

تحلیل خطر روگذری آب در سد با در نظر گرفتن جنبه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: سد ونک)

عبدالرضا کبیری سامانی^{۱*}، نیکو منصوری^۲، احمدرضا سدهی سامانی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- معاون طرح و توسعه شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری

* اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

akabiri@cc.iut.ac.ir

چکیده - شکستن سد همواره تهدیدی برای جان و دارایی انسانها محسوب می‌شود. برای تعیین درجه ایمنی و قابلیت اطمینان سد، محاسبه احتمال شکست سد راه‌کاری بسیار مناسب است. در میان عواملی که باعث شکست سد می‌شوند، روگذری جریان، به‌ویژه در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، خطر اصلی است و بیش از یک سوم موارد شکست در جهان بر اثر روگذری رخ داده است. در این پژوهش به منظور توسعه کاربرد تحلیل خطر در تحلیل ایمنی سدها، به محاسبه خطر روگذری سد خاکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر این پدیده پرداخته شده است. این پارامترها شامل ارتفاع سد، تراز اولیه آب مخزن، دبی بیشینه سیلاب، هندسه مخزن، دبی خروجی سرریز، خطای روندیابی، سرعت باد و خطای محاسبه افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد است. برای برآورد خطر، از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و *LHS* استفاده شده است. برای درک بهتر و نشان دادن کاربرد تحلیل خطر، قابلیت اعتماد سد ونک در برابر روگذری مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها در احتمال شکست سد مؤثر است. در این میان تأثیر عدم قطعیت در منحنی حجم - ارتفاع مخزن و تعداد دریچه کارآمد سرریز، برجسته‌تر است. هم‌چنین دقت در برآورد بزرگی دبی بیشینه سیلاب نقش به‌سزایی در کاهش خطر روگذری دارد؛ در حالی که تأثیر تراز اولیه آب بر میزان خطر شکست سد قابل چشم‌پوشی است. بر اساس نتایج تحلیل خطر، با تلفیق اثر باد و سیل، میزان خطر شکست به طور محسوسه افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: عدم قطعیت، تحلیل خطر، روگذری، شبیه‌سازی، مونت کارلو، سد ونک.

۱- مقدمه

مطلوب باید بررسی شود. عدم قطعیت عاملی مهم در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه است. عوامل ایجاد عدم قطعیت در پروژه‌های سدسازی بسیار متنوع‌اند: عدم

سدها و سازه‌های هیدرولیکی همواره تحت تأثیر عوامل تصادفی بوده و بنابراین قابلیت اطمینان آنها در عملکرد

تحلیل خطر و عدم قطعیت در بسیاری از علوم کاربرد دارد. (Zhao et al. (1997 به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو قابلیت اعتماد سازه‌های هیدرولیکی را تحلیل و با بکارگیری نظریه هیدروگراف واحد (UH) و روش‌های روندیابی، احتمال شکست سازه‌های هیدرولیکی را برآورد کردند. (Abrishamchi et al. (2003 بهینه‌سازی ظرفیت سرریزها را تحت تأثیر عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن پدیده روندیابی در مخزن مطالعه کردند. بر طبق نظر ایشان در سیل‌های با دوره بازگشت بزرگ، عدم قطعیت بالایی وجود دارد و عدم قطعیت‌های هیدرولیکی در مقایسه با عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی اهمیت کمتری دارند. (Afshar and Takbiri (2009 بهینه‌سازی چند هدفه فیوز دریچه‌ها را بر مبنای خطر شکست بررسی کردند. در تحقیق آنان فرایند روندیابی در سرریزهای مجهز به فیوز دریچه شبیه‌سازی شده و برای رسیدن به ضریب ایمنی بالا، خطر روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی برآورد شده است.

(Cheng (1982 مطالعه دقیقی در زمینه خطر روگذری سدها ارائه کرده که هم‌چنان به‌عنوان مبنای مناسبی در تحقیقات از آن استفاده می‌شود. خاکباز و همکاران (۱۳۸۰) و تفرج و همکاران (۱۳۸۲) اثر افزایش ارتفاع آب بر اثر باد و اثر عدم قطعیت‌های مربوط به آن را بر خطر روگذری از سیل‌بند مطالعه کردند.

(Kwon and Moon (2006 به بررسی خطر روگذری سدها پرداختند. در مطالعه آنان سه ابتکار در توسعه روش‌های ارزیابی خطر به کار رفته است.

(Kuo et al. (2007 خطر روگذری آب از سد فیتسویی در تایوان را بررسی کردند. آنان از پنج روش مختلف *MCS*، *RPEM*، *HPEM*، *MFOSM* و *LHS* برای ارزیابی خطر روگذری آب از سد استفاده و این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. افشار و تکبیری (۱۳۸۷) و میران‌بیگی و افشار (۱۳۸۸) خطر روگذری سد را به کمک

قطعیت طبیعی، عدم قطعیت در مدل‌سازی، عدم قطعیت در پارامترهای مدل، عدم قطعیت در داده‌ها و عدم قطعیت عملکردی سیستم. برای برآورد پاسخ‌های متأثر از عدم قطعیت‌های ورودی، نیاز به روش‌های ریاضی و آماری خاصی است که تحلیل عدم قطعیت نامیده شده‌اند. به طور کلی پارامترهای غیر قطعی در برآورد خطر برای سد را می‌توان چنین دسته‌بندی کرد: پارامترهای هیدرولوژیکی، پارامترهای هیدرولیکی، پارامترهای زمین‌شناسی، پارامترهای لرزه‌ای، پارامترهای سازه‌ای و ساخت، پارامترهای عملکردی و بهره‌برداری. در نظر گرفتن تمامی این پارامترها به زمان و محاسبات زیادی نیاز دارد. با توجه به حضور عدم قطعیت در تمامی مسایل مهندسی و طراحی به خصوص در سدها، در طراحی سد باید خطر را پذیرفت. اما این‌که چه مقدار از این خطر قابل قبول است بحث دیگری است که با میزان خطر قابل قبول در جامعه ارتباط دارد که آن نیز به شرایط اقتصادی، محیطی و روحی و روانی مردم بستگی دارد و برای تعیین آن به مطالعات خاص نیاز است. به‌عنوان مثال نرخ مرگ و میر سالیانه و سطح تحمل آن در جامعه یکی از معیارهای تعیین‌کننده سطح قابل قبول خطر هستند. هم‌چنین این موضوع که سازه قدیمی است یا تقویت‌شده یا در حال ساخت، بر میزان خطر قابل قبول اثر می‌گذارد. این نرخ در استرالیا برابر 10^{-4} و در چین برابر 10^{-5} است، اما در ایران استاندارد در این زمینه ارائه نشده است. در صورت وجود معیاری مناسب و با در نظر گرفتن نتایج تحلیل خطر سد در شرایط مختلف، تعیین سیلاب ایمنی و ابعاد مناسب سرریز میسر می‌شود. در این تحقیق عدم قطعیت‌هایی که تأثیر بیشتری در افزایش احتمال وقوع شکست سد دارند، در نظر گرفته می‌شود. محاسبه احتمال شکست را تحلیل خطرپذیری می‌نامند که خروجی آن اطلاعات گسترده‌ای است که تصمیم‌گیری در زمینه‌های مهندسی، سیاسی، اجتماعی و اقتصادی را میسر می‌سازد.

$$P_F = P[H > H_C] = P[H - H_C > 0] \quad (1)$$

مقدار H از ترکیب ارتفاع اولیه آب پشت سد و ارتفاع ناشی از وقوع پدیده‌ای طبیعی مانند G به دست می‌آید. هر یک از این دو مقدار، تابعی از پارامترهای غیر قطعی دیگری است. در پژوهش حاضر به کمک اطلاعات آماری موجود از وقوع پدیده‌های طبیعی اثرگذار در روگذری (باد و سیلاب)، ابتدا بزرگی هر پدیده متناظر با دوره بازگشت خاص از طریق تحلیل فرکانس به دست آمده است. سپس قابلیت اعتماد سازه در هر دوره بازگشت سنجیده شده است. برای محاسبه خطر روگذری سد لازم است ابتدا تابع عملکرد یعنی تابع شکست سد محاسبه شود. با توجه به رابطه (۱) تابع عملکرد سد (Z) چنین است:

$$Z = H - H_C \quad (2)$$

تراز آب پشت سد متأثر از سه مؤلفه اصلی تراز اولیه آب (H_0)، افزایش ارتفاع ناشی از سیلاب (H_F) و افزایش ارتفاع ناشی از باد (H_W) است. لذا تابع عملکرد سد را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$Z = H_0 + H_F + H_W - H_C \quad (3)$$

به این ترتیب چهار متغیر اصلی تابع شکست عبارتند از: H_0 ، H_F ، H_W و H_C که همه غیر قطعی هستند. عواملی که باعث بروز عدم قطعیت در ارتفاع سد می‌شوند عبارتند از: نشست بدنه سد، تغییر دما در بدنه سد و خطای ناشی از ساخت. اثر تغییر دما بر ارتفاع سدهای خاکی ناچیز است، اما اثر نشست بر ارتفاع این سدها مؤثر است. برای محاسبه میزان نشست روابط متعددی وجود دارد که بیشتر آنها روابطی تجربی و آزمایشگاهی بوده و تقریبی را از مقدار نشست نهایی به دست می‌دهند. بر اساس توصیه کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشست تاج سد به میزان یک تا دو درصد ارتفاع سد مجاز است و در نقاط زلزله‌خیز یک درصد به این مقدار اضافه می‌شود. در این پژوهش اثر عدم قطعیت ارتفاع سد خاکی در اثر نشست،

دو روش مونت‌کارلو و LHS بررسی کردند. پارامترهای غیرقطعی مطالعه آنان: ارتفاع سد، تراز اولیه آب، خطای آزادسازی مخزن، خطای روندیابی در گام‌های زمانی، هندسه مخزن و دبی حداکثر بوده و نتایج آنان نشان می‌دهد که روش LHS با تعداد شبیه‌سازی کمتر، نتایج بهتری را نسبت به روش مونت‌کارلو به دست می‌دهد.

با بررسی مطالعات پیشین مشخص می‌شود که روگذری و خطر شکست ناشی از آن همواره به عنوان موضوع مهمی مورد توجه قرار گرفته و مطالعات گوناگونی در این زمینه انجام شده است. اما تاکنون تحقیق جامعی در زمینه بررسی خطر روگذری با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و باد و کارایی یا عدم کارایی سازه‌های هیدرولیکی، به طور همزمان - انجام نشده است. در تحقیق حاضر خطر روگذری سد با اثر هم‌زمان باد و سایر پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی مطالعه می‌شود. متغیرهای تصادفی مورد نظر در این تحقیق در محاسبه خطر روگذری عبارتند از: ارتفاع سد، تراز اولیه آب، بیشینه سیلاب ورودی، سرعت باد، هندسه مخزن، خروجی مخزن و روندیابی مخزن. برای نشان دادن اهمیت و اثر عدم قطعیت‌ها در میزان خطر، مطالعه موردی بر روی سد ونک در استان چهارمحال و بختیاری انجام شده است. یادآوری می‌شود که هدف تحقیق حاضر در مطالعه موردی، بررسی وضعیت و میزان خطر طرح پیشنهادی مشاور بوده است

۲- مبانی و روش تحقیق

سدها در طول عمر خود تحت تأثیر بارهای زیادی قرار می‌گیرند. اگر ارتفاع آب در مخزن سد با H و ارتفاع تاج سد از تراز بستر رودخانه - که در واقع نیروی مقاوم در برابر بارهای خارجی است - با H_C نشان داده شود، آنگاه احتمال شکست (خطر روگذری) P_F به صورت زیر تعریف می‌شود:

به کمک توزیع مثلثی مدل‌سازی شده است. برای این منظور مقدار مد برابر با ارتفاع طراحی سد در نظر گرفته شده و حد پایین توزیع مثلثی برابر با ارتفاع سد بعد از نشست کلی در نظر گرفته شده است. ارتفاع اولیه آب مخزن، ارتفاع آبی است که قبل از وقوع سیلاب در مخزن وجود دارد. این ارتفاع به‌دستورالعمل و نحوه بهره‌برداری از مخزن بستگی دارد. در این پژوهش، تراز اولیه مخزن در هنگام سیلاب برابر با تراز عادی آب فرض می‌شود. با توجه به این که تراز اولیه تابع پارامترهای متعددی است، از قضیه حد مرکزی استفاده و توزیع تراز اولیه مخزن، نرمال فرض می‌شود. برای نشان دادن اهمیت تراز اولیه آب مخزن در هنگام وقوع سیلاب، مقدار میانگین و انحراف از معیار این پارامتر تغییر داده شده و اثر آن بر خطر روگذری سد بررسی می‌شود. بر اثر سیلاب، ارتفاع آب در مخزن افزایش می‌یابد. این افزایش ارتفاع تابع چهار عامل: هیدروگراف سیلاب ورودی به مخزن، تراز اولیه آب مخزن، رابطه حجم-ارتفاع مخزن و رابطه دبی-ارتفاع خروجی‌های سد است. در سدهایی که برنامه بهره‌برداری مشخصی دارند، به‌جز این چهار عامل، منحنی فرمان نیز بر تخلیه سیلاب اثر می‌گذارد. قبل از آن که آب به ارتفاع H_F برسد، مخزن در حال پر شدن و بعد از آن، مخزن در حال تخلیه است. بنابراین بیش‌ترین حجم ذخیره سیلاب مخزن (S_{max}) در تراز H_F ایجاد می‌شود. در این مطالعه، دبی بیشینه به کمک داده‌های آماری محاسبه می‌شود. به این منظور، پس از تصحیح و تطویل داده‌های آماری موجود، توزیع‌های مختلفی برای دبی سیلاب در نظر گرفته شد. در این حالت از هر دو روش گشتاور و درست‌نمایی حداکثر برای برآورد پارامترهای آماری هر توزیع استفاده شد. پس از آن، بهترین توزیع به کمک آزمون کای مربع انتخاب شد. به کمک تحلیل فرکانس (اسلامیان و کویایی ۱۳۸۱)، دبی بیشینه دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰۰۰ ساله به‌دست آمد. در این مرحله، به

کمک نرم‌افزار *HYFA* انحراف از معیار مربوط به دبی بیشینه هر دوره بازگشت، محاسبه شد و به عنوان معیاری از عدم قطعیت داده‌های آماری به کار رفت. به این ترتیب برای هر دوره بازگشت، مقدار میانگین، نتیجه تحلیل فرکانس با توزیع مورد قبول آزمون کای مربع است و مقدار انحراف معیار، مقدار به‌دست آمده از نرم‌افزار *HYFA* است. به کمک این مقادیر، توزیع نرمال هر دوره بازگشت ایجاد می‌شود. در این پژوهش رابطه بین هد آب روی سرریزها (h_e) و دبی سرریز به کمک منحنی دبی-ارتفاع سرریز به‌دست آمده است. به این ترتیب h_e مقداری قطعی است و قرائت نمی‌شود. بنابراین عدم قطعیت ضریب دبی، به‌تنهایی، باعث ایجاد عدم قطعیت در مقدار دبی سرریز است. با توجه به این که در روندیابی جریان از منحنی دبی-ارتفاع استفاده می‌شود، وارد کردن عدم قطعیت در تک تک مقادیر دبی منطقی نیست. به همین دلیل در این جا از یک ضریب برای دبی عبوری سرریز استفاده می‌شود. برای این منظور، پس از محاسبه منحنی دبی-ارتفاع سرریز سد، این منحنی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده و در هر بار اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو، یک ضریب در مقادیر این منحنی ضرب شده و برای روندیابی جریان استفاده می‌شود. میانگین این ضریب برابر ۱ است و انحراف معیار آن به انحراف از معیار ضریب دبی بستگی دارد. با توجه به این که ضریب دبی تحت تأثیر عوامل متعددی است، با استفاده از قضیه حد مرکزی، توزیع نرمال برای توصیف این نسبت مناسب است. یکی از اشکالاتی که در هنگام بهره‌برداری از سرریز، به‌ویژه سرریزهای درجه‌دار ممکن است پیش آید، بسته شدن کل یا قسمتی از عرض سرریز به علت عدم کارایی تجهیزات کنترل دریچه، گیرکردن آشغال، تنه درختان یا سایر موارد بر روی سرریز است. این باعث کاهش عرض سرریز، افزایش ارتفاع آب بر روی تاج سرریز و تغییر در مقدار ضریب دبی جریان

سرعت طراحی و به طرف دیواره سد است. روابط متعددی برای محاسبه خیز موج سطح مخزن ارائه شده است. در مطالعه حاضر، رابطه (۴) برای نمودارها و جدول‌های مذکور ارائه می‌شود. با وارد کردن سرعت باد (V_w ، متر بر ثانیه) و طول مؤثر دریاچه (F_e ، کیلومتر) پارامتر b به دست می‌آید (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۹):

$$b = 2.303 \ln(V_w \cdot F_e^m) \quad (4)$$

که در آن m مقداری ثابت و در این‌جا برابر $0.793-$ است. سپس به کمک جدول ۱ و با درون‌یابی b ارتفاع موج مهم بر حسب متر محاسبه می‌شود. این روش برای طول بادگیر تا ۱۰ کیلومتر و سرعت باد بین ۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت انجام شده است.

جدول ۱ ارتفاع موج مهم بر حسب b

(کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۹)

ارتفاع موج مهم (m)	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۹
فاکتور b	۱/۲۸۷	۱/۳۷۸	۱/۵۶۹	۱/۶۳۱	۱/۷۱۶

در مطالعه حاضر، تراز اولیه مخزن برابر با تراز عادی در نظر گرفته شده و عمق متوسط آب در مخزن با تغییر ارتفاع اولیه آب تغییر می‌کند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت روابط و فاکتورهایی مانند طول مؤثر و شیب و جنس بدنه سد از ضریب (λ_w) برای اصلاح مقادیر محاسبه شده H_w استفاده می‌شود که مقدار میانگین این ضریب برابر ۱ فرض شده و برای تعیین انحراف از معیار آن لازم است، نتایج به دست آمده از روابط در شرایط مختلف با مقادیر واقعی مقایسه شوند و انحراف معیار به دست آید. با توجه به این که سد مورد مطالعه در مرحله طراحی بوده و از مقادیر واقعی اطلاعاتی در دست نیست با قضاوت مهندسی و بررسی مطالعات قبلی، توزیع مناسب، توزیع لوگ‌نرمال با انحراف معیار ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

می‌شود و کاهش دبی عبوری از سرریز را به دنبال دارد. در این مطالعه، این پدیده در قالب عدم کارکرد یک یا چند دریچه مطالعه شده است. در محاسبه رابطه حجم-ارتفاع مخزن، خطاهای نقشه‌برداری و خطاهای روش‌های محاسباتی، مهم‌ترین نقش را در بروز عدم قطعیت دارد. با توجه به این که منحنی حجم-ارتفاع مخزن در روندیابی به کار می‌رود، در این مورد نیز مانند منحنی دبی-ارتفاع سرریز از ضریبی با توزیع نرمال استفاده شده است. مقدار میانگین این ضریب برابر ۱ فرض می‌شود. بیش‌ترین تراز آب مخزن یعنی H_F ، از طریق روندیابی جریان سیلاب در مخزن سد به دست می‌آید. برای روندیابی جریان، اگر هیدروگراف ورودی معلوم باشد، با توجه به این که هر دو پارامتر O (دبی خروجی سد) و S (ذخیره مخزن) مجهول است، به طور مستقیم نمی‌توان این معادله را حل کرد. برای حل این مسأله به رابطه دیگری بین این دو مجهول نیاز است. برای این منظور از رابطه بین ارتفاع آب مخزن با حجم و دبی خروجی سرریز استفاده می‌شود. رابطه بین حجم ذخیره و دبی به صورت نامتغیر در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی همواره دبی ثابتی به ازای رقوم خاصی از مخزن خارج می‌شود. در مطالعه انجام شده توسط کو و همکاران (۲۰۰۷) از ضریبی با مقدار میانگین برابر ۱ و انحراف از معیار برابر ۰/۰۸۲ به منظور وارد کردن این عدم قطعیت در مقدار ارتفاع بیشینه به دست آمده در روندیابی استفاده شده است. در این مطالعه با توجه به حجم زیاد مخزن، فرض افقی بودن سطح مخزن در هنگام سیل به واقعیت بسیار نزدیک بوده و از این خطا صرف‌نظر می‌شود. وزش باد بر روی سطح آب دریاچه سد، به دو صورت خیز موج در سطح آب ناشی از وزش باد (خیزاب) و رانش امواج ناشی از باد بر دیوار سد (بالاروی موج) در افزایش ارتفاع آب تأثیرگذار است. موج حاصل از تنش افقی وزش باد بر روی سطح آب مخزن موجب بالا رفتن سطح آب در نزدیکی دیوار سد می‌شود. در محاسبه ارتفاع موج فرض می‌شود که باد با

شهادای چشمه علی) در استان چهارمحال و بختیاری بر روی رودخانه سولگان، یکی از سرشاخه‌های مهم کارون طراحی شده است. رودخانه سولگان به علت بارش برفی قابل توجه، دارای آورد سالیانه و جریان پایه مناسبی است. سد ونک دارای چهار سرریز درجه‌دار (۸×۴ مترمربع) و یک تخلیه کننده پایینی در سمت چپ و نیز یک سیستم انتقال آب در تکیه‌گاه راست است. این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی، ارتفاع تاج سد از بستر رودخانه برابر ۶۴/۵ متر، تراز عادی بهره‌برداری برابر ۲۱۰۰ متر و حجم مخزن در رقوم عادی برابر ۱۸۳/۸۴ میلیون متر مکعب است.

در شکل ۲ روندنمای تعیین خطر همراه با متغیرهای تصادفی درگیر نشان داده شده است. در ادامه، نحوه برآورد عدم قطعیت هر یک از این متغیرها توضیح داده می‌شود.



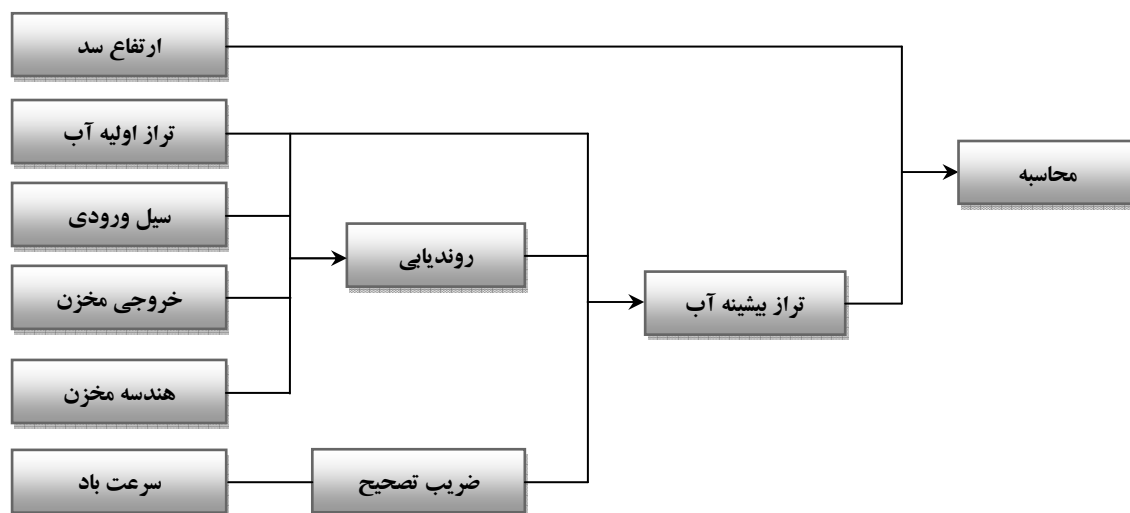
شکل ۱ محدوده جغرافیای سد ونک

بر اساس گزارش‌های مرحله اول طراحی سد مخزنی ونک، ارتفاع سد از بستر رودخانه برابر ۶۴/۵ متر است. میزان نشست سد برابر یک درصد ارتفاع آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نشست نهایی سد ونک برابر ۰/۶۴۵ متر است. با توجه به این که بر اثر نشست، ارتفاع سد کاهش می‌یابد، تابع چگالی احتمال مثالی برای ارتفاع سد به کار رفته است. در این توزیع a برابر با ۶۳/۸۵۵ و b و c برابر ۶۴/۵ است. مقدار میانگین، ضریب تغییرات و انحراف معیار به ترتیب برابر ۶۴/۲۲۱، ۰/۰۲۳۶ و ۰/۱۵۲ است.

پس از آن که عدم قطعیت متغیرهای درگیر در مسأله خطر روگذری و توابع احتمال آنها تعیین شد، به کمک یکی از روشهای محاسبه خطر، میزان خطر شکست سازه محاسبه می‌شود. در این تحقیق از شبیه‌سازی مونت کارلو و روش LHS استفاده شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو روشی عددی برای تولید اعدادی تصادفی بر اساس توزیع احتمال آنها است. در این روش در هر تکرار تعدادی اعداد تصادفی تولید شده و مدل با آنها اجرا می‌شود. سپس یک متغیرشمارنده تعریف می‌شود تا اگر بعد از هر بار اجرای مدل به جواب دلخواه نرسیدیم، یک واحد افزایش می‌یابد. در پایان آخرین تکرار، با تقسیم این شمارنده بر تعداد کل تکرارها مقدار خطر به دست می‌آید. برای تحلیل خطر سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، در هر تکرار بر اساس توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای متغیرها، اعدادی تصادفی تولید شده و روندیابی انجام می‌شود. اگر تراز آب مخزن حاصل از تراز تاج مخزن بیشتر شود، به شمارنده یک واحد اضافه شده و در پایان خطر روگذری محاسبه می‌شود. هرچه تعداد تکرارها بیشتر باشد، مشخصه آماری نمونه‌ها به مشخصه آماری جمعیت واقعی نزدیکتر می‌شود، اما هر چه تعداد متغیرهایی که به صورت تصادفی تولید می‌شوند بیشتر باشد، مدل با تعداد تکرار بیشتری به جواب همگرا می‌شود. اساس روش LHS مانند روش مونت کارلو است و تفاوت آنها در نحوه تولید اعداد تصادفی است. در روش LHS به دلیل این که تولید اعداد تصادفی به روش بهتری صورت می‌گیرد، برای رسیدن به جوابی با دقت یکسان به تعداد تکرار کمتری در مقایسه با روش مونت کارلو نیاز است.

۳- مطالعه موردی و تشریح متغیرهای تصادفی مؤثر در تابع شکست

سد انتخاب شده برای مطالعه موردی، سد ونک در استان چهارمحال و بختیاری است (شکل ۱). سد ونک (یا سد



شکل ۲ روندنمای ارزیابی خطر روگذری ناشی از باد و سیلاب

محاسبه شده توسط هر دو روش حداکثر درستیابی و روش گشتاورها برای هر توزیع ارائه شده و آزمون نیکویی برازش انجام می‌شود. علاوه بر این، تحلیل فرکانس داده‌ها با دوره‌های بازگشت مورد نیاز در این نرم‌افزار قابل انجام است. روابطی که در این نرم‌افزار برای محاسبه احتمال داده‌های تجربی استفاده شده، عبارت است از: هیزن، ویبول، بلوم، توکی، چگودیف و گرینگورتن (صفوی ۱۳۸۵). دوره‌های بازگشت استاندارد به کار رفته در این نرم‌افزار برابر ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بوده و دوره‌های بازگشت دیگری نیز قابل تعریف است. برای تعیین دبی بیشینه هیدروگراف سیلاب محل سد، ابتدا لازم است دبی بیشینه سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف در ایستگاه سولگان محاسبه شود. به این منظور به داده‌های آماری این ایستگاه نیاز است. برای ایستگاه ۲۶ سال داده در دست است. تحلیل فرکانس برای بازه ۲۶ سال بسیار نامعقول است، زیرا طول بازه کم است. برای به دست آوردن نتایج مناسب به کمک آمار ایستگاه‌های دیگر و روابط همبستگی بین آنها، طول بازه آماری به ۵۰ سال توسعه داده شد. سپس توزیع‌های نرمال، لوگ‌نرمال، گاما، پیرسون III، لوگ‌پیرسون III و

انحراف معیار مربوط به تراز اولیه آب بر اساس قضاوت مهندسی و مطالعات قبلی، ۱/۹ متر برآورد می‌شود (چانگ ۱۹۸۲ و کو و همکاران ۲۰۰۷). اما به منظور بررسی اثر عدم قطعیت تراز اولیه آب بر مقدار خطر، مقادیر ۱، ۲/۵، ۰ و ۰/۵ برای انحراف معیار ارتفاع اولیه آب مخزن در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت تراز اولیه آب با استناد به قضیه حد مرکزی از توزیع نرمال استفاده می‌شود. همچنین برای تراز اولیه آب مخزن مقادیر ۲۰۹۶، ۲۰۹۲ و ۲۰۸۸ متر در نظر گرفته شده است تا حساسیت خطر روگذری سد نسبت به این عامل بررسی شود. در این پژوهش، آمار ایستگاه هیدرومتری سولگان برای محاسبه دبی بیشینه به کار رفته است، زیرا نزدیک‌ترین ایستگاه به محل سد ونک بوده و از نظر موقعیت و سطح حوضه، اختلاف چندانی بین محل سد و این ایستگاه وجود ندارد. در ادامه به شرح چگونگی تعیین دبی بیشینه و شکل هیدروگراف سیل پرداخته می‌شود. نرم‌افزار HYFA برای محاسبه پارامترهای آماری برخی از توزیع‌های احتمال (نرمال، لوگ‌نرمال دو پارامتری، لوگ‌نرمال سه پارامتری، گاما، پیرسون III، لوگ‌پیرسون III و گامبل) به کار می‌رود. در این نرم‌افزار، پارامترهای

گامبل داده‌ها توسط نرم‌افزار *HYFA* برآزش داده شد. برای این منظور از هر دو روش حداکثر درست‌نمایی و گشتاورها (مستقیم و غیرمستقیم) استفاده شد. نتایج آزمون‌های نیکویی برآزش نشان داد که توزیع لوگ‌پیرسون *III* بهترین توزیع است. به این ترتیب دبی بیشینه سیلاب در محل سد ونک را می‌توان به کمک نتایج حاصل از برآزش توزیع لوگ‌پیرسون *III* به دست آورد. برای وارد کردن عدم قطعیت دبی بیشینه سیلاب هر دوره بازگشت از توزیع نرمال استفاده می‌شود. برای تعیین شکل هیدروگراف از هیدروگراف شاخص استفاده شد. هیدروگراف شاخص انتخاب شده مربوط به سیلاب رخ داده در تاریخ ۱۴ تا ۲۹ اسفند سال آبی ۱۳۷۱-۷۲ در ایستگاه سولگان است. لازم است ذکر شود که این سیلاب از نوع با دوره بازگشت بالا است که هیدروگراف آن پس از تعدیل به‌عنوان هیدروگراف در محل سد ونک به کار برده می‌شود. برای به دست آوردن هیدروگراف سیلاب ورودی مخزن سد ونک کافی است دبی بیشینه مربوط به هر دوره بازگشت در مقادیر جدول یاد شده ضرب شود. سد ونک چهار سرریز دريچه‌ای با ابعاد ۷×۸ متر (ارتفاع×عرض) دارد. که در تکیه‌گاه سمت چپ و در تراز ۲۰۹۲ متری (۸ متر پایین‌تر از تراز عادی) قرار دارند. این سد علاوه بر این سرریزها، خروجی‌های دیگری مانند تخلیه‌کننده پایینی و سیستم انتقال آب نیز دارد. اما با توجه به این که دبی عبوری از این سازه‌ها در مقابل سرریز ناچیز است، در تخلیه سیلاب و کاهش خطر روگذری نقش مؤثری ندارند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت دبی عبوری از سرریزها از ضریبی با میانگین برابر یک و انحراف معیار برابر ۰/۱ با توزیع نرمال استفاده می‌شود. علاوه بر این تعداد دريچه‌هایی که به صورت صحیح کار می‌کنند از ۴ عدد به ۳، ۲ و ۱ عدد کاهش داده می‌شود و میزان افزایش خطر روگذری در هر حالت بررسی می‌شود. سطوح دریاچه با انجام محاسبات پلانی متری و

محاسبه حجم‌ها به روش حجم منشور ناقص تعیین شده است. برای محاسبه خطای پلانی متری لازم است نوع پلانی متر و نقشه مربوط به محل سد در دست باشد. به این منظور از ۲۰ کارشناس خواسته شد که سطح مشخصی را بر روی نقشه به کمک پلانی متر اندازه‌گیری کنند. سپس به کمک تحلیل‌های آماری اعداد پرت جدا و مقدار میانگین، انحراف معیار و خطای نسبی (نسبت انحراف معیار به میانگین) محاسبه شد. به این ترتیب، خطای نسبی (که برابر ۰/۰۸ به دست آمد) به‌عنوان خطای نسبی محاسبه سطح مخزن به کار برده شده است. همان‌طور که گفته شد، برای تعیین عدم قطعیت حجم مخزن، علاوه بر خطای سطح، به دقت ارتفاعی نقشه نیاز است. با توجه به این که فاصله خطوط تراز نقشه برابر ۱ متر است، به کمک روابط نقشه‌برداری خطای نسبی ارتفاع برابر ۰/۳۳۳ محاسبه می‌شود. خطای روندیابی (در روش مخزن تراز) با به کار بردن توزیع نرمال با میانگین برابر ۱ و انحراف معیار برابر ۰/۰۸۲ وارد می‌شود. گفتنی است که در روندیابی سیل، تراز اولیه همان تراز عادی بهره‌برداری (۲۱۰۰ متر) در نظر گرفته شده است و در مورد عملکرد سرریز فرض شده که دريچه‌ها - تا زمانی که سطح آب مخزن به ۲۱۰۰ متر نرسد - بسته بوده و پس از آن به طور کامل باز می‌شوند. طول بادگیر در تراز عادی برابر ۱۳۹۰ متر و عمق متوسط آب مخزن در تراز عادی برابر ۲۸ متر است. به منظور محاسبه ارتفاع بالاروی موج بر روی (۱۳۷۹) بدنه سد، بر اساس روش کمیته ملی سدهای بزرگ ایران برای تبدیل ارتفاع موج مهم به ارتفاع موج طراحی برای سد سنگ‌ریزه‌ای با جاده دسترسی روی تاج از ضریب ۱ استفاده شده است. هم‌چنین با در نظر گرفتن جنس خاکریز با سنگ‌های نسبتاً ریز یا قلوه سنگ‌های متوسط و شیب ۱ به ۱/۹ برای بدنه بالادست، ضریب ۱/۷ برای تبدیل ارتفاع موج طراحی به ارتفاع بالاروی موج به دست می‌آید. سرعت باد در خشکی نیز به سرعت باد

به منظور جمع‌بندی و دسترسی ساده‌تر به مقادیر عددی متغیرهای تصادفی، جدول ۲ تنظیم شده است. در این جدول برای هر متغیر، یک علامت اختصاری تعریف شده که در ادامه از آنها استفاده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج تحلیل خطر روگذری سد ونک ارائه می‌شود. ابتدا نتایج تحلیل خطر سیلاب ارائه و سپس اثر افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد در سطح دریاچه بررسی می‌شود و در هر مورد عوامل اثرگذار در میزان خطر مطالعه می‌شود. برای نشان دادن اثر تغییر هر پارامتر بر مقدار خطر، تغییراتی در مقدار آن پارامتر اعمال می‌شود. اما برای سایر متغیرهای تصادفی فقط مقادیر میانگین و انحراف معیار از جدول ۲ استفاده می‌شود. همچنین برای سیلاب و باد، به ترتیب دوره‌های بازگشت ۱۰۰۰ ساله و ۱۰۰ ساله یا ۱۰۰۰۰ ساله و ۱۰ ساله در نظر گرفته می‌شود. مقادیر خطر در این بخش بر حسب درصد آورده شده است. نتایج روش MCS برای ۲۰۰ هزار بار تکرار به دست آمده است. برای اجرای مدل خطر ارائه شده از نرم افزار متلب (Matlab Ver. 7.10 R2010a) استفاده شده است.

در سطح آب باید تبدیل شود که با در نظر گرفتن طول بادگیر برابر ۱۳۹۰ متر، ضریب تبدیل برابر ۱/۱۳ است. در محاسبه افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد، فقط اثر عدم قطعیت سرعت باد در نظر گرفته شده و اثر دیگر پارامترها از طریق خطای مدل‌سازی وارد شده است. در این مطالعه از آمار ایستگاه سینوپتیک شهرکرد برای محدوده سد ونک استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار HYFA توزیع‌های مختلفی به آمار حداکثر سرعت باد برازش داده شد. بر اساس آزمون نیکویی برازش، توزیع لوگ‌پیرسون III بهترین توزیع برای مدل‌سازی سرعت حداکثر باد است. نظیر آنچه در خصوص دبی بیشینه سیلاب گفته شد، انحراف معیار سرعت حداکثر باد در هر دوره بازگشت برابر خطای استاندارد در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل در تلفیق اثر باد و سیلاب برای محاسبه حداکثر ارتفاع ناشی از وزش باد به کار می‌رود. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت روابط تجربی در محاسبه افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد، از ضریب ۱ با توزیع لوگ‌نرمال استفاده می‌شود. برای بررسی اثر تغییر عدم قطعیت این ضریب بر میزان خطر، انحراف معیار ۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ خلاصه مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی

عوامل عدم قطعیت	علامت اختصاری	واحد	میانگین	انحراف معیار	توزیع آماری
ارتفاع سد	H_0	m	۶۴/۲۲	۰/۱۵۲	مثالی
تراز اولیه آب	H_C	m	۲۱۰۰	۱/۹	نرمال
ورودی مخزن (۱۰۰۰ساله)	Q_T	m^3/s	۱۴۰۹/۴	۷۰۷/۶	نرمال
خروجی مخزن	O_R	ratio	۱	۰/۰۵	نرمال
هندسه مخزن	R_S	ratio	۱	۰/۰۵	نرمال
روندبایی مخزن	R_R	ratio	۱	۰/۰۸۲	نرمال
حداکثر سرعت باد (۱۰۰ ساله)	V_W	m/s	۲۶/۴	۲/۴۴	لوگ پیرسون نوع ۳
ضریب تصحیح	C_F	ratio	۱	۰/۳	لوگ‌نرمال

سد زیاد باشد، با افزایش تراز اولیه، مقدار خطر نیز بیشتر می‌شود. این میزان افزایش در حد ۱ تا ۲ درصد است.

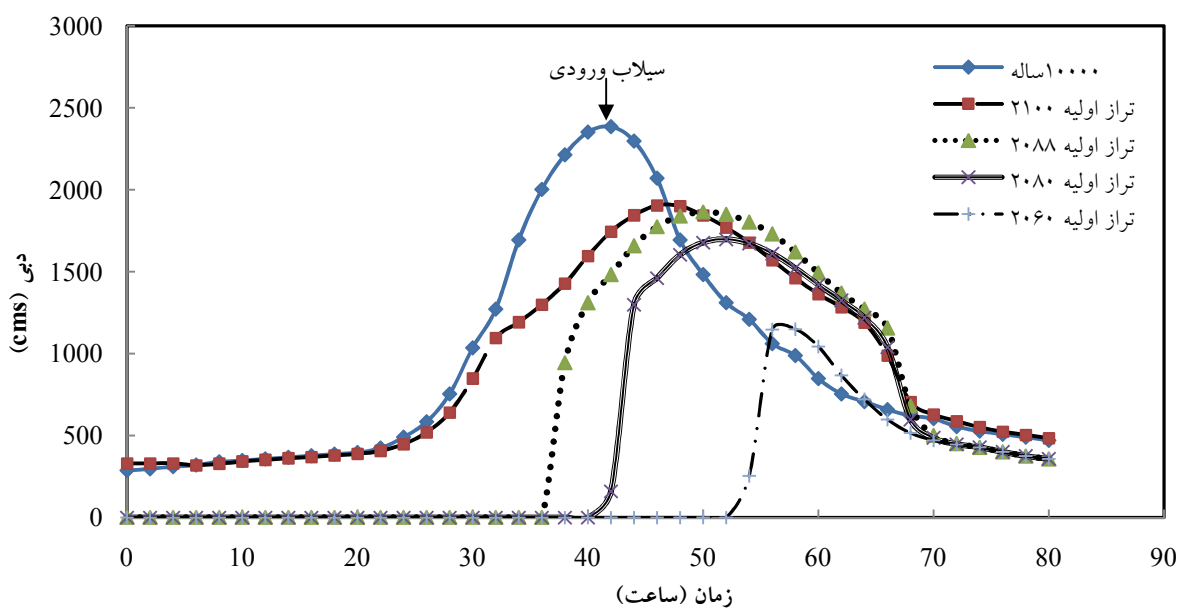
برای بررسی اثر تراز اولیه آب، فقط مقدار H_0 تغییر داده شده و دیگر پارامترها از جدول ۲ استخراج می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده (جدول ۳)، اگر احتمال شکست

جدول ۳ اثر تراز اولیه آب

خطر روگذری (%)		تراز اولیه آب (m)	انحراف معیار H_0 بدون اثر باد
۱۰۰۰۰ساله	۱۰۰ساله		
۲۰/۳۷	۰/۰۷۹	۲۱۰۰	۰/۰
۲۱/۳۶	۰/۱۲۴	۲۰۹۶	
۲۱/۸۸	۰/۱۸۶	۲۰۹۲	
۲۱/۲۴	۰/۲۶۲	۲۰۸۸	
۲۱/۴۸	۰/۰۷۸	۲۱۰۰	۰/۵
۲۱/۶۶	۰/۱۲۶	۲۰۹۶	
۲۰/۸۶	۰/۱۷۲	۲۰۹۲	
۱۹/۷۶	۰/۲۳۶	۲۰۸۸	
۲۰/۸۶	۰/۰۸۰	۲۱۰۰	۱/۰
۲۲/۳۰	۰/۱۲۹	۲۰۹۶	
۲۱/۵۶	۰/۲۱۷	۲۰۹۲	
۲۰/۴۲	۰/۲۷۰	۲۰۸۸	
۲۲/۱۴	۰/۰۹۶	۲۱۰۰	۱/۹
۲۱/۲۱	۰/۱۳۱	۲۰۹۶	
۲۱/۴۶	۰/۱۹۵	۲۰۹۲	
۲۰/۶۴	۰/۲۶۶	۲۰۸۸	
۲۱/۶۴	۰/۱۲۸	۲۱۰۰	۲/۵
۲۱/۳۰	۰/۱۳۴	۲۰۹۶	
۲۱/۶۴	۰/۱۹۶	۲۰۹۲	
۲۱/۵۶	۰/۲۶۲	۲۰۸۸	
همراه با اثر باد			
۳۱/۱۸	۱/۳۸	۲۱۰۰	۱/۹
۳۰/۸۹	۱/۴۳	۲۰۹۶	
۳۰/۶۳	۱/۷۹	۲۰۹۲	
۲۹/۵۷	۲/۰۲	۲۰۸۸	
PMF			بدون اثر باد
۴۸/۲۹		۲۱۰۰	۱/۹
۴۸/۰۲		۲۰۹۶	
۴۷/۴۰		۲۰۹۲	
۴۶/۰۵		۲۰۸۸	

از رسیدن به تراز عادی اتفاق بیافتد که به معنای ذخیره حجم قابل ملاحظه‌ای از سیلاب در مخزن است. این در عمل امکان‌پذیر نیست، زیرا سطح آب پشت سد باید در ترازهای بسیار پایین نگاه داشته شود که معمولاً با اهداف دیگری در تناقض است. بهترین راه حل برای کاهش خطر در سد ونک استفاده از فرمان بهره‌برداری از دریچه‌ها است؛ به این صورت که قبل از رسیدن آب به تراز ۲۱۰۰ متری، دریچه‌های سرریز برای تخلیه سیلاب باز شود. احتمال شکست سد با افزایش دوره بازگشت سیل طراحی (که با افزایش دبی بیشینه سیلاب معادل است) افزایش می‌یابد (شکل ۳). با توجه به این که با افزایش دوره بازگشت، انحراف معیار دبی بیشینه سیل افزایش می‌یابد و به‌منظور بررسی تأثیر عدم قطعیت دبی بیشینه بر خطر شکست، مقدار خطر در شرایط محاسبه شده که انحراف معیار دبی بیشینه برابر صفر است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش عدم قطعیت دبی بیشینه، به‌ویژه برای دوره‌های بازگشت بالا در کاهش خطر بسیار مؤثر است.

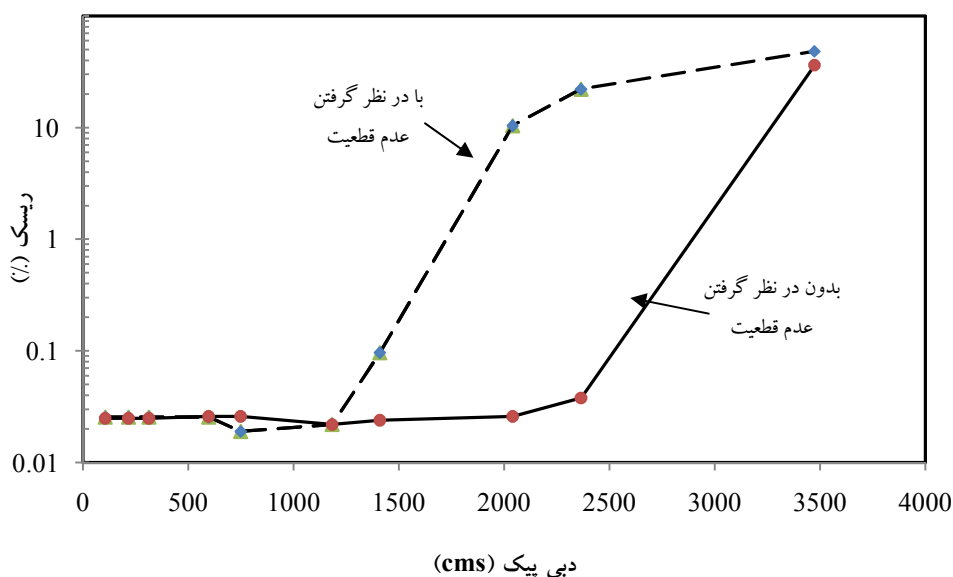
با توجه به این که در روش MCS تعداد تکرار در همگرایی جواب، به‌ویژه برای مقادیر کم، اهمیت دارد، در مورد سیلاب ۱۰۰۰ ساله تعداد تکرار بیشتری (در حدود ۱ میلیون بار) لازم است. هرچه تعداد تکرار بیشتر شود زمان اجرای شبیه‌سازی و تحلیل خطر بیشتر می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در مورد سد ونک اثر عدم قطعیت تراز اولیه آب مخزن بر خطر روگذری زیاد نیست. در واقع کاهش تراز اولیه آب مخزن از تراز عادی بهره‌برداری به تراز ۲۰۸۸ متر (۱۲ متر پایین‌تر) حداکثر باعث ۲ درصد کاهش خطر می‌شود. اگر تراز اولیه آب به تراز حداقل بهره‌برداری (یعنی ۲۰۸۰ متر) کاهش داده شود، احتمال شکست در سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله به اندازه ۴ درصد کاهش می‌یابد (و به ۱۸ درصد می‌رسد) که این مقدار کاهش در مقایسه با کاهش ۲۰ متری تراز اولیه آب بسیار کم است. بنابراین در مجموع، اثر تراز اولیه بر خطر روگذری سد ونک قابل توجه نیست. منحنی‌های سیلاب روندیابی شده (شکل ۲) بیان‌گر آن است که کاهش تراز اولیه آب زمانی مؤثر است که بیشینه سیلاب ورودی قبل



شکل ۳ روندیابی سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله با تراز اولیه متفاوت

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود در دوره‌های بازگشت بیش از ۵۰۰ سال، عدم قطعیت دبی بیشینه اثرگذار است. علت آن است که سد ونک برای عبور سیلاب با دوره‌های بازگشت بالا طراحی شده و بنابراین به سادگی و همراه با خطر بسیار کمی، توانایی ذخیره‌سازی و عبور سیلاب‌های کوچک را دارد. در حالی که عدم قطعیت سیلاب‌های ۱۰۰۰ ساله و بالاتر در افزایش احتمال شکست سد بسیار مؤثر است. در این جا به‌منظور بررسی کافی بودن ارتفاع آزاد سد ونک، خطر روگذری، بدون در نظر گرفتن انحراف معیار دبی بیشینه PMF نیز محاسبه شد. با توجه به بزرگی دبی بیشینه PMF خطر روگذری، حتی در شرایطی که انحراف معیار دبی بیشینه PMF برابر صفر است، هم‌چنان بالاست. شایان ذکر است که PMF با استفاده از حداکثر بارش محتمل و تبدیل آن به وسیله مدل بارش-رواناب به هیدروگراف سیل به دست آمده است. یکی از پارامترهای هواشناسی مهم و مؤثر در محاسبه PMF ، الگوی توزیع زمانی بارش است که در این تحقیق با هدف حداکثر سازی مقدار PMF انتخاب شده است (منصوری، ۱۳۹۰).

به‌منظور بررسی اثر عدم قطعیت ضریب به‌کار رفته در رابطه دبی-ارتفاع سرریز، خطر روگذری سد با مقدارهای مختلف انحراف معیار ضریب O_R برای سیلاب ۱۰۰۰ ساله بدون اثر باد محاسبه شده است. بر اساس این نتایج با افزایش عدم قطعیت ضریب O_R ، خطر افزایش می‌یابد اما مقدار افزایش ناچیز است. این نتیجه در مواردی که احتمال شکست سد زیاد است (مانند وقوع سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله) نیز درست است. در واقع عدم قطعیت متغیرهای تعیین‌کننده دبی خروجی سرریز تأثیر کمی بر میزان خطر دارد. به این ترتیب می‌توان استنباط کرد که روابط تجربی به‌کار رفته برای محاسبه ضریب سرریز قابل اعتماد است. با افزایش عدم قطعیت R_S مقدار خطر افزایش می‌یابد. این موضوع اهمیت دقت در استخراج منحنی حجم-ارتفاع مخزن سد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، دقت کم در نقشه‌برداری مهم‌ترین عامل بروز عدم قطعیت در این منحنی است. این در حالی است که فاصله خطوط تراز در نقشه توپوگرافی، بیشترین سهم را در محاسبه انحراف معیار ضریب R_S به خود اختصاص داده است. بنابراین برای تعیین رابطه حجم-ارتفاع مخزن باید از نقشه‌ای با دقت بالا استفاده شود.

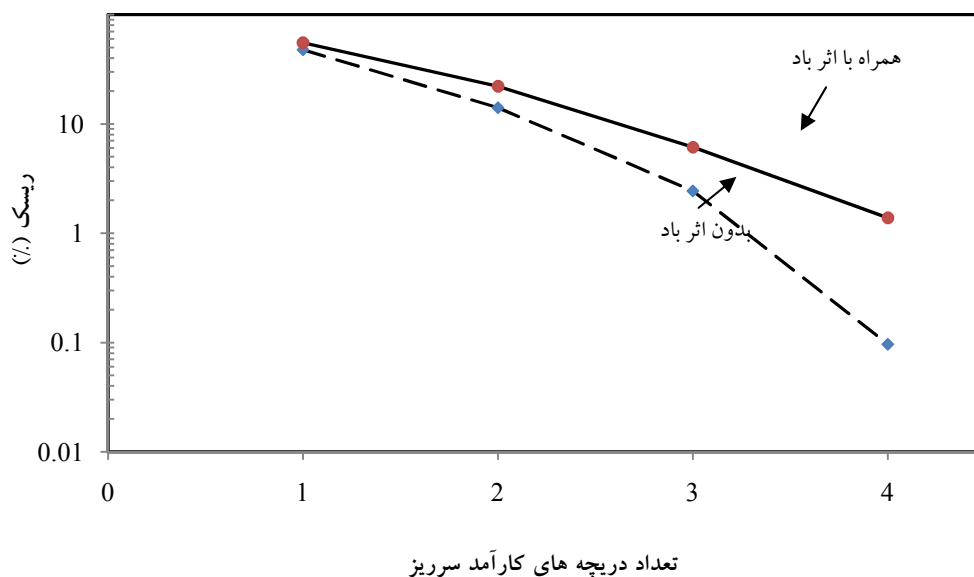


شکل ۴ اثر تغییر دبی بیشینه بر خطر روگذری

بیشتر و از ضریب R_S کمتر است. همچنین با افزایش احتمال شکست سد، اثر این عامل کم‌رنگ می‌شود. با توجه به این که ضریب C_F بیانگر تأثیر عدم قطعیت H_W است، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که اثر باد همراه با سیل بررسی می‌شود، در برآورد پارامترهای مؤثر بر H_W -مانند طول بادگیر و عمق دریاچه- به دقت بالایی نیاز نیست.

در جدول ۴ نتایج تحلیل خطر در سه حالت وقوع سیلاب به تنهایی، وقوع باد به تنهایی و وقوع هم‌زمان باد و سیلاب آورده شده است. دیده می‌شود که در دوره‌های بازگشت کوتاه، خطر روگذری بر اثر وقوع سیلاب ناچیز است، در حالی که در اثر وزش باد با همان دوره بازگشت، خطر بیشتر می‌شود. با افزایش دوره بازگشت سیل طراحی، دبی بیشینه سیلاب با نرخ قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و به دنبال آن احتمال روگذری سد به شدت زیاد می‌شود. با تلفیق اثر باد و سیل از قابلیت اعتماد سد (نسبت به اثر هر یک به‌طور مجزا) تا حد زیادی کاسته می‌شود.

گفتنی است که تأثیر عدم قطعیت ضریب R_S بسیار بیشتر از ضریب O_R است. این از آن‌جا ناشی می‌شود که حجم مخزن، مهم‌ترین نقش را در تسکین سیلاب بر عهده دارد. نتایج تحلیل خطر به روش MCS برای سیلاب ۱۰۰۰ ساله با و بدون در نظر گرفتن اثر باد ۱۰ ساله در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با از کار افتادن تعدادی از دریچه‌های سرریز، میزان خطر افزایش می‌یابد. بر خلاف اثر کم ضریب O_R ، کارکرد ناقص دریچه‌های سرریز اثر زیادی بر میزان افزایش خطر دارد. به‌منظور بررسی اهمیت افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد، احتمال شکست سد و نک تحت تأثیر باد و بدون وقوع سیلاب محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه سرعت باد بیشتر شود احتمال روگذری بیشتر می‌شود. اما احتمال شکست سد بر اثر وزش باد بسیار کم‌تر از احتمال شکست سد بر اثر سیلاب است. نتایج تحلیل خطر سد و نک نشان می‌دهد که -مانند ضرایب O_R و R_S - با افزایش عدم قطعیت ضریب C_F ، مقدار خطر افزایش می‌یابد. تأثیر ضریب C_F بر مقدار خطر از ضریب O_R



شکل ۵ اثر تعداد دریچه‌های کارآمد سرریز بر خطر روگذری

جدول ۴ تحلیل اثر باد

احتمال شکست سد در اثر باد و سیل (%)	احتمال شکست سد در اثر باد (%)	احتمال شکست سد بر اثر سیلاب (%)	
۱۰۰ سال و ۱۰۰۰ سال	۱۰۰ سال	۱۰۰۰ سال	دوره بازگشت
۱/۳۸	۰/۳۷	۰/۱۰	
۱۰ سال و ۱۰۰۰۰ سال	۱۰ سال	۱۰۰۰۰ سال	دوره بازگشت
۳۱/۱۸	۰/۲۸	۲۱/۱۷	

۵- نتیجه گیری

به طور کلی در شرایطی که عدم قطعیت‌ها ثابت فرض شوند، درجه خطر سیستم با افزایش مقاومت یا کاهش بار خارجی به سیستم کمتر می‌شود. اگر سیستم در حالت مقاوم (مقدار بار از مقاومت کمتر) باشد، در این صورت با افزایش عدم قطعیت‌ها (چه در بار و چه در مقاومت) مقدار خطر بیشتر می‌شود. در این شرایط صرف نظر کردن از عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در مقاومت (مانند پارامترهای هیدرولیکی در مسائل مهندسی آب) منجر به محاسبه کمتر خطر و طراحی دست پایین برای سازه می‌شود. در صورتی که سیستم در حالت شکست (مقدار بار از مقاومت بیشتر) باشد، با افزایش عدم قطعیت‌ها احتمال شکست سازه کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی نادیده گرفتن عدم قطعیت عامل‌های مقاومت باعث طراحی دست بالای سازه می‌شود. سد ونک در برابر سیلاب با دوره‌های بازگشت کمتر از ۱۰۰۰ سال قابلیت اعتماد خوبی دارد. اما با بالا رفتن دوره بازگشت سیلاب، خطر روگذری به شدت افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن عدم قطعیت زیاد در برآورد دبی بیشینه سیل است. برای این سد در صورتی که احتمال بروز سیل همراه با بادهای شدید وجود داشته باشد، انجام اقدامات اضطراری مانند تنظیم دریچه‌ها و تراز آب توصیه می‌شود.

۶- فهرست علائم

b	ضریب
C_F	ضریب تصحیح
F_e	طول مؤثر دریاچه
H_0	ارتفاع تاج سد
H_C	ارتفاع آب در مخزن تحت تأثیر بارهای مختلف
H_F	افزایش ارتفاع آب ناشی از سیلاب
H_W	افزایش ارتفاع ناشی از باد
h_e	هد آب روی سرریزها
m	مقدار ثابت
O	دبی خروجی سد
O_R	خروجی مخزن
P_F	احتمال شکست (خطر روگذری)
Q_T	ورودی مخزن
R_S	هندسه مخزن
R_R	روندیابی مخزن
S	ذخیره مخزن
V_w	سرعت باد
Z	تابع عملکرد سد
λ_w	ضریب اصلاح مقادیر محاسبه شده H_w

۷- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری در انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود.

۸- منابع

مخزنی ونک و تونل انتقال آب به دشت‌های خان‌میرزا، چنارمحمودی و مونج، شرکت سهامی آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری.

میران‌بیگی، ب.، و افشار، ع. (۱۳۸۸). "تحلیل خطر برای روگذری سد با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف با استفاده از تکنیک نمونه‌گیری *Latin hypercube* و روش مونت‌کارلو (مورد مطالعاتی: سد کرخه تحت فرمان بهره‌برداری مشخص)"، دومین همایش ملی سد سازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

Abrishamchi A., Afshar A., and Kerachian, R. (2003). "Spillway capacity optimization under hydrologic uncertainties and flood routing", *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. B1, pp. 111-121.

Afshar A. and Takbiri, Z. (2009). "Optimal design and operation of fuse-gates considering water loss", *World Environmental and Water Resources Congress*, pp. 3053-3060.

Cheng S.T. (1982). Overtopping risk evaluation for an existing dam. PhD Thesis. University of Illinois at Urbana Champaign, USA.

Kuo J.T., Yen B.C., Hsu Y.C., and Lin H.F. (2007). "Risk analysis for dam overtopping-Feitsui reservoir as a case study", *Journal of Hydraulic Engrg*, Vol. 133, No.8, pp. 955-963.

Kwon H.H. and Moon Y. (2006). "Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams", *Stochastic Environmental Research Risk Assessment*, Vol. 20, No. 4, pp. 223-237.

Matlab 7.10, (2010). MathWorks Inc., Release 2010a.

Zhao B., Tung Y.K., Yeh K.C., and Yong, J.C. (1997). "Reliability analysis of hydraulic structures considering unit hydrograph uncertainty", *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 11, No. 1, pp. 33-50.

اسلامیان، س. و سلطانی کوپائی، س. (۱۳۸۱). تحلیل فراوانی سیل، انتشارات ارکان، اصفهان.

افشار، ع. و تکبیری، ز. (۱۳۸۷). "تحلیل خطر روگذری سد با احتساب عدم قطعیت‌های مدل روندیابی سیل (مطالعه موردی سد کرخه)"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.

تفرج نوروز، ع.، تجریشی، م.، ابریشم‌چی، ا. و خاکباز، ب. (۱۳۸۲). "بررسی تراز بیشینه سطح آب دریاچه هامون هیرمند و مدل قابلیت اعتماد دینامیک سیل بند آن"، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.

خاکباز، ب.، تجریشی، م.، و ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۰). "تحلیل خطر و قابلیت اعتماد روگذری سیل بند رودخانه ناشی از باد"، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

راهنمای استفاده از نرم افزار *HYFA* [iranrivers.ir/ HYFA](http://iranrivers.ir/software/hydrology/hyfa)

کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، (۱۳۷۹). روش برآورد ارتفاع آزاد در سدهای بزرگ، وزارت نیرو، کمیته فنی هیدرولیک، نشریه شماره ۲۹.

صفوی، ح. (۱۳۸۵). هیدرولوژی مهندسی، انتشارات ارکان، اصفهان.

منصوری، ن. (۱۳۹۰). تحلیل خطرپذیری روگذری آب در سد با در نظر گرفتن جنبه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی سد ونک)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

مهندسین مشاور آبدان فراز، (۱۳۸۸). مطالعات مرحله اول سد