دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

بهره‌برداری از مخزن سد گلستان در شرایط تغییراقلیم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته

علیرضا دنیائی[۱]، امیرپویا صراف[۲] و حسن احمدی[۳]

۱- کاندیدای دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران (نویسنده مسوول: sarraf@riau.ac.ir)
۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تاریخ ارسال: ۹۹/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۴
صفحه: ۲۳۸ تا ۲۵۰

چکیده

میزان رواناب ورودی به مخازن سدها به‌طور مستمر تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی بوده که این مهم نیز به‌نوعی متاثر از پدیده تغییراقلیم است. در این پژوهش، با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM4.2، پارامترهای تغییراقلیم براساس مدل اقلیمی CANESM2 به‌دست آمد. سپس شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب توسط مدل ANFIS با ساختار سوگنو و خوشه‌بندی تفاضلی در ورودی مخزن سدگلستان در شرایط تغییراقلیم صورت گرفت و در نهایت از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته (MOIWOA) که ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) و تکامل تفاضلی (DE) است در استخراج قواعد بهره‌برداری بهینه، استفاده گردید. نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت، حاکی از قرارگیری نتایج شبیه‌سازی دوره تغییراقلیم در باند اطمینان ۹۵درصد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود. ضمنا بهینه‌سازی مخزن گلستان در شرایط پایه (اسفند۱۳۸٤-شهریور۱۳۹۷) و تغییراقلیم (فروردین۱٤۲۰ - مهر ۱٤۳۲) نشان داد که محدودهٔ تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۱۸ تا ٤٥ درصد و ۱۰ تا ۳۹ درصد و محدودهٔ تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۵۲ تا ۸۹/۵ درصد و ۲۸ تا ۹۰ درصد است و به‌ازای اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد، آسیب‌پذیری ۳۱ و ۲۷ درصد، به‌ترتیب، برای شرایط پایه و تغییراقلیم ایجاد می‌شود. مقایسه قواعد بهینهٔ حاصل از شرایط پایه با قواعد بهینهٔ حاصل از تغییر اقلیم نشان داد که نیاز آبی طرح به‌ازای شاخص اطمینان‌پذیری۸۰ درصد تأمین می‌گردد. همچنین میزان رهاسازی در شرایط تغییراقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر بوده، به‌طوریکه این موضوع به‌دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط مربوط به تغییراقلیم می‌باشد. از سوی دیگر مقایسه عملکرد مخزن در تأمین نیاز آبی اراضی پایین‌دست در نقطه پَرتو (اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد) در شرایط پایه و تغییراقلیم نیز حکایت از تطبیق بیشتر میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا در شرایط تغییراقلیم دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته، تغییراقلیم، عدم‌قطعیت، مدل فازی – عصبی تطبیقی و سد گلستان

مقدمه

میانگین دمای سطح زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتباً افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای‌که سناریوهای اخیر IPCC[1] افزایش متوسط جهانی دما را ۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد در قرن گذشته و تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند (۱۲) این پدیده که به آن تغییر اقلیم اطلاق می‌شود، می‌تواند با احتمال زیاد بر بخش‌های مختلفی تأثیر بگذارد که بخش منابع آب از اصلی‌ترین آن‌ها می‌باشد. از آنجا که این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیانباری برای جوامع بشری داشته باشد، لذا در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد صورت گرفته است (۳). از سوی دیگر با عنایت به اینکه ساخت سدهای مخزنی در راستای تامین نیازهای آبی شرب, صنعت و کشاورزی با توجه به محدویت‌های منابع آبی حائز نهایت اهمیت است، تخمین آورد رواناب به مخازن سدها در دوره‌های زمانی آتی از موضوعات مهمی محسوب گردیده بطوریکه نادیده‌گرفتن اثرات تغییراقلیم در آن باعث ایجاد خطا در برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب می‌گردد (۲۵). شایان ذکر است که از مهمترین روش‌های بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آبی، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بوده که در چند دهه اخیر به کرات مورد استقبال متخصصین امر قرار گرفته است. استیل و همکاران (۲۹) تاثیر تغییر اقلیم را بر رواناب با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق که برای ۹ حوضه واقع در کشور ایرلند صورت گرفت، از مدل مفهومی بارش- رواناب HBV- Light برای بررسی وضعیت جریان رودخانه در دوره۲۰۶۰-۲۰۱۰ استفاده گردید. ایشان با استفاده از داده‌های بارش و دمای استخراج‌شده از مدل ECHAM5 دریافتند که در آینده ضمن تغییر رژیم آبدهی رودخانه تحت تاثیر پدیده تغییراقلیم- بارش زمستانه کاهش و بارش تابستانه افزایش خواهد یافت. سانیر و همکاران (۳۰) پنج مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری را با هم مقایسه کردند. آنها اقدام به تولید سری زمانی در شرایط تغییراقلیم و تحت سناریوی A1B و برای دوره ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ در شمال دانمارک کردند. سه مدل از پنج مدل مورد نظر حاکی از پیش‌بینی افزایش مقدار بارندگی در آینده بود. ثانی‌خانی و همکاران (۲۸) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه آجی‌چای در استان آذربایجان‌شرقی پرداختند. نتایج ایشان حاکی از افزایش دما و کاهش بارش و کاهش قابل توجه میزان رواناب در حوضه بوده است. زمانی و همکاران (۳۴) ضمن بررسی احتمالاتی اثر تغییراقلیم بر رواناب با تحلیل عدم قطعیت در حوضه رود زرد در جنوب‌غربی ایران، تحت دو سناریوی انتشار RCP 4.5 و RCP 8.5 در دوره

1- Intergovernmental Panel of Climate Change

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

(۲۰۵۴–۲۰۲۵) استفاده نشان دادند که میانگین دمای سالانه به مقدار ۲/۰۴–۱/۶۴ درجه‌سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP 4.5 و ۲/۴–۱/۸۵ تحت سناریوی RCP 8.5 افزایش می یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی رواناب تحت تاثیر تغییراقلیم در حالت کلی حاکی از کاهش میانگین رواناب شبیه‌سازی‌شده برای دوره آینده نسبت به دوره پایه می‌باشد. بطوریکه بیشترین کاهش رواناب مورد انتظار در شرایط بحرانی به مقدار ۵۱ درصد تحت سناریوی RCP 8.5 می‌باشد. همچنین موارد مشابهی نیز توسط کریستنسن و لتن مایر (۵)، جیانگ و همکاران (۱۵) و پورکی و همکاران (۲۶) به انجام رسیده است. از آنجاییکه یکی از روش‌های سازگاری با اثرات تغییراقلیم ایجاد سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از سدها براساس سناریوهای مختلف رواناب ورودی به مخزن بوده، متخصصین زیادی از جمله خنجری ساداتی و همکاران (۱۶)، مازندرانی‌زاده و همکاران (۲۱) و آشفته و همکاران (۲) ضمن شبیه‌سازی حجم رواناب ورودی به مخازن و تغییرات نیاز پایین‌دست آن‌ها در شرایط تغییراقلیم، به بهینه‌سازی میزان رهاسازی از مخارن و الگوی کشت پرداختند.

لطفی‌منش و بارانی (۱۹) به‌منظور بهره‌برداری بهینه ازمخزن سد زاینده رود واقع درحوضه آبریز زاینده رود در یک دوره پنج‌ساله با توجه به دو سناریوی تغییراقلیم A2 و B1 برمبنای الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزاری MATLAB توسعه دادند. نتایج نشان داد که مدل قادر به تامین ۷۴ درصد نیاز پایین‌دست بوده بطوریکه برای سناریوی A2 درصد تامین نیاز، قابلیت اعتماد حجمی و آسیب‌پذیری به‌ترتیب ۵۹/۳۸، ۵۳ و ۸۰ درصد، و برای سناریوی B1 این مقادیر به‌ترتیب ۶۱، ۲۷/۶۶ و ۶۷ درصد حاصل شد.

هدف از پژوهش حاضر استخراج قواعد بهره برداری بهینه سد گلستان در شرایط پاپه و تغییراقلیم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته (MOIWOA) می‌باشد که در این راستا پس از دست‌یابی به پارامترهای تغییراقلیم شبیه‌سازی فرآیند بارش–رواناب توسط مدل ANFIS با ساختار سوگنو و خوشه‌بندی تفاضلی در ورودی مخزن سدگلستان در شرایط تغییراقلیم صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

ریزمقیاس‌سازی

در این پژوهش، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM4.2، پارامترهای تغییراقلیم براساس مدل اقلیمی CANESM2 به‌دست آمد.

سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی[1]

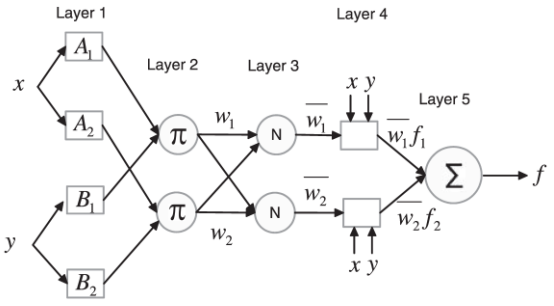
از ترکیب منطق فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی – عصبی به وجود آمده‌اند. یک شبکه تطبیقی، یک ساختار پیشرو چندلایه است که رفتار کلی خروجی آن به‌وسیله مقدار مجموعه‌ای از پارامترهای قابل اصلاح، تعیین می‌گردد. به‌عبارت دیگر ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گره‌های متصل به‌هم است که به‌طور مستقیم به‌هم مرتبط شده‌اند و در آن هر گره یک واحد پردازش محسوب می‌شود (شکل۱) (۱۴). این سیستم‌ها مشکل اصلی در طراحی سیستم‌های فازی در به دست‌آوردن قواعد اگر–آنگاه فازی را به‌وسیله استفاده مؤثر از قابلیتیادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تولید خودکار این قواعد و بهینه‌سازی پارامترها، حل کرده‌اند.

ANFIS یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی فازی است که یک سیستم فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند (۲۲).

این روش که در سال ۱۹۹۳ توسط جانگ مطرح شد (۱۴). پنج لایه دارد که به‌ترتیب شامل گره‌های ورودی، گره‌های قاعده، گره‌های میانی، گره‌های نتیجه و گره‌های خروجی است و به‌طور مستقیم با هم ارتباط دارند. هر گره دارای تابعی با پارامترهای قابل تنظیم یا ثابت است (۱۷) (شکل ۱). ساختار مناسب تکنیک ANFIS متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع عضویت ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند (۲۷).

در این روش جهت تعیین نوع و تعداد تابع عضویت در لایه اول از یکی از دو روش تفکیک شبکه‌ای یا تفکیک خوشه‌ای جهت کلاسه‌بندی داده‌ها استفاده می‌گردد.

روش آموزش هیبرید یکی از مهم‌ترین روش‌های آموزش سیستم‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی می‌باشد. در این روش جهت آموزش در لایه اول از روش پس‌انتشار خطا[2] و در لایه چهارم از روش تخمین کمترین مربعات[3] استفاده می‌شود (۱۴).



شکل ۱– شمای ساده‌ای از مدل ANFIS (۳۱)
Figure 1. A simple diagram of the ANFIS model (31)

1- Adaptive Neuro – Fuzzy Inference System 2- Back propagation (BP) 3- Least squares estimator (LSE)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

از مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم در ANFIS می‌توان به شعاع تأثیر اشاره کرد. شعاع تأثیر مشخص‌کننده محدوده نفوذ یک مرکز خوشه در هر یک از ابعاد داده‌هاست. به‌طورکلی، محققین جهت تعیین شعاع تاثیر بهینه مدل‌ها، با تغییر مقادیر شعاع تأثیر، سعی در دست‌یابی به شبکه‌های کاراتر رادارند.

شبیه‌سازی بارش-رواناب

جهت مدل‌سازی بارش-رواناب از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری حاجی قوشان، دوغ، قره شور و اوغان برای سد گلستان به‌دلیل ورود آورد رودخانه‌های مذکور به مخزن سد گلستان استفاده شد. لازم به‌ذکر است که از داده‌های روزانه پس از ساخت سد شامل داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، تبخیر از سطح دریاچه، میزان رواناب ورودی به مخزن سد و داده‌های ماهانه سطح دریاچه و حجم مخزن مندرج در سایت IranDams وابسته به وزارت نیرو برای سالهای ۱۳۸۴ الی ۱۳۹۷ برای سد گلستان جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی رواناب آینده استفاده شد. روش‌های مختلفی برای خوشه‌بندی داده‌ها وجود دارد که در این تحقیق از روش خوشه‌بندی تفاضلی استفاده شده است. در این روش شعاع تاثیر با تعداد خوشه‌ها نسبت عکس دارد. یعنی افزایش یکی باعث کاهش دیگری می‌شود. روش خوشه‌بندی کاهشی در مواردی استفاده می‌شود که دید مشخصی در مورد تعداد خوشه‌ها وجود ندارد (۱۰). در تحقیق حاضر برای دسته‌بندی و تحلیل داده‌ها، از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی با خوشه‌بندی تفاضلی، ساختار سوگنو و توابع عضویت گوسین به‌دلیل داشتن بالاترین کارایی در بین تمامی توابع عضویت در هر دو مرحله آموزش و آزمون استفاده شد. برای آموزش مدل از الگوریتم ترکیبی با ۱۰۰۰۰ تکرار با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2015a استفاده گردید. تعداد بهینه قوانین نیز با سعی و خطا (عوض‌کردن شعاع تاثیر در هر تکرار) برای هر ماه به‌دست آمد که در این تحقیق بهترین پیش‌بینی بر اساس نتایج متناظر با کمترین مقدار خطا و بیشترین مقدار همبستگی در هر یک از ماه‌های سال در نظر گرفته شد.

یکی از مراحل آماده‌سازی و محاسبات عددی برای تغذیه شبکه‌های عصبی نرمال‌سازی داده به‌منظور افزایش حساسیت به بزرگی داده‌ها و افزایش قدرت یادگیری می‌باشد که باعث افزایش توانایی پیش‌بینی می‌شود. در این تحقیق با نوشتن زیربرنامه‌ای در MATLAB بردارهای ورودی و خروجی در بازه $\{0$ و $1\}$ استاندارد شدند و در انتها پس از انجام فرآیند پیش‌بینی مجددا با نوشتن زیربرنامه‌ای دیگر در MATLAB به حالت عادی خویش برگشت داده شدند.

جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب مرحله تغییراقلیم در محل ورودی سد گلستان از مدل ANFIS با ساختار سوگنو و خوشه‌بندی تفاضلی با تابع عضویت گوسین و با ۲۰ اپوک آموزش و ۱۰ هزار تکرار جهت ۹۵٪ از داده‌های آموزش در هر بار برآورد، استفاده شد. بهترین شعاع تاثیر مدل ۰/۰۴ به‌روش سعی و خطا به‌دست آمد.

ارزیابی فرایند بارش- رواناب

در این پژوهش جهت ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی، از پارامترهای آماری ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب نش ساتکلیف (NSE) استفاده شد (روابط ۱ الی ۳). همچنین جهت دست‌یابی به بهترین ساختار در شبکه عصبی-فازی تطبیقی ضمن استفاده از شعاع بهینه تأثیر، از تابع عضویت گوسین به‌دلیل داشتن بالاترین کارایی در بین توابع عضویت برای مرحله آموزش و آزمون استفاده شد. شایان ذکر است که جهت صرفه‌جویی در وقت، ارزیابی توابع عضویت در راستای دست‌یابی به بهترین تابع عضویت با نوشتن زیربرنامه‌ای در نرم‌افزار متلب صورت گرفت.

$$R = Cov(O,S)/\delta_o\,\delta_s \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(e_i)^2/n} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_O - Q_S)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_O - \overline{Q_O})^2} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

در این روابط، Cov به معنای کوواریانس، δ نماد انحراف معیارهای مقادیر شبیه‌سازی‌شده (S)، مقادیر مشاهده‌شده (O)، n تعداد گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی، e_i خطای پیش‌بینی است که از تفاوت مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده به‌دست می‌آید Q_S، Q_O به‌ترتیب جریان شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای در گام زمانی i است و $\overline{Q_O}$ متوسط دبی جریان مشاهده‌شده می‌باشد. طبیعی است که هر چه مقادیر همبستگی به یک و ضریب خطای RMSE به صفر نزدیکتر باشند مدل از دقت بیشتری برخوردار است. مقدار NSE از یک مقدار منفی تا ۱+ در تغییر است و زمانی که ۱+ باشد نمایانگر انطباق هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده می‌باشد (۶ و ۷). یکی از مهمترین بخش‌ها در منطق فازی، خوشه‌بندی داده‌ها به‌منظور تعریف توابع عضویت و تعیین قوانین اگر-آنگاه فازی است. نکته مهم در تعداد قوانین اگر-آنگاه، این است که تعداد کم این قوانین نمی‌تواند تمام مساله را پوشش داده، بنابراین یافتن تعداد بهینه قوانین یکی از مهم‌ترین نکات سیستم استنتاج فازی است (۳۲).

در این راستا جهت ارزیابی مدل‌های مختلف استفاده شده در فرآیند شبیه‌سازی بارش-رواناب از پارامترهای خطا، ضریب همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف استفاده شد که بر اساس آن‌ها بهترین الگو جهت شبیه‌سازی، به شرح جدول ۱ به دست آمد.

جدول ۱- ارزیابی پارامترهای مدل شبیه سازی فرایند بارش- رواناب

Table 1. Evaluation of rainfall-runoff simulation parameters

مخزن	ضریب همبستگی	ضریب ناش-ساتکلیف	خطای RMSE
سد گلستان	٪۹۸	٪۹۵	۰/۰۰۰۳

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

توسعه مدل بهینه‌سازی

پیش از پرداختن به توسعه مدل بهینه‌سازی، لازم است شبیه‌سازی مخزن به کمک معادلهٔ پیوستگی مطابق با روابط زیر به ازای هر $\forall\ t = 1, 2, \dots T$ ارائه گردد (۲ و ۲۴):

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - Re_t - Sp_t - (\bar{A}_t . E_t) \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$\bar{A}_t = a_0 + a_1 \bar{S}_t \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$S_{P_t} = \begin{cases} S_t + Q_t - Re_t - (\bar{A}_t . E_t) - S_{max} \\ if\ S_t + Q_t - Re_t - (\bar{A}_t . E_t) \geq S_{max} \\ 0 \\ if\ \ S_t + Q_t - Re_t - (\bar{A}_t . E_t) < S_{max} \end{cases} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در این روابط Re_t: حجم رهاسازی از مخزن در دوره tام، E_t: عمق تبخیر از مخزن دریاچه در دوره tام، S_t و $S_{(t+1)}$: میزان حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره tام، Q_t: میزان حجم جریان ورودی به مخزن سد در دوره tام، $\bar{A}_t$: متوسط مساحت سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره tام، $\bar{S}_t$: متوسط حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره tام، S_{max}: حجم بیشینه مخزن سد در دوره tام، Sp_t: حجم سرریز از مخزن در دوره tام، n طول دوره زمانی برنامه‌ریزی، Ar_i: سطح متوسط مخزن در دوره tام، a_0 و a_1: ضرایب ثابت معادله منحنی سطح – حجم مخزن و T: بازه بهره‌برداری است (۲).

در این پژوهش، توابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی شاخص آسیب‌پذیری و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ می‌باشد (۲).

$$Minimize\ F_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T}(D_t - Re_t | Re_t < D_t)}{[N_{t=1}^{T}(Re_t < D_t)].D_{Max}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$Maximize\ F_2 = \frac{N_{t=1}^{T}(D_t - Re_t | Re_t \geq D_t)}{T} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

F_1 تابع هدف شاخص آسیب‌پذیری F_2، تابع هدف شاخص اطمینان‌پذیری، D_t حجم تقاضا در طول دوره tام، D_{Max}: بیشینهٔ تقاضای آب دربازهٔ بهره‌برداری موردنظر، $N_{t=1}^{T}(Re_t < D_t)$ تعداد ماه‌های کمبود آب و $N_{t=1}^{T}(D_t - Re_t | Re_t \geq D_t)$ تعداد ماه‌های تأمین آب می‌باشند.

محدودیت‌های مساله بهره‌برداری از مخزن مطابق روابط زیر است (۲):

$$S_t \geq S_{min} \quad , R_t \geq 0 \quad \forall\ t = 1, 2, \dots T \quad \text{(رابطه ۹)}$$

S_{min} حجم کمینه مخزن است.

در صورت تخطی از محدودیت‌های رابطه فوق، توابع جریمه‌ای به‌شرح ذیل به توابع هدف اضافه می‌شود (۲):

$$F_1(or\ F_2) = F_2(or\ F_1) \pm \left[A'.\left(\frac{S_{min} - S_t}{S_{max} - S_{min}}\right) + B'\right] \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$F_1(or\ F_2) = F_2(or\ F_1) \pm \left[C'.\left(\frac{Re_t}{D_{Max}}\right) + D'\right] \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

که در آن‌ها $\left[A'.\left(\frac{S_{min} - S_t}{S_{max} - S_{min}}\right) + B'\right]$ تابع جریمهٔ ناشی از تخطی حجم مخزن و $\left[C'.\left(\frac{Re_t}{D_{Max}}\right) + D'\right]$ تابع جریمهٔ ناشی از تخطی حجم خروجی از مخزن، و ضرایب A' تا D' ثابت‌های مثبت توابع جریمهٔ ($A' = 1$, $B' =$ ۰/۵, $C' =$ ۱ و $D' =$ ۱۶) هستند (۲).

منحنی فرمان بهره‌برداری نیز به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که قاعدهٔ تصمیم برای بهره‌برداری از سیستم تک‌مخزنه سد گلستان با اهداف کمینه‌سازی آسیب‌پذیری ناشی از کمبود سیستم، به منظور تأمین تقاضای مورد نیاز و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری ناشی از تأمین تقاضا به کمک الگوریتم MOIWOA، مطابق روابط زیر استخراج می‌شود (۲):

$$Re_{bt} = g_1(Q_{bt} + S_{bt} + D_{bt}) \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$Re_{ft} = g_2(Q_{ft} + S_{ft} + D_{ft}) \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$g_1(Q_{bt} + S_{bt} + D_{bt})$ گزینهٔ اول، دستور حاصل از MOIWOA در بازهٔ بهره‌برداری پایه برای شرایط پایه و $g_2(Q_{ft} + S_{ft} + D_{ft})$ گزینه دوم، دستور حاصل از MOIWOA در بازهٔ بهره‌برداری تغییراقلیم برای شرایط تغییراقلیم، اندیس b برای شرایط پایه، و اندیس f برای شرایط تغییراقلیم هستند (۲).

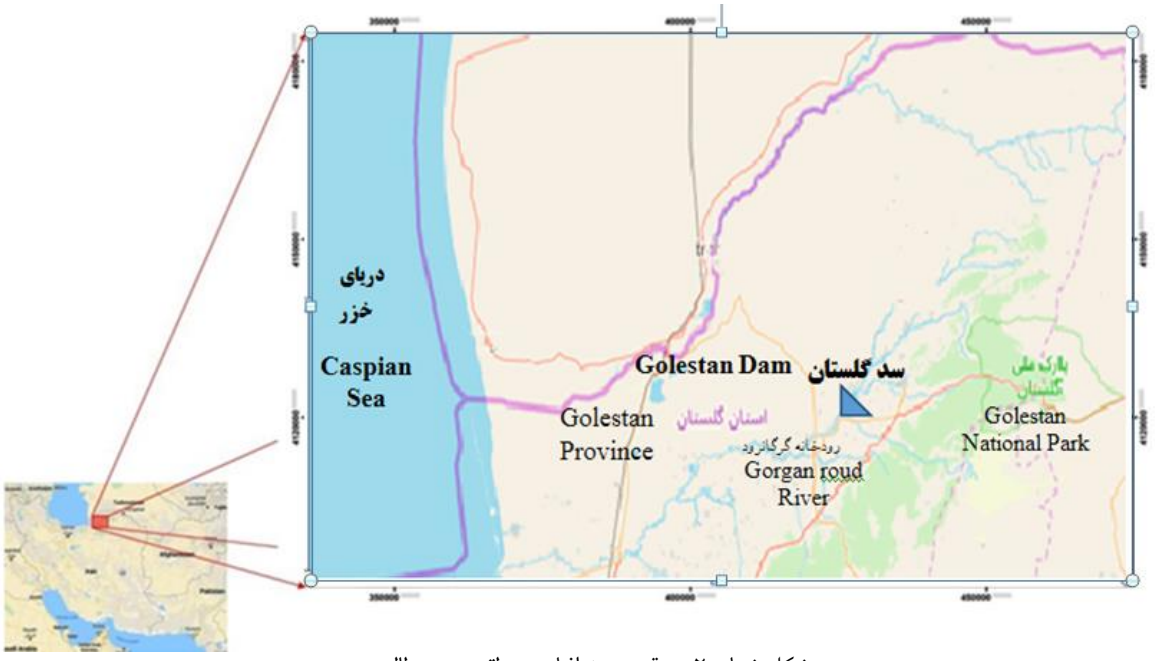
منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی گلستان بر روی رودخانه گرگانرود در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر گنبد احداث شده است. ظرفیت مخزن سد در ابتدای بهره‌برداری حدود ۸۶ میلیون مترمکعب بوده که با توجه به نقش مهم ذخیره‌سازی 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 ۲ میلیون متر مکعب برآورد می‌گردد. ضمنا قواعد بهره‌برداری بهینه از سامانه سد مخزنی گلستان به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شده است. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را مشخص نموده است. بر این اساس حداکثر نیاز آبی اراضی پایین‌دست سد گلستان بالغ بر ۱۲۵ میلیون متر مکعب بوده که از حجم قابل تنظیم سالانه آن کمی بیشتر است. که به‌منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از سامانهٔ تک‌مخزنه از الگوریتم MOIWOA استفاده شد. براین اساس منحنی سطح – حجم مخزن گلستان با ضریب همبستگی ۰/۹۸ مطابق رابطه زیر به‌دست‌آمد:

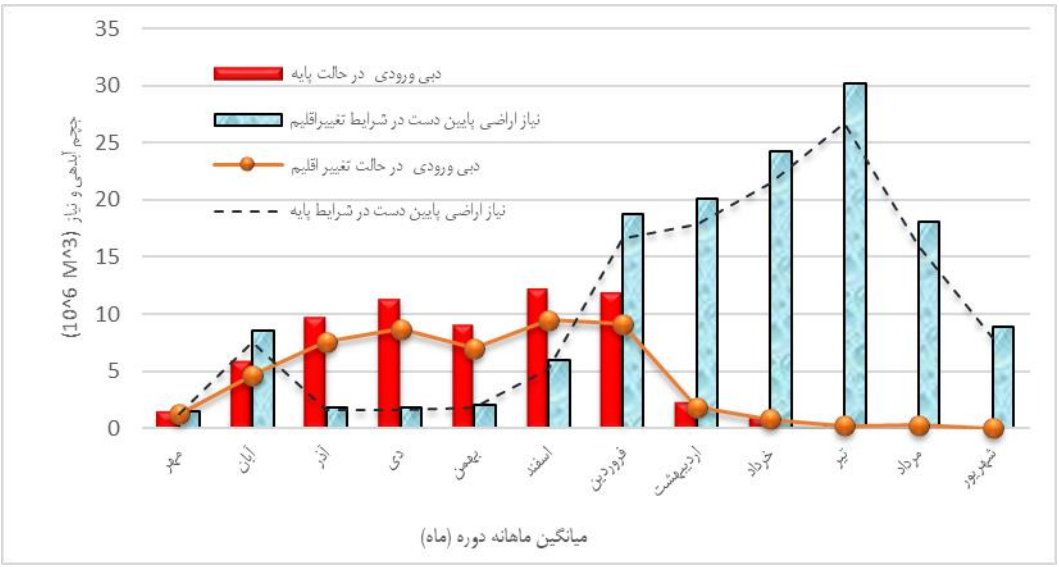
$$Y = -0.001X^2 + 0.190X + 0.024 \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

بیشینه تقاضا در شرایط پایه و تغییراقلیم ۱۲۵/۶۱ و ۱۴۱/۹۴ میلیون متر مکعب می‌باشد. شکل ۳ میانگین ماهیانهٔ حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب را در شرایط پایه و تغییراقلیم نشان می‌دهد. نتایج نشان داد حجم آبدهی به مخزن و حجم تقاضای آب در شرایط تغییراقلیم نسبت به شرایط پایه، به‌ترتیب، حدود ۲۷ درصد کاهش و ۱۳ درصد افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]



شکل شماره ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 2. Geographical location of the study area



شکل۳- میانگین ماهیانهٔ حجم آبدهی به مخزن به‌همراه میانگین ماهیانهٔ حجم تقاضای آب در شرایط پایه و تغییر اقلیم
Figure 3. Average monthly inflow and water demand volume under baseline and climate change conditions

برآورد عدم قطعیت در پیش‌بینی رواناب

یکی دیگر از اهداف این پژوهش، بررسی و برآورد عدم قطعیت در خروجی مدل نروفازی است. بدین‌صورت که مدل نروفازی در قالب یک نمونه‌گیری مونت کارلو به‌کارگیری شد. از آنجاییکه روش مونت کارلو براساس استفاده از اعداد تصادفی و تابع توزیع احتمالاتی استوار است، با استفاده از توابع توزیع احتمالاتی متغیرهای ورودی مدل به‌طور تصادفی تولید شده و سپس خروجی معادل آن‌ها از مدل مورد نظر به‌دست‌آمده و با تکرار این عمل، عدم قطعیت خروجی از طریق محاسبه پارامترهای آماری برآورد می‌گردد (۸).

در روش مونت کارلو از داده‌های تصادفی تولیدشده استفاده می‌شود بطوریکه مشابه روش نمونه‌گیری دودویی Bootstrap می‌باشد. اما با این تفاوت که یک الگو در یک نمونه تکرار نمی‌شود. لذا ابتدا از بین داده‌های واسنجی مدل، به دفعات و بدون تکرار نمونه‌گیری انجام شده و برای هر نمونه عملیات صحت‌سنجی صورت می‌گیرد. با استفاده از این روش، محدوده‌ای از خروجی که نتیجه عدم قطعیت مدل در آن ساخته می‌شود، حاصل خواهد شد (۲۰).

بنابراین در پژوهش حاضر، جهت بررسی عدم قطعیت، ضمن درنظرگرفتن حدود اطمینان ۹۵٪ برای داده‌های حاصل

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

از پیش‌بینی، جهت تعیین عرض متوسط باند اطمینان از فاکتور d (رابطه زیر) استفاده شد (۱):

$$d = \frac{\bar{d}}{S} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

که درآن $\bar{d}$ عرض انحراف از معیار آبدهی مشاهداتی و S متوسط باند اطمینان می‌باشد که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(U-L)_i \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

که درآن L حد ۲/۵ درصد و U حد ۹۷/۵ درصد توزیع تجمعی احتمال تجربی حاصل از داده‌های پیش‌بینی می‌باشد. ضمن اینکه مقادیر کمتر از یک در فاکتور d عدد مناسبی خواهد بود (۱). به‌علاوه درصد داده‌های قرارگرفته در باند اطمینان ۹۵٪ با رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱):

(رابطه ۱۷)

$$95\ PPU = \frac{1}{a}\,count(Q|L \le Q \le U) \times 100$$

الگوریتم تکامل تفاضلی[1]

الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) یک الگوریتم ساده و قدرتمند برای حل مسائل بهینه سازی است (۱۱ و ۱۸). اساساً، الگوریتم DE حاوی دو پارامتر مهم یعنی عملگر جهش (SF) و دیگری احتمال تقاطع CR بوده (۱۳) که به‌شرح زیر می‌باشند (۳۳):

عملگر جهش

عملگر جهش در الگوریتم تکامل تفاضلی بر اساس رابطه زیر استوار است (۳۳):

$$m_i^{(g+1)} = X_{r1}^{g} + SF \times \left(X_{r2}^{g} - X_{r3}^{g}\right) \quad \text{(رابطه ۱۸)}$$

که در آن $m_i^{(g+1)}$ عامل جهش‌یافته در $g+1$مین نسل بوده و X_{r1}^{g} ، X_{r2}^{g} و X_{r3}^{g} نشانگر سایر عوامل در جمعیت است. به علاوه SF مقدار ثابتی است که مبین عامل جهش می‌باشد.

عملگر تقاطع

در فرآیند تقاطع، الگوریتم به‌طور تصادفی فردی از جمعیت را در جهت ایجاد تکامل در تنوع جمعیتی انتخاب می‌کند بطوریکه این فرد می‌تواند یکی از افراد عادی ($X_i^{(g)}$) یا افراد جهش‌یافته ($m_i^{(g+1)}$) باشد (۳۳).

$$c_i^{(g+1)} = \begin{cases} m_i^{(g+1)} & if \quad rand \le CR \\ X_i^{(g)} & otherwise \end{cases} \quad \text{(رابطه ۱۹)}$$

که در آن rand نشان‌دهنده عددی تصادفی بین صفر و یک است. CR ثابتی است که احتمال تقاطع را نشان می‌دهد (۳۳).

عملگر انتخاب

در این مرحله، بردار سنجش به‌دست‌آمده از مرحله قبل و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شده بود، با توجه به تابع هدف، ارزش‌دهی می‌شوند و درصورتی‌که بردار سنجش، ارزشی بیش از عضو هدف داشته باشد، به‌عنوان یکی از اعضای نسل بعد درنظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت، عضو هدف، خود یکی از جمعیت نسل بعد به‌حساب می‌آید. رابطه زیر بیان‌کننده انتخاب بین بردار سنجش و عضو هدف هست (۳۳).

$$X_i^{(g+1)} = \begin{cases} c_i^{(g+1)} & if \quad f\left(c_i^{(g+1)}\right) \le f\left(c_i^{(g)}\right) \\ X_i^{(g)} & otherwise \end{cases} \quad \text{(رابطه ۲۰)}$$

که در آن f نشاندهنده مقدار تابع برازندگی مساله است.

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ[2]

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری الهام‌گرفته از طبیعت، رفتار اجتماعی نهنگ‌های گوژپشت را به تصویر می‌کشد. در این الگوریتم با استفاده از سه عملگر محاصره طعمه، روش حمله تور حبابی (مرحله استخراج) و جستجوی طعمه (مرحله اکتشاف) به‌روزرسانی موقعیت عوامل جستجو در هر تکرار صورت می‌پذیرد. به‌طوریکه پس از شناسایی بهترین عامل جستجو، سایر عوامل جستجو مکان خود را نسبت به بهترین عامل به‌روزرسانی می‌کنند (روابط ۲۱ و ۲۲).

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad \text{(رابطه ۲۱)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X^*}(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad \text{(رابطه ۲۲)}$$

بطوریکه t تکرار جاری، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردارهای ضرایب، $\vec{X^*}$ بردار مکان بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده در حال حاضر، $\vec{X}$ بردار مکان، II علامت قدر مطلق و صفر 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 ۲۳ و ۲۴ محاسبه می گردند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r} - \vec{a} \quad \text{(رابطه ۲۳)}$$

$$\vec{C} = 2.\vec{r} \quad \text{(رابطه ۲۴)}$$

که در آنها $\vec{a}$ به‌صورت خطی از مقدار ۲ تا صفر طی تکرارها کاهش می‌یابد و $\vec{r}$ بردار تصادفی در فاصله صفر تا یک می‌باشد.

در روش حمله تور حبابی، نهنگ‌های گوژپشت در اطراف طعمه در امتداد یک دایره انقباضی و به‌طور همزمان در مسیر مارپیچی شکل شنا می‌کنند (شکل ۴).

رفتار تهاجمی شبکه حباب تور را می توان از لحاظ ریاضی با روابط زیر نشان داد:

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X^*}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad \text{(رابطه ۲۵)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}.e^{br}.\cos(2\pi r) + \vec{X^*}(t) \quad \text{(رابطه ۲۶)}$$

بطوریکه $\vec{D}$ به فاصله i مین نهنگ تا شکار (بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده تا کنون) اشاره داشته، b ثابتی برای تعریف شکل مارپیچی لگاریتمی، r عددی تصادفی بین ۱- تا ۱+ می‌باشد.

جهت مدلسازی این رفتار فرض می‌شود که نهنگ با احتمال ۵۰ درصد از بین سازوکار محاصره انقباضی و یا مدل مارپیچی یکی از آنها را انتخاب می‌کند تا موقعیت نهنگ‌ها طی فرآیند بهینه‌سازی به‌روز شود. مدل ریاضی آن به‌صورت رابطه ۲۷ تعریف می‌شود:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X^*}(t) - \vec{A}.\vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D}.e^{br}.\cos(2\pi r) + \vec{X^*}(t) & \text{if } p \ge 0.5 \end{cases} \quad \text{(رابطه ۲۷)}$$

که در آن P عددی تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. به‌منظور افزایش توانایی فاز اکتشاف، در الگوریتم نهنگ از یک استراتژی جستجوی وسیع استفاده شده است. عوامل جستجو جایگاه خود را مطابق با یک عامل تصادفی در جمعیت یعنی بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده تاکنون به‌روز

1- Differential Evolution
2- Whale optimization algorithm

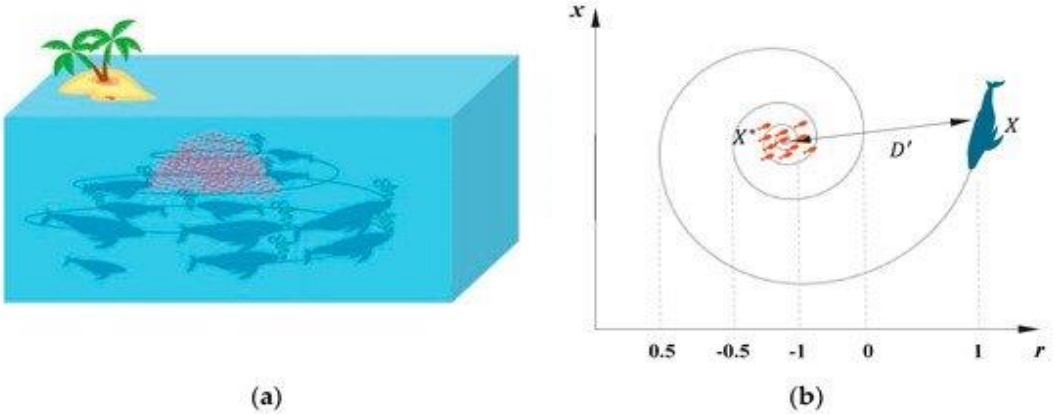
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

می‌کنند. از آنجاییکه $\vec{A}$ با مقادیر تصادفی بین ۱- تا ۱+ نشانگر نزدیکی عامل جستجو به نهنگ مرجع است، جستجوی رفتار طعمه می‌تواند از نظر ریاضی به‌شرح زیر باشد:

$$\vec{D} = |C.\overrightarrow{X_{rand}} - \vec{X}(t)| \quad \text{(رابطه ۲۸)}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A}.\vec{D} \quad \text{(رابطه ۲۹)}$$

که $\overrightarrow{X_{rand}}$ بردار موقعیت تصادفی منتخب از جمعیت جاری می‌باشد.



شکل ۴- شبکه تورحبابی(a) و مدل به روز رسانی موقعیت(b) در WOA
Figure 4. Bubble-net feeding behavior of humpback whale (**a**) and the position update model (**b**)

الگوریتم پیشنهادی نهنگ بهبود یافته چندهدفه[1]

جهت بهبود توانایی فاز اکتشاف در الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ وایجاد همگرایی در زمان کوتاه‌تر، ضمن ادغام عملگر جهش موجود در الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) در الگوریتم نهنگ(WOA) الگوریتم جدیدی پیشنهاد شد که از آن تحت عنوان الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهبودیافته (IWOA) یاد می‌شود (۴). الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ بهبودیافته شامل دو بخش اکتشاف و استخراج می‌باشد که جهت کنترل قابلیت این دو بخش پارامتری تحت عنوان λ تعریف می‌شود که مقدار آن براساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد (۴):

$$\lambda = 1 - \frac{t}{t_{max}} \quad \text{(رابطه ۳۰)}$$

که در آن t نسل فعلی و t_{max} حداکثر تعداد نسل‌ها بوده و مقادیر λ از یک به صفر در طول زمان کاهش می‌یابد. بنابراین، هر یک از نهنگ‌ها مجاز هستند ضمن انجام فرآیند استخراج با افزایش زمان، به اکتشاف خود در نسل اولیه نیز ادامه دهند. نکته حائز اهمیت در الگوریتم IWOA این است که در این الگوریتم فاز اکتشاف از ترکیب عملگر جهش الگوریتم تکامل تفاضلی و جستجوی طعمه الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ حاصل می‌شود. علت اساسی این ادغام، برتری عملگر جهش در کاوش در فضای جستجو است (۹).

فاز استخراج در IWOA بسیار شبیه WOA می‌باشد. الگوریتم هیبریدی برخلاف WOA، یک روش نخبه‌گرایی است؛ یعنی، موقعیت جدید نهنگ‌ها در نسل بعدی یکی از مناسب‌ترین مواردی است که بین والدین (Xi) و فرزندان (Ui) به‌وجود می‌آید. توجه به این نکته ضروری است که راه‌حل‌ها باید محدودیت‌های مرزی را در نظر بگیرند. اگر این محدودیت‌ها نقض شوند، اعمال قوانین جبرانی مطابق با روابط زیر الزامی است (۴).

$$X_i(j) = \begin{cases} \delta_j + rndreal(0,1) \times (\mu_j - \delta_j) & if \ \ X_i(j) < \delta_j \\ \mu_j - rndreal(0,1) \times (\mu_j - \delta_j) & if \ \ X_i(j) < \mu_j \end{cases} \quad \text{(رابطه ۳۱)}$$

که در آن δ_jوμ_j به‌ترتیب مرز بالایی و پایینی زمین بعد بوده و $X_i(j)$ زمین بعد از iمین راه حل می‌باشد. $rndreal(0,1)$ یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. در نتیجه، پیچیدگی محاسباتی IWOA مشابه WOA است که در آن حداکثر تعداد نسل ها و سازگاری توسط الگوریتم تعیین می‌شود (۴).

در این پژوهش ضمن ارائه الگوریتم MOIWOA کدنویسی آن برای اولین بار در نرم‌افزار متلب صورت گرفت و کارایی آن در مهندسی و مدیریت منابع آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی آماری نشان‌دهنده افزایش دمای متوسط ماهانه به‌میزان ۱/۸ تا ۲ درجه سانتی‌گراد در تمامی سناریوها بود. بررسی تغییرات بارش متوسط ماهانه نیز نشان داد که کاهش نرخ نزولات جوی در دوره آتی کاملا محرز بوده و با توجه به سناریوی RCP متوسط این میزان به مقدار ۲۱/۱٪ کمتر از دوره پایه پیش‌بینی شده است. به‌علاوه در این مطالعه همچنین به بررسی تأثیر عدم قطعیت شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل نروفازی مرتبه دوم پرداخته شد. در هر یک از مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل، تعداد ۵۰۰ تکرار داده تصادفی برای پیش‌بینی رواناب تولید گردید. سپس حدود اطمینان ۹۵٪ از طریق تعیین مقادیر ۲/۵ درصد و ۹۷/۵ درصد توزیع احتمالاتی تجربی مشخص گردید. پارامترهای عدم قطعیت محاسبه‌شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

1- Multi-objective Improved whale optimization algorithm

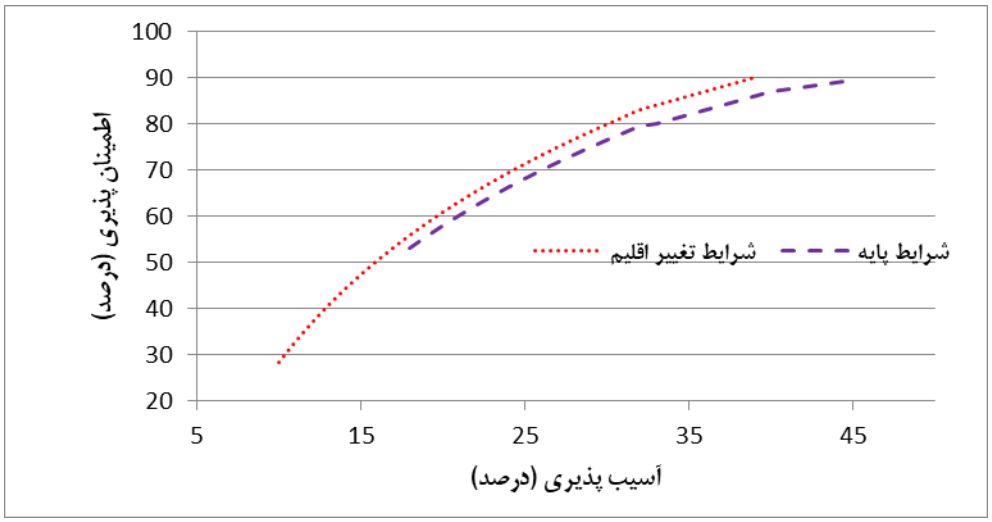
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

جدول ۲- پارامترهای عدم قطعیت مدل نروفازی مرتبه دوم در پیش‌بینی رواناب ورودی به سد گلستان
Table 2. Uncertainty Parameters of the Second Order Neuro-fuzzy Model in Predicting the reservoir inflow

پارامتر	واسنجی	صحت سنجی
فاکتور d	۰/۹۷	۰/۹۴
حدود اطمینان ۹۵٪	۹۴/۲۶	۹۱/۶۳

از آنجاییکه لحاظنکردن ارزیابی عدم‌قطعیت در مطالعات بررسی اثرات تغییراقلیم بر رواناب می‌تواند نتایج غیرکاربردی در پی داشته باشد، با توجه به قرارگرفتن بیش از ۹۰ درصد داده‌ها در باند اطمینان ۹۵ درصد و مقادیر فاکتور d به دست‌آمده کمتر از یک چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله صحت‌سنجی می‌توان دریافت که اثر عدم‌قطعیت مدل پیش‌بینی باعث شده تا کیفیت نتایج بهبود یابد (۲۳).

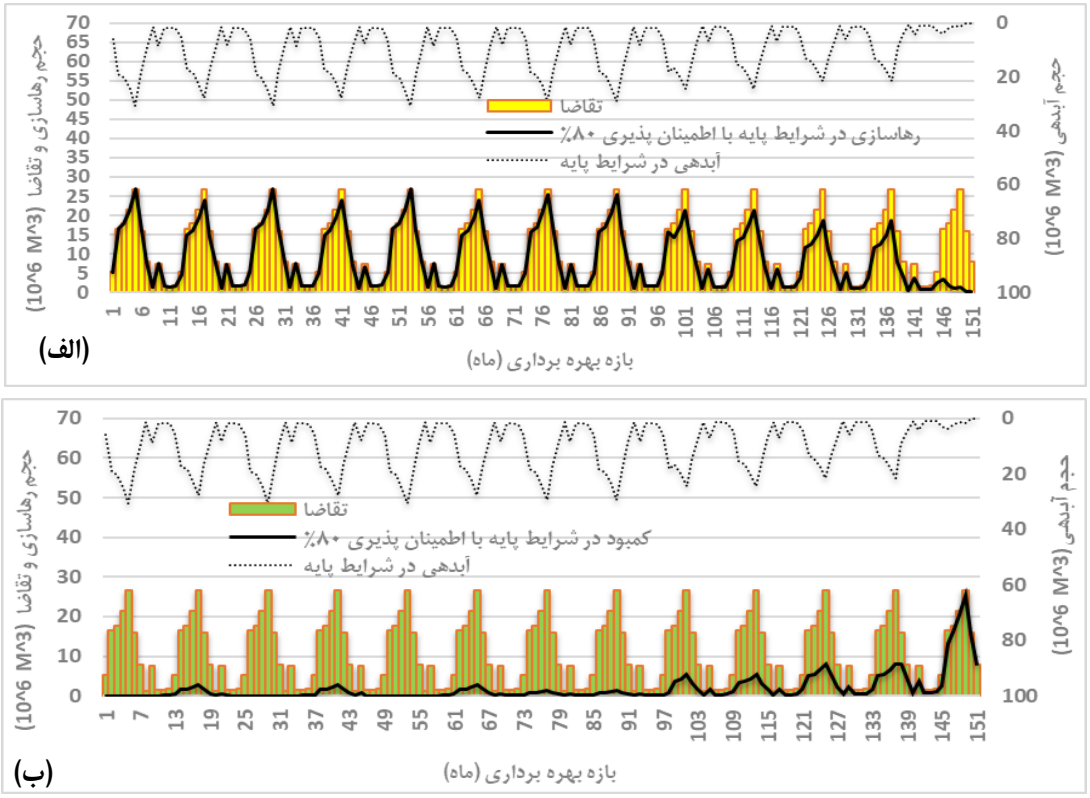
قواعد بهره‌برداری بهینهٔ مخزن گلستان از یک مسالهٔ دوهدفه به کمک الگوریتم MOIWOA استخراج شد. این مسالهٔ دوهدفه شامل کمینه‌سازی آسیب‌پذیری سیستم و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضا بود. شکل ۵ نتایج الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفهٔ مذکور را به شکل منحنی پَرِتو، برای شرایط پایه و تغییراقلیم، نشان می‌دهد.



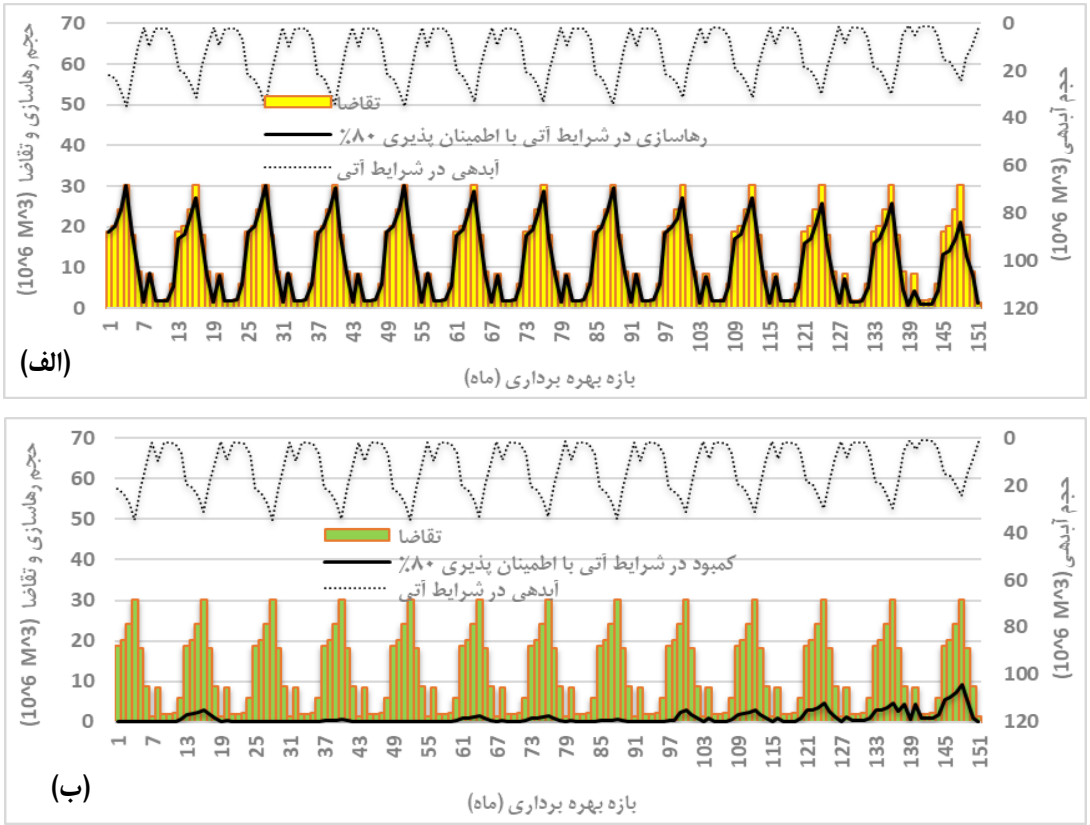
شکل ۵- مقایسهٔ منحنی پَرِتو و تغییرات توابع هدف آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری
Figure 5. Comparison of the pareto curve and the variations of the objective functions of the vulnerability and reliability indices

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، محدودهٔ تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۱۸ تا ۴۵ درصد و ۱۰ تا ۳۹ درصد و محدودهٔ تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۵۲ تا ۵/۸۹ درصد و ۸ تا ۹۰ درصد است. به‌ازای اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد، آسیب‌پذیری ۳۱ و ۲۷ درصد، به‌ترتیب، برای شرایط پایه و تغییراقلیم ایجاد می‌شود. این مطلب به آن معنی است که میزان پارامتر آسیب‌پذیری مدل در شرایط تغییراقلیم از رنج کمتری برخوردار بوده، به‌طوریکه در مقادیر اطمینان‌پذیری یکسان، مدل در شرایط تغییراقلیم از آسیب‌پذیری کمتری برخوردار خواد بود. از سوی دیگر، محدودهٔ تغییرات آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری در شرایط تغییراقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر است. هر یک از نقاط منحنی پَرِتو در شکل ۴، مبین یک قاعده بهره‌برداری از مخزن است که شاخص‌های آسیب‌پذیری و اطمینان‌پذیری مربوط به‌خود را در بر می‌گیرد. هیچ یک از این نقاط پَرِتو 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 تغییراقلیم بررسی و ارزیابی شد. بدین‌منظور، قواعد بهینهٔ حاصل از شرایط پایه با قواعد بهینهٔ حاصل از تغییراقلیم مقایسه شدند. نتایج مربوطه در تأمین نیاز آبی به‌ازای شاخص اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد در شکل ۶ الف (برای شرایط پایه) و ۷ الف (برای گزینهٔ تغییراقلیم) ارائه شده است. در ادامه، تغییرات حجم کمبود با قواعد بهره‌برداری بهینهٔ حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی هیبریدی پیشنهادی برای گزینه‌های دوگانهٔ فوق‌الذکر در مقایسه با نیاز آبی مربوطه بررسی شدند. نتایج، همانگونه در شکل‌های۶ ب و ۷ ب آمده است نشان می‌دهند که در شرایط تغییراقلیم عملکرد سد بهتر شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]



شکل ۶- مقایسهٔحجم رهاسازی(الف) و حجم کمبود (ب) به ازای نقطه پَرتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۸۰٪ در شرایط پایه
Figure 6. Comparison of water release (a) and deficiency volume (b) for pareto point of 80% reliability under baseline conditions



شکل ۷- مقایسهٔحجم رهاسازی(الف) و حجم کمبود (ب) به‌ازای نقطه پَرتوی حاصل از اطمینان‌پذیری ۸۰٪ در شرایط تغییراقلیم
Figure 7. Comparison of water release (a) and deficiency volume (b) for Pareto point of 80% reliability under climate change conditions

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

با توجه به شکل ۶ الف و ۷ الف، میزان رهاسازی در شرایط تغییراقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر بوده بطوریکه این موضوع به‌دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط تغییراقلیم به میزان ۱۳ درصد است. از سوی دیگر با توجه به شکل‌های ۶ ب و ۷ ب در گام بعد، به منظور بررسی عملکرد مخزن در تأمین نیاز آبی اراضی پایین‌دست، مقادیر تابع هدف به‌ازای نقطه پَرتو (اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد) در شرایط مذکور مقایسه شدند (جدول ۲). با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود، میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا در شرایط تغییراقلیم تطابق بیشتری دارد. بنابراین، در شرایط تغییراقلیم عملکرد سد بهتر می‌باشد. شایان توجه می‌باشد که نتایج به دست‌آمده از این پژوهش با نتایج تحقیق آشفته و همکاران (۲ و ۳) نیز منطبق می‌باشد.

جدول ۳- مقایسهٔ توابع هدف در دو حالت پایه و تغییراقلیم به‌ازای نقطهٔ پَرتو (اطمینان‌پذیری ۸۰ درصد)

Table 3. Objective functions' comparison in the baseline and climate change conditions for 80% reliability

شرایط	اطمینان‌پذیری (٪)	آسیب‌پذیری (٪)
پایه	۸۰	۳۱
تغییراقلیم	۸۰	۲۷

بنابراین از آنجایی که پیش‌بینی رواناب آینده در شرایط تغییراقلیم بدون تکیه بر تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌های پیش‌بینی کننده باعث ایجاد خطا در برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌گردد، در این پژوهش پس از دست‌یابی به پارامترهای تغییراقلیم براساس مدل اقلیمی CANESM2 با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM4.2، پیش‌بینی فرآیند بارش-رواناب آتی در شرایط تغییراقلیم صورت پذیرفت. سپس تحلیل عدم قطعیت بر روی نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام گرفته توسط مدل نروفازی مرتبه دو صورت گرفت تا در صورت مناسب‌بودن نتایج حاصل از بررسی عدم قطعیت مذکور بهینه‌سازی میزان رواناب حاصله و مخزن سد گلستان صورت پذیرد. با عنایت به نتایج حاصل از تحلیل عدم قطعیت، شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در دوره تغییراقلیم در باند اطمینان ۹۵ درصد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس جهت دست‌یابی به قواعد بهره‌برداری بهینه در شرایط پایه و تغییراقلیم، اقدام به کدنویسی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نهنگ بهبودیافته برای اولین بار در مدیریت منابع آب در نرم‌افزار متلب جهت بهینه‌سازی مخزن سد گلستان در شرایط پایه (۱۳۸۴-۱۳۹۷) و تغییراقلیم (۱۴۲۰ الی ۱۴۳۲) شد. نتایج نشان داد، محدودهٔ تغییرات آسیب‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۱۸ تا ۴۵ درصد و ۱۰ تا ۳۹ درصد و محدودهٔ تغییرات اطمینان‌پذیری در شرایط پایه و تغییراقلیم، به‌ترتیب، برابر ۵۲ تا ۸۹/۵ درصد و ۲۸ تا ۹۰ درصد است. به‌ازای اطمینان‌پذیری درصد، آسیب‌پذیری و درصد، به ترتیب، برای شرایط پایه و تغییراقلیم ایجاد می‌شود. مقایسه قواعد بهینهٔ حاصل از شرایط پایه با قواعد بهینهٔ حاصل از تغییراقلیم نشان داد که نیاز آبی طرح به‌ازای شاخص اطمینان‌پذیری درصد تأمین می‌گردد. همچنین میزان رهاسازی در شرایط تغییراقلیم نسبت به شرایط پایه بیشتر بوده، بطوریکه این موضوع به‌دلیل افزایش حجم تقاضای آب در شرایط مربوط به تغییراقلیم می‌باشد. از سوی دیگر مقایسه عملکرد مخزن در تأمین نیاز آبی اراضی پایین‌دست در نقطه پَرتو (اطمینان‌پذیری درصد) در شرایط پایه و تغییراقلیم نیز حکایت از تطبیق بیشتر میزان رهاسازی از مخزن با تقاضا در شرایط تغییراقلیم دارد. شایان ذکر است که آشفته و همکاران (۲ و ۳) نیز پیش‌تر به نتایج مشابهی دست یافته بودند. از آنجاییکه که این مدل ضمن مقایسه با روش‌های پیشین نظیر استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک که پیشتر توسط آشفته و همکاران به‌کار گرفته شد توانسته اطمینان‌پذیری بیشتری را به‌دست دهد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الگوریتم هیبریدی نهنگ بهبودیافته از کارایی بهتری نسبت به GP برخوردار می‌باشد، لذا پیشنهاد می‌گردد استفاده از الگوریتم های فراابتکاری جدید در این روش مورد ارزیابی قرار گیرد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

منابع

1. Abbaspour, K.C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333: 413-430.
2. Ashofteh, P.S. and O. Bozorg Haddad. 2016. Using a GP optimization tool developed for multipurpose reservoirs in climate change. Iranian Journal of Soil and Water Research, 46(3): 415-422 (In Persian).
3. Ashofteh, P.S. and O. Bozorg Haddad and M.A. Mari˜no. 2013. Climate change impact on reservoir performance indices in agricultural water supply. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(2): 19434774.
4. Bozorgi S.M. and S. Yazdani. 2019. IWOA: An improved whale optimization algorithm for optimization problems. Journal of Computational Design and Engineering, 6: 243-259.
5. Christensen, N. and D.P. Lettenmaier. 2006. A multi-model ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. Journal of Hydrology and Earth System Sciences, 3(6): 3727-3770.
6. Donyaii, A., and A. Sarraf. 2020. Optimization of Reservoir Operation using a Bioinspired Metaheuristic Based on the COVID-19 Propagation Model. Numerical Methods in Civil Engineering Journal, 5 (1) :15-28.
7. Donyaii A., A. Sarraf and H. Ahmadi. 2020a. A Novel Approach to Supply the Water Reservoir Demand Based on a Hybrid Whale Optimization Algorithm. Shock and Vibration, https://doi.org/10.1155/2020/8833866.
8. Donyaii, A., A. Sarraf and H. Ahmadi. 2020b. Application of a new approach in optimizing the operation of the multi-objective reservoir. Journal of Hydraulic Structures, 6(3), 1-20.
9. Gong, W., Z. Cai and C.X. Ling. 2011. DE/BBO: A hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for global numerical optimization. Soft Computing, 15(4): 645-665.
10. Hessami, M., F. Anctil and A.A. Viau. 2003. An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for the Post-Calibration of Weather Radar Rainfall estimation. J. Hydroinform., 5: 63-70.
11. Ibrahim, R.A., M.A. Elaziz and S. Lu. 2018. Chaotic opposition-based grey-wolf optimization algorithm based on differential evolution and disruption operator for global optimization. Expert Systems with Applications, 108: 1-27.
12. IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis," Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
13. Jadon, S.S., R. Tiwari, H. Sharma and J.C. Bansal. 2017. Hybrid artificial bee colony algorithm with differential evolution. Applied Soft Computing, 58: 11-24.
14. Jang, J.S.R. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 23: 665-685.
15. Jiang, T., Y.D. Chen, C.Y. Xu, X. Chen, X. Chen and V.P. Singh. 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. Journal of Hydrology, 336: 316-333.
16. Khanjari Sadati, S., M. Speelman, M. Sabouhi, Gitizadeh and B. Ghahraman. 2014. Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions. Water, 6(10): 3068-3084.
17. Kisi, O., T. Haktanir, M. Ardiclioglu, O. Ozturk, E. Yalcin and S. Uludag. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. Advances in Engineering Software, 40: 438-444.
18. Lin, Q., Q. Zhu, P. Huang, J. Chen, Z. Ming and J. Yu. 2015. A novel hybrid multi-objective immune algorithm with adaptive differential evolution. Computers and Operations Research, 62: 95-111.
19. LotfiManesh, B. and G.A. Barani. 2019. Optimal utilization of surface waters due to climate change effect by genetic algorithm (case study of Zayandeh-rood basin). 5th annual national conference on civil engineering, Architecture and Design of Iran, Mashhad Scientific Institute and research, Mashhad, Iran. (In Persian)
20. Marce, R., M. Comerma, J.C. García and J. Armengol. 2004. A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time varying human impact. Limnology and Oceanography: Methods, 2: 342-355.
21. Mazandaranizadeh, H., J. PiadehKoohsar and S.M.K. Sadr. 2019. Evaluation of GA and PSO optimization algorithms in operation of multi-reservoir systems Case study: Gorgan-Rood basin dams. Journal of Water and Soil Conservation Research, 26(2): 239-250.
22. Mirzaee, N., and A. Sarraf. 2021. Application of Data Fusion Models in River Flow Simulation Using Signals of Large-Scale Climate (Case Study: Jiroft Dam Basin), Journal of Watershed Engineering and Management, https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.343547.1816.
23. Moazami Goudarzi, F., A. Sarraf and H. Ahmadi. 2020. Prediction of Runoff Within Maharlu Basin for Future 60 Years Using RCP Scenarios, Arabian Journal of Geosciences, 13: 605, 1-17.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

24. 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, Iran, (In Persian).
25. Noori, M., M.B. Sharifi and M. Zarghami. 2015. Effects of climate changes on inflow of reservoirs in the uncertainty condition (case study: Bostan and Golestan dams in the Gorgan-roud catchment), Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 2(9): 367-380 (In Persian).
26. Purkey, D.R., B. Joyce, S. Vicuna, M.W. Hanemann, L.L. Dale, D. Yates and J.A. Dracup. 2007. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. Climatic Change, 87: 109-122.
27. Sabziparvar, A.A. and M. Bayat Varkeshi. 2010 Accuracy evaluation of ANN and Neuro-Fuzzy in global solar radiation. Iranian Journal of Physics Research, 10: 347-357 (In Persian).
28. Sanikhani, H., Y. Dinpajoh, S. Pour Yusef, S.Z. Ghavidel and B. Solati. 2014. Investigation of the effects of climate change on runoff of watersheds (Case study: Ajay-Chay catchment in East Azarbaijan province. Water and Soil, 27(6): 1225-1234 (In Persian).
29. Steele- Dunne, S., P. Lynch, R. McGrath, T. Semmler, Sh. Wang, J. Hanafin and P. Nolan. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. Journal of Hydrology, 356(1-2): 28- 45.
30. Sunyer, M.A., H. Madsen and P.H. Ang. 2012. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. Atmospheric Research, 103: 119-128.
31. Takagi, T. and M. Sugeno. 1983. Derivation of fuzzy control rules from human operators control actions. Proceedings of the IFAC symposium on fuzzy information, knowledge representation and decision analysis, 55.
32. Wilby, R.L., C.W. Dawson, C. Murphy, P. O'Connor and E. Hawkins. 2014. The Statistical Downscaling Model- Decision Centric (SDSM-DC): conceptual basis and applications. Climate Research, 61(3): 259-276.
33. Yüzgeç, U. and M. Eser. 2018. Chaotic based differential evolution algorithm for optimization of baker's yeast drying process. Egyptian Informatics Journal, 19: 151-163.
34. Zamani, R., A. Akhund Ali and M.A. Roozbahani. 2019. Investigating the impact of climate change on runoff Under different probabilistic levels using the uncertainty approach (case study: Yellow River basin). Irrigation Science and Engineering, in press, (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]

Operation of the of Golestan Dam Reservoir in Climate Change Conditions Using an Improved Multi-Objective Whale Optimization Algorithm

Alireza Donyaii[1], Amirpouya Sarraf[2] and Hassan Ahmadi[3]

1- Ph.D. Candidate of Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran (Corresponding Author: sarraf@riau.ac.ir)
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
Received: April 20, 2020 Accepted: October 5, 2020

Abstract

The amount of runoff entering the dam's reservoirs are continuously affected by climatic parameters, which influenced by the climate change phenomenon. In this study, the climate change parameters were obtained based on CANESM2 climate model using the SDSM4.2 statistical downscaling model. Then the rainfall-runoff process was simulated by ANFIS model with Sugeno structure and subtractive clustering at the entrance of Golestan dam reservoir in climate change conditions. Finally, the Improved Multi-Objective Whale Optimization Algorithm (MOIWOA) which is a combination of Whale V (WOA) and the Differential Evolution (DE) is used to extract the optimal operation rules of Golestan Dam Reservoir in Golestan province. The results of the uncertainty analysis indicated that the simulation results of the climate change period were in the 95% confidence band - in both calibration and validation phases. Also optimization of Golestan reservoir in baseline (March 2005-September 2018) and climate change (April 2021-October 2033) periods showed that the vulnerability changes in the baseline and climate changes are in the range of 18-45% and 10-39%, respectively, and the reliability ranges over 52 to 89.5% and 28 to 90%, respectively, in both baseline and climate change phases. And for 80% reliability, the baseline and climate change conditions' vulnerability are obtained as 31% and 27%, respectively. Comparison of the optimal rules derived from the baseline conditions with the optimized ones from the climate change showed that the plan water demand is met by 80% reliability index. In addition, the release volume in climate change conditions is higher than its baseline one, which can be due to the increased volume of water demand in climate change conditions. On the other hand, comparing the performance of the reservoir to meet the irrigation demands of downstream land at the Pareto point (80% reliability) in terms of baseline and climate change also suggests a greater adaptation of reservoir release to demand in climate change period.

Keywords: ANFIS Model, Climate Change, Golestan Dam, Multi-objective Improved Whale Optimization Algorithm, Uncertainty

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1400.12.23.21.6]
[DOI: 10.52547/jwmr.12.23.238]