

## Application of Genetic Algorithms and K-Nearest Neighbor Method in Developing Reservoir Operation Policies During Floods

B. Zahraie<sup>1</sup> and A. Takeshi<sup>3,2</sup>

### Abstract

In Iran, the reservoir operation during floods is mostly carried out based on engineering judgments. There is no operation policy for the majority of the reservoirs especially those with no flood prediction and warning system. In this research, operation policies during flood are developed for Shahid Abbaspour Reservoir on Karun river southwestern Iran. A Genetic Algorithm (GA) model is developed to determine the reservoir releases. The parametric objective function of the GA model is to minimize the flood losses associated with releases exceeding the safe carrying capacity of the downstream river. The GA model performance is evaluated using historical flood data as well as simulated floods with 50-year return period. The GA model output has been used along with a K-Nearest Neighbor (K-NN) model to develop the reservoir operation policies for controlling floods. Comparison between the results of K-NN and linear regression model shows the accuracy of the GA and K-NN models to develop the operation policies for reservoir operation during floods.

**Keywords:** Genetic Algorithm, Parametric objective function, Flood control, K-Nearest Neighbor

## کاربرد روش‌های الگوریتم ژنتیک و K-نزدیک ترین همسایه در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در زمان وقوع سیلاب

بنفشه زهرایی<sup>۱</sup> و آذر تکشی<sup>۲</sup>

### چکیده

در حال حاضر بهره‌برداری از اکثر سدهای مخزنی کشور در شرایط سیلابی به صورت تجربی می‌باشد و عملاً دستورالعمل مدونی برای تعیین میزان خروجی در زمان وقوع سیلاب خصوصاً در حوزه‌های فاقد سیستم هشدار و پیش‌بینی سیلاب وجود ندارد. در این تحقیق سعی شده است با توجه به سابقه سیلاب‌های به وقوع پیوسته در سیستم رودخانه-مخزن کارون، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد شهید عباسپور به نوعی صورت گیرد که میزان تجاوز دبی خروجی از دبی سالم رودخانه پایین‌دست حداقل شود. به منظور تعیین خروجی‌های مخزن در شرایط سیلابی از مدل الگوریتم ژنتیک که به همین منظور تدوین شده، استفاده شده است. تابع هدف این مدل به صورت پارامتری در نظر گرفته شده بدین معنی که نسبت خسارت با توجه به میزان تجاوز جریان از حد مجاز توسط مدل تعیین می‌شود. کارایی مدل ژنتیک با سیلاب‌های تاریخی و سیلاب‌های بازسازی شده با دوره بازگشت ۵۰ ساله بررسی شده است. خروجی مدل الگوریتم ژنتیک با استفاده از روش K-نزدیکترین همسایه (K-NN) جهت تدوین سیاست‌های بهره‌برداری در زمان سیلاب استفاده شده و نتایج آن با معادله رگرسیون خطی برای شبیه‌سازی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از این دو مدل بیانگر کارایی آنها در تدوین سیاست بهره‌برداری از سد در زمان وقوع سیلاب می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، تابع هدف پارامتری، کنترل سیلاب، الگوریتم K-نزدیکترین همسایه.

تاریخ دریافت مقاله: ۷ مهر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۱ شهریور ۱۳۸۷

1- Assistant Professor and member of Center of Excellence on Infrastructure Engineering and Management, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, bzahraie@ut.ac.ir  
2- M.Sc., School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

1- استادیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشکده فنی دانشگاه تهران.  
2- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

(1994) East and Hall, Fahmy et al. (1994) و (2005) Chang et al. از آن دسته افرادی هستند که از الگوریتم ژنتیک برای مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن استفاده کرده‌اند، هرچند که اغلب این موارد به بهره‌برداری در مقیاس ماهانه می‌پردازند. در سال‌های اخیر چندین نمونه کاربرد این روش در مدیریت بهره‌برداری از منابع آب در ایران نیز صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به (2004) Karamouz & Kerachian و حسینی (۱۳۸۴) اشاره کرد که این موارد نیز معطوف به بهره‌برداری ساعتی نبوده‌اند.

در زمینه برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری از مخازن سدها در هنگام وقوع سیلاب در سامانه‌های رودخانه و مخزن تحقیقات معدودی صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط (2004) Akter & Simonovic برای مدل نمودن عدم قطعیت‌ها در بهره‌برداری کوتاه مدت با استفاده از مجموعه فازی و الگوریتم ژنتیک اشاره نمود. در این مدل، عدم قطعیت در تابع خسارت (جریمه) مخزن<sup>۱</sup> و مقدار خروجی مورد نیاز از مخزن در نظر گرفته شده است. (2004) Cheng & Chau برنامه جامع برای مدیریت سیلاب با بهره‌برداری مناسب از مخازن سدها را در کشور چین ارائه نمودند. در این مطالعات یک برنامه جامع مدیریت سیلاب (IMSFCR)<sup>۲</sup> به صورت نرم افزاری خاص برای مدیریت مهار سیلاب مخازن ارائه شده است.

(2002) Chuntian & Chau یک مدل تصمیم‌گیری برای حل اختلاف با استفاده از تابع چند هدفه سه شخصی<sup>۳</sup> برای بهره‌برداری از مخازن با منظور کنترل سیلاب را ارائه نمودند. برای به دست آوردن تصمیم گروهی، روش حل چانه زنی<sup>۴</sup> و سپس گزینه تصمیم‌گیری با استفاده از الگوی شناخت فازی انتخاب می‌شود. (2005) Turgeon بهره‌برداری روزانه بهینه از یک مخزن کوچک تحت قیود احتمالی در سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها را مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه با تعریف یک منحنی اعلام خطر<sup>۵</sup> برای سطح مخزن از حد بالا و پائین در وضعیت وقوع یکی از حالات سیلابی و یا خشکسالی، سیاست بهره‌برداری بهینه روزانه مخزن بر اساس ناحیه بین دو منحنی اعلام خطر، محاسبه می‌شود.

برای تعیین دستورالعمل‌های دینامیک بهره‌برداری از مخزن، روش‌های گوناگونی از جمله تدوین معادله سیاست با استفاده از رگرسیون خطی و همچنین تئوری مجموعه‌های فازی ارائه شده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Hasebe and Nagayama (2002) و Karamouz and Vasiliadis (1992) اشاره کرد.

در چند دهه اخیر بهره‌برداری بهینه از سدهای چند منظوره از موضوعات قابل توجه برنامه‌ریزان منابع آب بوده است. تاکنون روش‌های ریاضی پیچیده‌ای با اهداف برنامه‌ریزی درازمدت از این گونه مخازن تدوین شده است. اکثر مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن که تاکنون توسعه داده شده‌اند، برای بهره‌برداری در مقیاس ماهانه و یا فصلی مناسب بوده و قادر به در نظر گرفتن تغییرات قابل توجه ورودی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت سیلابی نمی‌باشند. سیاست‌های بهره‌برداری نیز که در قالب این مدل‌ها تدوین می‌شوند، اعم از استاتیک یا دینامیک، از کارایی قابل قبولی در مدیریت سیلاب در مخزن برخوردار نیستند. علاوه بر موارد فوق، ماهیت کوتاه‌مدت و ساعتی مدیریت بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی نظیر برنامه‌ریزی پویا را عملاً با مشکلات زیادی مواجه می‌کند. دلیل این امر، تغییرات کم حجم ذخیره مخزن در مقیاس ساعتی و ضرورت افزایش قابل توجه تعداد مجزاسازی حجم ذخیره مخزن می‌باشد که روش‌هایی نظیر برنامه‌ریزی پویا را با مشکلات ابعادی مواجه می‌سازد. لازم به ذکر است که هرچند، انتظار می‌رود عمده تغییرات حجم مخزن در زمان سیلاب در محدوده حجم کنترل سیلاب واقع شود، در سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های بزرگ که دارای حجم قابل ملاحظه هستند، تغییرات حجم مخزن در زمان سیلاب می‌تواند از بازه حجم کنترل سیلاب خارج شده و عملاً نیاز به مجزاسازی بخش قابل ملاحظه‌ای از حجم مخزن در استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا وجود داشته باشد. این شرایط در وضعیتی که حجم ذخیره مخزن در زمان شروع سیلاب در سطحی پایین تر از بازه حجم کنترل سیلاب قرار داشته باشد نیز وجود دارد.

مهار سیلاب با استفاده از مخازن اغلب در عمل با پیچیدگی‌های ناشی از تعدد اهداف بهره‌برداری روبرو است. محدودیت‌های مربوط به دبی ایمن رودخانه پایین دست، آماده سازی مخزن برای مهار سیلاب‌های محتمل بعدی و ذخیره‌سازی حداکثر آورده‌های سیلابی برای تامین مصارف و تولید انرژی از جمله این موارد هستند. مدل‌های بهینه‌سازی که برای بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی توسعه داده می‌شوند، بایستی امکان در نظر گرفتن این اهداف را با حفظ اولویت حداقل کردن خسارات ناشی از سیلاب فراهم نمایند.

همانطور که توسط Wardlaw and Sharif (1999) تاکید شده، الگوریتم ژنتیک تا کنون کاربرد محدودی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های رودخانه-مخزن داشته است.

شده متغیرهای تصمیم‌گیری را در بردارند، نشان داده می‌شوند. سپس با تشکیل خانواده اولیه و ارزیابی هر یک از رشته‌ها، افراد مناسب برای تشکیل خانواده بعدی انتخاب می‌شوند. جواب‌های جدید (فرزندان) با تغییر ساختار رشته‌های جواب‌های اولیه (والدین) توسط عملگرهای الگوریتم ژنتیک تولید می‌شوند. سپس مقدار برازندگی فرزندان با توجه به تابع هدف مورد نظر ارزیابی می‌شود. این روند تا زمانی که جواب‌ها به مقادیر بهینه و یا همسایگی آنها همگرا شوند، ادامه می‌یابد.

سه بخش اصلی مدل تدوین شده در این تحقیق شامل متغیرهای تصمیم، محدودیت‌ها و تابع هدف بشرح ذیل می‌باشند:

**متغیرهای تصمیم:** متغیرهای تصمیم جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن در زمان وقوع سیلاب، مقدار خروجی‌های ساعتی می‌باشند که بایستی به نحوی تعیین شوند که حداقل آسیب به رودخانه پایین دست وارد شود. در این تحقیق، ضریب محاسبه خسارت در شرایطی که جریان خروجی از دبی سالم رودخانه پایین دست تجاوز می‌کند هم به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده که توسط مدل مقدار مناسب آن محاسبه می‌شود. در این مورد توضیحات بیشتری در قسمت "تابع هدف" ارائه شده است.

**محدودیت‌ها:** محدودیت‌های موجود در این مسئله چهار دسته هستند:

الف) برقراری معادله پیوستگی: در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t \quad (1)$$

$S_t$ : حجم ذخیره مخزن در ابتدای بازه زمانی  $t$

$I_t$ : ورودی به مخزن در ابتدای بازه زمانی  $t$

$R_t$ : خروجی از مخزن در بازه زمانی  $t$

ب) حجم ذخیره مخزن: علاوه بر اینکه در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن، حجم ذخیره بایستی بین مقادیر حداقل ( $S_{\min}$ ) و حداکثر ( $S_{\max}$ ) آن باشد، شرط دیگری برای ثابت نگه داشتن نسبی تراز سطح آب در مخزن گذاشته شده است که مطابق آن، حجم اولیه ( $S_1$ ) و حجم نهایی پس از خاتمه سیلاب ( $S_N$ ) نباید بیش از ۱۰٪ تفاوت داشته باشند.

(۲)

$$S_{\min} \leq S_{t+1} \leq S_{\max}$$

دو نکته مهم در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در زمان سیلاب، انتخاب تابع هدف مناسب و تدوین قوانین مناسب بهره‌برداری از مخزن می‌باشد که امکان استفاده از نتایج بهینه‌سازی را در زمان واقعی فراهم نماید. بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد، انتخاب نوع توابع هدف و ساختار محدودیت‌ها در رویکردهای بکار برده شده توسط محققین مختلف تفاوت‌های قابل ملاحظه ای دارند که عمدتاً ناشی از حساسیت بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی نسبت به مشخصات سیلاب‌های محتمل، مخزن و تاسیسات وابسته و بهینه و حساسیت مناطق سیلگیر واقع در پایین دست سد است. بنابراین هرچند که تحقیقات انجام شده در سایر کشورها می‌تواند الگوی مناسبی برای انجام تحقیقات روی سدهای مخزنی کشور که در معرض سیلاب هستند، باشند، توسعه این روش‌ها و بومی‌سازی آنها در ایران ضروری می‌باشد. انتخاب شکل تابع هدف مناسب برای مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد شهید عباسپور در شرایط سیلابی که در این تحقیق توسعه داده شده، از جمله دستاوردهای مهم این تحقیق محسوب می‌شود که می‌تواند در تحقیقات بعدی در مورد سایر سدهای مخزنی کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای تعیین خروجی‌های مخزن در حین سیلاب استفاده شده و نتایج آن برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن در زمان وقوع سیلاب به کمک روش  $K$ - نزدیک‌ترین همسایه بکار گرفته شده است که از جمله نوآوری‌های این تحقیق محسوب می‌شود. به منظور بررسی عملکرد مدل شبیه‌سازی، معادله سیاست به کمک رگرسیون خطی نیز تدوین و با نتایج مدل  $K$ - نزدیک‌ترین همسایه مقایسه شده است. جهت مقایسه کارایی سیاست‌های تدوین شده توسط روش‌های مذکور، از سیستم واقعی مخزن سد شهید عباسپور واقع بر رودخانه کارون استفاده گردید و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- ساختار مدل الگوریتم ژنتیک

بهینه‌سازی در واقع تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم برای حداقل یا حداکثر کردن تابع هدف است. یکی از روش‌های نوین که امکان دستیابی به جواب‌های بهینه/نزدیک به بهینه را فراهم می‌کند، الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در مقیاس ساعتی مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک، روش جستجوگری است که بر اساس فرآیند انتخاب و ژنتیک زیستی فرموله شده است. این روند با انتخاب تصادفی خانواده‌ای از جواب‌های ممکن شروع می‌شود. هریک از جواب‌ها توسط یک ساختار رشته‌ای از بیت‌ها که مقدار کدگذاری

$$\text{Min } z = \sum_t \text{Loss}_t \quad (6)$$

$$\text{Loss}_t = \begin{cases} 0 & RR(t) < 1 \\ 10^6 \times RR(t) & 1 \leq RR(t) \leq 2.0 \\ 10^7 \times RR(t) \times a & RR(t) \geq 2.0 \end{cases}$$

که در آن  $RR(t)$  برابر نسبت خروجی از مخزن در بازه زمانی  $t$  ام به دبی سالم رودخانه پایین دست (۲۰۰۰ متر مکعب در ثانیه در مورد مطالعه مورد سد شهید عباسپور) و  $a$  ضریب افزایش هزینه برای خروجی بیش از دو برابر دبی سالم می‌باشد که به عنوان یکی از متغیرهای تصمیم توسط مدل الگوریتم ژنتیک مقدار مناسب آن برای هر سیلاب محاسبه می‌شود. با استفاده از معادلات فوق، میزان خسارت در تابع هدف مدل الگوریتم ژنتیک، تابعی از میزان تخطی از دبی سالم رودخانه پایین دست در نظر گرفته می‌شود. در مواقع عدم رعایت محدوده‌های مجاز حجم و خروجی مخزن، مقدار جریمه ثابتی در نظر گرفته شده است. در این حالت، کروموزومی که دارای شرایط ذکر شده باشد و یا به عبارت دیگر، به لحاظ فیزیکی امکان ناپذیر باشد، متحمل این جریمه می‌شود و در فرآیند تکامل، از میان جواب‌ها حذف می‌شود. برای درک بیشتر مراحل کار، الگوریتم مدل در شکل (۱) نشان داده شده است.

## ۲-۲- ساختار مدل شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایه

نزدیک‌ترین همسایه، یک روش تشخیص الگوی آماری بدون متغیر است که برای الگوی هیدرولوژیکی موجود، K الگوی مشابه به نام نزدیک‌ترین همسایه‌ها را می‌یابد. نزدیک‌ترین همسایه‌ها به طور آماری برای تخمین متغیر هیدرولوژیکی مورد نظر استفاده می‌شوند. (Yakowits (1993 و Yakowits and Karlson (1987) یک روش برای کاربرد آن در تحلیل سری‌های زمانی و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی تدوین کردند.

در این روش ابتدا توسط بردار مشخصه  $F_t$  یک ساختار وابستگی برای متغیرهای مستقل و وابسته تعریف می‌شود. به بیان دیگر بردار مشخصه نشان می‌دهد که متغیر مورد پیش‌بینی،  $R_t$  (جریان خروجی)، به چه پارامترهایی بستگی دارد. با داشتن بردار مشخصه (داده‌های آزمون مدل)، K نزدیک‌ترین بردارهای مشخصه در داده‌های تاریخی (داده‌های آموزش مدل) با فاصله اقلیدسی وزن‌دار شده، یافته می‌شوند. خروجی مخزن (متغیر در حال پیش‌بینی) از K نزدیک‌ترین همسایه‌ها با استفاده از رگرسیون وزن‌دهی شده که از تابع کرنل استفاده می‌کند، برآورد می‌شود. مراحل استفاده از این روش به شرح زیر می‌باشد:

$$\left| \frac{S_1 - S_N}{S_N} \right| < 0.1 \quad (3)$$

در صورت حذف این محدودیت، حجم ذخیره مخزن می‌تواند در زمان خاتمه سیلاب بسیار بیشتر یا کمتر از حجم ذخیره در زمان شروع سیلاب باشد. در صورتی که حجم ذخیره مخزن در انتهای سیلاب کاهش یابد می‌تواند در تناقض با سایر اهداف بهره‌برداری از مخزن نظیر ذخیره سازی آب برای تولید برق و یا تامین نیازهای آبی باشد. همچنین در صورتی که حجم ذخیره مخزن در زمان خاتمه سیلاب افزایش یابد، مخزن برای مهار سیلاب‌های محتمل بعدی آماده نخواهد بود.

ج) خروجی مخزن: میزان خروجی بهینه‌سازی شده در هر دوره بایستی کمتر از حداکثر ظرفیت خروجی از دریاچه‌ها ( $R_{\max}(S_t)$ ) باشد. شرایط مرزی تعریف شده برای خروجی، با استفاده از منحنی‌های خروجی دریاچه‌ها نسبت به ارتفاع و یا حجم ذخیره آب در مخزن محاسبه می‌شود.

$$R_t < R_{\max}(S_t) \quad (4)$$

د) اختلاف خروجی‌های متوالی: به منظور هموار ساختن هیدروگراف خروجی و جلوگیری از نوسانات غیرضروری آن، شرط دیگری تعریف شده است که در آن نباید اختلاف دو خروجی متوالی بیشتر از ۴۰٪ تا ۶۰٪ باشد که این محدوده با توجه به بازه تغییرات جریان ورودی در هیدروگراف ثبت شده متغیر در نظر گرفته شده است.

$$\left| \frac{R_{t+1} - R_t}{R_{t+1}} \right| < m \quad 0.4 \leq m \leq 0.6 \quad (5)$$

در صورت در نظر نگرفتن این محدودیت، خروجی‌های از مخزن که کمتر از حداکثر دبی ایمن رودخانه پایین دست هستند، تغییرات غیرقابل پیش‌بینی خواهند داشت که عملاً تدوین سیاست بهره‌برداری را با مشکل مواجه می‌نماید.

**تابع هدف:** در این تحقیق تابع هدف، حداقل‌سازی مجموع خسارت ناشی از خروجی مخزن در طول مدت آزادسازی جریان سیلابی می‌باشد که در آن، خسارت ناشی از رهاسازی آب از سیستم تنها تابعی از نسبت خروجی به دبی سالم رودخانه پایین دست در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور از ساختار تابع هدف ساده سه بخشی زیر استفاده شده است. دامنه رهاسازی مطمئن آب از صفر تا ۱۰۰٪ است که خارج از این محدوده مطمئن، با افزایش انحراف از خروجی مطلوب، هزینه‌ها ( $\text{Loss}_t$ ) به صورت خطی افزایش می‌یابند:



۱- تعریف بردار مشخصه در زمان  $t$ :

$$F_t : \{Si_{t-\tau}, Ss_{t-\tau}\} \quad (7)$$

که در آن  $Si_{t-\tau}$  برابر است با شیب نمودارهای جریان ورودی به مخزن با تأخیر زمانی  $\tau$  و  $Ss_{t-\tau}$  برابر است با شیب منحنی‌های تغییرات حجم مخزن با تأخیر زمانی  $\tau$  که در این تحقیق  $\tau$  از یک تا پنج بازه زمانی قبل در نظر گرفته شده است.

۲- یافتن  $K$  نزدیک‌ترین همسایه‌ها به بردار مشخصه موجود که معمولاً با استفاده از فاصله اقلیدسی وزن‌دهی شده محاسبه می‌شود. بردار مشخصه موجود شامل تغییرات ورودی و حجم ذخیره مخزن در زمان‌های قبل از زمان  $t'$  است که محاسبه خروجی از مخزن در آن مدنظر است. نزدیک‌ترین همسایه‌ها از روی نتایج تغییرات حجم ذخیره محاسبه شده توسط مدل الگوریتم ژنتیک و جریان ورودی در سایر هیدروگراف‌های مورد استفاده در مدل‌سازی یافت می‌شوند. در اینجا به جای استفاده از مربع تفاضل شیب نمودار در حال پیش‌بینی و شیب سایر نمودارها، از توان سوم آن استفاده شده است. به این ترتیب مدل می‌تواند علاوه بر در نظر گرفتن شباهت شیب تغییرات منحنی‌های ورودی و حجم ذخیره مخزن، واقع شدن آن روی بازوی بالا رونده یا پایین رونده هیدروگراف‌ها را نیز تشخیص دهد. فاصله اقلیدسی وزن داده شده به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$d_{t,t'} = w_1 \sum_{\tau=1}^5 (Si_{t'-\tau} - Si_{t-\tau})^3 \quad \forall t' > 5 \quad (8)$$

$$+ w_2 \sum_{\tau=1}^5 (Ss_{t'-\tau} - Ss_{t-\tau})^3$$

که در آن:

$d_{t,t'}$ : توان سوم فاصله وزن‌دهی شده بردارهای مشخصه در

داده‌های آموزش در زمان  $t$  و آزمون مدل در زمان  $t'$

$w_1$ : وزن اختلاف شیب نمودارهای جریان ورودی به مخزن

$w_2$ : وزن اختلاف شیب منحنی‌های تغییرات حجم مخزن

$Si_{t-\tau}$ : شیب نمودار جریان ورودی به مخزن برای بازه زمانی  $t-\tau$  در داده‌های آزمون مدل

$Si_{t-\tau}$ : شیب نمودارهای جریان ورودی به مخزن در زمان  $t-\tau$  در داده‌های آموزش مدل

$Ss_{t-\tau}$ : شیب منحنی تغییرات حجم مخزن برای بازه زمانی  $t-\tau$  در داده‌های آزمون مدل

$Ss_{t-\tau}$ : شیب منحنی‌های تغییرات حجم مخزن در زمان  $t-\tau$  در داده‌های آموزش مدل

۳- جریان خروجی از جمع وزنی نزدیک‌ترین همسایه‌ها به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

$$R'_t = \sum_{k=1}^K (D_k(t') \times R_{t,k}) \quad (9)$$

در این رابطه  $R'_t$  خروجی پیشنهادی بر اساس نزدیک‌ترین همسایه‌ها در زمان  $t'$  و  $R_{t,k}$  خروجی از مخزن در زمان  $t$  که براساس  $k$  نزدیک‌ترین همسایه منتخب انتخاب شده است. وزن  $D_k(t')$  در معادله (۵) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_k(t') = \frac{1/d_{t',t,k}}{\sum_{k=1}^K 1/d_{t',t,k}} \quad (10)$$

در این رابطه،  $K$  تعداد کل همسایه‌ها و  $d_{t',t,k}$  فاصله محاسبه شده از رابطه (۴) برای  $k$  امین همسایه می‌باشد. تعداد مناسب همسایه‌ها،  $K$ ، با سعی و خطا تعیین شده است که نتایج آن در بخش‌های بعدی مقاله ارائه شده است.

### ۳- مطالعه موردی و نتایج

سد شهید عباسپور (کارون یک) در ۵۵ کیلومتری شمال شرقی مسجد سلیمان بر رودخانه کارون احداث شده است. این سد از نوع بتنی دو قوسی بوده و دوره ساخت آن در فاصله سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۵۵ به طول انجامید. مساحت دریاچه این سد در رقوم ۵۳۰ متر از سطح دریا ۵۵ کیلومتر مربع می‌باشد. طول تاج سد ۳۸۰ متر و ارتفاع آن از پی سد ۲۰۰ متر می‌باشد. حداکثر تراز بهره‌برداری از سد ۵۳۲/۵ متر و تراز تاج سد ۵۴۲ متر از سطح دریا است. حجم دریاچه آن بر اساس منحنی حجم-تراز مخزن در زمان ساخت، ۲۹۰۰ میلیون کیلومتر مکعب بوده که با نصب دریچه‌ای با ارتفاع ۲/۵ متر روی سرریزها، حجم آن به ۳۰۳۴ میلیون متر مکعب افزایش یافته است.

در مدل بهینه‌سازی از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پل شالو در بالادست سد شهید عباسپور استفاده شده است. سابقه سیلاب‌های ثبت شده در این ایستگاه از سال ۱۳۳۸ تا ۱۳۷۲ موجود می‌باشد. در این تحقیق کلیه هیدروگراف‌های ثبت شده در این دوره جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفت و از میان آنها ۲۷ هیدروگراف به عنوان نمونه‌های کامل با زمان پایه مناسب برای بهینه‌سازی انتخاب گردید. محل سد و ایستگاه پل شالو بر رودخانه کارون در شکل (۲) نشان داده شده است. از میان هیدروگراف‌های انتخاب شده، بیشترین حجم سیلاب در سال ۱۳۷۲ با حجمی معادل ۶۱۶/۵ میلیون متر مکعب و زمان پایه ۹۶ ساعت، و کمترین حجم در پاییز ۱۳۵۰ با حجمی معادل ۷۰/۵ میلیون متر مکعب و زمان پایه ۷۲ ساعت به وقوع پیوسته است. حداکثر دبی ایمن رودخانه پایین دست



نظر گرفته شده‌اند. وزن‌دهی به پارامترها به روش سعی و خطا انجام شد و خطای نسبی برای تمامی حالات محاسبه شده است. شکل (۹)

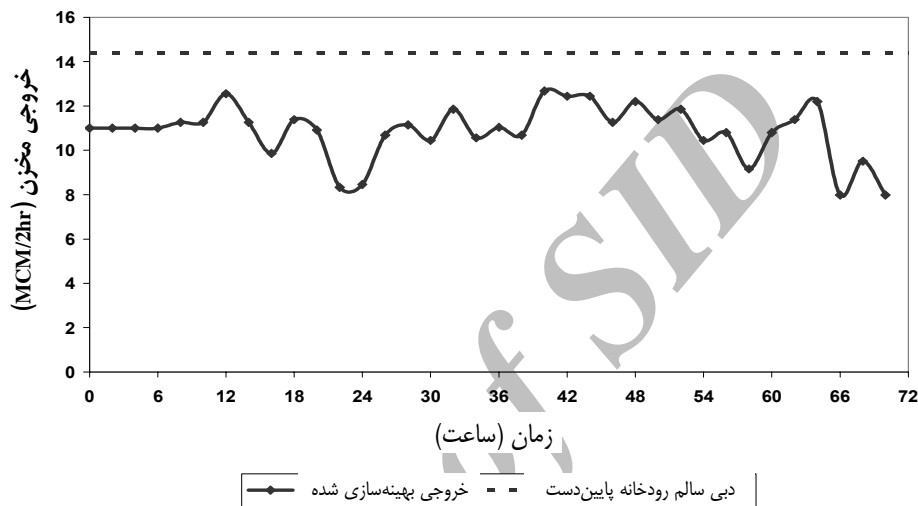
Archive of SID



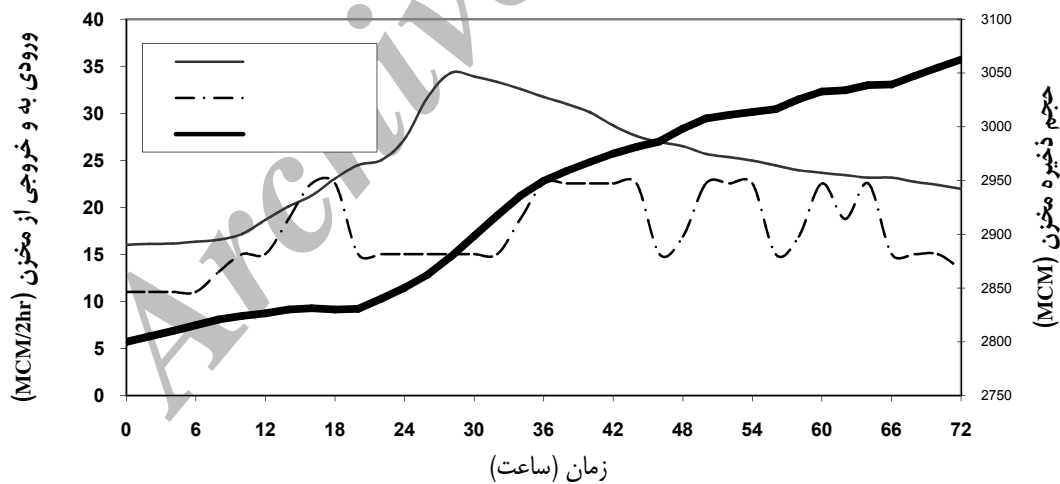
رگرسیون خطی را نسبت به خروجی مدل بهینه‌سازی نشان می‌دهد. که در آنها  $w_1$  وزن اختلاف شیب نمودارهای جریان ورودی به مخزن و  $w_2$  وزن اختلاف شیب منحنی‌های تغییرات حجم مخزن هستند. کمترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی بر اساس سیاست‌های بهینه و نتایج مدل الگوریتم ژنتیک در ۸۰٪ موارد با نسبت دادن وزن  $w_1=0.8$  به اختلاف شیب نمودارهای جریان ورودی و  $w_2=0.2$  به اختلاف شیب منحنی‌های تغییرات حجم مخزن حاصل می‌شود.

خطای نسبی را برای یک تا سه نزدیک‌ترین همسایه در تمام سیلاب‌ها با یکدیگر مقایسه می‌کند.

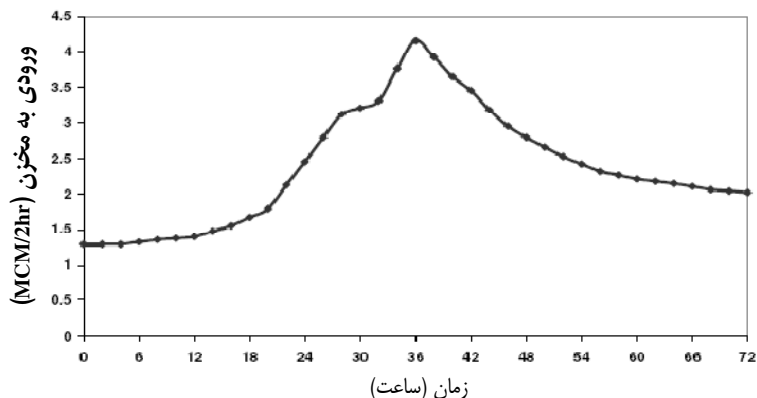
با توجه به شکل فوق در تمام سیلاب‌ها کمترین خطا مربوط به یک همسایگی می‌باشد. حداکثر خطا در اردیبهشت ماه ۱۳۷۲ برابر با ۰/۱۷ و حداقل آن در فروردین ۱۳۵۸ معادل ۰/۱۳ می‌باشد. جدول ۱ متوسط خطای نسبی خروجی مدل شبیه‌سازی را با در نظر گرفتن وزن‌های مختلف برای یک همسایگی و متوسط خطای نسبی



شکل ۳- مقایسه دبی رودخانه پایین دست و خروجی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک برای سیلاب اردیبهشت ۱۳۷۲

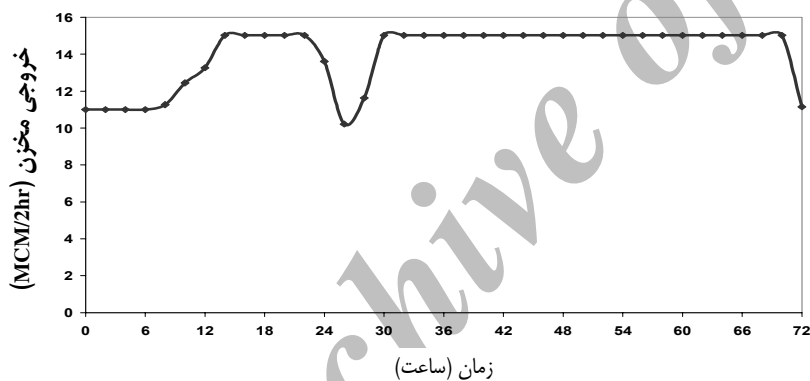
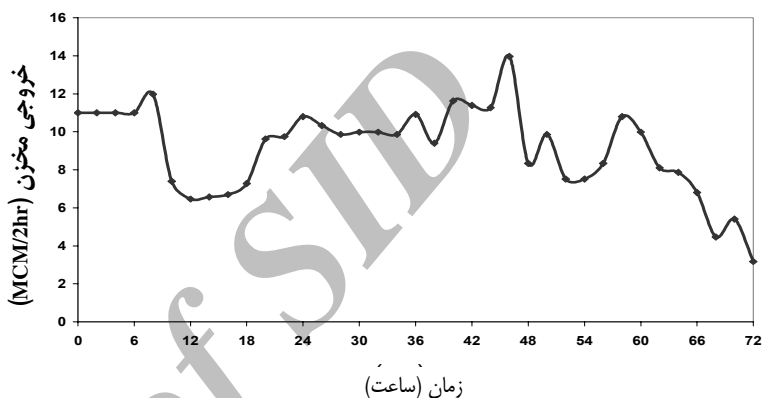


شکل ۴- هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله که براساس سیلاب اردیبهشت ۱۳۷۲ بازسازی شده است و خروجی و حجم ذخیره مخزن



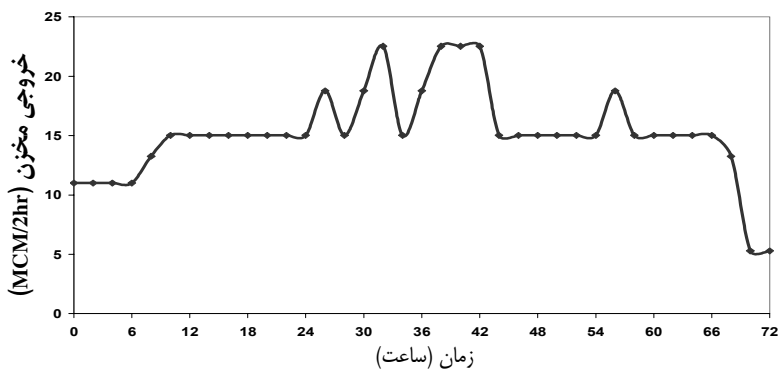
شکل ۵- هیدروگراف ورودی به سد  
مشاهده شده در آذر ماه ۱۳۶۷

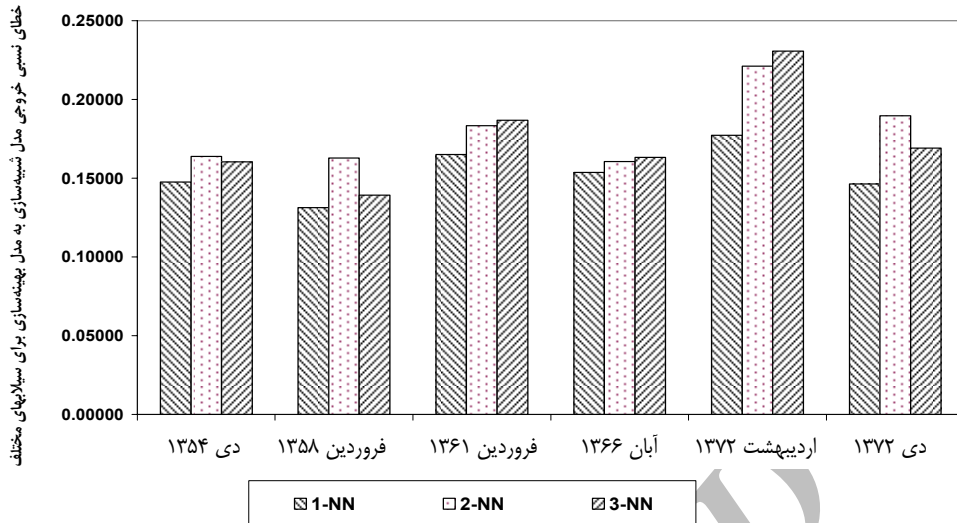
شکل ۶- خروجی مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن حجم اولیه ۲۰۰۰ میلیون متر مکعب برای مخزن و سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله بازسازی شده براساس سیلاب آذر ۱۳۶۷



شکل ۷- خروجی مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن حجم اولیه ۲۵۰۰ میلیون متر مکعب برای مخزن و سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله بازسازی شده براساس سیلاب آذر ۱۳۶۷

شکل ۸- خروجی مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن حجم اولیه ۲۹۵۰ میلیون متر مکعب برای مخزن و سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله بازسازی شده براساس سیلاب آذر ۱۳۶۷





شکل ۹- مقایسه خطای نسبی خروجی مدل شبیه‌سازی به مدل بهینه‌سازی برای سیلاب‌های مختلف

جدول ۱- متوسط خطای نسبی خروجی مدل K- نزدیک‌ترین همسایه برای وزن‌های مختلف با در نظر گرفتن یک همسایگی و متوسط خطای نسبی رگرسیون خطی نسبت به خروجی مدل بهینه‌سازی

تاریخ سیلاب	$W_1=0, W_2=1$	$W_1=0.2, W_2=0.8$	$W_1=0.4, W_2=0.6$	$W_1=0.6, W_2=0.4$	$W_1=0.8, W_2=0.2$	$W_1=1, W_2=0$	رگرسیون خطی
دی ۱۳۵۴	0.16100	0.17262	0.16511	0.15599	0.14761	0.14356	0.17785
فروردین ۱۳۵۸	0.15922	0.16361	0.15966	0.16229	0.13117	0.15589	0.19957
فروردین ۱۳۶۱	0.17493	0.17356	0.16945	0.16863	0.16506	0.15394	0.14039
آبان ۱۳۶۶	0.13988	0.14406	0.14545	0.15437	0.15354	0.18939	0.18614
اردیبهشت ۱۳۷۲	0.18648	0.18166	0.21713	0.21713	0.17712	0.19620	0.17854
دی ۱۳۷۲	0.20253	0.20647	0.20358	0.20358	0.14627	0.14627	0.27282

#### ۴- خلاصه و جمع بندی

در این مقاله، برای تعیین مقادیر خروجی از سد در زمان سیلاب، مدلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تدوین شده است. در این مدل که خروجی ساعتی از مخزن را محاسبه می‌کند از یک تابع هدف پارامتری برای حداقل سازی میزان تجاوز از دبی سالم رودخانه پایین دست استفاده شده است. برای تدوین سیاست‌های بهینه از الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایه استفاده شده است و خروجی آن با نتایج حاصل از رگرسیون خطی مقایسه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم K- نزدیک‌ترین همسایه، در برخی از سیلاب‌های مورد مطالعه، تا ۱۳ درصد خطای تخمین خروجی‌های مدل الگوریتم ژنتیک را نسبت به اعداد بدست آمده از رگرسیون خطی کاهش داده است.

نتایج این تحقیق نشان داده است در تدوین مدل بهره‌برداری از سد در شرایط سیلابی، ساختار تابع هدف مدل از اهمیت خاصی برخوردار

بوده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج مدل‌سازی دارد. محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای محدود کردن تغییرات میزان خروجی از مخزن در ساعات متوالی و حجم ذخیره مخزن در زمان شروع و پایان سیلاب، نتایج مدل را به اطلاعاتی قابل استفاده برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری تبدیل کرده است.

اطمینان از دستیابی به خروجی‌های مناسب مخزن، مستلزم تحلیل حساسیت روی بزرگی سیلاب ورودی و حجم کنترل سیلاب مخزن در زمان شروع سیلاب می‌باشد. در نظر گرفتن تابع هدف پارامتری به شکلی که ضرایب تابع هدف توسط مدل بهینه‌سازی تعیین شود، راهکار مناسبی برای یافتن مناسب‌ترین شکل تابع هدف در این تحقیق بوده است و استفاده از روش K- نزدیک‌ترین همسایه توانسته است راهکار مناسبی را برای تدوین سیاست بهره‌برداری از مخزن در شرایط سیلابی با توجه به وضعیت تغییرات سیلاب ورودی و حجم ذخیره مخزن فراهم نماید. روش پیشنهادی با توجه به مقادیر

Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, Netherland, pp. 225-231.

Fahmy H. S., King J. P., Wentzel M. W. and Seton J. A. (1994). "Economic Optimization of River Management Using Genetic Algorithms." Paper No. 943034, ASAE, Int, Summer Meeting, St. Joseph, Mich.

Hasebe, M., Nagayama, Y. (2002) "Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support", *Advances in Engineering Software*, Vol.33, pp. 245-260.

Karamouz M., Araghinejad S., and Haghnegahdar A. (2004) "Calibration and Validation of Long-term Streamflow Forecasting Models" *Conference Proceeding Paper, Critical Transition in Water and Environmental Resources Management*, USA.

Karamouz M., Kerachian R., (2004) "Optimal Operation of Reservoir Systems Considering the Water Quality: Application of Stochastic Sequential Genetic Algorithms" *Conference Proceeding Paper, Critical Transition in Water and Environmental Resources Management*, USA.

Karamouz, M., and Vasiliadis, H., (1992), "A Bayesian Stochastic Optimization of Reservoir Operation Using Uncertain Forecast", *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5.

Turgeon, A. (2005) Daily Operation of Reservoir Subject to Yearly Probabilistic Constraints. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), pp. 342-350.

Wardlaw R., and Sharif M. (1999). "Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 1, pp. 25-33.

Yakowits, S. (1993), "Nearest-neighbor regression estimation for null-recurrent Markov time series", *Stochastic Process, Appl*, Vol. 48, pp. 311-318.

Yakowits, S., and Karlson, M., (1987), "Nearest Neighbor methods for nonparametric rainfall-runoff forecasting", *Water Resour. Res*, 23, 1300-1308.

Yeh W. W-G. (1985). "Reservoir Management and Operations Models: A State of the Art Review." *Water Resources Researches*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.

کالیبره شده تعداد همسایه‌ها و ضرایب حجم ذخیره و جریان ورودی که در مقاله ارائه شده اند، قابل استفاده در بهره‌برداری از سد های مخزنی برای بهره‌برداری در زمان واقعی در شرایط سیلابی می‌باشد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Reservoir penalty function
- 2- Integrated Management System for Flood Control of Reservoirs (IMSFCR)
- 3- Three-person multi – objective conflict decision in reservoir flood control
- 4-Bargaining solution
- 5-Warning curve
- 6-Near optimal
- 7-Fitness
- 8-Raiting curve
- 9-Kernel function

#### ۵- مراجع

حسینی، س.م. ۱۳۸۴، "بهبودسازی بهره‌برداری از سد مخزنی زاینده‌رود در شرایط عدم قطعیت نیاز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.

Akter T., and Simonovic S. P. (2004). "Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm" *Journal of Hydrological Science*, Vol 49, No 6, pp. 1081-1097.

Chang F. J., Chen L., and Chang L. C. (2005). "Optimization the Reservoir Operating Rule Curves by Genetic Algorithm." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 2277-2289

Cheng, Chun-Tian, Chau, K.W., (2004), "Flood control management system for reservoirs", *Environmental Modeling & Software*, Vol.19. pp. 1141 –1150.

Chuntian, C. And Chau, K.W. (2002) Three-person multi-objective conflict decision in reservoir flood control. *European Journal of Operational Research*, 142, pp. 625-631.

East V. and Hall M. J. (1994). "Water Resources System Optimization Using Genetic Algorithms." *Hydroinformatics*, 1994, Proc., 1<sup>st</sup>nt. Conf. on