

## طرح بهینه مخازن کنترل سیلاب (مطالعه موردی سد تنگ سرخ شیراز)

ملیکا مرادی<sup>1</sup>، سعید علیمحمدی<sup>2\*</sup>، نسرين رفیعی انزاب<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

2- استادیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

\* تهران، صندوق پستی 1719 - 17765

s\_alimohammadi@sbu.ac.ir

**چکیده-** با توجه به استعداد سیل خیزی بالای ایران، به‌کارگیری روش‌های کنترل سیلاب و ارائه راهکارهایی برای کاهش خسارات ناشی از آن باید مورد توجه قرار گیرد. اولین گزینه‌های مهار سیلاب، استفاده از روش کنترل سازه‌ای بوده است (احداث سد، سیل‌بند و...). پژوهش حاضر به ارائه مدلی جهت تعیین ابعاد بهینه مخازن کنترل سیلاب شامل ارتفاع سد و ابعاد سرریز (طول و ارتفاع) و دوره بازگشت طرح بر اساس تحلیل اقتصادی سود- هزینه پرداخته است. در این مدل سود عبارت است از کاهش خسارات سیلاب در منطقه پتانسیل خسارت، هزینه شامل هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم می‌باشد. حل مدل حاصل توسط نرم‌افزار لینگو<sup>12</sup> صورت گرفته است. سیستم کنترل سیلاب (سد) رودخانه تنگ سرخ شیراز به عنوان مطالعه موردی مدنظر قرار گرفته است. با اجرای مدل بهینه‌سازی مقادیر سودخالص سالانه ارتفاع سد و طول سرریز بدست آمده است.

**کلیدواژگان:** بهینه‌سازی، روش‌های سازه‌ای، کنترل سیلاب، سد.

### 1- مقدمه

سدسازی اتخاذ شود. مسأله ارزیابی سیلاب طراحی و انتخاب ابعاد بهینه مخازن سدها و سرریزها، سالهاست که مورد بحث قرار گرفته است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهینه‌سازی حجم مخازن سیستم‌های کنترل سیلاب انجام شده است. (Mays and Tung (1992 به انواع روش‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی اشاره کرده و به بررسی تأثیر روش‌های مختلف سازه‌ای کنترل سیلاب در کاهش خسارات سیل پرداخته‌اند. (Linsley (1992 به برآورد

استفاده از مخازن کنترل سیلاب (سد)، یکی از روش‌های سازه‌ای متداول در طرح‌های کنترل سیلاب می‌باشد. با توجه به خطر بالقوه‌ای که در صورت شکست و یا تخریب سد برای پایین‌دست وجود دارد و خسارت‌های مالی و جانی احتمالی آن، انتخاب سیلاب طراحی یکی از عمده‌ترین تصمیماتی است که باید در توسعه پروژه

1. LINGO12

خسارات سیل، شناخت نقاط آسیب‌پذیر و تحلیل اقتصادی روش‌های مختلف مهار سیلاب پرداخته است. همچنین Lund (2002) با استفاده از یک مدل خطی دو مرحله‌ای به بهینه‌سازی مدیریت سیلاب‌دشت در دو حالت دائمی<sup>1</sup> و اضطراری<sup>2</sup> با رویکرد آنالیز ریسک پرداخته است. Mays (2005) نیز به توضیح روش‌های کاهش خسارات سیل و نحوه تعیین خسارات سیل با رویکرد USACE، و بهینه‌سازی حجم مخازن کنترل سیل پرداخته است. بازرگان (1378) در یک طرح مطالعاتی به بهینه‌سازی حجم مخازن سدهای کنترل سیل با رویکرد تحلیل اقتصادی سود - هزینه می‌پردازد. مهندسان مشاور مشانیر (1378) در طرح بهره‌برداری از سیستم رودخانه‌های دز و کارون یک به بهینه‌سازی حجم کنترل سیلاب دو سد دز و کارون پرداخته‌اند و بدین نتیجه رسیدند که بهینه‌سازی حجم کنترل سیل مخازن نه تنها در تعیین نحوه عملکرد سدها در کنترل سیلاب‌های بزرگ و کوچک، بلکه در بهینه‌سازی بهره‌برداری از آنها نیز نقش مهمی دارد. داننده مهر (1383)، به توضیح و تبیین روش‌های کاهش خسارات سیل و نحوه تعیین خسارات سیل با رویکرد USACE پرداخته است. وی در مطالعه موردی بر روی حوضه رودخانه آجی‌چای عبوری از شهر تبریز روش ترکیبی احداث سد - ساماندهی رودخانه را برای کنترل سیلاب منطقه مورد مطالعه توصیه نموده است. سرابندی (1387) به تهیه یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد بهینه سیستم ترکیبی سد - گور پرداخته، که محوریت این بهینه‌یابی بر اساس تحلیل سود - هزینه بوده است. در مطالعه موردی نیز به مطالعه سیستم پیشنهادی ترکیبی کنترل سیلاب رودخانه خشک معالی آباد (تنگ سرخ) شیراز پرداخته است.

ابریشمچی، دشتی و تجریشی (2010) یک مدل بهینه‌سازی چند منظوره را برای در نظر گرفتن تعارض

های بین کنترل سیلاب و تولید نیروی برقابی در سیستم مخازن کنترل سیلاب مخازن چند منظوره ارائه دادند. آنها در مطالعه خود به بررسی سیستم مخزن کرخه پرداختند. بررسی‌های مختلفی در زمینه ارائه مدل‌های بهینه‌سازی برای بیان تعارض‌های بین اهداف مخازن چند منظوره انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ملک محمدی و همکاران (2008)، افشار و همکاران (2009) و Yinghai et al. (2010) اشاره کرد.

تجربه نشان داده است، روندی که در حال حاضر در طراحی سدها به کار برده می‌شود عمدتاً بر اساس شبیه‌سازی بوده که مبتنی بر تولید تعداد زیادی گزینه (با ابعاد کاملاً مشخص)، تحلیل و آنالیز آنها و نهایتاً انتخاب یک گزینه می‌باشد که با توجه به تعداد گزینه‌ها، هزینه و زمان زیادی صرف خواهد شد. این در حالی است که با استفاده از روش بهینه‌سازی با انتخاب گزینه بهینه، می‌توان تا حدود زیادی از زمان مطالعات طراحی کاست. هدف از این مطالعه تهیه یک مدل بهینه‌سازی جهت تعیین ابعاد بهینه اجزای یک مخزن (سد) کنترل سیلاب می‌باشد.

در این پژوهش بهینه‌سازی بر اساس تحلیل "سود - هزینه"<sup>3</sup> صورت گرفته است. تابع هدف مدل، حداکثرسازی سود خالص توسعه طرح کنترل سیلاب بر اساس کمینه کردن هزینه‌های طرح و بیشینه کردن سود حاصل از کاهش خسارت سیلاب می‌باشد. در این مطالعه، حذف یا کاهش خسارت سیلاب در ناحیه پتانسیل خسارت به عنوان فایده طرح منظور گردیده و هزینه شامل مجموع هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سد بوده است. مدل حاصل علاوه بر تعیین دوره بازگشت بهینه طراحی سیستم و سود خالص، مقادیر بهینه ابعاد طرح از قبیل ارتفاع سد، ارتفاع ذخیره موقت، ارتفاع کنترل سیلاب و ابعاد سرریز را نتیجه می‌دهد.

مهم‌ترین تفاوت مدل ارائه شده در این مقاله نسبت به

1. Permanent

2. Emergency

3. Benefit - Cost

نهایت با توجه به رابطه (3)، خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح بدست می‌آید ( $EAD_{without}$ ). برای تعیین خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط طرح، با در نظر گرفتن هیدروگراف سیل طراحی  $T$  ساله، این هیدروگراف در شرایطی که مخزن سد خالی است وارد آن می‌شود. پس از پر شدن مخزن تا تراز سرریز، قسمت باقی‌مانده هیدروگراف ورودی تحت اثر روندیابی مخزن قرار می‌گیرد و طبق معادلات سرریز آزاد و روندیابی مخزن، هیدروگراف خروجی از سرریز مشخص می‌شود. هیدروگراف خروجی تا ابتدای منطقه پتانسیل خطر روندیابی شده و مطابق با آنچه در بالا نیز اشاره شد با هیدروگراف سیل حاصل از میان حوضه جمع و در نهایت پس از تعیین خسارت برای هر دوره بازگشت، خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط وجود طرح از رابطه (4) تعیین می‌شود ( $EAD_{with}$ ). باید در نظر داشت که برای طراحی سرریز، مخزن پر فرض می‌شود، در صورتی که برای طراحی مخزن (تعیین ارتفاع یا ظرفیت کنترل سیلاب مخزن)، فرض می‌شود مخزن خالی است. همچنین باید توجه کرد که سیلاب طراحی مخزن برای تعیین حجم کنترل سیلاب، متفاوت از سیلاب طراحی سرریز است.

سرریز سد باید توانایی عبور سیلاب طراحی سرریز (معمولاً سیل 10000 ساله) را داشته باشد تا خطر شکست سد تحت اثر روگذری آب از روی جسم سد (بالاخص در مورد سدهای خاکی) به حداقل ممکن کاهش یابد. همان‌طور که اشاره شد، ابعاد سرریز براساس سیل طراحی  $T$  ساله مشخص نمی‌شود، بلکه در این حالت هیدروگراف سیل با دوره بازگشت 10000 سال در شرایطی که مخزن پر است وارد آن شده و پس از روندیابی، بر اساس این هیدروگراف است که ارتفاع تیغه آب روی سرریز مشخص می‌شود. از طرفی با در نظر گرفتن سیل طراحی  $T$  ساله، به روشی که تشریح شد، ارتفاعی برای کنترل سیلاب محاسبه می‌شود. بنابراین طبق شکل 2 ارتفاع کل سد حاصل جمع  $H_{dead}$  (ارتفاع متناظر با حجم مرده سد)،

مطالعات پیشین در این است که در مدل توسعه داده شده، مخزن کنترل سیلاب خالی فرض شده است و اثرات تجمع و تسکین سیلاب در مخزن سد به طور یک‌جا لحاظ شده‌اند.

## 2- فرضیات حاکم و تشریح مسأله

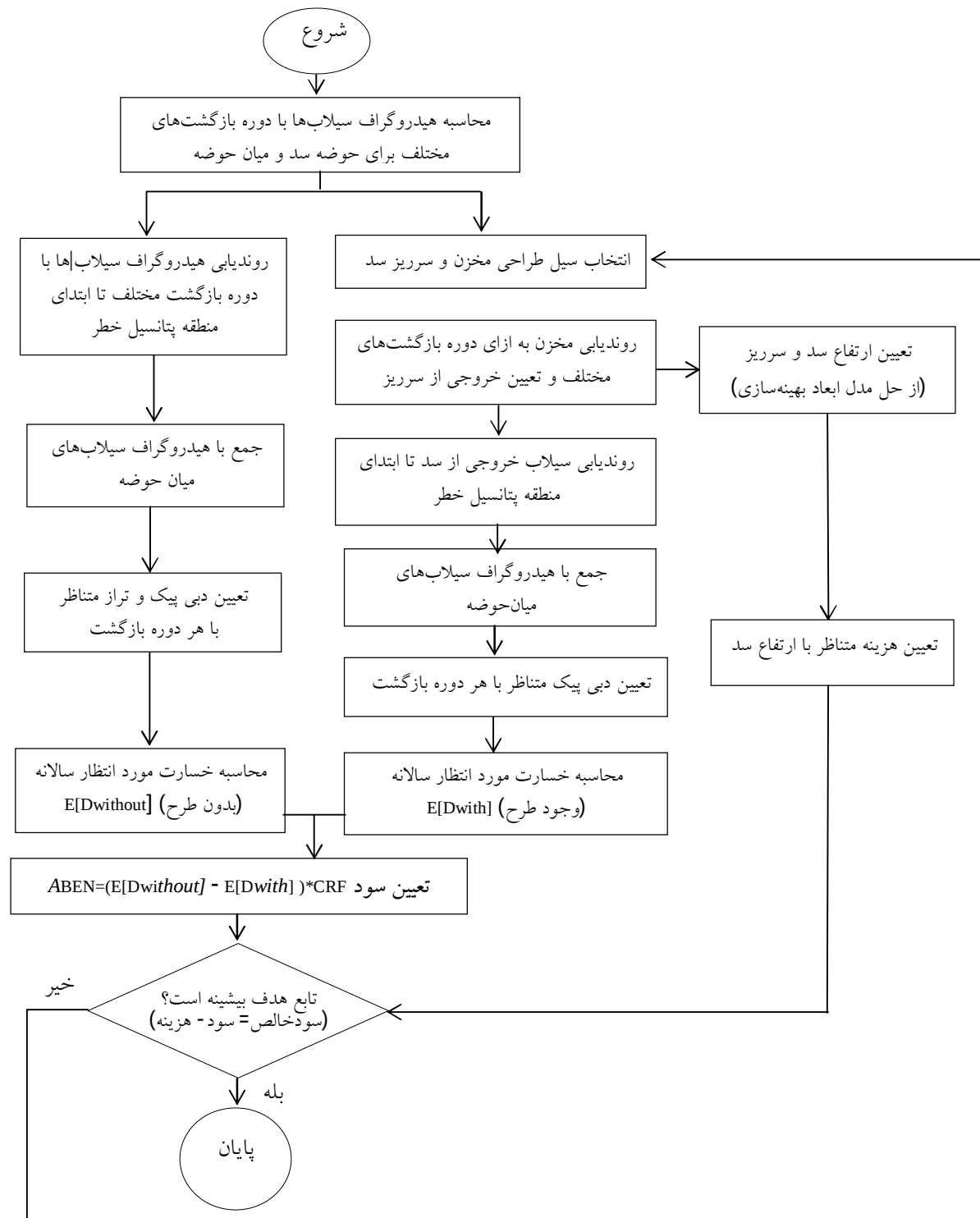
فرضیاتی که در ارائه مدل بهینه‌سازی این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از: الف- هدف از ایجاد سد فقط کنترل سیلاب است، بدین معنا که تمام حجم مفید آن بعد از ذخیره سیلاب، تخلیه شده و برای سیلاب بعدی آماده می‌شود. ب- سرریز سد از نوع آزاد (اوجی) و کنترل نشده در نظر گرفته شده است. پ- در طراحی سیستم، تنها سرریز اضطراری به عنوان خروجی سیلاب در نظر گرفته شده و خروجی از تخلیه کننده تحتانی (در جهت اطمینان) لحاظ نگردیده است. ت- روندیابی‌ها در مخزن و رودخانه به روش هیدرولوژیکی و به ترتیب به روشهای مخزن تراز<sup>1</sup> و ماسکینگام انجام گرفته است. ث- تنها خسارت‌های محسوس (مستقیم) از قبیل خسارت وارد بر یک منزل مسکونی در اثر غرقاب شدن آن تا یک تراز مشخص و غیره مد نظر قرار گرفته است. ج- در هنگام ورود سیل با هیدروگراف مشخص، حجم مرده، پر در نظر گرفته شده است.

روال کلی کار بدین ترتیب است که ابتدا با فرض عدم وجود سد، سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف ( $2 = T$ ) 5، 10، 20، 50، 100، 200، 500، 1000، 10000 سال و  $PMF$  تا ابتدای منطقه پتانسیل خطر روندیابی شده، سپس هیدروگراف روندیابی شده با هیدروگراف سیل حاصل از حوضه میانی (در صورتی که فاصله بین سد تا منطقه پتانسیل خطر زیاد باشد) جمع می‌شود تا دبی پیک و تراز متناظر برای هر دوره بازگشت در منطقه پتانسیل خسارت بدست آید. سپس خسارت برای هر دوره بازگشت با توجه رابطه اشل - خسارت محاسبه شده و در

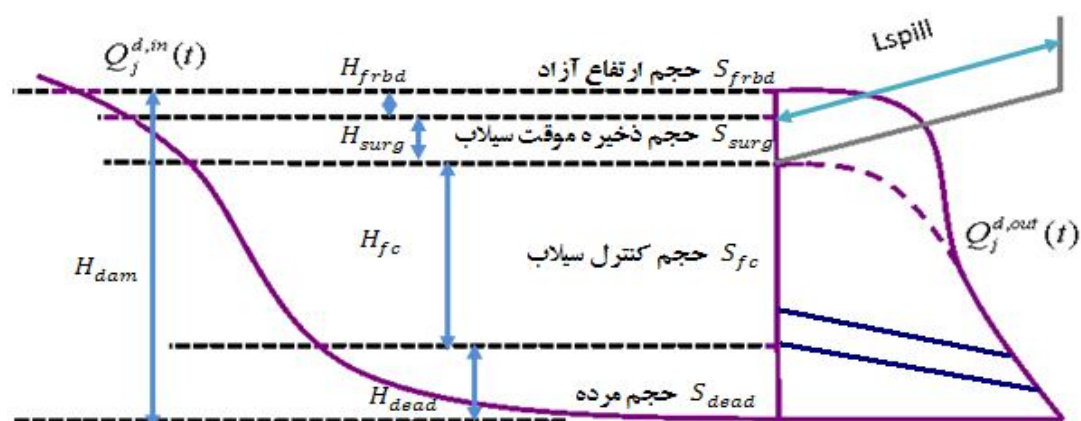
1. Level pool

ترتیب براساس سیل طراحی  $T$  ساله و سیل 10000 ساله مشخص می‌شود. روند کلی حل مسئله به صورت فلوچارت در شکل 1 ارائه شده است.

$H_{fc}$  (ارتفاع متناظر با حجم کنترل سیلاب)،  $H_{surg}$  (ارتفاع متناظر با حجم ذخیره موقت) و  $H_{frbd}$  (ارتفاع آزاد) می‌باشد، که همان‌طور که اشاره شد،  $H_{fc}$  و  $H_{surg}$  به



شکل 1 روندنمای روش پژوهش در این مطالعه



شکل 2 مقطع عرضی سد و مخزن کنترل سیلاب و پارامترهای طراحی (علیمحمدی و همکاران، 1389)

قیدهای مربوط به تشریح تابع هدف با توجه به شکل 3 به شرح زیر می‌باشند:

$$ABEN = (E[D_{without}] - E[D_{with}]) \times CRF \quad (2)$$

$$E[D_{without}] = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{D(Q_{j,max}^{pda,natural}) + D(Q_{j+1,max}^{pda,natural})}{2} \right] \times [F(Q_{j+1,max}^{pda,natural}) - F(Q_{j,max}^{pda,natural})]$$

$$\text{for } Q_c = Q_{1,max}^{pda,natural} \leq Q_{2,max}^{pda,natural} \leq \dots \leq Q_{n,max}^{pda,natural} \leq \infty \quad (3)$$

$$E[D_{with}] = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{D(Q_{j,max}^{pda}) + D(Q_{j+1,max}^{pda})}{2} \right] \times [F(Q_{j+1,max}^{pda}) - F(Q_{j,max}^{pda})]$$

$$\text{for } Q_c = Q_{1,max}^{pda} \leq Q_{2,max}^{pda} \leq \dots \leq Q_{n,max}^{pda} \leq \infty \quad (4)$$

$$ACOST = CRF \times (COST_{DAM} + COST_{SPILL}) + AOMR \quad (5)$$

$$COST_{DAM} = f_1(H_{DAM}) \quad (6)$$

$$H_{DAM} = H_{dead} + H_{fc} + H_{surg} + H_{frbd} \quad (7)$$

$$COST_{SPILL} = f_2(H_{surg}, L) \quad (8)$$

$$AOMR = \alpha (COST_{DAM} + COST_{SPILL}) \times CRF \quad (9)$$

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (10)$$

### 3- فرمول‌بندی مدل

#### 3-1- تعیین تابع هدف

برای نمایش ارتباط بین اجزای سیستم مورد بررسی، شکل 3 ترسیم شده است.

تابع هدف مدل، حداکثرسازی سود خالص سالانه سیستم می‌باشد. بر این اساس تابع هدف عبارتست از:

$$\max ANB = ABEN - ACOST \quad (1)$$

که در آن  $ANB$  سود خالص سالانه،  $ABEN$  سود سالانه و  $ACOST$  هزینه سالانه می‌باشد.

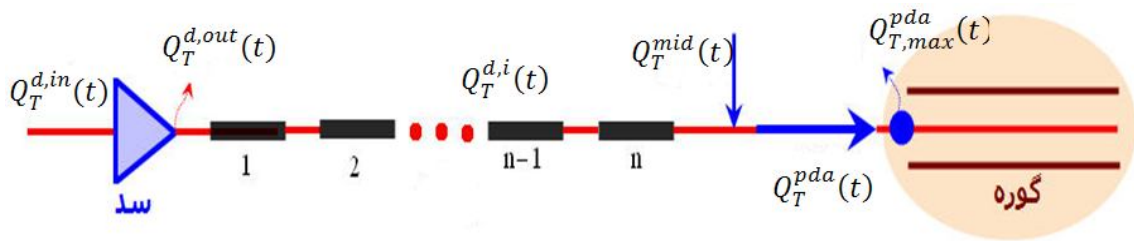
قیدهای مدل شامل توابع و ترم‌های مربوط به تشریح تابع هدف، روندیابی سیل در مخزن و رودخانه، می‌باشد.

در شکل 2 اجزای مخزن کنترل سیلاب به تصویر کشیده شده است. در اینجا نیز سعی شده تا حد امکان جزئیات بیشتری از سیستم مد نظر قرار گیرد تا تطابق هر چه بیشتری با واقعیت ایجاد شود. چنانچه ملاحظه می‌شود حجم مخزن از چهار بخش حجم مرده، حجم کنترل سیلاب، حجم ذخیره موقت<sup>1</sup> و حجم ارتفاع آزاد تشکیل شده است.

#### 3-2- محدودیت‌ها

##### 3-2-1- محدودیت‌های مربوط به تشریح تابع هدف

1. Surcharge



شکل 3 شمای کلی سیستم مورد مطالعه

روندیابی  $K_i$ ،  $X_i$  تقسیم شده است.

$$Q_{T,natural}^{r,i}(t+1) = C_{1,i} \times Q_{T,natural}^{r,i-1}(t+1) + C_{2,i} \times Q_{T,natural}^{r,i-1}(t) + C_{3,i} \times Q_{T,natural}^{r,i}(t) \quad (11)$$

$i=2,3,\dots,n$

$$C_{1,i} = \frac{\Delta t - 2K_i X_i}{2K_i(1-X_i) + \Delta t} \quad (12)$$

$$C_{2,i} = \frac{\Delta t + 2K_i X_i}{2K_i(1-X_i) + \Delta t} \quad (13)$$

$$C_{3,i} = \frac{2K_i(1-X_i) - \Delta t}{2K_i(1-X_i) + \Delta t} \quad (14)$$

در این روابط  $Q_{T,natural}^{r,i}(t)$  دبی خروجی بازه  $i$  در انتهای دوره  $t$  در شرایط بدون طرح،  $K_i$  و  $X_i$  ضرایب روندیابی در بازه  $i$  و  $C_{1,i}, C_{2,i}, C_{3,i}$  پارامترهای روندیابی ماسکینگام در بازه  $i$  می‌باشند.

دبی هیدروگراف ورودی به منطقه پتانسیل خطر نیز از جمع دبی هیدروگراف میان حوضه و دبی هیدروگراف روندیابی شده از آخرین بازه ( $j=n$ ) حوضه آبریز اصلی با دوره بازگشت  $T$  سال، در زمان  $t$  بدست می‌آید. بنابراین برآورد خسارت ناشی از سیل ورودی بر اساس حداکثر دبی هیدروگراف ورودی به منطقه پتانسیل خطر صورت می‌گیرد.

### 3-2-3- تعیین دبی‌های سیلابی در شرایط وجود طرح

برای تعیین خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط با طرح، ابتدا روندیابی سیلاب در مخزن و سپس روندیابی رودخانه انجام می‌شود. بنابراین مجموعه سوم قیدها

در روابط فوق  $E[D_{without}]$  خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل در شرایط طبیعی (بدون طرح)،  $E[D_{with}]$  خسارت مورد انتظار سالانه ناشی از سیل پس از اجرای طرح کنترل سیلاب،  $D(Q_{j,max}^{pda,natural})$  خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت  $j$  در منطقه پتانسیل خطر در شرایط طبیعی،  $D(Q_{j,max}^{pda})$  خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت  $j$  در منطقه پتانسیل خطر در شرایط وجود طرح می‌باشند. همچنین،  $F(Q_{j+1,max}^{pda,natural})$  احتمال عدم وقوع سیل با دوره برگشت  $j$  ( $F = \frac{1}{p} - 1 = \frac{1}{T}$ ) و  $H_{DAM}$  ارتفاع کل سد، می‌باشند. هزینه‌ها نیز عبارتند از  $COST_{SPILL}$  هزینه احداث سرریز،  $COST_{DAM}$  هزینه احداث سد و  $AOMR$  هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری سد.  $f_2()$  رابطه تابعی بین ارتفاع و طول سرریز با هزینه آن،  $f_1()$  رابطه تابعی بین ارتفاع و هزینه سد،  $\alpha$  ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سد،  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه،  $i$  نرخ بهره،  $n$  عمر مفید طرح کنترل سیلاب به سال می‌باشند.

### 3-2-3- تعیین دبی‌های سیلابی در شرایط بدون طرح

مجموعه دوم قیدها مربوط به محاسبات روندیابی سیل در رودخانه در شرایط بدون طرح و ورودی به منطقه پتانسیل خطر می‌باشد. برای این منظور از روش ماسکینگام استفاده شده است که روابط آن در ادامه ارائه شده است. در این قسمت، بازه رودخانه مطابق شکل 3 به  $n$  قسمت با پارامترهای روندیابی معلوم  $i=1,2,\dots,n$  هر یک با ضرایب

خطر می‌باشد. برای این منظور مانند حالت بدون طرح، از روش ماسکینگام استفاده شده است. سپس مانند حالت بدون طرح، حداکثر دبی هیدروگراف ورودی به منطقه پتانسیل خطر و خسارت مربوط به آن‌ها تعیین می‌شوند. به عبارتی از همان روابط (11) تا (14) استفاده می‌شود، تنها به جای دبی هیدروگراف رودخانه، دبی خروجی از سرریز در قسمت مربوط به روندیابی بازه اول، قرار داده می‌شود.

### 3-2-4- تعیین هزینه اجرای طرح

مجموعه پنجم قیده‌ها مربوط به محاسبات روندیابی سیل طراحی سرریز در مخزن سد و تعیین ابعاد سرریز و حجم ذخیره موقت ( $S_{sur}$ ) و ارتفاع سد و هزینه متناظر با آن می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، سیلاب طراحی مخزن جهت تعیین حجم کنترل سیلاب، متفاوت از سیلاب طراحی سرریز است. فرض شده است که سیلاب طراحی سرریز، بزرگتر از سایر سیلاب‌ها باشد. در این حالت مخزن پر فرض شده و بنابراین، روندیابی سیلاب در مخزن به روش مخزن تراز انجام شده است. ارتفاع ذخیره موقت در هر زمان نیز از رابطه (21) بدست می‌آید.

$$H_{spldes}(t) = \left[ \frac{Q_{spldes}^{d,out}(t)}{C_{spill} \times L_{spill}} \right]^{2/3} \quad \text{for all } t \quad (21)$$

### 4- تعیین رابطه تراز - خسارت

برای محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه، لازم است ابتدا خسارت منطقه مورد مطالعه به ازای دبی‌های مختلف تعیین شود. بدین منظور ابتدا مقاطعی با توجه به مسیر رودخانه در گذر از ناحیه پتانسیل خسارت تعیین و با استفاده از نقشه توپوگرافی، شکل مقاطع مشخص می‌شوند. سپس با استفاده از نرم‌افزار  $HEC-RAS^1$  (با معلوم

مربوط به روندیابی سیلاب طراحی در مخزن و محاسبه ظرفیت کنترل سیلاب ( $S_{fc}$ ) می‌باشد. برای این منظور مخزن خالی فرض می‌شود. در این صورت روندیابی مخزن، با روندیابی به روش مخزن تراز تفاوت دارد، چرا که در روش مذکور، مخزن پر از آب فرض می‌شود، در صورتی که در مطالعه حاضر، برای تعیین حجم کنترل سیلاب، مخزن خالی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مقداری از حجم هیدروگراف سیلاب‌های ورودی در مخزن سد ذخیره می‌شود و باقیمانده هیدروگراف (چنانچه حجم آن بیش از ظرفیت سد باشد) تحت اثر روندیابی مخزن قرار می‌گیرد. روابط زیر نشان دهنده رابطه بین  $G$  و  $Q$  در روندیابی مخزن می‌باشد.

$$G_T^d(t) = \frac{S_T^d(t)}{\Delta t} + \frac{Q_T^{d,out}(t)}{2} \quad (15)$$

$$G_T^d(t+1) = G_T^d(t) + \left[ \frac{Q_T^d(t) + Q_T^d(t+1)}{2} \right] - Q_T^{d,out}(t) \quad (16)$$

for all  $\begin{cases} T > m \\ i > k \end{cases}$

$$R_1 = C_{spill} \times H^{1.5} \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{H}{(3 \times \Delta t \times 3600)} \quad (18)$$

$$R_3 = [A + A_{crest} + \sqrt{A \times A_{crest}}] \quad (19)$$

$$Q_T^{d,out}(t) = \left[ \frac{R_1 \times L_{spill}}{(R_2 \times R_3) + \frac{R_1 \times L_{spill}}{2}} \right] \times G_T^d(t) \quad (20)$$

در این روابط  $G$  نشانه ذخیره،  $Q_T^d$  دبی هیدروگراف ورودی به مخزن سد و  $Q_T^{d,out}$  دبی هیدروگراف خروجی از سرریز می‌باشد. همچنین  $A$  مساحت دریاچه سد در ارتفاع  $H$  از تاج سرریز،  $A_{crest}$  مساحت دریاچه سد در تراز تاج سرریز،  $H$  ارتفاع تیغه آب روی سرریز و  $L_{spill}$  طول سرریز می‌باشند.

مجموعه چهارم قیده‌ها مربوط به محاسبات روندیابی سیل خروجی از سد در رودخانه و ورودی به منطقه پتانسیل

این منحنی درصد خسارت وارد به ساختمان‌ها را می‌توان از رابطه (24) تقریب زد (Hyd. Eng. Circular, 1980):

$$P = 12.54 + 5.3d - 0.144d^2 \quad (24)$$

در این رابطه  $P$  درصد خسارت و  $d$  ارتفاع در معرض خسارت برحسب فوت می‌باشند.

پس از محاسبه درصد خسارت برای هر مقطع به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، خسارت به این ترتیب محاسبه می‌شود:

درصد خسارت  $\times$  ارزش دارایی = خسارت برحسب میلیارد ریال (25)

بنابراین پس از بدست آوردن خسارت منطقه مورد مطالعه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، خسارت مقاطع تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، فرضیاتی که در برآورد خسارت در نظر گرفته شده است مربوط به منحنی‌های تراز - خسارت نیز می‌باشد.

## 5- مطالعه موردی

رودخانه خشک شیراز یک رودخانه فصلی است که از ملحق شدن دو رودخانه نهر اعظم و چنار سوخته تشکیل شده و پس از عبور از شهر شیراز به سمت جنوب شرقی حوضه خود متمایل شده و به دریاچه مهارلو می‌ریزد. حوضه آبریز رودخانه خشک به شکل کشیده و در جهت غرب به شرق است و یکی از زیرحوضه‌های دریاچه مهارلو محسوب می‌شود. همه ساله به دلیل بارندگی و عبور سیلاب از داخل شهر خسارت زیادی به اراضی و تاسیسات شهری وارد می‌شود که عمده این سیلاب‌ها از شاخه تنگ سرخ سرچشمه می‌گیرد. شکل 4 منطقه پتانسیل خطر، محور سد و موقعیت رودخانه تنگ سرخ را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 5 منطقه پتانسیل خطر مشخص شده است.

## 1-5- داده‌های ورودی

از جمله داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل، دبی‌های

بودن مشخصات هیدرولیکی بازه‌ها) پروفیل جریان برای سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه و ترسیم می‌شود. بدین ترتیب تراز سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف در مقاطع مورد نظر معلوم می‌گردد. همچنین لازم است کاربری اراضی در مقاطع نیز تعیین شود.

برای تعیین خسارت می‌توان از دو روش ذوزنقه‌ای یا مستطیلی استفاده کرد که در مطالعه حاضر روش مستطیلی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، سطح مربوط به مقطع  $i$  برای سیل با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاد از رابطه زیر تعیین می‌شود. ( $Topwide(i)$ : عرض فوقانی (که از خروجی نرم‌افزار HEC-RAS در اختیار قرار می‌گیرد))

$$S(i) = \frac{(L_1 + L_2)}{2} \times Topwide(i) \quad (22)$$

$$ارزش دارایی‌ها = \frac{unit\ price\ land \times s}{1\ میلیارد\ ریال} \quad (23)$$

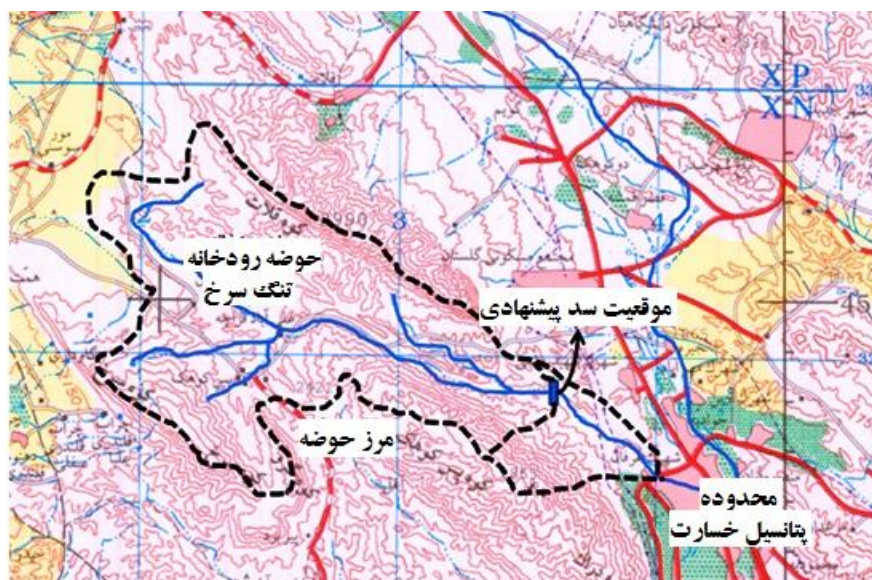
پس از تعیین مساحت به ازای هر دوره بازگشت برای هر مقطع، با در نظر گرفتن ارزش واحد اراضی، ارزش دارایی - ها، برای هر مقطع برحسب میلیارد ریال بدست می‌آید. در روابط بالا  $L_1$  و  $L_2$  به ترتیب فاصله بین مقطع  $i$  با مقاطع  $i-1$  و  $i+1$  و  $S$  مساحت مربوط به مقطع  $i$  می‌باشد.

فرض می‌شود در هر مقطع، از ارتفاعی مشخص به بالا به ساختمان خسارت وارد می‌شود. بنابراین اختلاف ارتفاع آب از این ارتفاع، مقدار ارتفاع در معرض خسارت را نتیجه می‌دهد. در ادامه لازم است درصد خسارت ناشی از غرقاب شدن اراضی محاسبه شود، زیرا در اثر غرقاب شدن تمام ارزش اراضی از دست نمی‌رود. واضح است هر قدر میزان غرقاب شدن بیشتر باشد، خسارت بیشتر است. این بخش از کار مشکل‌ترین بخش محاسبه خسارت است، زیرا بسیار وابسته به نوع تاسیسات و زیر- ساخت‌ها و ساختمان‌ها و کاربری اراضی هر منطقه است. در اینجا به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات محلی، از منحنی که توسط کوری<sup>1</sup> ارائه شده، استفاده شده است. در

1. Corry

داده‌های دبی - اشل - خسارت در منطقه پتانسیل خسارت می‌باشند.

پیک و هیدروگراف سیلاب‌های ورودی به مخزن و میان حوضه با دوره بازگشت‌های مختلف (مترمکعب بر ثانیه) (جدول 1)، داده‌های سطح - حجم - ارتفاع مخزن سد و



شکل 4 موقعیت رودخانه، منطقه پتانسیل خطر، محور سد، حوضه آبریز اصلی و میان حوضه رودخانه تنگ سرخ (شرکت مهندسين مشاور آيفن، 1383)



شکل 5 موقعیت منطقه پتانسیل خطر (سرابندی، 1387)

جدول 1 دبی پیک سیلاب حوضه آبریز اصلی و میان حوضه (شرکت مهندسين مشاور آبن، 1383)

| دوره بازگشت (سال)                     | 2  | 5    | 10   | 20   | 50   | 100  | 200  | 500 | 1000 | 10000 | PMF   |
|---------------------------------------|----|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|-------|
| دبی پیک حوضه اصلی (مترمکعب بر ثانیه)  | 70 | 102  | 122  | 141  | 168  | 249  | 276  | 310 | 339  | 429   | 662   |
| دبی پیک حوضه میانی (مترمکعب بر ثانیه) | 14 | 20/4 | 24/4 | 28/2 | 33/6 | 49/8 | 55/2 | 62  | 67/8 | 85/8  | 132/4 |

در این شکل، منظور از حروف A، C و M به ترتیب کاربری کشاورزی، بایر و شهری است. سپس خسارت هر مقطع به ازای دبی‌های مختلف تعیین می‌شود. جدول 3 نمونه‌ای از محاسبات تعیین خسارت مربوط به یک مقطع را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این محاسبات برای تمامی مقاطع انجام شده است. جداول مربوط به محاسبات سایر مقاطع، توسط مرادی (1389) ارائه شده است. سپس با گرفتن میانگین خسارت تمامی مقاطع برای هر دوره بازگشت، داده‌های دبی-خسارت تعیین می‌شود. (جدول 4).

در این پژوهش برای تعیین هزینه ساخت با توجه به ارتفاع سد، از اطلاعاتی که توسط سرابندی (1387) ارائه شده، استفاده شده است.

## 5-2- نتایج حاصل از اجرای مدل

با توجه به محدودیت‌های موجود و مدل حاصل که از نوع عدد صحیح مختلط غیرخطی<sup>1</sup> می‌باشد، نرم-افزار لینگو (LINDO Systems Inc., 2009) از روش شاخه و کران<sup>2</sup> که روشی سیستماتیک برای شمارش ضمنی تمام ترکیب‌های ممکن از متغیرهای صحیح است، استفاده می‌نماید. این روش فضای امکان‌پذیر را به زیرمجموعه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کند. سپس این زیرمجموعه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا حل بهینه نهایی حاصل شود (Hillier and Lieberman, 2009).

شکل 6 منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد را نشان می‌دهد. سایر پارامترهای مورد نیاز در جدول 2 ارائه شده است. در این جدول،  $X1$ ،  $K1$  و  $X2$ ،  $K2$  به ترتیب پارامترهای مربوط به روندیابی ماسکینگام برای بازه اول و بازه دوم می‌باشند. (در مطالعه حاضر، با توجه به رابطه  $\frac{1}{2(1-x)} < \frac{k}{\Delta t} < \frac{1}{2x}$  (Mays, 2005) دو بازه روندیابی انتخاب شده است). همچنین داده‌های مورد نیاز برای تعیین ضریب بازگشت سرمایه از قبیل  $i$  و  $n$  نیز در این جدول ارائه شده است.

جدول 2 بخشی از داده‌های ورودی

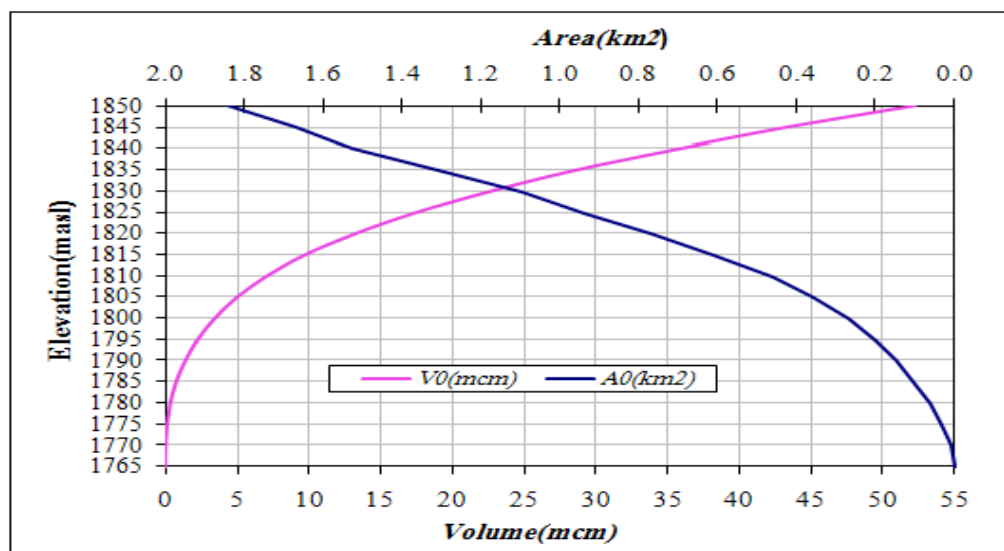
(شرکت مهندسين مشاور آبن، 1383)

| پارامتر                                 | مقدار |
|-----------------------------------------|-------|
| ضریب آبگذری از سرریز (C)                | 2/22  |
| حجم مرده بر حسب میلیون متر مکعب         | 3/66  |
| تراز کف (ELV0)                          | 1765  |
| ارتفاع روی تراز تاج سرریز (H1) به متر   | 13/26 |
| نرخ بهره (i)                            | 0/08  |
| عمر مفید طرح کنترل سیلاب به سال (n)     | 50    |
| $K1$ ، $K2$                             | 0/25  |
| $X1$ ، $X2$                             | 0/25  |
| فاصله زمانی بر حسب ساعت (DT)            | 1     |
| ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سد | 0/3   |

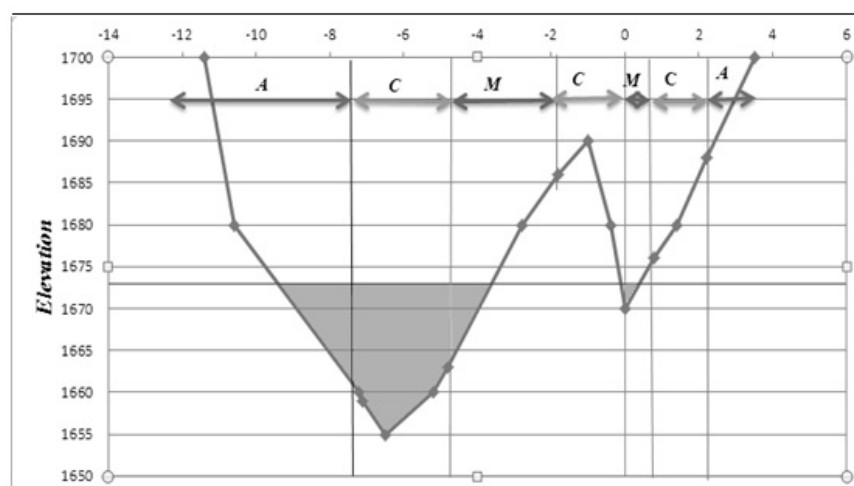
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش 4، پس از تعیین فاصله بین مقاطع (مقاطعی که در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرند) با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، مساحت هر مقطع تعیین می‌شود. شکل 7 پروفیل مقطع شماره 6 را با در نظر گرفتن سیلاب PMF به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

1. Mixed Integer Nonlinear Program (MINLP)

2. Branch and Bound Solver



شکل 6 منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن (شرکت مهندسين مشاور آيفن، 1383)



شکل 7 مقطع شماره 6 با در نظر گرفتن سیلاب PMF (مرادی، 1389)

جدول 3 تعیین خسارت مقطع 6

| Damage<br>(میلیارد ریال) | P<br>(درصد خسارت) | H <sub>above</sub><br>(ft) | H <sub>above</sub><br>(m) | H <sub>water</sub><br>(m) | ارزش دارایی<br>(میلیارد ریال) | Area<br>(m <sup>2</sup> ) | Top wide<br>(m) | Q<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|
| 229/167                  | 16/0              | 0/66                       | 0/2                       | 1/2                       | 1436/271                      | 28725/4                   | 69/01           | 101/3                    |
| 318/413                  | 19/1              | 1/28                       | 0/39                      | 1/39                      | 1668/330                      | 33366/6                   | 80/16           | 147/6                    |
| 371/283                  | 20/7              | 1/61                       | 0/49                      | 1/49                      | 1794/662                      | 35893/2                   | 86/23           | 176/6                    |
| 419/738                  | 22/1              | 1/90                       | 0/58                      | 1/58                      | 1898/933                      | 37978/7                   | 91/24           | 204/1                    |
| 488/340                  | 24/0              | 2/30                       | 0/7                       | 1/7                       | 2038/793                      | 40775/9                   | 97/96           | 243/1                    |
| 675/444                  | 28/2              | 3/25                       | 0/99                      | 1/99                      | 2392/189                      | 47843/8                   | 114/94          | 360/4                    |
| 729/507                  | 29/4              | 3/51                       | 1/07                      | 2/07                      | 2483/764                      | 49675/3                   | 119/34          | 399/4                    |
| 801/143                  | 30/8              | 3/84                       | 1/17                      | 2/17                      | 2604/268                      | 52085/4                   | 125/12          | 448/6                    |
| 859/786                  | 31/9              | 4/10                       | 1/25                      | 2/25                      | 2699/173                      | 53983/5                   | 129/69          | 490/6                    |
| 1030/295                 | 34/8              | 4/82                       | 1/47                      | 2/47                      | 2964/741                      | 59294/8                   | 142/45          | 620/9                    |
| 1475/040                 | 41/0              | 6/53                       | 1/99                      | 2/99                      | 3597/233                      | 71944/7                   | 172/84          | 991/3                    |

جدول 4 تعیین خسارت منطقه

| خسارت متوسط<br>Dave | Damage (میلیارد ریال) |            |           |           |           |           | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|---------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
|                     | Section 11            | Section 10 | Section 9 | Section 8 | Section 7 | Section 6 |                       |
| 296/520             | 287/392               | 308/990    | 192/958   | 305/437   | 455/174   | 229/167   | 101/3                 |
| 409/013             | 404/555               | 436/440    | 265/412   | 415/869   | 613/391   | 318/413   | 147/6                 |
| 473/094             | 463/408               | 511/949    | 306/576   | 480/466   | 704/880   | 371/283   | 176/6                 |
| 533/251             | 524/917               | 584/264    | 344/766   | 541/562   | 784/259   | 419/738   | 204/1                 |
| 615/152             | 602/963               | 677/537    | 397/183   | 619/279   | 905/612   | 488/340   | 243/1                 |
| 837/156             | 821/000               | 946/629    | 535/942   | 845/074   | 1198/845  | 675/444   | 360/4                 |
| 905/152             | 890/498               | 1029/544   | 579/444   | 903/635   | 1298/282  | 729/507   | 399/4                 |
| 988/924             | 972/815               | 1125/608   | 631/336   | 987/958   | 1414/683  | 801/143   | 448/6                 |
| 1059/834            | 1052/334              | 129/381    | 681/251   | 1060/631  | 1495/618  | 859/786   | 490/6                 |
| 1264/212            | 1254/479              | 1463/170   | 807/351   | 1252/485  | 1777/490  | 1030/295  | 620/9                 |
| 1769/631            | 1751/025              | 2094/847   | 1112/784  | 1718/681  | 2465/409  | 1475/040  | 991/3                 |

- تعیین دوره بازگشت طراحی مخزن سد

جدول 5 تعیین دوره بازگشت طراحی مخزن سد

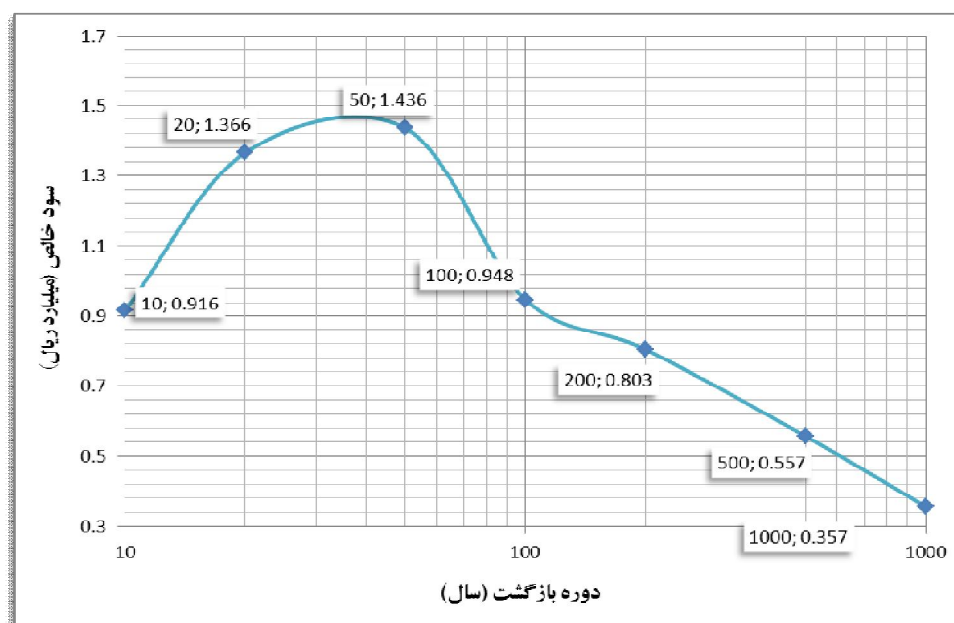
| دوره بازگشت<br>(سال) | طول بهینه سرریز<br>(متر) | سود خالص سالانه<br>(میلیارد ریال) |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 10                   | 30/103                   | 0/916                             |
| 20                   | 28/26                    | 1/366                             |
| 50                   | 28/26                    | 1/436                             |
| 100                  | 28/26                    | 0/948                             |
| 200                  | 28/26                    | 0/803                             |
| 500                  | 28/26                    | 0/557                             |
| 1000                 | 28/26                    | 0/357                             |

از آنجا که دبی پیک در منطقه پتانسیل خسارت تابعی از حجم ذخیره کنترل سیلاب مخزن است و با توجه به این که حجم ذخیره مخزن نامعلوم است، مقدار دبی پیک و خسارت هم نامعلوم می‌باشد. در اینجا حجم زیر هیدروگراف سیلاب برابر حجم کنترل سیلاب مخزن در نظر گرفته شده و بر این اساس یک سری گزینه‌های طراحی مطرح شده است. بدین ترتیب مدل باید به ازای دوره بازگشت‌های مختلف اجرا شود تا دوره بازگشت بهینه طراحی مخزن تعیین شود.

جدول 6 نتایج خروجی مدل بهینه‌سازی (T=50 year)

|                                     |      |                                         |         |
|-------------------------------------|------|-----------------------------------------|---------|
| H <sub>dead</sub><br>(m)            | 35/8 | cost <sub>dam</sub><br>(میلیارد ریال)   | 105/010 |
| H <sub>fc</sub><br>(m)              | 45/3 | cost <sub>spill</sub><br>(میلیارد ریال) | 10/293  |
| H <sub>surg</sub><br>(m)            | 3/6  | cost <sub>total</sub><br>(میلیارد ریال) | 12/253  |
| H <sub>dam</sub><br>(m)             | 84/8 | Benefit<br>(میلیارد ریال)               | 13/689  |
| A<br>(m <sup>2</sup> )              | 1/1  | NB<br>(میلیارد ریال)                    | 1/436   |
| A <sub>0</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | 0/7  | L(m)                                    | 28/260  |

پس از اجرای مدل به ازای دوره بازگشت‌های مختلف، دوره بازگشتی به عنوان بهینه انتخاب می‌شود که بیشترین سود خالص را داشته باشد. با توجه به مقادیر نشان داده شده در جدول 5، دوره بازگشت 50 سال به عنوان دوره بازگشت طراحی مخزن انتخاب شده است. نمودار تغییرات سود خالص نیز به ازای دوره بازگشت‌های مختلف در شکل 8 نشان داده شده است. جدول 6 نیز مقادیر مربوط به ارتفاع سد و سود خالص را ارائه می‌دهد.



شکل 8 تغییرات سود خالص به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

است.

#### - تحلیل حساسیت

در این قسمت تحلیل حساسیت برای نتایج خروجی مدل به انجام رسیده است. بدین ترتیب که هر بار یک دوره بازگشت معین به عنوان دوره بازگشت طراحی سیستم در نظر گرفته شده و نتایج ارائه شده‌اند. مقادیر مختلف سود خالص سالانه در برابر ارتفاع سد و طول مؤثر سرریز، به ازای دوره بازگشت مختلف، به ترتیب در شکل‌های 9 و 10 ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین سود خالص سالانه مربوط به دوره بازگشت 50 سال، طول سرریز 28/26 متر و ارتفاع سد 84/8 متر بدست آمده است. البته باید در نظر داشت که عرض سرریز و ارتفاع سد بدست آمده در این مقاله باید بر اساس معیارهای ایمنی سد نیز تعیین و اصلاح شوند.

با توجه به این که دوره بازگشت 50 سال، به عنوان دوره بازگشت بهینه طراحی مخزن تعیین شده، بنابراین تنها جداول مربوط به این دوره بازگشت در ادامه ارائه خواهند شد.

#### - خسارت مورد انتظار سالانه

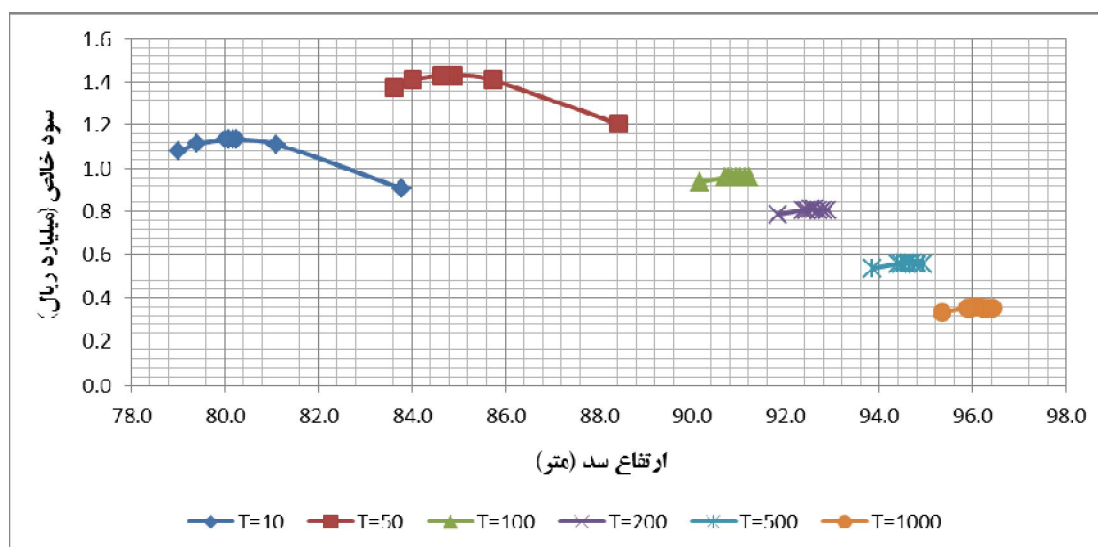
در مطالعه حاضر برای محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه (EAD) در محدوده منطقه پتانسیل خطر از روش فراوانی استفاده شده است. جدول 7 نتایج حاصل از محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح را نشان می‌دهد. در این جدول ستون دوم دبی‌های پیک برحسب متر مکعب بر ثانیه (دبی‌های پیک پس از روندیابی رودخانه و جمع با سیلاب میان حوضه تعیین می‌شوند)، ستون سوم، اشل متناظر با دبی‌های پیک بر حسب متر و ستون چهارم میزان خسارت را برحسب میلیارد ریال نشان می‌دهند. همچنین ستون پنجم و ششم، به ترتیب نشان دهنده خسارت متوسط و احتمال عدم وقوع سیل می‌باشند. نتایج مربوط به خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط وجود طرح نیز در جدول 8 ارائه شده

جدول 7 تعیین خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط عدم وجود طرح

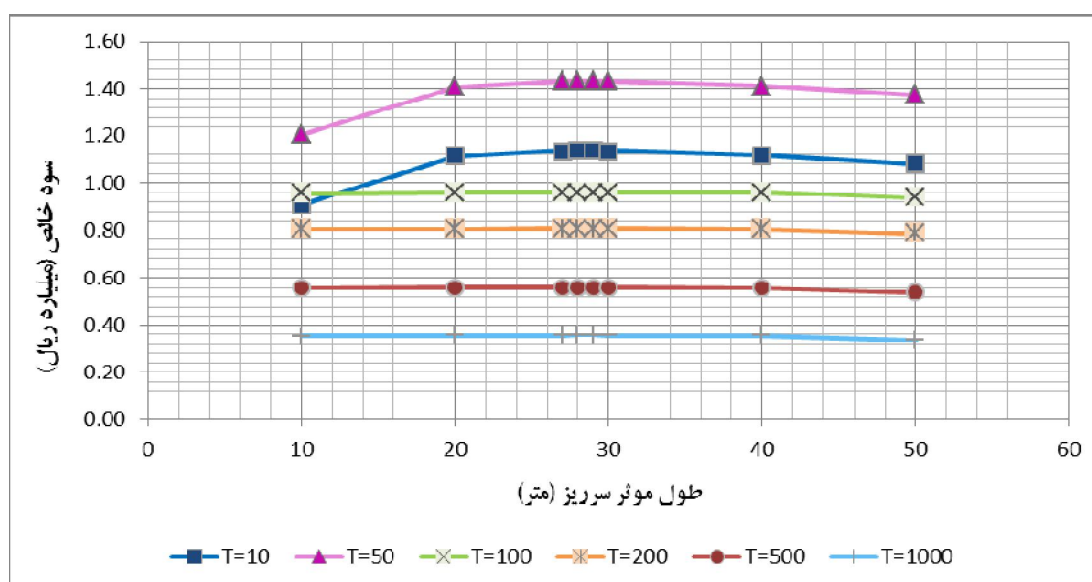
| دوره بازگشت<br>(سال)                                      | دبی پیک در ابتدای منطقه پتانسیل<br>خطر (مترمکعب بر ثانیه) | ارتفاع متناظر با<br>دبی (متر) | خسارت<br>(میلیارد ریال) | خسارت متوسط<br>(Dave) | احتمال عدم<br>وقوع سیل (F) | DF    | DF*Dave |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|-------|---------|
| 2                                                         | 82/962                                                    | 1/302                         | 242/818                 | 293/276               | 0/5                        | 0/3   | 87/983  |
| 5                                                         | 120/746                                                   | 1/695                         | 343/733                 | 372/526               | 0/8                        | 0/1   | 37/253  |
| 10                                                        | 144/452                                                   | 1/823                         | 401/319                 | 426/623               | 0/9                        | 0/05  | 21/331  |
| 20                                                        | 167/001                                                   | 1/934                         | 451/927                 | 486/822               | 0/95                       | 0/03  | 14/605  |
| 50                                                        | 198/788                                                   | 2/069                         | 521/718                 | 616/491               | 0/98                       | 0/01  | 6/165   |
| 100                                                       | 293/882                                                   | 2/405                         | 711/264                 | 741/803               | 0/99                       | 0/005 | 3/709   |
| 200                                                       | 326/135                                                   | 2/509                         | 772/341                 | 810/020               | 0/995                      | 0/003 | 2/430   |
| 500                                                       | 366/417                                                   | 2/637                         | 847/698                 | 877/362               | 0/998                      | 0/001 | 0/877   |
| 1000                                                      | 400/531                                                   | 2/733                         | 907/027                 | 996/442               | 0/999                      | 9E-04 | 0/897   |
| 10000                                                     | 507/194                                                   | 2/997                         | 1085/857                | 1285/406              | 0/9999                     | 1E-04 | 0/129   |
| PMF                                                       | 782/662                                                   | 3/538                         | 1484/955                | 0                     | 1                          | 0     | 0       |
| خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح (میلیارد ریال) |                                                           |                               |                         |                       |                            |       | 175/378 |

جدول 8 تعیین خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط وجود طرح

| دوره بازگشت<br>(سال)                                      | دبی پیک در ابتدای منطقه پتانسیل<br>خطر (مترمکعب بر ثانیه) | خسارت<br>(میلیارد ریال) | خسارت متوسط<br>(Dave) | احتمال عدم<br>وقوع سیل (F) | DF    | DF*Dave |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|-------|---------|
| 2                                                         | 0                                                         | 0                       | 0                     | 0/5                        | 0/3   | 0       |
| 5                                                         | 0                                                         | 0                       | 0                     | 0/8                        | 0/1   | 0       |
| 10                                                        | 0                                                         | 0                       | 0                     | 0/9                        | 0/05  | 0       |
| 20                                                        | 0                                                         | 0                       | 0                     | 0/95                       | 0/03  | 0       |
| 50                                                        | 0                                                         | 0                       | 214/123               | 0/98                       | 0/01  | 2/141   |
| 100                                                       | 0/157                                                     | 428/245                 | 475/145               | 0/99                       | 0/005 | 2/376   |
| 200                                                       | 0/202                                                     | 522/044                 | 584/331               | 0/995                      | 0/003 | 1/753   |
| 500                                                       | 0/264                                                     | 646/618                 | 713/721               | 0/998                      | 0/001 | 0/714   |
| 1000                                                      | 0/334                                                     | 780/824                 | 892/573               | 0/999                      | 9E-04 | 0/803   |
| 10000                                                     | 0/457                                                     | 1004/322                | 1282/949              | 0/9999                     | 1E-04 | 0/128   |
| PMF                                                       | 0/825                                                     | 1561/577                | 0                     | 1                          | 0     | 0       |
| خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح (میلیارد ریال) |                                                           |                         |                       |                            |       | 7/915   |



شکل 9 تحلیل حساسیت سود خالص نسبت به ارتفاع سد به ازای دوره بازگشت‌های مختلف



شکل 10 تحلیل حساسیت سود خالص نسبت به طول موثر سرریز به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی مخازن کنترل سیلاب ارائه گردید. در مدل ارائه شده حجم مخزن به هنگام وقوع سیل خالی فرض شده و ارتفاع سد نیز نامعلوم است. مشابه چنین رویکردی در مطالعات پیشین دیده نشده است.

مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

1- به کمک مدل‌های بهینه‌سازی می‌توان یک مدل

برای تعیین ظرفیت کنترل سیلاب یک سد تهیه کرد. این مدل می‌تواند جایگزین روش‌های معمول شبیه‌سازی باشد.

2- مدل ارائه شده دارای این قابلیت است که می‌تواند چند بازه روندیابی برای رودخانه در نظر بگیرد. همچنین مدل قابلیت انجام روندیابی مخزن و رودخانه و ارائه هیدروگراف‌های آنها و همچنین محاسبه خسارت مورد انتظار سالانه در هر دو شرایط با طرح و بدون طرح

احتمال عدم وقوع سیل با دوره برگشت  $j$   $F(Q_{j,max}^{pda})$   
 در شرایط وجود طرح  
 $f_1()$  رابطه تابعی بین ارتفاع و هزینه سد  
 $f_2()$  رابطه تابعی بین ارتفاع و طول سرریز با هزینه آن  
 $f_4$  رابطه تابعی بین حجم و ارتفاع\*  
 $H_{dead}$  ارتفاع متناظر با حجم مرده سد  
 $H_{fc}$  ارتفاع متناظر با حجم کنترل سیلاب  
 $H_{surg}$  ارتفاع متناظر با حجم ذخیره موقت  
 $H_{frbd}$  ارتفاع آزاد  
 $H_{DAM}$  ارتفاع کل سد  
 $H_{spldes}(t)$  ارتفاع ذخیره موقت در زمان  $t$   
 $C_{1,i}, C_{2,i}, C_{3,i}$  پارامترهای روندیابی ماسکینگام در بازه  $i$   
 $Ki, Xi$  ضرایب روندیابی در بازه  $i$   
 $L$  طول سرریز  
 $Q_T^{d,out}(t)$  دبی هیدروگراف خروجی از سد با دوره بازگشت  $T$  سال در زمان  $t$   
 $Q_{T,natural}^{r,i}(t)$  دبی خروجی بازه  $i$  در انتهای دوره  $t$  در شرایط بدون طرح  
 $Q_T^{pda}(t)$  دبی هیدروگراف ورودی به ابتدای منطقه پتانسیل خطر، با دوره بازگشت  $T$  سال در زمان  $t$   
 $Q_{T,max}^{pda}(t)$  حداکثر دبی هیدروگراف با دوره بازگشت  $T$  سال در منطقه پتانسیل خطر،  $t=1, \dots, tb$   
 $Q_{T,max}^{pda,natural}(t)$  دبی حداکثر سالانه با دوره برگشت  $T$ ، در منطقه پتانسیل خطر در شرایط بدون طرح  
 $n$  عمر مفید طرح کنترل سیلاب به سال  
 $i$  نرخ بهره  
 $Q_{spldes}^{d,out}(t)$  دبی هیدروگراف (سیلاب طراحی سرریز) خروجی از سرریز در زمان  $t$   
 \* نحوه تعیین روابط تابعی  $f_1, f_2, f_3$  و  $f_4$  توسط مرادی (1389) ارائه شده است.

## 7- منابع

بازرگان، ج. (1378). بهینه‌سازی حجم مخازن سدهای کنترل سیل، گزارش علمی، دانشکده عمران، دانشگاه زنجان.  
 داندانه مهر، علی، (1383). اندازه‌گیری و ارزیابی میزان خسارات

و تعیین سود خالص را به طور همزمان دارد. در این مدل دبی طراحی سرریز سد کنترل سیلاب معلوم فرض می‌شود در حالی که دبی طراحی سیستم (ظرفیت سد) پس از حل مدل حاصل می‌شود.

3- در مطالعه موردی که مربوط به سد تنگ سرخ شیراز است، دوره بازگشت بهینه 50 سال، ارتفاع سد 84/8 متر و طول سرریز 28/26 متر حاصل گردید. لازم به ذکر است که در مطالعات عملی لازم است عرض سرریز و ارتفاع سد بر اساس معیارهای ایمنی سد نیز کنترل شوند.

این مطالعه با فرضیات و محدودیت‌هایی انجام شده است. از جمله سرریز سد از نوع اوجی فرض شده و برای روندیابی رودخانه از روش ماسکینگام استفاده شده است.

## 7- فهرست علائم

سود سالانه  $ABEN$   
 هزینه سالانه  $ACOST$   
 سود خالص سالانه  $ANB$   
 هزینه سالانه بهره‌برداری و نگهداری سد  $AOMR$   
 ضریب هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سد  $\alpha$   
 هزینه احداث سرریز  $COST_{SPILL}$   
 هزینه احداث سد  $COST_{DAM}$   
 ضریب بازگشت سرمایه  $CRF$   
 خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت  $j$   $D(Q_{j,max}^{pda,natural})$   
 در منطقه پتانسیل خطر در شرایط طبیعی  
 خسارت ناشی از سیل با دوره برگشت  $j$   $D(Q_{j,max}^{pda})$   
 در منطقه پتانسیل خطر در شرایط وجود طرح  
 خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط بدون طرح  $EAD_{without}$   
 خسارت مورد انتظار سالانه در شرایط با طرح  $EAD_{with}$   
 احتمال عدم وقوع سیل با دوره برگشت  $j$   $F(Q_{j,max}^{pda,natural})$   
 در شرایط طبیعی  $(F = \frac{1}{p} - 1 = \frac{1}{T})$

A., Dashti M., and Tajrishy M., Abrishamchi (2011). Development of a multi-reservoir flood control optimization model; Application to the Karkheh river basin, Iran, World Environmental and Water Resources Congress, Palm Springs, California, United States.

Afshar. A, Sharifi. M, and Jalali. M. R., (2009). "Non-dominated archiving multicolony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multipurpose reservoir operation." *Engineering Optimization.*, 41(4). pp. 313-325.

Hillier, F. S., and J. J. Lieberman, (2009). *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill.

R. Linsley K., J. B. Franzini, D. L. Freyberg and Tchobanoglous, (1992). *Water Resources Engineering*, 4th. Ed., McGraw-Hill.

Lund, J. R., (2002). Floodplain with risk-based optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 3, pp. 202-207.

Malekmohammadi, B. and Zahraie, B. (2008). "Multi-objective VLGA model for flood control and water supply management in a cascade system of reservoirs", WEWRC 2008, Honolulu, Hawaii, United States.

Mays, L. W., and Tung, Y. Y., (1992). *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill, NY.

Mays, L.W., (2005). *Water Resources Engineering*, John Wiley & Sons, New York.

Department of Transportation, The design of encroachments of floodplain using risk analysis, (1980). *Hydraulic Engineering Circular No. 17*, U.S. Federal Highway Administration, Washington D.C.

US Army Corps of Engineers (USACE), (2006). Depth-damage relationships for structures, contents, and vehicles and content-to-structure value ratios (CSVR) in support of the Donaldsonville to the Gulf, Louisiana, Feasibility study, New Orleans, Louisiana.

Yinghai Li, Jianzhong Zhou, Yongchuan Zhang, Hui Qin, and Li Liu, (2010). "Novel multiobjective shuffled frog leaping algorithm with application to reservoir flood control operation." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 136(2), pp. 217-226.

ناشی از سیلاب‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.

سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (1380). راهنمای مهار سیلاب رودخانه (روش‌های سازه‌ای)، نشریه 242، معاونت امور فنی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تهران.

سرابندی، امیر، (1387). بهینه‌سازی ابعاد سیستم‌های ترکیبی (سد - گوره) مهار سیلاب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب-رودخانه، دانشگاه شهید عباسپور.

شرکت مهندسين مشاور آبن، (1383). مطالعات سد تنگ سرخ و گزارشات منابع آب، گزارش طراحی، تهران.

شرکت مهندسين مشاور مشانير، (1378). طرح بهره برداری از سیستم رودخانه های دز و کارون، گزارش بهینه‌سازی حجم کنترل سیلاب (گزارش میانکار) - جلد 7، تهران.

علیمحمدی، س، (1384). طراحی و بهره برداری بهینه تلفیقی سیستم آبهای سطحی و زیرزمینی-رویکرد ذخیره سیکلی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

علیمحمدی، سرابندی و مجدزاده، (1389). بهینه‌سازی ابعاد سیستم‌های ترکیبی (سد - گوره) مهار سیلاب، مجله تحقیقات منابع آب ایران، شماره 21، پاییز 1390.

مرادی، ملیکا، (1389). طرح بهینه مخازن کنترل سیلاب، پایان‌نامه کارشناسی مهندسی آب (بهره برداری از سد و شبکه)، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).