

## تحلیل ریسک و عدم قطعیت شکست سد خاکی (مطالعه موردی: سد درودزن در استان فارس)

احسان گودرزی<sup>۱</sup>، ناصر شکری<sup>۲\*</sup> و مینا ضیائی<sup>۳</sup>

### چکیده

امروزه ارزیابی سطوح ایمنی سدهای موجود در دنیا بر اساس تحلیل ریسک و عدم قطعیت با روش‌های ریاضی و آمار به صورت فزاینده‌ای در حال انجام است. در این پژوهش کاربرد تحلیل ریسک شکست سد خاکی بر اثر سرریز شدن آب از بدنه با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای برخی از پارامترهای ورودی ارزیابی شده است. سپس با به کار بردن روش‌های احتمالاتی، احتمال وقوع این پدیده محاسبه شده است. در این مطالعه با انجام تحلیل فراوانی دبی‌های حداکثر سالیانه (۳۲ سال سیلاب) و با به کار بردن روش توزیع نهایی کل (GEV) و در نظر گرفتن هیدروگراف ورودی، تراز آب اولیه و ضریب دبی سرریز به عنوان متغیرهای غیرقطعی، احتمال سرریز شدن آب از بدنه سد برآورد شده است. بدین منظور، با بهره‌گیری از تکنیک روندیابی مخزن، بالاترین تراز آب در مخزن محاسبه شده و سپس از روش‌های مونت کارلو و لاتین هایپرکیوب برای انجام تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. همچنین برای بررسی اثر سرعت باد بر روی سرریز شدن آب از بدنه سد، تحلیل فراوانی برای داده‌های حداکثر سرعت باد (۳۴ سال) انجام شده و احتمال شکست سد با توجه به تأثیر همزمان سیلاب و باد برای دوره بازگشت ۵۰، ۲۰، ۱۰، ۲، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله و ۴ تراز سطح آب مختلف برآورد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آنالیز عدم قطعیت، تحلیل ریسک، سد، سیلاب، سد مخزنی، شکست.

**ارجاع:** گودرزی ا.، شکری ن. و ضیائی م. ۱۳۹۲. تحلیل ریسک و عدم قطعیت شکست سد خاکی (مطالعه موردی: سد درودزن در استان فارس). مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳):۳۱-۴۰.

۱- دانشجوی فوق دکتری منابع آب، گروه عمران، انستیتو تکنولوژی جورجیا، آمریکا.

۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، ایران.

۳- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه عمران، انستیتو تکنولوژی جورجیا، آمریکا.

\* نویسنده مسئول: [n\\_shokri819@yahoo.com](mailto:n_shokri819@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۰۴

## مقدمه

دبی طراحی سیلاب یک مخزن به طور معمول بر اساس تحلیل فراوانی یک متغیره دبی‌های حداکثر محاسبه می‌شود. در این راستا هیدروگراف سیل طراحی، درون مخزن روندیابی شده و بر اساس آن ظرفیت کنترل سیلاب و همچنین دبی طراحی سرریز آن تعیین می‌شود. با این حال سدهای خاکی از خطر شکست ناشی سرریز آب از بدنه رنج می‌برند و این پدیده باعث حدود یک سوم شکست‌های کنترل نشده در سدها شده است. طراحی استاندارد سدها به طور مطلق حل کننده این مشکل نیست و این پدیده به عنوان یک معضل در مهندسی سازه‌های آبی وجود دارد لازم به ذکر است پیچیدگی طراحی به دلیل عدم قطعیت متغیرها و روش‌های به کار برده شده است (ICOLD, 1973).

روش‌های قطعی از قبیل روش حداکثر سیلاب محتمل (PMF) که با فرض صفر بودن ریسک شکست سد کار می‌کنند، هنوز در طراحی مهندسی سد استفاده می‌شوند (استدینگر و همکاران، 1996). گسترش مدل‌های ریاضی و آماری، پیشرفت برنامه‌های کامپیوتری و همچنین دسترس بودن اطلاعات ثبت شده برای دوره‌های زمانی طولانی ایجاب می‌کند که از روش‌های قطعی در طراحی مهندسی به سوی روش‌های احتمالی، که عدم قطعیت در مدل‌ها و متغیرها را با درجه‌های بالاتری مورد ملاحظه قرار می‌دهند، حرکت کرد.

در گذشته مطالعاتی جهت لحاظ نمودن آنالیز ریسک و قابلیت اعتماد در ایمنی سدها انجام شده است. وود (1977) پدیده شکست را برای یک سد خاکی با استفاده از روش تبدیل انتگرالی ارزیابی نمود. چنگ و همکاران (1982) ریسک این پدیده را با کاربرد روش‌های مختلفی از قبیل روش انتگرال‌گیری مستقیم، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، روش MFDSM و روش MFOSM بررسی کرد و نتایج روش‌های فوق را با یکدیگر مقایسه کرد. کمیته ایمنی سدهای موجود در دنیا، یک نمایه برای ریسک پدیده سرریز شدن آب از بدنه سد و در نتیجه شکست ساختمان سد پیشنهاد کرده و مفهوم طراحی بر مبنای ریسک را برای سازه‌های آبی شرح کرده است. چنگ و همکاران (1986) روش جدیدی را برای تخمین ریسک پدیده سرریز شدن آب از بدنه سد بر اثر باد ارایه کردند. ونگ و بولز (2005) موقعیت شکاف گسیختگی ناشی از

سرریز شدن آب بر اثر موج را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جهت وزش باد به اندازه سرعت آن روی مکان گسیختگی نقش دارد. کویوو و همکاران (2007) ریسک شکست سد را با در نظر گرفتن وجود دریچه سرریز تخمین زدند. اسلامیان و فیضی (2007) با به کار بردن روش گشتاور خطی ماکزیم بارش ماهیانه را برای اصفهان به عنوان یک منطقه خشک مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر، اسلامیان (2009) تحلیل فراوانی باد را آنالیز و بررسی کردند. در این پژوهش با ارایه یک برنامه برای بازدید از سد، فواصل زمانی بهینه برای سرکشی تعیین می‌گردد. کویوو و همکاران (2007) با در نظر گرفتن پنج روش MCS, HPEM, RPEM, MFOSM و چهار تراز اولیه سطح آب در مخزن سد فیتشو تحلیل ریسک را برای پنج دوره بازگشت انجام دادند.

در تحلیل ریسک شکست سد ناشی از سیلاب صرف نظر کردن از اثر سرعت باد و استفاده از یک نمونه بزرگ در نمونه‌گیری تحلیل عدم قطعیت، خلایی است که در این مطالعات وجود دارد. از این‌رو هدف پژوهش حاضر محاسبه حداکثر ارتفاع آب حین وقوع سیلاب و همچنین سرعت باد در مخزن سد با مدنظر قرار دادن سه فاکتور غیرقطعی تراز اولیه سطح آب، هیدروگراف ورودی مخزن و ضریب دبی سرریز است. برای تحلیل عدم قطعیت و همچنین احتمال وقوع شکست ناشی از سرریز شدن آب از بدنه سد روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS) و نمونه‌گیری (LHS) به کار گرفته شده است. دلایل عمده استفاده از این تکنیک‌ها عبارتند از:

۱. مشکل اصلی در متغیرهای غیرقطعی مدل‌های غیرخطی و پیچیده از قبیل روندیابی مخزن، استخراج تابع توزیع احتمال PDF متغیرهای غیرقطعی و استفاده از تابع توزیع آماری احتمالاتی خروجی‌های مدل است.
۲. هر تحلیلی در دنیای واقعی بر اساس داده‌های ثبت شده پیشین که به طور عموم پیوستگی کافی نداشته و دارای انواع خطاها می‌باشند، صورت می‌گیرد. از این‌رو تکنیک نمونه‌گیری یک روش کاربردی است که تلاش می‌کند با ترکیب نمودن چندین متغیر ورودی تصادفی، بهترین نتیجه را به دست آورد. این نتایج می‌تواند به صورت آماری و برای پیش‌بینی رفتار سیستم تحلیل شود. از آن جا که دقت روش‌های نمونه‌گیری به شدت به اندازه نمونه وابسته است، در این پژوهش حجم زیادی از نمونه‌ها

آب، برآورد دوره بازگشت باد ( $T_w$ ) و سرعت متناظر با آن ( $V_T$ ) در مخزن ضروری است.

USBR (۱۹۹۲) جهت محاسبه پارامتر بالا آمدگی سطح آب بر اثر وزش باد معادله زیر را ارائه کرده است:

$$h_t = \frac{V^2 F}{6.2772D} \quad (2)$$

در این معادله  $h_t$  بالا آمدگی سطح آب در اثر باد (m)، F

طول خیز موج (km)، V سرعت باد روی سطح آب ( $\frac{km}{h}$ )

و D متوسط عمق آب در طول خیز موج (m) است.

اگر به هر دلیلی موج به یک سازه نزدیک شود، مانند زمانی که یک موج آب به بدنه سد برخورد می‌کند، قسمتی از انرژی به دلیل تلاطم تلف شده و باقی‌مانده انرژی باعث بالا زدن آب از دیوار سد می‌شود. بر اساس ارتفاع بالازدگی، می‌توان تعیین کرد که آیا پدیده سرریز شدن آب از بدنه سد رخ خواهد داد یا خیر. بالازدگی ناشی از موج به صورت اختلاف ارتفاع تراز سطح آب در پای شیب تا بالاترین تراز سطح آب ناشی از برخورد موج به بدنه سد تعریف می‌شود. هوگزر (۲۰۰۴) معادله زیر را برای برآورد پارامتر مذکور ارائه کرد:

$$\frac{h_r}{h} = 3.84 \times \tan q \left( \frac{M_F}{rgh^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن  $h_r$  ارتفاع بالازدگی موج (m)،  $h$  عمق آب از بستر تا ارتفاع سطح آب (m)،  $r$  چگالی آب،  $M_F$  سیلان لحظه‌ای موج در واحد عرض بوده که بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\left( \frac{M_F}{rgh^2} \right)_{Max} = A_0 \left( \frac{h}{gT^2} \right)^{-A_2} \quad (4)$$

که در آن،

$$A_0 = 0.6392 \times \left( \frac{H}{h} \right)^{2.0256} \quad (5)$$

$$A_1 = 0.1804 \times \left( \frac{H}{h} \right)^{-0.391} \quad (6)$$

و H ارتفاع موج سد می‌باشند (بوولز و ونگ، ۲۰۰۵). در نهایت ارتفاع موج از حاصل جمع بالازدگی ناشی از باد و موج، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_w = h_r + h_t \quad (7)$$

تحلیل عدم قطعیت

ارزیابی واکنش سیستم با قطعیت مشخص ممکن نیست زیرا مؤلفه‌های مختلف سیستم تابعی از پارامترهای غیرقطعی

(۲۰۰۰) برای مونت کارلو (MCS) و ۱۰۰۰۰ برای (LHS)) برای افزایش دقت محاسبات مدنظر قرار گرفته شده است. اندازه نمونه در تکنیک LHS نصف تکنیک MCS است، چرا که نمونه‌گیری LHS با وجود پیچیدگی با تعداد نمونه کمتری همگرا می‌شود.

## مواد و روش‌ها

مدل سیلاب (روندیابی مخزن)

هدف اصلی تحلیل پدیده شکست ناشی از سرریز شدن آب از بدنه یک سد خاکی، تخمین ارتفاع آب در مخزن با توجه به دبی ورودی و سرعت باد و مقایسه با ارتفاع تاج است. در این راستا سیلاب درون مخزن روندیابی می‌شود که ساده‌ترین روش استفاده از معادله پیوستگی است. که فرم آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{S_t - S_{t+1}}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (1)$$

که در آن  $I_t$  و  $I_{t+1}$  جریان‌های ورودی به مخزن،  $Q_t$  و  $Q_{t+1}$  جریان‌های خروجی از مخزن،  $S_t$  و  $S_{t+1}$  حجم ذخیره مخزن در زمان‌های t و t+1 می‌باشد و  $\Delta t$  اختلاف فواصل زمانی است.

می‌توان با حل معادله ۱ به صورت گام به گام حداکثر ارتفاع آب مخزن را محاسبه کرد. فواصل زمانی  $\Delta t$  مشخص کننده طول هر گام در معادله روندیابی مخزن بوده و دقت نتایج خروجی با کاهش  $\Delta t$  افزایش می‌یابد. در این پژوهش گام زمانی ۳۰ دقیقه‌ای برای افزایش دقت نتایج و همچنین کاهش اثر غیرقطعی بودن  $\Delta t$  انتخاب شده است. برای حل معادله روندیابی مخزن روش رانژکوتای مرتبه چهارم استفاده شده است.

مدل باد

حرکت افقی هوا، باد نامیده می‌شود و هنگامی ایجاد می‌شود که توازن دمایی جو به دلیل عدم تعادل انرژی بر هم بخورد. باد می‌تواند با ایجاد موج و بالا بردن ارتفاع آب در مخزن سد خاکی پدیده شکست را افزایش دهد. به عبارت دیگر اگر تراز آب خیلی نزدیک به تاج باشد موج ایجاد شده می‌تواند از روی سد عبور کرده و امکان شکست آن را فراهم نماید. برآمدگی سطح آب بر اثر وزش باد و بالازدگی سطح آب ناشی از موج دو فاکتور عمده برای تخمین اثر سرعت باد بر تراز سطح آب مخزن هستند. پس برای محاسبه فاکتورهای مذکور و در نتیجه تعیین ارتفاع

شمال غربی شیراز روی رودخانه کر تا دریاچه بختگان را شامل می‌شود. ارتفاع بلندترین نقطه حوضه از سطح دریا ۳۷۴۹ متر و در شمال غربی حوضه است. کل حجم ذخیره و مرده مخزن سد به ترتیب برابر ۹۹۳ و ۱۳۳ میلیون مترمکعب است. برخی از مشخصات اصلی سد درودزن در جدول ۱ آمده است. نمای شماتیک سد درودزن و حوضه آبریز آن نیز در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نیاز آبی ۱۱۲۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی و همچنین نیازهای شهری و صنعتی شیراز، مرودشت و زرقان را سد درودزن فراهم می‌کند.

#### آزمون عدم همخوانی (Outlier)

در اولین گام در این پژوهش جهت تعیین داده‌های پرت آزمون عدم همخوانی روی داده‌های حداکثر دبی سالانه برای یک دوره ۳۴ ساله (از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۸۶) انجام شده است. آزمون همخوانی با روش Bulletin 17B انجام شده است (مک کوئین، ۲۰۰۵). نتایج آزمون نشان می‌دهد باید یک رویداد از سری داده‌های سیل حداکثر سالانه حذف شود. بنابراین تعداد داده‌های ثبت شده به ۳۳ عدد کاهش یافته است.

#### تحلیل فراوانی

برای تخمین حداکثر دبی سیل در دوره بازگشت مختلف، توزیع‌های آماری مختلفی بر مقادیر حداکثر سیلاب سالیانه برازش داده شده است. توزیع‌های آماری مورد استفاده عبارت بودند از گامیل حداکثر، GEV، گاما، log-Logestic، لوگ گاما، (Gen-Gama4p)، توزیع نرمال، پیرسون تیپ ۵ (p3) و لگاریتم پیرسون تیپ ۳. در نهایت می‌توان گفت که مناسب‌ترین توزیع احتمال برای داده‌های حداکثر سیلاب سالیانه توزیع GEV می‌باشد (جدول ۲). به علاوه با استفاده از تحلیلی فراوانی سیل، میانگین و انحراف معیار دبی حداکثر برای دوره بازگشت مختلف محاسبه شده است (جدول ۳).

به منظور تخمین حداکثر سرعت باد در دوره بازگشت مختلف توزیع‌های آماری مختلفی بر داده‌های حداکثر سرعت باد سالانه (دوره ۳۴ ساله (۱۳۵۳ تا ۱۳۸۶)) برازش داده شده است. توزیع‌های مورد استفاده عبارتند از گامیل حداکثر، GEV، Rayleigh، گاما، لوگ گاما، گاما سه پارامتره، ویبول، ویبول سه پارامتره، لوگ نرمال سه پارامتره، نرمال، پیرسون تیپ ۵ سه پارامتره و لگاریتم پیرسون تیپ ۳ (جدول ۴). لازم به ذکر است توزیع‌های برازش داده شده توزیع GEV برای داده‌های حداکثر سرعت باد سالانه

هستند. عدم قطعیت به شرایط یا متغیرهایی نسبت داده می‌شود که به طور دقیق قابل کمی‌سازی نیستند. هر متغیر غیرقطعی به طور طبیعی دارای ویژگی‌های تصادفی بوده و در معرض سطوح آشکاری از خطا قرار دارد. در این پژوهش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) و نمونه‌گیری (LHS) به عنوان دو روش نمونه‌گیری مهم برای کمی‌سازی عدم قطعیت متغیرهای تصادفی غیرقطعی استفاده شده است.

فرآیند مونت کارلو یک شبیه‌سازی عددی برای برگرداندن متغیرهای آماری بر اساس یک توزیع آماری مشخص است. به بیان دیگر مونت کارلو با استفاده از مقادیر تصادفی فرآیند مطلوب را مدل می‌کند. در این روش نمونه‌گیری، افزایش اندازه نمونه در مدل، پیش‌نیاز دستیابی به نتایج دقیق‌تر است.

برای بالا بردن دقت خروجی‌های مونت کارلو، روش‌های کاهش واریانس مختلفی وجود دارد که بدون افزایش روش نمونه این کار را انجام می‌دهد. (تانگ و همکاران، ۲۰۰۵). LHS یکی از روش‌های عمده کاهش واریانس می‌باشد که کارایی پارامترهای آماری خروجی را افزایش می‌دهد. در روش LHS، هنگام نمونه‌گیری از یک تابع  $M$  متغیره، تقسیم‌بندی محدوده‌ها با احتمال وقوع  $1/M$  صورت می‌گیرد که البته این محدوده‌ها با یکدیگر همپوشانی ندارند. برای یک توزیع احتمال مطلوب، LHS یک مقدار تصادفی از هر یک از محدوده متغیرها بدون تکرار استخراج می‌کند. سرعت همگرایی LHS از مونت کارلو و همچنین دیگر نمونه‌گیری‌های طبقه‌بندی شده بیشتر است (سینگ و همکاران، ۲۰۰۷). الگوریتم نمونه‌گیری متغیرهای تصادفی مستقل ( $k$ ) با استفاده از تکنیک LHS را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. تقسیم‌بندی محدوده متغیرهای ورودی به مقدار  $M$

۲. ایجاد مقدار  $M$  داده تصادفی از  $(1/M)$

۳. انجام جایگشت‌های تصادفی

۴. تعیین متغیر تصادفی  $x_{i,j}$  با استفاده از معادله زیر:

$$x_{i,j} = F_j^{-1} \left( \frac{1}{M} [P_{i,j} - r_{i,j}] \right) \quad (8)$$

که در آن  $x_{i,j}$  عدد تصادفی و  $P_{i,j}$  جایگشت تصادفی می‌باشد (کوون و سوون، ۲۰۰۵).

#### مطالعه موردی (سد درودزن)

سد درودزن از مهمترین سدهای استان فارس در جنوب ایران است. حوضه این سد خاکی چند منظوره، در نزدیکی

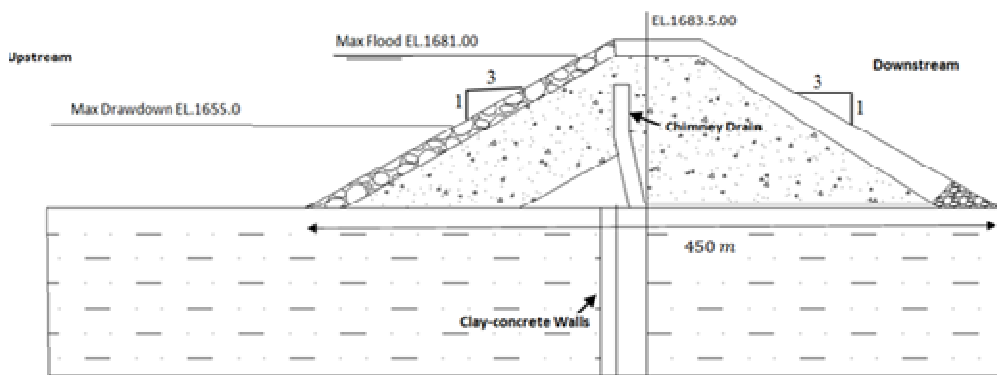
انتخاب و سرعت باد برای دوره‌های بازگشت ۲، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ سال محاسبه شد (جدول ۵).



شکل ۱- حوضه آبریز بالادست سد درودزن

جدول ۱- مشخصات سد درودزن

سد	توضیح
نوع	خاکی
ارتفاع	۵۷ متر
طول تاج	۷۱۰ متر
عرض تاج	۱۰ متر
تراز تاج	۱۶۸۳/۵
حداکثر عرض در پی	۴۵۰ متر
حجم خاکریزی	۴/۸ میلیون متر مکعب
تراز حداکثر سطح آب	۱۶۸۱
جنس پی	سنگ لیمستون
شیب بالادست	3H : 1V
شیب پایین دست	3H : 1V



شکل ۲- نمای شماتیک از سد درودزن

جدول ۲- برازش توزیع‌های مختلف آماری بر حداکثر مقادیر سیلاب سالانه

Kolmogorov-Smirnov			توزیع احتمال
نتیجه	مقادیر جدول	مقادیر آماری	
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۹۹	گامبل حداکثر
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۸۵	GEV
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۸۶	گاما
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۱۱۰	لوگ-گاما
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۹۱	لوگ-لوجستیک
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۱۹۵	گاما چهار پارامتره
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۱۱۹	نرمال
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۸۹	پیرسون (۵) سه پارامتره
مطلوب	۰/۲۳۰	۰/۰۷۴	لوگ-پیرسون (۳)

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار دبی های حداکثر در دوره بازگشت مختلف

دوره بازگشت- پارامتر	۲ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
<i>m</i>	۵۲۴/۱۹۱	۷۵۵/۳۸۸	۸۷۱/۸۷۶	۱۰۴۸/۴	۱۲۰۱/۱۴
<i>S</i>	۲۱/۵۶	۵۲/۷۴	۷۸/۸۳	۱۲۶/۳۰	۱۷۳/۸۵

جدول 4- برازش توزیع‌های مختلف آماری بر مقادیر حداکثر سرعت باد سالانه

Kolmogorov-Smirnov			توزیع احتمال
نتیجه	مقادیر جدول	مقادیر آماری	
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۱۹۶	گامبل حداکثر
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۰۴	GEV
نامطلوب	۰/۳۲۷	۰/۳۷۱	Rayleigh
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۴۳	گاما
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۲۸	لوگ-گاما
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۴۰	گاما سه پارامتره
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۳۴	ویبول
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۴۷	ویبول سه پارامتره
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۳۷	لوگ - نرمال سه پارامتره
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۶۶	نرمال
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۳۵	پیرسون (۵) سه پارامتره
مطلوب	۰/۳۲۷	۰/۲۴۰	لوگ-پیرسون (۳)

جدول 5- مقادیر سرعت باد و حداقل زمان رسیدن به حداکثر ارتفاع موج

$t_{min} (hr)$	$V (km/h)$	CDF	پارامتر - دوره بازگشت
0/24	53/05	0/500	2
0/22	66/66	0/900	10
0/21	71/61	0/950	20
0/20	77/83	0/980	50
0/20	82/35	0/990	100

ضریب دبی سرریز (C): متوسط و انحراف معیار ضریب سرریز به ترتیب برابر ۲/۰۵ و ۰/۰۶۹ فرض شده‌اند. مشخصات پارامترهای ورودی از قبیل میانگین (M)، انحراف معیار (σ) و توابع توزیع احتمال (PDF) که با داده‌های تصادفی غیرقطعی برازش داده شده‌اند، در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول 7- خصوصیت آماری پارامترهای متغیر

متغیر	نوع	PDF	m	S
$H_0$	تصادفی	نرمال	جدول (۱)	۱/۶۳۴۱
I	تصادفی	گامبل	جدول (۳)	جدول (۳)
C	تصادفی	نرمال	۲/۰۵	۰/۰۶۹

#### تحلیل ریسک و شکست سد

شکست یک سیستم زمانی به وقوع می‌پیوندد که سیستم قادر به انجام عملکرد قابل انتظار نباشد. شکست می‌تواند باری ( $L_F$ ) تعریف شود که از مقاومت و یا ظرفیت سیستم (R) فراتر رود.

شناسایی بار وارده و مقاومت اساس آنالیز ریسک بوده و به نوع ساختار هیدرولیکی و فیزیک مسأله بستگی دارد.

#### فاکتورهای عدم قطعیت

سیلاب حداکثر با دوره بازگشت مختلف ( $I_t$ ): مهمترین دلیل برای انتخاب این پارامتر به عنوان متغیر عدم قطعیت، خطا در ثبت داده‌ها، فقدان داده و وجود دبی‌های جانبی ورودی به مخزن می‌باشد. مقادیر میانگین و انحراف معیار سیلاب حداکثر در جدول ۳ آمده است.

تراز اولیه سطح آب ( $H_0$ ): متوسط تراز سطح آب در مخزن سد با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و ثبت شده تراز آب در یک دوره ۳۳ ساله (۱۳۵۳ تا ۱۳۸۶) برآورد گردیده است. میانگین و انحراف معیار داده‌ها به ترتیب برابر ۴۳/۱۶ و ۱/۶۳ متر می‌باشد. به علاوه ۶ عمق دیگر (با  $\Delta H$  ۱/۵ متری) به عنوان عمق اولیه و به منظور در نظر گرفتن اثر تغییرات عمق اولیه بر احتمال پدیده سرریز شدن آب از بدنه فرض شده‌اند (جدول ۶).

جدول 6- مقادیر حداقل عمق اولیه آب

$m_{H_0} (m)$	۴۳/۱۶	۴۴/۶۶	۴۶/۱۶	۴۷/۶۶	۴۹/۱۶	۵۰/۶۶	۵۲/۱۶
---------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

## ریسک شکست سد ناشی از سیلاب

بر اساس معادلات فوق، احتمال شکست در اثر سیلاب با دوره بازگشت ۲، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال با در نظر گرفتن سه متغیر غیرقطعی حداکثر سیلاب ورودی، تراز اولیه آب در مخزن و ضریب دبی سرریز محاسبه شده است. متغیرهای غیرقطعی به صورت متغیر مستقل فرض شده و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) (با اندازه نمونه ۲۰۰۰۰) و نمونه‌گیری لاتین‌هایپرکیوب (LHS) با اندازه نمونه ۱۰۰۰۰ برای انجام تحلیل عدم قطعیت به کار گرفته شده‌اند. احتمال شکست سد بر اثر سیلاب با دوره بازگشت مختلف و مقادیر متفاوت تراز اولیه آب در جدول‌های ۸ و ۹ ارایه شده است.

شکل‌های ۳ و ۴ نتایج ریسک شکست محاسبه شده برای ترازهای آب اولیه ۴۴/۶۶ و ۴۹/۱۶ را نشان می‌دهد.

در تحلیل پدیده سرریز شدن آب از بدنه سد، ارتفاع آب در مخزن سد ( $H_{max}$ ) و ارتفاع سد ( $H_R$ ) به ترتیب به عنوان بار و مقاومت سیستم در نظر گرفته می‌شوند. ریسک شکست ناشی از دبی ورودی و سرعت باد را می‌توان توسط توابع کاربردی زیر بیان کرد (کوون و موون، ۲۰۰۵):

$$Z_{Flood} = \ln \frac{H_R}{H_{Max}} \quad (9)$$

$$Z_{Flood \& Wind} = \ln \frac{H_R}{H_{Max} + h_w} \quad (10)$$

در نهایت ریسک شکست به صورت زیر تعیین می‌شود:

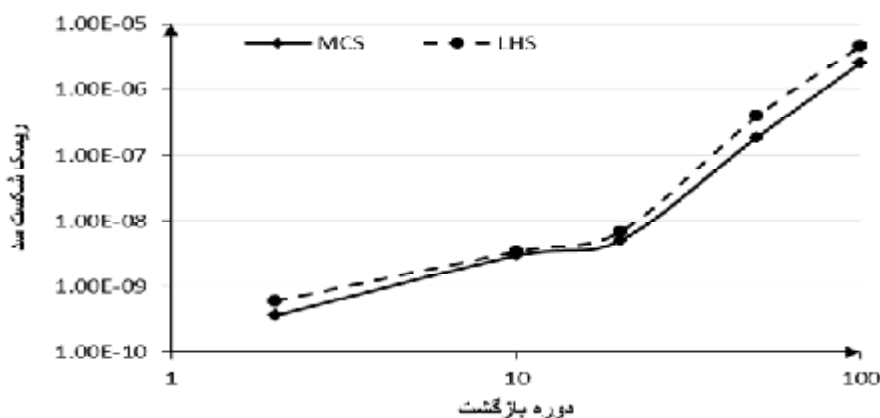
$$Risk = 1 - j \left( \frac{m_z}{S_z} \right) = 1 - j(b) \quad (11)$$

جدول 8- ریسک سرریز شدن ناشی از سیلاب به روش مونت کارلو

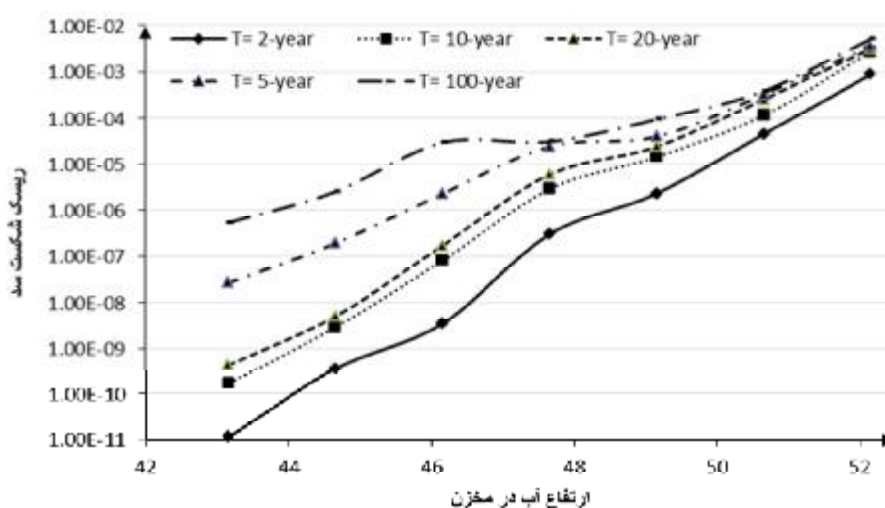
$H_0(m)$	دوره بازگشت				
	۲ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
۴۳/۱۶	$1/13 \times 10^{-7}$	$1/67 \times 10^{-10}$	$4/36 \times 10^{-10}$	$2/6 \times 10^{-8}$	$5/30 \times 10^{-7}$
۴۴/۶۶	$3/6 \times 10^{-10}$	$2/91 \times 10^{-9}$	$4/99 \times 10^{-9}$	$1/88 \times 10^{-7}$	$2/53 \times 10^{-6}$
۴۶/۱۶	$3/47 \times 10^{-9}$	$7/95 \times 10^{-8}$	$1/69 \times 10^{-7}$	$2/28 \times 10^{-6}$	$2/99 \times 10^{-5}$
۴۷/۶۶	$2/95 \times 10^{-7}$	$2/88 \times 10^{-6}$	$5/96 \times 10^{-6}$	$2/46 \times 10^{-5}$	$3/13 \times 10^{-5}$
۴۹/۱۶	$2/31 \times 10^{-6}$	$1/46 \times 10^{-5}$	$2/45 \times 10^{-5}$	$4/02 \times 10^{-5}$	$9/52 \times 10^{-5}$
۵۰/۶۶	$4/58 \times 10^{-5}$	$1/16 \times 10^{-4}$	$2/59 \times 10^{-4}$	$3/30 \times 10^{-4}$	$3/89 \times 10^{-4}$
۵۲/۱۶	$8/78 \times 10^{-4}$	$2/75 \times 10^{-3}$	$3/21 \times 10^{-3}$	$3/73 \times 10^{-3}$	$5/23 \times 10^{-3}$

جدول 9- ریسک سرریز شدن ناشی از سیلاب به روش LHS

$H_0(m)$	دوره بازگشت				
	۲ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
۴۳/۱۶	$5/66 \times 10^{-11}$	$4/56 \times 10^{-10}$	$7/83 \times 10^{-10}$	$3/08 \times 10^{-8}$	$8/06 \times 10^{-7}$
۴۴/۶۶	$5/95 \times 10^{-10}$	$3/35 \times 10^{-9}$	$6/78 \times 10^{-9}$	$3/94 \times 10^{-7}$	$4/6 \times 10^{-6}$
۴۶/۱۶	$4/04 \times 10^{-9}$	$1/54 \times 10^{-7}$	$2/69 \times 10^{-7}$	$5/63 \times 10^{-6}$	$4/4 \times 10^{-5}$
۴۷/۶۶	$7/8 \times 10^{-7}$	$5/92 \times 10^{-6}$	$9/8 \times 10^{-6}$	$5/23 \times 10^{-5}$	$8/73 \times 10^{-5}$
۴۹/۱۶	$5/7 \times 10^{-6}$	$3/79 \times 10^{-5}$	$4/25 \times 10^{-5}$	$9/63 \times 10^{-5}$	$1/77 \times 10^{-4}$
۵۰/۶۶	$6/33 \times 10^{-5}$	$1/76 \times 10^{-4}$	$3/78 \times 10^{-4}$	$4/09 \times 10^{-4}$	$7/76 \times 10^{-4}$
۵۲/۱۶	$9/95 \times 10^{-4}$	$3/74 \times 10^{-3}$	$4/43 \times 10^{-3}$	$4/9 \times 10^{-3}$	$6/12 \times 10^{-3}$



شکل 3- تغییرات ریسک سرریز شدن در مقابل دوره بازگشت



شکل 4- تغییرات ریسک سرریز شدن در مقابل ارتفاع آبدر روش مونته کارلو

بازگشت و ۴ تراز سطح آب اولیه با استفاده از روش‌های MCS و LHS ارزیابی شده است. (جدول‌های ۱۰ و ۱۱). در این مطالعه فرض شده که همبستگی بین سرعت باد و جریان ورودی وجود دارند. بنابراین مقادیر سیلاب و باد به طور جداگانه و با اندازه نمونه ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ به ترتیب در روش MCS و LHS ایجاد شده‌اند. ریسک شکست سد برای دو روش مذکور با افزایش دوره بازگشت سیل بالا می‌رود.

ریسک شکست سد بر اثر سیلاب و باد

پس از تعیین سرعت باد با دوره بازگشت مختلف، با استفاده از معادلات ارایه شده توسط USBR، بالازدگی سطح آب بر اثر وزش باد و موج محاسبه شده است. نظر به این که سطح آب اولیه به عنوان یک فاکتور غیرقطعی فرض شده است پس پارامتر مذکور تابعی از تراز سطح آب اولیه در مخزن بوده و در معرض عدم قطعیت قرار دارد. ریسک شکست سد ناشی از سیلاب مختلف و سرعت باد برای ۵ دوره



جدول 10- ریسک سرریز شدن ناشی از باد و سیل به روش MCS

دوره بازگشت سرعت باد	عمق اولیه آب (متر)	دوره بازگشت سیلاب				
		۲ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
۲	۴۷/۶۶	$3/45 \times 10^{-7}$	$3/03 \times 10^{-6}$	$6/46 \times 10^{-6}$	$2/56 \times 10^{-5}$	$3/25 \times 10^{-5}$
	۴۹/۱۶	$3/63 \times 10^{-6}$	$1/78 \times 10^{-5}$	$3/81 \times 10^{-5}$	$9/18 \times 10^{-5}$	$2/09 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$5/86 \times 10^{-5}$	$1/51 \times 10^{-4}$	$3/82 \times 10^{-4}$	$5/6 \times 10^{-4}$	$9/34 \times 10^{-4}$
	۵۲/۱۶	$1/19 \times 10^{-3}$	$3/32 \times 10^{-3}$	$4/7 \times 10^{-3}$	$6/91 \times 10^{-3}$	$8/74 \times 10^{-3}$
۱۰	۴۷/۶۶	$5/81 \times 10^{-7}$	$3/83 \times 10^{-6}$	$1/48 \times 10^{-5}$	$4/44 \times 10^{-5}$	$7/67 \times 10^{-5}$
	۴۹/۱۶	$3/92 \times 10^{-6}$	$1/92 \times 10^{-5}$	$4/12 \times 10^{-5}$	$9/94 \times 10^{-5}$	$2/25 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$6/31 \times 10^{-5}$	$1/63 \times 10^{-4}$	$4/12 \times 10^{-4}$	$6/05 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$9/83 \times 10^{-4}$	$3/58 \times 10^{-3}$	$5/08 \times 10^{-3}$	$7/49 \times 10^{-3}$	$9/01 \times 10^{-3}$
۲۰	۴۷/۶۶	$6/36 \times 10^{-7}$	$4/19 \times 10^{-6}$	$1/62 \times 10^{-5}$	$4/87 \times 10^{-5}$	$8/34 \times 10^{-5}$
	۴۹/۱۶	$4/22 \times 10^{-6}$	$2/06 \times 10^{-5}$	$4/43 \times 10^{-5}$	$1/07 \times 10^{-4}$	$2/42 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$6/66 \times 10^{-5}$	$1/72 \times 10^{-4}$	$4/35 \times 10^{-4}$	$6/39 \times 10^{-4}$	$1/06 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1/33 \times 10^{-3}$	$3/71 \times 10^{-3}$	$5/27 \times 10^{-3}$	$7/78 \times 10^{-3}$	$9/61 \times 10^{-3}$
۵۰	۴۷/۶۶	$7/99 \times 10^{-7}$	$5/24 \times 10^{-6}$	$2/04 \times 10^{-5}$	$6/11 \times 10^{-5}$	$1/03 \times 10^{-4}$
	۴۹/۱۶	$5/29 \times 10^{-6}$	$2/57 \times 10^{-5}$	$5/56 \times 10^{-5}$	$1/35 \times 10^{-4}$	$3/01 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$8/34 \times 10^{-5}$	$2/15 \times 10^{-4}$	$5/45 \times 10^{-4}$	$8/02 \times 10^{-4}$	$1/3 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1/67 \times 10^{-3}$	$4/64 \times 10^{-3}$	$6/60 \times 10^{-3}$	$9/77 \times 10^{-3}$	$1/62 \times 10^{-2}$
۱۰۰	۴۷/۶۶	$1/07 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$2/73 \times 10^{-5}$	$8/18 \times 10^{-5}$	$1/36 \times 10^{-4}$
	۴۹/۱۶	$7/08 \times 10^{-6}$	$3/44 \times 10^{-5}$	$7/44 \times 10^{-5}$	$1/81 \times 10^{-4}$	$4/01 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$1/11 \times 10^{-4}$	$2/87 \times 10^{-4}$	$7/29 \times 10^{-4}$	$1/07 \times 10^{-3}$	$1/71 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$2/23 \times 10^{-3}$	$6/19 \times 10^{-3}$	$8/83 \times 10^{-3}$	$1/31 \times 10^{-2}$	$2/17 \times 10^{-2}$

جدول 11- ریسک سرریز شدن ناشی از باد و سیل به روش LHS

دوره بازگشت سرعت باد	عمق اولیه آب (متر)	دوره بازگشت سیلاب				
		۲ ساله	۱۰ ساله	۲۰ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله
۲	۴۷/۶۶	$7/56 \times 10^{-7}$	$5/13 \times 10^{-6}$	$1/07 \times 10^{-5}$	$3/61 \times 10^{-5}$	$5/35 \times 10^{-5}$
	۴۹/۱۶	$4/85 \times 10^{-6}$	$2/39 \times 10^{-5}$	$5/04 \times 10^{-5}$	$1/22 \times 10^{-4}$	$2/7 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$6/02 \times 10^{-5}$	$1/59 \times 10^{-4}$	$3/97 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4}$	$1/01 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1/21 \times 10^{-3}$	$3/34 \times 10^{-3}$	$4/74 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$	$8/92 \times 10^{-3}$
۱۰	۴۷/۶۶	$8/87 \times 10^{-7}$	$5/93 \times 10^{-6}$	$1/9 \times 10^{-5}$	$5/49 \times 10^{-5}$	$9/77 \times 10^{-5}$
	۴۹/۱۶	$5/14 \times 10^{-6}$	$2/53 \times 10^{-5}$	$5/34 \times 10^{-5}$	$1/3 \times 10^{-4}$	$2/86 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$6/47 \times 10^{-5}$	$1/71 \times 10^{-4}$	$4/27 \times 10^{-4}$	$6/44 \times 10^{-4}$	$1/08 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1 \times 10^{-3}$	$3/68 \times 10^{-3}$	$5/27 \times 10^{-3}$	$7/98 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
۲۰	۴۷/۶۶	$9/34 \times 10^{-7}$	$6/28 \times 10^{-6}$	$2/04 \times 10^{-5}$	$5/92 \times 10^{-5}$	$1/04 \times 10^{-4}$
	۴۹/۱۶	$5/44 \times 10^{-6}$	$2/67 \times 10^{-5}$	$5/65 \times 10^{-5}$	$1/38 \times 10^{-4}$	$3/03 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$6/81 \times 10^{-5}$	$1/79 \times 10^{-4}$	$4/5 \times 10^{-4}$	$6/79 \times 10^{-4}$	$1/14 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1/35 \times 10^{-3}$	$3/8 \times 10^{-3}$	$5/46 \times 10^{-3}$	$8/27 \times 10^{-3}$	$1/06 \times 10^{-2}$
۵۰	۴۷/۶۶	$1/1 \times 10^{-6}$	$7/34 \times 10^{-6}$	$2/45 \times 10^{-5}$	$7/16 \times 10^{-5}$	$1/24 \times 10^{-4}$
	۴۹/۱۶	$6/51 \times 10^{-6}$	$183 \times 10^{-5}$	$6/78 \times 10^{-5}$	$1/65 \times 10^{-4}$	$3/62 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$8/49 \times 10^{-5}$	$2/33 \times 10^{-4}$	$5/61 \times 10^{-4}$	$8/42 \times 10^{-4}$	$1/38 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$1/69 \times 10^{-3}$	$4/74 \times 10^{-3}$	$6/8 \times 10^{-3}$	$1/03 \times 10^{-2}$	$1/72 \times 10^{-2}$
۱۰۰	۴۷/۶۶	$1/37 \times 10^{-6}$	$9/1 \times 10^{-6}$	$3/15 \times 10^{-5}$	$9/23 \times 10^{-5}$	$1/57 \times 10^{-4}$
	۴۹/۱۶	$8/3 \times 10^{-6}$	$4/05 \times 10^{-5}$	$8/66 \times 10^{-5}$	$2/11 \times 10^{-4}$	$4/62 \times 10^{-4}$
	۵۰/۶۶	$1/13 \times 10^{-4}$	$2/95 \times 10^{-4}$	$7/44 \times 10^{-4}$	$1/11 \times 10^{-3}$	$1/79 \times 10^{-3}$
	۵۲/۱۶	$2/25 \times 10^{-3}$	$6/29 \times 10^{-3}$	$9/02 \times 10^{-3}$	$1/36 \times 10^{-2}$	$2/27 \times 10^{-2}$

- for an Arid Region in Isfahan Province, Iran, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46(4):494-503.
3. Eslamian S. S. 2009. Wind Modeling and Frequency Analysis (WMFA), *International Journal of Global Energy Issues, Special Issue Volume, Indersciences*.
  4. Hughes S. A. 2004. Estimation of Wave Run-Up on Smooth Impermeable Slopes Using the Wave Momentum Flux Parameter. *Coast Eng.* 51:1085-104.
  5. International Commission on Large Dams (ICOLD). 1973. *Lessons from dam incidents (reduced edition)*. ICOLD, Paris.
  6. 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 Engineering*. 133(8):955-963.
  7. Kwon H. and Moon Y. 2005. *Improvement of Overtopping Risk Evaluations Using Probabilistic Concepts for Existing Dams*. Springer. 20: 223-237.
  8. McCuen R. 2000. *Hydrologic Analysis and Design*. (New Jersey) Pearson Prentice Hall.
  9. Singh VP. Jain S K. and Tyagi A. 2007. *Risk and Reliability Analysis*. American Society of Civil Engineers.
  10. Stedinger J. R. Heath D. and Thompson K. 1996. *Risk Analysis for Dam Safety Evaluation. Hydrologic Risk*. (Cornel University). U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources.
  11. Tung Y. K. Yen B. C. and Melching C. S. 2005. *Hydrosystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis*. (New York). McGraw-Hill Professional.
  12. USBR. 1992. *Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowance for storage dams*. US Dept of the interior, Bureau of Reclamation.
  13. Wang Z. and Bowles D. S. 2005. *Dam Breach Simulations with Multiple Breach Locations Under Wind and Wave Actions*. *Advances in Water Resources*. 29:1222-1237.
  14. Wood E. F. 1977. An analysis of flood levee reliability. *Water Resources Research*. 13(3):665.

## نتایج و بحث

این مقاله روند تخمین ریسک شکست سد بر اثر متغیرهای دبی ورودی و سرعت باد در مخزن را برای سد خاکی درودزن در جنوب ایران آرایه کرد. در این پژوهش از دو روش (LHS و MCS) در تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو روش مذکور، نتایج از یک روند یکسان پیروی می‌کند و ریسک شکست سد با بالا رفتن سطح آب اولیه و دبی ورودی به مخزن و سرعت باد در مخزن افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج LHS و MCS نشان می‌دهد که ریسک محاسبه شده بر اساس روش LHS کمی بالاتر از روش MCS بوده است. اما نمی‌توان گفت که این اتفاق همیشه رخ می‌دهد. به علاوه نتایج پژوهش نشان می‌دهد که باد اثر مهمی بر ریسک شکست سد دارد به طوری که این فاکتور احتمال شکست را افزایش می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش ثابت کرد که تراز سطح آب اولیه مخزن مهمترین فاکتور در تحلیل ایمنی سد خاکی است به طوری که ریسک شکست سد با افزایش تراز سطح اولیه آب، بالا می‌رود. به علاوه تغییر تراز آب باعث افزایش احتمال سرریز شدن آب از بدنه سد، افزایش احتمال شکست، افزایش آب قابل استفاده برای پایین‌دست می‌شود. بنابراین تراز آب در مخزن باید توسط اپراتور برای برقرای تعادل در شرایط مختلف تنظیم شود.

## منابع

1. Cheng S. T. Yen B. C. and Tang W. H. 1986. *Overtopping risk for an existing dam (Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana)*. *Civil engineering studies, Hydraulic Engineering Series*. 37.
2. Eslamian S. S. and Feizi H. 2007. *Maximum Monthly Rainfall Analysis Using L-moments*