ارزیابی و مقایسه تعدادی از روش‌های تحلیل کمی ریسک در برآورد سیلاب طراحی سرریز سدها (مطالعه موردی : سد پیشین)

همایون فقیه[۱*]، مجیدخلقی[۲] و صلاح کوچک‌زاده[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۲/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۸/۱۴)

چکیده

سرریزشدن سیلاب از تاج سد یکی از عوامل اصلی شکست انواع سدها به‌شمار می‌آید. به‌منظور اجتناب از سرریز آب از روی بدنه سد، سد با یک یا چند سرریز مجهز می‌شود تا آب نگه‌داشته شده در مخزن را خارج نماید. تعداد و اندازه این سرریزها براساس مقدار سیلاب طراحی تعیین می‌شوند. تعیین سیلاب طراحی سرریز سد را می‌توان به‌عنوان یک مسأله ریسک چندمنظوره فرموله کرد و چنین مسأله‌ای را می‌توان با استفاده از روش‌های تحلیل کمی ریسک حل نمود. در اینجا چهار روش طراحی اقتصادی مبتنی بر تحلیل ریسک شامل انجمن تحقیقات ملی آمریکا، مهندسین عمران آمریکا، منحنی‌واحد و تقسیم‌بندی ریسک چندمنظوره مورد بررسی قرارگرفت، و به‌منظور مقایسه این روش‌ها تحلیل ریسک برای تعیین مجدد سیلاب طراحی سرریز سد پیشین احداث شده روی رودخانه سرباز انجام شد. برای حل روابط تعیین خسارت مورد انتظار در دو روش مهندسین عمران و تقسیم‌بندی ریسک که به‌صورت تحلیلی قابل حل نیستند، از روش انتگرال‌گیری عددی رامبرگ، و برای انجام محاسبات مربوط به انتگرال‌گیری عددی و ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد. هم‌چنین تجزیه و تحلیل سیلاب‌ها جهت انتخاب توزیع مناسب با استفاده از نرم‌افزار Smada انجام گردید. نتایج نشان داد که سیلاب طراحی برآورد شده توسط سه روش مهندسین عمران، انجمن تحقیقات ملی آمریکا و منحنی واحد تقریباً مساوی، و مقدار آن کمتر از سیلاب ده‌هزارساله می‌باشد. در صورتی‌که سیلاب طراحی توسط روش تقسیم‌بندی ریسک چندمنظوره بزرگ‌تر از سیلاب ده‌هزار ساله برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل کمی ریسک، سرریز سد، سیلاب طراحی، سد پیشین

مقدمه

سیلاب طراحی برای یک سد، سیلابی است که بزرگی و احتمال وقوع آن متناسباً به‌نحوی در نظر گرفته شود که ایمنی سد را طبق استاندارد مناسب ایمنی طراحی و پیامدهای شکست و خرابی سد تضمین نماید. بنابراین انتخاب سیلاب طراحی یکی از عمده‌ترین تصمیماتی است که باید در توسعه پروژه سد سازی اتخاذ گردد. این مسأله نه تنها به خود طراحی به‌عنوان یک عامل مؤثر به‌همراه سایر عوامل هیدرولوژیکی وابسته است بلکه به خطر بالقوه‌ای که درصورت تخریب شدن سد موجب خسارت‌های جانی و اقتصادی خواهد شد، مربوط می‌شود (۱).

۱. کارشناس‌ارشد مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. به‌ترتیب دانشیار و استاد مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس‌کشاورزی و منابع‌طبیعی، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hfaghih54@gmail.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

مسأله ارزیابی سیلاب طراحی، سال‌هاست که مورد بحث و مجادله شدید قرارگرفته است. این مسأله موضوعی دشوار، مهم و نگران کننده است. بسیاری از سدها به‌دلیل عدم کفایت سرریزهایشان دچار زوال و تخریب شده‌اند، به‌طوری‌که سرریز سیلاب از تاج سد یکی از عوامل اصلی شکست انواع سدها به‌شمار می‌آید. طبق مطالعات کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ علت تخریب ۳۴ درصد از سدهای مرتفع‌تر از ۱۵ متر بین سال‌های ۱۹۰۰ الی ۱۹۷۵ میلادی لبریز شدن سیلاب از تاج سد بوده، که اکثراً به‌دلیل عدم‌کفایت سرریز رخ داده است (۵ و ۱۴).

تنوع و پیچیدگی عوامل مؤثر در تشکیل و اندازه سیلاب موجب پیدایش روش‌های متنوع و متفاوتی برای ارزیابی سیلاب طراحی شده است (۱). بدین جهت تعیین سیلاب طراحی فاقد یک روش یکسان، جهانی و یا استاندارد واحد بین‌المللی است. این سیلاب معمولاً به‌صورت حداکثر سیلاب محتمل (Probable Maximum Flood (PMF) و یا براساس تحلیل فراوانی سیلاب‌های مشاهده شده تعریف می‌گردد. اگرچه امروزه کاربرد PMF بیشترشده است، با این وجود در بسیاری از کشورها سیلاب طراحی سرریز هم‌چنان براساس تحلیل فراوانی حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب‌ها محاسبه می‌شود. در انتخاب دوره برگشت یا بزرگی سیلاب طراحی نیز مانند روش محاسبه آن اتفاق‌نظر وجود ندارد و کشورهای مختلف برمبنای نوع و ابعاد سد و یا براساس خطرات بالقوه ناشی از شکست سد مقدار سیلاب طراحی سرریز را انتخاب می‌کنند (۳).

انتخاب حداکثر سیلاب محتمل به‌عنوان سیلاب طراحی سرریز بدان جهت است که احتمال وقوع چنین سیلابی نزدیک به صفر است و هم‌چنین احتمال وقوع سیلاب ده هزارساله بسیار اندک است. اگر در پایین دست این‌گونه سدها منافع اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی وجود نداشته باشد و جان انسان‌ها نیز در معرض خطر نباشد، قبول هزینه‌های سنگین مربوط به این ضرایب اطمینان فوق‌العاده زیاد ضرورت ندارد و در چنین مواردی تحلیل اقتصادی می‌تواند راهنمای مفیدی برای طراحان درخصوص انتخاب مناسب سیلاب طراحی باشد. علاوه بر این بسیاری از سدهای در دست بهره‌برداری قبل از پیشرفت‌های اخیر در علم هیدرولوژی آماری ساخته شده‌اند و یا درحال‌حاضر اطلاعات و داده‌ها در زمینه علوم هواشناسی و هیدرولوژی موردنیاز در برآورد مقدار سیلاب طراحی افزایش یافته‌اند، لذا ارزیابی مجدد سیلاب طراحی این سدها لازم می‌باشد. ارزیابی مجدد هر سد در دست بهره‌برداری ممکن است ضرورت ایجاد تغییر و اصلاحات ساختمانی را به‌منظور تأمین ایمنی سد ایجاب کند، اما به‌دلیل محدودیت امکانات مالی لازم است که این افزایش ایمنی و کاهش احتمال خسارت در مقابل هزینه تغییرات ساختمانی موازنه گردد، که در این صورت روش‌های مبتنی برتحلیل اقتصادی در ارزیابی مجدد این‌گونه سدها مثمر ثمر می‌باشند (۱۳).

مطالعات ایمنی سدها در ایالت متحده نشان داده است که برخی از سدهای موجود قادر به تأمین معیار طراحی حداکثر سیل محتمل (معیار طراحی رایج برای سدهای با خطر زیاد) نمی‌باشند. از طرف دیگر محدودیت سرمایه‌ها و هزینه‌های زیاد اصلاح سدهای بزرگ به‌منظور تأمین معیار طراحی PMF موجب گردید تا کاربرد ریسک مبتنی‌بر تجزیه و تحلیل مورد توجه قرار گیرد (۱۷). برخلاف معیارPMF، روش‌های تحلیل کمی ریسک مستقیماً درجهت دستیابی به نتایج مؤثر و کارآمد اقتصادی و اجتماعی از طریق موازنه هزینه‌های افزایش ایمنی و منافع حاصل از آن یعنی کاهش خسارت جانی و مالی سعی نموده‌اند (۱۸).

مک‌گیک و اریکسون (۱۲) توصیف روشنی از طراحی اقتصادی را درمثال خود که استفاده توزیع‌های نرمال لگاریتمی برای سیلاب‌های پائیزه و بهاره است، نشان داده‌اند. مطالعات انجمن تحقیقات ملی‌آمریکا موازنه صریح ریسک‌ها و منافع را به‌صورت یک ایده تأیید کرد، اما روشی برای موازنه بین ریسک‌ها، هزینه‌ها و منافع ارائه نداد. بعد از آن تحقیقاتی توسط دانیل رسیندیز- کاریلو و لستر (۱۳) به‌منظور موازنه ریسک‌ها، هزینه‌ها و منافع صورت گرفت و آنها روشی را برای موازنه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

ریسک‌ها و منافع ارائه نمودند. هم‌چنین توسط جامعه مهندسین عمران آمریکا یک روش مشابه مک‌گیک و اریکسون ارائه شده است، این روش برای برآورد سیلاب طراحی سرریز سدها به‌کار می‌رود (۷). استفاده از امید ریاضی در حل مسائل تصمیم‌گیری، موجب از دست رفتن مقدار زیادی از اطلاعات در تغییر مسأله تصمیم‌گیری به مسأله جبری می‌شد، به‌منظور رفع این مشکل، تحقیقاتی توسط افراد مختلف انجام گرفت و روش‌هایی ارائه گردید، که از آن جمله می‌توان به روش تقسیم‌بندی ریسک چند منظوره ارائه شده توسط اسبک و هایمس (۸)، اشاره نمود. کاربرد این روش در حل مسائل ایمنی سد، در گزارشی که توسط هایمس و همکاران برای انجمن ارتش آمریکا تهیه شده به‌طور کامل مورد بررسی قرارگرفته است (۱۱). اخیراً رابطه بین ظرفیت و سود خالص کل برای سدهای بتنی وزنی و بتنی غلتکی (Roller Compacted Concrete (RCC)) با استفاده از تحلیل هزینه- سود بررسی، و تحلیل هزینه- سود برای ۱۴۴ سد مختلف انجام شده است که اطلاعات به دست آمده از این مطالعه در انتخاب اندازه بهینه این نوع سدها می‌تواند به‌کار رود (۱۹).

ابریشمچی و همکاران (۶) نیز با استفاده از تئوری فازی روشی برای تخمین تابع خسارت ناشی از سرریز آب از روی بدنه سد ارائه نمودند. آنها هم‌چنین با بررسی عدم قطعیت‌های مورد بحث در مراحل انجام روندیابی و تخمین مقدار سیل، یک مدل بهینه‌سازی برای طراحی سرریز ارائه کردند و با به‌کاربردن مدل برای سد ماکو ساخته شده در ایران به این نتیجه رسیدند که این مدل، ابزاری مفید برای طراحی اقتصادی سرریز می‌باشد.

در این مقاله چهار روش طراحی بهینه شامل انجمن تحقیقات ملی آمریکا، مهندسین عمران آمریکا، منحنی واحد و تقسیم‌بندی ریسک چندمنظوره به‌طور مختصر ارائه، و سیلاب طراحی سرریز سد پیشین که دردست بهره‌برداری می‌باشد مجدداً توسط این روش‌ها به‌منظور مقایسه نتایج آنها تعیین شده است.

مواد و روش‌ها

الف) روش انجمن تحقیقات ملی آمریکا (National Research Council (NRC))

به‌منظور تأیید ایده انجمن تحقیقات ملی آمریکا مبنی‌بر موازنه صریح ریسک‌ها و منافع، دانیل رسیندیز – کاررِیلو و لستر (۱۳) تحقیقاتی انجام دادند که می‌توان خلاصه آن را به‌صورت زیر بیان کرد:

۱. تعیین توزیع جریان‌های پیک برای داده‌های ثبت شده;
۲. تعیین رابطه بین ظرفیت سرریز و هزینه ساخت سرریز
۳. طبقه‌بندی و برآورد خسارت سیلاب در پایین‌دست درصورت شکست سد;

هدف در این روش به‌حداقل رساندن کل هزینه‌های سالانه (A_c) می‌باشد که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min A_C = (C_d + m \times q_c) \times r + (C_d + m \times q_c) \times P = (C_d + m \times q_c) \times (r + P) = C_c \times (r + P) \quad [۱]$$

در رابطه ۱، A_c کل هزینه‌های سالانه مربوط به پروژه سد، C_d هزینه‌های سد (منهای هزینه سرریز)، m افزایش هزینه در هرمترمکعب برای ساختن سرریز با ظرفیتی معادل q_c مترمکعب در ثانیه، r فاکتور بازیابی سرمایه (Capital Recovery Factor)، P احتمال سالانه تجاوز سیل از ظرفیت طراحی سرریز (P =۱ - F(q))، F(q) تابع توزیع تجمعی مناسب‌ترین توزیع برازش داده شده به داده‌های مشاهداتی و C_c هزینه‌های ساختمانی مربوط به کل پروژه سد (برابر مجموع C_S و C_d) می‌باشد. C_S نیز هزینه احداث سرریز، که به‌عنوان تابعی از ظرفیت سرریز به‌صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$f_1(S) = C_S = m \times q_c \quad [۲]$$

ب) روش مهندسین عمران آمریکا (US Civil Engineering)

این روش به‌منظور برآورد سیلاب طراحی سرریز سدها ارائه شده است. در این روش، یک سری از طراحی پروژه‌ها به‌وسیله سیلاب‌های طراحی سرریز مشخص می‌شوند، مثلاً پروژه طرح ۵۰۰ ساله، پروژه طرح ۱۰۰۰ ساله و الی آخر. خسارت مورد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

انتظار ناشی از سیلاب‌های مختلف برای هریک از طرح‌های پروژه که شامل صدمات جانی، خسارات مالی از جمله تخریب سد، تأسیسات و ... می‌باشد، برآورد می‌شود و با هزینه احداث سرریز، برای عبور سیلاب طراحی متناظر جمع می‌شود. کمترین مقدار حاصل جمع هزینه‌های فوق‌الذکر، اقتصادی‌ترین سیلاب طراحی سرریز را تعیین می‌کند (۹ و ۱۶).

ج) روش منحنی واحد (Unit Curve Method)

به‌منظور تسهیل امور و عمومیت بخشیدن به روش تفصیلی ارائه شده توسط انجمن مهندسین عمران آمریکا روش ساده‌ای مبتنی بر منحنی‌های واحد پیشنهاد شده است که در ارزیابی مقدماتی طرح‌ها قابل استفاده می‌باشد (۹). در این روش، انتخاب اقتصادی‌ترین سیلاب طراحی سرریز سد برمبنای نسبت هزینه خسارت ناشی از شکست ناگهانی سد (D) به هزینه احداث سرریز برای عبور حداکثر سیل محتمل (C) صورت می‌گیرد. مقادیر D و C برای هر پروژه خاص سدسازی تعریف می‌شوند. هزینه احداث سرریزی که بتواند سیلاب طراحی را از خود عبور دهد با استفاده از نقشه‌های مقدماتی قابل برآورد است و از مطالعات ارزش‌های اجتماعی- اقتصادی مراکز شهری (اعم از مسکونی، اداری، تجاری و تأسیسات زیر بنایی) و فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، خدماتی، ارزش سد و آب ذخیره شده در دریاچه سد، میزان خسارت وارده به پایین‌دست سد برآورد می‌گردد. با محاسبه نسبت D به C می‌توان دوره برگشت اقتصادی‌ترین سیلاب طراحی سرریز را از جدول ۱ یا شکل ۱ انتخاب نمود.

د) روش تقسیم بندی ریسک چند منظوره ((PMRM) Partitioned Multiobjective Risk Method)

گروه بزرگی از مسائل تصمیم‌گیری را می‌توان به‌عنوان مسأله ریسک چند منظوره در نظرگرفت. راه‌حل عمومی برای حل چنین مسائلی، استفاده از امید ریاضی می‌باشد. اما کاربرد امید ریاضی موجب ازدست رفتن مقدار زیادی از اطلاعات در تبدیل مسأله از یک مسأله تصمیم‌گیری احتمالاتی به یک مسأله جبری می‌شود. به‌منظور رفع این مشکل توسط افراد متعدد تحقیقاتی انجام، و روش‌هایی ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، روش تقسیم‌بندی ریسک چندمنظوره می‌باشد که توسط اسبک و هایمس(۸) مطرح‌گردید. در این روش به‌جای بررسی فقط یک تابع مقدار خسارت محتمل (تابع ریسک)، تعدادی تابع ریسک شرطی با این فرض که خسارت درون دامنه‌های احتمالاتی (یا دامنه‌های خسارت) ویژه‌ای واقع شده‌اند، ایجاد می‌شود که این توابع نشان دهنده میزان خسارت می‌باشند. ترکیب هریک از توابع ریسک مورد انتظار شرطی ایجاد شده با توابع هدف دیگر یک مسأله بهینه‌سازی چندمنظوره جدید به وجود می‌آورد. این مسأله بهینه‌سازی جدید شامل اطلاعات بیشتری درباره رفتار احتمالاتی مسائل می‌باشد (۱۰). در روش PMRM محور احتمال به یک مجموعه با n بازه تقسیم می‌شود. انتخاب n، تابع خصوصیات مسأله تصمیم‌گیری می‌باشد. تقسیم محور احتمال به چند بازه در روش PMRM در شکل ۲ نشان داده شده است. α_i نشان دهنده نقاط تقسیم روی محور احتمال می‌باشد. برای هرنقطه تقسیم α_i و هر خط‌مشی S_j یک خسارت منحصربه‌فرد β_{ij} وجود دارد، این مطلب در شکل ۳ نشان داده شده است: بنابراین

$$P_X(\beta_{ij};S_j)=\alpha_i \quad \Rightarrow \quad \beta_{ij}=P_X^{-1}(\alpha_i;S_j) \qquad [۳]$$

β_{ij} درتعریف امید ریاضی شرطی به‌کار رفته است و امید ریاضی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$i= ۲، ۳، ۴ \text{ و } ... \qquad j = ۱، ۲، ... \text{ و } q \qquad [۴]$$

$$f_i\left(S_j\right)=\frac{\int_{\beta_{i,j}}^{\beta_{i+1,j}} x\times p_X(X)\times dx}{\int_{\beta_{i,j}}^{\beta_{i+1,j}} p_X(X)\times dx}$$

که دراین رابطه $p_x(X)$ تابع چگالی احتمال (pdf) مربوط به خسارت تصادفی می‌باشد.

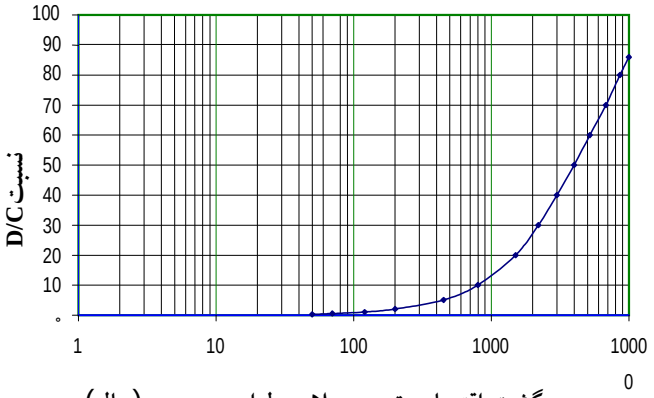
از نظر تئوری هرتعداد از چنین توابع ریسک شرطی را می‌توان ایجاد نمود، اما به‌کار بردن تعداد زیادی از این توابع مسأله را به‌شکل غیرضروری پیچیده می‌کند. اسبک و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

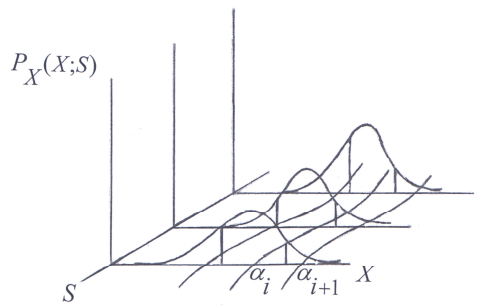
[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

جدول ۱. سیلاب طراحی سرریز با کمترین هزینه کل (اقتباس از منحنی واحد (۷))

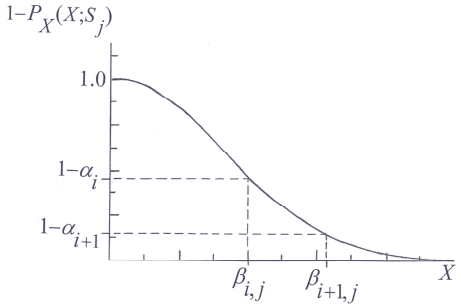
ردیف	دوره برگشت سیل (سال)	نسبت D/C
۱	۰/۲۵	۵۰
۲	۰/۵	۷۰
۳	۱	۱۲۰
۴	۲	۲۰۰
۵	۵	۴۵۰
۶	۱۰	۸۰۰
۷	۲۰	۱۵۰۰
۸	۳۰	۲۲۰۰
۹	۴۰	۳۰۰۰
۱۰	۵۰	۴۰۰۰
۱۱	۶۰	۵۲۰۰
۱۲	۷۰	۶۸۰۰
۱۳	۸۰	۸۶۰۰
۱۴	۸۶	۱۰۰۰۰



شکل ۱. منحنی واحد برای انتخاب اقتصادی‌ترین سیلاب طراحی سرریز (۷)



شکل ۲. توابع ریسک مورد انتظار شرطی



شکل ۳. تقسیم محور احتمال برحسب محور خسارت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

هایمس(۸) در نظر گرفتنِ سه تابع از این توابع را پیشنهاد کردند که این توابع عبارت‌اند از:

۱- وقایع با فراوانی وقوع زیاد $f_2(\ )$;

۲- وقایع با فراوانی وقوع متوسط $f_3(\ )$;

۳- مقادیر حدی و وقایع فاجعه آمیز $f_4(\ )$;

علامت $f_1(\ )$ برای بیان هزینه ساخت سرریز در نظر گرفته شده است. در طراحی سرریز تابع $f_4(\ )$ را در نظر می‌گیریم. به‌طور کلی حل رابطه ۴ به‌صورت تحلیلی مشکل است، و اغلب یک روش انتگرال‌گیری عددی برای حل لازم می‌باشد. راه حل‌هایی نیز برای تخمین انتگرال امید ریاضی احتمال وقوعِ کم یعنی $f_4(\ )$ وجود دارند. کارلسون و هایمس (۱۰) سری زیر را برای تخمین مقدار $f_4(\ )$، ارائه دادند.

$$f_4()=u_{n'}+\sum_{j=1}^{\infty}\frac{d^j u_{n'}}{d(\ln n')^j} \qquad [۵]$$

در رابطه۵، $u_{n'}$ بزرگ‌ترین مقدار خصوصیت می‌باشد و به‌عنوان مقداری از متغییر اولیه X با احتمال تجاوز $\frac{1}{n'}$ تعریف شده است:

$$1-P_X(u_{n'})=\frac{1}{n'} \qquad [۶]$$

ه) مطالعه موردی (سد پیشین)

محل سد: پیشین چابهار ارتفاع از کف: ۶۲ متر حجم مصالح مصرفی: ۲میلیون مترمکعب

نزدیکترین شهر: کنارک عرض در پی: ۲۵۵ متر ظرفیت سرریز تخلیه: ۱۱۳۰۰ مترمکعب برثانیه (ده هزارساله)

نوع سد: خاکی– سنگریز نام رودخانه: سرباز گنجایش مخزن: ۱۷۵ میلیون مترمکعب

نوع سرریز: آزاد عرض در تاج: ۱۰ متر گنجایش مفید مخزن: ۱۶۷ میلیون مترمکعب

طول تاج: ۴۰۰ متر ارتفاع از پی: ۶۳ متر حجم آب قابل تنظیم سالانه: ۹۱ میلیون مترمکعب

نتایج و بحث

سرریز سد پیشین که در دست بهره برداری می‌باشد براساس دوره برگشت ده هزارساله، برای عبور دبی ۱۱۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه طراحی شده است (۳). در اینجا به‌وسیله روش‌هایی که در بالا تشریح گردید، سیلاب طراحی آن به منظور مقایسه نتایج روش‌ها مجدداً تعیین شده است.

الف) مخاطرات پایین‌دست سد

میزان خسارت ناشی از سیل بسیار وابسته به خصوصیات ویژه هر محل (از قبیل توپوگرافی، آمار جمعیت، خط مشی بهره‌برداری، ظرفیت مخزن و ...) می‌باشد. در برآورد مخاطرات پایین دست باید افزایش تراز آب ناشی از سیلاب مصنوعی (غیرطبیعی) رهاشده به واسطه شکست فرضی سد محاسبه شود و با همان سیلاب در صورتی که بدون وجود سد رخ دهد، مقایسه گردد. خسارت احتمالی وارده به پایین‌دست سد را می‌توان به سه بخش طبقه‌بندی کرد:

۱- تلفات جانی;

۲- زیان‌های مستقیم اقتصادی ناشی از خسارت بر اموال;

۳- زیان‌های غیرمستقیم اقتصادی ناشی از فقدان سد;

ایجاد تابع خسارت سیل که به‌صورت واقع بینانه‌ای ارتباط خسارت با طراحی سد و با سیلاب تصادفی را بیان کند آسان نیست. بنابراین دراینجا تابع پیشنهادی استینگر و گریکر که تعمیم تابع ارائه شده توسط انجمن تحقیقات ملی آمریکا در خصوص ایمن‌سازی سدها در سال ۱۹۸۵ می‌باشد به‌عنوان راه حل درنظرگرفته شده است. رابطه استینگر و گریکر (۱۵) به‌صورت زیر می‌باشد:

$$g(q)=(M+L)\times\frac{1}{1+\frac{L}{M}(\frac{q_C}{q})^3} \qquad q\geq 0 \qquad [۷]$$

در رابطه ۷، $g(q)$ میزان خسارت، M خسارت ناشی از شکست سد، L هزینه نگهداری سد، q_c سیل طراحی بحرانی (جریان لازم برای شکست سد) و q مقدار سیلاب می‌باشد. برآورد خسارت ناشی از شکست‌سد پیشین در جدول ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

جدول ۲. برآورد خسارت ناشی از شکست سد در پروژه پیشین با فرض تخریب کامل (۲)

ردیف	شرح	ارزش (میلیارد ریال)
۱	سد (بدنه و تأسیسات)	۴۰
۲	سرریز بتنی	۲۰
۳	بند آبگیر و کانال انتقال	۳۲/۵
۴	شبکه آبیاری و زهکشی	۱۸
۵	فرض بر تلفات جانی ۱۰۰۰ نفر	۷۰
۶	ارزش محصولات شبکه آبیاری (فرض ۵ سال عدم بهره برداری)	۲۰
۷	ارزش افزوده ۵ سال بهره برداری از شبکه آبیاری	۲۶/۷
۸	ارزش محصولات اراضی حاشیه رودخانه (فرض ۲ سال عدم بهره‌بردای از صیفی‌جات و یونجه، و ۵ سال عدم بهره‌برداری از مرکبات)	۲
۹	ارزش آب ذخیره شده در دریاچه سد	۹/۳
۱۰	سایر	۱۱/۵
۱۱	جمع کل	۲۵۰

جدول ۳. شرایط انتخاب توزیع‌های اولیه مناسب (۴)

توزیع مناسب	شرط
به‌احتمال ۹۵ درصد توزیع متقارن است و چنانچه رابطه $\Delta=\frac{\bar{x}-x_0}{S}\geq 3/9$ نیز برقرار باشد (حد پایین x_0 را می‌توان نادیده گرفت) توزیع نرمال قابل استفاده است.	اگر $-H \leq m_3 \leq H$
در این حالت توزیع مناسب دارای چولگی مثبت است و می‌توان از توزیع‌های لوگ نرمال ۲ و یا ۳ متغییره، پیرسون نوع سوم، لوگ پیرسون و گمبل استفاده کرد.	اگر $m_3 > H$
در این حالت توزیع مناسب دارای چولگی منفی است و می‌توان از توزیع پیرسون استفاده کرد.	اگر $m_3 < -H$

ب) برآورد توزیع سیلاب‌های پیک برای داده‌های ثبت شده

تعیین فراوانی خسارت سیل بخش اصلی هر روش جامع تحلیل ریسک را تشکیل می‌دهد. در بررسی‌ها و تحقیقات انجام شده به‌منظور تشخیص مناسب‌ترین روش تعیین فراوانی‌خسارت سیل، روش مبتنی‌بر قوانین احتمال بهترین تطابق را با مشاهدات واقعی خسارت نسبت به سایر روش‌ها داشته، و درنتیجه به‌عنوان روش مناسب معرفی شده است (۲۰). در این مقاله به‌منظور تعیین توزیع مناسب، ابتدا بر اساس داده‌های موجود، گشتاور مرکزی سوم ساده از رابطه ۸ و عامل H از رابطه ۹ به‌دست آمد، سپس براساس شرایط جدول ۳ توزیع‌های اولیه مناسب انتخاب شدند.

$$m_3 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3 \qquad [۸]$$

$$H = 1/96 \times S^3 \times \sqrt{\frac{6}{n}} \qquad [۹]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

در این روابط X_i مقدار هریک از داده‌ها، $\bar{x}$ میانگین حسابی، S انحراف معیار و n تعداد داده‌هاست.

در مرحله بعد جهت انتخاب نهایی توزیع مناسب، مجموع مربعات باقیمانده (Residual Sum of Squares (RSS)) برای هر یک از توزیع‌ها محاسبه گردید. عیب روش RSS آن است که به چگونگی برازش در منطقه داده‌های موجود توجه دارد و برمنتهی‌الیه سمت راست تأکید ندارد. به‌منظور بررسی قسمت انتهایی این توزیع‌ها می‌توان دوره برگشت حداکثر سیلاب محتمل در منطقه را برای هر یک از آنها محاسبه نمود. اگر PMF سیلی با دوره برگشت ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ سال درنظر گرفته شود (۱۳)، توزیعی را که دارای کمترین مقدار RSS، و دوره برگشت آن در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ سال باشد می‌توان به‌عنوان ارجح‌ترین توزیع براساس معیار نکویی برازش و معیار PMF انتخاب نمود.

در هر صورت معمول‌ترین توزیع مورد استفاده برای مدل‌سازی مقدار نهایی، توزیع گمبل است (۱). در این تحقیق پس از آزمون توزیع‌های مناسب اولیه و انجام مراحل مذکور، توزیع گمبل به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع انتخاب گردید.

ج) برقراری موازنه بین ریسک‌ها و منافع

در این مسأله بهینه‌سازی هدف به‌حداقل رساندن هم‌زمان هزینه ساخت سرریز سد $f_1(S)$ و خسارت مورد انتظار $E[g(q;S)]$ می‌باشد. بنابراین لازم است برای هر گزینه طراحی S، هزینه ساخت سرریز $f_1(S)$ و خسارت مورد انتظار $E[g(q;S)]$ که هر دو تابعی از سیلاب تصادفی q هستند محاسبه، سپس کمترین مقدار مجموع آنها به‌عنوان گزینه طراحی بهینه انتخاب گردد: یعنی:

$$\min\{ f_1(S) + \rightarrow \quad E[g(q;S)]\} \qquad [۱۰]$$

(q) اقتصادی‌ترین سیلاب طراحی

در اینجا از رابطه ۲ جهت برآورد هزینه ساخت سرریز مربوط به هرگزینه طراحی استفاده شده است. هزینه ساخت سرریز سد پیشین که برای عبور سیل ۱۱۳۰۰ مترمکعب برثانیه طراحی شده، ۲۰میلیارد ریال می‌باشد. در نتیجه در رابطه ۲ مقدار m برابر با ۱/۷۶۹۹ (میلیون ریال بر مترمکعب در ثانیه) خواهد شد.

در روش مهندسین‌عمران هزینه سالانه خسارت مورد انتظار (Expected Damage) از حاصل‌ضرب تابع احتمال سیل به اندازه q که هرسال انتظار می‌رود رخ‌دهد یعنی p(q) ، در هزینه خسارت ناشی از سیل g(q;S) به‌دست آمده است (۱۰). بنابراین هزینه سالانه مورد انتظار غیر شرطی (امید ریاضی) از طریق رابطه ۱۱ به‌دست خواهد آمد. خلاصه محاسبات این روش در جدول ۴ ارائه، و درشکل ۴ به‌صورت نمودار ترسیم شده است. حداقل مجموع هزینه ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار مربوط به سیلاب ۸۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دوره برگشت ۱۰۲۶ سال می‌باشد.

$$E[g(q;S)] = f_5(s) = \int_{q_C}^{\infty} g(q_C,s)\times p(q)\times dq \qquad [۱۱]$$

در روش تقسیم‌بندی ریسک چند منظوره خسارت مورد انتظار از قرار دادن رابطه ۷ در انتگرال رابطه ۱۲ و انتگرال‌گیری عددی از این رابطه به دست آمد. نتایج محاسبات روش تقسیم‌بندی ریسک در جدول ۵ و به‌صورت نمودار در شکل ۵ ارائه شده است. در این روش کمترین مجموع هزینه ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار برای سیلاب ۱۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دوره برگشت ۱۶۵۰۰ سال به دست آمد.

$$E[g(q;S)] = f_4(\alpha';S) = \frac{\int_{p_Q^{-1}(\alpha')}^{\infty} g(q;S)\times p(q)\times dq}{\int_{p_Q^{-1}}^{\infty} p(q)\times dq} \qquad [۱۲]$$

در روش انجمن تحقیقات ملی (NRC) r فاکتور برگشت سرمایه برابر ۱۲ درصد در نظرگرفته شد. سپس با استفاده از رابطه۱ هزینه سالانه برای گزینه‌های طراحی مختلف محاسبه گردید. خلاصه محاسبات این روش در جدول ۶ ارائه شده است. کمترین هزینه سالانه (A_c) مربوط به سیلاب ۸۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دوره برگشت ۹۶۰ سال است که این سیلاب به‌عنوان سیلاب طراحی در این روش انتخاب گردید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

جدول ۴. هزینه‌های ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار متناظر با گزینه‌های طراحی مختلف سرریز سد پیشین (روش مهندسین عمران)

گزینه طراحی S	سیلاب طراحی q_c	هزینه ساخت سرریز $f_1(S)$	هزینه خسارت مورد انتظار $f_5(S)$	مجموع هزینه سرریز و خسارت $f_1(S)+ f_5(S)$
۱	۳۵۰۰	۶/۱۹	۲۶/۴۲	۳۲/۶۱
۲	۴۵۰۰	۷/۹۶	۱۸/۲۶	۲۶/۲۲
۳	۵۶۰۰	۹/۹۱	۱۲/۷۶	۲۲/۶۷
۴	۶۷۰۰	۱۱/۸۶	۹/۲۶	۲۱/۱۲
۵	۸۱۰۰	۱۴/۳۴	۶/۴۱	۲۰/۷۵
۶	۹۰۰۰	۱۵/۹۳	۵/۱۷	۲۱/۱۰
۷	۱۰۰۰۰	۱۷/۷۰	۴/۱۲	۲۱/۸۲
۸	۱۱۳۰۰	۲۰/۰۰	۳/۱۲	۲۳/۱۲

جدول۵. هزینه‌های ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار متناظر با گزینه‌های طراحی مختلف سرریز سد پیشین (روش PMRM)

گزینه طراحی S	سیلاب طراحی q_c	هزینه سرریز $f_1(S)$	خسارت مورد انتظار $f_4(S)$	هزینه ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار $f_1(S)+f_4(S)$
۱	۳۰۰۰	۵/۳۱۰	۹۸/۷۵۸	۱۰۴/۰۶۸
۲	۴۵۰۰	۷/۹۶۵	۴۳/۰۴۳	۵۱/۰۰۸
۳	۶۰۰۰	۱۰/۶۱۹	۳۰/۴۹۵	۴۱/۱۱۴
۴	۷۵۰۰	۱۳/۲۷۴	۲۰/۷۸۴	۳۴/۰۵۸
۵	۹۰۰۰	۱۵/۹۲۹	۱۲/۱۷۲	۲۸/۱۰۱
۶	۱۰۵۰۰	۱۸/۵۸۴	۵/۶۸۸	۲۴/۲۷۲
۷	۱۲۰۰۰	۲۱/۲۳۹	۱/۶۰۱	۲۲/۸۴۰
۸	۱۳۵۰۰	۲۳/۸۹۴	۰/۲۰۹	۲۴/۱۰۳
۹	۱۵۰۰۰	۲۶/۵۴۹	۰/۰۰۶	۲۶/۵۵۵
۱۰	۱۶۵۰۰	۲۹/۲۰۴	۰	۲۹/۲۰۴

در روش منحنی واحد نسبت هزینه خسارت ناشی از شکست ناگهانی سد (D) به هزینه احداث سرریز برای عبور حداکثر سیل محتمل (C) برابر (۱۲/۵= ۲۰ ÷ ۲۵۰)، که برای این عدد از طریق شکل ۱ و یا جدول ۱ دوره برگشت اقتصادی‌ترین سیل ۹۷۵ سال به دست آمد. سپس برای تعیین مقدار سیلاب طراحی این دوره برگشت از توزیع گمبل استفاده، و سیلاب طراحی ۸۰۳۰ مترمکعب بر ثانیه تعیین شد.

د) محاسبات

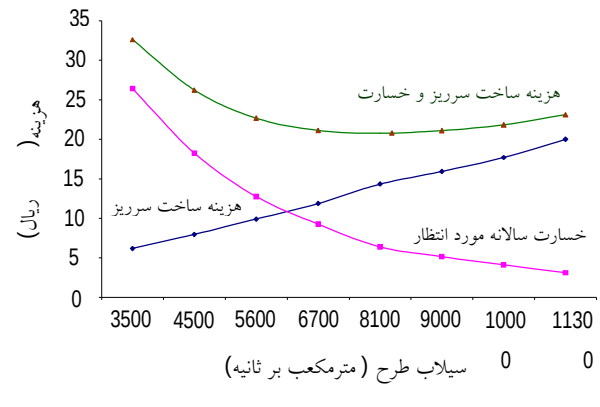
انتگرال‌های معادلات ۱۱ و ۱۲ که در تعیین خسارت مورد انتظار در روش‌های مهندسین عمران و تقسیم‌بندی ریسک به‌کار رفته‌اند به‌صورت تحلیلی قابل حل نیستند، بنابراین برای حل آنها از روش انتگرال‌گیری عددی رامبرگ (Romberg)، و به منظور انجام محاسبات مربوط به انتگرال‌گیری عددی از نرم‌افزار Excel استفاده گردید. تجزیه و تحلیل سیلاب‌ها به‌منظور انتخاب توزیع مناسب با استفاده از نرم‌افزارهای Smada و Hyfa صورت‌گرفت.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

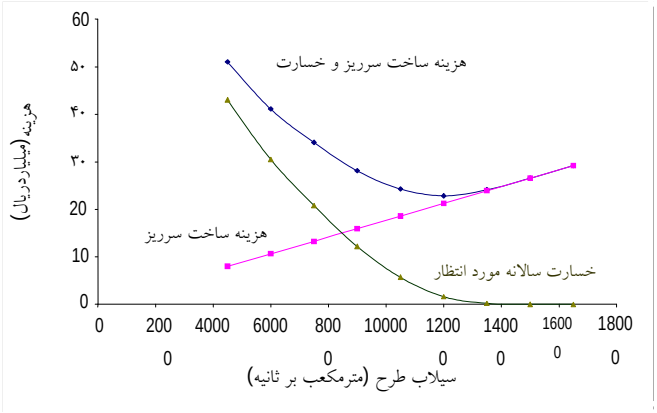
[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

جدول۶. هزینه‌های ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار متناظر با گزینه‌های طراحی مختلف سرریز سد پیشین (روش NRC)

S گزینه طراحی	q_c سیلاب طراحی	$(c_d+m\times q)\times P$	$(c_d+m\times q)\times r$	$(c_d+m\times q)\times (P+r)$
۱	۳۰۰۰	۸/۴۸۹	۲۸/۲۶۹	۳۶/۷۵۸
۲	۴۰۰۰	۴/۲۳۷	۲۸/۴۸۱	۳۲/۷۱۸
۳	۵۰۰۰	۲/۱۰۵	۲۸/۶۹۴	۳۰/۷۹۹
۴	۶۰۰۰	۱/۰۴۳	۲۸/۹۰۷	۲۹/۹۵۰
۵	۷۰۰۰	۰/۵۱۶	۲۹/۱۱۹	۲۹/۶۳۵
۶	۸۰۰۰	۰/۲۵۵	۲۹/۳۳۲	۲۹/۵۸۷
۷	۹۰۰۰	۰/۱۲۶	۲۹/۵۴۴	۲۹/۶۷۰
۸	۱۰۰۰۰	۰/۰۶۲	۲۹/۷۵۷	۲۹/۸۱۹
۹	۱۱۰۰۰	۰/۰۳۱	۲۹/۹۷۰	۳۰/۰۰۱
۱۰	۱۱۳۰۰	۰/۰۲۵	۳۰/۰۳۳	۳۰/۰۵۸
۱۱	۱۲۰۰۰	۰/۰۱۵	۳۰/۱۸۲	۳۰/۱۹۷
۱۲	۱۳۰۰۰	۰/۰۰۸	۳۰/۳۹۵	۳۰/۴۰۳



شکل ۴. برآورد هزینه‌های ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار متناظر با گزینه‌های مختلف طراحی سرریز سد پیشین (روش مهندسین عمران)



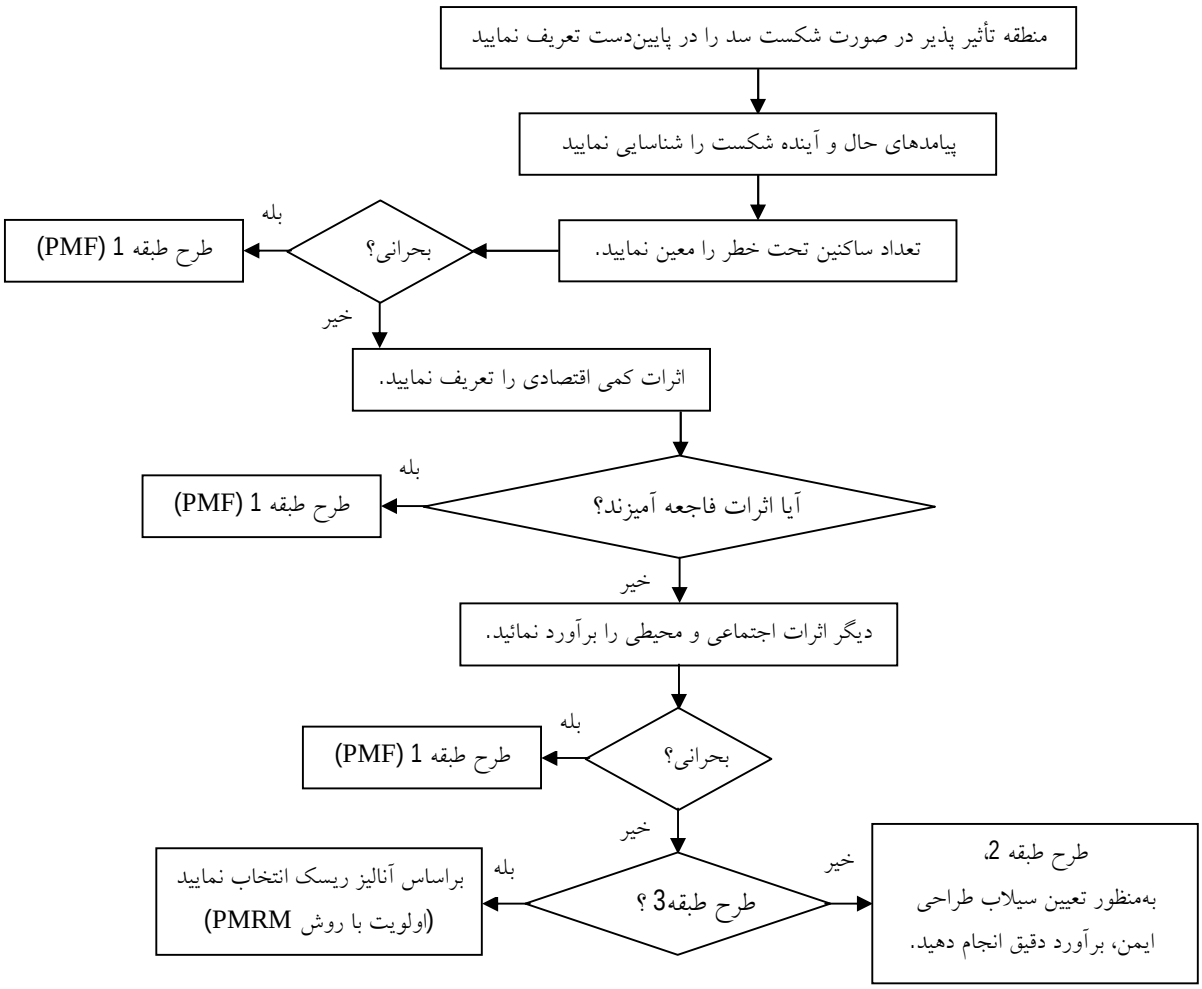
شکل ۵. برآورد هزینه‌های ساخت سرریز و خسارت مورد انتظار متناظر با گزینه‌های مختلف طراحی سرریز سد پیشین (روش PMRM)

نتیجه‌گیری

نتایج سه روش مهندسین عمران، منحنی واحد و انجمن تحقیقات ملی‌آمریکا در این پروژه تقریباً برابر است، و هر سه روش سیلاب طراحی را کوچک‌تر از سیل ده‌هزار ساله پیشنهاد می‌نمایند. در صورتی که روش تقسیم‌بندی ریسک (PMRM)، سیلی به‌مقدار ۱۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دوره برگشت ۱۶۵۰۰ سال را به‌عنوان سیلاب طراحی پیشنهاد می‌نماید که با توجه به احتمال خسارت جانی و مالی فراوان در این پروژه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]



شکل۶. انتخاب روش تعیین سیلاب طراحی سرریز سدها

می‌توان این دبی را منطقی‌تر از دبی طرح پیشنهادی سه روش قبل دانست. جان انسان‌ها با ارزش‌ترین سرمایه‌های این جهان می‌باشند و می‌بایست به‌عنوان عامل اصلی و تعیین کننده در انتخاب سیلاب طراحی درنظر گرفته شوند. در پروژه‌هایی که احتمال خسارت جانی و مالی زیاد است، و اثرات شکست سد فاجعه آمیزند PMF به‌عنوان سیلاب طرح در نظر گرفته می‌شود. روش PMRM نیز این مطلب را در مورد سد پیشین تأیید نموده است. اما اگر در پایین‌دست سدها منافع اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی وجود نداشته باشد و جان انسان‌ها نیز در معرض خطر نباشد، در چنین مواردی تحلیل اقتصادی می‌تواند راهنمای مفیدی برای طراحان در خصوص انتخاب مناسب و بهینه سیلاب طراحی باشد. مراحل مختلف انتخاب روش تعیین سیلاب طرح سرریز در شکل ۶ نشان داده شده است. ضمناً روش‌های طراحی اقتصادی امکان مقایسه طراحی‌های مختلف را از نظر اقتصادی ممکن می‌سازند. پیشنهاد می‌گردد درجه‌بندی‌هایی بر اساس خطرات بالقوه ناشی از شکست برای سدها انجام، تا درجه اهمیت هر سد مشخص‌گردد. سپس با لحاظ نمودن درجه اهمیت سد، روش مناسب جهت تخمین سیلاب طراحی سرریز انتخاب گردد، که این امر مستلزم مطالعه گسترده در خصوص ارزش سدها و روش‌های تعیین سیلاب طراحی می‌باشد. بدین وسیله می‌توان ضمن تأمین ایمنی از تحمیل هزینه‌های غیر ضروری جلوگیری نمود.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]

منابع مورد استفاده

۱. خواجه موگهی، ع. ک. ۱۳۷۹. انتخاب سیلاب طراحی. کمیته فنی سد و طغیان، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریه شماره۲۶.

۲. صحت نیاکی، ا. ۱۳۷۴. تحلیل ریسک اقتصادی در انتخاب سیلاب طراحی سرریز سدها. فصلنامه امور آب شماره۱، وزارت نیرو، تهران.

۳. فقیه، ه . ۱۳۸۰. آنالیز ریسک - هزینه در طراحی سرریز سدها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۴. مهدوی، م. ۱۳۷۸. *هیدرولوژی کاربردی*. جلددوم، انتشارات دانشگاه تهران.

۵. وفائیان، م. ۱۳۷۷. *سدهای خاکی*. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.

6. Abrishamchi, A., A. Afshar and R. Kerachian. 2003. Spillway Capacity Optimization under Hydrologic Uncertainties and Flood Routing. Ir. J. Sci. and Tec. Trans. B-Eng. 27(B1): 111-121.
7. Alexander, G.N. 1969. Application of probability to Spillway Design Flood Estimation. Proc. IASH Symposium on Floods and their computation, Leningrad, 1967, IASH-UNESCO-WMO Studies and Reports in Hydrology 3: 536-543.
8. Asbeck, E. L. and Y. Y. Haimes. 1984. The Partitioned Multiobjective Risk Method (PMRM). Large Scale Sys. 6(1): 13-38.
9. Buehler, N. 1974. Reevaluating Spillway adequacy of existing dams. Proc. Eng. Foundation Conf. on safety of small dams, ASCE.
10. Karlsson, P. O. and Y. Y. Haimes. 1988a. Risk-based analysis of extreme events. Water Resour. Res. 22(1):8-20.
11. Karlsson, P. O. and Y. Y. Haimes. 1989. Risk Assessment of Extreme Events. ASCE, J. Water Resour. Plan. & Man. 115(3):299-320.
12. McCaig, I. W. and O. M. Erickson. 1959. Spillway Capacity and Flood Flows. Proc. Symposium No. 1, Spillway Design Floods, NRC, Ottawa.
13. Resndiz-Carrillo, D. and L. B. Lave. 1987. Optimizing spillway capacity with an estimated distribution of floods. Water Resour. Res. 23(11):2043-2049.
14. Schnitter, N. J. 1979. Transactions of The 13th International Congress on Dams. Vol.V, pp. 488-493, New Delhi.
15. Stedinger, J. and J. Grygier. 1985. Risk-Cost analysis and spillway design criteria. Computer Applications in Water Resources. H. C. Torno(Ed.), PP. 1208-1217. Proceeding of the Specialty Conference Sponsord by the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Buffalo, NY.
16. Task committee of ASCE. 1973. Reevaluating Spillway adequacy of existing dams. J. Hydraul. Div. ASCE, 99(2): 337-372.
17. Thompson, K. D. and J. R. Stedinger. 1997. Evaluation and Presentation of Dam Failure and Flood Risks. J. Water Resour. Plan & Manag. 123(4): 216-226.
18. Woodbury, M. S., D. T. Eberlein and N. Pansic. 1994. Minimizing the probable maximum flood. Civil Eng. ASCE 64(6):64-65.
19. Yanmaz, A. M. and M. E. Gunindi. 2003. Capacity and Benefit-Cost Relation for Concrete Gravity and RCC Dams. Proc. of World Water & Environmental Resources, June 23-26, 2003, Philadelphia, Pennsylvania.
20. Zhang, L. and V. P. Singh. 2005. Frequency analysis of flood damage. J. Hydrol. Eng. 10(2): 100-109.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.35.4]