بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در شرایط بحرانی وقوع سیلاب براساس الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت

مطالعه‌ی موردی: سد مخزنی البرز

معصومه خادمی:دانشجوی دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
رامین فضل‌اولی*: دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، raminfazl@yahoo.com
علیرضا عمادی: دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

چکیده

سد مخزنی چندمنظوره‌ی البرز در حوضه‌ی آبریز پاشاکلای بابل در استان مازندران واقع شده است. بهره‌برداری بهینه از حجم آب ذخیره شده در مخزن این سد از موضوعات قابل توجه مدیران و بهره‌برداران است. در تهیه‌ی منحنی فرمان سد البرز، هدف کنترل سیلاب مطرح نگردیده و منحنی فرمان صرفاً از نقطه‌نظر بهره‌برداری مناسب برای تأمین نیازهای شرب و کشاورزی تهیه شد. با توجه به حداکثر سیلاب محتمل سد (۱۴۶۶/۵ متر مکعب بر ثانیه) و حداکثر ظرفیت تخلیه‌کننده‌های تعبیه شده در سد (۱۱۸۳ متر مکعب بر ثانیه) و عدم نصب سرریز جانبی و فیوز پلاگ در محل سد، تهیه‌ی منحنی فرمان سد در شرایط سیلابی از الزامات است. در این پژوهش، به‌منظور مدیریت و مهار سیلاب‌های ورودی، یک مدل ریاضی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی سیلاب تهیه شد که قابلیت انجام روندیابی بهینه‌ی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف، با هدف کمینه‌سازی خسارت ناشی از سیلاب را دارد. در صورت تجهیز نمودن حوضه‌ی آبریز سد به سیستم هشدار سیلاب به‌منظور اطلاع از زمان وقوع و حجم سیلاب، می‌توان به مدیریت بهینه‌ی مخزن در شرایط بحرانی وقوع سیلاب و کمینه‌سازی خسارت ناشی از آن پرداخت. نتایج نشان داد که برای به حداقل رساندن خسارت ناشی از سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله و PMF، به ترتیب به ۱۰ و ۳۵ ساعت پیش تخلیه‌ی مخزن نیاز است تا در لحظه‌ی ورود سیلاب، تراز مخزن به ترتیب حدود ۰/۵ و ۴ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: *کمینه‌سازی خسارت سیلاب، مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب، مهار سیلاب*

Reservoir Operation Optimization in Critical Conditions of Flood Occurrence Based on Simulated Annealing Algorithm

Case Study: Alborz Dam

Masoome Khademi[1], Ramin Fazloula[2*], Alireza Emadi[3]

Abstract

Alborz multi-purpose reservoir dam is located in the Pashakola Babol basin in Mazandaran province. Optimal operation of the water volume stored in the dam reservoir is significant subject for managers and operators. In the rule curve prepared for Alborz dam, the purpose of flood control is not considered and rule curve was prepared only from the standpoint of properly operation for drinking and agricultural needs. According to the probable maximum flood of dam (1466.5 m3/s) and the outlets maximum capacity embedded in the dam (1183 m3/s) and lake of side spillway and fuse plug at the dam site, preparing the rule curve in flood conditions is necessary. In this study, in order to management and estimation of entering flood, a simulation-optimization mathematical model of flood was prepared which is capable of flood optimal routing for different return periods, with the goal of reducing flood damage. In case of equipping the dam basin to flood warning system in order to information of the flood time and volume, can be paid to reservoir optimal management in critical conditions of flood occurrence and reducing flood damage. The results were showed that for reducing 10000 years flood damage and PMF damage, respectively 10 and 35 hours before emptying of reservoir is needed until on the time of flood entering, the reservoir level is respectively at least 0.5 and 4 meters below the normal level.

Keywords: *Flood Control, Flood Simulation-Optimization Model, Minimization of Flood Damage*

1 Ph.D. Student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2 Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University; Email: raminfazl@yahoo.com
3 Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

مقدمه

بهره‌برداری بهینه و مناسب از منابع آب خصوصاً در شرایط خشکسالی و سیلابی یکی از وظایف مهم مدیران منابع آب است. مدیریت سیل با هدف کاهش پتانسیل اثرات نامطلوب سیل بر انسان‌ها، محیط‌زیست و اقتصاد یک منطقه صورت می‌گیرد. کنترل سیلاب شامل فرایندهای خاصی است که با فراهم آوردن و بهره‌برداری مناسب و صحیح از سازه‌های طراحی شده، اثرات تخریبی سیل را رفع یا کاهش می‌دهد که این امر با بهره‌برداری صحیح، ذخیره‌سازی، محدودسازی و انحراف جریان سیلاب تا حدی که از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر باشد، انجام می‌شود [۱]. یخکشی [۲]، به‌منظور مدیریت سیلاب در سیستم رودخانه - مخزن سد نرماب، سناریوهایی را برای حجم کنترل سیل در مخزن سد در نظر گرفت و اقدام به روندیابی سیل در مخزن نمود. این محقق پس از بررسی ۲۸ سناریو و پهنه‌بندی سیلاب توسط مدل هیدرولیکی HEC-RAS میزان خسارت ناشی از سیلاب در پایین‌دست محل سد را به ازای تمام سناریوها و دوره‌های بازگشت محاسبه نمود. نتایج نشان داد که سد مخزنی نرماب کارایی بسیار خوبی در کاهش دبی اوج سیلاب و خسارت ناشی از سیلاب بر اراضی منطقه دارد. یزدی[۳]، یک مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی را برای طراحی بهینه‌ی سیستم‌های ترکیبی کنترل سیلاب با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیلاب تدوین نمود. به‌این منظور مدل عددی MIKE11 را به‌عنوان مدل ریاضی هیدرولیک سیلاب برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف سیلاب به‌کار گرفت و برای تعیین طرح‌های بهینه با مدل بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II ترکیب نمود. نتایج نشان داد که مدل تلفیقی به‌خوبی توانسته اندرکنش طرح‌های مختلف را در تسکین و یا تشدید خسارت سیلاب تحت شرایط متغیر مکانی و زمانی سیلاب‌ها مدل‌سازی نموده و جانمایی مناسب طرح‌های کنترل سیلاب را به همراه سطح طراحی آن‌ها در سطح حوضه‌ی آبریز ارائه نماید. کابوسی و جلینی [۴]، به بررسی شاخص‌های کارایی مخازن تأخیری و تأثیر آن‌ها بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب در حوضه‌ی جعفرآباد استان گلستان پرداختند. برای این منظور فرایند بارش- رواناب و روندیابی سیلاب در مخازن را با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که در دوره‌های بازگشت مختلف، مخزن تأخیری بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب خروجی از حوضه تأثیر داشته اما این تأثیر از نظر آماری معنی‌دار نبود. بررسی عملکرد مخازن نشان داد که کارایی مخزن در کنترل سیلاب تنها به حجم مخزن بستگی ندارد بلکه مشخصات ژئومتری مخزن و سرریز نیز بر آن تأثیرگذار است. ملک‌محمدی و همکاران [۵]، با تهیه‌ی مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه مدت با هدف مهار سیلاب و بلند مدت با دو هدف مهار سیلاب و تأمین نیاز به روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، به بهینه‌سازی بهره‌برداری سدهای سری دز و بختیاری در شرایط سیلابی پرداختند و کارایی مناسب مدل تهیه شده را در کاهش خسارت سیلاب و تأمین نیاز تأیید نمودند. هی و همکاران [۶]، بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (CPSO)، بهره‌برداری مخازن کنترل سیلاب را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن را با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، تکامل تفاضلی (DE) و ازدحام ذرات (PSO) مقایسه نمودند. نتایج، کارایی الگوریتم CPSO را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان داد. این مدل با به حداقل رساندن دبی اوج سیل، موجب کاهش مخاطرات سیلاب خواهد شد. چو و یو [۷]، چارچوب‌های کلی قوانین بهره‌بردای برای کنترل سیلاب مخزن را در طول سه گام ارائه نمودند. در این پژوهش، مدل شبیه‌سازی توسعه یافته با نام الگوریتم بهینه‌سازی محدود با تقریب درجه دوم (BOBYQA) به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی مؤثر برای تعیین پارامترهای بهینه تهیه و با استفاده از سابقه‌ی جریان ۵۹ سیل تاریخی و حداکثر سیلاب محتمل، قوانین رهاسازی از مخزنی در تایوان تخمین زده شد. این قوانین بهینه‌سازی اهداف بهره‌برداری شامل ایمنی سد، کاهش سیلاب و دسترسی کافی ذخیره‌ی آب در پایان دوره‌های بهره‌برداری را برآورد می‌نماید. لو و همکاران [۸]، به‌منظور کنترل سیلاب در مخزن از یک روش بهینه‌سازی چند هدفه ترکیبی به نام (MO-PSO-EDA) که ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم برآورد توزیع (EDA) است، استفاده نمودند. هدف از این پژوهش به حداقل رساندن دو تابع هدف بالاترین تراز آب در بالادست و بیشترین حجم رهاسازی آب در طول دوره‌ی سیلاب است. مطالعات تجربی روی مسئله‌ی کنترل سیلاب مخزن آنکانگ[۱]، حاکی از عملکرد صحیح الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه‌ی ترکیبی مذکور است. زرگر و همکاران [۹]، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب پایین‌دست، با استفاده از مانور دریچه‌های سرریز سیستم‌های چند مخزنی فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب را پیشنهاد نمودند. هدف اصلی، تعیین میزان دبی خروجی در هر تراز بوده است که با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی بر پایه‌ی اصول الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی تعیین شد. اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در سدهای مورد مطالعه سبب کاهش قابل ملاحظه در خسارت سالانه‌ی سیلاب قابل انتظار شده که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی است. یوسل و همکاران [۱۰]، به‌منظور مدیریت کوتاه‌مدت بهره‌برداری سیلاب به مقایسه‌ی مدل‌های مختلف مخزن سد چند منظوره پرداختند. آن‌ها از شبیه‌ساز HEC-ResSim و بسته‌ی بهینه‌ساز RTC-Tools برای مسئله‌ی مدیریت سیلاب بزرگ در سدی در ترکیه استفاده نمودند. در پژوهش مذکور هدف از کنترل سیلاب، به حداکثر رساندن میزان تأمین آب در پایان مهار سیلاب و همچنین کاهش خسارت سیلاب در بازه‌ی رودخانه‌ی پایین‌دست بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، هر روش مزایا و معایب خود را دارد. رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی به علت دارا بودن ساختار ریاضی در مقایسه با روش مبتنی بر شبیه‌سازی که پارامترهای آن توسط کاربر تعریف می‌شود و همیشه تضمین راه حل مطلوب نیست، نتایج عینی‌تری را نشان می‌دهد. کای و همکاران [۱۱]، به‌منظور کنترل سیلاب مخزن از الگوریتم تکاملی چند هدفه استفاده نمودند. هدف کنترل سیلاب و

جدول ۱: مشخصات کلی سد مخزنی البرز

ترازها (متر از سطح دریا)	حداقل تراز آب	تراز نرمال سد	حداکثر تراز آب	تراز تاج سد
	۲۵۴/۰	۳۰۱/۰	۳۰۵/۸	۳۰۷/۰
احجام (میلیون متر مکعب)	حجم مرده	حجم مفید	حجم کل	حجم تنظیمی
	۶/۴۵	۱۳۵/۱۵	۱۴۱/۶۰	۱۹۲/۰۰

جدول ۲: مشخصات سیستم‌های تخلیه‌کننده سیلاب، آبگیرهای آبیاری و نیروگاه و تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد مخزنی البرز

موقعیت تخلیه‌کننده سیلاب	موقعیت آبگیرهای آبیاری و نیروگاه	موقعیت تخلیه کننده تحتانی
سرریز نیلوفری واقع در جناح چپ سد در تراز ۳۰۱/۰ متر	تونل انحراف آب شماره ۱ واقع در جناح چپ سد در تراز ۲۵۶/۷ متر	تونل انحراف آب شماره ۲ واقع در جناح چپ سد در تراز ۲۵۴/۰ متر
ظرفیت تخلیه‌کننده‌ی سیلاب (متر مکعب بر ثانیه)	ظرفیت آبگیرهای آبیاری و نیروگاه (متر مکعب بر ثانیه)	ظرفیت تخلیه‌کننده‌های تحتانی (متر مکعب بر ثانیه)
۱۰۱۰	۲۳	۱۵۰

تقاضای تأمین آب با یکدیگر در تضاد است. به‌منظور بررسی مدل توسعه یافته، چهار سیل به وقوع پیوسته در مخزن آنکانگ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد برنامه‌ی به دست آمده توسط MOEA/D-PWA به طور قابل توجهی می‌تواند به کاهش اوج سیلاب و تضمین ایمنی سد کمک نماید. در مطالعات پیشین به‌منظور شبیه‌سازی روندیابی سیلاب به ازای سناریوهای مختلف سیلاب با در نظر گرفتن ترکیبات مختلف از دوره‌های بازگشت سیلاب‌های ورودی و ترازهای مخزن سد در شروع سیلاب‌ها، از روش‌های هیدرولوژیکی غیر ذخیره‌ای و ذخیره‌ای (روندیابی مخزن و رودخانه) و هیدرولیکی HEC-HMS، HEC-RAS، MIKE11 و ... استفاده شد. هدف از انجام این پژوهش تهیه‌ی مدل ریاضی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه مدت (در مقیاس زمانی ساعتی) برای کاهش خسارت سیلاب است. در تهیه‌ی این مدل از ترکیب مدل بهینه‌سازی SA و مدل شبیه‌سازی روندیابی سیلاب براساس روندیابی ذخیره‌ای مخزن استفاده شد. در طول اجرای مدل بهینه‌سازی SA، برای محاسبه‌ی تابع هدف (میزان خسارت سیلاب)، مدل شبیه‌سازی روندیابی سیلاب به‌عنوان زیر برنامه فراخوانی می‌شود. اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تهیه شده تا زمانی ادامه خواهد یافت که مقدار بهینه‌ی تابع هدف حاصل شود. از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تهیه شده، می‌توان برای روندیابی هیدروگراف سیلاب‌های ورودی با دوره‌های بازگشت مختلف تا رسیدن به مقدار بهینه‌ی تابع هدف (کمینه‌سازی میزان خسارت سیلاب) استفاده نمود.

روش تحقیق

معرفی سد مخزنی البرز

سد مخزنی البرز روی رودخانه‌ی بابلرود در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر بابل احداث شده که به‌طور تقریبی در طول جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی واقع شده است. این سد از نوع خاکی سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی است و در سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسید. رودخانه‌های آذر رود، کرسنگ رود و اسکلیم رود سه رودخانه‌ی اصلی ورودی به مخزن سد البرز در حوضه‌ی آبریز پاشاکلا هستند [۱۲]. در تهیه‌ی منحنی فرمان سد البرز توسط شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، هدف کنترل سیلاب مطرح نگردیده و منحنی فرمان صرفاً از نقطه‌نظر بهره‌برداری مناسب برای تأمین نیازهای شرب و کشاورزی تهیه شده است. حداکثر سیلاب محتمل سد معادل ۱۴۶۶/۵ متر مکعب بر ثانیه است. با توجه به حداکثر ظرفیت تخلیه‌کننده‌های تعبیه شده در سد (شامل تخلیه‌کننده سیلاب و تخلیه‌کننده‌ی تحتانی) معادل ۱۱۸۳ متر مکعب بر ثانیه و عدم نصب سرریز جانبی و فیوز پلاگ در محل سد، تهیه‌ی منحنی فرمان سد در شرایط سیلابی از الزامات است [۱۳]. در حال حاضر بین حداکثر سیلاب محتمل سد و حداکثر ظرفیت تخلیه‌کننده‌های تعبیه شده در سد ۲۸۲ متر مکعب بر ثانیه اختلاف وجود دارد، لذا به پیشنهاد شرکت مهندسین مشاور ملی پاکستان (نسپاک) برای حفظ ایمنی و پایداری سد در زمان وقوع سیلاب، تراز مخزن سد تا پایان ماه آذر، حداقل ۳ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد (یعنی در تراز ۲۹۸ متر) نگه داشته می‌شود. مشخصات کلی سد مخزنی البرز در جدول ۱ و مشخصات سیستم‌های تخلیه‌کننده‌ی سیلاب، آبگیرهای آبیاری و نیروگاه و تخلیه‌کننده‌های تحتانی سد در جدول ۲ ارائه شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی SA

روش عددی SA یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با فرایند فیزیکی آنیلینگ به‌منزله‌ی یک فرایند فیزیکی در صنعت شبیه‌سازی شد [۱۴،۱۵]. ایده‌ی اصلی که روش بهینه‌سازی SA بر مبنای آن پایه‌گذاری شده، اولین بار توسط متروپولیس و همکاران [۱۶] مطرح شد. مهم‌ترین پارامترها و معیارهایی که قبل از کاربرد روش SA برای مسئله‌ی مورد نظر باید بررسی و تنظیم شوند عبارتند از [۱۷]: دمای اولیه (T_0)، فاکتور کاهش دما (B)،

طول گام تصادفی $\Delta X=Random/K_{div}$ (که در آن: Random گزینه‌ی تصادفی و K_{div} عددی که گزینه‌ی تصادفی به نسبت آن کوچک می‌شود)، پارامتر مربوط به شرط تعادل (EBS)، طول دوره (تعداد تکرارها در هر دوره برای کنترل شرط تعادل) (Epoch)، حداکثر تعداد تکرارها در هر دما برای رسیدن به شرط تعادل (It)، دمای نهایی مربوط به شرط توقف (T_f). به‌طور کلی مراحل مختلف استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SA به‌صورت زیر است [۱۷]:

۱. فراخوانی پارامترهای روش SA: $(T_0, B, \Delta X, EBS, Epoch, It, T_f)$؛
۲. ایجاد نمونه‌ی اولیه: ایجاد نمونه‌ی تصادفی S در فضای امکان‌پذیر با توجه به قیدهای مسئله و به‌دست آوردن مقدار تابع هدف $OF(S)$ به ازای این نقاط؛
۳. ایجاد نمونه‌ی ثانویه: ایجاد نمونه‌ی تصادفی S' در فضای امکان‌پذیر با توجه به قیدهای مسئله و به‌دست آوردن مقدار تابع هدف $OF(S')$ به ازای این نقاط؛
۴. بررسی تغییرات تابع هدف: $(D=OF(S')-OF(S))$ (فرض اولیه: پارامتر دما (T_r) برابر با دمای اولیه (T_0)). اگر به ازای نمونه‌ی تصادفی S' نسبت به S، در مقدار تابع هدف کاهش مشاهده شد $(D\le 0)$، این انتقال رو به پایین به‌عنوان جواب بهتر پذیرفته می‌شود و S' جایگزین S می‌گردد. اگر به ازای نمونه‌ی تصادفی S' نسبت به S، در مقدار تابع هدف افزایش مشاهده شد $(D>0)$، یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید $(R(0-1))$ و احتمال $P(D)=\exp(-D/T_r)$ محاسبه می‌شود. اگر $P(D)>R(0-1)$ شد، برای رهایی از دام نقاط بهینه محلی و همگرایی به سوی بهینه سراسری این انتقال رو به بالا نیز پذیرفته می‌شود و S' جایگزین S می‌گردد و در غیر این صورت مجدداً به گام ۳ برگشت داده خواهد شد.
۵. تکرار گام‌های ۳ و ۴ به تعداد طول دوره (Epoch)؛
۶. بررسی شرط تعادل: (در این پژوهش از شرط تعادل به‌صورت رابطه‌ی ۱ استفاده شد [۱۸]).

رابطه‌ی ۱:
$$\left|(F_e-F_g)/F_g\right|\le EBS$$

که در آن: F_e: میانگین تابع هدف در طی آخرین دوره در هر دما، F_g: میانگین تابع هدف در طی تمام دوره‌های پیشین در همان دما و EBS: مقدار ثابت کوچک و مثبت کنترل کننده شرط تعادل است که توسط کاربر انتخاب می‌شود و مقدار بهینه‌ی آن طی آزمایشات اولیه به‌دست می‌آید. اگر شرط تعادل برقرار شد، گام ۷ اجرا می‌شود. اگر شرط تعادل برقرار نشد، باید حداکثر تعداد تکرارها در هر دما برای رسیدن به شرط تعادل (It) بررسی شود. اگر تعداد دفعات تکرار گام‌های ۳ و ۴ به It رسید، گام ۷ اجرا می‌شود و در غیر این صورت به گام ۳ برگشت داده خواهد شد.

بررسی شرط توقف: (در این پژوهش رسیدن به دمای نهایی شرط توقف در نظر گرفته شد). اگر شرط توقف برقرار شد، جواب به‌دست آمده به‌منزله‌ی جواب بهینه (E) پذیرفته می‌شود. اگر شرط توقف برقرار نشد، باید پارامتر دما به میزان $T_{r+1}=B\times T_r$ کاهش داده شود و به گام ۳ برگشت نمود. در این پژوهش، براساس اصول و مبانی روش SA یک برنامه‌ی کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شد.

تابع هدف، متغیرهای تصمیم و قیود

در یک روش بهینه‌سازی مقادیر کلیه‌ی متغیرهای تصمیم به‌منظور کمینه یا بیشینه نمودن تابع هدف با اعمال یک‌سری قیدها و محدودیت‌ها، محاسبه می‌گردد. دو نکته‌ی مهم در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی، انتخاب تابع هدف و تدوین قوانین مناسب بهره‌برداری از مخزن است تا بتواند امکان استفاده از نتایج بهینه‌سازی در زمان واقعی را فراهم نماید. در این پژوهش، حداقل نمودن دبی اوج سیلاب خروجی در مقیاس زمانی ساعتی و کمبود آب در مقیاس زمانی ماهانه، به‌منزله‌ی تابع هدف در نظر گرفته شد که به‌صورت رابطه‌ی ۲ و ۳ تعریف می‌شود.

رابطه‌ی ۲:
$$OF=Min\left|Q_{peak}+Penalty\right|$$

که در آن OF: مقدار تابع هدف مربوط به دبی اوج سیلاب خروجی در مقیاس زمانی ساعتی؛ Q_{peak}: دبی اوج سیلاب خروجی و Penalty: تابع جریمه مربوط به اختلاف بین دبی اوج سیلاب خروجی و دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست سد در مدت سیلاب است. تابع جریمه، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی محدود را با مجموعه‌ای از مسائل بدون قید جایگزین می‌نماید. مسائل بدون قید با افزودن یک شرط به تابع هدف به وجود می‌آیند که متشکل از یک پارامتر پنالتی و میزانی از نقض قیود و محدودیت‌ها هستند. زمانی که محدوده‌ها نقض شوند، میزان نقض مخالف صفر و زمانی که محدوده‌ها نقض نشوند، میزان نقض برابر با صفر است.

رابطه‌ی ۳:
$$Penalty=\begin{cases}\sum_{t=1}^{n_f}\left(Q_{peak}-Q_{safety}\right) & \text{if } Q_{peak}>Q_{safety}\\ 0 & \text{if } Q_{peak}\le Q_{safety}\end{cases}$$

n_f: تعداد بازه‌های زمانی در هیدورگراف سیلاب خروجی، Q_{peak}: دبی اوج سیلاب خروجی و Q_{safety}: دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست سد. در این پژوهش، میزان خروجی بهینه ناشی از مهار سیلاب در ماه‌های سیلابی، به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم برای این مدل شامل ضرایب تخلیه‌ی سیلاب (۱۵ متغیر تصمیم معادل ۱۵ تراز بحرانی) و زمان و ضریب پیش تخلیه‌ی سیلاب (۲ متغیر تصمیم) است.

قیود قابل تعریف برای این مدل، به شرح زیر است:

۱. محدودیت ثابت نگه داشتن نسبی تراز سطح آب در مخزن که به‌صورت رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود. این اختلاف حجم نباید بیشتر از ۱۰ درصد باشد [۲۰]. در صورت حذف این محدودیت، حجم ذخیره‌ی مخزن در زمان خاتمه‌ی سیلاب می‌تواند بسیار بیشتر یا

کمتر از حجم ذخیره‌ی مخزن در زمان شروع سیلاب باشد. درصورتی که حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای سیلاب کاهش یابد، می‌تواند در تناقض با سایر اهداف بهره‌برداری از مخزن نظیر ذخیره‌سازی آب برای تولید برق و یا تأمین نیازهای آبی باشد. همچنین درصورتی که حجم ذخیره‌ی مخزن در زمان خاتمه‌ی سیلاب افزایش یابد، مخزن برای مهار سیلاب‌های محتمل بعدی آماده نخواهد بود.

رابطه‌ی ۴:
$$\left|\frac{S_I - S_N}{S_N}\right| \le 0.1$$

S_I: حجم اولیه‌ی ذخیره‌ی مخزن و S_N: حجم نهایی ذخیره‌ی مخزن در پایان سیلاب

۲. محدودیت حداقل و حداکثر حجم خروجی از مخزن که به‌صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود.

رابطه‌ی ۵:
$$0 \le R_t \le R_{max}$$

R_t: حجم جریان خروجی از مخزن در ماه t ام و R_{max}: حداکثر حجم جریان خروجی از مخزن (معادل حداکثر ظرفیت خروجی از تخلیه کننده‌های مخزن)

۳. محدودیت اختلاف حجم خروجی‌های متوالی از مخزن که به‌صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود. این اختلاف حجم نباید بیشتر از ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد [۲۰]. این محدوده با توجه به بازه‌ی تغییرات جریان ورودی در هیدروگراف ثبت شده‌ی متغیر در نظر گرفته شد. درصورت حذف این محدودیت، نوسانات شدیدی در هیدروگراف خروجی از مخزن ایجاد خواهد شد که عملاً تدوین سیاست بهره‌برداری را با مشکل مواجه می‌نماید.

رابطه‌ی ۶:
$$\left|\frac{R_{t+1} - R_t}{R_{t+1}}\right| \le m \quad , \quad 0.4 \le m \le 0.6$$

R_t: حجم جریان خروجی از مخزن در ماه t ام و R_{t+1}: حجم جریان خروجی از مخزن در ماه $(t+1)$ ام.

مدل شبیه‌سازی سیلاب

به‌منظور تهیه‌ی مدل شبیه‌سازی سیلاب در مخازن با سرریزهای بدون دریچه که بالاتر از تراز نرمال کنترلی روی میزان سرریز آب از سد وجود ندارد، به شرح ذیل عمل شده است:

۱. در ترازهای پایین‌تر از تراز نرمال سد (۳۰۱ متر)، حجم مفید مخزن (فاصله‌ی بین حداقل و حداکثر تراز ذخیره‌ی مخزن، ۲۵۹ و ۳۰۱ متر) به تعدادی پله (۱۵ پله) با فاصله‌ی مساوی تقسیم شده است. تراز قرارگیری این پله‌ها ثابت بوده که به‌عنوان ترازهای بحرانی تلقی شده است. تعداد ترازهای بحرانی برای هر سد به دلخواه کاربر با فاصله‌ی یکسان بین پله‌ها انتخاب شد. هر چه فاصله بین پله‌ها کوچک‌تر انتخاب شود، دقت محاسبات افزایش خواهد یافت. با رسیدن تراز سطح آب مخزن به این پله‌ها در زمان سیلاب، دبی ثابت از پیش تعیین شده‌ای از مخزن خارج شده که به‌عنوان دبی‌های بحرانی تلقی شده است. مهم‌ترین معیار تعیین دبی‌های بحرانی، استفاده از حداکثر ظرفیت مخزن برای کنترل سیلاب است، به گونه‌ای که بازشدگی دریچه نه آنقدر کم باشد که سد به ازای سیلاب‌های مختلف، خصوصاً سیلاب طراحی دچار روگذری شود و نه آنقدر زیاد باشد که بدون این‌که از ظرفیت مخزن برای ذخیره‌ی سیلاب استفاده شود، سبب خسارت ناشی از سیلاب در پایین‌دست شود. دبی خروجی در هر پله به گونه‌ای انتخاب شد که تخلیه‌کننده‌های سد، ظرفیت عبور آن را داشته باشد. بنابراین پس از تعیین دبی خروجی، کنترل شد که دبی هر پله، از دبی به دست آمده از رابطه‌ی دبی- اشل تخلیه‌کننده‌های سد بیشتر نشده باشد. همچنین دبی خروجی از هر پله در شاخه‌ی صعودی هیدروگراف به نحوی تعیین شد که بزرگ‌تر یا مساوی دبی پله‌ی قبل باشد و برعکس. دبی خروجی از هر پله با استفاده از مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی که در ادامه توضیح داده شده، تعیین شده است [۱۹].

۲. در ترازهای بالاتر از تراز نرمال سد (۳۰۱ متر)، دبی خروجی از مخزن سد معادل حداکثر ظرفیت سرریز در تراز سرریز در نظر گرفته شده است.

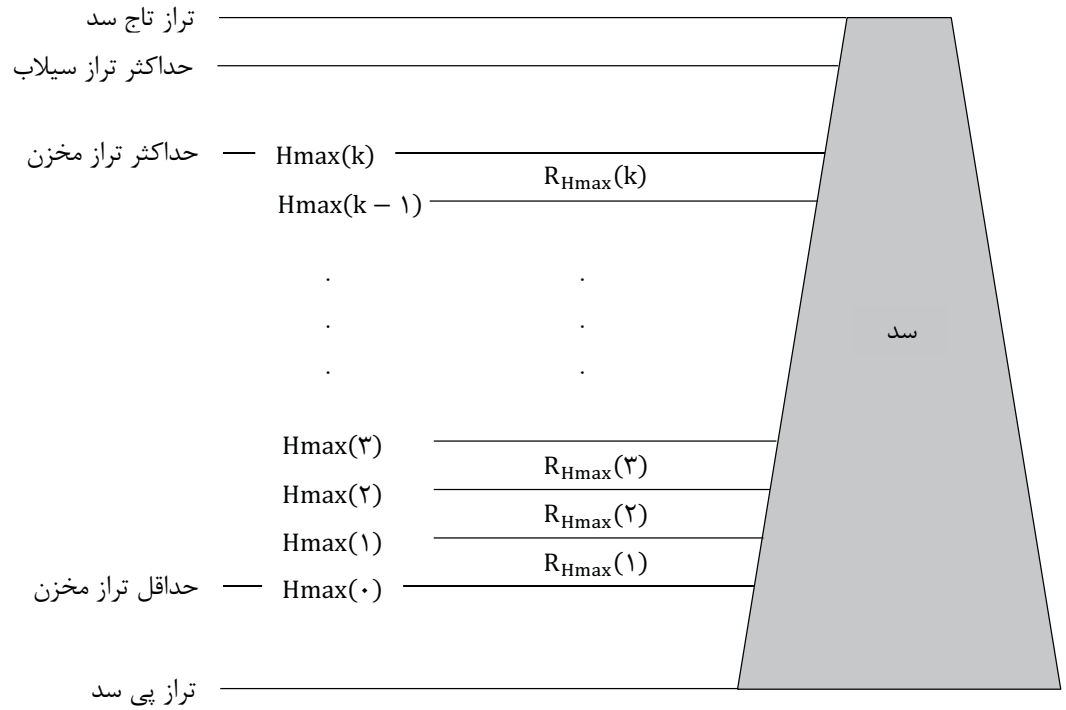
هدف اصلی از مدل بهینه‌سازی تعیین دبی‌های بحرانی سدهای مختلف است. برای نیل به اهداف فوق و مقید کردن متغیرهای تصمیم‌گیری در مسئله‌ی بهینه‌سازی از روابط ۸ الی ۱۲ استفاده شد. در تصویر ۱ موقعیت شماتیک (طرح‌وار) ترازها و دبی‌های بحرانی در روش شبیه‌سازی پله‌ای ترسیم شده است.

روندیابی سیلاب در مخزن سد

روندیابی سیلاب عبارت است از تعیین هیدروگراف سیلاب خروجی با داشتن هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن سد. در روندیابی مخزن رابطه‌ی ۷ اساس تمام روش‌های روندیابی ذخیره‌ای است، این معادله به‌صورت مستقیم قابل حل نیست، لذا به منظور حل این معادله باید از روش‌های عددی تفاضلات محدود (روش‌های عددی اولر، اولر اصلاح شده، رانگ کوتای درجه سه و رانگ کوتای درجه چهار) استفاده نمود.

رابطه‌ی ۷:
$$\Delta H = \frac{I(t) - O(H)}{A(H)} \times \Delta t$$

که در آن: ΔH: تغییرات تراز آب، $I(t)$: حجم جریان ورودی به مخزن نسبت به زمان، $O(H)$: حجم جریان خروجی از مخزن نسبت به تراز آب، $A(H)$: سطح مخزن نسبت به تراز آب و Δt: تغییرات زمان باید به‌قدری کوچک انتخاب شود که بتوان در طی آن تغییرات I و O را به‌صورت خطی فرض نمود. معمولاً Δt حدود 1/6 زمان رسیدن هیدروگراف ورودی به نقطه‌ی اوج در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، براساس اصول و مبانی فرایند روندیابی سیلاب یک برنامه‌ی کامپیوتری به زبان فرترن تهیه شد.



تصویر۱: موقعیت شماتیک (طرح‌واره) ترازها و دبی‌های بحرانی در روش شبیه‌سازی پله‌ای

نحوه‌ی شبیه‌سازی سیلاب

در ترازهای پایین‌تر از تراز نرمال از روابط ۸ الی ۱۱ استفاده شد: (شاخه‌ی صعودی هیدروگراف (رابطه‌ی ۱۰) و شاخه‌ی نزولی هیدروگراف (رابطه‌ی ۱۱))

رابطه‌ی ۸:

$$R_{H\max}(k) = Q_{B\max}(k)$$

رابطه‌ی ۹:

$$Rc_{H\max}(k) = R_{H\max}(k-1) + C(k) \times \left(R_{H\max}(k) - R_{H\max}(k-1)\right)$$

رابطه‌ی ۱۰:

$$\text{if} \quad Inflow < Rc_{H\max}(k) \quad \rightarrow \quad Outflow = Pre \quad Outflow + Inflow$$
$$\text{if} \quad Inflow \geq Rc_{H\max}(k) \quad \rightarrow \quad Outflow = Pre \quad Outflow + Rc_{H\max}(k)$$

رابطه‌ی ۱۱:

$$\text{if} \quad Inflow < Rc_{H\max}(k) \quad \rightarrow \quad Outflow = Inflow$$
$$\text{if} \quad Inflow \geq Rc_{H\max}(k) \quad \rightarrow \quad Outflow = Rc_{H\max}(k)$$

که در آن: k: شماره‌ی تراز بحرانی $(k = 1,2,3,...,15)$، $H\max(k)$: تراز بحرانی kام (متر)، $Q_{B\max}(k)$ و $R_{H\max}(k)$: حداکثر دبی عبوری از تخلیه‌کننده‌ی تحتانی در تراز بحرانی kام (متر مکعب بر ثانیه)، $C(k)$: ضریب تخلیه‌ی سیلاب (این ضریب بین صفر و یک بوده و با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود)، $Rc_{H\max}(k)$: دبی خروجی بحرانی در تراز بحرانی kام (متر مکعب بر ثانیه)، $Pre\ \ Outflow$: دبی پیش تخلیه‌ی سیلاب (متر مکعب بر ثانیه)، $Inflow$: دبی سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه) و $Outflow$: دبی سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)

در ترازهای بالاتر از تراز نرمال از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شد:

رابطه‌ی ۱۲:

$$Outflow = Pre \quad Outflow + Rc_{H\max}(15) + Q_s(i)$$

که در آن: i: شماره‌ی تراز سرریز، $Rc_{H\max}(15)$: دبی خروجی بحرانی در تراز بحرانی پانزدهم (متر مکعب بر ثانیه) و $Q_s(i)$: حداکثر ظرفیت سرریز در تراز سرریز (متر مکعب بر ثانیه) است.

نحوه‌ی شبیه‌سازی پیش تخلیه‌ی سیلاب

به‌منظور کاهش دبی اوج سیلاب و کاهش خسارت سیلاب، قبل از ورود سیلاب به مخزن سد، حجمی از مخزن سد تخلیه خواهد شد لذا یکی دیگر از اهداف مدل بهینه‌سازی تعیین زمان و دبی پیش تخلیه‌ی سیلاب است. برای نیل به اهداف فوق و مقید کردن متغیرهای تصمیم‌گیری در مسئله‌ی بهینه‌سازی از روابط ۱۳ و ۱۴ استفاده شد.

رابطه‌ی ۱۳:

$$Pre \quad Time = D(1)$$

رابطه‌ی ۱۴:

$$Pre \quad Outflow = D(2) + Q_{B\max}(i)$$

که در آن: $D(1)$ و $Pre\ \ Time$: زمان پیش تخلیه‌ی سیلاب (این مقدار بین صفر و یک بوده و با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود)، $D(2)$: ضریب پیش تخلیه‌ی سیلاب (این ضریب بین صفر و یک بوده و با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود)، $Q_{B\max}(i)$: حداکثر دبی عبوری از تخلیه‌کننده‌ی تحتانی در تراز iام (متر مکعب بر ثانیه) و $Pre\ \ Outflow$: دبی پیش تخلیه‌ی سیلاب (متر مکعب بر ثانیه) است.

جدول ۳: پارامترهای کنترلی مدل بهینه‌سازی SA

نام تابع	T_0	T_f	B	Epoch	It	EBS	K_{div}
OF	۵۰۰۰	۱	۰/۵	۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۱	۱۰

جدول ۴: حد بالا، حد پایین و طول گام تصادفی متغیرهای تصمیم

ضرایب تخلیه سیلاب	زمان پیش تخلیه سیلاب (ساعت)	ضریب پیش تخلیه سیلاب
۰	۰	۰
۱	۷۲	۱
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱

بحث و نتایج

تهیه‌ی مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب (FLOOD ROUTING-SA)

در این پژوهش، کد مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب به زبان فرترن تهیه شد. در مدل تهیه شده، مدل شبیه‌سازی فرایند روندیابی سیلاب به‌منزله‌ی یک زیر برنامه برای مدل بهینه‌سازی SA تعریف شده و به‌این ترتیب مدل ترکیبی FLOOD ROUTING-SA شکل گرفت. مدل بهینه‌سازی SA، شامل دو فایل ورودی PARAMETERS SA و INPUT و یک فایل خروجی OUTPUT است. در فایل ورودی PARAMETERS SA، پارامترهای مدل بهینه‌سازی *SA*، پس از یک سری اجراهای اولیه انتخاب می‌شوند. پس از تحلیل حساسیت، پارامترهای کنترلی مناسب برای همگرایی مدل به نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری در تابع هدف مورد استفاده برای اجرای نهایی مدل ترکیبی به‌دست آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. در اجرای نهایی مدل، ۱۲۴۴۷ تکرار انجام و در نهایت از بین این تکرارها، ۵ مورد بهبود در مقدار تابع هدف (انتقال‌های رو به پایین) مشاهده شد. در اجرای نهایی مدل، مقدار تابع هدف ۷۳۹/۸۱ به‌دست آمد. به کمک روش مجانب مشاهده شد که با ضریب همبستگی ۰/۹۳ تابع هدف به سمت نقطه‌ی بهینه سراسری ۷۳۱/۲۲ میل می‌نماید.

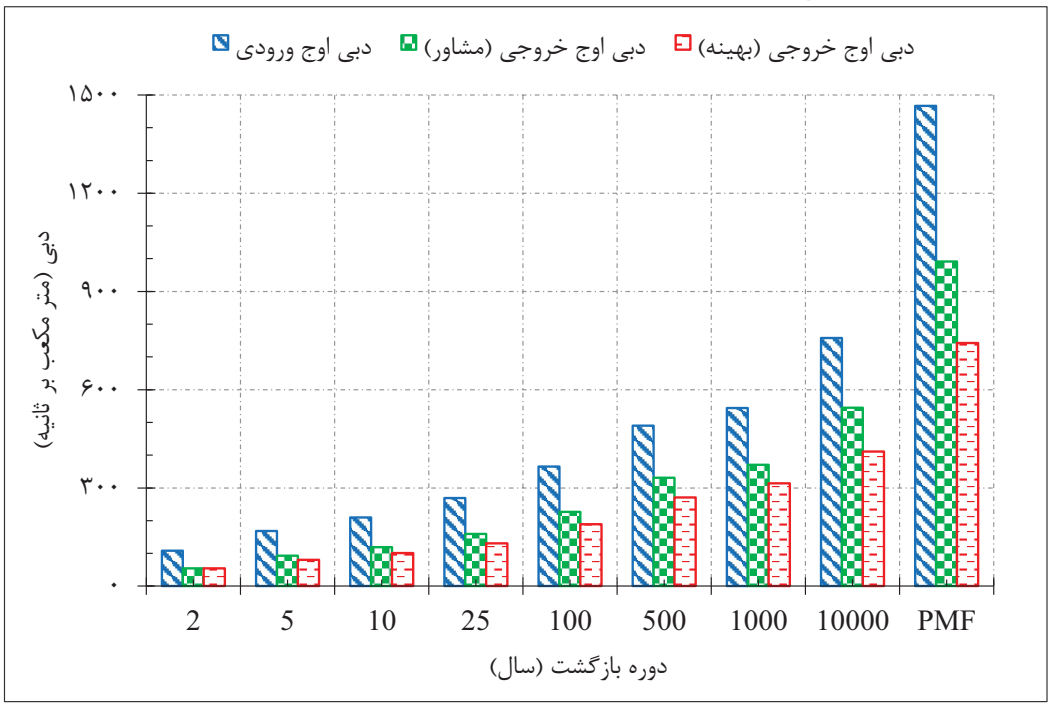
در فایل ورودی INPUT، حد پایین، حد بالا و طول گام تصادفی متغیرهای تصمیم، برای انتخاب فضای شدنی یا مجاز تعریف می‌شوند. در این پژوهش، ۱۷ متغیر تصمیم تعریف شد که ۱۵ متغیر تصمیم به‌منزله‌ی ضرایب تخلیه‌ی سیلاب در ۱۵ تراز مختلف مخزن از حداقل تا حداکثر تراز ذخیره‌ی مخزن، یک متغیر تصمیم به‌عنوان زمان پیش تخلیه‌ی سیلاب و یک متغیر تصمیم به‌عنوان ضریب دبی پیش تخلیه‌ی سیلاب در نظر گرفته شد. در جدول ۴ حد بالا، حد پایین و طول گام تصادفی متغیرهای تصمیم برای انتخاب تصادفی ارائه شده است. در فایل خروجی OUTPUT، مقادیر متغیرهای تصمیم و تابع هدف بهینه محاسبه می‌شوند.

روندیابی سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف

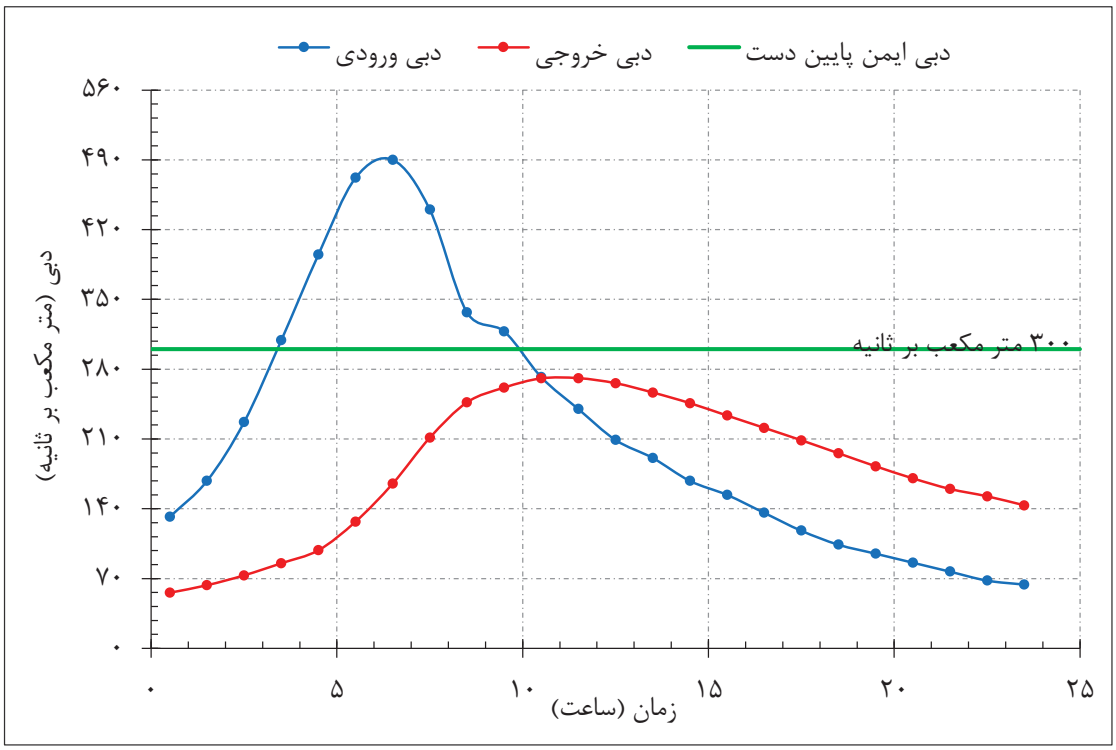
مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی سیلاب (FLOOD ROUTING-SA) این امکان را ایجاد می‌نماید که با حداقل میزان حجم آب خروجی از مخزن سد پیش از وقوع سیلاب بتوان حجم آب مازاد بر دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست سد در زمان وقوع سیلاب را کاهش داد. به این ترتیب می‌توان با کاهش دبی اوج سیلاب، خسارت ناشی از سیلاب در پایین‌دست سد را به حداقل رساند. در تصویر ۲ مقایسه بین دبی اوج خروجی تعیین شده توسط مشاور و روندیابی شده توسط مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب برای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف ارائه شد. با توجه به ظرفیت عبور سیلاب رودخانه‌ی بابل‌رود، خسارت سیلاب پایین‌دست رودخانه به ازای دبی کمتر از ۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه صفر است.

دبی اوج ورودی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله، ۴۹۰ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۶/۵ ساعت است. با اجرای مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی سیلاب و پس از روندیابی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه با تأخیر زمانی ۵ ساعته، ۲۷۰/۹ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۱۱/۵ ساعت از زمان شروع سیلاب به‌دست آمد. تراز مخزن سد در پایان سیلاب ۰/۶۲ متر افزایش یافت. نتایج نشان داد که دبی اوج خروجی بهینه کمتر از دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (۳۳۱/۵ متر مکعب بر ثانیه) است و مشاور افزایش تراز مخزن سد در پایان سیلاب را ۱/۳۴ متر محاسبه نمود. در زمان وقوع سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله، نیازی به پیش تخلیه‌ی مخزن سد نیست، زیرا دبی اوج خروجی بهینه کمتر از دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست سد (۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه) به‌دست آمد و می‌توان از ظرفیت مخزن برای ذخیره‌ی این سیلاب استفاده نمود. حجم سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله، ۱۸/۶۲ میلیون متر مکعب است که براساس فرایند روندیابی سیلاب، حجم سیلاب خروجی از مخزن سد ۱۵/۳۵ میلیون متر مکعب پیش‌بینی شد. در تصویر ۳ روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله نمایش داده شد.

دبی اوج ورودی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰ ساله، ۵۴۴ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۶/۵ ساعت است. با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب و پس از روندیابی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه با تأخیر زمانی ۴ ساعته، ۳۱۳/۹ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۱۰/۵ ساعت از زمان شروع سیلاب به‌دست آمد. تراز مخزن سد در پایان سیلاب ۰/۶۲ متر افزایش

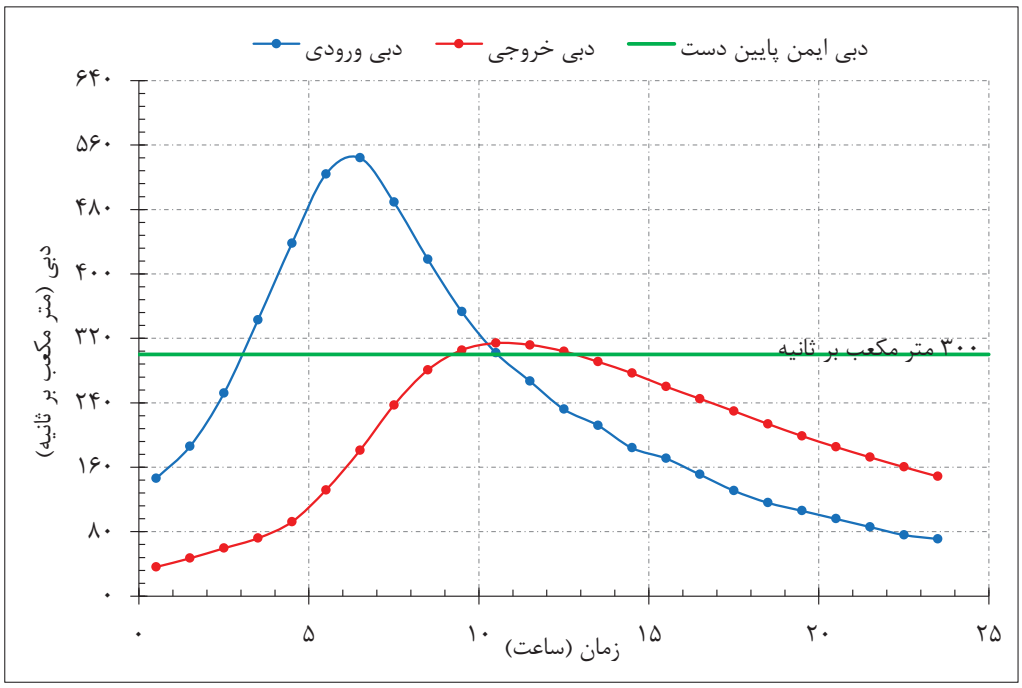


تصویر ۲: مقادیر دبی اوج سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف در مقاطع ورودی و خروجی از مخزن سد البرز



تصویر ۳: روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰ ساله

یافت. نتایج نشان داد که دبی اوج خروجی بهینه کمتر از دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (۳۷۰/۵ متر مکعب بر ثانیه) است و مشاور افزایش تراز مخزن سد در پایان سیلاب را ۱/۳۴ متر محاسبه نمود. در زمان وقوع سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰ ساله، با وجود این‌که دبی اوج خروجی بهینه بیشتر از دبی ایمن رودخانه در پایین‌دست سد (۳۰۰ متر مکعب بر ثانیه) به‌دست آمد و پایین‌دست سد تا حدودی (۰/۱۲ میلیون متر مکعب حجم آب رها شده‌ی مازاد بر حجم آب ایمن در رودخانه‌ی پایین‌دست) متحمل خسارت خواهد شد ولی نیازی به پیش تخلیه‌ی مخزن سد نیست. حجم سیلاب ورودی به مخزن



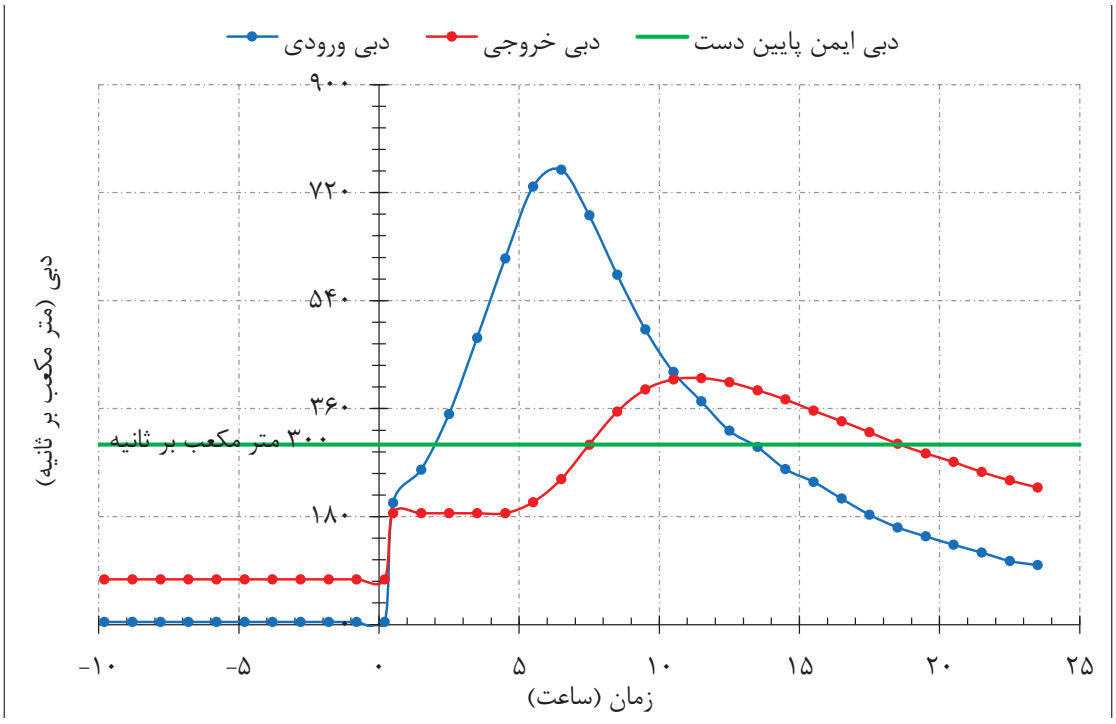
تصویر ۴: روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰ ساله

سد با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰ ساله، ۲۰/۸۳ میلیون متر مکعب است که براساس فرایند روندیابی سیلاب، حجم سیلاب خروجی از مخزن سد ۱۶/۷۸ میلیون متر مکعب پیش‌بینی شد. در تصویر ۴ روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰ ساله نمایش داده شد.

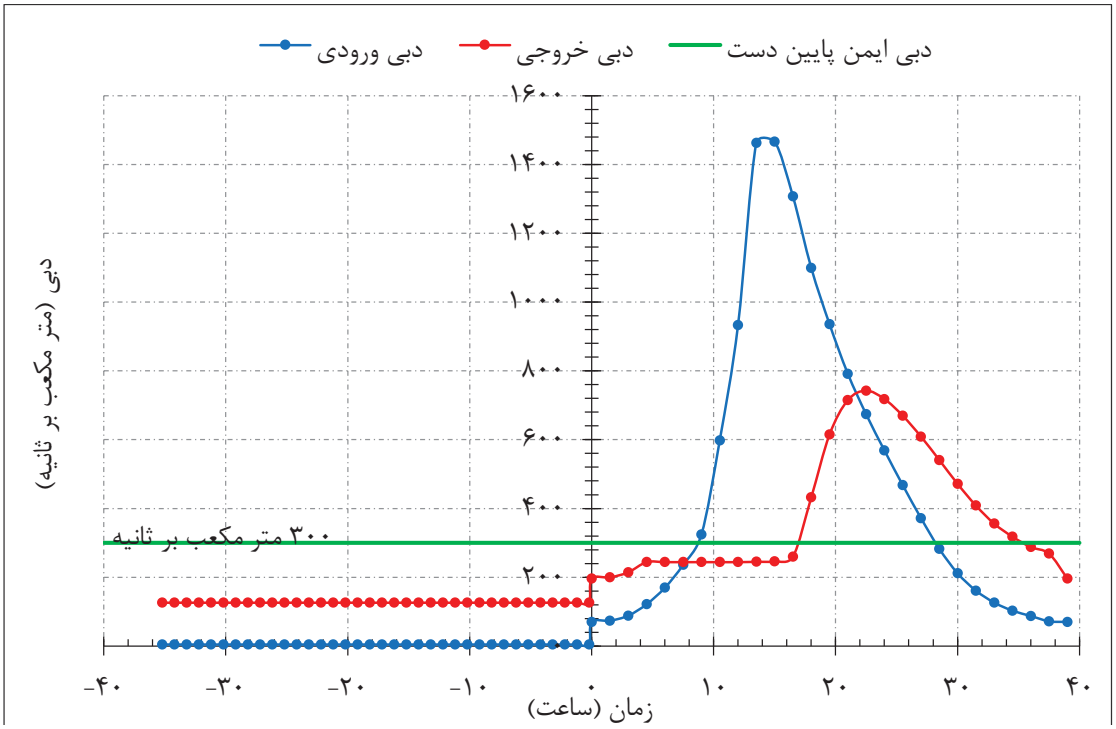
دبی اوج ورودی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، ۷۵۸ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۶/۵ ساعت است. با اجرای مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی سیلاب و پس از روندیابی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه با تأخیر زمانی ۵ ساعته، ۴۱۰/۹ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۱۱/۵ ساعت از زمان شروع سیلاب به‌دست آمد. تراز مخزن سد در پایان سیلاب ۰/۳ متر افزایش یافت. نتایج نشان داد که دبی اوج خروجی بهینه کمتر از دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (۵۴۴/۸ متر مکعب بر ثانیه) است و مشاور افزایش تراز مخزن سد در پایان سیلاب را ۲/۳۸ متر محاسبه نمود. در زمان وقوع سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، ضرورت دارد به‌منظور کاهش خسارت ناشی از سیلاب در پایین‌دست سد، ۱۰ ساعت قبل از ورود سیلاب به مخزن سد، تخلیه‌ی مخزن با دبی ثابت صورت گیرد. این فرایند منجر خواهد شد تا در لحظه‌ی ورود سیلاب به مخزن سد، تراز مخزن حدود ۰/۵ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد قرار گیرد. حجم سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، ۲۹/۰۳ میلیون متر مکعب است که براساس فرایند روندیابی سیلاب، حجم سیلاب خروجی از مخزن سد ۲۴/۴۸ میلیون متر مکعب پیش‌بینی شد. طی این فرایند و قبل از ورود سیلاب به مخزن سد نیاز به ۲/۷۵ میلیون متر مکعب پیش تخلیه‌ی سیلاب است که موجب خسارت ناشی از رهاسازی ۲/۷۱ میلیون متر مکعب آب مازاد بر حجم آب ایمن در رودخانه پایین‌دست خواهد شد. در تصویر ۵ روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله نمایش داده شد.

دبی اوج ورودی سیلاب PMF، ۱۴۶۶/۵ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۱۵ ساعت است. با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب و پس از روندیابی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه با تأخیر زمانی ۷/۵ ساعته، ۷۴۲/۲ متر مکعب بر ثانیه و زمان وقوع آن، ۲۲/۵ ساعت از زمان شروع سیلاب به‌دست آمد. تراز مخزن سد در پایان سیلاب ۰/۱۷ متر کاهش یافت. نتایج نشان داد که دبی اوج خروجی بهینه کمتر از دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس (۹۹۱/۳ متر مکعب بر ثانیه) است و مشاور افزایش تراز مخزن سد در پایان سیلاب را ۴/۷۹ متر محاسبه نمود. در زمان وقوع سیلاب PMF، ضرورت دارد به‌منظور کاهش خسارت ناشی از سیلاب در پایین‌دست سد، ۳۵ ساعت قبل از ورود سیلاب به مخزن سد، تخلیه‌ی مخزن با دبی ثابت صورت گیرد. این فرایند منجر خواهد شد تا در لحظه‌ی ورود سیلاب به مخزن سد، تراز مخزن حدود ۴ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد قرار گیرد. حجم سیلاب ورودی به مخزن سد با دوره‌ی بازگشت PMF، ۶۹/۱۲ میلیون متر مکعب است که براساس فرایند روندیابی سیلاب، حجم سیلاب خروجی از مخزن سد ۵۳/۸۸ میلیون متر مکعب پیش‌بینی شد. طی این فرایند و قبل از ورود سیلاب به مخزن سد نیاز به ۱۵/۸۹ میلیون متر مکعب پیش تخلیه‌ی سیلاب است که موجب خسارت ناشی از رهاسازی ۱۵/۸۱ میلیون متر مکعب آب مازاد بر حجم آب ایمن در رودخانه‌ی پایین‌دست خواهد شد. در تصویر ۶ روندیابی سیلاب PMF نمایش داده شد.

نتایج نشان داد مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب (FLOOD ROUTING-SA)، قابلیت کاهش دبی اوج خروجی



تصویر ۵: روندیابی سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله



تصویر ۶: روندیابی سیلاب PMF

سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف را در مقایسه با دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس دارد. برای سیلاب‌های ورودی به مخزن سد البرز با دوره‌ی بازگشت ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ ساله و سیلاب PMF، دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب، به ترتیب ۱۸، ۱۵، ۲۵ و ۲۵ درصد کمتر از دبی اوج خروجی محاسبه شده توسط شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس به‌دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی قابلیت مدل در کاهش دبی اوج و به تأخیر انداختن زمان وقوع دبی اوج و نهایتاً کاهش خسارت ناشی از سیلاب‌ها است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب (FLOOD ROUTING-SA) با هدف بهره‌برداری کوتاه‌مدت (در مقیاس زمانی ساعتی) کاهش خسارت سیلاب برای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ ساله و سیلاب PMF تهیه شد. در این بخش، روش پلکانی برای شبیه‌سازی فرایند روندیابی سیلاب در مخزن سد پیشنهاد شد و تصمیم‌گیری در رابطه با این‌که در هر تراز بحرانی، چه مقدار دبی رها شود، فقط براساس تراز آب مخزن صورت گرفت. لذا تعیین میزان دبی خروجی در هر تراز مهم‌ترین اقدام در این مرحله از کار بوده که با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی بر پایه‌ی اصول الگوریتم SA تعیین شد. دبی خروجی از هر تراز به نحوی تعیین شد که هم ریسک خسارت سیلاب به نواحی پایین‌دست حداقل شود و هم ایمنی سد و رودخانه‌ی پایین‌دست به ازای هیچ سیلابی به خطر نیفتد. همچنین با فرض مجهز بودن حوضه به سیستم خودکار هشدار سیلاب و اطلاع از زمان و حجم سیلابی که قرار است وارد مخزن سد گردد، بخشی از مخزن تخلیه شده و با ایجاد حجم کنترل سیلاب از تخصیص حجم مجزایی از مخزن برای این منظور جلوگیری شد. با به‌کارگیری این سیاست بخشی از حجم مخزن به‌صورت دو منظوره استفاده شد. به عبارت دیگر از این حجم مخزن در زمان‌های عادی به‌عنوان حجم ذخیره‌ی آب و در زمان وقوع سیلاب به‌عنوان حجم کنترل سیلاب استفاده شد. مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه مدت تهیه شده در این پژوهش، هیدروگراف سیلاب خروجی از مخزن سد با دوره‌های بازگشت مختلف را بهینه نمود. به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب در سد مخزنی البرز سبب کاهش دبی اوج و به تأخیر انداختن زمان وقوع دبی اوج و نهایتاً کاهش خسارت ناشی از سیلاب‌ها، خصوصاً سیلاب ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ ساله و سیلاب PMF در پایین‌دست سد شده که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی تهیه شده است. لذا ایجاد سیستم هشدار سیل به منظور آگاهی از میزان جریان ورودی به مخزن سد و تصمیم‌گیری برای پیش تخلیه‌ی مخزن، به همراه مدیریت مناسب در بهره‌برداری از سد با حداکثر نمودن حجم آب در مخزن سد در انتهای سیلاب و حفظ ایمنی سد، نقش به‌سزایی در کاهش خسارت سیل ورودی به مخزن سد البرز خواهد داشت. نتایج نشان داد برای مهار سیلاب‌هایی با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰، نیازی به پیش تخلیه‌ی مخزن نیست و می‌توان با حداقل خسارت وارده به رودخانه‌ی پایین‌دست این سیلاب‌ها را مهار نمود. دبی اوج ورودی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، ۷۵۸ متر مکعب بر ثانیه است. با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه، ۴۱۰/۹ متر مکعب بر ثانیه به‌دست آمد که با تأخیر زمانی ۵ ساعته نسبت به دبی اوج ورودی سیلاب رخ می‌دهد. برای مهار سیلاب با دوری بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله، نیاز به ۱۰ ساعت پیش تخلیه‌ی مخزن است تا در لحظه‌ی ورود سیلاب به مخزن سد، تراز مخزن حدود ۰/۵ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد قرار گیرد. دبی اوج ورودی سیلاب PMF ، ۱۴۶۶/۵ متر مکعب بر ثانیه است. با اجرای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب، مقدار دبی اوج خروجی بهینه، ۷۴۲/۲ متر مکعب بر ثانیه به‌دست آمد که با تأخیر زمانی ۷/۵ ساعته نسبت دبی اوج ورودی سیلاب رخ می‌دهد. برای مهار سیلاب PMF ، نیاز به ۳۵ ساعت پیش تخلیه‌ی مخزن است تا در لحظه‌ی ورود سیلاب به مخزن سد، تراز مخزن به ترتیب حدود ۴ متر پایین‌تر از تراز نرمال سد قرار گیرد که درصورت تجهیز نمودن حوضه‌ی آبریز سد البرز به سیستم هشدار سیلاب، می‌توان با اطلاع از زمان وقوع سیلاب و حجم سیلاب، پیش تخلیه‌ی مخزن را آغاز نمود و به‌این ترتیب از حجم کنترل سیلاب برای ذخیره‌ی آب در مخزن برای فصول زراعی استفاده نمود. در پایان مقایسه‌ی دقت، قابلیت و جواب‌های مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تهیه شده با سایر مدل‌های بهینه‌سازی عددی در ترکیب با مدل شبیه‌سازی سیلاب در یک مطالعه‌ی موردی مشترک و ارائه‌ی روش مناسب بهینه‌سازی برای حل مدل‌های بهره‌برداری کوتاه مدت، برای کارهای تحقیقاتی آینده پیشنهاد می‌شود. نتایج کاربرد مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب در کاهش خسارت سیلاب در این پژوهش با نتایج کاربرد این مدل در مطالعات ملک محمدی و همکاران[۵] و زرگر و همکاران [۹] مقایسه گردید. اجرای مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی سیلاب در سدهای مورد مطالعه، سبب کاهش قابل ملاحظه در خسارت سالانه‌ی سیلاب شده که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل‌ها است.

پی‌نوشت

1. Ankang

منابع

1. Simonovic S.P. and Ahmad S. (2000). System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14 (3): 190-198.

۲. یخکشی م. (۱۳۹۱). مدیریت سیلاب در سیستم رودخانه- مخزن (مطالعه موردی: سد نرماب). پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳. یزدی ج. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی اقدامات کنترل سیلاب در حوضه‌های آبریز با رویکرد غیر قطعی. رساله‌ی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۴. کابوسی ک. و جلینی ر. (۱۳۹۵). بررسی شاخص‌های کارآیی و نقش مخازن تأخیری در کنترل سیلاب خروجی از حوضه (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی جعفرآباد استان گلستان). *نشریه‌ی حفاظت منابع آب و خاک*، ۵ (۴): ۴۶-۳۵.

5. Malekmohammadi B., Zahraie B. and Kerachian R. (2011). Ranking solutions of multi-objective reservoir operation optimization models using multi-criteria decision analysis. Expert Systems with Application, 38: 7851–7863.

6. He Y., Xu Q., Yang SH. and Liao L. (2014). Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 38: 4480–4492.

7. Chou F.N-F. and Wu C-W. (2015). Stage-wise optimizing operating rules for flood control in a multipurpose reservoir. *Journal of Hydrology*, 521: 245–260.

8. Luo J., Qic Y., Xie J. and Zhang X. (2015). A hybrid multi-objective PSO–EDA algorithm for reservoir flood control operation. *Applied Soft Computing*, 34: 526–538.

9. Zargar M., Samani H.M.V. and Haghighi A. (2016). Optimization of gated spillways operation for flood risk management in multi-reservoir systems. *Natural Hazards,* 82: 299–320

10. Uysal G., Akkol B., Topcu M.I., Sensoy A. and Schwanenberg D. (2016). Comparison of different reservoir models for short term operation of flood management. 12th International Conference on Hydro informatics, Procedia Engineering 154: 1385–1392.

11. Qi Y., Yu J., Li X., Wei Y. and Miao Q. (2017). Reservoir flood control operation using multi-objective evolutionary algorithm with decomposition and preferences. *Applied Soft Computing*, 50: 21–33.

۱۲. شرکت مهندسی مشاور ساز آب شرق. (۱۳۸۹). مطالعات بهنگام‌سازی اطلس منابع آب حوضه‌ی آبریز رودخانه‌های مازندران و شرق گیلان. جلد اول (آمار و اطلاعات و بررسی‌های مقدماتی آن).

۱۳. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. (۱۳۸۷). گزارش پیشرفت کار طرح سد مخزنی البرز.

14. Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. Science, 220: 671-680.

15. Zegordi S.H., Itoh K. and Enkawa T. (1995 a). A knowledgeable simulated annealing scheme for the early / tardy flow shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 33: 1449-1466.

16. Metropolise N., Rosenbluth A., Teller A. and Teller E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21: 1087-1092.

۱۷. محسنی موحد ا. (۱۳۸۳). تهیه مدل ریاضی بهینه‌سازی عملکرد هیدرولیکی کانال‌های آبیاری با استفاده از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده (SA) و تعیین ارزش نسبی شاخص‌های ارزیابی. رساله دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

18. Wilhelm M.R. and Ward T.L. (1987). Solving quadratic assignment problem by simulated annealing. IIE Transactions. 19 (1): 107-119.

۱۹. زرگر م.؛ سامانی ح.م.و.؛ حقیقی ع. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی بهره‌برداری از سرریزهای دریچه‌دار در سیستم‌های چند مخزنه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مطالعه‌ی موردی سیستم سدهای دز و بختیاری. *نشریه علمی-پژوهشی هیدرولیک*، انجمن هیدرولیک ایران، ۱۰ (۲): ۴۳-۲۷.

۲۰. زهرایی ب. و تکشی آ. (۱۳۸۷). کاربرد روش‌های الگوریتم ژنتیک و K-نزدیک ترین همسایه در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در زمان وقوع سیلاب. *مجله علمی-پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران*، انجمن علوم و مهندسی منابع آب، ۴ (۳): ۳۷-۲۷.