

مقاله علمی- پژوهشی

## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سیاست‌های پوشش دهی چند نقطه‌ای برای بهره‌برداری از سیستم مخزن برقابی سد دز

فهیمة خادم‌پور<sup>۱</sup>، مهدی امیرآبادی‌زاده<sup>\*</sup>، یاشار فلامرزی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

### چکیده

نیروگاه‌های برقابی یکی از منابع تولید انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که نسبت به سایر منابع احیاشدنی، بهره‌وری بهتری دارند. یکی از شیوه‌های مناسب برنامه‌ریزی جهت به حداکثر رساندن بهره‌وری در این نیروگاه‌ها، به کارگیری روش‌های نوین بهینه‌سازی مانند روش‌های فراکاوشی است. هدف از انجام این مطالعه، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک مدل مبتنی بر قوانین پوشش ریسک یک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای به منظور بررسی کارایی این قوانین و سیاست‌ها در بهره‌برداری از سیستم مخزن برقابی و به حداکثر رساندن کل تولید برقابی سد دز در طول دوره‌ی (۲۰۲۰-۱۹۹۱) در مقیاس ماهانه با الگوریتم M2O-CSA برای دوره پایه و آینده می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده الگوریتم M2O-CSA، خروجی تولید برق برای دوره آینده نسبت به میانگین خروجی برق در دوره پایه در هر دو سناریو در پوشش یک نقطه‌ای در اغلب ماه‌ها کاهش یافته ولی هر دو سناریو در پوشش دو نقطه‌ای در اغلب ماه‌ها افزایش یافته است. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل خروجی کل تولید برق در طول دوره بهینه‌سازی و به منظور یافتن بهترین راه‌حل (حداکثر توان تولید)، می‌توان حداکثر تولید برق نسبت به دوره پایه را با استفاده از 2PHP به دست آورد که مقدار بیشینه ۱۱۰۵۱/۶۴ مگاوات در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) و کمترین آن ۶۰۲۹/۴۵ مگاوات در ماه نوامبر (۱۰ آبان تا ۹ آذر) در سناریوی SSP585 می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج داده شده، 2PHP و 1PHP به ترتیب حداکثر توان تولیدی را ارائه می‌دهند. همچنین، حداکثر ذخیره‌سازی با مقدار ۵۲۸۲ میلیون مترمکعب برای دوره آماري مطالعاتی برای سد دز را تولید کند. به طور کلی، می‌توان گفت که سیاست 2PHP کارآمدترین و مناسب‌ترین سیاست در بین سیاست‌های بهینه‌سازی آزمایش شده است و حداکثر خروجی تولید برق و افزایش تولید برق را برای سد دز ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم M2O-CSA، بهره‌برداری از سیستم مخازن، بهینه‌سازی، سیاست‌های پوشش ریسک، نیروگاه‌های برقابی

### مقدمه

(Suman, 2021; al., 2013). در میان گزینه‌های ذکر شده، نیروگاه‌های برقابی به دلیل ماهیت منحصربه‌فرد خود به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی تجدید پذیر شناخته می‌شوند (Panwar et al., 2011). تغییر از سوخت‌های فسیلی به منابع انرژی تجدید پذیر برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی جهانی ضروری است (Sims, 2004). گرچه نیروگاه‌های برقابی مزایای زیادی نسبت به سوخت‌های فسیلی و سایر منابع تجدید پذیر دارند، اما مستقیماً به میزان جریان آب وابسته هستند و به شرایط آب و هوایی بسیار حساس هستند. بنابراین، بقای پروژه‌های برقابی در وضعیت فعلی یا برنامه‌ریزی شده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در جریان رودخانه قرار دارد (Zolghadr-Asli et al., 2019; Zapata et al., 2022). آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۴</sup>، کاهش دسترسی به آب را به عنوان یکی از

منابع انرژی تولید و مصرف شده، به‌ویژه منابع انرژی تجدید پذیر، از ارزش بسیار بالایی برخوردارند. منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، آبی و زمین گرمایی، روش‌های پایداری هستند که حدود ۱۴٪ از نیازهای انرژی جهان را تأمین می‌کنند (Panwar et

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران  
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران  
۳- استادیار گروه پژوهشی مدل‌سازی و پیش‌آگاهی اقلیمی، پژوهشکده اقلیم-شناسی، مشهد، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

بالا‌ترین بازده سیستم، محققان به دنبال استفاده از راحت‌ترین عملیات برای دستیابی به عملکرد خوب با بالاترین تولید انرژی هستند. بسیاری از منحنی‌های قاعده و سیاست‌های تصمیم‌گیری مانند سیاست بهره‌برداری استاندارد، قانون پوشش ریسک، قانون مبتنی بر شبکه‌های عصبی و غیره اعمال و بررسی می‌شوند (Ji et al., 2016; Sangiorgio et al., 2018). در بین سیاست‌های مذکور، سیاست‌های پوشش ریسک به دلیل خشک‌سالی‌های اخیر، افزایش تقاضای آب و همچنین عدم قطعیت در منابع آب بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Zhao et al., 2011). دلیل اصلی جذابیت سیاست‌های پوشش ریسک، توزیع یکنواخت کمبود آب برای کاهش کمبودهای شدید آینده است. آشفته و همکاران از یک برنامه‌ریزی ژنتیکی منطقی برای تعیین قوانین پوششی برای مخزن تک منظوره آیدوغموش در شمال شرق ایران استفاده کرد. در این میان، استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی به دلیل قدرت و دقت در مقایسه با استفاده از یک الگوریتم واحد، جلب توجه می‌کند (Ashofteh et al., 2017). ابوطالبی و همکاران ترکیبی از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب را با رگرسیون بردار پشتیبان و برنامه ریزی غیرخطی برای یافتن سیاست‌های عملیاتی بهینه مخزن کارون ۴ ارائه می‌کند (Aboutalebi et al., 2015). احترام و همکاران الگوریتم جدیدی را با ادغام الگوریتم ژنتیک با الگوریتم کریل<sup>۱</sup> برای کشف سیاست عملیات بهینه در مخازن تک منظوره و چندمنظوره برای همگرا شدن به بهینه جهانی در زمان کوتاه‌تر پیشنهاد کرد (Ehteram et al., 2017). محمدی و همکاران (۱۴۰۳) به شبه‌سازی تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در حوزه آبخیز طالقان پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بارش در برخی ماه‌ها روند کاهشی و در برخی روند افزایشی دارد. نوروز و لاشدی و همکاران (۱۴۰۳) پیش‌نگری تغییرات نمایه‌های حدی دما در پهنه استان مازندران تحت سناریوهای CMIP6 را بررسی کردند. نتایج بیانگر وجود تغییرات ناگهانی برای دما تحت سناریوی بدبینانه بیشتر از دو سناریوی دیگر بود. به‌طور کلی، نمایه‌های حدی دمایی تغییرات قابل توجهی خواهند داشت و استان مازندران با افزایش دمای هوا و رخدادهای حدی درجه حرارت بالا همراه خواهد بود. افزایش دما به‌ویژه در ماه‌های گرم که هم‌زمان با کاهش نزولات جوی است، با توجه به ماهیت فصل گرم سال، در کشاورزی این منطقه که از مناطق مهم تولید برنج کشور است، نقش قابل توجهی دارد. حاتم‌خانی و همکاران (۲۰۲۵) یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر سیستم‌های برقابی حوضه مارون ارائه دادند. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش تحت سناریوهای تغییر اقلیم و کاهش تولید انرژی برقابی بود. رانجان و همکاران (۲۰۲۵) به ارزیابی تأثیر تغییر آب‌وهوا بر دبی رودخانه زیر

خطرات اصلی مرتبط با تغییرات اقلیمی برای بخش انرژی شناسایی کرده است. بنابراین، اثرات تغییرات اقلیمی می‌تواند مشکلات جدی در برنامه‌های آینده نیروگاه‌های برقابی ایجاد کند و آن‌ها را از نظر اقتصادی غیرقابل توجیه کند. بنابراین، انجام مطالعاتی در مورد اثرات تغییرات اقلیمی در طول عمر مفید سد برق آبی ضروری است و نتایج آن در مدیریت بلندمدت سد و تولید انرژی برق آبی حیاتی است (Beheshti et al., 2019). در دهه‌های اخیر، استفاده بهینه از منابع آب به دلیل کمبود آب و انرژی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین مدیریت کارآمد مخازن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب سطحی به شمار می‌رود. چالش اصلی مدیریت مخزن سطحی مستلزم استخراج سیاست‌های بهینه برای بهره‌برداری از مخازن سطحی تحت شرایط آب و هوایی شدید است (Karamouz et al., 2013). برای غلبه بر کاستی‌های روش‌های بهینه‌سازی برای حل مسائل مدیریت منابع آب، بسیاری از محققان از الگوریتم‌های تکاملی و فراابتکاری برای حل مسائل استفاده کردند. از آنجایی که بهره‌برداری بهینه از مخزن کمک می‌کند تا قوانین عملیاتی بهتر و قابل‌اعتمادتری به دست آید که مزایای اجتماعی و اقتصادی را در زمینه‌ی کمبود آب و انرژی افزایش می‌دهد، بنابراین، جستجوی الگوریتم‌های جدید با پتانسیل بالا برای حل مخزن پیچیده مهم است. در بهینه‌سازی دستی پارامترهای هیدرولوژیکی، در ابتدا تمام پارامترها تغییر پیدا می‌کنند تا مجموعه پارامترهای بهتری به دست آید. با بهبود جواب‌ها، در ادامه فقط مقادیر برخی پارامترها تغییر پیدا می‌کنند و سایر پارامترها در مقادیر مشخص ثابت هستند. بنابراین در این پژوهش از الگوریتم جستجوی کلاغ چند هدفه<sup>۱</sup> (M2O-CSA) استفاده شد که این الگوریتم برای حل مشکلات بهینه‌سازی چند هدفه در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. در این روش، سعی بر آن است که اختلافات بین همگرایی و توزیع راه‌حل‌ها کاهش یابد. همچنین، الگوریتم CSA توانایی بالایی خود را در بهینه‌سازی تک هدفه سیستم‌های ترکیبی و سایر مسائل بهینه‌سازی نشان داده است (عسکرزاده، ۲۰۱۷). از این‌رو برای بهینه‌سازی چند هدفه از نسخه چند هدفه الگوریتم CSA یعنی M2O-CSA استفاده شده است. یکی از اولویت‌های اساسی طرح‌های تأمین آب، بهره‌برداری مناسب از مخازن ذخیره می‌باشد. بنابراین سیاست‌های بهره‌برداری مناسب از مخازن از لحاظ اجتماعی و اقتصادی جایگاه ویژه‌ای دارد. برای طراحی این مخازن، باید جریان‌های ورودی و خروجی و رابطه بین آن‌ها تعیین گردد. روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری آب از مخازن وجود دارد که با اعمال هر یک از آن‌ها منحنی فرمان بهره‌برداری از آن مخزن به دست می‌آید. برای دستیابی به

1- krill algorithm

2- Multi-objective Orthogonal Opposition-based Crow Search Algorithm

بین‌الدول تغییر اقلیم تحت دو سناریوی انتشار SSP245 و SSP585 به مقیاس محلی مدنظر و تولید سناریوهای تغییر اقلیم آتی

۲- شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن بر اساس سناریوهای اقلیمی آتی به‌منظور تولید آورد رودخانه به مخزن سد

۳- شبیه‌سازی مخزن سد برای دوره پایه و آتی

۴- بهینه‌سازی تولید انرژی برقی سد با استفاده از الگوریتم چند هدفه هوشمند M2O-CSA و سیاست‌های پوشش ریسک یک نقطه‌ای (1PHP) و دونقطه‌ای (2PHP).

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در مقیاس ماهانه شامل بارش، حداقل و حداکثر دما در ایستگاه مطالعاتی در دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (۱۳۹۹-۱۳۷۰) می‌باشد. داده‌های هیدرولوژیکی از منحنی‌ها و داده‌های ارتفاع-سطح-حجم، طول مخزن، میزان تبخیر، ظرفیت سرریز، حجم فعال و غیرفعال مخزن، حداقل و حداکثر حجم مخزن، اطلاعات حوضه بالادست سد و دبی تشکیل شده است. داده‌های مورد نیاز برای اجرای این پژوهش، داده‌های تقاضا، تبخیر، بارش و دبی در مقیاس ماهانه است. همچنین، متوسط ورودی سالانه، حجم حداکثر (ظرفیت کل)، حجم حداقل (حجم مرده)، حجم مؤثر مخزن به ترتیب معادل ۵۹۵۰، ۳۳۴۰، ۸۳۰ و ۲۵۱۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. علاوه بر این، تراز پایاب نیروگاه سد دز معادل ۱۷۲ متر از سطح دریا منظور شده است و نیروگاه آن از ۸ واحد ۸۰/۸ مگاواتی تشکیل شده است که زمان کارکرد آن در طول روز حدود ۱۰ ساعت می‌باشد. به این ترتیب در محاسبات ضریب کارکرد<sup>۵</sup> (P<sub>f</sub>) معادل ۰/۴۱۷ منظور شده است. همچنین، ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۶۵۰ مگاوات و بازده آن معادل ۹۰ درصد هست (عزیزپور و همکاران، ۲۰۱۶). داده‌ها از سازمان آب و برق استان خوزستان اخذ شد.

### روش ریزمقیاس نمایی

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ایستگاه مطالعاتی سد دز، از خروجی ۶ مدل گردش عمومی جو (AOGCM) مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC شامل مدل‌های ACCESS-CM2، CanESM5، GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MIROC6 و MRI-ESM2-0 استفاده شد. بسیاری از مدل‌های گردش عمومی برآورد کمتر یا بیشتر از مقدار مشاهداتی مؤلفه‌های اقلیمی (بارش، حداکثر و حداقل دما) دارند. به‌منظور تصحیح خطای داده‌های شبیه‌سازی شده ماهانه بارش و دما در دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) و سپس دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) تحت دو سناریوی حد متوسط (SSP245) و بدبینانه (SSP585) در ایستگاه مطالعاتی از روش

حوضه در گانگا<sup>۱</sup> در هند پرداختند. پیش‌بینی می‌شود تا پایان قرن ۲۱، دما و بارندگی تحت شرایط SSP585 افزایش یابد. همچنین، رواناب کل افزایش یافت. کریمی الکوهی و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر تولید انرژی برقی در سد کارون ۴ پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما، کاهش رواناب و کاهش تولید برق سالانه بود. سلطانی نژاد و همکاران (۱۴۰۳) بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های برقی حوضه کارون به‌وسیله الگوریتم کاوش باکتری و الگوریتم ژنتیک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم جستجوی باکتری توانایی بالاتری از لحاظ دقت و سرعت در انجام محاسبات داشته است. بنابراین، نوآوری این پژوهش، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک مدل عملیاتی مبتنی بر قوانین پوشش ریسک یک نقطه‌ای<sup>۲</sup> و دونقطه‌ای<sup>۳</sup> (1PHP و 2PHP) به‌منظور بررسی کارایی این قوانین و سیاست‌ها در بهره‌برداری از سیستم مخزن برقی و به حداکثر رساندن کل تولید برقی سد دز در طول دوره‌های عملیاتی (۲۰۲۰-۱۹۹۱) در مقیاس زمانی ماهانه با الگوریتم M2O-CSA برای دوره پایه و آینده تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 برای دوره (۲۰۳۰-۲۰۵۹) می‌باشد. روش پیشنهادی در هیچ سیستم مخزنی بخصوص برای به حداکثر رساندن تولید برق اعمال نشده است.

### روش پژوهش

#### منطقه مطالعاتی

سد دز بلندترین سد ایران و در زمان ساخت نیز مرتفع‌ترین سد مخزنی در خاورمیانه بوده و بر روی رودخانه دز در استان خوزستان، جنوب غربی ایران ساخته شده و محل سد در ۲۵ کیلومتری شمال شهر دزفول قرار دارد. رودخانه دز که از ارتفاعات غربی زاگرس (کوه‌های بختیاری) سرچشمه می‌گیرد از نظر میزان آبدی دومین رودخانه ایران محسوب می‌شود و در ۴۵ کیلومتری شمال اهواز به رودخانه کارون می‌پیوندد. عرض بدنه پی ۲۷ متر و در تاج ۴/۵ متر، طول تاج ۲۱۲ متر، ارتفاع آن از پی ۲۰۳ متر و از کف رودخانه ۱۹۰ متر و رقوم تاج سد به ۶۵ کیلومتر مربع می‌رسد. (احمدیان فر و ادیب، ۱۳۹۳). نمودار جریان کار حاضر در شکل (۱) خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مراحل انجام پژوهش از اخذ داده‌ها تا مرحله شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با ذکر روش‌ها مشخص گردیده است تا ذهنیت لازم را برای محققان فراهم آورد.

۱- بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما با استفاده از روش ریزمقیاس سازی<sup>۴</sup> BCSD (روش جداسازی فضایی تصحیح ارزیابی) برای تبدیل خروجی مدل‌های ارائه شده در گزارش ششم هیئت

1- One Point Hedging Policy

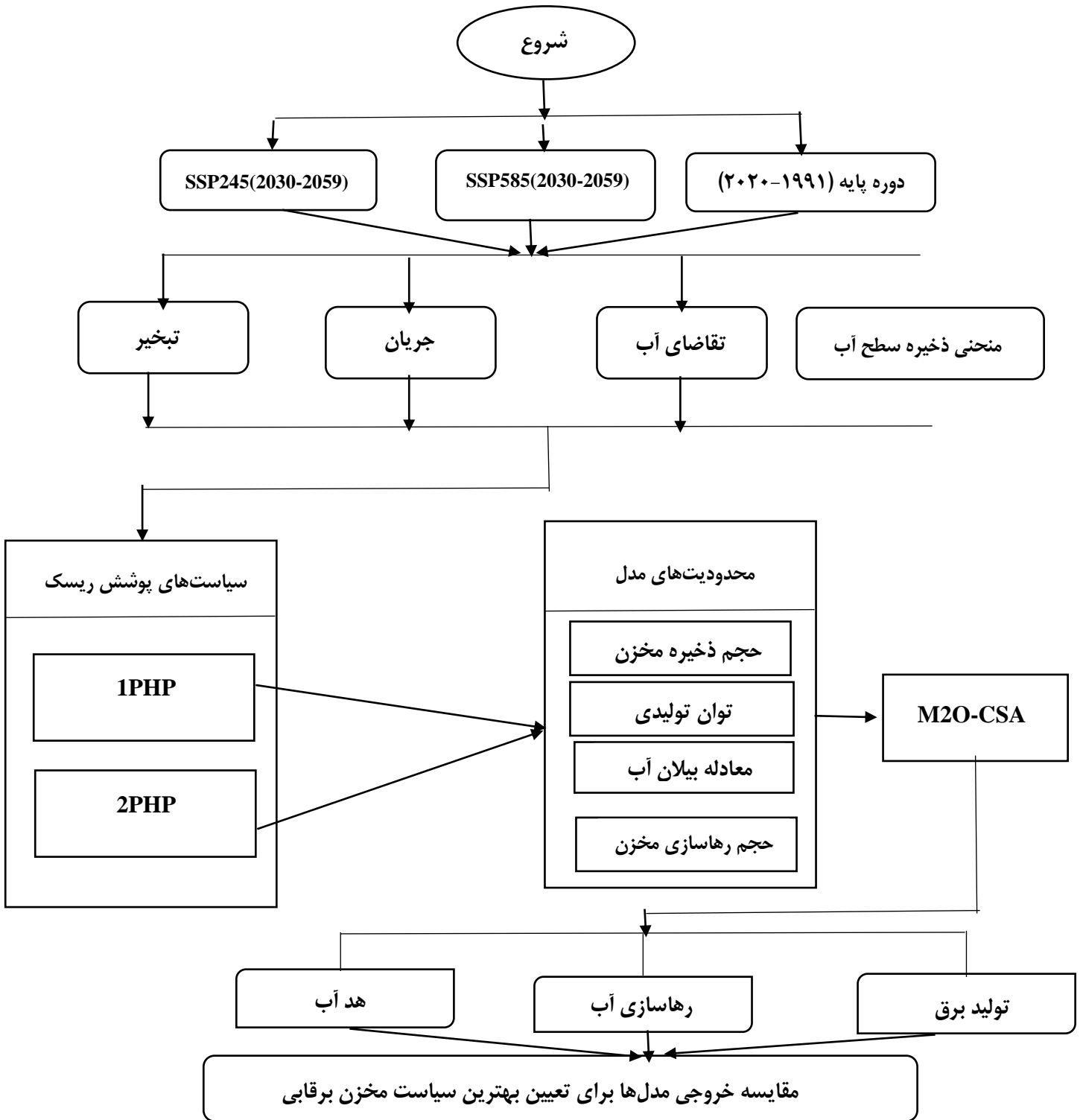
2- Two Point Hedging Policy

3- Bias Corrected Spatial Disaggregation

4- Plant Factor

5- Atmosphere Ocean General Circulation Models

دینامیکی جداسازی فضایی تصحیح‌اریبی (BCSD) استفاده می‌شود.



شکل ۱- فلوچارت مراحل انجام کار

پیدا کردن نقاط خوب در فضای مسئله می‌گردد (وزیری و همکاران، ۱۳۹۷).

مراحل الگوریتم M2O-CSA به شرح زیر است.

گام اول: فرض کنید فضای محیط پیرامون شامل  $d$  بُعد و  $N$  تعداد کلاغ‌ها می‌باشد.

گام دوم: موقعیت هر کلاغ در هر مرحله از تکرار بر اساس بردار  $X^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, \dots, x_d^{i,iter}]$  می‌باشد (iter: تعداد تکرارها،  $i$ : کلاغ).

گام سوم: هر کلاغ دارای حافظه‌ای است که محل پنهان کردن غذا را به ذهن می‌سپارد. در هر مرحله از تکرار، موقعیت مکان پنهان کلاغ به صورت  $m^{i,iter}$  مشخص می‌گردد.

گام چهارم: موقعیت مذکور به عنوان بهترین موقعیتی است که کلاغ جهت پنهان کردن غذا انتخاب کرده است.

گام پنجم: بهترین مکان پنهان کردن غذا در حافظه کلاغ ذخیره می‌شود و کلاغ‌ها در محیط جستجو می‌کنند تا بهترین مکان پنهان کردن غذا جهت مواقع نیاز را پیدا نمایند.

گام ششم: فرض کنید در هر مرحله، کلاغ  $\lambda$  می‌خواهد محل پنهان کردن غذای خود ( $m^{i,iter}$ ) را مشاهده کند. در این مرحله کلاغ  $\lambda$  تصمیم می‌گیرد کلاغ  $\lambda$  را تعقیب نماید تا به محل غذای وی دسترسی پیدا کند که دو حالت رخ می‌دهد.

حالت اول: کلاغ  $\lambda$  نمی‌داند که کلاغ  $\lambda$  آن را تعقیب می‌کند و در نتیجه کلاغ  $\lambda$  به مکان کلاغ  $\lambda$  دسترسی پیدا می‌کند. بنابراین، موقعیت جدید کلاغ  $\lambda$  بر اساس رابطه (۱) به دست می‌آید.

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

که  $0 < r < 1$  یعنی  $r$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و ۱ و  $fl^{i,iter}$  طول پرواز کلاغ  $\lambda$  است.

بنابراین، مقادیر کوچک  $fl^{i,iter}$  منجر به جستجوی محلی و مقادیر بزرگ آن منجر به جستجوی بهینه مطلق می‌شود. همچنین، اگر مقادیر  $fl^{i,iter}$  بزرگ‌تر از یک باشد، موقعیت جدید کلاغ ممکن است بعد از  $m^{i,iter}$  باشد.

حالت دوم: کلاغ  $\lambda$  می‌داند که کلاغ  $i$  در تعقیب هست (یعنی آگاهی دارد (AP: احتمال آگاهی کلاغ  $\lambda$  در هر مرحله از تکرار)) در نتیجه، کلاغ  $\lambda$  سعی دارد که کلاغ  $i$  را فریب دهد و به موقعیت دیگری برود.

همچنین، در الگوریتم مذکور، قابلیت تنوع و تشدید بر اساس پارامتر AP کنترل می‌شود. بدین صورت، مقادیر کوچک AP، مقدار تشدید و مقادیر بزرگ AP تنوع‌گرایی را افزایش می‌دهد.

پس با توجه به مراحل مذکور می‌توان گفت که ابتدا، مقداردهی اولیه مسئله و پارامترهای قابل تنظیم شامل، طول پرواز ( $f1$ )، احتمال آگاهی (AP)، تعداد کلاغ‌ها ( $N$ ) و بیشترین تعداد تکرارها

این روش دارای دو مرحله تصحیح اربیبی و تولید داده است. در مرحله تصحیح اربیبی، مقادیر میانگین‌گیری شده ماهانه مدل گردش عمومی (GCM) در دوره پایه با سری زمانی داده‌های دیده‌بانی شده شبکه‌ای در مقیاس مکانی و دوره زمانی مشابه مقایسه می‌شوند. سپس شبیه‌سازی‌های GCM در دوره آینده بر اساس نتایج مقایسه انجام شده تنظیم و تصحیح می‌شوند. نهایتاً، به روش تولید داده سری زمانی داده‌های روزانه اقلیم آتی به روش تصادفی تولید می‌شوند. در این روش، پیش‌بینی شونده و پیش‌بینی کننده یکی هستند، منتهی مقیاس مکانی و زمانی آن‌ها مختلف است (Brekke et al., 2013). پس از انجام تصحیحات مرحله اول بر روی برونداد شبکه‌ای مدل گردش عمومی جو، مرحله دوم BCSD می‌تواند با استفاده از نرم-افزارهای ArcGIS و RStudio انجام گیرد.

### الگوریتم M2O-CSA

الگوریتم جستجوی کلاغ چند هدفه (M2O-CSA) برای حل مشکلات بهینه‌سازی چند هدفه در مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است و یک روش هوشمند برای پیدا کردن بهترین راه‌حل‌ها در مسائل بهینه‌سازی پیچیده است.

این الگوریتم ترکیبی از دو بخش اصلی است:

۱- دو عملگر تکاملی (M2O: Multi- Operator):

این الگوریتم از دو عملگر هوشمند به نام‌های "عملگر جهش" و "عملگر ترکیب" استفاده می‌کند تا جواب‌های بهتری بسازد. این عملگرها باعث می‌شوند الگوریتم هم نقاط جدیدی را جستجو کند (گشت زدن در فضای مسئله) و هم از جواب‌های خوب فعلی بهتر استفاده کند (تمرکز روی راه‌حل‌های مناسب)

۲- الگوریتم کلونی پرنده (Crow Search Algorithm- CSA):

الگوریتم CSA توانایی بالای خود را در بهینه‌سازی تک هدفه سیستم‌های ترکیبی و سایر مسائل بهینه‌سازی نشان داده است. از این رو برای بهینه‌سازی چند هدفه از نسخه چند هدفه الگوریتم CSA یعنی M2O-CSA استفاده شده است (عسکرزاده، ۲۰۱۷). این الگوریتم بر اساس رفتار خاص کلاغ‌ها ساخته شده که به عنوان پرندگانی باهوش در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، از فرایند پیچیده-ای جهت پنهان کردن غذا در یک مکان برای بهره بردن در زمان-های مورد نیاز استفاده می‌نمایند. کلاغ‌ها به تماشای پرندگان دیگر مشغول و سپس محل غذای پرندگان دیگر را متوجه می‌شوند و پس از ترک آن پرنده از محل، غذای وی را می‌ربایند. این الگوریتم از این ایده برای جستجوی راه‌حل‌های بهتر استفاده می‌کند که با انجام پرش‌های تصادفی بلند (شبیه به پروازهای ناگهانی کلاغ) به دنبال

است.

$$\text{Min}F = \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_t - R_t}{D_{\max}} \right)^2 \quad \forall t = 1.2 \dots T \quad (2)$$

$$\text{Max}G_t = \sum_{i=1}^T \eta \times g \times r_t \times H_t \times t \quad (3)$$

که در آن،  $F$  تابع هدف،  $D_t$  مقدار نیاز پایین‌دست سد در ماه  $t$ ،  $R_t$  حجم رهاسازی از مخزن سد در ماه  $t$ ،  $D_{\max}$  بیشترین مقدار نیاز در طول دوره بهره‌برداری،  $n$  طول دوره بهره‌برداری،  $G_t$  کل تولید انرژی برقابی برحسب (مگاوات)،  $T$  دوره‌های زمانی،  $\eta$  راندمان نیروگاه برقابی،  $g$  شتاب ثقل  $9.81$  بر حسب  $(m/s^2)$ ،  $r_t$  تخلیه در زمان  $t$   $(m^3/s)$ ،  $H_t$  تراز مخزن در دوره زمانی  $t$  می‌باشد.

هم‌چنین، به‌منظور محاسبه توان تولیدی، علاوه بر میزان آب رهاشده از مخزن، میزان بار مؤثر بر توربین‌ها نیز می‌بایست تعریف گردد. بنابراین مسئله بهره‌برداری بهینه برقابی از مخزن سد دارای قیود غیرخطی هست. به‌طور کلی قیود این مسئله را می‌توان به‌صورت روابط (۴) تا (۱۰) تعریف کرد.

$$h_t = \left( \frac{H_t + H_{(t+1)}}{2} \right) - TWL \quad (4)$$

$$H_t = a + b \times S(t) + cS(t)^2 + d \times S(t)^3 \quad (5)$$

$$R_t = r_t \times t \quad (6)$$

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

$$R_{\min} \leq R(t) \leq R_{\max} \quad (8)$$

$$G_{\min} \leq G(t) \leq G_{\max} \quad (9)$$

$$S(t+1) = S(t) + P(t) + Q(t) - R(t) - SP(t) - E(t) \quad (10)$$

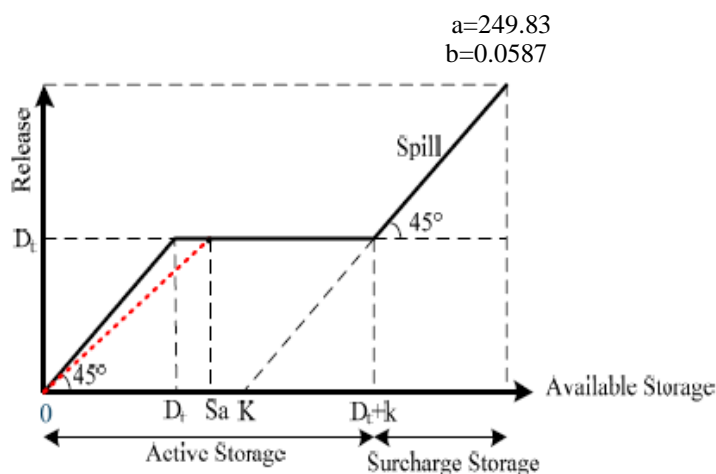
$TWL$  تراز پایاب نیروگاه،  $S(t)$  حجم مخزن در ابتدای دوره (میلیون مترمکعب)،  $S(t+1)$  حجم مخزن در انتهای دوره (میلیون مترمکعب)،  $S_{\min}$  کمترین حجم مجاز مخزن،  $S_{\max}$  بیشترین حجم مجاز مخزن،  $R_{\min}$  کمترین میزان رهاسازی از مخزن،  $R_{\max}$  بیشترین میزان رهاسازی از مخزن،  $G_{\min}$  کمترین مقدار تولید انرژی،  $G_{\max}$  بیشترین میزان تولید انرژی،  $P(t)$  بارش مستقیم بر روی مخزن در طول دوره  $t$  (میلی‌متر)،  $Q(t)$  حجم آب ورودی به مخزن در طول دوره  $t$  (میلیون مترمکعب)،  $SP(t)$  حجم سرریز از مخزن در طول دوره  $t$  (میلیون مترمکعب) و  $E(t)$  تبخیر از مخزن در طول دوره  $t$  (میلی‌متر) می‌باشد. هم‌چنین، به‌منظور محاسبه بار آبی مؤثر بر توربین‌ها، با استفاده از اطلاعات حجم-ارتفاع مخزن، یک تابع چندجمله‌ای درجه سوم که ضرایب ثابت آن در زیر آورده شده است، برازش داده شد. ضرایب ثابت منحنی حجم-ارتفاع برای مخزن دز به‌صورت زیر است.

$(iter_{\max})$  تنظیم می‌شوند، و هم‌چنین، برای هر کلاغ تعداد متغیرهای تصمیم و مقادیر تابع هدف محاسبه می‌شود.

گام هفتم: شرط توقف و همگرایی بررسی می‌شود. در صورت برآورده شدن شرط توقف، الگوریتم به اتمام رسیده است. شرط توقف، معمولاً الگوریتم تا رسیدن به تعداد مشخصی تکرار ادامه پیدا می‌کند (یعنی رسیدن تا تعداد حداکثر تکرار  $(iter_{\max})$ )، هم‌چنین، اگر بعد از چندین تکرار، بهترین جواب‌ها یا آرشیو پارت و تغییر قابل توجهی نکند، الگوریتم متوقف می‌شود (یعنی ثبات در جواب‌ها باشد) (وزیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ نوبهاری و بیگشدل، ۲۰۱۷).

### مدل عملیاتی مخزن برقابی

مشکلات بهره‌برداری از مخزن برقابی می‌تواند به‌گونه‌ای کار کند که سود یا تولید انرژی را در طول دوره بهره‌برداری به حداکثر برساند. در این مطالعه، بهره‌برداری از نیروگاه برقابی سد دز در نظر گرفته شده است. از نظر تقاضای آب، مخازن باهدف انرژی آبی با انواع دیگر مخازن کاملاً متفاوت است. برای توضیح بیشتر، در مورد بهره‌برداری از مخزن برای مصارف شهری، میزان نیاز آب ثابت و رهاسازی بر اساس در دسترس بودن و تقاضای آب صورت می‌گیرد. در مورد نیاز آبیاری، تقاضا از فصلی به فصل دیگر بسته به شرایط آب و هوایی متفاوت است و الگوی تقاضای سالانه سال‌به‌سال تکرار می‌شود. باین‌حال، در مورد بهره‌برداری از یک مخزن برای تولید برقابی، نیاز آب ثابت نیست و باوجود تقاضای برق ثابت تغییر می‌کند. در سیستم مخزن نیروگاهی عملیاتی، دو پارامتر، میزان رهاسازی آب و هد آب بر خروجی تولید برق تأثیر می‌گذارند. بنابراین، سطح آب نقش مهمی در خروجی تولید برق دارد و بالاترین سطح آب در تولید برق سود بیشتری دارد. این به این معنی است که وقتی آب بیشتری در مخزن ذخیره می‌شود، هد نیز بیشتر می‌شود و بنابراین تخلیه کمتری از مخزن ممکن است برای تولید برق موردنیاز کافی باشد. باین‌حال، اگر ذخیره کمتر باشد، برای تولید نیاز برق، مقدار زیادی آب باید تخلیه شود. به‌طور خلاصه، تقاضای آب برای تولید برقابی قابل تغییر است و به میزان آب یا در دسترس بودن آب بستگی دارد. بنابراین، هیچ الگوی تقاضای هدف خاصی برای سیستم مخزن برقابی در دسترس نیست (طیبیان و همکاران، ۲۰۱۹). هدف اصلی این پژوهش، کاهش میزان تقاضا و به حداکثر رساندن کل تولید برق در طول دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۰) با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی متفاوت به‌عنوان یک هدف در نظر گرفته شد. از این‌رو، تابع هدف را می‌توان به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی، که همراه با قید است، تأیید کرد. در این پژوهش، دو تابع هدف شامل حداقل سازی کمبود تأمین نیازها و حداکثر سازی تولید برق به ترتیب به‌صورت روابط (۲) و (۳) مدنظر



شکل ۲- طرح کلی سیاست پوشش ریسک یک نقطه‌ای (1PHP)

می‌باشد. هرگاه ذخیره موجود از  $S_b$  بیشتر شود، رهاسازی آب می‌تواند تقاضای هدف را برآورده کند تا زمانی که ذخیره آب موجود از مجموع  $D_t + K$  فراتر رود و سرریز اتفاق بیفتد (شکل ۳). بقیه پارامترها قبلاً معرفی شدند (Draper & Lund., 2004).

### نتایج و بحث

این پژوهش به منظور مقایسه کاربرد سیاست‌های پوشش دهی چند نقطه در سیستم‌های برقابی عملیاتی باهدف اصلی به حداکثر رساندن کل تولید برق در دوره انتخابی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) انجام شد. برای دستیابی به این هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی M2O-CSA برای یافتن بهترین راه حل استفاده شد. تابع هدف باید طوری فرموله شود که هدف فوق را منعکس کند. بنابراین، داده‌های ماهانه جریان، تبخیر، تقاضای آب و منحنی سطح ذخیره آب از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به منظور استفاده در ساخت مدل‌های عملیاتی یعنی 1PHP و 2PHP جمع‌آوری شد. بر این اساس، کل فرآیند این پژوهش را می‌توان در پنج فرآیند اصلی جمع‌آوری داده‌ها، عملیات مخزن، پردازش بهینه‌سازی، نتایج خروجی و تجزیه و تحلیل نتایج خروجی خلاصه کرد. تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در هر مدل به تعداد نقاط تغییر در سیاست پوشش ریسک خاص بستگی دارد. ویژگی‌های الگوریتم M2O-CSA در جدول (۱) خلاصه شده است. الگوریتم M2O-CSA برای بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز برای مقاصد نیروگاهی آبی، در دوره‌ی ۳۰ سال آماری (۳۶۰ ماهه) استفاده شد تا بتوان قابلیت‌های الگوریتم موردنظر را برای مشکلات بهره‌برداری در مقیاس ماهانه ارزیابی کرد.

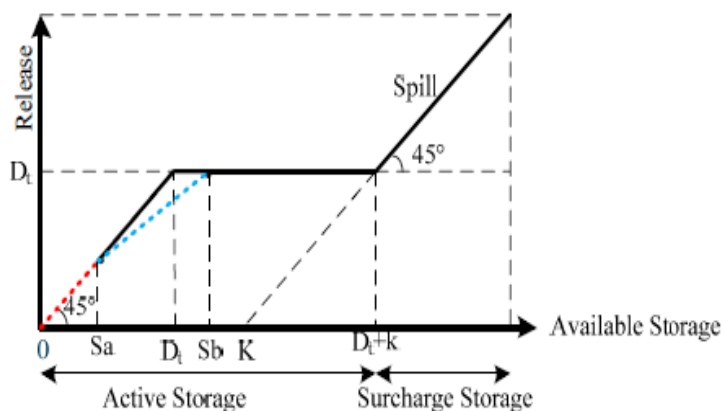
### سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن

#### پوشش ریسک یک نقطه‌ای (1PHP)

در پوشش ریسک یک نقطه‌ای، فقط یک مرحله جیره‌بندی وجود دارد که محور  $x$  ذخیره‌سازی موجود و محور  $y$  مجموع انتشار و نشت را نشان می‌دهد که شیب این خط (خط قرمز) کمتر از ۴۵ است (شکل ۲). در نتیجه میزان رهاسازی آب ( $R_t$ ) کمتر از ذخیره موجود ( $W_t$ ) خواهد بود و رهاسازی نمی‌تواند تقاضای هدف ( $D_t$ ) را برآورده کند. نشان دهنده نقطه تغییر در خط تقاضای هدف است که به عنوان  $S_a$  یک متغیر تصمیم برای 1PHP مشخص شده است که باید شبیه‌سازی یا بهینه شود. علاوه بر این، زمانی که مقدار ذخیره‌سازی موجود به  $S_a$  در 1PHP برسد، رهاسازی آب می‌تواند تقاضای هدف را برآورده کند تا زمانی که ذخیره‌سازی موجود با تقاضای هدف به اضافه ظرفیت مخزن برابر شود. آخرین مرحله سیاست‌های پوشش ریسک نیز به همین صورت است. اگر ذخیره‌سازی موجود از مجموع تقاضای هدف ( $D_t$ ) و ذخیره‌سازی فعال ( $K$ ) فراتر رود، سرریز ( $SP_t$ ) رخ می‌دهد (Rittima et al., 2009).

#### پوشش ریسک دونقطه‌ای (2PHP)

دو مرحله جیره‌بندی در پوشش ریسک دونقطه‌ای وجود دارد که خطوط جیره‌بندی از 1PHP هموارتر است. این بدان معناست که در مورد ذخیره‌سازی موجود یکسان، با مقایسه 1PHP با 2PHP، میزان انتشار در 2PHP بیشتر از 1PHP است و آب کمتری برای آینده ذخیره خواهد شد. پارامترهای  $S_a$  و  $S_b$  به ترتیب ذخیره مخزن را در اولین و دومین نقطه تغییر نشان می‌دهند. این دو پارامتر پس از آن باید برای تشکیل 2PHP برای مخزن خاص بهینه شوند. محدودیت اضافی در طول فرآیند بهینه‌سازی در 2PHP استفاده می‌شود که  $S_a$



شکل ۳- طرح کلی سیاست پوشش ریسک دونقطه‌ای (2PHP)

شکل‌های (۴) و (۵) تعیین شد. با توجه به نتایج ارائه شده الگوریتم M2O-CSA، خروجی تولید برق برای دوره آینده نسبت به میانگین خروجی برق در دوره پایه در هر دو سناریو در پوشش یک نقطه‌ای در اغلب ماه‌ها کاهش یافته ولی هر دو سناریو در پوشش دونقطه‌ای در اغلب ماه‌ها افزایش یافته است. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل خروجی کل تولید برق در طول دوره بهینه‌سازی و به منظور یافتن بهترین راه-حل (حداکثر توان تولید)، می‌توان حداکثر تولید برق نسبت به دوره پایه را با استفاده از 2PHP به دست آورد که مقدار بیشینه ۱۱۰۵۱/۶۴ مگاوات در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) و کمترین آن ۶۰۲۹/۴۵ مگاوات در ماه نوامبر (۱۰ آبان تا ۹ آذر) در سناریوی SSP585 هست. بنابراین با توجه به نتایج داده شده، 2PHP و 1PHP به ترتیب حداکثر توان تولیدی را ارائه می‌دهند (جدول ۷). با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که 2PHP کارآمدتر و مؤثرتر از 1PHP برای مسائل عملیاتی انرژی برقابی مخزن سد دز در دوره آینده است. نتایج این پژوهش با نتایج به دست آمده از پژوهش طیبیان و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه شد که نتایج نشان داد 2PHP کارآمدتر از 1PHP بوده است. همچنین، با توجه به شکل (۶)، بیشترین مقدار آب رهاسازی شده از مخزن، ۳۸۰۶/۰۹ میلیون مترمکعب در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) و کمترین مقدار آن ۱۸/۶۲ میلیون مترمکعب در ماه ژانویه (۱۲ دی تا ۱۲ بهمن) می‌باشد.

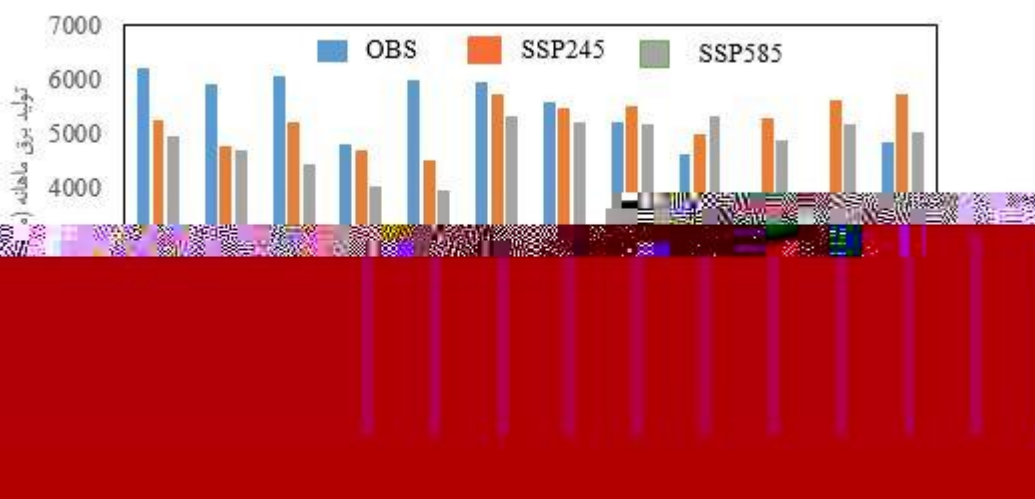
برای یافتن بهینه‌ترین حالت، این الگوریتم ۲۰۰۰ بار اجرا شد که با توجه به ماهیت این الگوریتم، در هر بار اجرا ۲۰ نمونه وجود دارد. تابع هدف حداقل، حداکثر و متوسط بهینه‌ترین اجرا برای عملیات برقابی در دوره‌ی ۳۶۰ ماهه برای دوره پایه و آینده برای پوشش یک نقطه‌ای و دونقطه‌ای در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده بهترین و بهینه‌ترین نقاط و متغیرهای تصمیم برای پوشش یک نقطه‌ای و دونقطه‌ای برای دوره پایه و آینده مشخص شدند. به دلیل ماهیت بیشینه‌سازی تابع هدف، تنها بزرگ‌ترین مقدار به عنوان بهترین راه‌حل در ۲۰۰۰ اجرا در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس مقادیر بهینه برای دو سیاست در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در هر شکل از سیاست پوشش ریسک به تعداد مراحل جیره‌بندی بستگی دارد.  $S_a$  در 1PHP،  $S_a$  و  $S_b$  در 2PHP متغیرهای تصمیم‌گیری هستند که با استفاده از تکنیک M2O-CSA بهینه شده‌اند. این متغیرها به عنوان ضریب ذخیره‌سازی فعال ( $K$ ) مانند  $a$  در 1PHP و  $a$  و  $b$  در 2PHP تعیین شدند. برای سیاست‌های 1PHP و 2PHP به ترتیب نقاط  $S_a$ ،  $S_b$  و  $S_a$ ، بهینه شده است. مقادیر ذخیره این نقاط و مقادیر بهینه در جدول (۶) نشان داده شده است. بر اساس این الگوها، میانگین و خروجی تولید برق ماهانه برای دوره پایه و سناریوهای آینده SSP245 و SSP585 در جداول (۴) و (۵) و همچنین در

جدول ۱- مقادیر پارامترهای روش الگوریتم M2O-CSA

2PHP	1PHP	خصوصیات
۲	۱	متغیرهای تصمیم‌گیری
۲۰	۲۰	جمعیت ( $N_c$ )
۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	تعداد تکرارها ( $iter_{max}$ )
۰/۱	۰/۱	احتمال آگاهی (AP)
۲	۲	طول پرواز ( $f1$ )

جدول ۲- نتایج تابع هدف روش الگوریتم M2O-CSA در بهینه‌ترین اجرا برای پوشش یک نقطه‌ای

شماره نمونه	دوره پایه	SSP245	SSP585
۱	۲/۰۱	۰/۱۴	۰/۰۲
۲	۰/۱۰	۰/۲۵	۰/۴۲
۳	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۷۹
۴	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۱
۵	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۲۳
۶	۰/۱۴	۲/۳۴	۰/۱۳
۷	۰/۳۰	۰/۰۳	۰/۳۳
۸	۰/۲۲	۰/۰۱	۱/۳۹
۹	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۳۰
۱۰	۰/۳۹	۰/۰۳	۰/۷۸
۱۱	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۲۲
۱۲	۰/۷۹	۱/۰۸	۰/۲۲
۱۳	۰/۹۵	۰/۰۵	۱/۲۰
۱۴	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۲۳
۱۵	۰/۹۸	۰/۴۴	۰/۰۱
۱۶	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۶۶
۱۷	۰/۲۹	۰/۱۰	۰/۱۶
۱۸	۰/۹۵	۰/۲۱	۰/۴۵
۱۹	۰/۹۳	۰/۳۵	۰/۰۸
۲۰	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۰۲
میانگین	۰/۵۱	۰/۳۱	۰/۳۸
حداکثر (بهترین راه‌حل)	۲/۰۱	۲/۳۴	۱/۳۹
حداقل	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۱
انحراف معیار	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۳۸



شکل ۴- مقادیر میانگین تولید برق ماهانه برای الگوریتم M2O-CSA در دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) و سناریوهای آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) برای پوشش یک نقطه‌ای

جدول ۳- نتایج تابع هدف روش الگوریتم M2O-CSA در بهینه‌ترین اجرا برای پوشش دونقطه‌ای

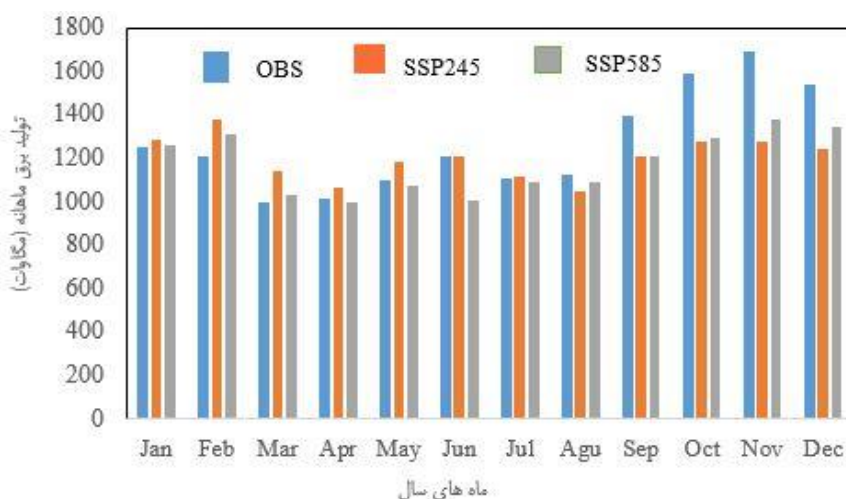
تعداد اجراها	دوره پایه	SSP245	SSP585
۱	۰/۵۸	۱/۰۲	۱/۱۶
۲	۰/۵۴	۰/۰۷	۰/۹۳
۳	۰/۲۱	۰/۵۳	۰/۵۳
۴	۰/۲۸	۱/۲۳	۰/۶۹
۵	۱/۷۹	۰/۱۱	۰/۶۰
۶	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۴۳
۷	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۴۸
۸	۰/۰۵	۱/۰۵	۰/۳۹
۹	۰/۲۵	۰/۸۹	۲/۱۳
۱۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۱/۵۹
۱۱	۱/۳۹	۰/۲۱	۰/۹۴
۱۲	۱/۳۴	۰/۲۴	۰/۳۷
۱۳	۰/۱۹	۰/۷۳	۱/۱۵
۱۴	۰/۰۱	۰/۶۸	۰/۱۲
۱۵	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۴۷
۱۶	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۱۴
۱۷	۰/۰۲	۰/۲۸	۱/۰۸
۱۸	۰/۲۶	۰/۲۱	۱/۳۱
۱۹	۰/۵۹	۰/۵۰	۲/۶۵
۲۰	۰/۹۶	۰/۳۸	۰/۰۳
میانگین	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۸۵
حداکثر (بهترین راه‌حل)	۱/۷۹ و ۱/۳۹	۱/۲۳ و ۱/۰۵	۲/۶۵ و ۲/۱۳
حداقل	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳
انحراف معیار	۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۶۶

جدول ۴- میانگین مقادیر انرژی تولیدی ماهانه برای پوشش یک نقطه‌ای برحسب مگاوات

ماه	دوره مشاهداتی	SSP245	SSP585
ژانویه	۶۲۰۸/۸۰	۵۲۴۸/۶۱	۴۹۴۲/۴۹
فوریه	۵۹۲۴/۹۶	۴۷۸۲/۹۳	۴۶۷۳/۴۶
مارس	۶۰۶۳/۹۴	۵۱۹۲/۱۰	۴۴۲۱/۹۲
آوریل	۴۷۹۷/۴۵	۴۶۸۶/۹۲	۴۰۰۴/۵۱
می	۶۰۰۷/۸۲	۴۵۰۱/۰۲	۳۹۳۴/۸۲
ژوئن	۵۹۶۰/۵۹	۵۷۱۵/۹۳	۵۳۱۳/۹۹
ژوئیه	۵۵۹۷/۶۸	۵۴۶۹/۸۱	۵۲۰۸/۳۹
اوت	۵۱۹۹/۰۰	۵۴۸۹/۷۸	۵۱۷۸/۶۰
سپتامبر	۴۶۰۵/۲۵	۴۹۹۳/۴۲	۵۳۳۷/۲۲
اکتبر	۳۷۷۰/۷۳	۵۲۷۶/۰۴	۴۸۷۵/۸۲
نوامبر	۳۶۰۹/۵۱	۵۶۳۳/۹۳	۵۱۸۹/۴۳
دسامبر	۴۸۵۰/۴۰	۵۷۱۲/۰۰	۵۰۳۸/۶۶
میانگین	۵۲۱۶/۳۴	۵۲۲۵/۲۱	۲۸/۴۸۴۳
حداکثر	۶۲۰۸/۸۰	۵۷۱۵/۹۳	۵۳۳۷/۲۲
حداقل	۳۶۰۹/۵۱	۴۵۰۱/۰۲	۳۹۳۴/۸۲
انحراف معیار	۸۶۰/۵۳	۳۹۱/۸۳	۴۶۶/۸۵

جدول ۵- میانگین مقادیر انرژی تولیدی ماهانه برای پوشش دونقطه‌ای برحسب مگاوات

ماه	دوره مشاهداتی	SSP245	SSP585
ژانویه	۶۸۹۷/۶۳	۷۳۴۳/۱۷	۸۱۹۸/۸۹
فوریه	۷۹۳۹/۶۹	۷۵۹۲/۸۳	۸۷۹۲/۱۰
مارس	۹۲۹۵/۶۸	۸۸۷۶/۸۵	۹۶۶۴/۹۴
آوریل	۱۲۷۳۷/۷۵	۹۷۲۷/۹۱	۱۱۰۵۱/۶۴
می	۱۱۳۱۸/۲۵	۱۰۱۲۶/۵۰	۹۸۵۲/۰۹
ژوئن	۸۲۵۴/۴۳	۸۱۷۱/۸۷	۸۴۶۲/۱۴
ژوئیه	۷۵۳۷/۴۰	۷۶۰۴/۴۹	۸۰۸۷/۵۹
اوت	۶۶۳۹/۹۸	۷۳۷۳/۶۱	۷۵۲۰/۲۸
سپتامبر	۵۵۹۵/۰۲	۶۴۸۴/۱۸	۶۸۹۱/۰۴
اکتبر	۴۲۷۴/۱۶	۶۴۸۴/۷۵	۶۱۵۸/۹۱
نوامبر	۳۱/۳۷۸۵	۶۸۰۱/۱۷	۶۰۲۹/۴۵
دسامبر	۵۱۱۲/۴۸	۷۲۰۳/۰۶	۷۴۶۹/۲۵
میانگین	۷۵۴۰/۶۵	۷۸۱۴/۳۷	۸۱۸۱/۵۳
حداکثر	۱۲۷۳۷/۷۵	۱۰۱۲۶/۵۰	۱۱۰۵۱/۶۴
حداقل	۳۷۸۵/۳۱	۶۴۶۶/۷۵	۶۰۲۹/۴۵
انحراف معیار	۲۷۸۱/۹۰	۱۱۴۵/۹۹	۱۴۴۴/۰۱



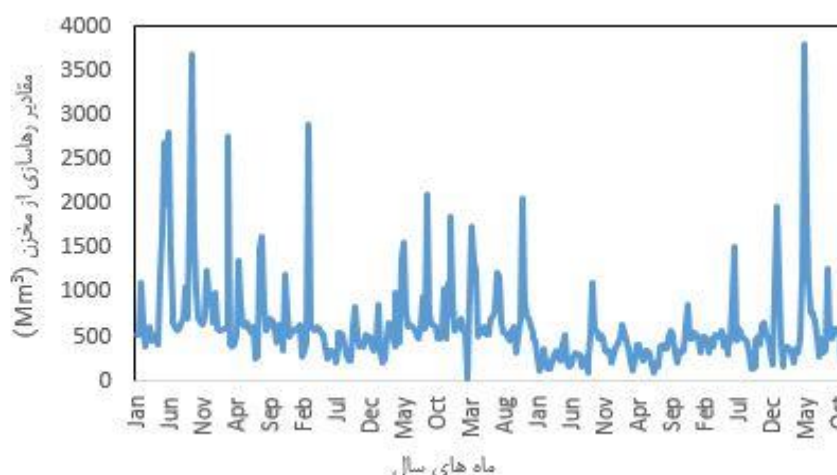
شکل ۵- مقادیر میانگین تولید برق ماهانه برای الگوریتم M2O-CSA برای دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۲۰) و سناریوهای آینده (۲۰۳۰-۲۰۵۹) برای پوشش دونقطه‌ای

جدول ۶- میانگین مقادیر انرژی تولیدی ماهانه برای پوشش یک نقطه‌ای و دونقطه‌ای برحسب میلیون مترمکعب دوره آماری مطالعاتی

مجموع تولید برق (MW)	حداکثر ذخیره‌سازی (Mm <sup>3</sup> )	متغیرهای بهینه		دوره	سیاست‌های عملیاتی
		Sb	Sa		
۶۲۵۹۶/۱۲	۴۲۰۶/۸۰	-	۲/۰۱	پایه	تک نقطه‌ای
۶۲۷۰۲/۵۰	۴۷۶۱/۲۰	-	۲/۳۴	SSP245	
۵۸۱۱۹/۳۱	۳۱۶۵/۲۰	-	۱/۳۹	SSP585	
۹۰۴۸۷/۷۸	۳۱۶۵/۲۰	۳۸۳۷/۲۰	۱/۳۹	پایه	دونقطه‌ای
۹۳۷۷۲/۴۰	۲۵۹۴/۰۰	۲۸۹۶/۴۰	۱/۰۵	SSP245	
۹۸۱۷۸/۳۱	۵۲۸۲/۰۰	۴۴۰۸/۴۰	۲/۶۵	SSP585	

جدول ۷- نتایج میانگین و کل تولید برق روش‌های مختلف برای دوره آماری موردنظر (برحسب مگاوات)

روش	دوره	M2O-CSA		
		میانگین	حداکثر	حداقل
تک نقطه‌ای	دوره پایه	۵۲۱۶/۳۴	۶۲۰۸/۸۰	۳۶۰۹/۵۱
	SSP245	۵۲۲۵/۲۱	۵۷۱۵/۹۳	۴۵۰۱/۰۲
	SSP585	۴۸۴۳/۲۸	۵۳۳۷/۲۲	۳۹۳۴/۸۲
دونقطه‌ای	دوره پایه	۷۵۴۰/۶۵	۱۳۷۳۷/۷۵	۳۷۸۵/۳۱
	SSP245	۷۸۱۴/۳۷	۱۰۱۲۶/۵۰	۶۴۶۶/۷۵
	SSP585	۸۱۸۱/۵۳	۱۱۰۵۱/۶۴	۶۰۲۹/۴۵



شکل ۶- مقادیر آب رهاسازی شده از مخزن برای الگوریتم M2O-CSA برای دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۹۱)

## نتیجه‌گیری

اگرچه انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی برقابی مزایای زیادی دارند، اما اکثر آن‌ها هنوز بر اساس تجربه و قوانین تعیین شده در زمان ساخت، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. از آنجایی که قوانین بهره‌برداری از مخزن نقش مهمی در توسعه منطقه‌ای دارند، در این پژوهش، اشکال مختلف قوانین بهره‌برداری (قوانین پوشش ریسک) ارزیابی شده‌اند. قوانین پوشش ریسک مخزن شامل مجموعه‌ای از منحنی‌های فرمان و ضرایب جیره‌بندی برای حفظ آب در زمان کمبود برای استفاده در آینده است. این مفهوم می‌تواند از سیستم مخزن برقابی برای ذخیره آب در مخزن به منظور افزایش ذخیره آب و هد آب در آینده استفاده کند. با این حال در این پژوهش، دو سیاست پوشش ریسک رقیب برای بررسی اینکه آیا این سیاست‌ها می‌توانند در بهره‌برداری از یک سیستم برقابی منتخب مورد استفاده قرار گیرند، تدوین و اعمال شد. سیاست‌های اعمال شده، سیاست‌های پوشش ریسک یک نقطه‌ای و دونقطه‌ای هستند. سیاست‌ها به منظور ارزیابی عملکرد سیستم مخزن برقابی ساخته، بهینه‌سازی و اعمال شدند. مدل‌های عملیاتی سیستم مخزن برای به حداکثر رساندن کل تولید

برقابی در طول دوره‌های عملیاتی (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در مقیاس زمانی ماهانه که در معرض محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی مختلف است، فرمول‌بندی شدند. الگوریتم M2O-CSA برای شناسایی مدل‌های بهینه عملیاتی مخزن ماهانه استفاده شد. با توجه به نتایج ارائه شده، کل تولید برق در طول دوره بهینه‌سازی و به منظور یافتن بهترین راه-حل (حداکثر توان تولید)، می‌توان حداکثر تولید برق را با استفاده از 2PHP به دست آورد که مقدار ماکزیمم ۱۱۰۵۱/۶۴ مگاوات در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) و کمترین آن ۶۰۲۹/۴۵ مگاوات در ماه نوامبر (۱۰ آبان تا ۹ آذر) در سناریوی SSP585 می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج داده شده، 2PHP و 1PHP به ترتیب حداکثر توان تولیدی را ارائه می‌دهند. با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که 2PHP کارآمدتر و مؤثرتر از 1PHP برای مسائل عملیاتی انرژی برقابی مخزن سد دز در دوره آینده است. بنابراین الگوریتم M2O-CSA می‌تواند در موارد دیگر، چه در بهره‌برداری از مخازن موجود و چه در پروژه‌های برقابی جدید، مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که سیاست 2PHP کارآمدترین و مناسب‌ترین سیاست در بین سیاست‌های بهینه‌سازی آزمایش شده است و حداکثر خروجی تولید برق و افزایش تولید برق را برای سد دز

نمایه‌های حدی دما در پهنه استان مازندران تحت سناریوهای CMIP6. مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۶(۲): ۳۰۱-۲۷۹.

وزیری، ح.ر، کرمی، ح.، موسوی، س.ف. و هادیانی، ا. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد مخزنی با الگوریتم جستجوی کلاغ براساس یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره. نشریه علوم آب و خاک. ۲۲(۱).

Aboutalebi, M., Bozorg Haddad, O. and Loáiciga, H.A. 2015. Optimal monthly reservoir operation rules for hydropower generation derived with SVR-NSGAIL. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 141: 04015029.

Ashofteh, P.S., Bozorg-Haddad, O. and Loáiciga, H.A. 2017. Logical genetic programming (LGP) development for irrigation water supply hedging under climate change conditions. *Journal of Irrigation and Drainage*. 66: 530-541.

Askarzadeh, A. 2017. Electrical power generation by an optimized autonomous PV/wind/tidal/battery system. *IET Renewable. Power Generation*. 11: 152-164.

Azizpour, M., Ghalenoei, V., Afshar, M.H. and Solis, S.S. 2016. Optimal Operation of Hydropower Reservoir Systems Using Weed Optimization Algorithm. *Journal of Water Resources Management*. 30:3995-4009.

Beheshti, M., Heidari, A. and Saghaifan, B. 2019. Susceptibility of hydropower generation to climate change: Karun III Dam case study. *Journal of Water*. 11(5): 1025.

Blackshear, B., Crocker, T., Drucker, E., Filoon, J., Knelman, J. and Skiles, M. 2011. Hydropower Vulnerability and Climate Change, A Framework for Modeling the Future of Global Hydroelectric Resources. Middlebury College Environmental Studies Senior Seminar, Middlebury, VT, USA.

Draper, A.J. and Lund, J.R. 2004. Optimal hedging and carryover storage value. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130: 83-87.

Ehteram, M., Mousavi, S.F., Karami, H., Farzin, S., Emami, M., Othman, F.B., Amini, Z., Kisi, O. and El-Shafie, A. 2017. Fast convergence optimization model for single and multipurposes reservoirs using hybrid algorithm. *Advanced Engineering Informatics*. 32: 287-298.

Hatamkhani, A., Moridi, A. and Torabi Haghghi, A. 2025. An integrated approach for assessing the economic impact of climate change on hydropower systems. *Journal of Energy*. 319: 134990.

Ji, Y., Lei, X., Cai, S. and Wang, X. 2016. Hedging

ارائه می‌دهد. همچنین، سیاست‌های پوشش‌دهی چندگانه به‌عنوان رویه‌های عملیاتی در سیستم‌های مخزن برقابی توصیه می‌شود. در مجموع بر اساس نتایج حاصل در منطقه مورد مطالعه، دما افزایش و بارش و جریان ورودی کاهش خواهد یافت که این تغییرات می‌تواند باعث افزایش تبخیر و تعرق، کاهش منابع آبی، کاهش بارش‌های برقی، افزایش بارش‌های رگباری و سیل‌آسا و همچنین، کاهش دوره رشد محصولات کشاورزی و در نتیجه کاهش عملکرد محصول را در منطقه به دنبال داشته باشد. مجموع این شرایط می‌تواند شرایط اقلیمی منطقه را دچار تغییر کند. بنابراین لازم است برنامه‌ریزان مسئول در بخش‌های گوناگون، راهکارهای لازم برای سازگاری با شرایط جدید را اتخاذ نمایند. همچنین، با توجه به این شواهد به نظر می‌رسد این حوضه در آینده با کم شدن آورد روبرو خواهد شد و این نتایج بر لزوم بازنگری و تغییر استراتژی‌های مدیریت منابع آب در جهت سازگاری با وقوع تغییر اقلیم تأکید می‌نماید. بنابراین، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و طول عمر مفید سد برای مدیریت منابع آب ضروری است. از نتایج این پژوهش می‌توان در تحلیل خشک‌سالی‌ها، کنترل سیلاب‌های مخرب، تخصیص منابع آب سطحی، زیرزمینی، بالا بردن تنظیم آب برای مصارف شرب و کشاورزی و مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه کاربردی خواهد بود. همچنین، سد دز وظیفه کنترل نوسانات برق کشور را بر عهده دارد لذا در پژوهش‌های بعدی می‌توان نوسانات برق سد مطالعاتی را به‌عنوان یک تابع هدف در نظر گرفت و آن را تحت سناریوهای مختلف و در دوره‌های زمانی مختلف تحلیل و بررسی کرد.

## منابع

احمدیان‌فر، ا. و ادیب، آ. ۱۳۹۴. بهینه‌سازی بهره‌برداری انرژی برقابی از سدها با استفاده از روش ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: سد دز). نشریه علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی). ۲۸(۳).

سلطانی‌نژاد، ک.، ثمره‌هاشمی، م.، شاه‌رخی، آ. و ذونعت کرمانی، م. ۱۴۰۳. بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه‌های برق آبی حوضه کارون به وسیله الگوریتم کاوش باکتری و الگوریتم ژنتیک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۴(۵۶).

محمدی، پ.، ملکیان، آ.، سلاجقه، ع.، نوری، م. و رفیعی، ح. ۱۴۰۳. شبیه‌سازی سناریوهای تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز. ۴(۳): ۵۱-۳۰.

نوروز ولاشدی، ر.، برازجان‌پور احمدی، ص.، بهرامی پیچاقچی، ح. و مظلوم باباناری، س. ۱۴۰۳. پیش‌نگری تغییرات

- Earth, Parts A/B/C, 138,103887.
- Rittima, A. 2009. Hedging policy for reservoir system operation: A case study of Mun Bon and Lam Chae reservoirs. *Journal of Kasetsart. (Natural Science)*. 43, 833–842.
- Sangiorgio, M. and Guariso, G. 2018. NN-based implicit stochastic optimization of multi-reservoir systems management. *Journal of Water*. 10: 303.
- Sims, R. E. 2004. Renewable energy: a response to climate change. *Solar energy*. 76(1-3): 9-17.
- Suman, A. 2021. Role of renewable energy technologies in climate change adaptation and mitigation: A brief review from Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 151: 111524.
- Tayebian, A. Ali, T.A.M. Ghazali, A.H. and Malek, M. 2016. Optimization of exclusive release policies for hydropower reservoir operation by using genetic algorithm. *Water Resources Management*. 30: 1203–1216.
- Zapata, V., Gernaat, D. E., Yalew, S. G., da Silva, S. R. S., Iyer, G., Hejazi, M. and Van Vuuren, D. P. 2022. Climate change impacts on the energy system: a model comparison. *Environmental Research Letters*. 17(3): 034036.
- Zhao, T., Cai, X. and Yang, D. 2011. Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Adv. Water Resources*. 34: 495–504.
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O. and Chu, X. 2019. Effects of the uncertainties of climate change on the performance of hydropower systems. *Journal of Water and Climate Change*. 10(3): 591-609.
- rules for water supply reservoir based on the model of simulation and optimization. *Journal of Water*. 8: 249.
- Karamouz, M., Goharian, E. and Nazif, S. 2013. Reliability assessment of the water supply systems under uncertain future extreme climate conditions. *Journal of Earth Interactions*. 17(20):1–27.
- Karimi Alkoochi, F., Ghorbanizadeh Kharrazi, G., Soleimani Babarsad, M., Jazayeri Moghaddas, S.M. and Khoshnavaz Koumleh, S. 2025. Studying the impact of climate change on hydroelectric energy production (Case study: Karun 4 Dam). *Journal of Water and Environmental Sciences Research Center, Shoushtar branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran*. 11(4): 1-115.
- Nobahari, H. and Bighashdel, A. 2017. MOCSA: A Multi-Objective Crow Search Algorithm for Multi-Objective Optimization. 2<sup>nd</sup> Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC2017), Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, 2017.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C. and Kothari, S. 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(3): 1513-1524.
- Panwar, N. L., Siva Reddy, V., Ranjan, K. R., Seepana, M. M. and Totlani, P. 2013. Sustainable development with renewable energy resources: a review. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*. 10(4):163-184.
- Ranjan, R., Goswami, A., Ojha, C.S.P., Jain, S. and Kumar Singh, P. 2025. Climate change impact assessment on the river discharge of the upper Ganga Subbasin. *Physics and Chemistry of the*

## Simulation and Optimization of Multi-Point Hedging Policies for the Operation of the Dez Dam Hydroelectric Reservoir System

F. Khadempour<sup>1</sup>, M. Amirabadizadeh<sup>2\*</sup>, Y. Falamarzi<sup>3</sup>

Received: Jul.08, 2025

Accepted: Oct.05, 2025

### Abstract

Hydroelectric power plants are one of the renewable energy sources that have better efficiency compared to other renewable resources. One of the appropriate planning methods to maximize efficiency in these power plants is the use of modern optimization methods, such as metaheuristic algorithms. The aim of this study is to simulate and optimize a model based on single-point and two-point risk coverage rules in order to evaluate the efficiency of these rules and policies in operating the reservoir system of the Dez hydroelectric dam and maximize its total electricity generation over the period 1991–2020 on a monthly scale, using the M2O-CSA algorithm for both the baseline and future periods. According to the results obtained from the M2O-CSA algorithm, the electricity generation output for the future period decreased compared to the average output in the baseline period under both scenarios with single-point coverage for most months, whereas both scenarios under two-point coverage showed an increase in most months. Furthermore, by analyzing the total electricity generation output during the optimization period to find the best solution (maximum power production), it was found that the maximum electricity generation compared to the baseline period can be achieved using 2PHP, with a peak value of 11051.64 MW in April and the lowest value of 6029.45 MW in November under the SSP585 scenario. Therefore, based on the given results, 2PHP and 1PHP provide the maximum production capacity, respectively. Additionally, the maximum storage was generated with a value of 5282 Mm<sup>3</sup> per cubic meter for the statistical study period for the Dez dam. Overall, it can be concluded that the 2PHP policy is the most efficient and suitable policy among the tested optimization policies, providing the highest electricity production output and increase in power generation for the Dez dam.

**Keywords:** Hydropower Plants, M2O-CSA Algorithm, Optimization, Reservoir System Operation, Risk Coverage Policies

1- PhD student in Water Sciences and Engineering - Water Resources, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Assistant Professor, Climate Modeling and Forecasting Research Group, Climatology Research Institute, Mashhad, Iran

(\* - Corresponding Author Email: m Amirabadizadeh@birjand.ac.ir)