

ارائه منحنی فرمان دریچه‌های سرریز در هنگام وقوع سیلاب با رویکرد مرحله‌ای - مطالعه موردی سد مهاباد

شایان محسنی بیله‌سوارچی^۱، بنفشه زهرایی^{۲*}، محمد علی بنی‌هاشمی^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

*bzahraie@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۵]

تاریخ دریافت: [۹۶/۱۲/۲۷]

چکیده

بهره‌برداری مناسب از دریچه‌های سرریز از جمله چالش‌های مدیریت بهره‌برداری از مخازن در زمان سیلاب است. بهره‌برداری بهینه از دریچه‌های سرریز به عنوان یک روش غیر سازه‌ای، اهمیت ویژه‌ای در مهار و استهلاک انرژی سیلاب‌ها دارد. با اعمال سیاست‌های مناسب بهره‌برداری می‌توان خسارت سیلاب را تا حد زیادی کاهش داد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن قوانین مؤثر بر بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز، یک منحنی فرمان بهینه چند مرحله‌ای برای بهره‌برداری از دریچه‌ها در زمان وقوع سیلاب، ارائه شده و میزان رهاسازی آب مخزن از دریچه‌های سرریز براساس ترازهای بحرانی و مدت زمان وقوع سیلاب، تعیین شده است. عملکرد مدل ارائه شده در بهره‌برداری از دریچه سرریز سد مهاباد ارزیابی شده است. از ویژگی‌های مثبت سیاست تدوین شده، عدم وابستگی آن به پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن است که انعطاف پذیری بسیار زیادی را برای استفاده از آن فراهم می‌کند. کاهش و تأخیر بیشینه سیلاب ورودی در هیدروگراف سیلاب خروجی از مخزن و استفاده بهینه از حجم کنترل سیلاب برای بهره‌برداری در آینده برای مصارف کشاورزی و نیروی برق آبی از نتایج سیاست بهره‌برداری تدوین شده در این پژوهش است.

واژگان کلیدی: سرریز دریچه‌دار، کنترل سیلاب، منحنی فرمان، بهینه‌سازی، سیاست بهره‌برداری.

۱- مقدمه

سیلاب نه تنها می‌تواند در کاهش خسارات سیل مؤثر باشد، بلکه می‌تواند ذخایر مناسبی را برای مصرف در اختیار قرار دهد. پس بهره‌برداری بهینه از دریچه‌های سرریزها در زمان وقوع سیلاب به عنوان یک روش غیر سازه‌ای دارای اهمیت ویژه‌ای است. به گونه‌ای که با تکیه بر دستورالعمل‌های مدیریتی و اعمال سیاست‌های مناسب بهره‌برداری، می‌توان خسارت سیلاب را تا حد زیادی کاهش داد. بهره‌برداری از

یکی از اهداف مهم احداث سدها مهار سیلاب و استفاده حجم ذخیره شده جریان در زمان موردنیاز است. با توجه به اهمیت مقوله کنترل سیلاب، مدیریت بهینه دریچه سرریز سدها در زمان وقوع سیلاب، از جمله چالش‌های مدیریت بهره‌برداری از مخازن است (سنگ سفیدی و همکاران، ۲۰۱۵ [1]). بهره‌برداری مناسب از مخازن سدها در حین وقوع

منظور افزایش تولید برق آبی، ۳ دستور بهره برداری با در نظر گرفتن ذخیره سازی اولیه ارائه کردند. هدف از این رویکردها رسیدن تراز آب مخزن به تراز بیشینه مخزن در پایان سیلاب در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا بیشینه سیلاب خروجی نزدیک به سیلاب ورودی بوده، بنابراین خسارات وارد شده به پایین دست قابل توجه بوده است. زرگر و همکاران [11] با هدف کاهش خسارت پایین دست یک مدل چند مرحله‌ای برای مدیریت سرریزها ارائه کرده‌اند. نوآوری این پژوهش انتخاب تعداد مراحل به عنوان متغیر تصمیم و انتخاب دبی بحرانی برای هر مرحله بوده است. آن‌ها مدل خود را روی چهار سد کارون ۴، کارون ۳، کارون ۱ و گتوند مورد آزمون قرار داده و تعداد مراحل بهینه بدست آمده به ترتیب ۹، ۱۲، ۲۲ و ۱۴ بوده است.

در رویکرد کاربرد بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم موثر بر سیاست‌های اتخاذ شده برای آزادسازی آب مخازن، بر اساس ساختار مدل تعیین می‌شوند. پس از آن با کاربرد الگوریتم تکاملی مناسب تابع هدف منتخب کمینه می‌شود. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری، هم‌چون ژنتیک، به صورت گسترده‌ای به منظور بهینه‌سازی عملکرد مخازن سدها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ایست و هال [12] نشان دادند که پتانسیل قابل توجهی از مدل الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی سیستم مخازن وجود دارد و مزیت این مدل را نسبت به مدل برنامه‌ریزی پویا در تأمین نیازها، اثبات نمودند. فهمی و همکاران [13] اظهار داشتند که مدل الگوریتم ژنتیک پتانسیل کاربرد در سیستم رودخانه - مخزن بزرگ را دارد. شریف و واردلاو [14] مدل الگوریتم ژنتیک را به منظور بهینه‌سازی یک سیستم چند مخزنی در اندونزی پیشنهاد نمودند. پژوهش آن‌ها کارایی مدل الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی منحنی فرمان سیستم چند مخزنی آشکار ساخت. برای بهبود نتایج و نزدیکی به واقعیت می‌توان از هیدروگراف‌های واقعی در مدل سازی استفاده نمود [15]. تکشی [16] و صالحی [17] برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن از الگوریتم ژنتیک و سابقه سیلاب‌های به وقوع پیوسته استفاده کردند.

سرریزهای دریچه‌دار برای سیلاب‌های بزرگ باید به گونه‌ای باشد که نه ایمنی سد به خطر بیفتد و نه به پایین دست خسارت قابل ملاحظه‌ای وارد شود [2]. با توجه به اهمیت بهره‌برداری مناسب از مخازن سدها، پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت پذیرفته است که در ادامه برخی از جدیدترین آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حاسبه و ناگایاما [3] مقایسه‌ای بین بهره‌برداری از مخزن با استفاده از سیستم‌های فازی و شبکه عصبی و سابقه تاریخی بهره‌برداری سد انجام دادند. آن‌ها از دبی بیشینه و ذخیره مخزن به عنوان پارامترهای اثرگذار بر شبیه‌سازی با هدف به تأخیر انداختن زمان دبی اوج خروجی نسبت به ورودی و حفظ بخشی از جریان سیل برای ذخیره مخزن سد استفاده کردند. کارابوگا و همکاران [4] با بهره‌گیری از رویکرد فازی یک فرمان بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز برای بهره‌برداری در زمان واقعی توسعه دادند. همچنین پژوهش دیگری تحت عنوان منطق فازی برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز در هنگام وقوع سیلاب نیز در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد نمودند [5].

دستورالعمل‌های چند مرحله‌ای از جمله سیاست‌های بهره‌برداری کارآمد برای مهار سیلاب توسط سرریزهای دریچه‌دار هستند. سینسکی [6] مدل بهره‌برداری سه مرحله‌ای از دریچه‌های سرریز برای کنترل سیلاب را ارائه نمود. پس از آن مجموعه‌ای از فرمان‌های بهره‌برداری با ترازهای مختلف در کشور ترکیه توسعه داده شده است که تحت عناوین سیاست‌های عملکرد چند مرحله‌ای ارائه شده‌اند [7]، [8]. لازم به ذکر است که در روش‌های فوق رویکردهای بهینه‌سازی مدنظر قرار نگرفته و تنها روش‌های تجربی مورد استفاده بوده است.

ژاو و همکاران [9] سیلاب‌های مطالعاتی را با توجه به بزرگی به سه گروه تقسیم نموده و یک مدل دو مرحله‌ای مدیریت مخزن با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی پایین دست ارائه نمودند. هاکتانیر و همکاران [10] یک سیاست پانزده مرحله‌ای بدون نیاز به پیش‌بینی سیلاب برای مدیریت بهینه مخازن سدها ارائه و روی سدهای کاتالان و اسلاتاس در ترکیه مورد آزمون قرار دادند. برای رسیدن به ذخیره‌سازی بیشتر به

روش هیدرولوژیکی پالس مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از تفاوت‌های بارز نسبت به مطالعات پیشین در زمینه مخازن سدها است [18]، [20]، [21]، [7] و [19]. با توجه به ظرفیت کافی سرریز در کنترل سیلاب طراحی برای بیشینه تراز ممکن و همچنین احتمال وقوع سیلاب در زمانی که تراز آب در مخزن بالاتر از تراز آستانه سرریز باشد، انتخاب تراز آستانه برای سیاست بهره‌برداری مناسب نیست. بنابراین عمق نرمال سد برای شروع رخداد سیلاب در نظر گرفته شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش سد مهاباد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مدل پیشنهادی روی آن اجرا شده است. سد مهاباد بر روی رودخانه مهاباد در استان آذربایجان غربی به فاصله کوتاهی در بالادست شهر مهاباد و جنوب شهر ارومیه مرکز استان آذربایجان غربی واقع شده است. پلان وضعیت کلی و مشخصات عمومی سد مهاباد در شکل (۱) و جدول (۱) آورده شده است. چنانکه در پلان وضعیت کلی سد مهاباد در شکل (۱) نشان داده شده رودخانه مهاباد پس از آبیاری اراضی کشاورزی پایین دست سد به دریاچه ارومیه می‌ریزد.

جدول ۱. مشخصات عمومی سد مهاباد (موسسه آب دانشگاه تهران ۱۳۹۱ [22])

Characteristics of Mahabad Dam

(AMSL) 1357	Heel Spillwey
(AMSL) 1358.5	Normal Water Level
(mm ³) 190	tank volume in NWL
(AMSL) 1361	Maximum Water Level
(mm ³) 220	tank volume in MWL

Table(1) Characteristics of Mahabad Dam

منظور اصلی از ساخت سد مهاباد ذخیره‌سازی آب برای تأمین نیازهای آب کشاورزی، آب شرب و تولید مقداری انرژی برق‌آبی بوده است. به علاوه تنظیم آب رودخانه مهاباد به کمک دریاچه سد به منظور حفظ و نگهداری شهر در پایین دست سد از جمله اهداف دیگر طرح عنوان شده است. اطلاعات هیدروگراف سیلاب‌های ورودی سد مهاباد

در زمینه مطالعات مدیریت سیلاب علاوه بر فرمان بهره‌برداری، انتخاب روش‌های محاسباتی مناسب برای روندیابی و در نظر گرفتن مقدار حجم ذخیره سازه مورد نظر، نیز دارای اهمیت است. روندیابی سیلاب یکی از مسائل مربوط به جریان‌های غیر دائمی است که با توجه به سابقه تحقیقاتی برای حل آن می‌توان از روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده نمود. روش‌های هیدرولیکی به جواب‌های با دقت بیشتر منتج می‌شوند. اما پیچیدگی نسبی روابط و هزینه‌های محاسباتی باعث می‌شود تا در اکثر موارد از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده شود. روش‌های مذکور برای کاربردهای پژوهشی از دقت مناسبی برخوردارند. حجمی که بین تراز آستانه سرریز و بیشینه تراز مخزن سد قرار دارد، اصطلاحاً حجم کنترل سیلاب نامیده می‌شود که ممکن است تمام یا قسمتی از این حجم در طی روند کنترل سیلاب مورد استفاده قرار بگیرد. در صورتی که آب در شروع سیلاب در تراز کمترین باشد می‌توان از تمامی حجم کنترل سیلاب استفاده نمود. در پژوهش‌های پیشین [6]، [18]، [7] و [19]، تراز آب مخزن در زمان شروع سیلاب آستانه سرریز فرض شده تا تمامی حجم کنترل سیلاب در بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد.

روش‌های کنترل سیلاب که با پیش‌بینی جریان همراه هستند، به تعداد زیاد ایستگاه اندازه‌گیری دبی رودخانه، دستگاه باران سنج و یک سیستم جمع‌آوری داده با فاصله زمانی طولانی، خیلی پیچیده و پرهزینه است. نکته قابل تامل از بررسی پژوهش‌های پیشین در این زمینه این است که می‌توان نرخ تغییرات تراز آب در مخزن را که مستقیماً با مشاهده عینی قابل اندازه‌گیری است، در مدل‌های شبیه‌سازی لحاظ کرد و آثار آن را بر ذخیره بیشتر سیلاب در مخزن و کاهش بیشتر پیک سیلاب خروجی مشاهده کرد.

در این پژوهش، یک فرمان بهره‌برداری چند مرحله‌ای برای بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز بر اساس مشاهده تراز آب مخزن و در نظر گرفتن تغییرات زمانی تراز آب در مخزن شبیه‌سازی شده است. از ویژگی‌های مثبت مدل، عدم نیاز به پیش‌بینی کامل سیلاب است. این ویژگی، دامنه کاربری مدل پیشنهادی را بسیار وسیع می‌کند. به منظور روندیابی جریان،

هر کدام یک دریچه تنظیم به ارتفاع ۱/۵ متر نصب شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد برای تاج سد، سطح آب دریاچه از تراز بیشینه ۱۳۶۰/۱ متر فراتر نخواهد رفت. برای محاسبه دبی‌های خروجی از منحنی عملکرد سرریز استفاده شده که در شکل (۳) آمده است.

۳- مدل سازی

در این پژوهش هدف ارائه یک منحنی فرمان برای سرریز دریچه‌دار برای بهره‌برداری در هنگام وقوع سیلاب است. برای رسیدن به این هدف در مدل تدوین شده، نیاز به اطلاعات تراز بحرانی، زمان بحرانی و میزان باز شدگی دریچه است که در ادامه آورده شده است.

در مدل تدوین شده در این پژوهش، تراز مشاهده شده سطح آب در مخزن و تغییرات آن در زمان، برای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل حاضر به ازای یک تراز آب تعریف شده (تراز بحرانی) و بر اساس تغییرات زمانی سطح آب نسبت به ترازهای بحرانی، باز شدگی دریچه‌ها به میزان لازم انجام گرفته و مقدار دبی مورد نظر رهاسازی می‌شود.

در شکل (۲) آورده شده است.

شکل ۱. حوضه آبریز سد مهاباد (موسسه آب دانشگاه تهران ۱۳۹۱ [22])

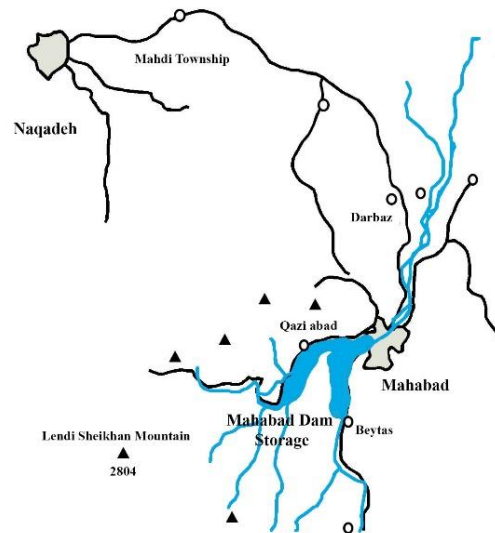
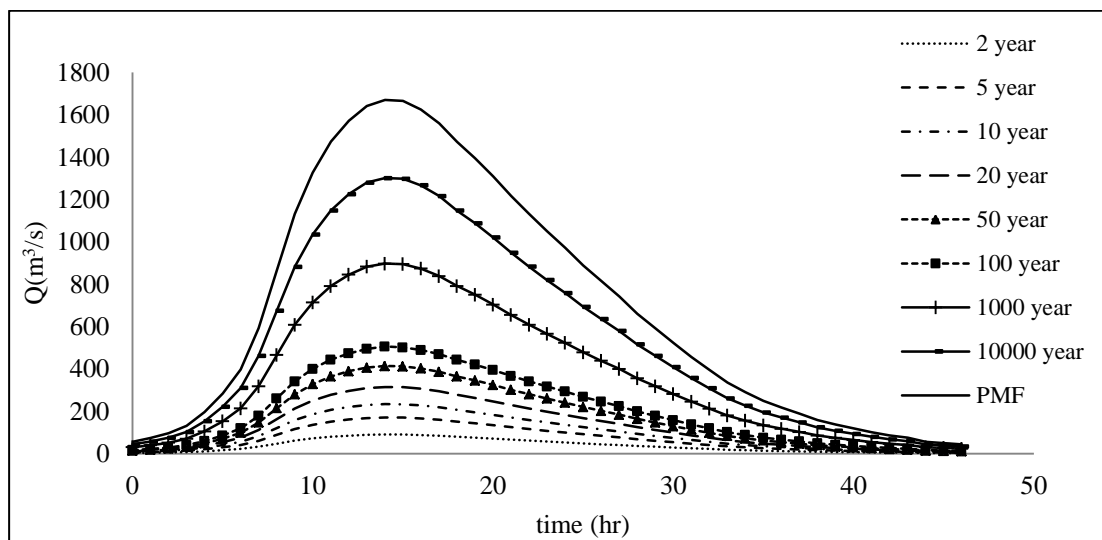


Fig. 1. Mahabad Dam catchment

سرریز سد مهاباد از نوع شوت بوده که در تکیه‌گاه چپ سد واقع شده است و خروجی آن به دو قسمت دهانه دریچه‌دار که هر یک به عرض ۱۳/۴۵ متر است، تقسیم شده است. دریچه‌ها از نوع قطاعی به ارتفاع ۶ متر بوده که روی

شکل ۲. هیدروگراف سیلاب‌های ورودی سد مهاباد



Figure(2) Flood hydrograph of Mahabad Dam

شکل ۳. منحنی عملکرد سرریز سد مهاباد (A باز شدگی دریچه به متر)

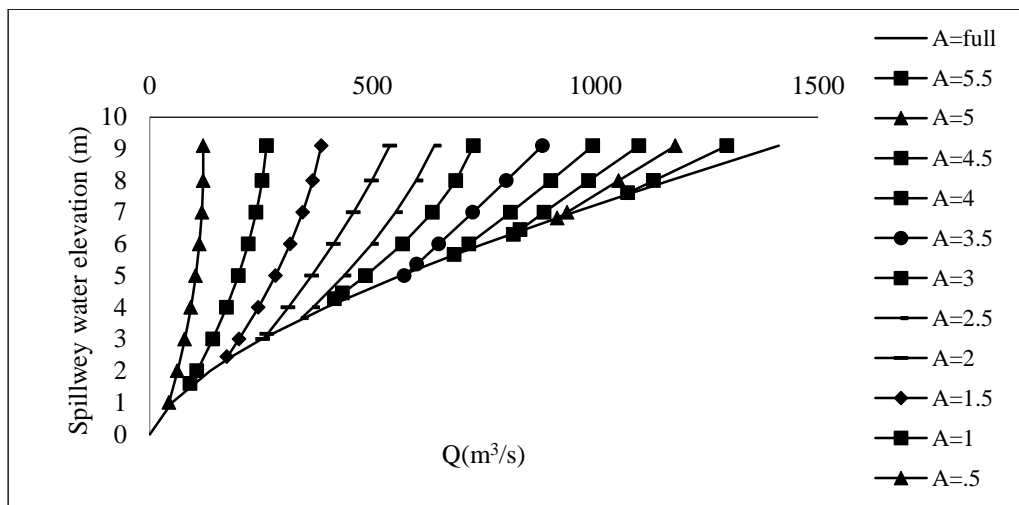


Fig. 3. Performance curve of Mahabad Dam spillway (A: gate opening (m))

در این پژوهش برای محاسبه خروجی‌های مدل برای ارائه منحنی فرمان، از یک الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا به عنوان بهینه‌ساز استفاده شده است. پارامترهای این الگوریتم و مشخصات آن در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به این نکته که میزان بازشدگی دریچه‌ها و زمان‌های کنترلی نقش اساسی در تعیین میزان جریان خروجی از دریچه‌های سرریز را ایفا می‌کنند، در این پژوهش، میزان بازشدگی دریچه‌ها (A_i) و زمان‌های کنترلی (T_i) به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. جمعیت تعداد کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک است که در ابتدا به صورت تصادفی تولید و در گام‌های بعد با به کارگیری عملگرهای تزویج و جهش بهبود یافته و بهینه می‌شود. هر کروموزوم شامل متغیرهای تصمیم مسئله است. در این قسمت مدل پیشنهادی بهره‌بردار مرحله‌ای از دریچه‌ها، قادر است با در نظر گرفتن تمامی سیلاب‌های مطالعه شده موجود با دوره بازگشت‌های مختلف، میزان بازشدگی دریچه‌ها و زمان‌های بحرانی بهینه را به عنوان خروجی معرفی کند.

در این مدل، میزان بازشدگی دریچه و متغیر زمان بحرانی به ازای هر تراز بحرانی، بر اساس تاریخچه سیلاب‌های پیشین تعیین شده است. ترازهای بحرانی نیز به عنوان اطلاعات ورودی با توجه به اطلاعات سد مورد نظر به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود.

در سیاست‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، برای هر سیلاب متناسب با حجم و دوره بازگشت، بخشی از ظرفیت حجم کنترل سیلاب تخصیص یافته و سپس سطوح بحرانی و میزان بازشدگی دریچه‌ها مشخص شده است. در مدل پیشنهادی، با در نظر گرفتن نرخ تغییرات ذخیره آب در مخزن، تخمینی از شدت سیلاب در حال وقوع بدست می‌آید. چنانچه نسبت زمان پر شدن مخزن به زمان بحرانی مربوطه کمتر از یک باشد، شدت سیلاب موجود بیش از پیش فرض مدل بوده و نیاز به افزایش بازشدگی دریچه سرریز خواهد بود و برعکس. بنابراین در صورت وقوع سیلاب کوچکتر، بازشدگی دریچه سرریز افزایش نیافته و به بهره‌بردار اجازه استفاده از تمامی ظرفیت حجم کنترل سیلاب داده می‌شود. در این حالت امکان ذخیره بیشتر و فروکش سیلاب فراهم می‌شود.

جدول ۲. مشخصات و پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Crossover Rate	Mutation Rate	Crossover	Decision Variables	Population	Criterion Convergence
85%	0.02	Single Point	T_i و A_i	150	number of generations Failure to improve the best Answer - Over several generations

Table 2. Specification and parameters of GA

اساس ظرفیت سازه هیدرولیکی خارج کننده جریان تعیین می‌شود. علاوه بر آن، ذخیره آب در مخزن تابع مستقیمی از ارتفاع سطح آب نسبت به سازه هیدرولیکی مذکور و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه است [23].

در روش روندیابی پالس برای هر فاصله زمانی، رابطه (۱۱) را می‌توان نوشت. که در آن مقادیر O_t ، I_t و V_t به ترتیب دبی آب ورودی، دبی خروجی و حجم مخزن در زمان t است. رابطه فوق برای حد فاصل دو زمان t و $t+1$ ، برای روندیابی جریان در مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با کمک روندیابی با توجه به میزان دبی ورودی و باز شدگی دریچه سرریز زمان بالا آمدن و تغییرات تراز آب در محل سرریز بدست می‌آید. برای تعیین میزان دبی دریچه سرریز نیز از منحنی عملکرد سرریز سد (شکل ۳) استفاده شده است. اطلاعات ورودی مدل شبیه ساز شامل I_i حجم سیلاب ورودی در زمان t ، V_i حجم اولیه در زمان شروع سیلاب، حجم مخزن در تراز نرمال، حجم مخزن در تراز بیشینه، H_b تراز لحظه شروع سیلاب، H_{cr}^i تراز بحرانی i -ام، A_i میزان بازشدگی دریچه‌ها و T_i زمان‌های کنترلی است. کلیه مدل سازی‌ها در محیط کتابخانه‌ای MATLAB انجام پذیرفته است

$$\text{Max } Z = \frac{1}{\sum_{k=1}^k \frac{1}{k} O_k^{Peak} + Penalty} \quad (1)$$

$$H_{cr}^0 = H_b \quad (2)$$

$$H_{cr}^9 = H_{max} \quad (3)$$

$$H_b < H_{cr}^i \leq H_{max} \quad (4)$$

$$V_{min} < V_t \leq V_{max} \quad (5)$$

$$A_0 < A_i \leq A_{fo} \quad (6)$$

$$RWL_t \leq H_{max} \quad (7)$$

$$A_0 = 0 \quad (8)$$

$$\text{if } I_t \geq I_{t-1} \rightarrow \begin{cases} \text{if } H_{\sigma}^i < RWL_t \leq H_{\sigma}^{i+1} \rightarrow O_t = f(A_i) & i = 0, 1 \\ \text{if } H_{\sigma}^i < RWL_t \leq H_{\sigma}^{i+1} \rightarrow \text{if } t \leq T_{i-1} \rightarrow \begin{cases} O_t = f(A_i) \\ \text{else} \rightarrow O_t = f(A_{i-1})^* \end{cases} & i = 2, \dots, 8 \end{cases}$$

با توجه به ماهیت تصادفی سیلاب در حال وقوع، برای کمتر کردن خسارت، ارزش انتظاری یا امید ریاضی خسارات محاسبه و معکوس خسارت بیشتر شده است. نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز به مدل بهینه‌ساز منتقل شده و مقدار مورد انتظار خسارت با در نظر گرفتن بیشینه دبی خروجی بر طبق رابطه (۱) بدست می‌آید. در مدل‌سازی مسئله فوق، محدودیت‌هایی نیز بر اساس ابعاد سرریز و محدودیت روگذری سد با توجه به ارتفاع سد باید در نظر گرفته شود که در روابط (۲ تا ۸) آورده شده است.

O_k^{Peak} بیانگر پیک سیلاب خروجی متناظر با دوره بازگشت k ام برای سیلاب ورودی است، k دوره بازگشت، Penalty تابع جریمه برابر با 10^7 در صورت تخطی و صفر در صورت عدم تخطی از محدودیت‌ها (روابط ۲ الی ۸) است. ضرایب وزنی تابع هدف نیز برابر با احتمال وقوع هر سیلاب یا همان k^{-1} هستند. تابع هدف بهره‌برداری از سرریزهای دریچه‌دار (Z) تعریف شده که با توجه به نتایج شبیه سازی بیشینه می‌شود.

همان‌گونه که بیان شد، سطوحی در مخزن به عنوان ترازهای بحرانی تعیین شده که بر اساس زمان رسیدن آب به این سطوح، در مورد میزان بازشدگی دریچه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. به منظور واسنجی مدل روندیابی سیلاب در مخزن نیاز به داده‌های مربوط به سیلاب‌های پیشین بوده، بنابراین تعداد مراحل تصمیم‌گیری با توجه به تعداد هیدروگراف‌های مطالعه شده موجود در نظر گرفته شده است. تعداد ۹ مرحله در نظر گرفته شده که ۸ مرحله با توجه به اطلاعات موجود درباره هیدروگراف‌ها و یک مرحله نیز به منظور ذخیره‌سازی (مرحله اول) است. در این پژوهش با افزایش تعداد مراحل، سعی شده تا مشکل پرش‌های ناگهانی مدل‌های چند مرحله‌ای تا اندازه‌ای کاهش داده شود. به لحاظ ریاضی می‌توان ساختار مدل شبیه ساز را با روابط (۹ و ۱۰) بیان کرد.

به منظور روندیابی جریان از روش پالس استفاده شده است. اساس این روش کاربرد معادله پیوستگی است. در این روش، مقدار دبی خروجی تابع معادله دینامیکی است که بر

طرح مرحله i است و بهره‌بردار دستور باز شدن دریچه در مرحله بعدی را می‌دهد. در صورتی که شرط دارای علامت * صادق باشد، مدل به مرحله بعدی وارد نشده و باز شدگی دریچه افزایش نمی‌یابد. لازم به ذکر است که مراحل کاهش (بازشدگی کوچکتر دریچه) با یک پله اختلاف ادامه می‌یابد. دیگر تفاوت این پژوهش با کارهای گذشته، انتخاب تراز نرمال (۱۳۵۸/۵) برای لحظه شروع سیلاب است. ترازهای بحرانی برای ۶ مرحله اول برابر ۰/۱ و برای مراحل ۷ و ۸ برابر ۰/۲ ارتفاع موجود در نظر گرفته شده و در مرحله ۹ به دلیل متناظر بودن با بیشینه سیلاب محتمل (PMF) و الزامات ایمنی سد، بازه ارتفاعی تا بیشینه تراز مخزن در نظر گرفته شده است. با توجه به فاصله کوتاه بین تراز نرمال و تراز فوقانی دریچه سرریز در سد مهاباد، ارتفاع موجود حجم کنترل سیلاب در مخزن سد، با کمک سعی و خطا و بررسی نتایج، به صورت ذکر شده، تقسیم شده و ترازهای کنترلی محاسبه شده است.

(۹)

$$if \quad I_t < I_{t-1} \rightarrow \begin{cases} if \quad H_{cr}^i < RWL_t \leq H_{cr}^{i+1} \rightarrow O_t = f(A_{i+1}) & i = 0, \dots, 7 \\ if \quad H_{cr}^i < RWL_t \leq H_{cr}^{i+1} \rightarrow O_t = f(A_i) & i = 8 \end{cases} \quad (10)$$

$$V_{t+1} + 0.5O_{t+1}(t_{i+1} - t_i) = V_t - 0.5O_t(t_{i+1} - t_i) + 0.5(I_t + I_{t+1})(t_{i+1} - t_i) \quad (11)$$

که در آن‌ها، RWL_t تراز آب در مخزن در زمان t ، H_{max} معادل بیشینه تراز مخزن، $f(A_i)$ مقدار دبی خروجی سرریز با توجه به شکل (۳)، O_t جریان خروجی از سرریز، A_{t0} بازشدگی کامل دریچه‌ها و t زمان از ابتدای شروع سیلاب است. با توجه به زمان سپری شده از شروع سیلاب و تراز آب مخزن، بزرگی سیلاب در حال وقوع حدس زده شده و دستور باز شدن دریچه در مرحله بعدی داده می‌شود. به طور نمونه، اگر زمان موجود برای رسیدن آب از تراز نرمال به تراز بحرانی i -ام (H_{cr}^i) کوچکتر و یا مساوی T_i باشد، نشانه بزرگتر بودن سیلاب در حال وقوع از سیلاب

شکل ۴. طرح شماتیک ترازهای بحرانی، زمان‌های بحرانی و میزان بازشدگی‌ها در مدل پیشنهادی

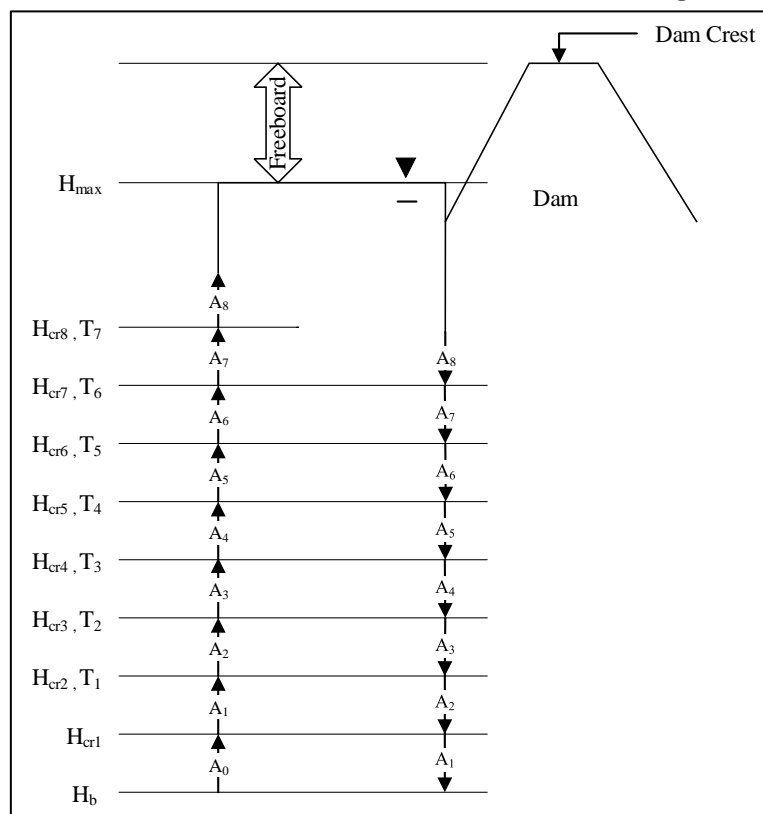


Fig. 4. Schematic layout of critical level, critical times and openings in the proposed model

شکل ۵. فلوچارت مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز عملکرد سرریزهای درجه‌دار

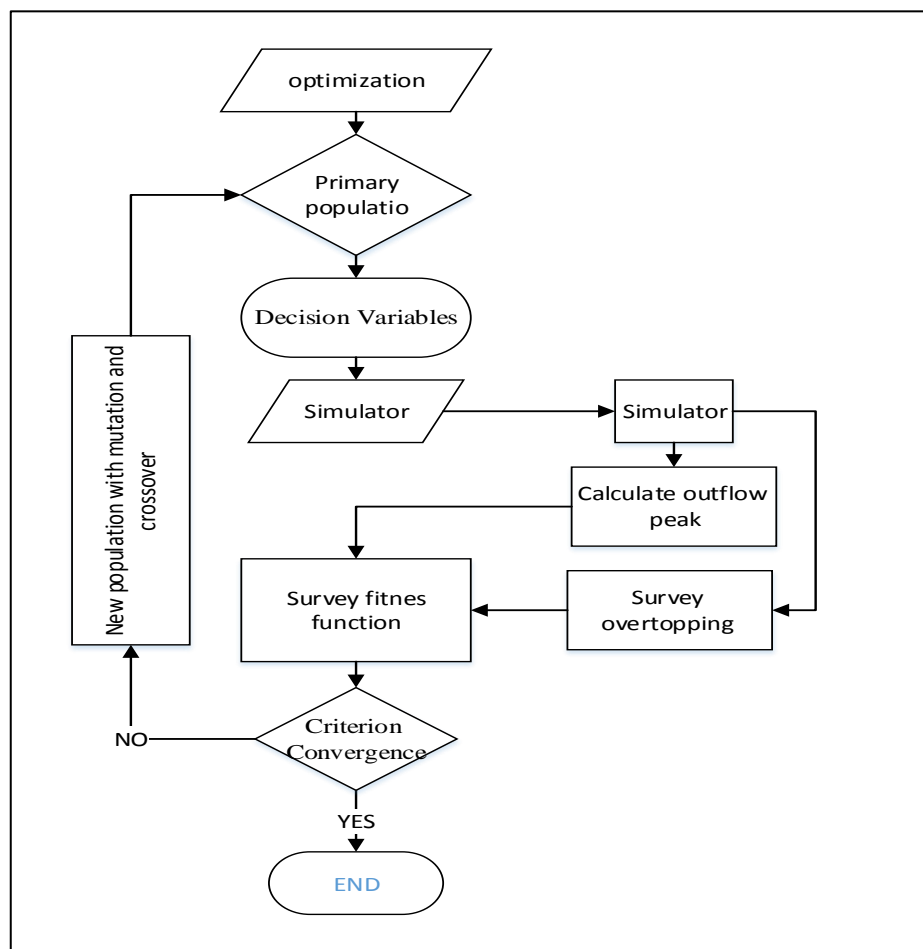


Fig. 5. Simulator – optimizer flowchart of gated spillway operations

آب از تراز بحرانی مذکور ($t < T_7$)، دریچه‌های سرریز باید کاملاً باز شوند. این عمل برای جلوگیری از روگذری سیلاب از سد و حفظ ایمنی سد صورت می‌گیرد. فلوچارت شکل (۵) اندرکنش میان اجزای گوناگون مدل‌های توسعه یافته شبیه‌ساز و بهینه‌ساز را نمایش می‌دهد.

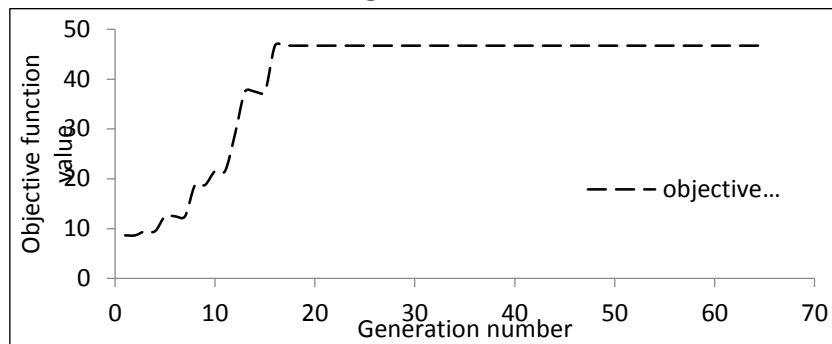
4- نتایج و بحث

تغییرات هیدروگراف خروجی می‌تواند بیانگر میزان خسارت احتمالی وارد شده به پایین دست مخزن باشد. در ادامه با هدف کاهش بیشینه هیدروگراف خروجی، تخلیه سیل از طریق سرریز مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل (۶) بعد از تقریباً ۲۰ تکرار، تغییرات محسوسی در پاسخ‌های حاصل از مدل مشاهده نمی‌شود. منحنی فرمان با توجه به نتایج بهینه حاصل از اجرای مدل، در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل (۴)، برای باز کردن دریچه به مقدار تعیین شده مرحله بعدی، باید دو شرط زمان و تراز بحرانی کنترل شود (برای نمونه کنترل زمان بحرانی T_7 و H_{cr}^0 به منظور باز شدگی A_8). هنگام وقوع سیلاب وقتی تراز آب مخزن بالا می‌آید، برای تعیین میزان بازشدگی دریچه‌ها و صدور فرمان دبی تخلیه، لازم است که تراز مخزن با ترازهای بحرانی و تغییرات زمانی تراز آب مخزن با زمان‌های بحرانی قیاس شود. در مدل پیشنهادی، تغییرات تراز آب مخزن با زمان به عنوان یک پارامتر کمکی برای بهره بردار برای حدس بزرگی سیلاب و انتخاب میزان بازشدگی مناسب است.

در واقع این ۹ تراز بحرانی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که قابل تعمیم برای هر سیلاب ورودی به مخزن هستند. هرچه زمان عبور تراز آب مخزن از H_{cr}^0 کاهش یابد به معنی افزایش حجم سیلاب ورودی به مخزن است. پس با عبور سریع تراز

شکل (۶) تغییرات تابع هدف



Figure(6) Objective function changes

جدول ۳. منحنی فرمان بهره برداری از سد مه‌آباد برای کلیه سیلاب‌ها با توجه به ترازهای بحرانی (بازشدگی دریچه‌ها و زمان‌های بحرانی)

critical level (AMSL)	Optimal openings(meter)	critical time (minute)
H_b	1358.5 ذخیره سازی	-
H_{cr}^1	A_1 0.0	-
H_{cr}^2	A_2 0.0	T_1 410
H_{cr}^3	A_3 0.25	T_2 470
H_{cr}^4	A_4 0.50	T_3 480
H_{cr}^5	A_5 0.75	T_4 500
H_{cr}^6	A_6 2.0	T_5 520
H_{cr}^7	A_7 3.75	T_6 460
H_{cr}^8	A_8 5.50	T_7 530
H_{cr}^9 - MWL	1360.10	-

Table. 3. Rule command curve of Mahabad Dam according to critical levels for all floods (gate openings and critical times)

آب به ترازهای بحرانی برای هر سیلاب در جدول (۴) آورده شده است، که با توجه به مقادیر اختلاف زمان نشان داده شده در جدول، زمان کافی برای انتخاب سیاست بهره‌برداری موجود است. با توجه به جدول (۴)، زمان رسیدن سیلاب پنج ساله به تراز کنترلی اول ۴۱۰ دقیقه است. در صورت وقوع سیلابی بزرگتر از سیلاب پنج ساله، زمان کوتاه‌تر از ۴۱۰ دقیقه بوده و مطابق جدول (۴) در صورت وقوع سیلاب مرحله بعد (ده ساله) زمان رسیدن به تراز کنترلی اول ۳۶۰ دقیقه خواهد بود. به طور مشابه اختلاف زمان رسیدن سیلاب ده و بیست ساله به تراز کنترلی دوم ۵۰ دقیقه، سیلاب بیست و نیز پنجاه ساله به تراز کنترلی سوم ۴۰ دقیقه، سیلاب پنجاه و صد ساله به تراز کنترلی چهارم ۳۰ دقیقه، سیلاب صد و هزار ساله به تراز کنترلی پنجم ۹۰ دقیقه، سیلاب هزار و ده هزار ساله به تراز کنترلی ششم ۵۰ دقیقه و سیلاب ده هزار و PMF به تراز کنترلی هفتم ۵۰ دقیقه خواهد بود. این اختلاف کمک به پیش بینی سیلاب در حال وقوع و انتخاب سیاست بهینه توسط بهره‌بردار می‌نماید.

این جدول ترازهای بحرانی ۹ گانه را به همراه میزان بازشدگی دریچه‌ها و زمان‌های بحرانی در حالت بهینه نشان می‌دهد که توان مدیریت کلیه سیلاب‌های ورودی به مخزن را داراست. از نتایج قابل توجه مدل توسعه یافته، عدم استفاده از میزان بازشدگی بیشینه در مدیریت سیلاب است. دلیل این امر آغاز رها سازی آب در مراحل اولیه و متناسب بودن توان سرریز با سیلاب طرح است.

با توجه به جدول، روند افزایشی در میزان باز شدگی دریچه‌ها مشاهده می‌شود که به دو دلیل افزایش حجم سیلاب ورودی و همچنین ضرایب درجه اهمیت به کار رفته برای مدیریت سیلاب است. در این پژوهش برای در نظر گرفتن درجه اهمیت هر سیلاب بر اساس احتمال وقوع سیلاب، درجه اهمیت معادل با معکوس دوره بازگشت سیلاب انتخاب شده است. نتایج حاصل از مدل بهینه‌ساز حاکی از بازشدگی کوچکتر برای سیلاب‌های با دوره بازگشت کوچک است. دلیل نامنظمی زمان بحرانی به دلیل تفاوت هیدروگراف‌های ورودی و اختلاف در میزان بازشدگی هر مرحله است. زمان رسیدن

جدول ۴. زمان رسیدن به ترازهای بحرانی (دقیقه)

Return period	critical levels							
	H _{cr} ¹	H _{cr} ²	H _{cr} ³	H _{cr} ⁴	H _{cr} ⁵	H _{cr} ⁶	H _{cr} ⁷	H _{cr} ⁸
5	410							
10	360	470						
20		420	480					
50			440	500				
100				470	520			
1000					430	460		
10000						410	530	
PMF							480	560
time differenc (minutes)	50	50	40	30	90	50	50	-

Table 4. Time to reach critical levels (minutes)

جدول ۵. نتایج حاصل از دستورالعمل پیشنهادی برای بهره برداری از سرریز سد مهاباد

Return period (year)	Arriving Time to Peaks (hr)	Outflow Peaks (m3/s)	Inflow Peaks (m3/s)	Peak reduction (%)	Maximum water level (m)
5	-	0	171	100	1359.62
10	-	0	233	100	1360.00
20	27	65.5	314	79	1359.89
50	23	120.5	413	70	1360.02
100	22.5	191.5	505	62	1360.04
1000	22	537	897	40	1360.04
10000	21	935.5	1300	28	1360
PMF	20	1294	1670	22	1360.08

Table 5. Results of the proposed guidelines for the operation of Mahabads Dam spillway

گرفتن زمان بالا آمدن آب در مخزن به عنوان پارامتر موثر در تصمیم گیری، کاهش بیشینه دبی در سیلاب خروجی مشاهده می‌شود. این نکته به خوبی برای سیلاب‌های زیر ۱۰۰۰ سال مشهود است. این نوع عملکرد سبب می‌شود حجم بیشتری از سیلاب ورودی به مخزن در محدوده حجم کنترل سیلاب ذخیره شده و درجه فروکش برای سیلاب ورودی به مخزن افزایش یابد. از این رو این مدل بهینه‌ساز امکان استفاده بیشتر از ظرفیت مخزن را فراهم می‌کند.

درصد کاهش بیشینه سیلاب‌های مختلف و زمان تأخیر بیشینه سیلاب خروجی نسبت به سیلاب ورودی، در شکل (۷) آورده شده است. با توجه به نتایج، با افزایش دوره بازگشت سیلاب، درصد کاهش بیشینه و زمان تأخیر روند نزولی دارد. این امر به سه دلیل (۱) تفاوت در حجم سیلاب ورودی، (۲) عدم حجم کافی برای کنترل سیلاب‌ها در مخزن و (۳) کاهش ضریب وزنی تابع هدف با بزرگ شدن سیلاب، است.

نتایج حاصل از بکارگیری دستورالعمل پیشنهادی برای بهره برداری از سرریز سد مهاباد برای سیلاب‌های با دوره بازگشت پنج، ده، بیست، پنجاه، صد، هزار، ده هزار و PMF در جدول (۵) آمده است. جدول (۵) بیانگر این مطلب است که در صورت استفاده از دستورالعمل پیشنهادی، بیشینه سیلاب خروجی در هنگام رخداد سیلاب PMF، به میزان ۲۲ درصد کاهش خواهد یافت و از ۱۶۷۰ متر مکعب بر ثانیه به ۱۲۹۴ متر مکعب بر ثانیه خواهد رسید. درصد کاهش بیشینه سیلاب خروجی برای سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف در بازه ۲۲ تا ۱۰۰ درصد قرار می‌گیرد. از ویژگی‌های بارز مدل پیشنهادی، بالاتر بودن تراز بیشینه آب مخزن نسبت به تراز بحرانی متناظر با هر سیلاب است. نتایج نشان می‌دهد که به کارگیری مدل پیشنهادی، سبب فروکش سیلاب ورودی و امکان استفاده بهینه از ظرفیت مخزن را فراهم می‌آورد. همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود با در نظر

شکل ۷. درصد کاهش سیلاب و زمان تأخیر سیلاب خروجی نسبت به سیلاب ورودی برای دوره بازگشت‌های مختلف

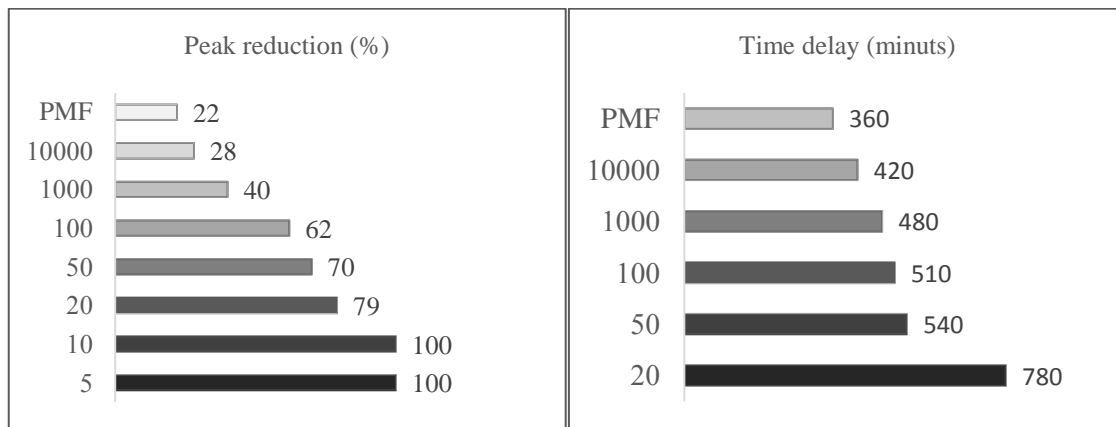


Fig. 7. Peak reduction and time delay outflow to inflow for different return period

دانشگاه تهران که در قالب مطالعات آنالیز شکست سد مخزنی مهاباد و تهیه طرح اقدام ضروری تهیه شده، مقایسه شد [22]. منحنی فرمان ارائه شده توسط این موسسه با هدف کمینه کردن سیلاب پایین دست و بیشینه کردن ذخیره آب مخزن سد با رعایت شرایط ایمنی سد شبیه سازی شده است. مدل فوق شامل ۸ مرحله و هفت تراز بحرانی است که در آن زمان، عاملی برای تصمیم‌گیری نیست و مشابه مطالعات گذشته با افزایش تراز آب در مخزن و عبور تراز آب از حد بحرانی، باز شدگی دریچه افزایش می‌یابد. نتایج خروجی‌های مدل موسسه آب دانشگاه تهران در جدول (۶) آورده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی در این مطالعه با منحنی فرمان ارائه شده توسط موسسه آب دانشگاه تهران، مشاهده می‌شود که مدل پیشنهادی علاوه بر ذخیره‌سازی بیشتر آب در مخزن سد و کاهش بیشتر بیشینه سیلاب خروجی، تأخیر زمانی بیشتری نیز در رسیدن به بیشینه خروجی دارد.

به منظور انتخاب میزان رهاسازی هر مرحله با توجه به درجه اهمیت مدیریت هر سیلاب، ضریب وزنی تابع هدف بر اساس احتمال وقوع تعیین شده است. بنابراین با افزایش شدت سیلاب احتمال وقوع و ضریب وزنی کاهش یافته، در نتیجه درصد کاهش بیشینه سیلاب ورودی نیز کمتر خواهد بود.

از مزایای به کارگیری سیاست‌های مناسب بهره‌برداری سرریز، ایجاد تأخیر در زمان رخداد بیشینه سیلاب خروجی نسبت به سیلاب ورودی بوده که سبب فراهم شدن زمان بیشتر برای کنترل محدوده پایین‌دست در هنگام وقوع سیلاب می‌باشد. با توجه به سابقه سیلاب‌های به وقوع پیوسته، زمان بیشینه سیلاب ورودی برابر با ۱۴ ساعت است. با کمک مدل بهره‌برداری پیشنهادی، زمان تأخیر برای سیلاب با دوره‌های بازگشت متفاوت، مابین ۶ الی ۱۳ ساعت خواهد بود. برای مقایسه مدل پیشنهادی در این مطالعه، نتایج آن با مدل ارائه شده توسط موسسه آب

جدول ۶. نتایج حاصل از مدل بهره‌برداری مؤسسه آب دانشگاه تهران

Return period (year)	Arriving Time to Peaks (hr)	Outflow Peaks (m3/s)	Inflow Peaks (m3/s)	Peak reduction (%)	Maximum Water Level (m)
5	14	150	171	12.28	1358.68
10	18	250	233	-7.3	1358.75
20	16	300	314	4.46	1358.82
50	17	400	413	3.15	1358.92
100	18	500	505	0.99	1359
1000	15	900	897	-0.99	1358.77
10000	16	1180	1300	9.23	1359.12
PMF	۱۳	۱۱۸۰	۱۶۷۰	۲۹،۳۴	1360.1

Table 6. Results of tehran university of water institute operation model

شکل ۸. هیدروگراف ورودی و خروجی برای سیلاب‌های صد، هزار، ده هزار ساله و سیلاب طرح

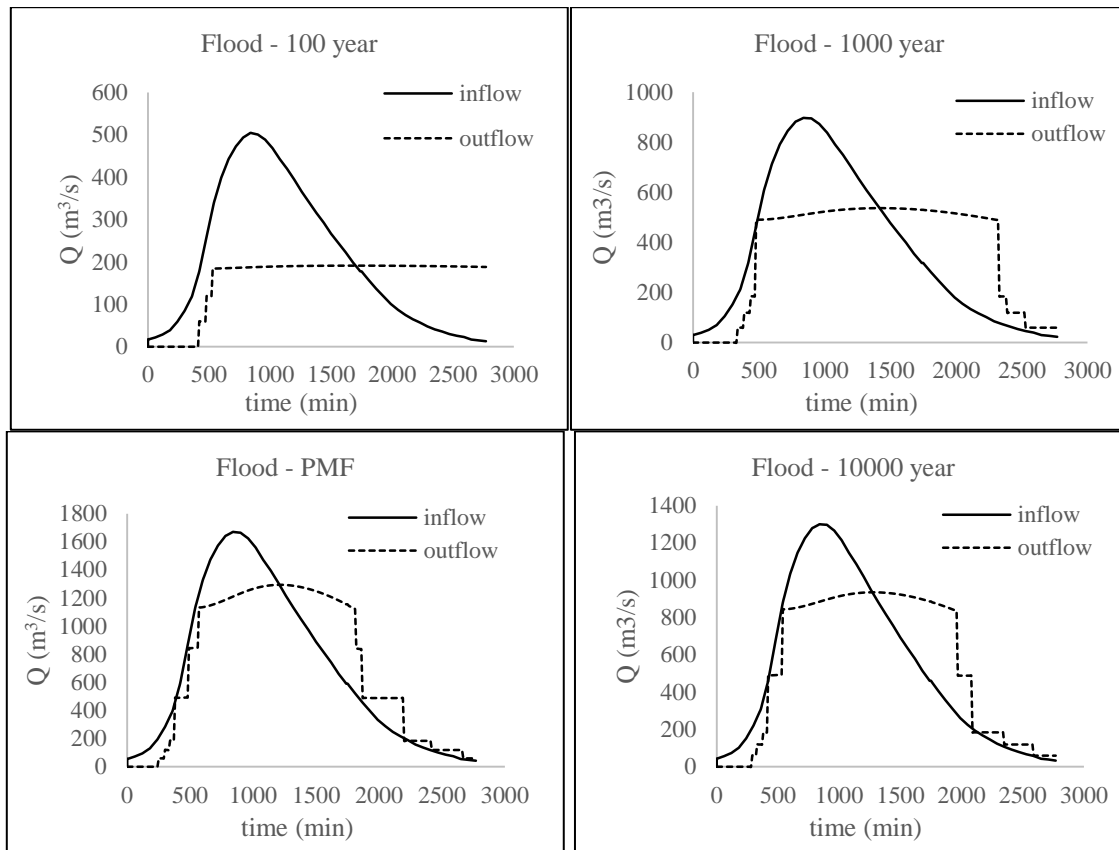


Fig. 8. inflow and outflow hydrograph for 100,1000,10000 and PWF floods

بررسی کارایی منحنی فرمان پیشنهادی و الگوریتم بهینه‌سازی در مورد سایر سدهای کشور می‌تواند در تدقیق روش شناسی یا تقویت اعتمادپذیری آن برای کاربرد در زمان واقعی موثر باشد. همچنین در شرایطی که ارتفاع حجم کنترل سیلاب مخزن قابل ملاحظه باشد، اضافه شدن ترازهای بحرانی به متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی می‌تواند کارگشا باشد.

تشکر و قدردانی

از موسسه آب دانشگاه تهران به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات و گزارشات طرح "مطالعات آنالیز شکست سد مخزنی مهاباد و تهیه طرح اقدام ضروری" قدردانی می‌کنیم.

References

[1] Sangsefidi, Y., Mehraein, M., Ghodsian, M. 2015. Numerical simulation of flow over labyrinth spillways. Scientia Iranica, Trans. A, 22(5), 1779 – 1787.

[2] 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

برای مقایسه میزان تغییرات بیشینه سیلاب ورودی و سیلاب خروجی با توجه به مدل بهینه‌سازی، هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت صد، هزار، ده هزار ساله و سیلاب طرح به عنوان نمونه در شکل (۸) نشان داده شده‌اند که تغییرات دبی ورودی و خروجی را در زمان نمایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داده‌اند که با به کار گیری الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن میزان زمان‌های بحرانی و بازشدگی بهینه دریچه‌ها، مدل توانست بیشینه دبی سیلاب خروجی را برای دوره بازگشت‌های مختلف، مستهلک نماید. همچنین با در نظر گرفتن متغیر زمان به عنوان متغیر تصمیم می‌توان بخش بزرگتری از حجم کنترل سیلاب را در هنگام وقوع سیلاب‌های با دوره بازگشت کوتاه استفاده و سیاست بهره‌برداری کارآمدتری ارائه نمود. زمان تأخیر برای سیلاب با دوره‌های بازگشت متفاوت، مابین ۶ الی ۱۳ ساعت خواهد بود.

- [14] Sharif M., and Wardlaw R. (2000). Multi Reservoir Systems Optimization Using Genetic Algorithms Case Study. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, PP. 255-263.
- [15] Rustami H. 1382. Model of operation of Spillway Gate to control flood. Master's Thesis, Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- [16] Takashi A. 1385. Optimizing the operation of the reservoir at the time of the flood. Master's Thesis, University of Tehran. (In Persian)
- [17] Salehi A. 2011. Comparison & Two Operation Rules for Gated Spillways; Application to Karkheh Dam. *Hydraulics and Waterways*, pp. 2468-2477.
- [18] Salehi A. 1390. Optimization of Multi-Stage Operation of Spillway Gates for flood control. Master's Thesis, Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- [19] Acanal N. Haktanir T. 2000. Six-stage flood routing for dams having gated spillways. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23)6(, 4112.
- [20] Bagis, A. and Karaboga, D. 2004. Artificial neural networks and fuzzy logic based control of spillway gates of dams. *Hydrological Processes*, 18(13), 2485-2501.
- [21] Bagis, A. & Karaboga, D. 2007. Evolutionary algorithm-based fuzzy PD control of spillway gates of dams. *Journal of the Franklin Institute*, 344:8, 1039-55
- [22] Tehran University of Water Institute. 1391. The final report of Mahabad reservoir failure breakdown analysis and preparation of the necessary action plan. (In Persian)
- [23] S.M. Hosseini & J. Abrishami .2006. Open – Channel Hydraulics. (In Persian)
- Engrg. AIENG/92. Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K., 501-514. Technical publications, 1987.
- [3] Hasebe M., and Nagayama Y. 2002. Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support. *Advances in Engineering Software*, 2002, No. 33, PP.245-260.
- [4] Karaboga, D., Bagis, A. & Haktanir, T. 2004. Fuzzy Logic Based Operation of Spillway Gated of Reservoirs during Floods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9:6, 544-49.
- [5] Karaboga, D., Bagis, A. & Haktanir, T. 2008. Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number. *Applied Soft Computing*, 8:1, 232-38.
- [6] Sinske B. H.1985. Gate Operation - Flood Control versus Dam Safety. ICID.
- [7] 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 Des Sciences Hydrologiques*, 44:2, 163-72.
- [8] Haktanir T. Kisi O. 2001. Ten-stage discrete flood routing for dams having gated spillways. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6:1, 86-90.
- [9] Zhao T. Zhao J. Lund J. & Yang D. 2015. Optimal Hedging Rules for Reservoir Flood Operation from Forecast Uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*• (ASCE)WR.1943-5452.0000432. [3] Bos, M. G; “Discharge measurement structures”. International Institute For Land Reclamation and Improvement, Wageningen, the Netherlands, 1976.
- [10] Haktanir T. Citakoglu H. & Acanal N. 2013. Fifteen-stage operation of gated spillways for flood. *Hydrological Sciences Journal*, 58:5, 1013-1031. routing management through artificial reservoirs
- [11] Zargar M. Samani V. & Haghghi 2016. Optimization of gated spillways operation for flood risk management in multi-reservoir systems. *Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*. ISSN 0921-030X.
- [12] East V. AND Hall m. j. 1994. Water Resources System Optimization Using Genetic Algorithms. *Hydroinformatics*, 1994, Proc., 1Stnt. Conf. on Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, Netherland, PP. 225-231.
- [13] Fahmy H. S., King J. P., Wentzel M. W. and Seton J. A. 1994. Economic Optimization of River Management Using Genetic Algorithms. Paper No. 942034, ASAE, Int, Summer Meeting, St. Joseph, Mich.

Developing Rule Curve for Operation of Spillway Gates using Sequential Approach: Case Study of Mahabad Dam

Sh. Mohseni Bilehsavarchi¹, B. Zahraie^{2*}, M. Banihashemi²

1- Ph.d student of Hydraulic Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Associate Professor, School of Civil Engineering, University College of Engineering., University of Tehran

Abstract:

Proper operation of gated spillways, which plays an important role in safety of dams during flood event, remains as a prominent challenge. Although telecommunication networks used in flood warning systems facilitate flood management by dams to some certain level but accurate prediction of both the magnitude and timing of peak flood flows with few days of lead time is not still possible. Therefore, operation of gated spillways may mostly benefit from the observed reservoir water level and observed flood discharges in the upstream gaging stations. In Iran, many of river-reservoir systems face severe floods every year. Most of these reservoirs are operated based on engineering judgments of dam personnel and static policies such as rule curves, which are not properly formulated for flood events with various return periods.

In this study, we proposed a rule curve for operation of gated spillways using sequential approach and its performances was compared with previously developed operation policies. For this purpose, nine stages as critical control levels were assigned and spillway gate openings associated with each critical level were determined for Mahabad Dam, located in northwest of Iran, as the case study of this research. Each control level was related to given percentage of the design flood volume. When using the proposed rule curve, as a critical control level is reached, the discharge through the spillway and related opening of its gate are accordingly increased. The gate openings associated with each critical water level were optimized using a real coded Genetic Algorithm (GA).

This attitude or policy of nine -stage operation includes an appropriate algorithm for determining critical levels, development of operational models spillway gates, calculation of gate opening in each stage, and applying the model to the case study of Mahabad dam. This study adopts the nine stages approach for which nine control levels and gate openings are determined by GA.

As it mentioned before, the nine critical levels should be placed in flood retention reservoir between initial water surface elevation and maximum water surface elevation. So, it will have crucial role to determinate gate opening spillway during flood events, and increase of flood storage in the flood retention reservoir.

This model was employed to route a flood with the same return period of design spillway flood through Mahabad reservoir. The performance of the proposed rule curve was then assessed by determining the amount peak flow discharge reduction. The results of the case study shows superiority of the proposed rule curve over previously developed operation policies for flood control in Mahabad Dam. One of the main advantages of the proposed methodology is that for using the proposed rule curve not flood forecast data is needed and therefore, it can be considered as a reliable tool for operation of gated spillways when there is no flood warning system in the upstream basin.

The future studies can be focused on testing the proposed algorithm on other reservoirs. In the cases of dams with large flood control volumes, critical control levels can also be considered as decision variables of the GA optimization model.

Keywords: Genetic Algorithm, Flood Control, Gated Spillway, Operation Policy, Flood Hydrograph.