

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سرریزهای دریاچه‌دار در سیستم‌های چند مخزنه با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مطالعه موردی سیستم سدهای دز و بختیاری

مرتضی زرگر¹، حسین محمد ولی سامانی^{2*}، علی حقیقی³

1- دانشجوی دکترای مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

2- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

3- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*hossein.samani@gmail.com

چکیده - در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب پایین‌دست، با استفاده از مانور دریاچه‌های سرریز سیستم‌های چند مخزنی فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب پیشنهاد شده است. در این تحقیق به منظور کنترل سیلاب در سدهایی که سرریز آنها از نوع دریاچه‌دار می‌باشد، یک روش پله‌ای با هدف پاسخگویی بلادرنگ به وقوع سیلاب‌هایی که از قبل هیچ‌گونه آگاهی از شکل و اندازه هیدروگراف ورودی آنها وجود ندارد، ارائه شده است. در روش پیشنهادی، تصمیم‌گیری در رابطه با اینکه در هر تراز بحرانی، چه مقدار دبی رها شود، فقط بر اساس تراز آب مخزن صورت می‌گیرد. لذا تعیین میزان دبی خروجی در هر تراز مهم‌ترین اقدام در این مرحله از کار است که با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی بر پایه اصول الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی تعیین شده است. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی خسارت سالیانه قابل انتظار در رودخانه پایین‌دست می‌باشد. به منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، سیستم رودخانه دز شامل سدهای بختیاری و دز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه گردید. اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در سدهای مورد مطالعه سبب کاهش قابل ملاحظه در خسارت سالانه سیلاب قابل انتظار شده که نشان دهنده عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی می‌باشد.

کلیدواژگان: بهینه‌سازی، سیلاب، دریاچه سرریز، الگوریتم ژنتیک، خسارت سیلاب.

1- مقدمه

تلاش گردیده با استفاده از روش‌های مختلف مانند مانور دریاچه‌های سرریز، سیلاب خروجی از مخزن را مدیریت کنند. در صورتی که سامانه مخازن فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب باشد و میزان حجم و اوج سیلاب ورودی به سدهای مختلف مشخص نباشد، موضوع بسیار پیچیده می‌شود. در چنین سامانه‌ای، تجربه و قضاوت بهره‌برداران فاکتور مهمی در بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز سدها در زمان سیلاب می‌باشد (Linsley et al., 1972).

تحقیقات انجام شده برای کنترل سیلاب در سدهای مخزنی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود:

(1) در دسته اول، مانند تحقیق انجام شده توسط Ngo et al. (2007) و Dittmann et al. (2009) هدف تحقیق بر روی تعیین حجم بهینه کنترل سیلاب مخزن متمرکز بوده است. (2) در دسته دوم تحقیقات مانند تحقیق حاضر، با فرض معلوم بودن حجم کنترل سیلاب در فصول سیلابی،

et al. (2010). Ahmed (2013) و He et al. (2014) از محققانی هستند که از مدل‌های بهینه‌سازی تکاملی برای مدیریت بهینه سیلاب مخازن سدها استفاده کرده‌اند.

در سال‌های اخیر الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی معروف برای مدیریت بهینه سیلاب با استفاده از مخازن سدها بوده است. Chang F.J. et al (1998). Chang L.C. (2008). Karamouz et al. (2008). L.C. et al. (2010) از محققانی هستند که از الگوریتم ژنتیک برای مدیریت بهینه سیلاب مخازن سدها استفاده کرده‌اند. سیستم مورد بررسی توسط این محققان نیز یا تک مخزنی بوده یا سیستم چند مخزنی مورد بررسی دارای سامانه پیش‌بینی سیلاب بوده و برای مدیریت بهینه یک یا چند طوفان از روش‌های بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند.

در این زمینه Malekmohammadi et al. (2010) یک مدل بهینه با هدف مدیریت سیلاب برای سیستم رودخانه-مخزن در زمان واقعی برای یک دوره بازگشت معین توسعه دادند. در این تحقیق با ترکیب الگوریتم ژنتیک و مدل روندیابی مخزن، مدل بهره‌برداری بهینه از سدهای بختیاری و دز در زمان سیلاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک تهیه شده است. در این تحقیق حداقل‌سازی خسارت سیلاب پایین‌دست مخازن برای یک دوره بازگشت معین به عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق متغیرهای تصمیم‌گیری کل مقادیر هیدروگراف خروجی از سد دز و بختیاری در گام‌های زمانی 2 ساعته می‌باشد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تحقیقات اندکی در زمینه استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌سازی، برای یافتن سیاست بهینه بهره‌برداری از دریچه سرریز سدها در زمان سیلاب، خصوصاً در سیستم‌های چند مخزنه که فاقد سامانه پیش‌بینی سیلاب هستند، انجام شده است. بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در بحث مدیریت بهینه سیلاب با استفاده از مخازن سدها بیشتر محققان یک طوفان را بررسی کرده‌اند که در آن هیدروگراف ورودی به مخازن سدها مشخص است (مانند Ahmed Malekmohammadi et al. (2013)). برخی دیگر مانند Malekmohammadi et al. (2010) با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی فقط برای یک

در این زمینه تحقیقات زیادی در مورد بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز در زمان سیلاب برای سیستم‌های تک مخزنی انجام شده است. Acanal, Acanal et al. (1999). Haktanir et al. (2000). et al. (2001). Haktanir et al. (2000). al. (2013) برای بهره‌برداری بهینه از دریچه‌های سرریز در سیستم‌های فاقد سامانه پیش‌بینی سیلاب، به ترتیب سیاست‌های عملکرد پنج، شش، ده و پانزده مرحله‌ای را پیشنهاد دادند. در این روش حجم کنترل سیلاب مخزن به تعدادی حجم ذخیره کوچک تقسیم می‌شود و برای هر حجم ذخیره تراز قرارگیری و بازشدگی دریچه سرریز به ازای آن حجم ذخیره با سعی و خطا تعیین می‌شود، به نحوی که در این روش تعداد زیادی جواب برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز در زمان سیلاب ارائه می‌شود.

برای حل این مشکل باید از مدل‌های بهینه‌سازی برای مدیریت سیلاب در مخازن سدها استفاده کرد. عمده محققانی که از مدل‌های بهینه‌سازی به منظور مدیریت بهینه سیلاب در مخازن سدها استفاده کرده‌اند، سیاستی برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز ارائه نکرده‌اند و سیستم مورد بررسی آنها یا دارای سامانه پیش‌بینی سیلاب بوده، یا برای مدیریت بهینه یک واقعه طبیعی مانند یک طوفان بزرگ که مشخصات آن معلوم است، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخازن در زمان سیلاب را ارائه کرده‌اند.

در همین زمینه برخی محققان از برنامه‌ریزی خطی (Windsor, 1973). Kelman et al., Marien, 1984. Needham et al., 2000, Marien et al., 1994, 1989. Hsu and Wei, 2007, 2009, Wei and Hsu, 2008. Unver and Mays, 1990) برخی از برنامه‌ریزی غیرخطی (و رضا زاده، 1381)، برخی از برنامه‌ریزی دینامیکی (Turgeon, 2005) و (Kumar et al., 2010) و برخی از منطق‌فازی (Chuntian 1999). Cheng and Chau, 2001. Karaboga et al., 2004. Cheng and Chau, 2004. Fu, 2008. Bagis, 2007. Fu, 2008. Li, 2008) استفاده کرده‌اند. Karaboga et al. (2005). Karbowski et al. (2005). Valeriano. Li et al. (2010). Qin et al. (2010).

سدهای مختلف حذف می‌شود. (4) به علت اینکه فاصله بین ترازهای بحرانی مساوی است، بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز برای بهره‌بردار بسیار ساده می‌باشد. (5) مدل یک جواب بهینه بدون در نظر گرفتن میزان سیلاب ورودی برای بهره‌برداری همزمان از کل سدهای سیستم ارائه می‌کند. (6) با اعمال روش پیشنهادی خسارت سالیانه قابل انتظار سیلاب در کل سیستم حداقل می‌شود.

2- روش انجام کار

در تحقیق حاضر یک روش شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی ریسک خسارت سیلاب با استفاده از مانور دریاچه‌های سرریز سیستم‌های چند مخزنی که فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب هستند و اطلاعی از حجم، شکل و اوج سیلاب در اختیار بهره‌برداران از سیستم نیست، پیشنهاد شده است. لذا در تحقیق حاضر روش بهینه بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز با در نظر گرفتن فرضیات زیر تعیین شده است: (1) بهره‌برداری از دریاچه سرریز سدها به نحوی باشد که خسارت سالیانه قابل انتظار کل سیستم حداقل شود. (2) بهره‌برداری از دریاچه سرریز به نحوی باشد که بیشترین استفاده ممکن از ظرفیت کنترل سیلاب مخازن مختلف به عمل آید. (3) بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز سدها به نحوی باشد که هیچ سدی در اثر وقوع سیلاب طراحی دچار روگذری نشود. (4) سیستم فاقد پیش‌بینی سیلاب است و بهره‌بردار اطلاعی از شکل، حجم و اوج سیلابی که در آستانه وقوع است، ندارد. (5) حجم کنترل سیلاب و رقوم نرمال متناظر با آن در فصول سیلابی معلوم و در زمان شروع سیلاب، مخزن پر و در تراز فوق قرار دارد و به دلیل پر بودن مخزن، امکان ذخیره‌سازی سیلاب برای استفاده در آینده میسر نمی‌باشد. در تحقیق حاضر برای روندیابی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف یک مدل شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریاچه‌های سرریز توسعه داده شده است. هدف اصلی مدل شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریاچه این است که در نبود سیستم پیش‌بینی سیلاب، بهره‌بردار باید بر اساس تغییرات تراز سطح آب مخزن نسبت به رهاسازی سیلاب با هر بزرگی اقدام کند. در مدل بهینه‌سازی نیز از مدل

دوره بازگشت معین مثلاً سیلاب با دوره بازگشت 1000 ساله روش بهره‌برداری بهینه از سد در زمان سیلاب را ارائه کرده‌اند و برای روندیابی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف از هیچ سیاست واحدی برای بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز سد در زمان سیلاب استفاده نکرده‌اند. روش‌های کلی که تاکنون بدون نیاز به مدل‌های پیش‌بینی سیلاب از دریاچه‌های سد در زمان سیلاب ارائه شده‌اند، مانند روش Haktanir et al. (2013) بدون استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و با استفاده از سعی و خطا تعداد زیادی جواب برای بهره‌برداری از سرریز سد در زمان سیلاب ارائه می‌کنند و عموماً در سیستم‌های تک مخزنی استفاده شده‌اند.

لذا در تحقیق حاضر یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب پایین‌دست با استفاده از مانور دریاچه‌های سرریز سیستم‌های چند مخزنی که فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب هستند و اطلاعی از حجم، شکل و اوج سیلاب در اختیار بهره‌برداران از سیستم نیست، پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر عملکرد کلیه سدهای سیستم به صورت هم‌زمان برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب در پایین‌دست مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف یک مدل شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریاچه‌های سرریز که از سیاست بهره‌برداری یکسانی در تمامی سیلاب‌ها استفاده می‌کند و یک مدل بهینه‌سازی بر پایه اصول الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی توسعه داده شده است. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی خسارت سالیانه قابل انتظار در رودخانه پایین‌دست می‌باشد. برای مطالعه موردی سیستم رودخانه دز شامل دو سد مخزنی بختیاری و دز بررسی شده و نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق Malekmohammadi et al. (2010) مقایسه گردید. لذا مزیت روش پیشنهادی در این تحقیق نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی برای مدیریت سیلاب این است که: (1) این روش برای مدیریت بهینه سیلاب نیازی به سامانه پیش‌بینی سیلاب ندارد. (2) برای هر سیلی با هر بزرگی قابل استفاده است و برای تمامی سیلاب‌ها با هر بزرگی از سیاست بهره‌برداری واحدی برای روندیابی استفاده می‌کند. (3) قضاوت بهره‌برداران برای روندیابی سیلاب در

سدهای مخزنی دارای نیروگاه به صورت آنلاین اندازه‌گیری می‌شود. در روش پیشنهادی روندیابی سیلاب در هر مخزن از سیلاب با دوره بازگشت 10 ساله شروع شده و تا سیلاب طراحی سد ادامه می‌یابد. در این روش روندیابی سیلاب با کوچکترین دوره بازگشت شروع شده و با اعمال سیاست بهره‌برداری واحد برای دوره بازگشت‌های بعدی ادامه می‌یابد و از نتایج روندیابی دوره بازگشت‌های قبلی برای روندیابی دوره بازگشت‌های بعدی استفاده می‌شود. قبل از شروع شبیه‌سازی باید موقعیت ترازهای بحرانی برای تمامی سدهای سیستم به مدل معرفی شود. در روابط استفاده شده در برنامه شبیه‌سازی ترازهای بحرانی با متغیر Hcr_{jk} مشخص شده‌اند؛ (اندیس j نشان دهنده شماره سد و اندیس k نشان دهنده شماره تراز بحرانی می‌باشد). تعداد ترازهای بحرانی برای هر سد به دلخواه کاربر انتخاب خواهد شد، ولی باید دقت شود که فاصله بین پله‌ها یکسان باشد و هر چه فاصله بین پله‌ها کوچکتر انتخاب شود، دقت محاسبات افزایش خواهد یافت. در شکل 1 موقعیت ترازهای بحرانی و دبی هر پله به صورت شماتیک برای شاخه صعودی و نزولی هیدروگراف نشان داده شده است.

سیکل نشان داده شده در سمت چپ شکل نشان دهنده وضعیت پله‌ها در شاخه صعودی و سیکل نشان داده شده در سمت راست شکل نشان دهنده وضعیت پله‌ها در شاخه نزولی هیدروگراف می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این تحقیق پله‌ها در شاخه نزولی و صعودی وضعیت یکسانی دارند.

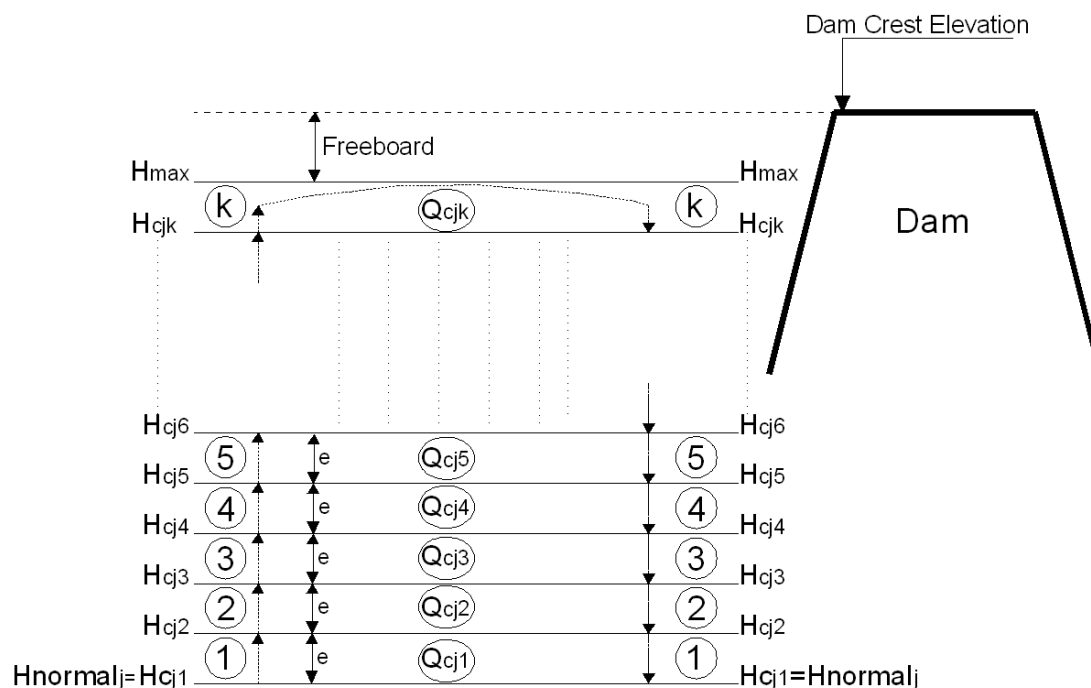
پس از مشخص شدن ترازهای بحرانی، باید دبی ثابت عبوری از پله‌های مختلف تعیین شود. در ادامه دبی ثابت عبوری از هر پله دبی بحرانی نامیده می‌شود. مهمترین معیار تعیین دبی‌های بحرانی، استفاده از حداکثر ظرفیت مخزن برای کنترل سیلاب می‌باشد؛ به گونه‌ای که بازشدگی دریاچه نه آنقدر کم باشد که سدی به ازای سیلاب‌های مختلف، خصوصاً سیلاب طراحی دچار روگذری شود و نه آنقدر زیاد باشد که بدون اینکه از ظرفیت مخزن برای ذخیره سیلاب استفاده شود، سبب خسارت در پایین‌دست شود.

بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی استفاده شده است. تابع هدف مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی خسارت سالیانه قابل انتظار در رودخانه پایین‌دست می‌باشد. خسارت سالیانه قابل انتظار برابر با سطح زیر منحنی احتمال-خسارت می‌باشد. لذا برای محاسبه آن باید خسارت سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های مختلف تعیین و به مدل معرفی شود (Arnell, 1988).

2-1- معرفی مدل شبیه‌سازی

ایده اصلی این روش این است که سیستم فاقد سیستم هشدار سیل است و بهره‌بردار اطلاعی از شکل، حجم و اوج سیلابی که در آستانه وقوع است ندارد، ولی سیلابی که در آینده اتفاق خواهد افتاد از نظر حجم و اوج سیلاب قطعاً در محدوده سیلاب‌های کوچک تا سیلاب طراحی سد قرار دارد. معمولاً در سدهای بزرگ سیلاب طراحی با دوره بازگشت 10000 ساله یا PMF می‌باشد. لذا سیاست‌های بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز در این تحقیق با استفاده از هیدروگراف سیلاب محاسباتی با دوره بازگشت‌های مختلف (از 10 ساله تا سیلاب طراحی) تعیین شده و هر سیلابی که در آینده اتفاق بیفتد، قطعاً در محدوده یکی از سیلاب‌های مورد استفاده در مدل قرار دارد. روش کار مدل شبیه‌سازی به این صورت است که حجم کنترل سیلاب مخازن (فاصله بین رقوم نرمال کنترل سیلاب تا تراز تاج منهای ارتفاع آزاد) به تعدادی پله با فاصله مساوی تقسیم می‌شود. تراز قرارگیری این پله‌ها ثابت و در ادامه تراز بحرانی نامیده می‌شود. با رسیدن تراز سطح آب مخزن به این پله‌ها در زمان سیلاب، دبی ثابت از پیش تعیین شده ای از مخزن خارج می‌شود. به این ترتیب روندیابی سیلاب برای تمامی سیل‌های با اندازه‌های مختلف که از قبل قابل پیش‌بینی نیستند، در قالب یک عملکرد واحد انجام می‌گیرد.

دبی خروجی از هر پله با استفاده از مدل بهینه‌سازی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، تعیین می‌شود. بر اساس روش پیشنهادی در تحقیق حاضر، کافی است بهره‌بردار تراز سطح آب مخزن را بداند و با توجه به تراز سطح آب مخزن نسبت به میزان بازشدگی دریاچه‌های سرریز تصمیم‌گیری کند. معمولاً تراز سطح آب مخزن در تمامی



شکل 1 موقعیت شماتیک ترازها و دبی‌های بحرانی در روش شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریچه

به ترتیب نحوه محاسبه دبی بحرانی در پله اول، دوم و k -ام سد شماره j ارائه شده است. با توجه به معلوم بودن مقادیر $Q_{max_{jk}}$ و $Q_{cr_{j,k-1}}$ برای تعیین دبی هر پله تنها ضرایب α_{jk} مجهول می‌باشد که این ضرایب با استفاده از فرایند بهینه‌سازی بدست می‌آید. لذا تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری بستگی به تعداد سدها و تعداد پله‌های هر سد دارد. برای مقید کردن فضای تصمیم‌گیری مسأله بهینه‌سازی ضریب α_{jk} بین صفر تا یک می‌باشد. در روابط (1) تا (3) در صورتی که ضریب $\alpha_{jk} = 0$ انتخاب شود، دبی پله جدید برابر دبی پله قبل می‌باشد. در اولین پله در صورتی که α_{j1} برابر صفر باشد، دبی خروجی از سرریز برابر صفر است و این به معنی بسته نگه داشتن دریچه‌های سرریز در پله اول می‌باشد. در صورتی که $\alpha_{jk} = 1$ انتخاب شود، دبی پله جدید برابر حداکثر ظرفیت سرریز در حالت دریچه‌های کاملاً باز در آن پله می‌باشد.

2-2- روندیابی سیلاب در مخازن

برای روندیابی سیل در مخزن از رابطه پیوستگی (4) استفاده می‌شود (Chow 1988):

$$I(t) - O(t) = dS(t) / dt \quad (4)$$

دبی خروجی در هر پله به گونه‌ای انتخاب می‌شود که سرریز سد ظرفیت عبور آن را داشته باشد. بنابراین پس از تعیین دبی خروجی، می‌بایست کنترل کرد که دبی هر پله، از دبی به دست آمده از رابطه دبی-اشل سرریز بیشتر نشود. همچنین دبی خروجی از هر پله در شاخه صعودی هیدروگراف به نحوی تعیین می‌شود که بزرگتر یا مساوی دبی پله قبل باشد. لذا هدف اصلی از برنامه بهینه‌سازی تعیین دبی‌های بحرانی سدهای مختلف می‌باشد. برای نیل به اهداف فوق و مقید کردن متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله بهینه‌سازی از روابط (1 تا 3) استفاده می‌شوند:

$$Q_{cr_{j1}} = \alpha_{j1} Q_{max_{j1}} \quad (1)$$

$$Q_{cr_{j2}} = Q_{cr_{j1}} + \alpha_{j2} (Q_{max_{j2}} - Q_{cr_{j1}}) \quad (2)$$

$$Q_{cr_{jk}} = Q_{cr_{j,k-1}} + \alpha_{jk} (Q_{max_{jk}} - Q_{cr_{j,k-1}}) \quad (3)$$

که در آن‌ها j اندیس شماره مخزن ($j = 1, \dots, nD$)، k اندیس شماره تراز بحرانی، $Q_{cr_{jk}}$ دبی خروجی بحرانی در پله k -ام سد j ، $Q_{max_{jk}}$ حداکثر دبی عبوری از سرریز در پله k -ام سد j در حالت دریچه‌های کاملاً باز می‌باشد که از رابطه دبی-اشل سد j به دست می‌آید، α_{jk} یک ضریب بین صفر و یک است که با استفاده از مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود. در رابطه‌های (1) تا (3)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{In the recession limb} \\ \text{if : } h_t < Hcr_{jk} \Rightarrow O_t = Qcr_{j,k-1} \\ \text{if : } h_t \leq Hcr_{jk} \text{ and } I_t > Qcr_{j,k-1} \Rightarrow O_t = I_t \end{array} \right. \quad (9)$$

برابر معادله (8) تا زمانی که تراز سطح آب مخزن کمتر از تراز بحرانی پله بعد ($Hcr_{j,k+1}$) باشد، دبی خروجی از مخزن تغییری نکرده و برابر دبی پله k ام (Qcr_{jk}) در نظر گرفته می‌شود و محاسبات به همین ترتیب تا زمانی که تراز سطح آب مخزن بزرگتر یا مساوی تراز بحرانی پله بعد ($Hcr_{j,k+1}$) شود، ادامه می‌یابد. در صورتی که تراز سطح آب مخزن بزرگتر یا مساوی تراز بحرانی پله بعد ($Hcr_{j,k+1}$) شود، مخزن در زمانی کمتر از Δt وارد تراز بحرانی بعدی شده است. لذا زمان دقیق انتقال به تراز بعدی محاسبه و دبی خروجی از مخزن نیز برابر دبی بحرانی پله بعدی می‌شود. علاوه بر این در شاخه صعودی هیدروگراف، دبی محاسبه شده برای هر پله باید کوچکتر یا مساوی دبی ورودی به مخزن در زمان رسیدن تراز سطح آب مخزن به آن پله باشد. محاسبات بالا تا زمان اتمام شاخه صعودی هیدروگراف خروجی ادامه می‌یابد. پس از این مرحله شاخه نزولی هیدروگراف خروجی شروع شده و تراز سطح مخزن به صورت تدریجی کاهش می‌یابد. روندیابی سیلاب در شاخه نزولی مانند شاخه صعودی می‌باشد، با این تفاوت که در شاخه نزولی زمانی که تراز سطح آب مخزن کوچکتر یا مساوی تراز بحرانی پله k ام (Hcr_{jk}) گردد، دبی عبوری از سرریز برابر دبی بحرانی پله پایین‌تر خواهد شد. لازم به توضیح است در شاخه نزولی هیدروگراف برای جلوگیری از نوسان سطح آب مخزن در صورتی که دبی بحرانی پله پایین‌تر کوچکتر از دبی ورودی به مخزن در زمان رسیدن تراز سطح آب مخزن به آن پله باشد، دبی خروجی از مخزن باید برابر دبی ورودی در نظر گرفته شود. روند یابی سیلاب در هر سد به ازای سیلاب با دوره بازگشت 10 ساله با استفاده از روابط و توضیحات ارائه شده در بالا انجام می‌شود. پس از پایان روندیابی سیلاب 10 ساله روندیابی دوره بازگشت‌های بعدی شروع شده و این کار به ترتیب تا رسیدن به بزرگترین دوره بازگشت (سیلاب طراحی سد) ادامه می‌یابد. در این مرحله

که در آن $I(t)$ و $O(t)$ نرخ جریان ورودی و خروجی به مخزن و $S(t)$ نشان دهنده حجم مخزن و $dS(t)/dt$ نرخ تغییرات حجم مخزن در زمان t می‌باشند. با روش تفاضل محدود معادله (4)، به صورت رابطه (5) منقطع می‌شود:

$$\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \Delta t - \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \Delta t = S_t - S_{t-1} \quad (5)$$

که در آن Δt نشان دهنده گام زمانی، t و $t-1$ نشان دهنده زمان حال و گذشته می‌باشد. معادله بالا دو مجهول O_t و S_t دارد. در شروع شبیه‌سازی تراز سطح آب مخزن برابر با رقوم نرمال مخزن در فصول سیلابی (Hcr_{j1}) و دبی خروجی از مخزن نیز در گام اول شبیه‌سازی برابر دبی پله اول Qcr_{j1} است که از رابطه (7) بدست می‌آید، در نظر گرفته می‌شود. پس از ساده سازی معادله (5) حجم ذخیره مخزن در زمان t با استفاده از رابطه (6) محاسبه می‌گردد:

$$S_t = S_{t-1} + \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \Delta t - \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \Delta t \quad (6)$$

در رابطه (6) تمامی دبی‌های ورودی و خروجی بر حسب m^3/s ، گام زمانی Δt بر حسب ساعت و S_t حجم مخزن در زمان t بر حسب میلیون متر مکعب می‌باشد. سپس تراز سطح آب متناظر با حجم ذخیره S_t با استفاده از رابطه حجم-ارتفاع مخزن، محاسبه خواهد شد. پس از محاسبه تراز h_t با مقایسه تراز محاسباتی با ترازهای بحرانی در خصوص دبی خروجی از مخزن بر اساس روابط (7) تا (9) مجدداً تصمیم‌گیری می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{At the beginning} \\ \text{if : } h_t = Hcr_{j1} \text{ and } I_t < Qcr_{j1} \Rightarrow O_t = I_t \\ \text{if : } h_t = Hcr_{j1} \text{ and } I_t \geq Qcr_{j1} \Rightarrow O_t = Qcr_{j1} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{In the rising limb} \\ \text{if : } h_t < Hcr_{j(k+1)} \Rightarrow O_t = Qcr_{jk} \\ \text{if : } h_t \geq Hcr_{j,k+1} \text{ and } h_t < H \max_j \Rightarrow \\ O_t = Qcr_{j,k+1} = Qcr_{jk} + \alpha_{j,k+1} (Q \max_{j,k+1} - Qcr_{jk}) \\ \text{if : } h_t \geq Hcr_{j,k+1} \text{ and } h_t < H \max_j \\ \text{and } Qcr_{j,k+1} > I_t \Rightarrow O_t = Qcr_{j,k+1} = I_t \\ \text{if } h_t \geq H \max_j \Rightarrow O_t = Q \max_{jk} \end{array} \right. \quad (8)$$

حاصل از تولید انرژی و تامین نیاز آب کشاورزی، شرب، صنعت و زیست محیطی حداکثر شود. ولی در صورتی که هدف تحقیق مانند تحقیق حاضر، نحوه رهاسازی سیلاب در کوتاه مدت و پس از عبور تراز سطح آب مخزن از حجم کنترل سیلاب باشد، بهترین راه ارزیابی صحت نتایج این است که به ازای سیاست اعمال شده، خسارت سیلاب حداقل شود (Malekmohammadi et al., 2010). لذا در تحقیق حاضر تابع هدف انتخابی برای مدل بهینه‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\minimize Z = \left[\sum_{i=1}^{nT} p_i \times Damage_i \right] \times \left(1 + \beta \cdot \left(\sum_{j=1}^{nD} \sum_{i=1}^{nT} \frac{dh_{ij}}{H \max_j - Hnormal_j} \right) \right) \quad (10)$$

که در آن:

$$dh_{ij} = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{if } : wse_{ij} \leq H \max_j \\ wse_{ij} - Hnormal_j \rightarrow \\ \text{if } : wse_{ij} > H \max_j \end{cases}$$

$$p_i = \frac{1}{T_i} \quad (11)$$

$$Damage_i = f(Q_{peak_{i,nD}}, Land\ use) \quad (12)$$

i اندیس احتمال وقوع سیلاب ($i=1, \dots, nT$) و $i=1$ نشان دهنده سیلاب با دوره بازگشت 10 ساله است)، nT تعداد کل دوره بازگشت‌های مورد بررسی، j اندیس شماره مخزن ($j=1, \dots, nD$)، nD تعداد کل سدهای سیستم، p_i احتمال وقوع سیلاب شماره i ، T_i دوره بازگشت سیلاب شماره i ، $Damage_i$ کل هزینه خسارت سیلاب سیل شماره i ، $H \max_j$: تراز تاج سد منهای ارتفاع آزاد در مخزن شماره j ، $Hnormal_j$: تراز نرمال در مخزن شماره j ، wse_{ij} حداکثر رقوم سطح آب به ازای سیلاب شماره i در مخزن شماره j ، dh_{ij} تفاوت بین حداکثر رقوم سطح آب به ازای سیلاب شماره i در مخزن شماره j با تراز نرمال در مخزن شماره j ، $Q_{peak_{i,nD}}$ اوج سیلاب خروجی به ازای سیلاب شماره i از آخرین سد سیستم (سد شماره nD)، $Landuse$ ارزش اقتصادی کاربری اراضی و β ضریب بزرگ نمایی تابع جریمه می‌باشد که بزرگتر یا مساوی یک می‌باشد و توسط کاربر تعیین می‌شود.

از ترازها و دبی‌های بحرانی تعیین شده برای روندیابی سیلاب با دوره بازگشت قبلی بدون تغییر برای روندیابی سیلاب با دوره بازگشت بعدی استفاده خواهد شد.

روندیابی سیلاب در سیستم چند مخزنی به این صورت انجام خواهد شد که پس از اتمام روندیابی سیلاب برای هر دوره بازگشت در سد بالادست، هیدروگراف خروجی از سد بالادست با هیدروگراف حوضه میانی حد فاصل دو سد با اعمال زمان انتقال جمع و هیدروگراف جدید به عنوان هیدروگراف ورودی سد پایین‌دست لحاظ خواهد شد. برای انجام این کار یک برنامه کامپیوتری تهیه شده است. برنامه فوق بر اساس شبکه سدهای معرفی شده به برنامه، به صورت اتوماتیک، محاسبات روندیابی سیلاب را در سدهای پشت سر هم انجام می‌دهد.

2-3- مدل بهینه‌سازی

در زمینه استفاده از روش‌های تکاملی در منابع آب و مدیریت سیلاب، تعریف صحیح تابع هدف و قیود بهینه‌سازی اهمیت فراوانی دارد. لذا در تحقیقات مختلف توابع هدف متفاوتی برای تعیین الگوریتم بهینه بهره‌برداری از سدها در زمان سیلاب استفاده شده است. (Unver and Mays (1990) ایده اصلی استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های رودخانه-مخزن را ارائه کردند. بر اساس ایده مطرح شده توسط آنها تابع هدف مسأله بهینه‌سازی مدیریت سیلاب یا به صورت حداقل‌سازی اختلاف با یک تراز مینا، اختلاف از یک دبی مینا، تراز سطح آب در سیلاب دشت، اوج سیلاب یا سرریز از مخزن سد یا حداکثر سازی حجم ذخیره مخزن تعریف می‌شود. بر اساس همین دیدگاه (Hsu and Wei (2007). Karaboga et al. (2008), Wei and Hsu, Chang L.C. (2008), Qin et al. (2008), Qin et al. (2010), Li et al. (2010), Ahmed (2013) و (2010) تابع هدف مسأله بهینه‌سازی کنترل سیلاب را به صورت حداقل‌سازی تراز سطح آب یا اوج سیلاب تعریف کردند. در صورتی که هدف از تحقیق مانند تحقیق (Ngo et al. (2007) یافتن حجم بهینه کنترل سیلاب مخزن باشد بهترین راه ارزیابی صحت نتایج مدل این است که در کنار حداقل کردن خسارت سیلاب، منافع

مورد بررسی در تحقیق حاضر یک کد بهینه‌سازی، بر پایه اصول روش الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی توسعه داده شده و از آن به عنوان ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار شبیه‌ساز-بهینه‌ساز استفاده شده است (Haupt, 2004).

4-2- اتصال مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی ریسک خسارت سیلاب در سیستم چند مخزنی مورد بررسی در این تحقیق مدل شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریاچه به مدل بهینه‌سازی متصل گردید. در این تحقیق از فلوچارت مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده شده است. مراحل این فلوچارت به شرح الگوریتم زیر می‌باشد:

1- ورود اطلاعات شامل: هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف (10 ساله تا سیلاب طرح)، منحنی حجم-ارتفاع مخازن، منحنی دبی-اشل سرریزهای مخازن، فاصله بین پله‌ها، تراز تاج سدها، رقوم نرمال کنترل سیلاب مخازن، تابع خسارت-دبی؛

2- ساختن جمعیت اولیه به صورت تصادفی بین صفر و یک بر اساس تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله α_{jk} ؛
3- محاسبه دبی بحرانی خروجی از پله‌های سد اول بر اساس معادله‌های (1) تا (3) و انجام روندیابی سیلاب بر اساس روش پله‌ای مانور دریاچه با استفاده از معادله‌های (6) تا (9). این کار باید برای تمامی هیدروگراف‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف انجام شود. این مرحله با روندیابی سیلاب با دوره بازگشت 10 ساله شروع و با اعمال سیاست واحد بهره‌برداری از دریاچه‌های سرریز به سیلاب طراحی سد ختم می‌شود؛

4- هیدروگراف سیلاب روندیابی شده در مخزن سد بالادست با هیدروگراف حوضه میانی بین دو سد با اعمال تأخیر زمانی جمع شده و هیدروگراف ورودی به سد پایین‌دست محاسبه می‌گردد. این کار باید برای تمامی هیدروگراف‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف انجام شود؛

5- مراحل (3) و (4) برای سدهای دیگر سیستم از بالادست به سمت پایین‌دست تا رسیدن به آخرین سد سیستم برای تمامی دوره بازگشت‌ها تکرار می‌شود؛

6- خسارت سیلاب در رودخانه پایین‌دست بر اساس

در تابع هدف مسأله $\sum_{i=1}^{nT} p_i \times Damage_i$ نشان دهنده خسارت سالیانه قابل انتظار کل سیستم می‌باشد (Karamouz et al. 2008) و

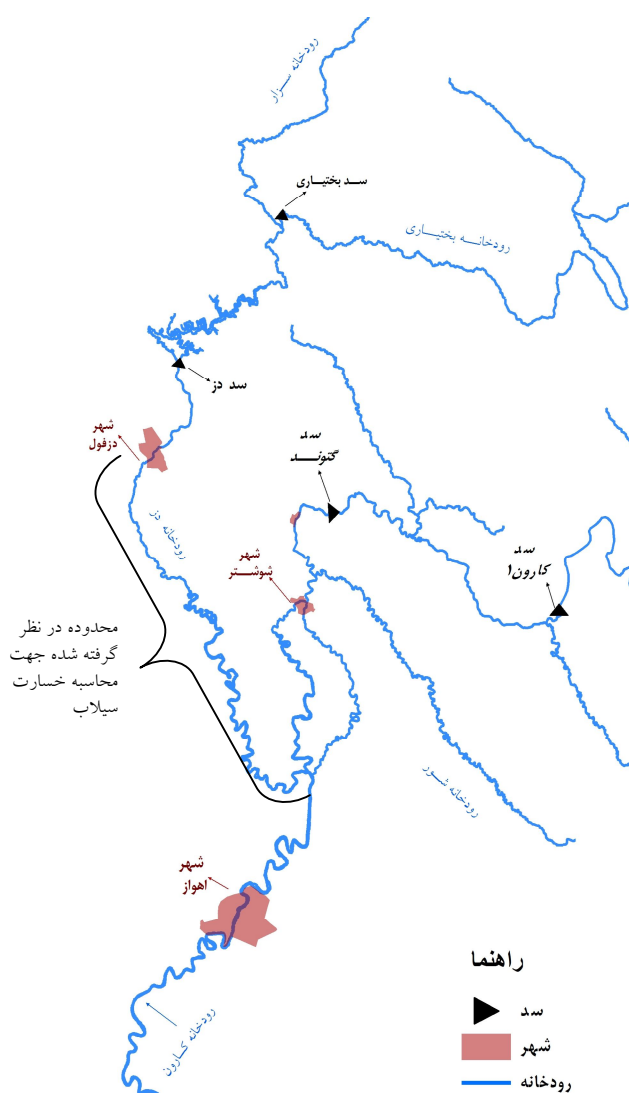
$$1 + \beta \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^{nD} \sum_{i=1}^{nT} \frac{dh_{ij}}{H \max_j - H \text{normal}_j}}{\dots} \right)$$

روگذری است. در صورتی که به ازای هر سیلی حداکثر تراز سطح آب در تمامی سدها کمتر از تراز تاج سد منهای ارتفاع آزاد باشد، مقدار ضریب β برابر با صفر منظور شده و جریمه‌ای به تابع هدف اضافه نمی‌شود. ولی در صورتی که به ازای سیلاب طراحی یا سیلاب با دوره بازگشت کوچکتر، تراز آب در مخزن بیشتر از تراز تاج سد منهای ارتفاع آزاد شود، مقدار ضریب β بزرگتر یا مساوی یک منظور شده و تابع جریمه اعمال خواهد شد. در برخی موارد ممکن است با $\beta = 1$ تابع جریمه روگذری برای جلوگیری از روگذری کافی نباشد و سد یا سدهایی دچار روگذری شوند. در این صورت لازم است ضریب $\beta > 1$ انتخاب شود، به نحوی که به ازای جواب بهینه هیچ سدی دچار روگذری نشود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تابع هدف نشان داده شده در معادله (10) به دبی خروجی از سدهای مختلف که با استفاده از روابط (7) تا (9) تعیین می‌شوند، وابسته است. همان‌طور که در روابط (7) تا (9) ملاحظه می‌گردد دبی خروجی از سدهای مختلف نیز تابع مقدار ضریب α_{jk} می‌باشد. لذا ضریب α_{jk} متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله بهینه‌سازی می‌باشند.

برای جلوگیری از یافتن جواب‌های نامطلوب معمولاً فضای تصمیم‌گیری تمامی مدل‌های بهینه‌سازی با استفاده از قیدهایی محدود می‌شود. در تحقیق حاضر قیدهای مسأله بهینه‌سازی نیز به سه گروه اصلی تقسیم بندی می‌شوند: قید پیوستگی (معادله 6)، قیدهای مربوط به بهره‌برداری دریاچه‌های سرریز (معادلات 7 تا 9) و تابع جریمه روگذری در معادله (10).

با توجه به تعداد بالای متغیرهای تصمیم‌گیری، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز و شکل غیرخطی تابع هدف و احتمال وجود نقاط بهینه محلی متعدد، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی مسأله استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های خاص تابع هدف و مسأله



شکل 2 محدوده مورد بررسی در این تحقیق

مقدار اوج سیلاب خروجی از آخرین سد سیستم با استفاده از رابطه دبی-خسارت برای تمامی دوره بازگشت‌ها محاسبه می‌شود؛

7- با استفاده از رابطه (10) مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود؛

8- با استفاده از برنامه بهینه‌سازی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری تغییر کرده و محاسبات مجدداً از مرحله 3 تکرار می‌شود. تکرار محاسبات تا زمانی که خسارت سالانه مورد انتظار برای کل سیستم حداقل شود، ادامه می‌یابد.

3- مطالعه موردی

مطالعه موردی در این تحقیق برای سامانه رودخانه-مخزن سد‌های بختیاری و دز انجام گرفته است. سد بختیاری بر روی رودخانه بختیاری و در بالادست سد دز، در فاصله 73 کیلومتری آن قرار گرفته است. رودخانه دز از دو شاخه اصلی به نام‌های سزار و بختیاری تشکیل می‌شود. این دو رود به هم می‌پیوندند و رودخانه دز را تشکیل می‌دهند. در پایین‌دست سد دز، رودخانه دز پس از گذر از شهر دزفول در جهت جنوب جریان یافته و در 45 کیلومتری شمال اهواز به رودخانه کارون می‌پیوندد. در این تحقیق تأثیر سد‌های دز و بختیاری بر روی کنترل سیلاب رودخانه دز در بازه خروجی سد دز تا تقاطع به رودخانه کارون (بندقی) بررسی شده است. در شکل 2 محدوده مورد بررسی در این تحقیق نشان داده شده است. مشخصات کلی سد‌های مورد بررسی در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات سد‌های مورد استفاده در مطالعه موردی

مشخصات سد		نوع سد
دز	بختیاری	
بتنی دو قوسی	بتنی دو قوسی	
840	354	تراز تاج سد (متر)
830	352	رقوم نرمال تولید انرژی (متر)
830	340	رقوم نرمال کنترل سیلاب (متر)
5472	3550	حجم کل مخزن (میلیون متر مکعب)
627	837	حجم کنترل سیلاب مخزن (میلیون متر مکعب)
5750	7137	حدکثر ظرفیت سرریز (متر مکعب بر ثانیه)
11	15	تعداد پله‌ها
0	0	ارتفاع آزاد

سد سیستم (سد دز)، از نتایج تحقیق Malekmohamadi

برای تعیین خسارت سیلاب نواحی پایین‌دست سد آخرین

مطالعات مرحله دوم سد بختیاری (دز آب 1384) به ازای دوره بازگشت‌های 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000 و 10000 ساله در قالب سناریوی اول و اصلی این تحقیق اجرا و یکبار به ازای هیدروگراف سیلاب‌های ارائه شده توسط Malekmohammadi et al. (2010) به ازای دوره بازگشت‌های 10، 50، 100، 500 و 1000 ساله در قالب سناریوی دوم اجرا و نتایج سناریوی دوم با نتایج Malekmohammadi et al. (2010) مقایسه گردید. لازم به توضیح است که هیدروگراف سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های 25، 200 و 10000 ساله توسط Malekmohammadi et al. (2010) گزارش نشده است.

با توجه به اطلاعات ورودی به برنامه و مشخصات سدهای سیستم تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری 26 متغیر برابر تعداد پله‌ها می‌باشد. در شکل‌های 3 تا 6 هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های 100، 500، 1000 و 10000 ساله ورودی و خروجی از سد دز و در شکل‌های 7 و 8 هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های 100 و 500 ساله ورودی و خروجی از سد بختیاری به ازای سناریوی اول نشان داده شده است. در جدول 2 دبی بهینه خروجی از پله‌های مختلف سدهای گوناگون به ازای سناریوی اول نشان داده شده است. در جدول 3 خلاصه نتایج سیلاب ورودی و خروجی به سدهای مختلف به ازای سناریوی اول نشان داده شده است. در جدول 4 خلاصه نتایج سیلاب ورودی و خروجی به سدهای مختلف به ازای سناریوی دوم نشان داده شده و نتایج حاصل با نتایج تحقیق Malekmohammadi et al. (2010) مقایسه شده است.

بر اساس مقادیر اوج سیلاب خروجی از سد دز با دوره بازگشت‌های مختلف در حالت بهینه بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز سدها، حداقل مقدار تابع هدف که نشان دهنده حداقل خسارت سالانه قابل انتظار است، در سناریوی اول 5/815 میلیارد ریال می‌باشد. در صورتی که به جای دبی بهینه خروجی از پله‌های مختلف سدها فرض شود که دبی تمامی پله‌ها برابر حداکثر ظرفیت سرریز در حالت دریچه‌های کاملاً باز در آن پله می‌باشد، یعنی برای تمامی پله‌ها و سدها $\alpha_{jk} = 1$ فرض شود، مقدار خسارت سالانه مورد انتظار برابر 40/89 میلیارد ریال خواهد شد.

(2010) استفاده شده است. بر اساس نتایج این تحقیق خسارت سیلاب رودخانه دز به عنوان تابعی از حداکثر دبی خروجی از سد دز تعریف شده است.

3-1- اطلاعات ورودی

اطلاعات ورودی شامل فایل داده‌های سیلاب با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000 و 10000 ساله ورودی به بالادست ترین سد سیستم (بختیاری) و حوضه‌های میانی حد فاصل دو سد (هیدروگراف با دوره بازگشت‌های مختلف رودخانه سزار)، فایل داده‌های حجم-ارتفاع مخزن برای کلیه سدها، فایل داده‌های رابطه دبی-اشل سرریز در حالت دریچه کاملاً باز برای کلیه سدها، تابع خسارت-دبی بر اساس اوج دبی خروجی از سد دز، فاصله بین پله‌ها (در این تحقیق فاصله بین پله‌ها یک متر فرض گردید)، رقوم نرمال بهره‌برداری از مخزن در زمان سیلاب، تراز تاج سد و ارتفاع آزاد سدهای مختلف و ماتریس گره بندی شبکه محاسباتی می‌باشند. در تحقیق حاضر هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف از مطالعات مرحله دوم سد بختیاری (دز آب 1384) استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.

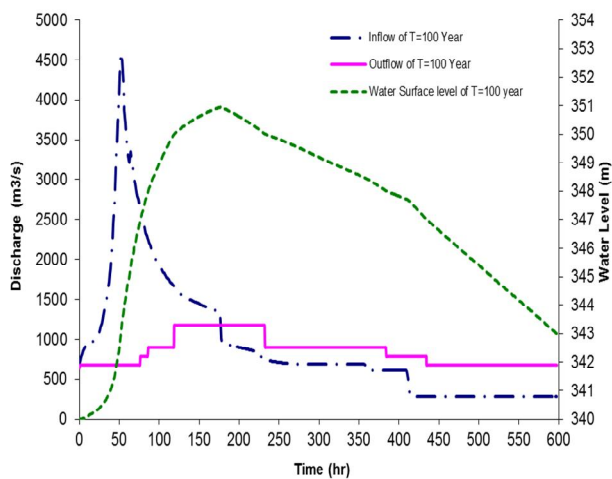
4- بحث و نتایج

همان‌طور که پیشتر اشاره گردید Malekmohammadi et al. (2010) یک مدل بهینه برای مدیریت سیلاب در زمان واقعی برای سیستم رودخانه دز توسعه دادند. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی توسعه داده شده بر پایه روش شبیه‌سازی پله‌ای مانور دریچه‌های سرریز سیستم رودخانه دز شامل دو سد بختیاری و دز به عنوان مطالعه موردی بررسی و برای تمامی دوره بازگشت‌ها و سدها از سیاست واحدی برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز استفاده شده و نتایج تحقیق حاضر با یکی از سناریوهای بررسی شده در تحقیق Malekmohammadi et al. (2010) مقایسه شده است.

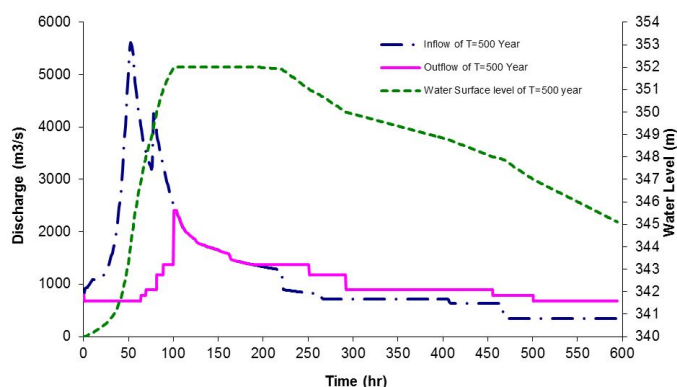
از آنجا که دبی اوج و شکل هیدروگراف‌های مورد استفاده در دو تحقیق یکسان نیست، برای یکسان‌سازی اطلاعات پایه مورد استفاده در هر دو تحقیق یکبار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به ازای هیدروگراف سیلاب‌های

کاهش یافته است.

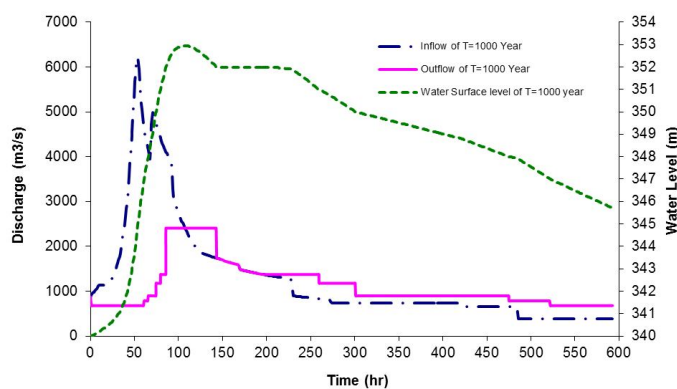
لذا با بهره‌برداری بهینه از دریچه‌های سرریز سدها خسارت سالانه مورد انتظار در مسأله مورد بررسی حدود 7 برابر



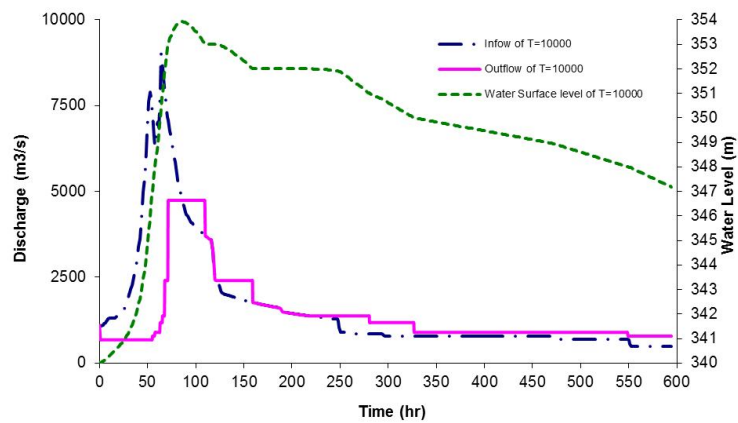
شکل 3 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد دز به ازای سیلاب 100 ساله در سناریوی اول



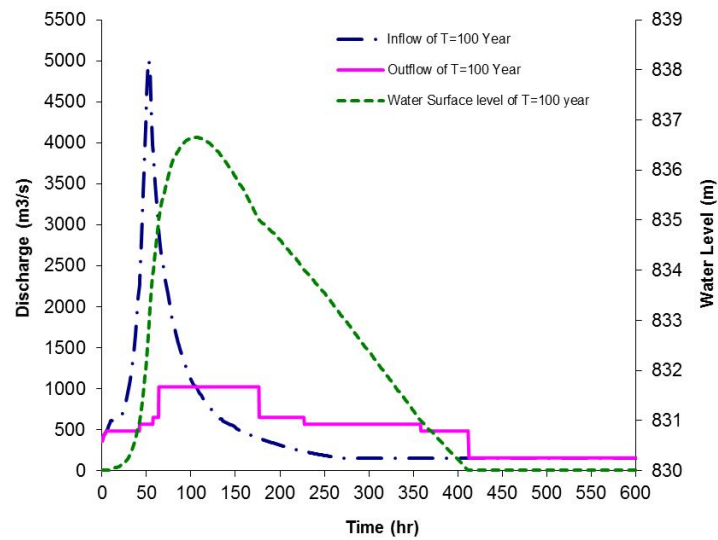
شکل 4 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد دز به ازای سیلاب 500 ساله در سناریوی اول



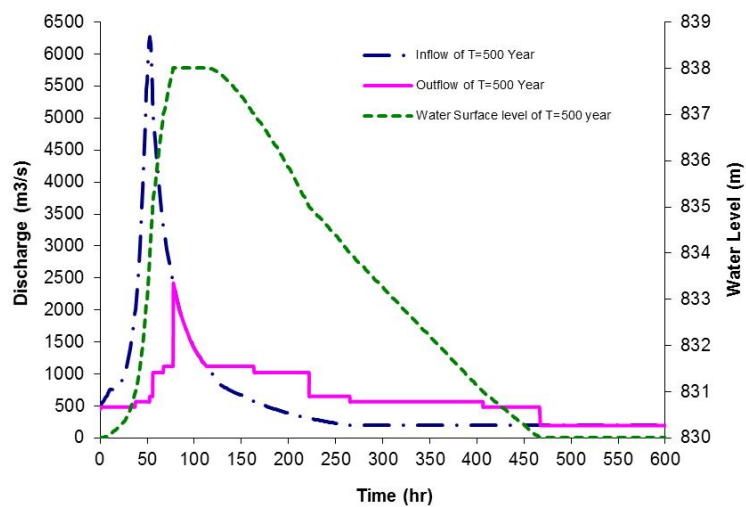
شکل 5 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد دز به ازای سیلاب 1000 ساله در سناریوی اول



شکل 6 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد دز به ازای سیلاب 10000 در سناریوی اول



شکل 7 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد بختیاری به ازای سیلاب 100 در سناریوی اول



شکل 8 نمودار تغییر سیلاب ورودی و خروجی به سد بختیاری به ازای سیلاب 500 در سناریوی اول

جدول 2 ضرایب بهینه‌سازی و دبی خروجی بهینه از پله‌های مختلف سدهای گوناگون در سناریوی اول

بختیاری			دز			نام سد
α_{jk}	$Q_{max_{jk}}$ (m^3/s)	$Q_{cr_{jk}}$ (m^3/s)	α_{jk}	$Q_{max_{jk}}$ (m^3/s)	$Q_{cr_{jk}}$ (m^3/s)	شماره پله
0/1243	3886	483	0/8000	850	680	1
0/0228	4093	565	0/0000	1140	680	2
0/0000	4278	565	0/0000	1440	680	3
0/0000	4492	565	0/0000	1770	680	4
0/0205	4670	650	0/0000	2140	680	5
0/0880	4873	1021	0/0000	2550	680	6
0/0000	5079	1021	0/0000	2970	680	7
0/0234	5242	1120	0/0384	3430	786	8
0/3018	5429	2421	0/0356	3900	896	9
0/8448	5583/5	5093	0/0000	4400	896	10
0/2526	5752/8	5259	0/0706	4900	1179	11
			0/0457	5430	1373	12
			0/2233	6000	2407	13
			0/5623	6557	4740	14
			0/4984	7137	5935	15

جدول 3 حداکثر دبی ورودی، خروجی و رقوم سطح آب سدهای مختلف در سناریوی اول

دوره بازگشت (سال)								نام سد	پارامتر
10000	1000	500	200	100	50	25	10		
8574	6816	6267	5565	5015	4442	3878	3098		اوج سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه)
5093	2421	2421	1120	1021	1021	1021	565	بختیاری تحقیق حاضر	اوج سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)
839/00	838/27	838/00	837/57	836/65	835/66	835/00	833/80		حداکثر تراز سطح آب (متر)
9026	6223	5612	5015	4597	4146	3684	3063		اوج سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه)
4740	2407	2407	1373	1179	896	786	680	دز	اوج سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)
353/92	352/95	352/00	351/54	350/95	349/81	347/92	345/67	تحقیق حاضر	حداکثر تراز سطح آب (متر)
415/35	204/37	204/37	110/98	93/42	67/87	57/84	0		خسارت سیلاب (میلیارد ریال)

بازگشت‌های کمتر از سیلاب طراحی حداقل کند، به نحوی که دبی خروجی از سد دز در سناریوی اول به ازای دوره بازگشت‌های 50، 100 و 200 ساله در حدود 896، 1179 و 1373 متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

همان‌طور که در جدول‌های 2 تا 4 مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه احتمال وقوع سیلاب با دوره بازگشت کمتر نسبت به سیلاب با دوره بازگشت‌های بزرگتر بیشتر است، لذا مدل بهینه‌سازی سعی نموده تا حد ممکن حداکثر دبی خروجی از آخرین سد سیستم (سد دز) را به ازای دوره

جدول 4 حداکثر دبی ورودی، خروجی و رقوم سطح آب سدهای مختلف در سناریوی دوم

دوره بازگشت (سال)					پارامتر	نام سد	نام محققان
1000	500	100	50	10			
5314	4342	2386	2095	1156	اوج سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه)	بختیاری	تحقیق حاضر
2421	2421	1021	565	483	اوج سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)		
5650	5085	4314	3905	2682	اوج سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه)	دز	تحقیق حاضر
2697	2407	1179	896	680	اوج سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)		
230/64	204/37	93/42	67/87	0/00	خسارت سیلاب (میلیارد ریال)		
4733	4490	3691	-	-	اوج سیلاب ورودی (متر مکعب بر ثانیه)	دز	Malekmohammadi et al. (2010)
3160	2420	1239	-	-	اوج سیلاب خروجی (متر مکعب بر ثانیه)		
272/49	205/59	98/83	-	-	خسارت سیلاب (میلیارد ریال)		

خروجی از سد بختیاری از لحاظ زمانی برهم منطبق نشود. همان‌طور که در جدول‌های 3 و 4 ملاحظه می‌شود، نتایج مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در هر دو سناریو تفاوت چندانی با یکدیگر نمی‌کند. همان‌طور که در جدول 4 ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از این تحقیق در مقایسه با نتایج Malekmohammadi et al. (2010) خصوصاً در سیلاب با دوره بازگشت 1000 ساله بهتر است. این در حالی است که در این تحقیق از سیاست واحدی برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز برای تمامی دوره بازگشت‌ها استفاده شده، ولی در تحقیق Malekmohammadi et al. (2010) این موضوع رعایت نشده است. در تحقیق آنها متغیرهای تصمیم‌گیری کل هیدروگراف خروجی از سدهای بختیاری و دز در گام‌های زمانی 2 ساعته بوده و این محققان برای روندیابی هر سیلاب، حتی سیلاب‌های با دوره بازگشت کوچک، مثلاً سیلاب 100 ساله، از کل حجم کنترل سیلاب مخزن استفاده کرده‌اند. به دلیل اینکه این محققان سیاست واحدی برای بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز در برنامه شبیه‌سازی خود اعمال نکرده‌اند، بهینه‌سازی هر سیلاب (هر

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌گردد، با توجه به ظرفیت عبور سیلاب رودخانه دز خسارت سیلاب پایین‌دست رودخانه به ازای دبی زیر 700 متر مکعب بر ثانیه صفر می‌باشد. همان‌طور که در جدول 3 ملاحظه می‌شود، به ازای سیلاب طراحی حداکثر، تراز سطح آب در هیچ سدی از مقدار حداکثر ارتفاع تاج سد تجاوز نکرده و هیچ سدی دچار روگذری نشده است. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، ضرایب بهینه‌سازی سد دز در پله‌های 2 تا 7 و پله 10 صفر می‌باشد. این به آن معنی است که دبی پله‌های دوم تا هفتم برابر دبی خروجی از پله اول بوده و نیازی به بازگشایی بیشتر دریچه‌های سرریز برای این پله‌ها نیست. این موضوع برای پله دهم نیز صادق است و دبی خروجی از پله‌های فوق نیز برابر دبی خروجی از پله نهم می‌باشد. در حد فاصل سدهای دز و بختیاری حوضه رودخانه سزار وجود دارد و سیلاب خروجی از سد بختیاری پس از جمع شدن با سیلاب این رودخانه به سد دز می‌رسد. همان‌طور که در شکل‌های 7 تا 9 مشاهده می‌گردد، مدل بهینه‌سازی به نحوی ضرایب بهینه‌سازی در سد بختیاری را تعیین نموده که اوج سیلاب رودخانه سزار با اوج سیلاب

مخزن صورت می‌گیرد. لذا تعیین میزان دبی خروجی در هر تراز مهمترین اقدام در این مرحله از کار است که با استفاده از یک مدل بهینه سازی بر پایه اصول الگوریتم ژنتیک اعداد حقیقی تعیین شده است. دبی خروجی از هر تراز به نحوی تعیین می‌شود که هم ریسک خسارت سیلاب به نواحی پایین دست حداقل شود و هم ایمنی کلیه سدها به ازای هیچ سیلابی به خطر نیفتد. لذا تابع هدف مسأله بهینه‌سازی حداقل‌سازی خسارت سالیانه قابل انتظار در رودخانه پایین دست می‌باشد. به منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی، سیستم رودخانه دز شامل سدهای بختیاری و دز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیق Malekmohammadi et al. (2010) مقایسه گردید. اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در سدهای مورد مطالعه سبب کاهش قابل ملاحظه در خسارت سالانه سیلاب سیستم مورد مطالعه شده که نشان دهنده عملکرد مناسب مدل بهینه‌سازی می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق که با اعمال سیاست واحد بهره‌برداری از دریچه‌های سرریز بدست آمده در مقایسه با Malekmohammadi et al. (2010) بهتر می‌باشد.

6- فهرست علائم

$dS(t)/dt$	نرخ تغییرات حجم مخزن در زمان t
$Damage_i$	کل هزینه خسارت سیلاب سیل
dh_{ij}	فاصله حداکثر رقوم سطح آب با رقوم نرمال
Hcr_{jk}	ترازهای بحرانی در پله k ام سد j
$H \max_j$	تراز تاج سد منهای ارتفاع آزاد
$Hnormal_j$	تراز نرمال در مخزن شماره j
$I(t)$	نرخ جریان ورودی مخزن
i	اندیس احتمال وقوع
j	اندیس شماره مخزن
k	اندیس شماره تراز بحرانی
nT	تعداد کل دوره بازگشت‌های مورد بررسی
nD	تعداد کل سدهای سیستم
Landuse	ارزش اقتصادی کاربری اراضی
$O(t)$	نرخ خروجی به مخزن
p_i	احتمال وقوع سیلاب شماره i
$Q_{peak_{i,nD}}$	اوج سیلاب خروجی

دوره بازگشت) مستقل از سایر سیلاب‌ها و به صورت جداگانه انجام شده و خسارت سیلاب برای همان سیلاب خاص حداقل شده است. لذا روش Malekmohammadi et al. (2010) زمانی کاربرد دارد که سدها دارای سیستم پیش‌بینی سیلاب باشند و از قبل برای بهره‌بردار معلوم باشد سیلابی که در آستانه وقوع است، معادل چه دوره بازگشتی است تا بر اساس روش ارائه شده توسط آنها برنامه بهینه‌سازی اجرا و برنامه رهاسازی سیلاب از مخزن به بهره‌بردار داده شود. ولی در روش پیشنهادی در این تحقیق چون تمامی سیلاب‌ها از سیلاب‌های کوچک تا بزرگ به صورت همزمان با یک سیاست بهره‌برداری واحد توسط مدل بهینه‌سازی بررسی شده‌اند، بهره‌بردار نیازی به سیستم پیش‌بینی سیلاب ندارد و با اطمینان از عدم روگذری و آسیب به سد، بهره‌بردار می‌تواند بر اساس تغییرات تراز سطح آب مخزن نسبت به رهاسازی سیلاب با هر بزرگی طبق نتایج جدول 2 اقدام کند. لذا حسن روش پیشنهادی در این تحقیق، نسبت به سایر روش‌ها برای مدیریت سیلاب این است که نیازی به سیستم پیش‌بینی سیلاب ندارد و برای روندیابی تمامی سیلاب‌ها از سیاست بهره‌برداری واحدی استفاده می‌کند. در نتیجه قضاوت بهره‌برداران برای روندیابی سیلاب در سدهای مختلف در این روش حذف می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب پایین دست با استفاده از مانور دریچه‌های سرریز سدهای سری پشت سر هم که فاقد سیستم پیش‌بینی سیلاب هستند، پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر عملکرد تمامی سدهای سیستم به صورت هم‌زمان برای حداقل‌سازی خسارت سیلاب در پایین دست مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر با روندیابی سیلاب با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50، 100، 200، 500، 1000 و 10000 ساله در تمامی سدها، سعی شده خسارت سالانه قابل انتظار سیلاب حداقل شود. در روش پیشنهادی، تصمیم‌گیری در رابطه با اینکه در هر تراز بحرانی، چه مقدار دبی رها شود، فقط بر اساس تراز آب

(2011). "Optimization-simulation for short-term reservoir operation under flooding conditions." *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, IWA Publishing, 60(7), 434-447.

Chang, F. J. and Chen, L. (1998). "Real-code genetic algorithm for rule-base flood control reservoir management", *Water Resource Management*. 12(3), 185-198.

Chang, L. C. (2008). "Guiding rational reservoir flood operation using penalty-type genetic algorithm", *Journal of Hydrology*. 354(1), 65-74.

Chang, L. C., Chang, F. J. and Hsu, H. C. (2010). "Real-time reservoir operation for flood control using artificial intelligent techniques." *International Journal of Nonlinear Sciences & Numerical Simulation*. 11(11), 887-902.

Cheng, C.T. and Chau, K.W. (2001). "Fuzzy iteration methodology for reservoir flood control operation." *J. Am. Water Resources Assoc.* 37(5), 1381-1388.

Cheng, C.T. and Chau, K.W. (2004). "Flood control management system for reservoirs", *Environmental Modelling Software*, 19(12), 1141-1150.

Chow V., David M., Mays L., (1988) "Applied Hydrology 1st Edition", McGraw-Hill Science, ISBN-13: 978-0070108103.

Chuntian, C., (1999). "Fuzzy optimal model for the flood control system of the upper and middle reaches of the Yangtze River", *Hydrological Sciences Journal*, 44(4), 573-582.

Dittmann R., Froehlich F., Pohl R. and Ostrowski M. (2009). "Optimum multi-objective reservoir operation with emphasis on flood control and ecology", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1973-1980.

Fu, G. (2008). "A fuzzy optimization method for multi-criteria decision making: An application to reservoir flood control operation", *Expert Systems with Applications*. 34(1), 145-149.

Haktanir T. and Kisi O., (2001). "Ten-stage discrete flood routing for dams having gated spillway", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 6(1), 86-90.

Haktanir, T., Citakoglu, H. and Acanal, N. (2013). "Fifteen-stage operation of gated spillways for flood routing management through artificial reservoirs." *Hydrological Sciences Journal*, 58(5), 1013-1031.

Haupt R.L. and Haupt S.E., (2004). *Practical genetic algorithms*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

$Q_{cr,jk}$ دبی خروجی بحرانی در پله k ام سد j
 $Q_{max,jk}$ حداکثر دبی عبوری از سرریز در حالت دریچه‌های کاملاً باز

$S(t)$ حجم مخزن

T_i دوره بازگشت سیلاب شماره i

wse_{ij} حداکثر رقوم سطح آب در مخزن

α_{jk} ضریب بهینه‌سازی (بین صفر و یک)

β ضریب بزرگ‌نمایی تابع جریمه

7- منابع

اسدی پور، ن. و محمد ولی سامانی ح. (1389). "بهینه‌سازی عملکرد دریچه‌های سرریز سد برای مهار سیل با استفاده از منطق فازی"، *مجله هیدرولیک*، دوره 5، شماره 2، ص.ص. 13-29.

رضازاده، ک. و محمد ولی سامانی ح. (1381). "کنترل سیلاب در مخازن سدها و بهینه‌سازی بهره‌برداری از دریچه‌ها". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

شرکت مهندسی مشاور دزآب (1384). "مطالعات مرحله دوم سد مخزنی بختیاری- گزارش هیدرولوژی"، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

Acanal, N. and 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*, 44(2), 163-172.

Acanal, N., Yurtal, R. and Haktanir, T. (2000). "Multi-stage flood routing for gated reservoirs and conjunctive optimization of hydroelectricity income with flood losses", *Hydrological Sciences Journal*, 45(5), 675-688.

Ahmed, S. M. S. and Mays, L. W. (2013). "Model for determining real-time optimal dam releases during flooding conditions", *Journal of Natural Hazards*, 65(3), 1849-1861.

Arnell, N. W. (1988). "Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(1), 471-481.

Bagis, A. and Karaboga, D. (2007). "Evolutionary algorithm-based fuzzy PD control of spillway gates of dams", *Journal of the Franklin Institute*, 344(8), 1039-1055.

Bayat, B., Mousavi, S. J. and Montazeri Namin, M.

- systems", *Journal of Natural Hazards*, 53(3), 459–482.
- Marien, J.L. (1984). "Controllability conditions for reservoir flood control systems with applications", *Water Resour. Res.*, 20(11), 1477–1488.
- Marien, J.L., Damazio, J.M. and Costa, F.S. (1994). "Building flood control rule curves for multipurpose multi reservoir systems using controllability conditions", *Water Resour. Res.*, 30(4), 1135–1144
- Needham, J.T., Watkins Jr., D.W., Lund, J.R., and Nanda, S., (2000). "Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(3), 118–127.
- Ngo L.L., Madsen H. and Rosbjerg D. (2007). "Simulation and optimization modeling approach for operation of the HoaBinh reservoir", *Vietnam. J. Hydrol.* 336: 269–281.
- Qin, H., Zhou, J. and Lu, Y. (2010). "Multi-objective cultured differential evolution for generating optimal trade-offs in reservoir flood control operation", *Water Resource Management*, 24(11), 2611–2632.
- Turgeon, A. (2005). "Daily operation of reservoir subject to yearly probabilistic constraints", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 342-350.
- Unver, O.I. and Mays, L.W. (1990). "Model for real-time optimal flood control operation of a reservoir system." *Water Resource Management*, 4(1), 21-46.
- Valerino, O.C.S., Koike, T., Yang, K. and Yang, D. (2010). "Optimal dam operation during flood season using a distributed hydrological model and a heuristic algorithm", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 15(7), 580–586.
- Wei, C. C. and Hsu, N. S., (2008). "Multi-reservoir real-time operations for flood control using balanced water level index method", *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1624–1639.
- Wei, C. C. and Hsu, N. S., (2009). "Optimal tree-based release rules for real-time flood control operations on a multipurpose multi reservoir system", *Journal of Hydrology*, 365(3), 213–224.
- Windsor, J. S., (1973). "Optimization model for the operation of flood control systems". *Water Resour. Res.* 9(5), 1219–1226.
- He, Y., Xu, Q., Yang. S. and Liao, L., (2014). "Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm", *Applied Mathematical Modeling*, DOI:10.1016/j.apm.2014.02.030.
- Hsu, N.S. and Wei, C.C. (2007). "A multi-purpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion", *Journal of Hydrology*, 336(3), 282–293.
- Karaboga, D., Bagis, A. and Haktanir, T. (2004). "Fuzzy logic based operation of spillway gates of reservoirs during floods", *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 9(6), 544–549.
- Karaboga, D., Bagis, A. and Haktanir, T. (2008). "Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number", *Applied Soft Computing*, 8(1), 232–238.
- Karamouz, M., Abesi. O., Moridi, A. and Ahmadi, A., (2008). "Development of optimization schemes for floodplain management; a case study", *Water Resource Management*. 23(9), 1743-1761.
- Karbowski, A., Malinowski, K. and Niewiadomska-Szynkiewicz, E. (2005). "A hybrid analytic/rule-based approach to reservoir system management during flood", *Decision Support Syst.*, 38(4), 599–610.
- Kelman, J., Damazio, J.M., Marien, J.L. and DaCosta, J.P. (1989). "The determination of flood control volumes in a multi-reservoir system", *Water Resour. Res.*, 25(3), 337–344.
- Kumar, D. N., Baliarsingh, F. and Raju, K.S. (2010). "Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming", *Water Resource Management*, 24(6), 1045–1064.
- Li, Y., Zhou J., Zhang, Y., Qin, H. and Liu, L. (2010). "Novel multi objective shuffled frog leaping algorithm with application to reservoir flood control operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 136(2), 217–226.
- Linsley, R. K., et al. (1992). *Water resources engineering*, 4th ed. New York, NY: Mc-Graw-Hill Book Company.
- Malekmohammadi, B., Kerachian, R. and Zahraie, B. (2010). "A real-time operation optimization model for flood management in river-reservoir