

مقاله علمی-پژوهشی

## مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی شکار گروهی دلفین‌ها

علیرضا دنیائی<sup>۱</sup>، امیرپویا صراف<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

### چکیده

در پژوهش حاضر، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی شکار گروهی دلفین‌ها (MODEA) در تهیه قواعد بهره‌برداری بهینه سد گاوشان در استان کرمانشاه، در شرایط تغییر اقلیم، استفاده شد. این قواعد با دو هدف کمینه‌سازی آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در شرایط پایه - از فروردین ۱۳۸۶ الی مهرماه ۱۳۹۸- و شرایط تغییر اقلیم- فروردین ۱۴۲۰ الی مهرماه ۱۴۳۲ تهیه شدند. نتایج نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم، ضمن افزایش دما به میزان ۱/۸ و کاهش بارش به میزان ۲۰/۱٪، میزان رواناب نیز به ۰/۱ مقدار دوره پایه کاهش می‌یابد. به‌علاوه محدودۀ تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۱۸ تا ۴۵٪ و ۱۰ تا ۳۹٪ و محدودۀ تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط مذکور، به ترتیب، برابر ۵۲ تا ۸۹/۵٪ و ۲۸ تا ۹۰٪ بوده و به ازای اطمینان‌پذیری ۸۰٪، مقادیر آسیب‌پذیری به ترتیب، به میزان ۳۳ و ۳۰٪ برای شرایط پایه و تغییر اقلیم برآورد گردید. مقایسه حجم رهاسازی و حجم کمبود نیاز آبی به‌ازای نقطه پرتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۸۰٪ ضمن افزایش میزان رهاسازی در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه، نشان‌دهنده تطابق بیشتر میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا و عملکرد بهتر سد در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اطمینان‌پذیری، بهینه‌سازی، ریزمقیاس‌نمایی، شبیه‌سازی بارش - رواناب، قواعد تصمیم‌گیری

### مقدمه

با توجه به کمبود منابع آبی و تغییر در الگوی مصرف به دلیل افزایش جمعیت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب موردتوجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است؛ از طرفی، به دلیل قرار گرفتن ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های منابع آب و مدیریت بهتر در شرایط کم‌آبی ضروری می‌باشد (دنیائی و صراف، ۱۴۰۰). از جمله ابزارهای مناسب در حوزه مدیریت منابع آب استفاده از روش‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب شبیه‌سازی بهینه‌سازی می‌باشد. در روش‌های شبیه‌سازی می‌توان سامانه منابع آب موجود را با تمامی جزئیات مدل نمود و با سرعت بیشتری به یک دید کلی از

سامانه موردنظر رسید و در فرآیند بهینه‌سازی مناسب‌ترین مقادیرهای ممکن برای متغیرهای موردنظر در یک مسئله پیدا شده، به‌طوری‌که به ازای مقادیر یافت شده، اهداف مسئله با بهترین مطلوبیت ممکن حاصل شود. (Donyaii, 2021) در میان روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی توانایی بالایی در حل مسائل خطی، غیرخطی و پیچیده دارند (Donyaii et al., 2020a). از جمله الگوریتم‌های مطرح تکاملی می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، جامعه مورچگان (ACO)، الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)، گرگ خاکستری (GWO)، نهنگ (WOA)، جستجوی کلاغ (CSA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) اشاره نمود. این الگوریتم‌ها به‌صورت موفقیت‌آمیز برای مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن به‌کار برده شده‌اند. نغی و همکاران (۱۳۹۳) از الگوریتم ژنتیک به‌منظور مدیریت بهره‌برداری بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری استفاده کردند. آشفته و همکاران با استفاده از برنامه‌ریزی چندمنظوره ژنتیک، مخزن سد آیدوغموش را در استان آذربایجان شرقی، در دو حالت پایه و تغییر اقلیم بهینه‌سازی

۱- دکتری مهندسی عمران، کارشناس حفاظت و بهره‌برداری، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

(Email: sarraf@riau.ac.ir)

\* - نویسنده مسئول:

بهبودسازی مخزن سد گلستان مناسب ارزیابی گردید (Donyaii et al., 2020b).

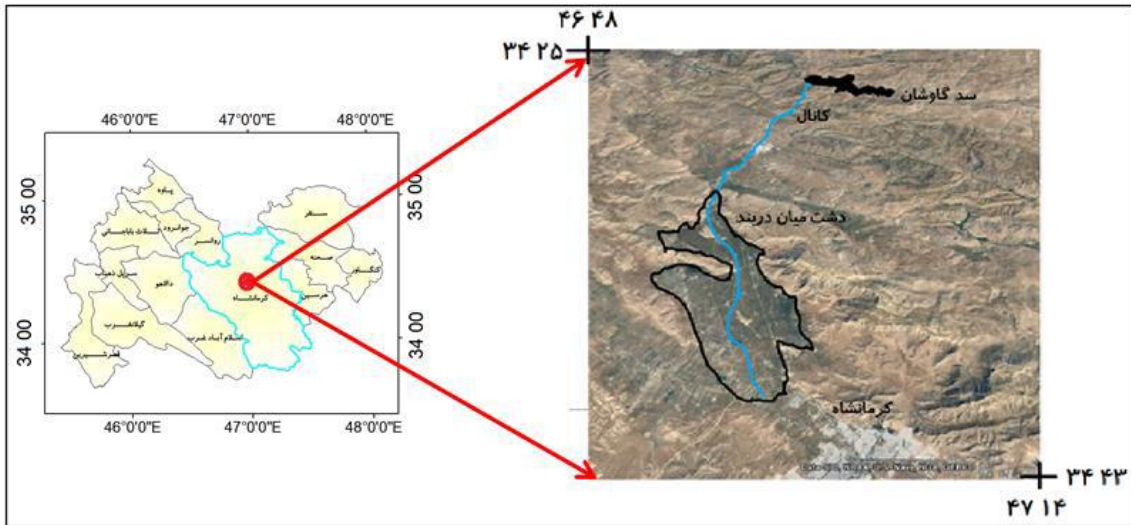
در تحقیق حاضر، توسعه و استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی شکار گروهی دلفین (MODEA) به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد می‌شود؛ که در تحقیقات پیشین به آن نپرداخته‌اند و در حوزه منابع آب نوآوری به شمار می‌رود. همچنین، قواعد بهره‌برداری بهینه از سامانه تک مخزن سد گاوشان در استان کرمانشاه در شرایط پایه (از فروردین ۱۳۸۶ الی مهر ماه ۱۳۹۸) و شرایط تغییر اقلیم (فروردین ۱۴۲۰ الی مهر ماه ۱۴۳۲) به کمک الگوریتم MODEA، با دو هدف کمینه کردن شاخص آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا، در بازه‌های مذکور، تعیین و مقایسه شد. در واقع هدف از این پژوهش استفاده از جدیدترین روش‌های هوش مصنوعی در دسترسی به قواعد بهره‌برداری بهینه از سامانه تک مخزن در شرایط تغییر اقلیم در جهت افزایش اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضای آبی اراضی پایین‌دست و کاهش آسیب‌پذیری تا حد امکان می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در غرب ایران و شمال شهر کرمانشاه قرار دارد و دارای طول ۴۸' ۴۶° تا ۱۴' ۴۷° و عرض ۲۵' ۳۴° تا ۴۳' ۰° است. پست‌ترین نقطه ارتفاعی در محدوده مورد مطالعه در مرز جنوبی و خروجی دشت با ارتفاع ۱۲۹۸ متر و بلندترین آن در شمال محدوده و به میزان ۱۷۱۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). عمده‌ترین جریان سطحی منطقه رودخانه راز آور است، که از ارتفاعات شرقی دشت کامیاران، ارتفاعات مروارید، کوه سیاه کمر، سفید چشمه، کوه شیخ میرزا و جریان‌هایی که از ارتفاعات غربی کوه کامیاران نشأت گرفته و به هم پیوسته در محل تنگه پیرمزد وارد دشت میان دربند می‌شود این رودخانه پس از جمع‌آوری آب چشمه‌های آهکی که از تشکیلات حاشیه دشت سرچشمه می‌گیرد و آب مسیل‌های اطراف دشت در نزدیکی روستا دو آب به رودخانه قره‌سو می‌پیوندد. دارای آب‌وهوای معتدل و سرد، میزان بارندگی در طول سال زراعی ۴۳۰ میلی‌متر است. منطقه میان دربند از نظر ساختار زمین‌شناسی جزء ساختار زاگرس محسوب می‌گردد. رسوبات آبرفتی جدید قسمت اعظم دشت میان دربند را شامل می‌شود این رسوبات از جنس قله‌سنگ بوده که در نواحی مخروط افکنه‌ها همراه با شن و ماسه و رسوبات ماسه‌ای و سیلتی و رسی در نواحی مرکزی و خروجی دشت می‌باشد (ملکی و رحمتی خورشیدی، ۱۳۹۶).

کردند، نتایج بهینه‌سازی نشان می‌داد که قوانین عملکرد مخزن که در تغییر اقلیم نقش دارند منجر به بهبود ۲۹ تا ۳۲ درصدی عملکرد مخزن تحت اثر تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه شدند (Ashofteh et al., 2016). گروهی نژاد و همکاران از الگوریتم کرم شبتاب برای بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف کشاورزی و تولید برق استفاده نمودند (Garousi-Nejad et al., 2016). زرگر و همکاران با هدف کاهش خسارت پایین‌دست یک مدل چندمرحله‌ای برای مدیریت سرریزها ارائه کرده‌اند نوآوری این پژوهش، انتخاب تعداد مراحل به‌عنوان متغیر تصمیم و انتخاب دبی بحرانی برای هر مرحله بوده است. آن‌ها مدل خود را روی چهار سد کارون ۴، کارون ۳، کارون ۱ و گتوند مورد آزمون قرار داده و تعداد مراحل بهینه به دست آمده به ترتیب ۱۲، ۶، ۲۲ و ۱۴ نمودند (Zargar et al., 2016). لی و همکاران از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی جریان روزانه حوضه یوتان<sup>۱</sup> در چین استفاده کردند (Li et al., 2017). افخمی فر و صراف (۱۳۹۹) عملکرد دو مدل ماشین‌های یادگیری افراطی (ELM)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ترکیب آن‌ها را با الگوریتم‌های انتقال موجک (W-ELM) و (W-ANN) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که مدل ترکیبی W-ELM-QPSO عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و به‌علاوه، این مدل در مرحله آموزش و آزمون از سرعت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود. دنیائی و همکاران (۱۳۹۹) بعد از معرفی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ، عملکرد آن را به‌عنوان بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بوستان بر اساس روش حل تعارض کالای و اشومرودینسکی ارزیابی کردند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم چندهدفه نهنگ نسبت به NSGA-II داشت. ایشان در پژوهشی دیگر در همان سال عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی نهنگ، تکامل تقاضی، جستجوی کلاغ و گرگ خاکستری در مقایسه با مقادیر بی‌بینه مطلق را در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد گلستان مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان پس از به دست آوردن معیارهای ارزیابی عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها (اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری)، این مقادیر را به همراه توابع هدف حاصل از بهینه‌سازی هر یک از الگوریتم‌ها با استفاده از شش روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، ویکور، لین‌مپ، کوداس، الکتراه و مدل وزن دهی ساده (SAW) رتبه‌بندی نمودند. نتایج تمامی روش‌ها حکایت از برتری الگوریتم گرگ خاکستری داشت. به‌طوری‌که الگوریتم‌های جستجوی کلاغ، تکامل تقاضی و نهنگ بعد از آن به ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفتند. از سوی دیگر به لحاظ یکسان بودن نتایج حاصل از روش‌های ادغام با نتایج روش‌های تاپسیس، ویکور و لین‌مپ، استفاده از این روش‌ها در حل مسئله



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (ملکی و رحمتی خورشیدی، ۱۳۹۶)

مخزن سد گاوشان می باشد. سرریز از مخزن قیدهایی را در محاسبات اعمال می کند، به طوری که (دنیائی و همکاران، ۱۴۰۰):

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

سایر قیدهها نیز به صورت زیر می باشد (Donyaii & Sarraf, 2020):

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

$$Re_{min} \leq Re_t \leq Re_{max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

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 می باشد.

در این تحقیق، دو تابع هدف به صورت کمینه سازی آسیب پذیری و بیشینه سازی شاخص اطمینان پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم مطابق روابط ۷ و ۸ به کار رفت (آشفته و بزرگ حداد، ۱۳۹۴).

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad \text{Minimize } F_1 = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t - Re_t | Re_t < D_t)}{[N_{t=1}^T (Re_t < D_t)]_{D_{max}}} \quad (7)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad \text{Maximize } F_2 = \frac{N_{t=1}^T (D_t - Re_t | Re_t \geq D_t)}{T} \quad (8)$$

$F_1$  تابع هدف شاخص آسیب پذیری،  $F_2$  تابع هدف شاخص

روش های مورد نیاز برای این تحقیق شامل برآورد پارامترهای تغییر اقلیم، شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب برای برآورد حجم آبدهی به مخزن سد گاوشان، محاسبه حجم تقاضای آب در شرایط پایه و تغییر اقلیم، استخراج قواعد بهره برداری به صورت چندهدفه (بر اساس سه تغییر آبدهی به مخزن، حجم ذخیره، حجم تقاضا) در شرایط پایه و تغییر اقلیم و در نهایت مقایسه سیاست های بهینه تخصیص در شرایط پایه و تغییر اقلیم، با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص های کارایی مخزن بود.

در این پژوهش، از مدل اقلیمی CANESM2 با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM4.2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و جهت دستیابی به یک تخمین واقع بینانه تر، با میانگین گیری از نتایج سه سناریوی مذکور یک سناریوی جدید با عنوان سناریوی متوسط تعریف شد

### توسعه مدل بهینه سازی

قبل از پرداختن به توسعه مدل بهینه سازی، لازم است شبیه سازی مخزن به کمک معادله پیوستگی یا بیلان جرم مطابق با روابط ۱ تا ۳ ارائه شود (Donyaii et al, 2020c):

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t - Sp_t - Loss_t \quad (1)$$

$$Loss_t = A_t \times Ev_t \quad (2)$$

$$A_t = aS_t^3 + bS_t^2 + cS_t + d \quad (3)$$

به طوری که  $A_t$  سطح مخزن در ماه  $t$ ام،  $S_t$  حجم ذخیره مخزن در ماه  $t$ ام،  $Sp_t$  سرریز از مخزن سد در ماه  $t$ ام،  $Q_t$  ورودی به مخزن در ماه  $t$ ام،  $Ev_t$  تبخیر خالص از مخزن (تفاوت میزان بارش و تبخیر در ماه  $t$ ام)  $a, b, c, d$  ضرایب ثابت معادله سطح-حجم مخزن برای

روش معمول در شکار دلفین‌ها به این گونه است که گروهی از آن‌ها با حلقه زدن به دور ماهی‌ها آن‌ها را در گوشه‌ای به شکل توپ گرد هم می‌آورند و به سطح آب نزدیک کرده و سپس با حمله به این «توپ طعمه» ماهی‌های سردرگم را شکار می‌کنند (شکل ۲). در این روش دلفین‌ها گرداگرد دسته‌ای از ماهی‌ها می‌چرخند و با ترساندن آن‌ها باعث تجمعشان در سطح آب می‌گردند. در این لحظه دلفین‌ها یکی‌یکی به این تجمع نزدیک شده و به راحتی از میان این دسته شکار خود را جدا می‌کنند. دلفینی که شکار کرده جای خود را با یکی از دلفین‌های دیگر که با چرخیدن زیر و اطراف دسته ماهی‌ها آن‌ها را اسیر کرده است عوض کرده تا همه بتوانند از این سفره بهره ببرند (Kaveh and Farhoudi, 2013).

برای شبیه‌سازی فرآیند شکار در الگوریتم شکار گروهی، دلفین‌ها به سمت رهبر دسته حرکت می‌کنند. رهبر، دلفینی است که دارای بهترین موقعیت در شرایط کنونی است فرض می‌شود که رهبر نقطه بهینه را یافته و سایر اعضا به سمت آن حرکت می‌کنند؛ بنابراین در الگوریتم جستجوی شکار دلفین، بعد از حرکت به سمت رهبر، هر دلفین موقعیت خود را بر اساس موقعیت سایر اعضا در گروه اصلاح می‌کند. در شکار گروهی، اگر طعمه از حلقه ایجادشده خارج شود، دلفین‌ها با سازمان‌دهی مجدد خود دوباره به دور آن حلقه می‌زنند. در الگوریتم شکار گروهی این توانایی به دلفین‌ها داده شده است تا بتوانند خارج از حلقه را نیز جستجو کنند. مراحل الگوریتم به شرح ذیل است (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳):

#### مقداردهی اولیه تنظیم پارامترهای الگوریتم

بر اساس تعداد دلفین‌ها ماتریس شکار گروهی با بردارهای راه‌حل تصادفی تولیدشده پُر می‌شود. سپس بیشترین تعداد حرکت به سمت رهبر تعیین شده و نرخ توجه دلفین به گروه که بین ۵ و ۱ تغییر می‌کند مشخص می‌گردد. مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و رهبر بر اساس مقدار تابع هدف دلفین‌ها تعیین می‌گردد.

#### حرکت به سمت رهبر

در این مرحله موقعیت جدید دلفین‌ها (بردار راه‌حل جدید) با حرکت به سمت رهبر بر اساس رابطه ۱۵ تولید می‌گردد (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳):

$$x_i^* = x_i + rand \times M_{max} \times (x_{il} - x_i) \quad (15)$$

موقعیت جدید دلفین (بردار راه‌حل جدید) شامل  $x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*$  می‌باشد.

$M_{max}$ : بیشترین تعداد حرکات به سمت رهبر به طوری که هرچقدر مقدار آن بیشتر باشد، الگوریتم سریع‌تر همگرا می‌شود و معمولاً در بازه ۰ تا ۰/۰۵ قرار می‌گیرد.

اطمینان‌پذیری،  $D_t$  حجم تقاضا در طول دوره  $t$  ام،  $D_{Max}$  بیشینه تقاضای آب در بازه بهره‌برداری موردنظر،  $(Re_t < D_t)$  تعداد ماه‌های کمبود آب و  $(Re_t \geq D_t)$   $N_{t=1}^T$  تعداد ماه‌های تأمین آب هستند (Donyaii et al, 2021).

$$S_t \geq S_{min} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

$$Re_t \leq Re_{max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

در صورت تخطی از محدودیت‌های ۹ و ۱۰، توابع جریمه‌ای به ترتیب به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ به توابع هدف اضافه می‌شود (Donyaii et al, 2021).

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad PF_1 = A' \cdot \left( \frac{|S_{min} - S_t|}{S_{max} - S_{min}} \right)^2 + B' \quad (11)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad PF_2 = C' \cdot \left( \frac{Re_t - D_{Max}}{D_{Max}} \right)^2 + D' \quad (12)$$

که در آن‌ها  $PF_1$  تابع جریمه ناشی از تخطی رابطه ۹ و  $PF_2$  تابع جریمه ناشی از رابطه ۱۰ و ضرایب  $A'$  تا  $D'$  ثابت‌های مثبت توابع جریمه ( $A'=1, C'=-1, B'=0.5, D'=16$ ) هستند (Donyaii et al, 2021).

#### منحنی فرمان بهره‌برداری

در این تحقیق، قاعده تصمیم برای بهره‌برداری از سیستم تک‌مخزنه سد گاوشان با اهداف کمینه‌سازی آسیب‌پذیری ناشی از کمبود سامانه، به منظور تأمین تقاضای موردنیاز و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری ناشی از تأمین تقاضا به کمک الگوریتم MODEA مطابق روابط ۱۳ و ۱۴ استخراج می‌شود (Donyaii et al, 2021).

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad Re_{bt} = g_1(Q_{bt}, S_{bt}, D_{bt}) \quad (13)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, T \quad Re_{ft} = g_2(Q_{ft}, S_{ft}, D_{ft}) \quad (14)$$

$g_1(Q_{bt}, S_{bt}, D_{bt})$  گزینه اول، دستور حاصل از MODEA در بازه بهره‌برداری پایه برای شرایط پایه و  $g_2(Q_{ft}, S_{ft}, D_{ft})$  گزینه دوم، دستور حاصل از MODEA در بازه بهره‌برداری تغییر اقلیم برای شرایط تغییر اقلیم، اندیس  $b$  برای شرایط پایه و اندیس  $f$  برای شرایط تغییر اقلیم‌اند (Donyaii et al, 2021).

#### الگوریتم جستجوی شکار گروهی دلفین‌ها<sup>۱</sup>

دلفین‌ها به کمک ارسال امواج صوتی به سوی اجسام زیر آب و دریافت انعکاس آن، شکل، اندازه و فاصله آن را حدس می‌زنند. در این روش یک دلفین که طعمه را با استفاده از انعکاس صدای خود پیدا کرده به عنوان رهبر انتخاب می‌شود، سپس به دیگر دلفین‌ها موقعیت طعمه را اطلاع می‌دهد (Kaveh and Farhoudi, 2013).

Rand: عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک

$x_i^j$ : مقدار موقعیت رهبر برای  $i$  امین متغیر

برای هر دلفین، اگر حرکت به سمت رهبر موفقیت‌آمیز باشد، دلفین در موقعیت جدید قرار می‌گیرد، ولی در غیر این صورت، به موقعیت قبلی خود بازمی‌گردد.

### اصلاح موقعیت - همکاری میان اعضا

در این مرحله همکاری میان اعضا به منظور هدایت هرچه بهتر شکار انجام می‌پذیرد. بعد از حرکت به سمت رهبر، دلفین (بر اساس موقعیت سایر دلفین‌ها و برخی فاکتورهای تصادفی) موقعیت دیگری را انتخاب می‌کند تا راه‌حل بهتری را بیابد. دلفین‌ها برای تصحیح موقعیت خود از روش تصحیح مقدار حقیقی استفاده می‌کنند (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

### تصحیح مقدار حقیقی

در این روش موقعیت جدید دلفین بر اساس توجه به شکار گروهی یا تصحیح موقعیت تولید می‌شود؛ بنابراین به هنگام سازی متغیرها بر اساس رابطه ۱۶ انجام می‌پذیرد (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳):

$$x_i^{j*} \leftarrow \begin{cases} x_i^{j*} \in x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{DEA} & \text{if SDSP occurs} \\ x_i^{j*} = x_i^j \pm Rand \times R_a & \text{if } (1 - SDSP) \text{ occurs} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن SDSP احتمال انتخاب مقداری از گروه دلفین ذخیره‌شده در هر موقعیت، (1-SDSP) احتمال انجام تصحیح موقعیت، Rand مقداری یکنواخت بین ۵ و ۱ و  $R_a$  شعاع فاصله مجازی برای ساخت متغیر پیوسته که می‌تواند در طی فرآیند بهینه‌سازی کاهش یابد. همان‌گونه که در رابطه ۱۷ به تصویر کشیده شده است، پس از هر بار ارزیابی تابع هدف، موقعیت جدید دلفین بررسی می‌گردد. در صورت بهبود راه‌حل، دلفین به موقعیت جدید می‌رود. در غیر این صورت همانند مرحله قبل موقعیت خود را حفظ خواهد کرد (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

$$R_i = R_{min}(\max_{x_i} - \min_{x_i})e^{\frac{\ln(\frac{R_{min}}{R_{max}}) \times i}{i_{max}}} \quad (17)$$

که در آن  $i$  تعداد تکرارها،  $i_{max}$  حداکثر تکرار در فرآیند بهینه‌سازی،  $\max_{x_i}$  بیشترین و  $\min_{x_i}$  کمترین مقدار ممکن متغیر  $x_i$  و  $R_{min}$  و  $R_{max}$  بیشترین مقدار شعاع جستجوی دلفین می‌باشد.



شکل ۲ - نحوه شکار گروهی دلفین‌ها به صورت حلقه زدن به دور طعمه (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳)

الگوریتم ارضاء نشده، الگوریتم، گروه دلفین‌ها را سازمان‌دهی مجدد می‌کند به طوری که بعد از تعداد مشخصی تکرار، می‌توان دوباره سازمان‌دهی مجدد گروه را انجام داد. عملیات سازمان‌دهی مجدد گروه

### سازمان‌دهی مجدد گروه دلفین‌ها

در صورتی که مقدار تابع هدف کمتر از مقدار از پیش تعیین شده برای دلفین رهبر و بدترین دلفین در گروه باشد و معیارهای خاتمه

گوسین به عنوان بهترین تابع عضویت و با ۳۰ اپوک آموزش و ۵۰۰۰ تکرار جهت ۹۰٪ از داده‌های آموزش در هر بار برآورد، صورت گرفت. بهترین شعاع تأثیر ANFIS جهت برآورد رواناب، ۰/۰۵ به دست آمد. در این راستا پارامترهای خطا، ضریب همبستگی و ضریب ناش-ساتکلیف جهت ارزیابی مدل‌های مختلف استفاده شد که بر اساس آن‌ها بهترین الگو جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب، الگوی بارش، دمای حداقل ماهانه، دمای حداکثر ماهانه و دمای میانگین ماهانه با ضرایب همبستگی ۹۱٪ در ورودی سد گاوشان به دست آمد، شایان ذکر است که میزان رواناب در دوره آبی (در شرایط تغییر اقلیم) به ۰/۱۹ مقدار دوره پایه کاهش می‌یابد. این کاهش آورد رودخانه می‌تواند زنگ خطری جهت مدیریت منابع آب باشد.

به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از سامانه تک مخزن سد گاوشان و شبکه ۴۲۰۰ هکتاری پایین دست آن، از الگوریتم MODEA استفاده شد. حجم این مخزن در تراز نرمال ۱۰۰ متر از سطح دریا ۴۳/۷ میلیون مترمکعب و در تراز سرریز ۵۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. بیشینه تقاضا در شرایط پایه و تغییر اقلیم ۳۷/۸۴ و ۴۱/۸۶ میلیون مترمکعب است. شکل (۳) میانگین ماهیانه حجم آبدهی به مخزن، میانگین عمق ماهیانه تبخیر و حجم تقاضای آب را در شرایط پایه و تغییر اقلیم نشان می‌دهد. نتایج نشان داد حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه، به ترتیب، حدود ۱۷٪ کاهش و ۱۱٪ افزایش می‌یابد.

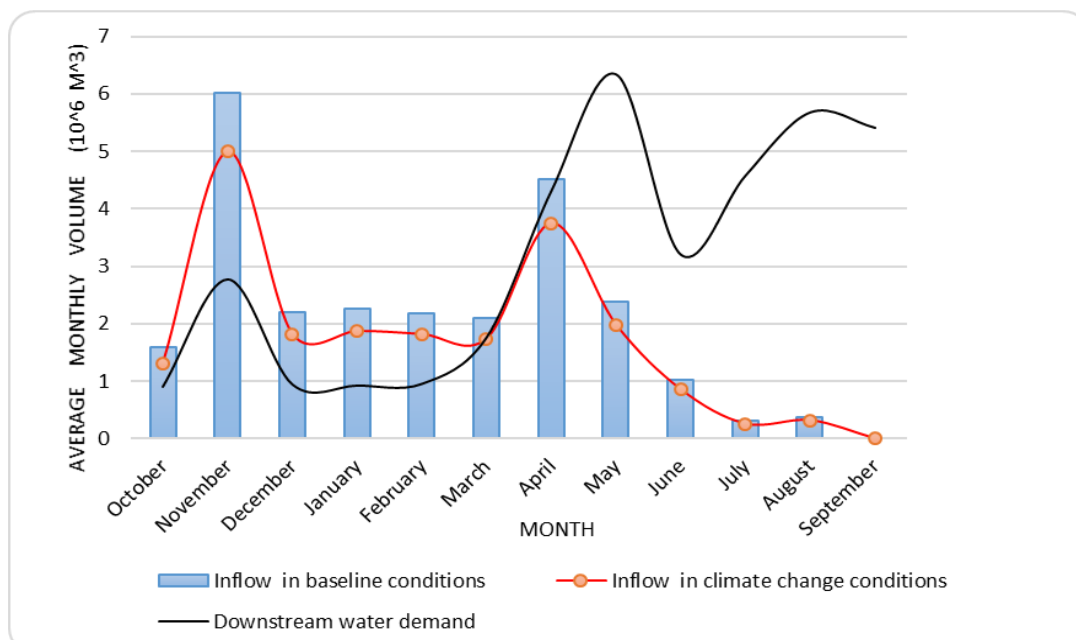
به این صورت انجام می‌شود که رهبر موقعیت خود را حفظ می‌کند و سایر اعضاء موقعیت خود را به صورت تصادفی به وسیله رابطه ۱۸ انتخاب می‌کنند (حمید زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

$$x_i^* = x_i^l + rand \times (max_{x_i} - min_{x_i}) \times ae^{-\beta \times EN} \quad (18)$$

$x_i^l$  مقدار موقعیت رهبر برای اُمین متغیر و EN تعداد دفعاتی که گروه به دام افتاده است را شمارش می‌کند. البته  $\beta$  و  $\alpha$  مقادیر حقیقی مثبت هستند که نرخ همگرایی سراسری الگوریتم را تعیین می‌کنند. در نهایت در صورت رسیدن به معیارهای توقف؛ نظیر انجام تعداد مشخصی تکرار و یا اینکه بعد از سازمان‌دهی مجدد تفاوت رهبر و بدترین دلفین کمتر از مقدار از قبل تعیین شده باشد، الگوریتم پایان می‌یابد.

## نتایج و بحث

نتایج حاصله نشان‌دهنده افزایش دمای متوسط ماهانه در هر سه سناریو حتی در سناریوی متوسط بوده به طوری که مقادیر این افزایش دمای ۱/۸ سانتی‌گراد در دوره پیش‌بینی می‌باشد. بررسی تغییرات بارش متوسط ماهانه نیز نشان داد که کاهش نرخ نزولات جوی در دوره آبی کاملاً محرز بوده و با توجه به سناریوی متوسط این میزان به مقدار ۲۰/۱٪ کمتر از دوره پایه پیش‌بینی شده است. شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب آینده مبنی بر پدیده تغییر اقلیم در محل ورودی سد گاوشان به وسیله مدل نروفازی مرتبه دوم و تابع عضویت

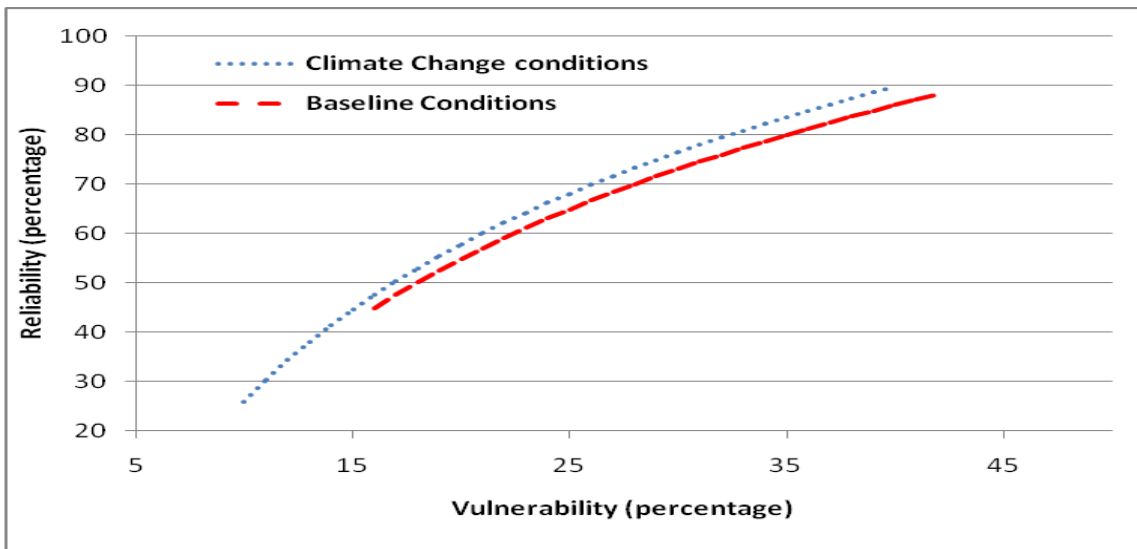


شکل ۳ - میانگین ماهیانه حجم آبدهی به مخزن در شرایط پایه و تغییر اقلیم به همراه میانگین ماهیانه حجم تقاضای آب

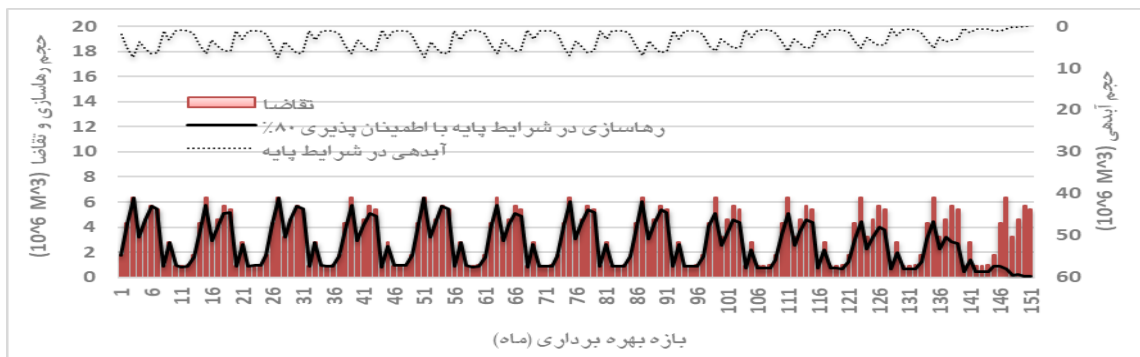


شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۱۸ تا ۴۵٪ و ۱۰ تا ۳۹٪ و محدوده تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۵۲ تا ۸۹/۵٪ و ۲۸ تا ۹۰٪ است. به ازای اطمینان‌پذیری ۸۰٪، آسیب‌پذیری ۳۳ و ۳۰٪، به ترتیب، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم ایجاد می‌شود.

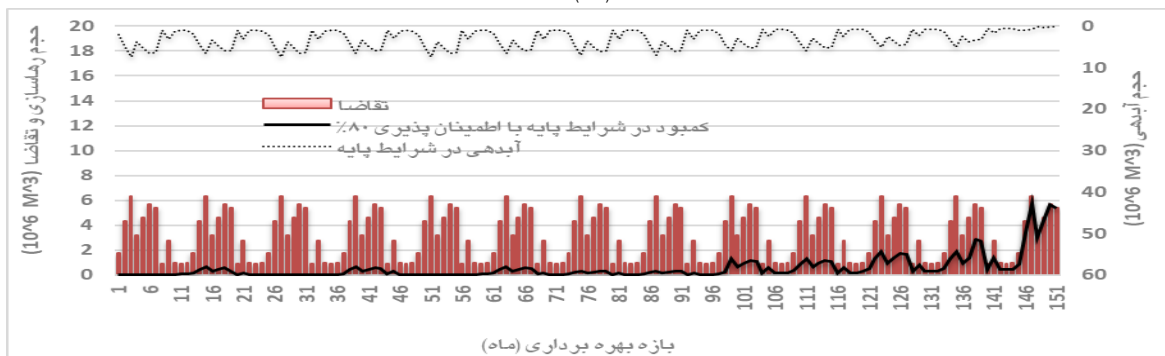
قواعد بهره‌برداری بهینه مخزن گاوشان از یک مسئله دوهدفه به کمک الگوریتم MODEA استخراج شد. این مسئله دوهدفه شامل کمینه‌سازی آسیب‌پذیری سیستم و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا بود. شکل (۴) نتایج الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه مذکور را به شکل منحنی پرتو، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، محدوده تغییرات آسیب‌پذیری در



شکل ۴- مقایسه منحنی پرتو و تغییرات توابع هدف آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری

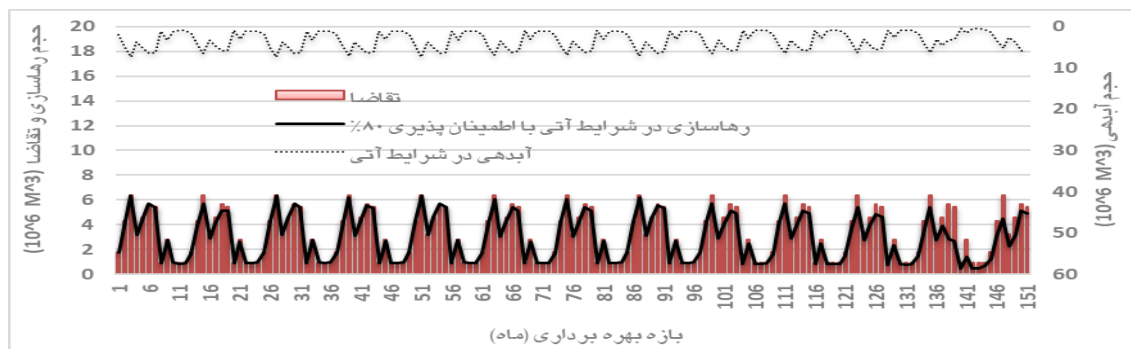


(الف)

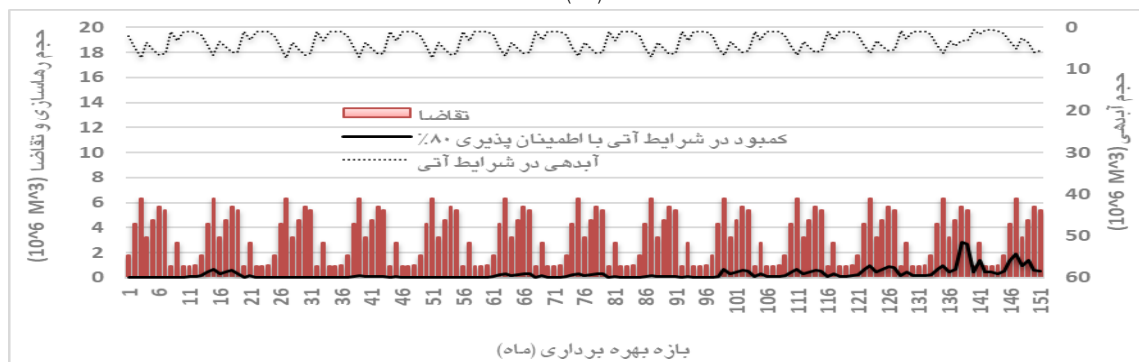


(ب)

شکل ۵- مقایسه حجم رهاسازی (الف) و حجم کمبود (ب) به ازای نقطه پرتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۸۰٪ در شرایط پایه



(الف)



(ب)

شکل ۶- مقایسه حجم رهاسازی (الف) و حجم کمبود (ب) به ازای نقطه پرتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۸۰٪ در شرایط تغییر اقلیم

در ادامه، تغییرات حجم کمبود با قواعد بهره‌برداری بهینه حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی برای گزینه‌های دوگانه فوق‌الذکر در مقایسه با نیاز آبی مربوطه بررسی شدند. نتایج، به ترتیب، در شکل‌های (۵ ب) و (۶ ب) آمده است.

با توجه به شکل (۵ الف) و (۶ الف)، میزان رهاسازی در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر بوده به طوری که این موضوع به دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط تغییر اقلیم به میزان ۱۱٪ است. از سوی دیگر مقایسه شکل‌های (۵ ب) و (۶ ب) نشان می‌دهد که حجم کمبود مخزن سد در شرایط پایه بسیار بیشتر از شرایط تغییر اقلیم بوده، به گونه‌ای که می‌توان نتیجه گرفت در شرایط تغییر اقلیم عملکرد سد بهتر شده است. در گام بعد، به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین نیاز آبی اراضی پایین دست، مقادیر تابع هدف به ازای نقطه پرتو (اطمینان‌پذیری) ۸۰٪ در شرایط مذکور مقایسه شدند که در جدول ۱ آمده است. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود، میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا در شرایط تغییر اقلیم تطابق بیشتری دارد؛ بنابراین در شرایط تغییر اقلیم عملکرد سد بهتر می‌باشد.

به بیان ساده‌تر، محدوده تغییرات آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر است. هر یک از نقاط منحنی پرتو در شکل (۴)، مبین یک قاعده بهره‌برداری از مخزن است که شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری مربوط به خود را دربر می‌گیرد. هیچ‌یک از این نقاط پرتو بر دیگری ارجحیت نداشته؛ بلکه بسته به شرایط و سیاست‌های حاکم بر سطح حوضه می‌تواند تغییر کند. در گام بعدی، قواعد بهینه نیاز آبی در شرایط پایه و تغییر اقلیم بررسی و ارزیابی شد. بدین منظور، قواعد بهینه حاصل از شرایط پایه با قواعد بهینه حاصل از تغییر اقلیم مقایسه شدند. نتایج مربوطه در تأمین نیاز آبی به ازای شاخص اطمینان‌پذیری ۸۰٪ در شکل (۵ الف) - برای شرایط پایه و (۶ الف) برای گزینه تغییر اقلیم ارائه می‌شود. همان‌گونه که در این دو شکل مشاهده می‌گردد الگوریتم بهینه‌سازی دلفین به طرف قابل قبولی مقادیر نیاز آبی اراضی پایین دست را جبران نماید. اگرچه الگوریتم، در تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی در ماه‌های پایانی در شرایط پایه ضعیف بوده (شکل ۵ الف)، ولی این ضعف در شرایط تغییر اقلیم به طرز محسوسی پوشش داده شده (شکل ۶ الف) که این مهم خود نوعی نشانگر عملکرد بهتر سد در شرایط تغییر اقلیم است.



جدول ۱ - مقایسه توابع هدف در دو حالت پایه و تغییر اقلیم به ازای نقطه پرتو (اطمینان‌پذیری ۸۰٪)

شرایط	اطمینان‌پذیری	آسیب‌پذیری
پایه	۸۰	۳۳
تغییر اقلیم	۸۰	۳۰

طوری که این موضوع به دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط مربوط به تغییر اقلیم می‌باشد. در گام بعد، به‌منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین نیاز آبی اراضی پایین‌دست، مقادیر تابع هدف به ازای نقطه پرتو (اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد) در شرایط مذکور با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا در شرایط تغییر اقلیم تطابق بیشتری داشته، به طوری که می‌توان دریافت که سد گاوشان در شرایط تغییر اقلیم از عملکرد بهتری برخوردار است.

### منابع

آشفته، پ. و بزرگ حداد، ا. ۱۳۹۴. استفاده از ابزار بهینه‌سازی GP توسعه‌یافته برای بهره‌برداری چندهدفه از مخازن در شرایط تغییر اقلیم. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران). ۳۶(۳): ۴۲۲-۴۱۵.

افخمی فر، س. و صراف، ا. ۱۳۹۹. پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه با استفاده از مدل هیبرید تبدیل موجک-ماشین یادگیری پیشینه و بهینه‌سازی با ازدحام ذرات کوانتومی. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۱۲(۲): ۳۶۴-۳۵۱.

حمید زاده، ج.، صالح نیا، ک. و بصیر، م. ۱۳۹۳. الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی شکار گروهی دلفین‌ها (HDA). اولین همایش ملی فناوری و مدیریت دانش با محوریت اقتصاد مقاومتی. تربت حیدریه. ایران. <https://civilica.com/doc/359020>.

دنیائی، ع. و صراف، ا. ۱۴۰۰. کالیبراسیون مدل توزیعی هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت بیوه سیاه و NSGA-II. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۳): ۷۳۶-۷۲۱.

دنیائی، ع.، صراف، ا. و احمدی، ح. ۱۳۹۹. تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه چندهدفه از مخزن سد بوستان با استفاده از الگوریتم‌های نهنگ و NSGA-II مبتنی بر تئوری بازی‌ها و روش آنتروپی شانون. مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۱۱۱-۹۹.

دنیائی، ع.، صراف، ا. و احمدی، ح. ۱۴۰۰. بهره‌برداری از مخزن سد گلستان در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۲(۲۳): ۲۳۸-۲۵۰.

نتایج بهینه‌سازی نشان داد که قوانین عملکرد مخزن که در تغییر اقلیم نقش دارند منجر به بهبود عملکرد مخازن تحت اثر تغییر اقلیم نسبت به حالت پایه می‌شوند.

### نتیجه‌گیری

در نظر گرفتن تمامی اهداف با توجه به سیاست‌های حاکم بر بهره‌برداری از سامانه‌های منابع آب جهت تأمین نیاز آبی از مهم‌ترین عواملی است که باید در سطح حوضه مدنظر قرار گیرد. لذا در شرایط تغییر اقلیم نیاز است که مجموعه‌ای از گزینه‌های تصمیم (منحنی پرتو) ارائه شود. تا مدیران اجرایی و بهره‌برداران با عنایت به اهمیت نسبی اهداف در این خصوص تصمیم بگیرند؛ بنابراین استخراج چندهدفه قواعد بهره‌برداری از مخازن امری اجتناب‌ناپذیر است. چراکه هر یک از نقاط منحنی پرتو مبین یک قاعده بهره‌برداری از مخزن بوده که تحت شرایط و سیاست‌های حاکم بر سطح حوضه قابل تغییر است. هدف از پژوهش حاضر استخراج دستورالعمل کلی استفاده از این نقاط پرتو بوده است. به طوری که با فرض تأمین نیاز آبی ۸۰ درصد اراضی پایین‌دست سد گاوشان در استان کرمانشاه، چگونگی دستیابی به این نقاط معین گردد. در این پژوهش از الگوریتم چندهدفه جستجوی شکار دلفین (برای اولین بار در مهندسی و مدیریت منابع آب) جهت حل مسئله بهره‌برداری از سیستم تک مخزنه در شرایط پایه و تغییر اقلیم استفاده گردید. توابع هدف عبارت از کمینه‌سازی شاخص آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری در جهت دستیابی به قواعد رهاسازی از مخزن (مبتنی بر منحنی پرتو) در شرایط پایه و تغییر اقلیم بر اساس پارامترهایی نظیر حجم آبدهی به مخزن، حجم ذخیره و حجم تقاضای آب بوده است که به کمک الگوریتم MODEA به دست آمدند. نتایج نشان داد، محدوده تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۱۸ تا ۴۵ درصد و ۱۰ تا ۳۹ درصد و محدوده تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییر اقلیم، به ترتیب، برابر ۵۲ تا ۸۹/۵ درصد و ۲۸ تا ۹۰ درصد است. به ازای اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد، آسیب‌پذیری ۳۳ و ۳۰ درصد، به ترتیب، برای شرایط پایه و تغییر اقلیم ایجاد می‌شود. مقایسه قواعد بهینه حاصل از شرایط پایه با قواعد بهینه حاصل از تغییر اقلیم نشان داد که نیاز آبی طرح به ازای شاخص اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد تأمین می‌گردد. همچنین میزان رهاسازی در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر بوده، به-

- reservoir multiobjective optimal operation using Grey Wolf optimizer. *Shock and Vibration*. <https://doi.org/10.1155/2020/8870464>.
- Donyaii A.R., Sarraf A. 2020. Optimization of Reservoir Operation using a Bioinspired Metaheuristic Based on the COVID-19 Propagation Model. *NMCE*.; 5 (1) :15-28 .  
URL: <http://nmce.kntu.ac.ir/article-1-289-en.html>
- Donyaii, A.R., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2021. Comparison of meta-heuristic algorithms in optimum operation of a single-reservoir dam system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*.  
<https://doi.org/10.1680/jensu.20.00065>.
- Garousi-Nejad, I., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. A. and Mariño, M. A. 2016. Application of the firefly algorithm to optimal operation of reservoirs with the purpose of irrigation supply and hydropower production. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142(10):04016041.
- Kaveh, A. and Farhoudi, N. 2013. A new optimization method: Dolphin echolocation. *Advances in Engineering Software*. 59: 53-70.
- Li, X., Sha, J., Li, Y. M. and Wang, Z. L. 2018. Comparison of hybrid models for daily streamflow prediction in a forested basin. *Journal of Hydroinformatics*. 20(1): 191-205.
- Zargar, M., Samani, H. M. and Haghghi, A. 2016. Optimization of gated spillways operation for flood risk management in multi-reservoir systems. *Natural Hazards*. 82(1):299-320.
- ملکی، ا. و رحمتی خورشیدی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثرات طبیعی و انسانی انتقال آب سد گاوشان بر دشت میان دربند در استان کرمانشاه. *جغرافیای طبیعی*. ۱۰(۳۷): ۳۱-۴۴.
- نخعی، م.، محمدی، خ. و رضایی، ح. ۱۳۹۳. بهینه یابی مدل عددی برداشت از آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: آبخوان ساحلی ارومیه). *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۰(۳۰): ۹۷-۹۴.
- Ashofteh, P. S., Haddad, O. B., Akbari-Alashti, H. and Marino, M. A. 2016. Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 141(4): 04014059.
- Donyaii, A.R. 2021. Evaluation of climate change impacts on the optimal operation of multipurpose reservoir systems using cuckoo search algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 80(19), 1-15. 80 (663). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09951-6>
- Donyaii, A.R., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2020a. Application of a new approach in optimizing the operation of the multi-objective reservoir. *Journal of Hydraulic Structures*. 6(3): 1-20.
- Donyaii, A.R., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2020b. Using composite ranking to select the most appropriate Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method in the optimal operation of the Dam reservoir. *Journal of Hydraulic Structures*. 6(2): 1-22.
- Donyaii, A.R., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2020c. Water

## Management of Reservoir Operation System under Climate Change Conditions Using Dolphin Echolocation Optimization Algorithm

A. R. Donyaii<sup>1</sup>, A. P. Sarraf<sup>2\*</sup>

Received: Apr. 23, 2021

Accepted: Aug. 04, 2021

### Abstract

In the present study, a multi-objective Dolphin Echolocation Algorithm (MODEA) was used to derive optimized operation rules of Gavoshan dam in kermanshah province under climate change conditions. These rules were extracted for the two purposes of minimizing vulnerability and maximizing reliability indices under the baseline i.e., April 2007 to October 2019 and climate change conditions i.e., April 2040 to October 2052. Results showed that under climate change conditions, in addition to increasing temperature by 1.8 degrees Celsius and decreasing in precipitation by 20.1%, the runoff would also be reduced to 0. related to the baseline period. Moreover, vulnerability changes by 18% to 45% and 10% to 39% in baseline and climate change conditions respectively, and the range of reliability changes by 52% to 89.5% and 28% to 90%, under these conditions, respectively. Comparison of the release and the water demand volume under climate change to the baseline conditions -based on the Pareto point with 80% reliability while increasing the release rate- indicates a greater adaptation of the release rate from the reservoir to the demand volume and a better performance of the reservoir under climate change conditions.

**Keywords:** Decision making rules, Rainfall-runoff simulation, Reliability, Statistical downscaling

---

1- Ph.D, Department of Civil Engineering, Water Resources Expert, Golestan Regional Water Company, Gorgan, Iran  
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran  
(\*- Corresponding Author Email: sarraf@riau.ac.ir)