

## بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری تحت شرایط خشکسالی هواشناسی (مطالعه موردی: سد آیدوغموش)

الهام‌السادات طاهری، سید فرهای موسوی\* و حجت کرمی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹)

### چکیده

با توجه به افزایش جمعیت و کمبود منابع آب در ایران، یکی از گام‌های اساسی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها است. در این پژوهش، اثر خشکسالی هواشناسی بر بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش در شمال غربی ایران، تحت اثر تغییر اقلیم در آینده و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری ارزیابی شد. از سناریوهای SSP2-4.5 و SSP2-8.5 گزارش ششم IPCC و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG برای ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش برای دوره پایه (۱۹۷۸-۲۰۱۴) و دوره‌های آینده (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) استفاده شد. جریان ورودی و خروجی سد و بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، کپک مخاطی و جامعه مورچگان، به تنهایی و در حالت ترکیبی، ارزیابی شد. نتایج سناریوی انتشار برتر SSP2-8.5 نشان داد که بارندگی سالانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب ۸/۹ و ۱۴/۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. تابع هدف بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد به صورت کمینه‌سازی مجموع مجذور کمبودهای نسبی در هر ماه و حداکثر کردن اعتمادپذیری، در دوره آماری ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ تعریف شد. نتایج نشان داد که از نظر اطمینان‌پذیری زمانی، آسیب‌پذیری و پایداری، الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی-ژنتیک با مقادیر ۷۳/۰، ۰/۳۲ و ۲۸/۷۸ بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است. پیش‌بینی مقدار جریان ورودی و خروجی سد با استفاده از الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی-ژنتیک به ترتیب با ۱۳ و ۱۹ درصد خطا در مقایسه با سایر مدل‌ها، نشان‌دهنده دقت خوب آن است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم کپک مخاطی، بهره‌برداری از مخزن، تغییر اقلیم، خشکسالی

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: fmousavi@semnan.ac.ir

## مقدمه

بر اساس گزارش‌های ارائه شده توسط سازمان ملل متحد، ۱۵ درصد از جمعیت دنیا دچار مشکل عدم دسترسی به آب سالم هستند. به همین منظور، در سطح جهان، سدهای مختلفی وجود دارد که برای تأمین آب احداث شده‌اند که ساخت آنها هزینه‌های زیادی را به کشورها تحمیل کرده‌اند (۲۰).

ایران از جمله کشورهایی است که با مشکل کمبود و محدودیت منابع آب مواجه است. عوامل متعددی از جمله قرارگیری این کشور در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، رشد سریع جمعیت و شهرنشینی، کاهش نزولات جوی و پراکنش ناهمگون آن، وقوع پدیده تغییر اقلیم و به تبع آن وقوع سیل و خشکسالی‌های پی‌درپی و آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی موجب افزایش مشکل آب در ایران شده‌اند. از این رو، بهره‌برداری از منابع آب موجود، و به‌ویژه منابع آب سطحی، اهمیت زیادی دارد. متداول‌ترین نوع بهره‌برداری از منابع آب سطحی، احداث سد در مسیر رودخانه است. با توجه به هزینه‌بر بودن ساخت سدها، ضرورت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها در راستای مدیریت منابع آب بیش از پیش احساس می‌شود (۹).

سیستم‌های طبیعی حوضه‌های آبریز و مخازن، با وجود ظاهر ساده، از پیچیدگی بسیاری برخوردارند. این پیچیدگی، برآیند تصادفی و غیرقطعی بودن متغیرهای دخیل در این سیستم‌هاست. بخش عمده پیچیدگی مربوط به تعدد متغیرهای تصمیم در طول مکان و زمان است (۵). روش‌های برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و یا برنامه‌ریزی پویا به‌عنوان روش‌های قدیمی بودند که از آنها برای بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها استفاده شده است. اما روش‌های مذکور نیاز به زمان محاسباتی زیادی داشته و گاه قادر به حل مسائل پیچیده بهره‌برداری از مخزن نظیر سیستم‌های چندمخزنی نیستند (۲۰).

تغییر اقلیم، یا تغییرات آب و هوایی، به تغییرات غیر قابل برگشت در متغیرهای آب و هوایی یک منطقه نسبت به شرایط افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن

منطقه اطلاق می‌شود. این تغییرات می‌تواند در متوسط دما، بارندگی، سرعت باد، تابش و سایر متغیرهای اقلیمی باشد (۳). مطابق گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای جهانی تا پایان قرن حاضر، تحت اثر تغییر اقلیم، ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (۲۳).

بزرگ‌حداد و همکاران (۶) با بهره‌گیری از فناوری داده‌کاوی، بهره‌برداری از مخزن سد کارون ۳ را مطالعه کردند. در این پژوهش، از روش‌های الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی پویا برای محاسبه منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن در شرایط پیش‌بینی شده و غیرپیش‌بینی شده استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که روش ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها داشته است.

آبرا و همکاران (۱) بهره‌برداری بهینه از مخزن نیروگاه برقایی تک‌تک تحت اثر تغییر اقلیم در شرق رودخانه نیل واقع در کشور ایتوپی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، از مدل‌های گزارش پنجم و سناریوهای انتشار RCP 8.5 و RCP 4.5 و همچنین مدل SWAT استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط تغییر اقلیم، حجم آب ماهانه و سالانه ورودی به مخزن مورد مطالعه در ماه‌های خشک افزایش یافته که موجب می‌شود حجم ذخیره مخزن ۲۵ تا ۳۰ درصد افزایش یابد.

مطالعه در خصوص بهره‌برداری بهینه و تخصیص آب به مصرف‌کننده‌ها از مخزن سد شهید در استان فارس با استفاده از الگوریتم‌های خفاش و ازدحام ذرات و همچنین تئوری بازی توسط زارعی و همکاران (۲۲) انجام پذیرفت. در این پژوهش، از ترکیب الگوریتم‌های خفاش و ازدحام ذرات جهت افزایش همگرایی و عملکرد بهتر، نسبت به هر یک از الگوریتم‌ها به تنهایی استفاده شده است. یافته‌های این پژوهش بیانگر برآورد بهتر روش مورد استفاده در مقدار آب رها شده مبتنی بر تقاضاهای مختلف (کشاورزی، شرب، صنعت و زیست‌محیطی) از مخزن سد مورد مطالعه در یک دوره ۵ ساله بوده است. یاسین و همکاران (۲۱) با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های

آیدوغموش است. این سد در شمال غربی ایران، در استان آذربایجان شرقی، در فاصله ۱۹ کیلومتری جنوب غربی شهرستان میانه، روی رودخانه آیدوغموش واقع شده است (شکل ۱).

مساحت حوضه آبریز رودخانه آیدوغموش تا محل سد ۱۶۲۵ کیلومتر مربع است. محور سد در طول جغرافیایی  $37^{\circ} 37'$  شرقی و عرض  $18^{\circ} 37'$  شمالی واقع است. بدنه این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته میانی ناتراوا بوده که ارتفاع آن از بستر رودخانه ۶۷ متر، عرض متوسط تاج ۱۲ متر، طول تاج ۳۳۰ متر، طول سرریز سد ۱۸۰ متر و ظرفیت تخلیه سیلاب آن ۲۴۶۰ متر مکعب بر ثانیه است. حجم مخزن سد در تراز نرمال ۱۴۵/۷ میلیون متر مکعب، حجم مفید آن ۱۳۷ میلیون متر مکعب و حجم آب تنظیم شده ۱۳۱ میلیون متر مکعب است (۱۱). آب‌های جمع‌آوری شده در مخزن این سد از طریق کانال‌هایی جهت آبیاری به زمین‌های پایین‌دست منتقل می‌شود. هدف از احداث این سد، بهبود ۱۴۰۰ هکتار کشاورزی، توسعه ۱۳۶۰۰ هکتار کشاورزی و تأمین ۱۳۲۰ میلیون متر مکعب آب شرب است (۱۱).

در جدول ۱، مشخصات ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است. در جدول‌های ۲ و ۳، مشخصات پارامترهای اقلیمی ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش در دوره مشاهداتی (۱۹۷۸-۲۰۲۱) ارائه شده است.

### تعیین خشکسالی

خشکسالی، پیامد کاهش مقدار بارندگی در یک دوره زمانی طولانی است که بسته به نوع اقلیم یک منطقه احتمال دارد در مقیاس‌های هفته، ماه، سال و یا حتی چندین سال به وقوع بپیوندد. این پدیده نتیجه یک دوره خشک غیرعادی است که به اندازه کافی تداوم داشته، تا در وضعیت هیدرولوژیک یک منطقه ایجاد عدم تعادل کند. یکی از شاخص‌های تعیین شدت خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است که توسط مک‌کی و همکاران (۱۷) ارائه شده است. شاخص SPI با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S} \quad (1)$$

خفاش و ازدحام ذرات، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد و شمشگیر در استان گلستان را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم ترکیبی عملکرد خوبی در بهره‌برداری بهینه از مخزن داشته است. بکل و همکاران (۴) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر حوضه آبریز Keleta در کشور اتیوپی پرداختند. آنها با استفاده از خروجی‌های ۲۰ مدل گردش عمومی و دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و نیز کاربرد مدل SWAT، تغییرات حوضه را در فاصله سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۸۰ تحت اثر تغییر اقلیم بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که دمای میانگین حوضه از ۱/۶ تا ۱/۸ درجه سلسیوس در سناریوی RCP4.5 و ۲/۱ تا ۲/۶ درجه سلسیوس در سناریوی RCP8.5 زیاد خواهد شد و رواناب حوضه ۷۰ درصد افزایش می‌یابد.

توماس و همکاران (۱۹) بهینه‌سازی بهره‌برداری از چهار مخزن حوضه نارمادا در کشور هند در شرایط تغییر اقلیم را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، از مدل SWAT و مدل‌های گزارش پنجم برای دوره پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۵) و سه دوره آینده (۲۰۰۶-۲۰۴۰)، (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و (۲۰۷۱-۲۰۹۹) تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی دوره‌های آینده، میزان تقاضای آب از مخازن مورد مطالعه افزایشی است؛ درحالی که میزان آب ورودی به مخازن کاهشی خواهد بود. وقوع این امر باعث می‌شود که سخت‌گیری‌های بیشتری در استفاده از آب در حوضه اعمال شود.

در پژوهش حاضر، برای استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، برای نخستین بار از الگوریتم بهینه‌ساز کپک مخاطی و ترکیب آن با چند الگوریتم دیگر، بهره گرفته شده تا عملکرد آنها در بهره‌برداری از سد آیدوغموش در شرایط تغییر اقلیم در دوره‌های آینده (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) مقایسه شود.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، دریاچه سد مخزنی



شکل ۱. محل سد آیدوغموش (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. مشخصات ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در پژوهش

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)	دوره آماری
سد آیدوغموش	هواشناسی و هیدرومتری	۳۷° ۲۷'	۴۲° ۴۷'	۱۱۱۰	۱۹۷۸-۲۰۲۱

جدول ۲. مشخصات میانگین دمای روزانه ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش (۱۹۷۸-۲۰۲۱) (شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی)

نام ایستگاه	تعداد داده آماری	میانگین (°C)	حداکثر (°C)	حداقل (°C)	انحراف معیار (°C)	ضریب تغییرات
سد آیدوغموش	۱۵۸۰۳	۱۴/۱۸	۳۴/۶۰	-۲۰/۷۰	۱۰/۸۱	۰/۷۶

جدول ۳. مشخصات بارش روزانه ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش (۱۹۷۸-۲۰۲۱) (شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی)

نام ایستگاه	تعداد داده آماری	میانگین (mm)	حداکثر (mm)	حداقل (mm)	انحراف معیار (mm)	ضریب تغییرات
سد آیدوغموش	۱۶۰۵۴	۰/۷۴	۴۷/۰۰	۰/۰۰	۲/۸۱	۳/۵۴

شاخص SPI نشانگر بارش بیش از متوسط و مقادیر منفی عکس آن است. طبق این روش، خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که به‌طور مستمر منفی و به -۱ یا کمتر برسد و هنگامی پایان

که  $P_i$  مقدار بارش،  $\bar{P}$  میانگین بلندمدت بارش و  $S$  انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد مطالعه است. به منظور تفسیر و بررسی نتایج این محاسبه، جدولی ارائه شده که مقادیر مثبت

$$K = \frac{\text{Log} \frac{R}{\sigma}}{\text{Log} \frac{N}{2}} \quad (5)$$

که  $N$  تعداد داده در سری زمانی،  $\sigma$  انحراف معیار سری و  $R$  برابر است با تفاوت بین مقادیر مثبت و منفی انحراف از میانگین سری زمانی که به صورت تجمعی محاسبه شده باشد:

$$R = S^+ - S \quad (6)$$

مقدار ضریب هرست برابر با ۰/۵ برای سری زمانی نشان‌دهنده یک سری مستقل نرمال است. هرچه مقدار این ضریب از ۰/۵ بیشتر باشد، حافظه بلندمدت در سری زمانی بیشتر است و نیازی به تطویل داده‌های سری زمانی ناست.

### سناریوهای تغییر اقلیم

کارآمدترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های سه‌بعدی اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM) هستند. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) تا کنون شش ارزیابی عمده در سه بخش مبانی علمی، اثرات و سازگاری و فرونشانی تغییر اقلیم ارائه داده که اولین گزارش در سال ۱۹۹۰ و گزارش ششم در سال ۲۰۱۹ منتشر شده است. برای ارزیابی پیش‌بینی اقلیمی در این پژوهش، از داده‌های سه مدل BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 با دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 گزارش ششم استفاده شده است.

مدل LARS-WG یک ابزار تولید تصادفی داده‌های آب‌وهوایی است و برای ریزنمایی داده‌های اقلیمی به کار می‌رود که ابتدا توسط راسکو و همکاران (۱۸) ارائه شده است. این مدل می‌تواند سری‌های زمانی روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه، بارندگی و تشعشع خورشید را ایجاد نماید. این مدل، از داده‌های روزانه مشاهداتی یک ایستگاه مشخص استفاده می‌کند تا یک مجموعه از پارامترها با توزیع احتمال متغیر هواشناسی و همچنین همبستگی بین آن‌ها با طول دوره دلخواه را تولید نماید.

می‌یابد که مثبت شود. این شاخص به علت سادگی محاسبات و استفاده از داده‌های بارندگی قابل دسترس، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و هر نوع شرایط آب و هوایی را دارد.

### تعیین روند داده‌ها

یکی از راه‌کارهای بررسی روند داده‌ها، استفاده از روش ترسیمی من- کندال است (۱۲). در این آزمون، تحت فرض  $H_0$  داده‌ها از یک سری که مستقل و دارای توزیع یکسان هستند گرفته شده‌اند. تست من- کندال به صورت معادلات زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(X_j - X_i), \text{ Where } \cdot \text{sgn}(X) = \begin{cases} +1, X > 0 \\ 0, X = 0 \\ -1, X < 0 \end{cases} \quad (2)$$

که واریانس فرایند از رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t+5) \right] \quad (3)$$

در معادله (۳)،  $m$  تعداد دسته‌ها با داده‌های گره‌دار و  $t_i$  تعداد داده‌های گره‌دار در هر دسته  $m$  است.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sigma_s}, & \text{if } s > 0 \\ 0, & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sigma_s}, & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

به منظور بررسی روند داده‌ها از روش من- کندال، مقدار  $Z$  به دست آمده از معادله (۴) با مقادیر  $Z$  به دست آمده از جدول توزیع نرمال استاندارد با سطح اطمینان مورد نظر مقایسه می‌شود. در صورتی که  $Z$  محاسبه شده بیش از  $Z$  جدول بود، فرضیه صفر مبنی بر وجود روند با سطح اطمینان مورد نظر رد می‌شود. در صورت وجود روند، مقدار  $Z$  مثبت نشان‌دهنده روند مثبت و مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند منفی است.

### کفایت داده‌ها

یکی از راه‌های ارزیابی کفایت طول دوره سری‌های زمانی برای کاربرد در مدل‌سازی، استفاده از ضریب هرست (Hurst) است:

## الگوریتم ژنتیک

در بین روش‌های بهینه‌ساز الهام گرفته از طبیعت، الگوریتم ژنتیک از تکامل یافته‌ترین الگوریتم‌ها به‌شمار می‌رود. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک شیوه جستجوی عمومی، از تکامل تدریجی بیولوژیک در قالب بقای افراد برتر و تبادل سازمان یافته و تصادفی اطلاعات الگوبرداری می‌کند. چن (۷) در زمره نخستین کسانی بود که از الگوریتم ژنتیک در زمینه مدیریت منابع آب بهره برد. در الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی را به‌وسیله رشته‌هایی با طول ثابت یا متغیر کدگذاری می‌کنند که در سیستم‌های بیولوژیک آن را کروموزوم می‌نامند. هر رشته نشان‌دهنده یک قطعه پاسخ در فضای جستجو است. به ساختمان رشته‌ها (مجموعه‌ای از پارامترها که توسط یک کروموزوم خاص نمایش داده می‌شوند) ژنوتیپ و به مقدار رمزگشایی شده آن فنوتیپ گویند. الگوریتم ژنتیک فرایندی تکراری است که هر مرحله تکراری را نسل و مجموعه‌ای از پاسخ‌ها در هر نسل را جمعیت نام‌گذاری می‌کنند. این الگوریتم با تولید نسل آغاز می‌شود که وظیفه تولید مجموعه نقاط جستجوی اولیه‌ای به نام جمعیت اولیه را عهده‌دار است و به‌طور انتخابی یا تصادفی تعیین می‌شود.

## الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان

حشرات و به‌ویژه مورچه‌ها یکی از گونه‌های موفق بوده‌اند که از ۱۰۰ میلیون سال قبل تا به امروز روی کره زمین زندگی می‌کنند. مورچه‌ها به صورت اجتماعی زندگی می‌کنند که این گروه‌های بزرگ اجتماعی مورچه‌ها کلنی (Colony) نامیده می‌شوند. یکی از مهمترین خصوصیات رفتاری جامعه مورچه‌ها، یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا است که بر این اساس، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO) توسط دوریگو و همکاران (۱۰) پیشنهاد گردید. مورچه‌ها با استفاده از حس بوایی خود مسیریابی می‌کنند. با عبور مورچه از هر مسیر، مقداری از یک ماده شیمیایی به نام فرومون از خود بر جای می‌گذارد که غلظت فرومون بیشتر موجود در مسیر کوتاه‌تر،

مورچه‌ها را به انتخاب این مسیر ترغیب می‌کند. رفتار جستجوی الگوریتم ACO را می‌توان با استفاده از دو مفهوم اکتشاف و استخراج توصیف نمود. اکتشاف به‌معنای توانایی الگوریتم در جستجوی گسترده و وسیع فضای مسئله و استخراج توانایی الگوریتم در جستجوی موضعی در فضای همسایگی جواب یافت‌شده قبلی است. افزایش استخراج ممکن است باعث هم‌گرایی سریع مسئله به یک جواب غیر بهینه و یا بهینه موضعی شود. درحالی که افزایش اکتشاف باعث کند شدن همگرایی و افزایش هزینه محاسباتی در پیدا کردن جواب‌های مناسب می‌شود. بنابراین، لازم است که توازن مناسبی بین اکتشاف و استخراج برقرار شود.

## الگوریتم بهینه‌ساز کپک مخاطی

الگوریتم بهینه‌ساز کپک مخاطی (SMA) یک الگوریتم فراابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت است که با الهام از رفتار هوشمندانه کپک مخاطی ارائه شده است (۱۵). کپک، رفتاری هوشمندانه دارد و می‌تواند خیلی سریع، بدون خطا، مسیریابی انجام دهد. این نوع کپک، موجودات تک سلولی هستند که گرد هم جمع می‌شوند و ساختاری چندسلولی و تناسلی را ایجاد می‌کنند. کپک‌های مخاطی مغز ندارند ولی می‌توانند کارهای هوشمندانه‌ای انجام داده و در مسیرهای پیچ و خم‌دار راه خود را پیدا کنند. آنها به دقت در تغذیه خود تعادل برقرار کرده و کیفیت غذا و ریسک آن را می‌سنجند. جهت تصادفی موقعیت اولیه کپک‌ها یا ویژگی‌ها، یعنی  $x_{i,k}$ ، از معادله (۷) استفاده می‌شود:

$$X_{i,k} = lb + \text{rand}(0,1) \times (ub - lb) \quad (7)$$

که،  $lb$  و  $ub$  به ترتیب حد بالا و حد پایین برای هر راه‌حل یا هر ویژگی منتخب است. مقدار تابع برازندگی برای تمام کپک‌ها محاسبه می‌شود و کپکی که تابع برازندگی آن بیشترین مقدار ممکن باشد به‌عنوان معیار قرار می‌گیرد و موقعیت مربوط به آن ( $\bar{X}^*$ ) به‌عنوان ویژگی مورد نظر تعیین می‌شود. کپک مخاطی برای نزدیک شدن به طعمه و مسیریابی آن از

مقادیر برآزندگی مرتب شده به صورت صعودی است. موقعیت کپک‌های مخاطی با استفاده از معادله (۱۴) به روزرسانی می‌شود.

$$\overline{X}^* = \begin{cases} \text{rand} \cdot (\text{UB} - \text{LB}) + \text{LB}, & \text{rand} < z \\ \overline{X}_b(t) + \text{vb} \cdot (\text{W} \cdot \overline{X}_A(t) - \overline{X}_B(t)), & r < p \\ \overline{\text{vc}} \cdot \overline{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (14)$$

که در آن، LB و UB به ترتیب حد پایین و حد بالای بازه جستجو است، rand و r به طور تصادفی در بازه [0,1] تعیین می‌شوند و مقدار z در آزمایش تنظیم پارامتر مورد بحث قرار خواهد گرفت. بنابراین، این روند تکرار می‌شود تا زمانی که شرط توقف برقرار شود. سپس، خروجی  $\overline{X}^*$  که نشان‌دهنده موقعیت ویژگی‌های بهینه است به دست می‌آید (۱۵).

برنامه‌نویسی الگوریتم‌های ژنتیک، جامعه مورچگان و کپک مخاطی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد. الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی هر کدام دارای قابلیت‌ها و ویژگی‌های خاصی هستند. قطعاً هر الگوریتمی دارای نقاط ضعف و قوتی است. البته این موارد در مواجهه با مسائل مختلف، می‌تواند شدت و ضعف داشته باشد. الگوریتم‌های ترکیبی با توجه به تفاوت‌های عملکردی و ساختاری الگوریتم‌های تک‌ی بهینه‌سازی مختلف شکل گرفته است و هدف از آن ایجاد الگوریتم‌هایی است که بتوانند با استفاده از نقاط قوت الگوریتم‌های ترکیب شونده، عملکرد بهتری را در حل مسائل بهینه‌سازی مختلف داشته باشند. در بحث مدل‌سازی پیش‌بینی آبدهی، پارامترهای بهینه الگوریتم کپک مخاطی استخراج و با ماشین بردار پشتیبان (SVM) شبیه‌سازی شد.

### بهره‌برداری از مخزن

در این پژوهش، برای ساخت مدل بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش از اطلاعات مشاهداتی دوره آماری ۱۱ ساله (۲۰۲۱-۲۰۱۱) استفاده شده است. جدول‌های ۴ و ۵، رژیم جریان ورودی و خروجی مخزن را در دوره آماری مشاهداتی ارائه کرده‌اند.

اطلاعات ورودی به مدل شامل سری زمانی ماهانه حجم آورد رودخانه، حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم نیازهای

بوی طعمه که در هوا پخش می‌شود استفاده می‌کند. معادله (۸)، رفتار مسیریابی کپک مخاطی را بر اساس بوی طعمه توصیف می‌کند:

$$\overline{X}(t+1) = \begin{cases} \overline{X}_b(t) + \text{vb} \cdot (\text{W} \cdot \overline{X}_A(t) - \overline{X}_B(t)), & r < p \\ \overline{\text{vc}} \cdot \overline{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (8)$$

که در آن،  $\text{vb}$  پارامتری است که در بازه  $[-a, a]$  قرار دارد،  $\text{vb}$  پارامتری است که به طور خطی از یک به صفر کاهش می‌یابد، t تکرار فعلی،  $\overline{X}_b(t)$  موقعیت کپک مخاطی در تکرار tام با بیشترین غلظت بوی موجود در محیط،  $\overline{X}(t)$  موقعیت کپک مخاطی در تکرار tام،  $\overline{X}(t+1)$  موقعیت بعدی کپک مخاطی در تکرار t،  $\overline{X}_A(t)$  و  $\overline{X}_B(t)$  دو موقعیت تصادفی انتخاب شده از کپک مخاطی و  $\overline{W}$  نشان‌دهنده وزن کپک مخاطی است. مقدار p با استفاده از معادله (۹) به دست می‌آید:

$$p = \tanh |S(i) - DF| \quad (9)$$

که  $i=1, 2, \dots, n$  تعداد سلول‌های موجود در کپک مخاطی،  $S(i)$  مقدار برآزندگی  $\overline{X}(t)$  و DF بهترین برآزندگی به دست آمده طی همه تکرارها است.  $\text{vb}$  از معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$\text{vb} = [-a, a] \quad (10)$$

$$a = \arctan h\left(-\frac{t}{\max t}\right) + 1 \quad (11)$$

همچنین،  $\overline{W}$  با استفاده از معادله (۱۲) به دست می‌آید:

$$\overline{W}(\text{Smell Index}(t)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log\left(\frac{\text{bF} - S(i)}{\text{bF} - \text{wF}}\right) + 1, \text{condition} \\ 1 - r \cdot \log\left(\frac{\text{bF} - S(i)}{\text{bF} - \text{wF}}\right) + 1, \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Smell Index} = \text{sort}(S) \quad (13)$$

در معادله (۱۲)، condition نشان می‌دهد که  $S(i)$  در نیمه اول جمعیت قرار دارد، r یک مقدار تصادفی در بازه  $[0,1]$ ، bF برآزندگی بهینه به دست آمده در تکرار فعلی، wF بدترین مقدار برآزندگی به دست آمده در تکرار فعلی و Smell Index توالی

جدول ۴. متوسط جریان ماهانه ورودی به مخزن سد آیدوغموش در فاصله سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۱ (میلیون متر مکعب)

جریان ورودی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین	۰/۷۴۴	۰/۸۸۷	۰/۱۹۱	۰/۰۴۴	۰/۰۱۴	۰/۰۱۹	۰/۴۸۸	۰/۰۷۴	۰/۱۲۰	۰/۰۹۴	۰/۱۳۵	۰/۲۶۹
بیشینه	۱/۱۸	۱/۹۲	۰/۵۸۴	۰/۱۶۳	۰/۰۵۵	۰/۰۵۱	۳/۸۳	۰/۱۵۵	۰/۱۹۸	۰/۱۵	۰/۲۲۳	۰/۵۴۶
کمینه	۰/۴۳	۰/۱۳۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۱۷	۰/۰۲۹	۰/۰۴	۰/۰۸۳	۰/۱۳۶

جدول ۵. متوسط جریان خروجی از مخزن سد آیدوغموش در فاصله سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۱ (میلیون متر مکعب)

جریان خروجی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میانگین	۰/۳۰۱	۰/۷۰۱	۰/۳۱۶	۰/۳۵۳	۰/۴۹۴	۰/۳۱۱	۰/۱۰۷	۰/۳۸۸	۰/۰۲۹	۰/۰۸۶	۰/۰۹۲	۰/۰۴۴
بیشینه	۰/۸۵۰	۱/۹۳۰	۰/۵۰۸	۰/۹۰۸	۱/۰۰۵	۰/۵۶۰	۰/۱۷۶	۰/۰۸۵	۰/۰۷۶	۰/۰۶۵	۰/۰۷۰۹	۰/۱۰۴
کمینه	۰/۰۵۰	۰/۰۷۰	۰/۱۳۶	۰/۱۱۷	۰/۱۷۴	۰/۱۷۰	۰/۰۷۷	۰/۰۲۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۶

پایین دست سد است. در مسئله بهینه‌سازی این پژوهش، حجم رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است.

#### شاخص‌های عملکرد مخزن

به‌منظور امکان بررسی عملکرد الگوریتم‌های کپک مخاطی، ژنتیک و جامعه مورچگان، از شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری استفاده شده است. شاخص قابلیت اعتماد، احتمال اینکه سامانه در طول دوره عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرارگیرد را ارائه می‌دهد. این شاخص به دو صورت حجمی و زمانی قابل تعریف است:

$$\delta_V = 100 \times \left( \frac{R_{et}}{D_{et}} \right) \quad (15)$$

که نسبت حجم آب رهاسازی در کل دوره ( $R_{et}$ ) به مقدار حجم آب مورد نیاز پایین دست مخزن ( $D_{et}$ ) است.

$$\delta_t = 100 \times \left[ 1 - \frac{N_{Def}}{T} \right] \quad (16)$$

$$N_{Def} = \text{Number} (\alpha \times D_{et} \times R_{et})$$

که درصدی از زمان است که مخزن قادر به تأمین تقاضا است (با

شکست روبرو نمی‌شود) (۱۳). در معادله (۱۶)،  $N_{Def}$  و  $T$  به ترتیب تعداد دوره‌های مواجهه با شکست و کل دوره‌های بهره‌برداری هستند.  $\alpha$  ضریب اطمینان است که نشان می‌دهد شکست در محاسبه شاخص قابلیت اعتماد زمانی تا چه اندازه قابل قبول است. به‌طور کلی، ضریب اطمینان مصرف شرب ۰/۹۵، برای نیازهای زیست محیطی ۰/۹ و برای کشاورزی ۰/۸۵ است. در این پژوهش، از آنجا که کل تخصیص بررسی می‌شود، به توصیه دوانی مطلق و همکاران (۹)،  $\alpha = ۰/۹$  فرض شده که می‌تواند به‌عنوان یک مقدار متوسط  $\alpha$  در نظر گرفته شود.

ب- شاخص آسیب‌پذیری

شاخص آسیب‌پذیری بیانگر بزرگی شکست‌های سامانه است که از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است.

$$\eta = \max_{t=1,2,\dots,T} \left( \frac{D_{et} - R_{et}}{D_{et}} \right) \quad (17)$$

که،  $D_{et}$  و  $R_{et}$  به ترتیب حجم آب مورد تقاضا و رها شده در دوره  $t$  ام و  $T$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری است.

ج- شاخص پایداری

شاخص پایداری به شرح زیر معرفی شده است:

$$\phi = \delta_V (1 - \eta) \quad (18)$$



دست‌یابی به بهترین جواب ممکن استفاده شده است.

#### مدل‌سازی پیش‌بینی میزان جریان ورودی و خروجی سد

به منظور پیش‌بینی میزان جریان ورودی و خروجی از سد آیدوغموش در شرایط تغییر اقلیم در دوره‌های آینده، ضرورت ساخت یک مدل وجود دارد. مدل‌های مختلف مورد بررسی برای تخمین میزان جریان ورودی و خروجی سد در جدول ۶ ارائه شده است. در همین راستا، از الگوریتم‌های GA، SMA-GA و ACO-GA نیز استفاده شده است. الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش، بهینه‌یاب هستند. هدف این بخش پژوهش، شبیه‌سازی جریان در آینده است. بنابراین، نیاز بود که الگوریتم بهینه‌یاب با الگوریتم شبیه‌ساز ترکیب شود تا بتوان شبیه‌سازی دوره‌های آینده را انجام داد. الگوریتم شبیه‌ساز مورد استفاده در این پژوهش، GA است. این الگوریتم، خاصیت شبیه‌سازی هم دارد و با سایر الگوریتم‌های بهینه‌یاب ترکیب شد. با توجه به دوره آماری پارامترهای اقلیمی (ورودی‌های مدل)، از متوسط ماهانه داده‌های اقلیمی ایستگاه سد آیدوغموش در فاصله سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ استفاده شده است. از مجموع ۱۱ سال (۱۳۲ مورد) داده ماهانه، ۷۰ درصد داده‌ها (۹۳ داده) برای آموزش مدل‌ها و ۳۰ درصد (۳۹ داده) برای آزمون دقت مدل‌ها استفاده شد. پارامترهای ایستگاه هواشناسی استفاده شده در مدل‌سازی عبارتند از: متوسط دمای بیشینه ماهانه ( $T_{max}$ )، متوسط دمای کمینه ماهانه ( $T_{min}$ )، متوسط دمای میانگین ماهانه ( $T_{mean}$ )، متوسط مجموع بارش ماهانه ( $P$ ) و متوسط مجموع ساعات آفتابی ماهانه (Rad).

#### صحت‌سنجی مدل‌های منتخب

برای صحت‌سنجی مدل‌ها و سناریوها در بخش پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و آورد ماهانه سد، از سه سنجه آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و جذر میانگین

که  $\delta$  و  $\eta$  به ترتیب شاخص‌های اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری هستند و  $\gamma$  سرعت برگشت‌پذیری است که از رابطه (۱۹) محاسبه شد.

$$\gamma = 1/f/f_s \quad (19)$$

که  $f_s$  تعداد دوره‌های شکست به‌طور پیوسته و  $f$  تعداد کل دوره‌های زمانی است.

#### مدل ریاضی بهره‌برداری بهینه از مخزن

در این مطالعه، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات نسبت کمبود به تقاضا و بیشینه کردن اعتمادپذیری تعریف شد. تابع هدف و قیدها به شرح زیر هستند:

$$\text{Min } F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t + D_t}{D_t} \right) + \frac{1}{\delta_t} + P \quad (20)$$

$$\text{Subject to:} \quad (21)$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + \text{Loss}_t + R_{et} + \text{Spill}_t$$

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (22)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (23)$$

$$P = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \frac{S_{\min} - S_t}{S_{\min}} & \text{if } (S_t < S_{\min}) \\ \sum_{t=1}^T \frac{S_t - S_{\max}}{S_{\max}} & \text{if } (S_t < S_{\max}) \end{cases} \quad (24)$$

که  $R_t$  حجم آب رهاسازی،  $D_t$  حجم آب مورد تقاضا،  $\delta_t$  اعتمادپذیری زمانی،  $S_{t+1}$  حجم آب ذخیره شده در مخزن در ماه بعد،  $S_t$  حجم آب ذخیره شده در مخزن،  $R_{\min}$  و  $R_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر آب رها شده از مخزن،  $S_{\min}$  و  $S_{\max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه آب ذخیره شده در مخزن،  $P$  تابع جریمه مربوط به حجم مخزن،  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن،  $\text{Loss}_t$  میزان تلفات آب مخزن،  $\text{Spill}_t$  حجم آب سرریز شده و اندیس  $t$  شماره ماه است.

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی و شبیه‌سازی جریان ورودی و خروجی از سد آیدوغموش و همچنین مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن این سد، از الگوریتم‌های ژنتیک، کپک مخاطی و جامعه مورچگان به‌صورت منفرد و ترکیبی برای

جدول ۶. ساختار مدل‌های ارزیابی پیش‌بینی جریان ورودی و خروجی سد آیدوغموش

شماره مدل	ساختار مدل
۱	$Q(t) = f\{P(t), T_{mean}(t)\}$
۲	$Q(t) = f\{P(t), Rad(t), T_{mean}(t)\}$
۳	$Q(t) = f\{P(t), T_{max}(t), T_{mean}(t), T_{min}(t)\}$
۴	$Q(t) = f\{P(t), T_{max}(t), T_{mean}(t), T_{min}(t), Rad(t)\}$
۵	$Q(t) = f\{P(t), P(t-1), T_{max}(t), T_{min}(t), T_{mean}(t), T_{min}(t-1)\}$
۶	$Q(t) = f\{P(t), T_{max}(t-1), T_{min}(t), T_{min}(t-1)\}$
۷	$Q(t) = f\{P(t), P(t-1), T_{max}(t-1), T_{min}(t-1), Rad(t)\}$

خط‌چین نشان‌دهنده سطح معنی‌داری، خط مشکی نقطه‌چین نشان‌دهنده مقادیر Z ابتدا تا انتهای داده‌ها و خط مشکی ممتد مقادیر Z انتها تا ابتدای داده‌ها است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مقادیر Z داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در بازه  $+1/96$  تا  $-1/96$  قرار دارند. بنابراین، داده‌های به‌کار گرفته شده در سطح اعتماد ۹۵ درصد بدون روند هستند.

#### ارزیابی کفایت دوره آماری سری زمانی

مقادیر ضریب هرست محاسبه شده برای پارامترهای اقلیمی و دبی ایستگاه سد آیدوغموش در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان‌دهنده مناسب بودن حافظه بلندمدت طول دوره آماری در این ایستگاه است.

#### ارزیابی نتایج تغییر اقلیم

ارزیابی عدم قطعیت میانگین خروجی مدل‌های اقلیمی MRI-ESM2-0 و GFDL-CM4، BCC-CSM2-MR سناریوهای انتشار SSP2-4.5 و SSP2-8.5 انجام گرفت. این سناریوها که به ترتیب سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه پیش‌بینی اقلیمی هستند برای پارامترهای دماهای متوسط، حداکثر و حداقل و نیز مجموع بارش روزانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش ارزیابی شدند که نتایج دمای متوسط و بارش روزانه در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. این نتایج بر اساس

مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شده است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)(X_P - \bar{X}_P)}{\sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)^2 \sum_{i=1}^n (X_P - \bar{X}_P)^2} \quad (25)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [X_0 - X_P]^2}{\sum_{i=1}^n [X_0 - \bar{X}_0]^2} \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_0 - X_P)^2}{n}} \quad (27)$$

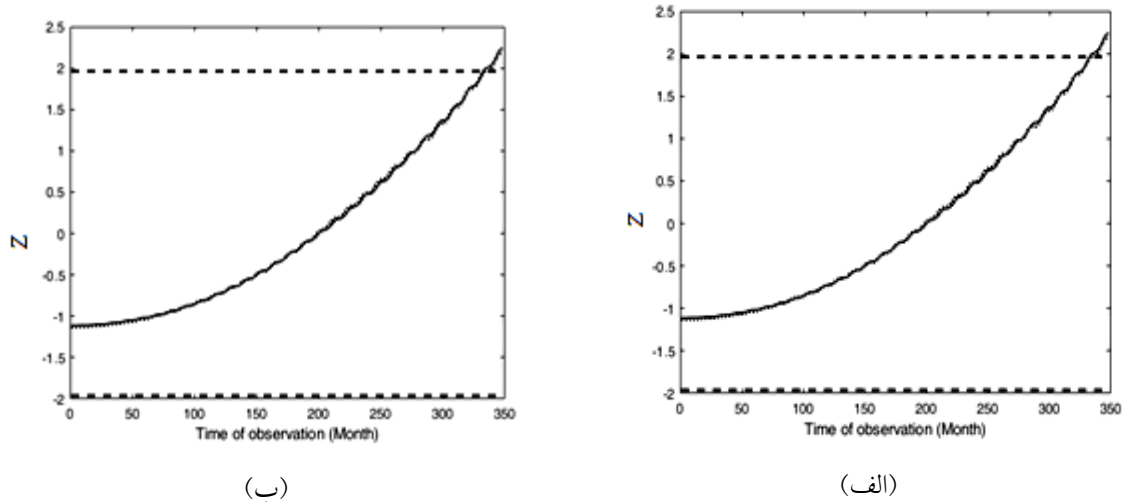
$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (28)$$

که،  $X_0$  مقادیر داده مشاهداتی،  $X_P$  مقادیر داده پیش‌بینی شده در همان زمان،  $\bar{X}_0$  میانگین مقادیر داده‌های مشاهداتی،  $\bar{X}_P$  میانگین مقادیر داده‌های پیش‌بینی شده،  $X_{max}$  حداکثر مقدار داده مشاهداتی،  $X_{min}$  حداقل مقدار داده مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌های مورد بررسی هستند.

## نتایج و بحث

### ارزیابی روند داده‌ها

روند داده‌های دماهای متوسط، حداقل، حداکثر و مجموع بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش در فاصله سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۲۱ بررسی شد که نتایج دمای متوسط و بارش در شکل ۲ (الف و ب) به‌عنوان نمونه ارائه شده است. در این شکل، نقاط



شکل ۲. آزمون من - کندال: الف) دمای متوسط ماهانه و ب) مجموع بارندگی ماهانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش (۱۹۷۸-۲۰۲۱).

جدول ۷. مقادیر ضریب هرست پارامترهای اقلیمی و دبی ایستگاه سد

نام ایستگاه	دمای میانگین روزانه	دمای حداکثر روزانه	دمای حداقل روزانه	بارش روزانه	دبی روزانه
آیدوغموش	۰/۶۹۳	۰/۸۰۴	۰/۷۹۳	۰/۷۱۶	۰/۶۷۱

جدول ۸. ارزیابی تطابق دمای میانگین روزانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش با دو سناریوی انتشار گزارش ششم IPCC

سناریوی انتشار						مدل اقلیمی
SSP2-8.5			SSP2-4.5			
NSE	RMSE (°C)	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE (°C)	R <sup>2</sup>	
۰/۷۶	۸/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۲	۹/۴۲	۰/۶۸	BCC-CSM2-MR
۰/۶۹	۱۰/۹۵	۰/۶۲	۰/۶۶	۱۲/۹۱	۰/۵۹	GFDL-CM4
۰/۷۴	۸/۹۴	۰/۷۰	۰/۶۹	۱۰/۳۹	۰/۶۵	MRI-ESM2-0

جدول ۹. ارزیابی تطابق مجموع بارش روزانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش با سناریوهای انتشار گزارش ششم IPCC

سناریوی انتشار						مدل اقلیمی
SSP2-8.5			SSP2-4.5			
NSE	RMSE (mm)	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE (mm)	R <sup>2</sup>	
۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۴۶	۲/۸۵	۰/۶۱	BCC-CSM2-MR
۰/۶۸	۰/۸۲	۰/۷۹	۰/۵۲	۲/۱۶	۰/۶۵	GFDL-CM4
۰/۶۲	۱/۰۷	۰/۷۱	۰/۴۷	۲/۵۳	۰/۶۳	MRI-ESM2-0

تغییرات کمتری نسبت به دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه خواهد داشت. میزان بارندگی ماهانه در آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در ماه‌های آوریل، ژوئیه، نوامبر و دسامبر افزایش و در سایر ماه‌های سال کاهش خواهد داشت ولی میزان بارش ماهانه در آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) در کلیه ماه‌های سال کاهشی است. نتایج تغییرات بارندگی سالانه نشان می‌دهد که میزان کاهش سالانه بارندگی در دوره‌های (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) به ترتیب برابر ۸/۹ و ۱۴/۵ میلی‌متر خواهد بود.

### ارزیابی خشکسالی در منطقه مطالعاتی

نتیجه بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش استاندارد در دوره مشاهداتی (۲۰۱۱-۲۰۲۱) در ایستگاه آیدوغموش در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد، بر اساس شاخص بارش استاندارد، منطقه مورد مطالعه در فاصله سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۱ خشکسالی را تجربه کرده است و در غالب سال‌های مورد بررسی، از نظر هواشناسی، شرایط بارش نرمال بر منطقه مذکور حاکم بوده است. به عبارت دیگر، حدود ۱۸ درصد در سال‌های مورد بررسی خشکسالی، در بیش از ۷۲ درصد سال‌ها شرایط نرمال از نظر بارش و کمتر از ۱۰ درصد ترسالی حکم‌فرما بوده است.

شکل ۶، نتیجه ارزیابی خشکسالی در ایستگاه سد آیدوغموش را در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) بر اساس شاخص بارش استاندارد نشان می‌دهد. مطابق این نتایج، تحت اثر تغییر اقلیم در سال‌های ۲۰۳۴ و ۲۰۳۶ خشکسالی اتفاق خواهد افتاد اما در بیشتر سال‌های این دوره (بیش از ۸۴ درصد سال‌ها) از نظر بارش شرایط نرمال حاکم است، و فقط در سال ۲۰۲۳ شرایط مرطوب پیش‌بینی شده است. یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که در مقایسه با دوره پایه، تغییر اقلیم موجب افزایش درصد سال‌های نرمال هواشناسی از نظر بارش و کاهش درصد میزان سال‌های مرطوب و خشک در دوره آینده نزدیک خواهد شد.

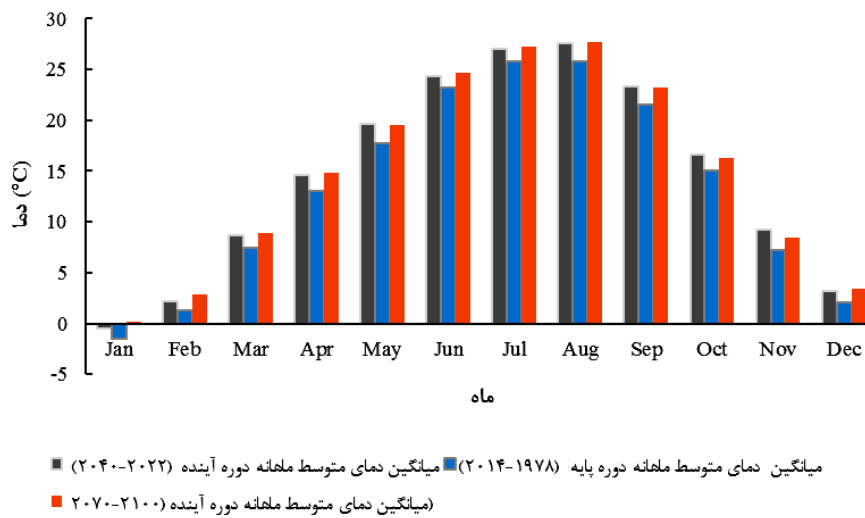
مقایسه داده‌های دوره پایه با داده‌های خروجی سه مدل و نیز دو سناریوی انتشار به‌دست آمده است. نتایج نشان داد که سناریوی SSP2-8.5 تطابق بیشتری نسبت به دیگر سناریوی انتشار گزارش ششم با تغییرات اقلیمی به وقوع پیوسته در منطقه مورد مطالعه دارد.

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش در خصوص نوع سناریوی منطبق بر تغییرات اقلیمی رخ داده در ایستگاه مورد مطالعه، با نتایج تحقیق زرین و همکاران (۲۳) در ارتباط با سازگاری سناریوی SSP2-8.5 با تغییرات پهنه اقلیمی ایران مطابقت نشان می‌دهد.

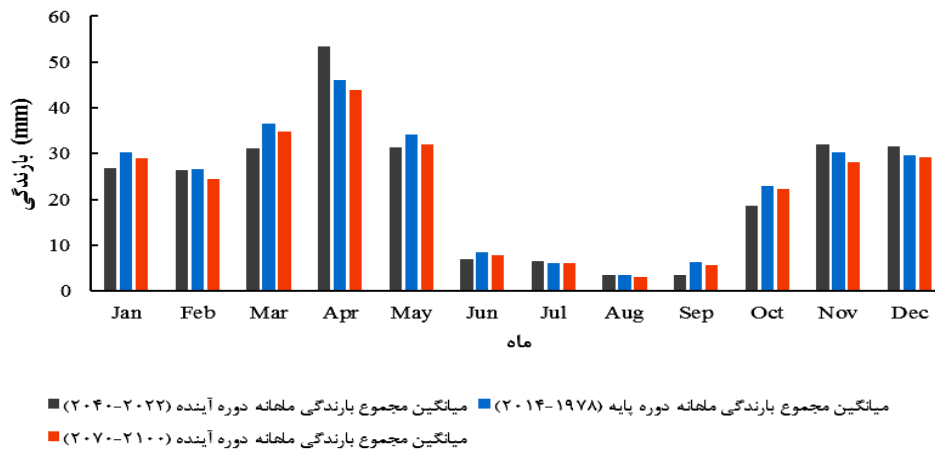
ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی (مجموع بارندگی، دماهای متوسط حداکثر و حداقل روزانه ایستگاه هواشناسی آیدوغموش برای دوره پایه (۱۹۷۸-۲۰۱۴)، دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و دوره آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) توسط مدل LARS-WG، نسخه ۶ انجام گرفت. در این بخش، از میانگین خروجی سه مدل گردش عمومی اقلیمی MRI-ESM2-0 و GFDL-CM4، BCC-CSM2-MR و همچنین سناریوی انتشار SSP2-8.5 بهره گرفته شده است. برای جلوگیری از طولانی‌شدن مقاله، فقط نتایج میانگین دما و بارش ماهانه در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

طبق شکل ۳، دمای متوسط ماهانه در ایستگاه آیدوغموش در دوره‌های آینده افزایش خواهد داشت. بیشترین میزان تغییر دما در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در ماه مه به میزان ۱/۹ درجه سلسیوس و کمترین میزان افزایش در ماه فوریه به میزان ۰/۸۹ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه خواهد بود. همچنین، در دوره آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) این پارامتر، تغییرات کمتری نسبت به دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در مقایسه با دوره پایه خواهد داشت.

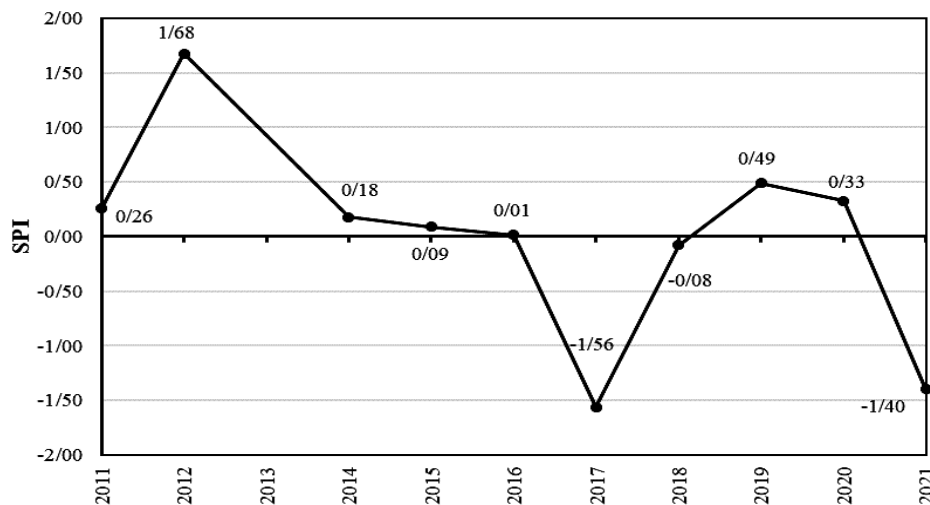
مطابق شکل ۴، بیشترین میزان افزایش بارش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در ماه آوریل به میزان ۷/۲۱ میلی‌متر و بیشترین میزان کاهش در ماه مارس به میزان ۵/۳۶ میلی‌متر نسبت به دوره پایه خواهد بود. نتایج بارندگی در دوره آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) نشان می‌دهد که بارندگی در این دوره



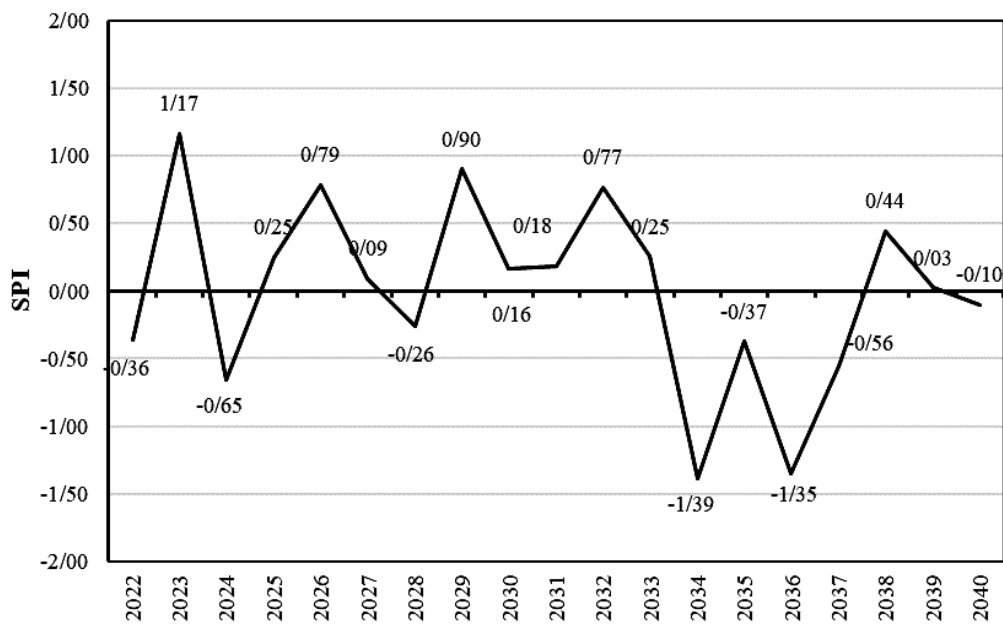
شکل ۳. مقایسه دمای متوسط ماهانه ایستگاه آیدوغموش در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. مقایسه مجموع بارش ماهانه ایستگاه آیدوغموش در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. شاخص بارش استاندارد ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش در دوره مشاهده‌ای (۲۰۱۱-۲۰۲۱)



شکل ۶. شاخص بارش استاندارد ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰)

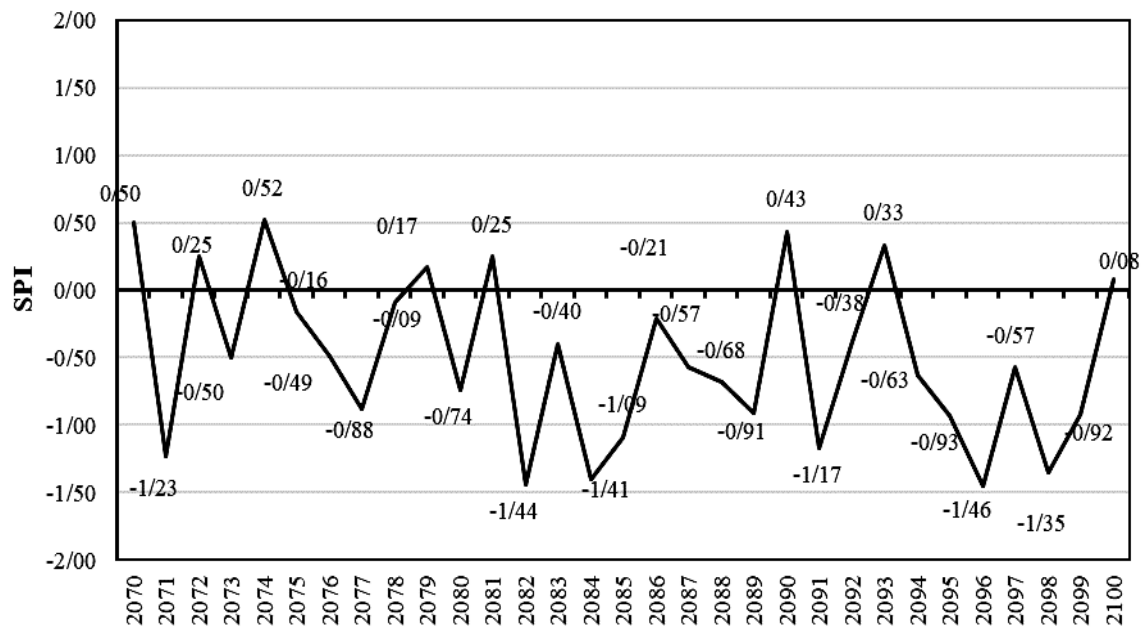
الگوریتم‌های مورد مطالعه در جدول ۱۰ نشان داده شده است. طبق این نتایج، از نظر کمینه کردن تابع هدف، الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی- ژنتیک (SMA-GA) در رتبه اول و الگوریتم‌های کپک مخاطی (SMA)، ژنتیک (GA) و جامعه مورچگان (ACO) در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

از نظر اعتمادپذیری حجمی، الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، کپک مخاطی (SMA) و ترکیب کپک مخاطی- ژنتیک (SMA-GA) قادر بودند که مقدار قابل قبولی از نیازهای پایین دست سد را تأمین کنند که در این میان SMA-GA با ۸۲/۵۸ درصد در جایگاه نخست عملکرد قرار دارد. از نظر اعتمادپذیری زمانی، SMA-GA و نیز GA با ۷۳/۰ درصد بهترین عملکرد را نشان داده‌اند. همچنین، در شرایط خشکسالی، SMA-GA با ۰/۳۲ شامل کمترین میزان آسیب‌پذیری است. با توجه به هدف تعریف شده (کمینه کردن آسیب‌پذیری و بیشینه کردن اعتمادپذیری)، الگوریتم SMA-GA در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد بررسی، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. از نظر شاخص پایداری هم، الگوریتم SMA-GA با مقدار ۲۸/۷۸ نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری داشته است.

نتایج ارزیابی ایستگاه سد آیدوغموش، از نظر شاخص بارش، تحت اثر تغییر اقلیم در دوره آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) در شکل ۷ ارائه شده است. طبق این نتایج، در سال‌های ۲۰۷۱، ۲۰۸۲، ۲۰۸۴، ۲۰۸۵، ۲۰۹۱، ۲۰۹۶ و ۲۰۹۸ خشکسالی اتفاق خواهد افتاد (بیش از ۲۳ درصد سال‌ها) و در سایر سال‌های این دوره از نظر بارش شرایط نرمال حاکم خواهد بود، و ترسالی هم پیش‌بینی نشده است. جمع‌بندی ارزیابی‌های این بخش نشان می‌دهد که در سال‌های آینده، تحت اثر تغییر اقلیم، تعداد سال‌های خشک (خشکسالی هواشناسی) در ایستگاه سد آیدوغموش افزایش خواهد داشت و در مقابل، تعداد سال‌های مرطوب و نرمال روند کاهشی خواهد داشت که این روند تغییرات با گذشت زمان سرعت بیشتری به خود می‌گیرد.

#### ارزیابی الگوریتم‌های بهره‌برداری از مخزن

به منظور ارزیابی کارایی هر یک از الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، از شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری استفاده شد. مقادیر تابع هدف و شاخص‌های اطمینان‌پذیری حجمی، اطمینان‌پذیری زمانی، آسیب‌پذیری و پایداری برای



شکل ۷. شاخص بارش استاندارد ایستگاه هواشناسی سد آیدوغموش در دوره آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰)

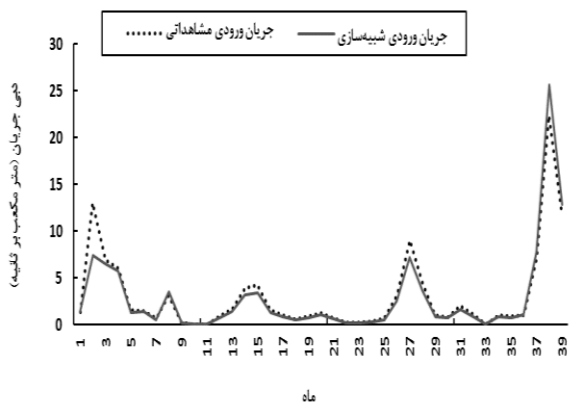
جدول ۱۰. مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن در بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش با الگوریتم‌های مختلف

الگوریتم	تابع هدف	کمبود (میلیون متر مکعب)	اعتمادپذیری حجمی (%)	اعتمادپذیری زمانی (%)	آسیب‌پذیری	پایداری (%)
GA	۰/۰۴۱۵	۱۰/۴۱	۷۸/۴۲	۷۳/۰۰	۰/۳۸	۲۶/۴۵
SMA	۰/۰۴۸۶	۹/۹۵	۷۹/۰۲	۷۱/۱۵	۰/۴۵	۲۵/۶۲
ACO	۰/۰۶۷۶	۱۱/۶۳	۷۶/۸۶	۶۸/۹۴	۰/۵۳	۲۴/۰۳
SMA-GA	۰/۰۳۹۸	۸/۲۰	۸۲/۵۸	۷۳/۰۰	۰/۳۲	۲۸/۷۸
ACO-GA	۰/۰۶۶۳	۱۷/۸۶	۷۷/۶۹	۶۰/۳۴	۰/۴۶	۲۷/۱۹

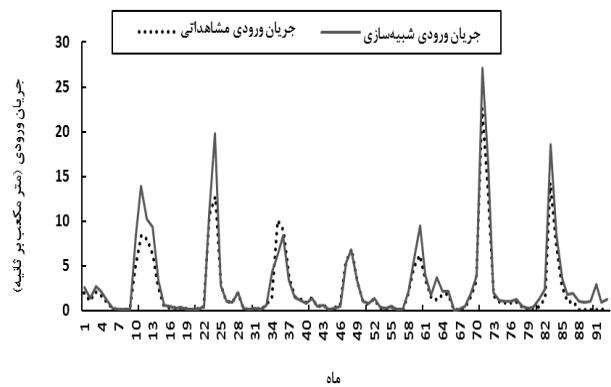
این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های یاسین و همکاران (۲۱) و دوانی مطلق و همکاران (۸) مبنی بر این‌که ترکیب الگوریتم‌ها می‌تواند عملکرد آنها را در خصوص مسائل بهره‌برداری از مخزن سد افزایش دهد مطابقت نشان می‌دهد.

**نتایج مدل‌سازی پیش‌بینی میزان جریان ورودی و خروجی سد**  
 نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که مدل شماره ۲ جدول ۶ با بهره‌گیری از الگوریتم SMA-GA با  $R^2=0/939$ ،  $RMSE=1/52$  و  $NSE=0/16$  در مرحله آموزش و  $R^2=0/943$ ،  $RMSE=1/13$  و  $NSE=0/07$  در مرحله آزمون، به‌عنوان مدل

برتر برای پیش‌بینی مقدار جریان ورودی ماهانه به سد آیدوغموش به‌کار گرفته شد. شکل ۸، مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی ورودی به مخزن سد آیدوغموش در مراحل آموزش و آزمون توسط الگوریتم SMA-GA را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی میزان جریان خروجی از سد آیدوغموش نیز سه الگوریتم GA، SMA-GA و ACO-GA ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مدل شماره ۴ جدول ۶ با بهره‌گیری از الگوریتم SMA-GA با  $R^2=0/924$ ،  $RMSE=0/08$  و  $NSE=0/08$  در مرحله آموزش و  $R^2=0/964$ ،  $RMSE=0/08$  و  $NSE=0/05$  در مرحله آزمون، به‌عنوان مدل برتر، بهترین



(ب)



(الف)

شکل ۸. مقایسه جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ورودی به مخزن سد آیدوغموش: (الف) مرحله آموزش و (ب) مرحله آزمون

سطح حوضه بالادست ایستگاه اشاره کرد. طبق نتایج‌ها، متوسط میزان جریان ورودی به سد آیدوغموش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) به ترتیب ۹/۹ و ۱۳ درصد کاهش نسبت به دوره پایه (۲۰۱۱-۲۰۲۱) را نشان می‌دهد.

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۱۰، میزان جریان خروجی از سد در دوره‌های آینده در ماه‌های فروردین، آبان، آذر، دی و بهمن بدون تغییر بوده و در سایر ماه‌های سال روند افزایشی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. از دلایل روند افزایشی جریان خروجی از سد در فصول بهار و تابستان می‌توان به کاهش بارش، افزایش دما، افزایش تبخیر و تعرق از سطح اراضی کشاورزی و نیاز به آبیاری بیشتر و افزایش تبخیر از مخزن سد اشاره کرد. نتایج ارزیابی‌ها، متوسط میزان جریان خروجی از سد آیدوغموش در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) را به ترتیب ۴/۸ و ۷/۷ درصد افزایش نسبت به دوره پایه (۲۰۱۱-۲۰۲۱) نشان می‌دهد. این تغییرات بیانگر آن است که تحت اثر تغییر اقلیم و با گذشت زمان، میزان مصارف سد آیدوغموش افزایش خواهد یافت. نتایج حاصل از این بخش با یافته‌های پژوهش‌های کرمی و برهانی داریان (۱۴) و احمدیان‌فر و زمانی (۲) مبنی بر افزایش خشکسالی‌های هیدرولوژیک در آینده تحت اثر تغییرات اقلیمی و کاهش پایداری سدها مطابقت دارد. به‌منظور پیش‌گیری و یا کاهش پیامدهای این

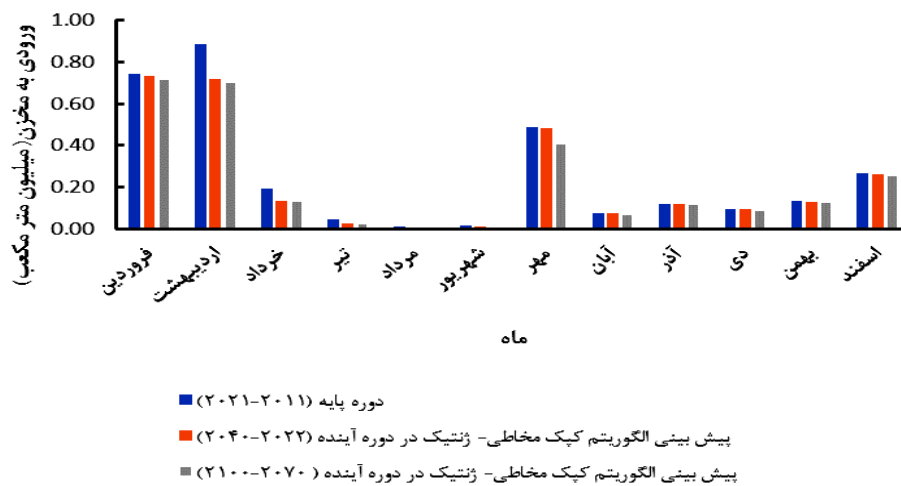
عملکرد را داشته است. نتایج میزان خطای برآورد جریان خروجی از این سد با استفاده از GA، SMA-GA و ACO-GA به ترتیب برابر ۲۹، ۱۹ و ۳۵ درصد را نشان می‌دهد. بنابراین، عملکرد مطلوب الگوریتم SMA-GA در پیش‌بینی میزان جریان خروجی از سد آیدوغموش مشخص می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های پژوهش معصومی و همکاران (۱۷) و بزرگ حداد و همکاران (۶) در ارتباط با عملکرد مطلوب روش‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی میزان جریان ورودی و خروجی از سدها مطابقت نشان داد.

#### پیش‌بینی میزان جریان در دوره‌های آینده

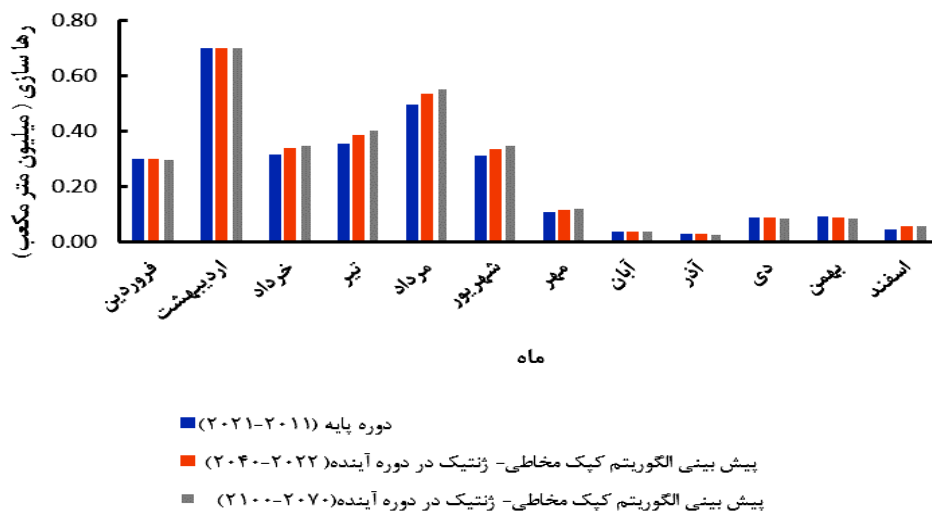
در این بخش، دبی ماهانه ورودی و خروجی سد آیدوغموش با توجه به خروجی‌های سناریوهای تغییر اقلیم و همچنین بهره‌گیری از مدل برتر ساخته شده توسط الگوریتم SMA-GA برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) پیش‌بینی شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

مطابق نتایج شکل ۹، میزان جریان ورودی به سد در دوره‌های آینده در ماه‌های مرداد، آبان، آذر و دی بدون تغییر بوده و در سایر ماه‌ها روند کاهشی را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. از دلایل کاهش جریان ورودی به سد می‌توان به کاهش بارش و نیز افزایش دما و پیامد آن افزایش تبخیر از





شکل ۹. مقایسه جریان ماهانه ورودی به سد آیدوغموش در دوره پایه و دوره‌های آینده مورد بررسی (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. مقایسه جریان خروجی از سد آیدوغموش در دوره پایه و دوره‌های آینده مورد بررسی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) و آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) انجام شده است. در جریان این پژوهش، از سناریوهای انتشار SSP2-4.5 و SSP2-8.5 گزارش ششم IPCC برای پیش‌بینی تغییر پارامترهای اقلیمی ایستگاه سد استفاده شد. همچنین، پیش‌بینی میزان جریان ورودی و خروجی سد با استفاده از سه الگوریتم SMA-GA، ACO-GA و ارزیابی شد. تابع هدف، کمینه‌سازی مجموع مربعات نسبت کمبود به تقاضا و بیشینه‌کردن اعتمادپذیری است. مقدار بهینه تابع هدف برابر ۱/۶۵ است. با توجه به نوع سیستم مورد استفاده، زمان اجرای هر الگوریتم متفاوت است. زمان اجرای هر

اتفاق، ضرورت دارد که مدیران و کارشناسان منابع آب در حوضه مربوطه در جهت مدیریت مصرف و تخصیص بهینه آب از این سد، در راستای کاهش ریسک تقاضا، اقدامات و تدابیر مؤثری برای کاهش مصارف آب سد از قبیل کاهش سطح زیر کشت محصولات و یا افزایش راندمان آبیاری پیش‌بینی نمایند.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی اثر خشکسالی‌های هواشناسی آینده بر بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد آیدوغموش در

خشک (خشکسالی هواشناسی) رو به افزایش خواهد گذاشت و در مقابل، تعداد سال‌های مرطوب و نرمال روند کاهشی خواهد داشت.

۴- ارزیابی عملکرد مخزن بر اساس شاخص‌های اطمینان‌پذیری حجمی، اطمینان‌پذیری زمانی، آسیب‌پذیری و پایداری برای الگوریتم‌های ژنتیک، جامعه مورچگان و کپک مخاطی و الگوریتم‌های ترکیبی کپک مخاطی-ژنتیک و جامعه مورچگان-ژنتیک نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم کپک مخاطی و ژنتیک موجب شده که توانایی و سرعت آن نسبت به کاربرد منفرد هر یک از این الگوریتم‌ها در عملکرد مخزن سد آیدوغموش افزایش یابد.

۵- میزان خطای برآورد جریان ورودی به سد و خروجی از سد با استفاده از الگوریتم ترکیبی کپک مخاطی-ژنتیک در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها کمتر بود.

۶- تحت اثر تغییر اقلیم و با گذشت زمان، میزان کاهش در جریان ورودی به سد شدت خواهد یافت.

۷- تحت اثر تغییر اقلیم، میزان اعتمادپذیری و پایداری سد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت.

الگوریتم حدود ۴ دقیقه است. تعداد ارزیابی‌های تابع هدف ۱۰۰ تکرار است.

نتیجه‌گیری کلی پژوهش به شرح زیر است:

۱- نتایج ارزیابی‌های پیش‌بینی اقلیمی نشان می‌دهد که میزان بارندگی ماهانه در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۲-۲۰۴۰) در بعضی ماه‌های فصل بهار و زمستان افزایش و در سایر ماه‌های سال کاهش خواهد داشت ولی میزان بارش ماهانه در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۰) در کلیه فصول سال دارای سیر کاهشی است. همچنین، نتایج ارزیابی تغییرات بارندگی سالانه نشان می‌دهد که در تمامی دوره‌های مورد بررسی در آینده، میزان بارش نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. میزان کاهش سالانه بارندگی در منطقه مورد مطالعه در دوره‌های (۲۰۴۰-۲۰۲۰) و (۲۰۷۰-۲۱۰۰) به ترتیب برابر ۸/۹ و ۱۴/۵ میلی‌متر خواهد بود.

۲- دماهای بیشینه، میانگین و کمینه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهند یافت.

۳- ارزیابی شاخص SPI در دوره‌های آینده نشان می‌دهد که در سال‌های آینده، تحت اثر تغییر اقلیم، تعداد سال‌های

## منابع مورد استفاده

1. Abera, F. F., D. H. Asfaw, A. N. Engida and A. M. Melesse. 2018. Optimal operation of hydropower reservoirs under climate change: The case of Tekeze reservoir, eastern Nile. *Journal of Water* 10(3): 273.
2. Ahmadianfar, I. and R. Zamani. 2020. Assessment of the hedging policy on reservoir operation for future drought conditions under climate change. *Climatic Change* 159(2): 253-268.
3. Amiri, E., H. Mohammadi and F. Rabani. 2016. *Climate Change and Climate Models*. First Edition, Tehran University Printing and Publishing Institute (In Persian).
4. Bekele, D., T. Alamirew, A. Kebede, G. Zeleke and A. M. Melesse. 2019. Modeling climate change impact on the hydrology of Keleta Watershed in the Awash River Basin, Ethiopia. *Journal of Environmental Modeling and Assessment* 24: 95-107.
5. Borhani Dariane, A. and S. M. Mortazavi Naeni. 2008. Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources. *Journal of Water and Wastewater* 19(4): 57-66 (In Persian).
6. Bozorg-Haddad, O., M. Aboutalebi, P. S. Ashofteh and H. A. Loáiciga. 2018. Real-time reservoir operation using data mining techniques. *Environmental Monitoring and Assessment* 190(10): 594.
7. Chen, Y. M. 1997. Management of water resources using improved genetic algorithms. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture* 18: 117-127.
8. Davani Motlagh, A., M. S. Sadeghian, A. H. Javid and M. S. Asgari. 2021. Operation optimization of Taleghan dam reservoir using grey wolf algorithm and its hybrid with genetic algorithm. *Journal of Water Engineering* 9(2): 1-16. (In Persian).
9. Donyaii, A., A. Sarraf and H. Ahmadi. 2021. 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* 24(4): 159-175 (In Persian).

10. Dorigo, M., V. Maniezzo and A. Colorni. 1991. Ant system: An autocatalytic optimizing process. Technical Report 91-016.
11. East Azarbaijan Water Authority. 2006. Evaluation of environmental impacts of irrigation and drainage networks of Aydoghmoush dam. Tabriz, Iran (In Persian).
12. Güçlü, Y. S. 2018. Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. *Journal of Hydrology* 566: 685-704.
13. Holland, J. H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
14. Karami, F. and A. Borhani Dariane. 2018. Many-objective multi-scenario algorithm for optimal reservoir operation under future uncertainties. *Journal of Water Resources Management* 32(12): 3887-3902.
15. Li, S., H. Chen, M. Wang, A. A. Heidari and S. Mirjalili. 2020. Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems* 111: 300-323.
16. MacKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In: 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, USA.
17. Masomi, F., N. Molasalimi and N. Zafari. 2020. Investigating the capability of the grasshopper optimization algorithm in the optimal exploitation of surface water reservoirs by observing the reliability constraints. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 14(2): 579-592 (In Persian).
18. Racsco, P., L. Szeidl and M. Semenov. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Journal of Ecological Modelling* 57(1-2): 27-41.
19. Thomas, T., N. C. Ghosh and K. P. Sudheer. 2021. Optimal reservoir operation-A climate change adaptation strategy for Narmada basin in central India. *Journal of Hydrology* 598: 126238.
20. Vaziri, H. R., H. Karami, S. F. Mousavi and O. Hadiani. 2018. Optimizing reservoirs exploitation with a new crow search algorithm based on a multi-criteria decision-making model. *Journal of Water and Soil Science* 22(1): 279-290 (In Persian).
21. Yaseen, Z. M., M. F. Allawi, H. Karami, M. Ehteram, S. Farzin, A. N. Ahmed, S. B. Koting, N. S. Mohd, W. Z. B. Jaafar, H. A. Afan and A. El-Shafie. 2019. A hybrid bat-swarm algorithm for optimizing dam and reservoir operation. *Neural Computing and Applications* 31(12): 8807-8821.
22. Zarei, A., S. F. Mousavi, M. Eshaghi Gordji and H. Karami. 2019. Optimal reservoir operation using bat and particle swarm algorithm and game theory based on optimal water allocation among consumers. *Water Resources Management* 33(9): 3071-3093.
23. Zarrin, A., A. Dadashi Rodbari and N. Salehabadi. 2021. Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics* 15(1): 35-54 (In Persian).

## Optimization of Dam Reservoir Operation Using Metaheuristic Algorithms under Meteorological Drought Conditions (Case Study: Aydoghmoush Dam)

E. S. Taheri, S. F. Mousavi\* and H. Karami<sup>1</sup>

(Received: September 8-2022 ; Accepted: January 9-2023)

### Abstract

One of the basic steps in water resources management and planning according to population increase and lack of water resources in Iran is to optimize the use of dam reservoirs. In this research, the effect of meteorological droughts on the optimization of the Aydoghmoush dam reservoir in the northwest of Iran was evaluated by applying metaheuristic algorithms under the impact of future climate change. Three models and two scenarios of SSP2-4.5 and SSP2-8.5 of the sixth IPCC report, and the LARS-WG downscaling model were used for Aydoghmoush dam weather station for the base period (1978-2014) and future periods of 2022-2040 and 2070-2100. The inflow and outflow of the dam, as well as the optimal utilization of the dam reservoir, were evaluated using standalone, and hybrid mode of genetic, slime mold, and ant colony algorithms. Results of the best release scenario (SSP2-8.5) showed that the annual rainfall in the future periods will decrease by 8.9 mm, and 14.5 mm, respectively, compared to the base period. The objective function of optimizing the use of the dam reservoir was defined as minimizing the sum of squared relative deficiencies in each month and maximizing the reliability in the statistical period of 2011-2021. The results showed that in terms of time reliability, vulnerability, and stability, the hybrid slime mold-genetic algorithm was better than other algorithms with values of 0.73, 0.32, and 28.78. Prediction of the dam's inflow and outflow using the hybrid slime mold-genetic algorithm indicated high accuracy compared to other models by 13% and 19% errors, respectively.

**Keywords:** Slime mold algorithm, Reservoir operation, Climate change, Drought

---

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: fmousavi@semnan.ac.ir