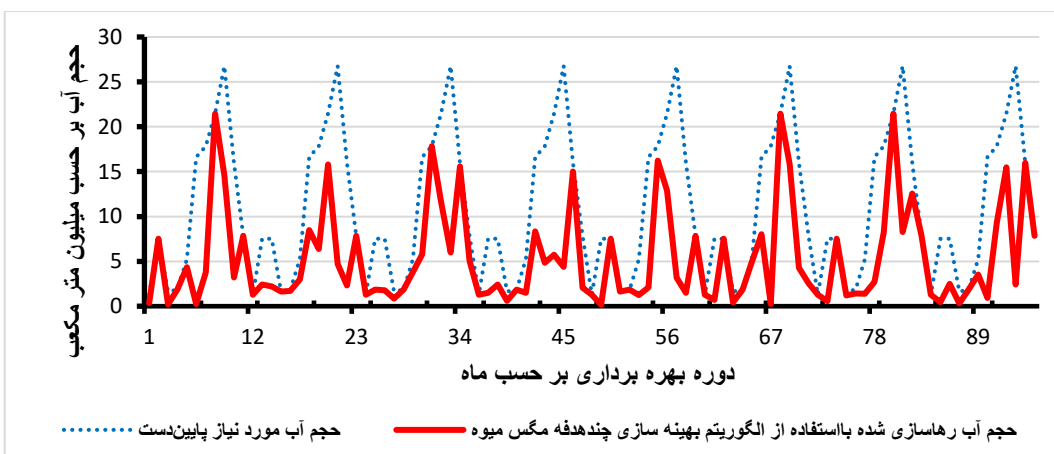
نمودار مقایسه‌ای حجم آب موردنیاز و رهاسازی شده از مخزن سد گلستان در دوره آماری ۹۵ ماهه در الگوریتم‌های سه‌گانه در شکل‌های ۹ الی ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودارهای مربوطه برمی‌آید با



شکل ۹- مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم چندهدفه نهنگ



شکل ۱۰- مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم چندهدفه جست و جوی فاخته



شکل ۱۱- مقایسه حجم آب مورد نیاز و رهاسازی شده از مخزن با استفاده از الگوریتم چندهدفه مگس میوه

جدول ۴- ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش تاپسیس

معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۴	معیار ۵	معیار ۶
گزینه ۱	۰/۲۴۴۴	۰/۲۲۹۶	۰/۳۹۱۳	۰/۱۲۵۰	۰/۸۰۳۱
گزینه ۲	۰/۳۱۸۵	۰/۲۹۶۳	۰/۳۱۰۶	۰/۲۸۱۳	۰/۱۴۸۲
گزینه ۳	۰/۴۳۷۰	۰/۴۷۴۱	۰/۲۹۸۱	۰/۵۹۳۸	۰/۰۴۸۷

مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مگس‌میوه، جستجوی فاخته و نهنگ به ترتیب به‌عنوان گزینه‌های اول تا سوم ماتریس تصمیم‌گیری و شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، پایداری و همچنین توابع هدف (تأمین نیاز و کنترل سیلاب) به‌عنوان معیارهای اول تا ششم انتخاب شده‌اند.

وزن معیارهای حاصل از روش آنتروپی و همچنین مثبت یا منفی بودن معیارها در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دو معیار پایداری و برگشت‌پذیری به‌ترتیب، دارای بیشترین وزن در بین معیارها هستند و سایر معیارها از اوزان کمتری برخوردار هستند. از دیدگاه دیگر می‌توان این‌گونه دریافت که در روش آنتروپی، شاخص‌های ارزیابی مدل از وزن بیشتری نسبت به توابع هدف برخوردار هستند.

جدول ۵- بردار وزن محاسبه‌شده به روش آنتروپی

معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۴	معیار ۵	معیار ۶
مثبت یا منفی بودن معیارها	مثبت	مثبت	منفی	منفی	منفی
وزن معیارها	۰/۱۷۶۲	۰/۱۷۷۷	۰/۱۶۹۴	۰/۱۷۸۱	۰/۱۳۰۱
رتبه	۳	۲	۴	۱	۵

نتایج حاصل از روش تاپسیس بر اساس گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری، نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ در رتبه نخست با حداکثر شباهت قرار داشته و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته و مگس‌میوه در رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند (جدول ۶).

جدول ۶- رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف با روش

## تاپسیس

رتبه‌بندی	شاخص شباهت	گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری
۳	صفر	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مگس‌میوه
۲	۰/۱۳۹	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته
۱	۱	الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ

نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق دنیائی و همکاران (۲۰۲۰)، حسینی موغاری و همکاران (۲۰۱۷) و صمدیان فرد و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد.

## نتیجه‌گیری کلی

از آنجایی که بهره‌برداری بهینه از سدها با اهداف متفاوت صورت می‌پذیرد، در این پژوهش جهت بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد گلستان واقع در حوضه آبریز گرگانرود با رویکرد توأمان کاهش کمبودهای نیاز آبی اراضی پایین‌دست و مدیریت حجم ذخیره سیلاب از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مگس‌میوه، چندهدفه نهنگ و چندهدفه جستجوی فاخته استفاده شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. افق طرح از مرداد ۱۳۹۰ الی خرداد ۱۳۹۸ به مدت ۹۵ ماه در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی به مدل حجم آورد ماهانه رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای

عملکرد بهتر الگوریتم نهنگ نسبت به سایر الگوریتم‌ها است. نتایج حاصل از روش تاپسیس بر اساس گزینه های ماتریس تصمیم‌گیری نیز حاکی از برتری الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بوده الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی فاخته و مگس میوه در رتبه های دوم و سوم قرار می‌گیرند. بنابراین الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ از عملکرد مناسب‌تر و همگرایی بهتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها برخوردار بوده و الگوریتم‌های چندهدفه جستجوی فاخته و مگس میوه در رده‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند.

### Reference

- 1) Behzad, A. 2017. Impact of environmental factors on destruction of archaeological sites by TOPSIS model (case study archaeological sites of Darreh Shahr and Abdanan of Ilam province). 14(53): 1-20.
- 2) Bozorg Haddad, O., Azarnivand, A., Hosseini-Moghari, S. M. and Hugo, A. L. 2016. Development of a Comparative Multiple Criteria Framework for Ranking Pareto Optimal Solutions of a Multiobjective Reservoir Operation Problem, Int. J. Irrigation and Drainage Engineering. 142(7):04016019
- 3) Dashti, R., Sattari, M. and Nourani, V. 2016. Performance evaluation of differential evolution algorithm in optimum operating of Eleviyan single-reservoir dam system, Journal of Water and Soil Research Conservation. 6(3):61-76
- 4) Donyaii, A.R., Sarraf, A.P., and Ahmadi, H. 2020a. Multi-Objective Optimal Utilization Policy of Boostan Dam Reservoir Using Whale and NSGA-II Algorithms Based on Game Theory and Shannon Entropy Method, Iranian water researches Journal, In Press. [in Persian].
- 5) Donyaii, A.R., Sarraf, A.P., & Ahmadi, H. 2020b. Optimization of Reservoir Dam Operation Using Gray Wolf, Crow Search and Whale Algorithms Based on the Solution of the Nonlinear Programming Model Journal of Water and Soil Science, In Press. [in Persian].
- 6) Fallah Mehdipour and A., Bozorg Haddad, A. 2018. Optimization of Multipurpose Dam Reservoirs Using Particle Collection Optimization Method, Journal of Water and Wastewater. 23(4): 97-105.
- 7) Fallahi, F., Beheshti, M. and Marashi, S. 2017. Ranking the environmental sustainability in selected Iranian provinces: A comparison of AHP and TOPSIS methods. J. of Quantitative Economics. 14(1): 97-118.
- 8) Hafezparast, M., Araghinejad, Sh. and Sharifazari, S. 2015. Sustainability Criteria in Assessment of Integrated Water Resources Management in the Aras Basin Based on DPSIR

پایین دست سد بوده است. از آنجایی که هر مسأله بهینه‌سازی از سه بخش اصلی متغیرهای تصمیم، توابع هدف و قیود مسأله تشکیل شده است، در بهینه‌سازی چندهدفه مخزن سد گلستان دو هدف؛ ۱- کمینه‌سازی کمبود آب مورد نیاز پایین دست اعم از کشاورزی، صنعت، آبی‌پروری، تأمین بخشی از نیاز سد و شمشیر و محیط زیست و ۲- کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف حجم مخزن از حجم ایده‌آل برای کنترل سیلاب تعریف شده‌اند. پس از آن، محدودیت‌های معادله پیوستگی به توابع هدف اعمال شدند. سپس عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مگس میوه، چندهدفه نهنگ و چندهدفه جستجوی فاخته براساس معیارهای اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده از جواب‌های بهینه حاکی از آن است که الگوریتم‌های پیشنهادی در بهینه‌سازی توابع هدف نسبت به یکدیگر متفاوت عمل می‌کنند. اگرچه عملکرد الگوریتم‌های چندهدفه مگس میوه و نهنگ بسیار شبیه یکدیگر است اما از آنجایی که مطلوب‌ترین و نامطلوب‌ترین مقادیر توابع هدف برآورد شده به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ کمتر است، عملکرد الگوریتم چندهدفه نهنگ مناسب‌تر تشخیص داده می‌شود. این برتری در مقایسه با عملکرد الگوریتم چندهدفه جستجوی فاخته نیز دیده می‌شود. در خصوص مدت زمان انجام عملیات بهینه‌سازی اگرچه اختلاف فاحشی بین الگوریتم مگس میوه و نهنگ وجود ندارد ولی هر دو به مراتب از الگوریتم جستجوی فاخته بهتر عمل کرده و در مدت زمان بسیار کمتری به همگرایی می‌رسند، به طوری که این اختلاف را می‌توان به افزایش تعداد پارامترهای تنظیمی الگوریتم جستجوی فاخته نسبت به سایر الگوریتم‌ها نسبت داد. از سوی دیگر در صورتیکه الگوریتم نهنگ به عنوان کارآمدترین الگوریتم با الگوریتم مگس میوه به عنوان ناکارآمدترین الگوریتم مقایسه شود، نه تنها مقادیر اطمینان‌پذیری برگشت‌پذیری مدل به ترتیب به میزان ۴۴ درصد و ۵۲ درصد افزایش و آسیب‌پذیری آن به میزان ۲۳ درصد کاهش می‌یابد بلکه با توجه به منحنی پرتو حاصله کاهش ۶۰ درصد حجم مخزن جهت کنترل سیلاب موجب کاهش تأمین نیاز آب پایین دست به میزان ۳۷ درصد می‌گردد. به طوری که این مسأله نشان‌دهنده

- 22) Rani, D. and Moreira, M. 2010. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water resources management*. 24(6): 1107-1138.
- 23) Samadianfard, S., Jarhan, S., Salwana, E., Mosavi, A., Shamshirband, S. and Akib, S. 2019. Support Vector Regression Integrated with Fruit Fly Optimization Algorithm for River Flow Forecasting in Lake Urmia Basin. *Water*. 11, 1934.
- 24) Sandoval-Solis S, McKinney DC. and Loucks DP. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *J Water Resour Plan* 137(5):381-390
- 25) Shannon, C. E., and Weaver, W. 1947. *The mathematical theory of communication*. Champaign, IL: University of Illinois press.
- 26) Wang, L., Yuanlong, S. and Shan, L. 2015. An improved fruit fly optimization algorithm and its application to joint replenishment problems, *Expert Systems with Applications* 42, 4310-4323.
- 27) Yang, X-S. and Deb, S. 2009. Cuckoo Search via Lévy Flights. In: *Proceedings of World congress on nature and biologically inspired computing (NaBIC)*, Coimbatore, India, pp 210-214.
- 28) Yang, X.S. and Deb, S. 2011. Multi-objective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research*.40(6): 1616-1624
- 29) Zaher, M.Y., Karami, H., Ehteram, M., Nuruol Syuhadaa, M., Mousavi, S.F. and Hin, L.S. 2018. Optimization of Reservoir Operation using New Hybrid Algorithm, *Journal of Civil Engineering*. 22(11): 4668-4680.
- Approach. *J. of Water and Soil Conservation*. 22(2): 61-77.
- 9) Hazim, I. and Mesut, G. 2014. Parameter Analysis on Fruit Fly Optimization Algorithm, *Journal of Computer and Communications*, 2, 137-141.
- 10) Hojjati, A., Hoseini, F., Ghahreman, B. and Alizadeh, A. 2013. The comparison of the application of heuristic methods in optimization of multi-objective water resources systems, *Iranian Journal of Water & Environment Engineering*. 1(2): 9- 14.
- 11) Hosseini Moghari, S.M. and Araghinezhad, sh. 2017. Application of Cuckoo optimization algorithm for optimal operation of hydroelectric ponds. Case study: reservoir of Karun4. *Journal of Water Resources Engineering*. 10, 19-32.
- 12) Hosseini Moghari, S.M. and Banihabib M.E. 2014. Optimizing operation of reservoir for agricultural water supply using firefly Algorithm, *Journal of Conservation of Soil and Water Resources*. 3(4): 17-31.
- 13) Kaveh, A. and Bakhshpoori, T. 2016. An efficient multi-objective cuckoo search algorithm for design optimization, *Advances in Computational Design*. 1(1): 87-103
- 14) Mirjalili, S.A. and Lewis, A. 2016. The Whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software* 1(95): 51-67.
- 15) Nabinejad, S. and Mousavi, S. 2013. Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures. *Journal of Water and Wastewater (parallel title); Ab va Fazilab*. 24(2): 70-79.
- 16) Pan, W.T. 2011. A new evolutionary computation approach: Fruit Fly Optimization Algorithm, *Conference of Digital Technology and Innovation Management*. Taipei.
- 17) Pan, Wen-Tsao. 2012. A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example. *Elsevier, Knowledge-Based Systems* 26, 69-74.
- 18) Parhizkari, M. and Mazandarani Zadeh, H. 2019. Multi-Objective Operation Optimization of Hydropower Reservoirs by MOPSO, Case Study: Karun 5 Dam, Iran-Water Resources. 15(10):384 - 381.
- 19) Parsamehr, A.H. and khosravani, Z. 2017. Determination of drought Using Multi Criteria Decision Making Based on TOPSIS Method (A case study of selective Isfahan Province Stations). *Iranian J. of Rangeland and Desert Research*. 24(1): 16-29.
- 20) Pourtabari, M., Maknoun, r. and Ebadi T. 2006. Multi-objective Optimal Model for Surface and Ground-water Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II, *Journal of water and wastewater*. 20 (69): 2 - 12
- 21) Rajabioun, R. 2011. Cuckoo optimization algorithm. *Appl. Soft Computing*. 11, 5508-5518.