

شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدل‌های بهره‌برداری کنترل سیلاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک

فرهاد صالحی^۱، محسن نجارچی^{۲*}، سید محمد مهدی نجفی زاده^۳، محمد میرحسینی هژاوه^۴

- ۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران
 - ۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران
- m-najarchi@iau-arak.ac.ir
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران
 - ۴- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

نظر به اینکه مدیریت بهینه مخازن و سرریزها در زمان وقوع سیلاب به‌عنوان یک روش غیرسازهای برای حفظ منابع آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد، به همین منظور در این تحقیق یک فرمان بهره‌برداری چندمرحله‌ای برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز در سدها تحت دو رویکرد مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. از ویژگی‌های مثبت مدل‌ها عدم نیاز به پیش‌بینی کامل هیدروگراف سیل است. این ویژگی دامنه کاربری مدل‌های پیشنهادی را بسیار وسیع و عملیاتی می‌کند. سپس بهینه‌سازی ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها تحت هر دو رویکرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. جهت صحت عملکرد مدل‌های بهینه پیشنهادی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، مطالعه موردی سد مخزنی کرخه در دنیای واقعی به کار گرفته شد. نتایج حاصله نشان داد که تنها هر دو مدل جواب‌های بهتری نسبت به مدل‌های بهره‌برداری پیشین ارائه می‌دهند؛ بلکه در رویکرد دوم، بیک سیلاب خروجی دارای درجه فروکش بیشتری نسبت به رویکرد اول می‌باشد و علاوه بر این، امکان ذخیره بیشتری از حجم سیلاب ورودی به مخزن و کاهش بیشتر خسارات سیلاب در پایین دست سد توسط هر دو رویکرد فراهم می‌شود.

واژگان کلیدی: مدیریت بهینه مخازن؛ سیلاب؛ خسارت؛ شبیه‌سازی؛ بهینه‌سازی؛ الگوریتم ژنتیک

از مهم‌ترین مسائل مدیریتی در سدها، عملکرد دریاچه‌های سرریز در هنگام وقوع سیلاب است. در این زمان، میزان جریان خروجی از مخزن باید به‌وسیله کنترل مناسب دریاچه‌های سرریز سازمان‌دهی شود. بایستی یادآور شد که میزان آب خروجی از سرریز به نوع روش کنترل بستگی دارد.

از طرفی از جمله اهداف احداث سد تأمین آب می‌باشد که به خاطر ارجح بودن این هدف معمولاً بودجه محدودی به عملیات کنترل سیلاب اختصاص خواهد یافت. در نتیجه مدیریت بهینه از دریاچه‌های سد در زمان وقوع سیلاب به‌عنوان یک روش غیر سازه‌ای اهمیت ویژه‌ای می‌یابد که با تکیه بر دستورالعمل‌های مدیریتی و اعمال سیاست‌های مناسب بهره‌برداری می‌توان خسارت سیلاب را تا حد زیادی کاهش داد. در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن قوانین مؤثر در بهره‌برداری از دریاچه‌ها در شرایط وقوع سیلاب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدل بهره‌برداری چندمرحله‌ای از سرریزهای دریاچه دار در دو سطح مختلف جهت کنترل سیلاب تهیه و ارائه شوند.

تاکنون مقالاتی در رابطه با طراحی بهینه سرریز سدها منتشر شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کار آقای کاریلو و همکارانش اشاره کرد که در آن با برآورد یک توزیع مناسب برای سیل ورودی به مخزن و یافتن رابطه‌ای میان ظرفیت سرریز و تابع خسارت ناشی از شکست آن، ابعاد بهینه سرریز محاسبه شده است. در آن تحقیق با استفاده از برنامه‌ریزی خطی سعی بر حداقل کردن هزینه اولیه ساخت سرریز به همراه هزینه احتمالی ناشی از شکست آن گردیده است (۴). بهینه‌سازی سرریز با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی موجود توسط آقای افشار و همکارانش انجام شده است. در این کار، عدم قطعیت‌های ناشی از تخمین بزرگی سیلاب با استفاده از تابع چگالی تخمین سیلاب و ارتباط میان ظرفیت سرریز و هزینه آن در

بهینه‌یابی هزینه سرریز لحاظ شده‌اند (۵). ابریشم‌چی و همکاران یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی سرریز با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی در تخمین بزرگی سیلاب و فرآیند روندیابی سیلاب توسعه داده و تکمیل نمودند. در آن تحقیق به دلیل غیر تحلیلی بودن تابع هدف، روش جستجوی مستقیم جهت پیدا نمودن ظرفیت و ابعاد بهینه سرریز مورد استفاده قرار گرفته است (۶).

در همین این زمینه سکاکیما و همکارانشان دادند که بهره‌برداری از سرریزهای دریاچه دار برای سیلاب‌های بزرگ باید به‌گونه‌ای باشد که نه ایمنی سد به خطر بیفتد و نه به پایین دست سد خسارت قابل ملاحظه‌ای وارد شود (۷). در زمینه بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز در زمان سیلابی اخیراً مجموعه‌ای از فرمان‌های بهره‌برداری با ترازهای مختلف در کشور ترکیه توسعه داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به کارهایی که توسط اکانال و همکارانشان انجام شد، اشاره کرد. این روش‌ها تحت عناوین سیاست‌های عملکرد چندمرحله‌ای ارائه شده‌اند (۸ و ۹). در مطالعه‌ای دیگر اکانال و همکاران برای کاهش خطاهای انسانی در هنگام رخداد سیلاب یک مدل روندیابی برای سرریزهای دریاچه‌دار ارائه کردند (۱۰). کارابوگا و همکاران با بهره‌گیری از رویکرد فازی یک فرمان بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز برای بهره‌برداری در زمان واقعی توسعه دادند (۱۱). همچنین، بجیس و کارابوگا، یک الگوریتم ارزیابی بر اساس رویکرد فازی برای دریاچه‌های سرریز مخازن سدها ارائه کردند (۱۲). تحقیق دیگری تحت عنوان ترکیب الگوریتم جستجوی ممنوعه و منطق فازی برای بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز در هنگام وقوع سیلاب توسط کارابوگا و همکاران پیشنهاد گردید (۱۳). در یک کار تحقیقاتی دیگر بابر و بولگوف یک تحلیل چندمنظوره از روش‌های بهره‌برداری مخزن در شرایط عدم قطعیت‌های مختلف هیدرولوژیکی پیشنهاد کردند (۱۴). در همین زمینه عملکرد سد دارای سرریز

دریچه‌ای با استفاده از روش ارزیابی حجمی (VEM) توسط وارد و همکاران شبیه‌سازی شده است (۱۵). دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ابزار قدرتمندی است که استفاده از روش‌های عددی و مدل‌های آشفتگی را برای شبیه‌سازی میدان‌های جریان پیچیده سه‌بعدی ممکن می‌سازد. این روش به تدریج به عنوان یک منبع داده مستقل و قابل اعتماد همراه با اندازه‌گیری‌های میدانی و مبتنی بر آزمایشگاه برای بسیاری از مطالعات در پدیده‌های هیدرولوژیکی و مکانیک سیالات پذیرفته شده است (۱۶ و ۱۷). اخیراً در یک کار تحقیقاتی دیگر، پیش‌بینی سیل ورودی بر اساس یک مدل هیدرولوژیکی توزیع شده برای مخزن بایپتزو در استان گوانگدونگ چین، توسط چن و همکاران توسعه داده است (۱۸).

نکته‌ای که از بررسی تحقیقات پیشین در این زمینه قابل تأمل می‌باشد، این است که می‌توان پیک سیلاب ورودی به مخزن را که مستقیماً از ایستگاه‌های اندازه‌گیری روی رودخانه در بالادست سد قابل اندازه‌گیری است، برداشت نمود و در مدل‌های شبیه‌سازی لحاظ کرد و اثرات آن را بر ذخیره بیشتر سیلاب در مخزن و کاهش بیشتر پیک سیلاب خروجی مشاهده کرد. نظر به مطالب ذکر شده از جمله بارزترین روش مدیریت بهره‌برداری از حجم کنترل سیلاب مخازن (روش‌های غیر سازه‌ای کنترل سیلاب) استفاده از حجم کنترل سیلاب مخازن با به‌کارگیری سیاستی بهینه برای آزادسازی سیلاب از دریچه‌های سرریز است. در همین راستا در سال ۱۹۷۳ مطالعه‌ای توسط جردن در زمینه قوانین بهره‌برداری برای کنترل سیل با استفاده از حجم مخزن، بر روی سدهای بزرگ صورت پذیرفته است (۱۹). در زمینه بهره‌برداری از مخزن در زمان سیلابی می‌توان به کارهایی که توسط سینسکه و همکاران صورت پذیرفت؛ اشاره نمود. در تهیه مدل فوق از هیدروگراف مثلثی استفاده شده بود. در این روش نیز موضوع بهینگی مطرح نبوده و تنها بر اساس روش‌های تجربی استوار است (۲۰). در روش‌های تحت عنوان

سیاست‌های عملکرد چندمرحله‌ای از دریچه‌های سرریز که تاکنون ارائه شده‌اند، عمدتاً موضوع بهینگی مطرح نبوده است. از سوی دیگر، نیاز به یک فرمان بهره‌برداری مناسب جهت مدیریت بهینه دریچه‌های سرریز به عنوان یک خلأ تحقیقاتی به‌ویژه در مطالعات موردی سدهای کشورمان احساس می‌شود. از این رو، در ارتباط با مانور دریچه‌ها و مدیریت عملکرد مخازن، می‌توان از روش‌های ترکیبی بهینه‌سازی بکار گرفته شده در سال‌های اخیر مانند منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک، اقدام به بهره‌برداری بهینه از دریچه‌های سرریز در مواقع سیلابی نمود؛ بنابراین، از جمله نوآوری‌های اصلی این کار تحقیقاتی بهینه کردن ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها، مدیریت سیلاب و کاهش بیشتر دبی پیک سیلاب خروجی، نسبت به سایر روش‌های معمول، است.

مواد و روش‌ها

در این قسمت یک مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای از دریچه‌های سرریز با در نظر گرفتن تمامی سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف، تحت دو رویکرد مختلف پیشنهاد و مورد آزمون قرار گرفت. مدل سطح اول تراز آب مشاهده شده در مخزن را به عنوان ورودی خروجی مبنا قرار می‌دهد. در حالی که مدل سطح دوم علاوه بر تراز مخزن از اطلاعات مربوط به پیک هیدروگراف نیز استفاده خواهد کرد. این مدل‌ها جهت کنترل سیلاب و استفاده بهینه از حجم کنترل سیلاب برای سدهایی که سرریز آن‌ها از نوع دریچه‌دار بوده پیشنهاد شده‌اند. از ویژگی‌های مثبت این مدل‌های بهره‌برداری این است که بدون نیاز به پیش‌بینی سیلاب برای تمامی سیلاب‌های ممکن قابل استفاده است. هنگامی که آب به ارتفاع خاصی می‌رسد بازشدگی دریچه‌ها به میزان لازم انجام شده و مقدار دبی مورد نظر رهاسازی می‌شود. وقتی سیلاب با دوره بازگشت معین در مخزن روندیابی می‌گردد در هر کدام از بازوهای صعودی و نزولی هیدروگراف خروجی، بسته به حجم سیلاب ورودی تا ده

به لحاظ ریاضی می‌توان ساختار مدل را به شکل زیر روابط (۲) تا (۱۱) بیان کرد.

$$Q_{out} = 0, \text{ if } H_b < RWL \leq H_{cr}^1 \quad (2)$$

$$Q_{out} = (d_2), \text{ if } H_{cr}^1 < RWL \leq H_{cr}^2 \quad (3)$$

$$Q_{out} = (d_3), \text{ if } H_{cr}^2 < RWL \leq H_{cr}^3 \quad (4)$$

$$Q_{out} = (d_4), \text{ if } H_{cr}^3 < RWL \leq H_{cr}^4 \quad (5)$$

$$Q_{out} = (d_5), \text{ if } H_{cr}^4 < RWL \leq H_{cr}^5 \quad (6)$$

$$Q_{out} = (d_6), \text{ if } H_{cr}^5 < RWL \leq H_{cr}^6 \quad (7)$$

$$Q_{out} = (d_7), \text{ if } H_{cr}^6 < RWL \leq H_{cr}^7 \quad (8)$$

$$Q_{out} = (d_8), \text{ if } H_{cr}^7 < RWL \leq H_{cr}^8 \quad (9)$$

$$Q_{out} = (d_9), \text{ if } H_{cr}^8 < RWL \leq H_{cr}^9 \quad (10)$$

$$Q_{out} = (d_{10}) \text{ or } d_{fullyopen}, \text{ if}$$

$$H_{cr}^9 < RWL \leq H_{cr}^{10} \quad (11)$$

که در آن:

$RWL =$ تراز آب مخزن

$H_b =$ تراز آستانه سرریز

$H_{cr}^{1-9} =$ ترازهای بحرانی بکار رفته در محدود حجم

کنترل

$H_{cr}^{10} =$ حداکثر تراز مخزن در حالت سیلابی (با حفظ

رعایت ایمنی سد)

$d_{1-10} =$ میزان بازشدگی دریاچه‌ها در هر مرحله

$Q_{out} =$ جریان خروجی از سرریز در هر گام زمانی

$d_{fullyopen} =$ جریان خروجی با دریاچه‌های کاملاً باز

درواقع این ده تراز کنترلی یا بحرانی به‌گونه‌ای

تعریف شده‌اند که قابل تعمیم برای هر سیلاب ورودی به

مخزن هستند. اگر تراز آب مخزن به ترازهای بحرانی

خیلی بالا مثلاً ترازهای بحرانی H_{cr}^9 و H_{cr}^{10} برسد، نشان

از حجم عظیم سیلاب ورودی به مخزن است که در این

حالت به خاطر حفظ ایمنی سد می‌توان از تمام ظرفیت

سرریز جهت تخلیه سیلاب موردنظر بهره جست. درواقع

پرش ناگهانی قابل مشاهده است که در فاصله زمانی بین این پرش‌ها دبی‌های خروجی تقریباً به صورت افزایش یکنواخت تخلیه می‌شوند.

در سطح مخزن، سطوحی به عنوان تراز یا ارتفاعات بحرانی تعیین می‌شود (H_{cr}) که با مشاهده سطح مخزن و رسیدن آب به هر یک از این سطوح، در مورد میزان بازشدگی دریاچه‌ها در سطح موردنظر تصمیم‌گیری می‌شود.

الف) توسعه مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای از دریاچه‌های سرریز

این سیاست برای انتخاب سطوح بحرانی و میزان بازشدگی دریاچه‌ها بیان می‌دارد که هر سیلاب متناسب با حجم سیلابش، می‌تواند قسمتی از ظرفیت مهار سیل در مخزن را اشغال کند. مثلاً سیلاب معادل 10% PMF، یک‌دهم ظرفیت مهار سیل در مخزن را اشغال می‌کند، سیلاب معادل 20% PMF دودهم، سیلاب معادل 30% PMF سه‌دهم، ... و سیلاب PMF همه ظرفیت مهار سیلاب در مخزن را اشغال می‌کند.

در این روش H_b بیانگر تراز آستانه سرریز و H_{cr}^{10} معرف حداکثر تراز مخزن در حالت سیلابی می‌باشد. بنابراین حجم کنترل سیلاب شامل مقدار حجم آب قابل ذخیره بین تراز آستانه سرریز و حداکثر تراز آب که برای حالت سیلاب در نظر گرفته شده است، می‌باشد. برای تعیین ترازهای بحرانی به کمک تعریف رابطه زیر می‌توان محدوده حجم کنترل سیلاب را به ده حجم مساوی تقسیم کرده و تمامی ترازهای بحرانی را از این طریق محاسبه کرد (۹).

$$S(j) = S_{cr}(j-1) + [S_{ult} - S_{cr}(j-1)] / [10 - (j-1)] \quad (1)$$

که در آن:

$S_{ult} =$ حجم مخزن متناظر با تراز آب حداکثر یا H_{cr}^{10} می‌باشد.

$S_{cr}(j) =$ حجم مخزن متناظر با تراز بحرانی $H_{cr}(j)$ می‌باشد.

$H_{cr}(j) =$ حداکثر ارتفاع سطح آب در هر مرحله می‌باشد.

$S(j) =$ حجم مخزن متناظر با تغییرات سطح آب

$H =$ اختلاف بین حداکثر تراز آب و تراز آستانه سرریز (متر)

$d =$ میزان بازشدگی دریچه‌ها (متر)

لازم به ذکر است رابطه بین ارتفاع سطح آب و حجم ذخیره در مخزن سد یا همان رابطه حجم-تراز مخزن، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی مخزن به دست می‌آید که عموماً برای سدها در مرحله طراحی استخراج و در طی زمان‌های بهره‌برداری با توجه به حجم رسوبات انباشته‌شده و یا احتمالات توده‌ای دیوارهای اطراف سد، به روز می‌گردد.

ب) میزان بازشدگی دریچه‌ها در هر مرحله

به‌طور کلی به دلیل اینکه احتمال رخداد سیلاب با دوره بازگشت‌های پایین‌تر، بیشتر است، میزان بازشدگی تدریجی دریچه‌ها در گام‌های اولیه (ترازهای بحرانی اولیه) نسبت به گام‌های بالاتر (ترازهای بحرانی بالاتر) کمتر خواهد بود تا بتوان حجم بیشتری از سیلاب‌های ورودی را ذخیره کرد. تراز آب نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان بازشدگی دریچه‌ها (d) در هر مرحله دارد. هنگام وقوع سیلاب وقتی تراز آب مخزن بالا می‌آید برای تعیین میزان بازشدگی دریچه‌ها (d) و صدور فرمان دبی تخلیه از مخزن لازم است که تراز مخزن با ترازهای بحرانی قیاس شود. سقف میزان جریان خروجی از دریچه‌های سرریز متناسب با درصد بازشدگی دریچه‌ها برای هر مرحله قابل تصمیم‌گیری است.

ج) بهینه‌سازی

در این قسمت جهت کنترل بهینه سیلاب ورودی و همچنین کارایی بهتر مدل توسعه داده‌شده، ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها در این مدل ده مرحله‌ای از دریچه‌های سرریز، تحت دو رویکرد الف: تنها با مشاهده تراز آب مخزن ب: در نظر گرفتن هم‌زمان تراز آب مخزن و پیک جریان ورودی به مخزن، بهینه‌سازی خواهند شد. همچنین عملکرد مدل‌های بهینه‌شده ده مرحله‌ای سطح اول و دوم در بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز سد کرخه مورد آزمون قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل‌ها در ادامه نیز

این عمل به خاطر جلوگیری از روگذری سیلاب از روی بدنه سد اعمال می‌شود زیرا متناسب با معیارهای در نظر گرفته‌شده، ایمنی سد مهم‌ترین عامل است.

جهت مدل کردن مسئله موردنظر از روش روندیابی مخزن-تراز در مخازن استفاده‌شده است که اساس روش روندیابی مخزن-تراز برای محاسبه هیدروگراف خروجی از یک مخزن با در دست داشتن جریان ورودی در هر لحظه، بر پایه رابطه معلوم بین ذخیره - خروجی است. در ضمن معادله پیوستگی اساس تمام روش‌های روندیابی ذخیره‌ای است که در آن با داشتن تغییرات دبی ورودی نسبت به زمان و داشتن اطلاعاتی در مورد تغییرات حجم، می‌توانیم تغییرات دبی خروجی را نسبت به زمان به دست آوریم.

روش روندیابی مخزن تراز به کار گرفته شده به قرار زیر است.

$$\frac{dS}{dT} = I - O \quad (12)$$

که در آن:

$I =$ هیدروگراف یا جریان ورودی به سیستم (مترمکعب بر ثانیه)

$O =$ هیدروگراف یا جریان خروجی از سیستم (مترمکعب بر ثانیه)

$$\frac{dS}{dT} = \text{نرخ تغییرات ذخیره سیستم (کعب بر ثانیه)}$$

با توجه به روابط هیدرولیکی ارائه‌شده برای سرریزها و تأسیسات خروجی از سدها رابطه هیدرولیکی که ارتباط بین ارتفاع آب و دبی را برای دریچه‌ها یا سرریزهای دریچه دار بیان می‌کند به صورت رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$Q = \frac{2}{3} * (\sqrt{2g}) * C * L * [H^{3/2} - (H - d)^{3/2}] \quad (13)$$

که در آن:

$Q =$ دبی عبوری از سرریز (مترمکعب بر ثانیه)

$g =$ شتاب گرانش (مترمربع بر ثانیه)

$C =$ ضریب عبور دهی یا ضریب تخلیه سرریز (مترمکعب بر ثانیه)

$L =$ عرض سرریز (متر)

ارائه شده‌اند.

۰/۰۳	۰/۱۰۹۶	۰/۱۴۰۶
۰/۰۱	۰/۰۶۳۲	۰/۰۹۷۵
۰/۰۰۹	۰/۰۶۰۰	۰/۰۹۴۱
۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۸۹	۰/۰۴۳۶
۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۶۰	۰/۰۲۰۲

۱- متغیرهای تصمیم

از آنجایی که ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها نقش اساسی در تعیین میزان جریان خروجی از دریچه‌های سرریز را ایفا می‌کنند در این مطالعه به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند.

۲- تابع هدف

با توجه به ماهیت تصادفی سیلاب در حال وقوع، برای حداقل سازی خسارات باید ارزش انتظاری یا امید ریاضی خسارات را محاسبه و حداقل کرد. ارزش انتظاری خسارات را می‌توان با استفاده از امید ریاضی یا مجموع ریسک‌های تصمیمات محاسبه نمود. چنانچه خواهیم داشت:

$$ED = \sum P_i \times f(Q_i) \quad (14)$$

که در آن:

$f(Q)$ = میزان خسارت که تابعی از دبی خروجی است.

P = احتمال وقوع سیلاب است.

بنابراین تابع هدف به شکل زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{Min}(ED) = w_1 Q'_1(\text{peak}) + w_2 Q'_2(\text{peak}) + \dots + w_k Q'_k(\text{peak}) + P \times \sum (\text{Overtopping Hieght})_k$$

$$\sum w_i = 1 \quad (15)$$

که در آن:

که در آن Q'_k بیانگر پیک سیلاب‌های خروجی متناظر با دوره بازگشت‌های ورودی مربوطه است، P تابع جریمه و w_i ضرایب وزنی تابع هدف بر اساس احتمال رخداد هر سیلاب خواهد بود.

لازم به ذکر است که در رابطه (۱۵) ضرایب وزنی تابع هدف بر اساس احتمال وقوع سیلاب‌ها در سه حالت ($n=1,2,3$) و مطابق با جدول ۱ بکار گرفته شده‌اند.

جدول ۱- ضرایب وزنی تابع هدف بر اساس

احتمال وقوع سیلاب در سه حالت متفاوت		
(n=1)	(n=2)	(n=3)
۰/۹	۰/۶۰۰۴	۰/۴۳۶۹
۰/۰۵	۰/۱۴۱۵	۰/۱۶۶۷

۳- شرایط و محدودیت‌ها

هیدروگراف ورودی و ذخیره مخزن به‌عنوان متغیرهای ورودی سیستم هستند. همچنین حداکثر و حداقل ارتفاع سطح آب و دیگر شرایط مخزن به‌عنوان قیودات مسئله شناخته می‌شوند. قیده‌های بهره‌برداری از سرریزهای دریچه‌دار به‌صورت زیر تعریف می‌شود که با توجه به آن مقدار تابع هدف رابطه (۱۵)، کمینه می‌شود.

$$\begin{cases} \text{Overtopping Hieght} = 0, \text{ if } RWL < IMWL \\ \text{Overtopping Hieght} = RWL - \\ IMWL, \text{ if } RWL > \text{ or } = IMWL \end{cases} \quad (16)$$

که در آن:

P = پناستی یا تابع جریمه

$IMWL$ = حداکثر تراز آب در اثر ورود سیل طرح به

مخزن (رعایت ایمنی سد)

$Q'_k(\text{peak})$ = پیک سیلاب‌های خروجی متناظر با دوره

بازگشت‌های ورودی مربوطه است.

MWL = بیشترین تراز آب بعد از ورود سیلاب‌های با

دوره بازگشت‌های متفاوت به مخزن در صورتیکه

دریچه‌های قطاعی بر روی سرریز اصلی قرار گرفته

باشند. لازم به ذکر است MWL ، با استفاده از فرآیند

روندیابی برای هر سیلاب به دست می‌آید.

اکنون پس از فرمول‌بندی تابع هدف، بایستی یک

روش بهینه‌سازی مناسب با مدل شبیه‌ساز ادغام گردد تا

ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی بهینه دریچه‌های

سرریز تعیین گردد. با توجه به این که مشتق‌گیری از این

تابع هدف بسیار پیچیده و چه بسا غیرممکن باشد،

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک بر پایه

گرادیان امکان‌پذیر نمی‌باشد. از سوی دیگر، روش‌های

بهینه‌سازی جستجوی غیرمستقیم نیز معمولاً از نرخ

همگرایی پایینی برخوردار هستند و مستلزم اجرای تعداد

قابل توجهی ارزیابی تابع هدف هستند که منجر به افزایش هزینه محاسباتی می‌گردد. علاوه بر این، کارایی این روش‌ها به شدت به ماهیت هر مسئله بهینه‌سازی بستگی دارد. افزون بر این، احتمال به تله افتادن این الگوریتم‌ها در فضاهای بهینه محلی وجود دارد. از این رو در این مطالعه از یک الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا به عنوان بهینه‌ساز استفاده می‌شود. عملگرهای انتخاب و تزویج، به ترتیب، از نوع چرخ رولت و دونقطه‌ای هستند. برای جلوگیری از پدیده روگذری بر روی بدنه سد از روش جریمه استفاده شده است. در این روش مسئله بهینه‌سازی مقید به یک مسئله نامقید تبدیل می‌شود.

۴- ساختار مفهومی مدل سطح اول

در این رویکرد از مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای پیشنهادی سطح اول به عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده شده است. در این مدل بهره‌برداری نحوه بازشدگی دریچه‌ها تنها بر اساس تراز مخزن تعیین می‌شود و جهت مدل کردن مسئله موردنظر از روش روندیابی مخزن - تراز در مخازن استفاده شده است. مدل سطح اول یا بهره‌برداری تنها با مشاهده تراز آب مخزن معادل است با اعلام تراز آب در مخزن (از طریق مشاهده عینی) و این تنها اطلاعاتی است که مدل در مرحله بهره‌برداری در این حالت نیاز دارد. به عبارتی دیگر، این سیاست بر این واقعیت بنا شده که هیچ‌گونه آگاهی، از قبیل شکل هیدروگراف، پیک سیلاب و... نسبت به سیلاب در شرف وقوع نداریم که این موضوع بیانگر بلادرنگ بودن سیاست است در این حالت تابع هدف از نوع وزن‌دار بر اساس پیک سیلاب‌های خروجی متناظر با دوره بازگشت‌های ورودی مربوطه از دریچه‌های قطاعی سرریز و جهت کاهش میزان خسارت انتظاری اعمال شده است رابطه (۱۴). همچنین تابع جریمه نیز برای جلوگیری از پدیده روگذری مطابق رابطه (۱۵) در نظر گرفته شده است.

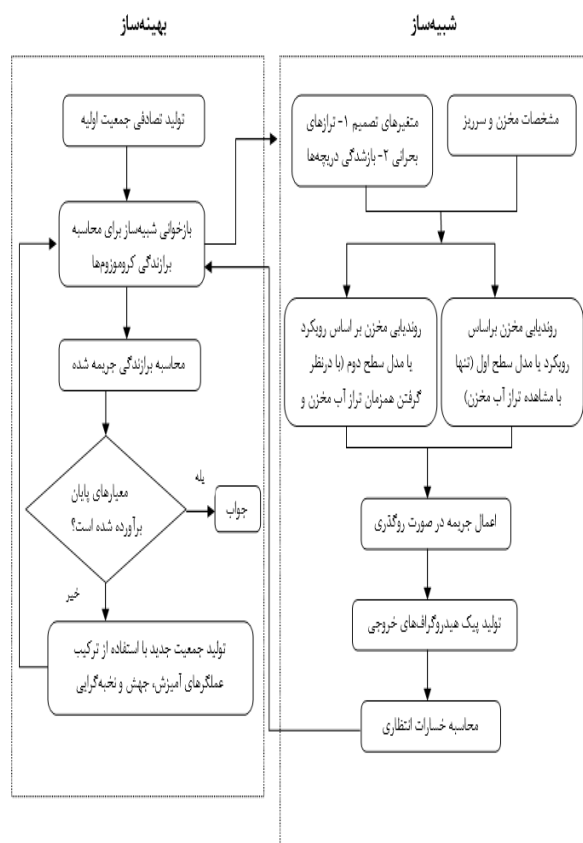
در این رویکرد متغیرهای تصمیم‌گیری ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها خواهند بود که به کمک الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا بهینه خواهند شد.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره گردید الگوریتم ژنتیک روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید یا نامقید است که مبنای آن بر اساس انتخاب طبیعی (روندی که تکامل بیولوژیکی را اداره می‌کند) می‌باشد. در الگوریتم ژنتیک متناوباً جمعیتی از افراد تولید می‌شود که هر فرد به‌منزله یک جواب برای مسئله موردنظر تلقی می‌شود. در هر مرحله، الگوریتم ژنتیک تعدادی از افراد موجود در جمعیت فعلی را به صورت تصادفی به عنوان والدین انتخاب کرده و از آن‌ها برای به دست آوردن افراد جمعیت بعدی استفاده می‌کند. بر اساس تولید موفق نسل‌های بعدی، جمعیت رفته‌رفته به وضعیت بهینه سوق پیدا خواهد کرد. در روند ایجاد جمعیت بعدی، تعدادی از افراد به صورت جهش‌یافته در جمعیت جدید تعریف می‌شوند که در مورد توابع هدف به شکل شکسته و با تغییرات غیرقابل پیش‌بینی، چنین جهش‌هایی می‌تواند جهت رسیدن به نقطه بهینه تابع هدف بسیار مفید باشد. در این حالت یک الگوریتم ژنتیک با عملگر تزویج دونقطه‌ای و عملگر انتخاب نمونه‌برداری به روش چرخ رولت ارائه شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل ده مرحله‌ای سطح اول در ادامه آورده شده است.

۵- ساختار مفهومی مدل سطح دوم

در این حالت نیز از مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای پیشنهادی (مدل سطح دوم) به عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده شده است. نکته اساسی در مدل سطح دوم؛ این است که ضمن رؤیت تراز مخزن، از داده‌های مربوط به پیک سیلاب در نزدیک‌ترین ایستگاه بالادست نیز استفاده می‌شود. این داده تکمیلی فقط مربوط به گذر از شاخه صعودی و شروع شاخه نزولی هیدروگراف می‌باشد. لذا کافی است که ایستگاه هیدرومتری بالادست عبور پیک سیلاب را اعلام نماید. از این رو این مدل به بهره‌بردار اجازه می‌دهد تا با اطلاع از وقوع پیک هیدروگراف و مقایسه تراز مخزن با ترازهای از پیش محاسبه‌شده توسط مدل، تصمیم مناسب را برای میزان رهاسازی سیلاب از دریچه‌ها اتخاذ نماید. در این حالت

نیز تابع هدف وزن دار بر اساس رابطه (۱۵) اعمال شده است. تابع جریمه نیز برای جلوگیری از پدیده روگذری در نظر شده است. نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز به مدل بهینه‌ساز منتقل شده و هزینه خسارات انتظاری بر طبق رابطه (۱۴) و (۱۵) برای هر کدام از رویکردها به دست می‌آید. شکل ۱ یک فلوچارت که اندرکنش میان اجزای گوناگون مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی توسعه‌یافته را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- فلوچارت مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بر پایه الگوریتم ژنتیک سرریزهای دریاچه‌دار

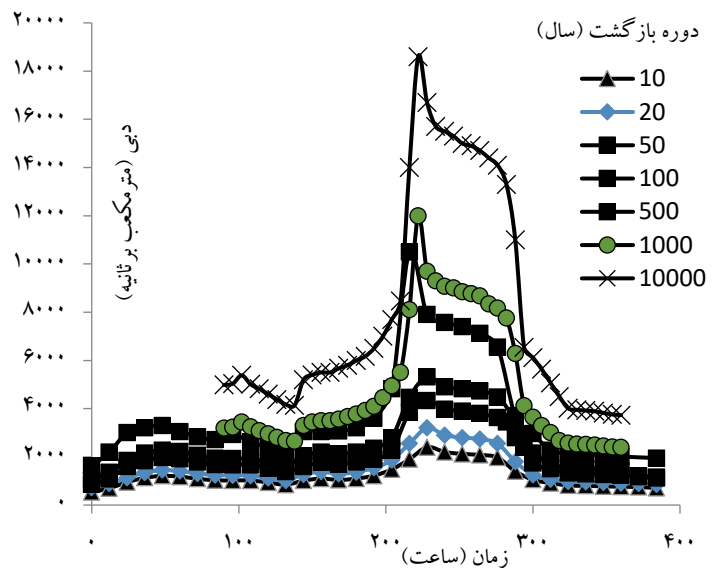
۶- به کارگیری مطالعه موردی سد مخزنی کرخه

در این قسمت مدل‌های شبیه‌ساز- بهینه‌ساز توسعه‌یافته در بخش قبل به یک مطالعه موردی اعمال می‌شوند تا عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. به همین منظور سد کرخه به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده تا مدل‌های پیشنهادی بر روی آن اجرا و نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار بگیرد.

سد مخزنی کرخه در ۲۵ کیلومتری غرب اندیمشک و در ۱۶۰ کیلومتری شمال اهواز بر روی رودخانه کرخه واقع شده است. این سد از نوع سد خاکی با هسته رسی است و رقوم تاج آن نسبت به سطح آزاد دریاها ۲۳۴ متر می‌باشد. بدین ترتیب ارتفاع سد نسبت به کف رودخانه ۱۲۴ متر و از پی ۱۲۷ متر می‌باشد. حجم مخزن در رقوم نرمال (رقوم ۲۲۰) معادل ۵/۳ میلیارد مترمکعب و سطح دریاچه در این تراز بیش از ۱۶۲ کیلومترمربع است. تراز حداقل برای مقاصد کشاورزی ۱۶۰ و تراز آبگیر نیروگاه ۱۸۵ می‌باشد.

سرریز سد کرخه، در جناح راست مخزن واقع شده است. این سرریز از نوع شوت دریاچه‌دار و مجهز به شش دریاچه قطاعی با ابعاد ۱۸×۱۵ متر می‌باشد. رقوم تاج سرریز ۲۰۹ متر بالاتر از سطح دریا و رقوم کف کانال تقرب سرریز ۲۰۱ متر بالاتر از سطح دریا است. عرض کف کانال تقرب حدود ۱۶۰ متر و عرض پایه‌های میانی معادل ۴ متر می‌باشد. مقدار بازگشایی دریاچه‌ها به وسیله فاصله عمودی لبه پایینی دریاچه تا رقوم تاج سرریز (تراز ۲۰۹ متر) تعریف شده است در پایانه سرریز نیز یک حوضچه آرامش از نوع تیپ USBRI در رقوم ۹۵ متر از سطح دریا طراحی گردیده است (۶).

در شکل ۲ می‌توان هیدروگراف‌های با دوره بازگشت مختلف سد کرخه را مشاهده کرد.



شکل ۲- هیدروگراف سیلاب‌های ورودی با دوره بازگشت مختلف - سد کرخه (۲).

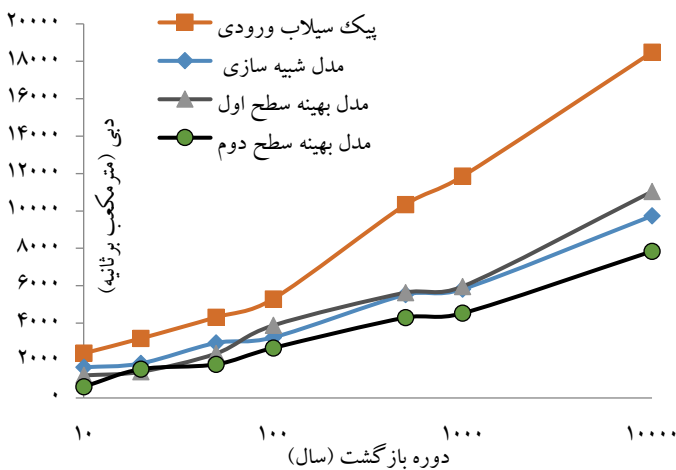
شکل و پیک هیدروگراف خروجی از سرریز می‌تواند بیانگر خسارات وارده احتمالی به پایین دست مخزن باشد. در ادامه با توجه به هیدروگراف‌های ورودی و وضعیت مخزن در هنگام وقوع سیلاب و همچنین رابطه منحنی آبگذری سرریز سد کرخه، وضعیت مناسب در تخلیه سیل از طریق سرریز (با توجه به عملکرد دریچه‌ها) به نحوی که پیک هیدروگراف خروجی به حداقل ممکن کاهش داده شود، مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

هیدروگراف ورودی و ذخیره مخزن به‌عنوان متغیرهای ورودی سیستم هستند که برای سد کرخه از صفر تا ۱۱۸۴۸۰ مترمکعب بر ثانیه و ذخیره مخزن از صفر تا ۸/۲ میلیارد مترمکعب خواهند بود. در مدل مرحله‌ای شبیه‌سازی بکار گرفته‌شده برای مطالعه موردی سد کرخه سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله نقش سیلاب با دوره بازگشت حداکثر را دارد. در ادامه نتایج مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در حالت (n=3) برای سد

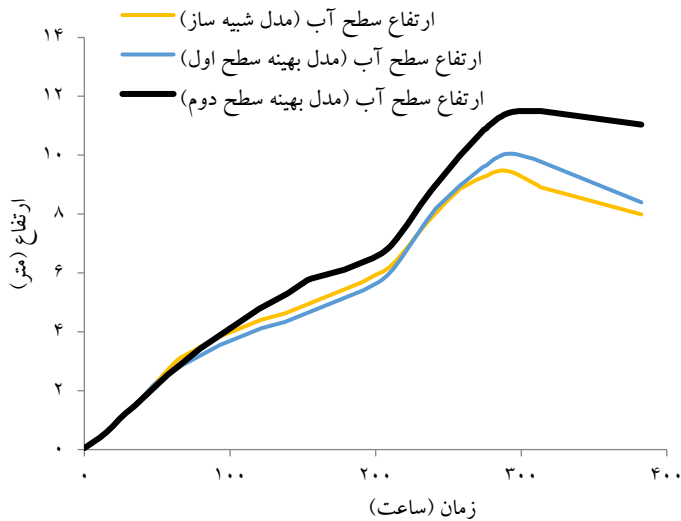
کرخه به‌صورت عددی در جداولی آورده شده است. سپس تجزیه و تحلیل لازم بر روی آن‌ها صورت گرفته است.

شکل ۳ پیک خروجی سیلاب با دوره بازگشت‌های متفاوت برای تعداد تکرار ۱۰۰ و اندازه جمعیت ۸۰ را بر اساس جداول ۴ تا ۶ نشان می‌دهد. به‌وضوح دیده می‌شود که جواب‌های به‌دست‌آمده با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک (مدل‌های سطح اول و دوم) و بخصوص برای سیلاب با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سال بهتر از مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای شبیه‌سازی هستند.

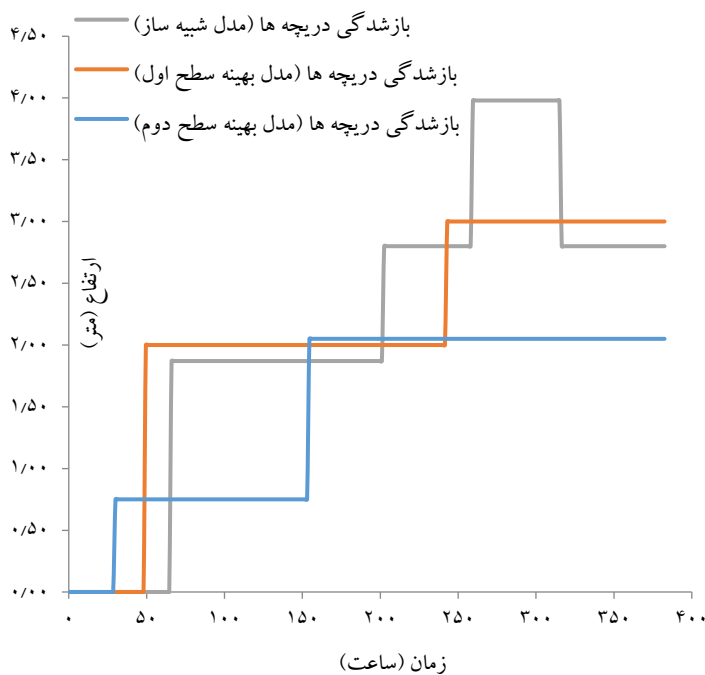


شکل ۳- مقایسه پیک خروجی سیلاب با دوره بازگشت‌های متفاوت در حالت (n=3)، (جدول ۴، ۵ و ۶)

جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل ساده شبیه‌سازی ده مرحله‌ای و مدل‌های بهینه سطح اول و سطح دوم، از هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال به‌عنوان نمونه استفاده شد که تغییرات دبی ورودی و خروجی و همچنین تغییرات تراز مخزن و میزان بازشدگی دریچه‌ها در هر لحظه بروی شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که نشان داده شده است وقتی سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله وارد مخزن سد کرخه گردید، حداکثر دبی رهاسازی از دریچه‌های سرریز با به‌کارگیری مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای شبیه‌سازی مرحله‌ای و مدل ده مرحله‌ای بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک (مدل‌های

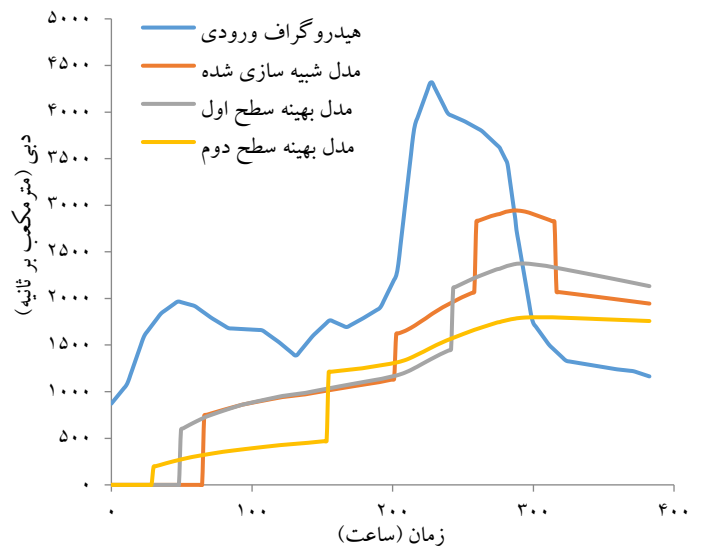


شکل ۵- تراز سطح آب مخزن سد به کارگیری برای سیلاب متناظر با دوره بازگشت ۵۰ سال



شکل ۶- میزان بازشدگی دریچه‌های سد برای سیلاب متناظر با دوره بازگشت ۵۰ سال

سطح اول و دوم)، به ترتیب برابر با ۲۳۷۵، ۲۹۴۴ و ۱۷۹۸ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. به عبارتی دیگر، وقتی سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله با دبی پیک ورودی ۴۳۱۷ مترمکعب بر ثانیه وارد مخزن سد گردید، پیک خروجی با به کارگیری مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای و مدل‌های بهینه سطح اول و دوم، به ترتیب $(\frac{4317-2944}{4317} = 32\%)$ ، $(\frac{4317-2375}{4317} = 45\%)$ و $(\frac{4317-1798}{4317} = 58\%)$ کاهش می‌یابد. نتایج برای سایر سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف در جداول ۴، ۵ و ۶ ارائه گردیده است. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ملاحظه گردید که مدل‌های سطح اول و دوم نسبت به مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای شبیه‌سازی قادر هستند علاوه بر کاهش بیشتر دبی پیک خروجی سیلاب، هم‌حجم بیشتری از سیل ورودی به مخزن را در محدوده حجم کنترل سیلاب خود ذخیره کنند و هم می‌توانند درجه فروکش بهتری بر روی سیلاب ورودی به مخزن داشته باشند.



شکل ۴- هیدروگراف ورودی و خروجی سیلاب برای سیلاب متناظر با دوره بازگشت ۵۰ سال

Hcr5	۲۲۲/۹	۲۲۰/۲۵	۲۲۰/۲۵
Hcr6	۲۲۵/۳۱	۲۲۴/۷۵	۲۲۳/۷۵
Hcr7	۲۲۷/۶۴	۲۲۵/۲۵	۲۲۷/۲۵
Hcr8	۲۲۹/۶	۲۲۸/۷۵	۲۲۹/۷۵
Hcr9	۲۳۱/۷۳	۲۳۱/۲۵	۲۳۰/۲۵
Hcr10	۲۳۴	۲۳۳/۷۵	۲۳۲/۷۵

نتایج حاصله از بهره‌برداری از سرریز سد کرخه در شرایط وقوع سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله، در صورت به‌کارگیری دستورالعمل حاصله از مدل شبیه‌سازی، در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، در صورت استفاده از دستورالعمل بهره‌برداری نتیجه شده از مدل شبیه‌سازی شده ده مرحله‌ای، امکان تخلیه سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله با بازشدگی ۸/۰۲ متر و حداکثر بال‌آمدگی سطح آب فراهم می‌گردد. در این صورت پیک سیلاب به میزان ۴۷/۳۳ درصد کاهش خواهد یافت و از ۱۸۴۸۱ مترمکعب بر ثانیه به ۹۷۳۴ مترمکعب بر ثانیه خواهد رسید. درصد کاهش پیک سیلاب خروجی برای سیل‌های با دوره بازگشت مختلف بین ۳۱/۲۹ تا ۵۰/۹۲ متفاوت و مجموع مقادیر تابع هدف قیاسی برای سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله به رقم ۲۷۲۶ بالغ خواهد شد.

درحالی‌که در صورت استفاده از دستورالعمل حاصله از مدل بهینه‌سازی سطح اول جدول ۵ مجموع مقادیر تابع هدف برای سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله از ۲۴۸۸ تجاوز نخواهد کرد. در این صورت درصد کاهش پیک سیلاب از ۲۶/۷۹ تا ۵۵/۹۵ درصد متفاوت خواهد بود که مؤید رفتار کاملاً مؤثرتر فرمان حاصله از به‌کارگیری مدل بهینه سطح اول است. همچنین در صورت استفاده از دستورالعمل حاصله از مدل بهینه‌سازی سطح دوم جدول ۶ مجموع مقادیر تابع هدف برای سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله از ۱۸۰۲ تجاوز نخواهد کرد. در این صورت درصد

در ادامه نتایج اجرای مدل ساده شبیه‌سازی ده مرحله‌ای و مدل‌های بهینه‌سازی سطح اول و سطح دوم در جدول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. این جداول ترازهای بحرانی ده‌گانه را به همراه میزان بازشدگی دریچه‌ها در حالت‌های بهینه نشان می‌دهند.

جدول ۲- میزان بازشدگی (متر) - سد کرخه

بازشدگی دریچه‌ها	مدل ده مرحله‌ای	مدل سطح اول (GA)	مدل سطح دوم (GA)
D1	۰	۰	۰
D2	۱/۸۷	۲	۰/۷۵
D3	۲/۸	۲	۲/۰۵
D4	۳/۹۸	۳	۳
D5	۳/۹۸	۴/۸۵	۴/۲۵
D6	۵/۹	۶/۲۵	۶/۲۵
D7	۶/۳	۹/۲۵	۹/۲۵
D8	۶/۳	۱۰/۲۵	۹/۸۵
D9	۶/۳	۱۰/۷۵	۱۱/۰۵
D10	۸/۰۲	۱۲/۵۵	۱۳/۷۵

جدول ۳- ترازهای بحرانی (متر) - سد کرخه

ترازهای بحرانی	مدل ده مرحله‌ای	مدل سطح اول (GA)	مدل سطح دوم (GA)
Hb	۲۰۹	۲۰۹	۲۰۹
Hcr1	۲۱۲/۱۱	۲۱۱/۲۵	۲۱۰/۲۵
Hcr2	۲۱۴/۹۷	۲۱۴/۷۵	۲۱۴/۷۵
Hcr3	۲۱۷/۸۸	۲۱۷/۲۵	۲۱۷/۲۵
Hcr4	۲۲۰/۶۴	۲۱۹/۷۵	۲۱۸/۷۵

جدول ۶- نتایج حاصل از مدل بهره‌برداری بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مدل سطح دوم)

مقادیر تابع هدف	درصد کاهش پیک سیلاب	پیک سیل خروجی	پیک سیل ورودی	دوره بازگشت (سال)
(m^3/s)	سیلاب	(m^3/s)	(m^3/s)	
۲۶۱/۵۳	۷۴/۴۷	۵۹۸	۲۳۸۷	۱۰
۲۵۶/۵۳	۵۱/۵۰	۱۵۳۸	۳۱۸۱	۲۰
۲۵۲/۸۶	۵۸/۵۰	۱۷۹۸	۴۳۱۷	۵۰
۲۶۰/۶۶	۴۹/۹۹	۲۶۷۳	۵۲۹۳	۱۰۰
۴۰۴/۸۳	۵۸/۴۱	۴۲۹۹	۱۰۳۳۷	۵۰۰
۱۹۷/۹۱	۶۱/۸۰	۴۵۲۸	۱۱۸۵۶	۱۰۰۰
۱۵۹/۰۸	۵۷/۵۶	۷۸۴۳	۱۸۴۸۱	۱۰۰۰۰
۱۸۰۲	-	-	-	مجموع

نتیجه‌گیری نهایی

با مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل بهره‌برداری شبیه‌سازی ده مرحله‌ای و مدل‌های ده مرحله‌ای بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک (مدل‌های سطح اول و دوم)، ملاحظه گردید که مدل‌های بهینه‌سازی شده سطح اول و دوم نسبت به مدل ده مرحله‌ای هم‌حجم بیشتری از سیلاب‌های ورودی به مخزن را می‌توانند در محدوده حجم کنترل سیلاب خود ذخیره کنند و هم می‌توانند درجه فروکش بیشتری بر روی سیلاب ورودی به مخزن داشته باشند. از این‌رو مدل‌های بهینه سطح اول و دوم از درجه‌های سرریز، امکان استفاده بیشتر از ظرفیت مخزن را فراهم می‌کنند. در این کار تحقیقاتی، وقتی سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله وارد مخزن سد گردید، پیک خروجی با به‌کارگیری مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای (مدل شبیه‌سازی) و مدل‌های بهینه‌سازی سطح اول و دوم، به ترتیب ۳۲ درصد، ۴۵

کاهش پیک سیلاب از ۴۹/۹۹ تا ۷۴/۴۷ درصد متفاوت خواهد بود که این نیز مؤید رفتار کاملاً مؤثرتر فرمان حاصله از به‌کارگیری مدل بهینه سطح دوم است.

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل بهره‌برداری ده مرحله‌ای شبیه‌سازی شده (۹)

مقادیر تابع هدف	درصد کاهش پیک سیلاب	پیک سیل خروجی	پیک سیل ورودی	دوره بازگشت (سال)
(m^3/s)	سیلاب	(m^3/s)	(m^3/s)	
۷۱۶/۴۳	۳۱/۲۹	۱۶۴۰	۲۳۸۷	۱۰
۳۰۸/۰۲	۴۱/۹۴	۱۸۴۷	۳۱۸۱	۲۰
۴۱۴/۰۵	۳۱/۸۰	۲۹۴۴	۴۳۱۷	۵۰
۳۱۵/۵۲	۳۸/۸۶	۳۲۳۶	۵۲۹۳	۱۰۰
۵۲۰/۱۰	۴۶/۵۶	۵۵۲۴	۱۰۳۳۷	۵۰۰
۲۵۴/۲۸	۵۰/۹۲	۵۸۱۹	۱۱۸۵۶	۱۰۰۰
۱۹۷/۴۳	۴۷/۳۳	۹۷۳۴	۱۸۴۸۱	۱۰۰۰۰
۲۷۲۶	-	-	-	مجموع

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل بهره‌برداری بهینه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مدل سطح اول)

مقادیر تابع هدف	درصد کاهش پیک سیلاب	پیک سیل خروجی	پیک سیل ورودی	دوره بازگشت (سال)
(m^3/s)	سیلاب	(m^3/s)	(m^3/s)	
۵۲۷/۳۱	۴۹/۴۷	۱۲۰۶	۲۳۸۷	۱۰
۲۳۳/۶۲	۵۵/۹۵	۱۴۰۱	۳۱۸۱	۲۰
۳۳۴/۰۲	۴۴/۹۸	۲۳۷۵	۴۳۱۷	۵۰
۳۷۷/۹۱	۲۶/۷۹	۳۸۷۵	۵۲۹۳	۱۰۰
۵۳۰/۵۳	۴۵/۴۸	۵۶۳۵	۱۰۳۳۷	۵۰۰
۲۶۰/۴۰	۴۹/۷۳	۵۹۵۹	۱۱۸۵۶	۱۰۰۰
۲۲۳/۷۸	۴۰/۳۰	۱۱۰۳۳	۱۸۴۸۱	۱۰۰۰۰
۲۴۸۱	-	-	-	مجموع

در مدل سطح دوم جواب‌های به‌مراتب بهتری نسبت به مدل سطح اول حاصل شده است. علاوه بر موارد یاد شده؛ با افزایش تراز مخزن توسط دریچه‌ها، کارایی توربین‌ها جهت تولید نیروی برق می‌تواند بیشتر افزایش یابد. از طرفی دیگر، در هنگام وقوع سیلاب بهره‌بردار با در اختیار داشتن ترازهای بحرانی و بازشدگی بهینه از دریچه‌های سرریز به راحتی می‌تواند در هر لحظه میزان بازشدگی دریچه‌ها را تعیین و اقدام به تخلیه سیلاب با هر دوره بازگشتی نماید.

درصد و ۵۸ درصد کاهش می‌یابند. همچنین نتایج برای سایر سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف در جداول ۴، ۵ و ۶ به تفکیک ارائه گردیده است. همان‌طور که از جداول مذکور ملاحظه می‌شود با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک جهت به دست آوردن ترازهای بحرانی و میزان بازشدگی بهینه دریچه‌ها، نتایج نشان می‌دهند که درصد کاهش پیک سیلاب برای هر دو مدل بهینه‌سازی شده سطح اول و دوم؛ بخصوص برای سیلاب‌های زیر صدسال؛ بیشتر از مدل شبیه‌سازی است که این موضوع اهمیت ویژه‌ای در پایین دست پیدا می‌کند. مضاف بر این

منابع

۱. صفوی، ح. ۱۳۸۸. هیدرولوژی مهندسی. اصفهان. انتشارات ارکان دانش. ویرایش دوم. صفحات: ۳۶۶-۱۸۵.
۲. طرح سد مخزنی سد کرخه. ۱۳۷۴. گزارش فنی طرح. مرحله دوم. گزارش سازه‌های هیدرولیکی. مرکز اسناد و مدارک فنی شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.
۳. کورش، ع و مهدی، ک. ۱۳۹۵. تحلیل الگوریتم‌ها و طراحی روش‌های فرا ابتکاری. انتشارات دانشگاه شریف
4. Resendiz-Carrillo, D., and Lave, L. B. (1987). Optimizing spill capacity with an estimated distribution of floods. *Water Resour. Res.*, 23(11), 2043-2049
5. Afshar and marino 1990 Afshar, A., Marino, M.A., 1990, Optimizing spillway capacity with uncertainty in flood estimator, *Journal of water resources planning and*
6. Abrishamchi, A., Afshar, A., and Kerachian, R., 2003, Spillway capacity optimization under hydrologic uncertainties and flood routing. *Iranian Journal of Science and Technology*, Q2 27.
7. Sakakima, S., Kojiri, T., and Itoh K. (1992). "Real time reservoir operation with neural nets concept." Proc., 17th Int. Conf. on Applications of Artificial Intelligence in Engrg. -AIENG/92, Computational Mechanics Publications, Southampton, U. K., 501-514. Technical publications, 1987.
8. Acanal, N. & Haktanir, T. 1999. 'Six-stage flood routing for dams having gated spillways. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23:6, 4112.
9. Haktanir, T. & Kisi, Ö. 2001. 'Ten-stage discrete flood routing for dams having gated spillways. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6:1, 86-90.
10. Acanal, N. & Haktanir, T. 1999. 'Five-stage flood routing for gated reservoirs by grouping floods into five different categories according to their return periods. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 44:2, 163-72.
11. Karaboga, D., Bagis, A. & Haktanir, T. 2004. 'Fuzzy Logic Based Operation of Spillway Gates of Reservoirs during Floods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9:6, 544-49.
12. Bagis, A. & Karaboga, D. 2004. 'Artificial neural networks and fuzzy logic based control of spillway gates of dams. *Hydrological Processes*, 18:13, 2485-501.

13. Karaboga, D., Bagis, A. &Haktanir, T. 2008. 'Controlling spillway gates of dams by using fuzzylogic controller with optimum rule number. 'Applied Soft Computing, 8:1, 232-38.
14. Buber A., Bolgov M. (2021). Multi-Criteria Analysis of the “Lake Baikal—Irkutsk Reservoir” Operating Modes in a Changing Climate: Reliability, Resilience and Vulnerability. *Water*, 13(20), 2879;
15. Sordo-Ward, A., Gabriel-Martin, I., Bianucci, P., Garrote, L. A. (2017). Parametric Flood Control Method for Dams with Gate-Controlled Spillways. *Water* 2017, 9, 237.
16. Zeng, J., Ansar, M. Rakib, Z. Wilsnack, M. & Chen, Z. (2019). Applications of computational fluid dynamics to flow rating development at complex prototype hydraulic structures: Case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 145 (12): 05019009.
17. Yang, J., Andreasson, P. Teng, P. &Xie, Q. (2019). The past and present of discharge capacity modeling for spillways: A Swedish perspective. *Fluids* 4 (1): 10.
18. Xu, S. Chen, Y. Xing, L. & Li, C. (2021). Baipenzhu Reservoir Inflow Flood Forecasting Based on a Distributed Hydrological Model. *Water* 2021, 13, 272.
19. Jordaan, J. M. Jr."Operating Rules for Flood Control by Reservoir” Proc. Int. Comm. On Large Dams, Madrid, 1973.
20. Sinske B. H., "Gate Operation – Flood Control versus Dam Safety" ICID, 1985.

Simulation and Optimization Models for Flood Control by Genetic Algorithm: Application to Karkheh Dam

Farhad Salehi¹, Mohsen Najarchi^{2*}, Mohammad Mahdi Najafizadeh³, Mohammad Mirhoseini Hezaveh⁴

1- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak Branch, Arak, Iran.

2*-Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak Branch, Arak, Iran.

m-najarchi@iau-arak.ac.ir

3. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak Branch, Arak, Iran.

4- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Arak Branch, Arak, Iran.

Abstract

The paper demonstrates a simulation-optimization framework for enhancing the real-time flood control with gated spillways at places where no flood forecasting data is available. A multi-objective modeling scheme is presented for flood management in a gated spillway in which the operator may specify the priorities on floods based on their different return periods. Two different operation strategies are devised. Both of the operating strategies employ ten-stage policies, which mainly rely on the reservoir water level as the input data. The second strategy benefits from both observed reservoir water level and flood peak. The optimal values of the Models parameters are obtained using genetic algorithm. This is a novel approach because none of its policies needs flood forecasting data, thus, making them adaptable to any flood with any return period. To evaluate the performances of the proposed models, the flood control through gated spillway of Karkheh reservoir is considered where flood hydrographs with different return periods are routed through the reservoir.

Keywords: Flood Hydrograph, Gated Spillway, Simulation, Optimization, Genetic Algorithm