

تحلیل قابلیت اعتماد سد بتنی قوسی تحت بارهای ساخت مرحله‌یی و فشار هیدرواستاتیکی باروش‌های مونت‌کارلو و سطح پاسخ

مجید پورامینیان* (استادیار)

حسام اکرا نژاد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، واحد راه‌س، دانشگاه آزاد اسلامی، راه‌س، ایوان

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (دردی ۲ - ۳۷، شماره ۳/۲، ص. ۱۳۵-۱۴۵، یادداشت‌ش)

هدف نوشتار حاضر، ارزیابی قابلیت اعتماد سد قوسی پاکویما تحت بارهای استاتیکی با در نظر گرفتن اثر ساخت مرحله‌یی است. بارگذاری، شامل وزن سد و فشار هیدرواستاتیک تراز نرمال بالادست است. بیشینه تنش کششی در بدنه‌ی سد به‌عنوان تابع خرابی در نظر گرفته شده است. سه پارامتر: تراز نرمال آب مخزن، وزن مخصوص و مدول کشسانی بتن به ترتیب با ضریب تغییرات ۵، ۱۰ و ۱۰ درصد و توزیع نرمال به‌عنوان متغیرهای احتمالاتی در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی احتمال خرابی سد از دو روش مونت‌کارلو و سطح پاسخ استفاده شده است. نتایج نشان داده است که سد پاکویما تحت بارگذاری‌های مفروض ایمنی بالایی دارد و در معرض ریسک خرابی نیست. همچنین مشخص شد در نظر نگرفتن اثر ساخت مرحله‌یی در تحلیل سازه منجر به خطا در وضعیت ایمنی سد به ویژه در ترکیب بار وزن سد می‌شود. طبق نتایج سطح پاسخ احتمال خرابی $p_f \approx 3/75 \times 10^{-9}$ و شاخص قابلیت اعتماد سد $\beta \approx 5/78$ است.

واژگان کلیدی: قابلیت اعتماد، ساخت مرحله‌یی، سد بتنی پاکویما، مونت‌کارلو، سطح پاسخ.

۱. مقدمه

تحلیل دقیق‌تر نیز توسط تحلیل احتمالاتی انجام می‌شود. در تحلیل احتمالاتی، عدم قطعیت‌های تأثیرگذار در تحلیل سازه، مانند عدم قطعیت در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح بدنه و فونداسیون سد و همچنین بارهای وارده به سد در نظر گرفته می‌شوند. تحلیل قابلیت اعتماد و ارزیابی ایمنی احتمالاتی از دقیق‌ترین روش‌ها برای این منظور است.

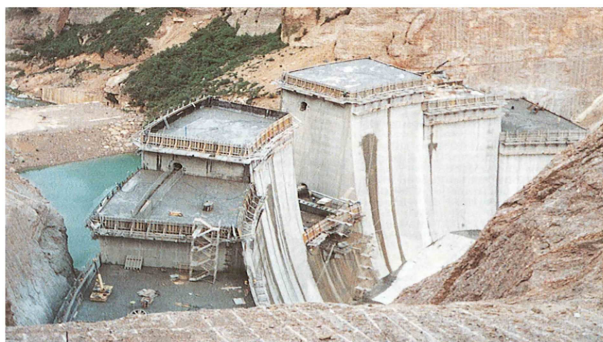
باشیولات^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، سطح ایمنی لرزه‌یی سد قوسی بتنی درینر واقع در ترکیه که ساخت آن در سال ۲۰۱۲ به اتمام رسیده بود، را بررسی کردند. سد تحت بارگذاری شتاب‌نگاشت حوزه‌های دور و نزدیک گسل انجام شده است. حالت حدی خرابی در نظر گرفته شده، بیشینه تنش کششی نقطه‌یی از پیش تعیین شده از بدنه‌ی سد است. مقاومت کششی مصالح، $6/1$ مگاپاسکال انتخاب شده است. رفتار مصالح کشسان خطی در نظر گرفته شده است. ضریب تغییرات متغیرهای تصادفی، شامل: مدول کشسانی، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی بتن و مدول کشسانی فونداسیون 10% در نظر گرفته شده است. شاخص ایمنی سد مطالعه شده، $3/13$ به‌دست آمده است.^[۶] در مدل اجزاء محدود سد درینر، آثار ساخت مرحله لحاظ نشده و همچنین فقط تحت یک رکورد مشخص زلزله و فقط در یک نقطه‌ی بحرانی، تنش‌های بیشینه کنترل شده است. همچنین عدم قطعیت در فشار آب هیدرواستاتیک لحاظ نشده است.

دنیای مهندسی، دنیای احتمالات است. با پیشرفت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری رایانه‌ها، ارزیابی سطح ایمنی سازه‌های موجود با دقت بیشتر و دستیابی به طرح‌های جدید مهندسی با قابلیت اعتماد بیشتری امکان‌پذیر است. آیین‌نامه‌های طراحی سازه نیز در دوره‌ی گذر از روش‌های طراحی سطح یک قابلیت اعتماد به سطوح بالاتر هستند. کاربرد قابلیت اعتماد در سازه‌ی نیروگاه اتمی که خرابی چنین سازه‌هایی منجر به فاجعه‌ی جبران‌ناپذیر می‌شود، توسط حریری اردبیلی انجام شده است.^[۱] کاربرد قابلیت اعتماد سازه برای شناسایی خصوصیات ماده برای سازه‌های مکانیکی با استفاده از روش‌های مونت‌کارلو و فیلتر کالمن با استفاده از پایه‌های تابع توسط عادل و همکاران انجام شده است.^[۲] سدها نیز جزء سازه‌های مهمی هستند که خرابی آن‌ها منجر به خسارت‌های زیاد و جبران‌ناپذیری می‌شود و باید به‌گونه‌یی طراحی شوند که در معرض ریسک پایین خرابی باشند. به همین جهت در مطالعات و نوشتارهای زیادی به ارزیابی احتمالاتی ایمنی سدها پرداخته شده است.^[۳-۴] معمولاً ارزیابی ایمنی سدهای جدید و سدهای موجود تحت بارگذاری عادی استاتیکی توسط نرم‌افزارهای اجزاء محدود و به‌طور قطعی انجام می‌گیرد. ارزیابی و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۷/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۲/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2021.56917.2871



شکل ۱. مونولیت‌ها و لیفت‌های حین ساخت.

است. [۲۳-۲۵] مطالعات دیگری در نوشتارهای علمی مرتبط با تحلیل قابلیت اعتماد سدهای بتنی وزنی و سدهای خاکی انجام شده است که به بررسی روش کار و نتایج دست‌یافته‌ی آن‌ها پرداخته نشده است.

در نوشتار حاضر، با لحاظ کردن قابلیت ساخت مرحله‌ی در چرخه‌های شبیه‌سازی و مقایسه‌ی نتایج آن با حالت بدون در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ی، اهمیت در نظر گرفتن آن در تحلیل سازه‌ی سد بتنی قوسی نشان داده شده است. همچنین با توجه به اینکه عدم قطعیت در برآورد منابع تأمین آب مخزن دشوار است، در نوشتار حاضر، تراز آب بالادست سد به‌عنوان یکی از منابع مهم عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. از دیگر نوآوری‌های نوشتار حاضر، به‌کارگیری روش سطح پاسخ به‌عنوان روش فرامدل در تخمین احتمال خرابی با دقت حدود $10^{-9} \times 1/2$ است که این تعداد تکرار مدل معادل شاخص قابلیت اطمینان حدود $5/96 \beta$ است که این تعداد تکرار مدل اجزاء محدود، هزینه‌ی محاسباتی بسیار زیادی خواهد داشت و سخت دست‌یافتنی است.

۲. تحلیل قابلیت اعتماد

در بخش کنونی، روش استفاده شده در تحلیل قابلیت اعتماد سد، روش مونت‌کارلو و نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار احتمال خرابی، تحلیل حساسیت پارامتر خروجی به تغییرات متغیرهای تصادفی ورودی بوده و به معرفی توابع احتمالاتی مورد نیاز پرداخته شده است.

۱.۲. روش بار - مقاومت

در تحلیل احتمالاتی ایمنی و تحلیل قابلیت اعتماد سازه‌ها، روش مدل بار - مقاومت طبق رابطه‌ی ۱، با استقبال زیادی در بین پژوهشگران مواجه شده است. R بیانگر مقاومت یک مؤلفه، عضو، یا یک سیستم و S نماینده‌ی تنش یا آثار بار است.

$$g(R, S) = R - S \quad (1)$$

فضای جست‌وجوی مسئله، (R, S) توسط تابع گسیختگی $g(R, S) = 0$ به دو ناحیه‌ی «ایمن» و «غیرایمن» تقسیم می‌شود. عملکردهای سازه در حالت ایمن و غیرایمن به ترتیب در رابطه‌های ۲ و ۳ ارائه شده است:

$$g(R, S) \geq 0 \quad (2)$$

$$g(R, S) < 0 \quad (3)$$

در شکل ۲، فضای متغیرهای تصادفی و نواحی ایمن و غیرایمن مشخص شده است. تخمین تابع حدی گسیختگی یا تابع عملکردی $g(R, S)$ که اغلب در مسائل

چن^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ی تحلیل احتمالاتی لرزه‌ی سد بتنی قوسی دایانگ چین، اثر بار دما لحاظ و به جای مدل‌سازی مخزن، از جرم متمرکز واقع در بالادست سد به‌صورت جرم معادل استفاده شده است. توابع تنش پیشینه‌ی کششی و فشاری نیز به‌عنوان توابع حالت حدی خرابی در نظر گرفته شده‌اند. ضریب تغییرات برای مدول کشسانی بتن بدنه و فونداسیون، 10% و برای مقاومت کششی و فشاری بتن 30% در نظر گرفته شده است. شاخص ایمنی برای هر یک از جزء‌های مدل گسسته‌سازی جداگانه به‌دست آمده است. از منحنی هم‌تراز به‌دست آمده‌ی واقع بر بالادست سد مشخص شد که شاخص ایمنی در جزء‌های بالادست بین ۱ الی $7/96 \leq \beta^{US} \leq 1$ به دست آمده است که اغلب جزء‌ها شاخصی بیش از ۶ دارند و فقط ۲۱ جزء، شاخصی کمتر از ۲ دارند که موقعیت آن‌ها در پاشنه و تکیه‌گاه سد است و به این نکته در زمان ساخت، مایتورینگ و مقاوم‌سازی باید توجه کرد. همچنین از منحنی‌های هم‌تراز پایین‌دست مشخص است که در تمامی جزء‌ها، شاخص ایمنی بین $5/5$ تا $6/4 \leq \beta^{DS} \leq 6/4$ است که مؤید عبارت «مقاومت مناسب بتن در بارگذاری فشاری» است.^[۷] در مدل اجزاء محدود سد دایانگ، آثار ساخت مرحله لحاظ نشده و همچنین عدم قطعیت در فشار آب هیدرواستاتیک لحاظ نشده است.

تان فنجی^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، طراحی بهینه‌ی شکل سد بتنی دوقوسی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و در نظر گرفتن بار حرارت را بررسی کرده‌اند. توزیع نرمال برای جرم مخصوص و مدول کشسانی بتن با ضریب تغییرات 10% اختصاص داده شده و احتمال گسیختگی و شاخص ایمنی سد بتنی قوسی با استفاده از دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تحلیل قابلیت اطمینان مرتبه‌ی دوم به‌دست آمده است.^[۹] قابلیت مدل‌سازی ساخت مرحله‌ی در مدل اجزاء محدود لحاظ نشده و همچنین عدم قطعیت در فشار آب هیدرواستاتیک مشاهده نشده است.

پورامینیان و همکاران (۲۰۱۹)، نیز وضعیت ایمنی سیستم سد بتنی قوسی پاکویما را توسط نرم‌افزار اجزاء محدود و روش مونت‌کارلو بررسی و تنش کششی و تنش فشاری را به‌عنوان دو حالت حدی سری، در سیستم سد در نظر گرفته‌اند. همچنین به کمک روش بار - مقاومت، شاخص قابلیت اعتماد به سد پاکویما با فرض ضریب تغییرات 15% برای تمامی ۶ پارامتر تصادفی حدود ۴ به‌دست آمد.^[۴] در پژوهش اخیر، مراحل ساخت مدل‌سازی نشده و به‌دلیل هزینه‌ی محاسباتی، تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی جهت ارزیابی سطح ایمنی به ۵۰۰۰۰ محدود بوده و محاسبه‌ی شاخص ایمنی با دقت بالایی انجام نشده است.

سدهای بتنی قوسی بزرگ که با روش ساخت معمولی از بلوک‌های متعددی به نام مونولیت ساخته می‌شوند، در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. مونولیت‌ها با درزهای قائم از هم مجزا تشکیل شده‌اند که در حین اجرای سد توسط گروت با مقاومت کششی پایین به یکدیگر متصل می‌شوند. هر کدام از مونولیت‌های گفته شده در لیفت‌های ۲ الی ۴ متری بتن‌ریزی می‌شوند. برای اخذ نتایج دقیق‌تر، تحلیل سازه‌ی سد باید در مدل‌سازی آثار ساخت مرحله‌ی در نظر گرفته شود. در تحلیل اجزاء محدود سازه‌ی سد بتنی قوسی، در نظر نگرفتن آثار مراحل ساخت منجر به پیشینه‌ی تنش‌های غیرواقعی در بدنه‌ی سد می‌شود.^[۲۳-۲۵] با توجه به نامعین بودن بدنه‌ی سد قوسی و محصور بودن پوسته‌ی سازه‌ی سد در دره‌ی رودخانه، اعمال ناگهانی نیروی وزن منجر به نتایج نادرست و تخیلی خواهد شد. زیرا سازه‌ی سد یکدفعه ساخته نمی‌شود و ساخت آن در هر مونولیت به صورت لیفت‌هایی انجام می‌پذیرد و طبیعتاً بارگذاری وزن بدنه‌ی سد به‌صورت یکدفعه، دور از واقعیت مدل‌سازی دقیق

شود. توقف نمونه‌گیری تا زمانی است که بیشینه‌ی خطای نسبی کمتر از آستانه‌ی تعیین شده باشد. [۲۶]

$$COV_{pf} = \sqrt{\frac{1 - pf}{N_{sim} pf}} \quad (5)$$

۳.۲. تحلیل حساسیت

به میزان تأثیرگذاری ورودی‌های مسئله در پاسخ آن تحلیل حساسیت گویند. نتایج تحلیل حساسیت برای کاهش متغیرهای مسئله‌ی بهینه‌سازی یا قابلیت اعتماد و کاهش هزینه‌های محاسباتی کاربرد فراوانی دارد. در تحلیل حساسیت به روش طراحی احتمالاتی سیستم با استفاده از جعبه‌ابزار نرم‌افزار، این گام‌ها دنبال می‌شود: [۲۷]

الف) مدل سازه‌ی برنامه‌نویسی می‌شود. مدل باید قابلیت تغییر متغیرهای تصادفی مدنظر و اختصاص مشخصات آماری به آن‌ها را داشته باشد.

ب) تعریف متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی به برنامه.

ج) انتخاب روش شبیه‌سازی و تنظیمات موردنیاز آن که در پژوهش حاضر از روش مونت‌کارلو با نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین استفاده شده است. سطح اعتماد ۰.۹۵ و سطح اهمیت ۰.۲/۵ برای پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است. به این معنی که ۵٪ از نمونه‌های با تکرار کم شبیه‌سازی شده به عنوان خطا کنار گذاشته می‌شوند. مجموع این دو مقدار با در نظر گرفتن هر دو حد بالا و پایینی برای سطح اهمیت همیشه یک است. برای همبستگی از پیش فرض برنامه که رتبه‌بندی اسپیرمن است، استفاده شده است.

د) استخراج نتایج شامل نمودارهای قطاعی و میله‌ی تحلیل حساسیت و ماتریس ضرایب همبستگی.

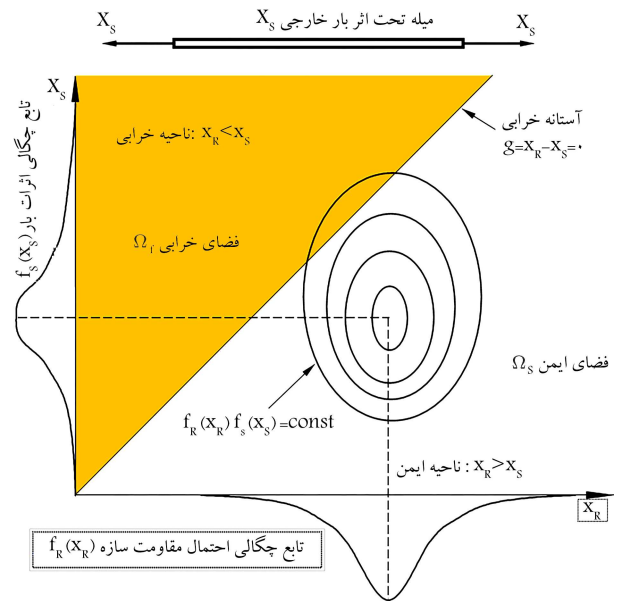
ه) اگر x_i ورودی تصادفی و g_i پارامتر خروجی باشد، به طوری که n ورودی $i = 1, 2, \dots, n$ و k خروجی $j = 1, 2, \dots, k$ موجود باشد، متغیر x_{ij} ، متغیر ورودی i ام برای پارامتر خروجی j ام خواهد بود. همبستگی $r_{x_{ij}g}$ بین متغیر ورودی x_i و خروجی g از طریق رابطه‌های ۶ و ۷ به دست می‌آید:

$$r_{x_{ij}g} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})(g_i - \bar{g})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

$$\bar{x}_{ij} = \sum_i \frac{x_{ij}}{n} \quad (7)$$

و همبستگی در روش رتبه‌بندی اسپیرمن نیز براساس رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید. تعداد شبیه‌سازی مونت‌کارلو N ، آمین تولید از مونت‌کارلو j_s و r_i مرتبه‌ی ارائه شده از متغیر تصادفی x_i است. m_{ij} جایگشت نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین است. n_j نمونه‌ی مرتب شده‌ی حاصل جایگذاری شبیه‌سازی زام است. ضریب همبستگی اسپیرمن $(-1 \leq r_i \leq +1)$ با مقداری نزدیک ± 1 نشان‌دهنده‌ی همبستگی زیاد و حساسیت زیاد خروجی به ورودی است و مقدار ۰، آن، یعنی حساسیت کم خروجی به ورودی است.

$$r_i = 1 - \frac{6 \sum_j (m_{ji} - n_j)^2}{N(N^2 - 1)}; r_i \in [-1, 1] \quad (8)$$



شکل ۲. فضای متغیر تصادفی و نواحی ایمن و غیرایمن.

مهندسی سازه و سازه‌های سد، پل و ساختمان شکل ضمنی دارد، نیازمند زمان زیادی برای پردازش تحلیل اجزاء محدود است و با زیادتر شدن متغیرهای تصادفی مسئله، زمان موردنیاز افزایش می‌یابد.

۲.۲. محاسبه‌ی احتمال خرابی به روش مونت‌کارلو

روش مونت‌کارلو در بین بسیاری از پژوهشگران در زمینه‌ی ارزیابی احتمالاتی ایمنی سازه‌ها استقبال شده است. به این ترتیب که با استفاده از تقریب زدن امید ریاضی، به کمک توزیع نمونه‌ی تابعی از متغیرهای تصادفی، شبیه‌سازی صورت گرفته و روند سه‌مرحله‌ی، شامل تولید اعداد تصادفی بین ۰ و ۱، انتقال اعداد تصادفی به تابع توزیع تجمعی احتمال و به دست آوردن مقدار هر نمونه با استفاده از معکوس تابع تجمعی در نقطه‌ی تصادفی و با جایگذاری بردار متغیر تصادفی ایجاد شده در روند گفته شده در توابع عملکردی خرابی در هر چرخه، وضعیت ایمنی سازه در آن چرخه بررسی می‌شود. [۱۸] از رابطه‌ی ۴، می‌توان احتمال خرابی را هم از تعداد توابع عملکردی با مقدار منفی در تاریخچه‌ی چرخه‌های شبیه‌سازی و یا از شاخص قابلیت اعتماد محاسبه کرد. تعداد چرخه‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و $N_{g(X) < 0}$ تعداد چرخه‌های با تابع عملکردی منفی است.

$$p_f = \frac{N_{g(X) < 0}}{N_{sim}} = P[g(X) < 0] \approx \Phi(-\beta) \quad (4)$$

که در آن، β شاخص قابلیت اطمینان است. تعداد کمیته‌ی شبیه‌سازی توصیه شده برای روش مونت‌کارلو $\frac{10^6}{p_f} \approx N_{sim}$ است که در آن p_f^T احتمال خرابی هدف توصیه شده در نشریات و آیین‌نامه‌های مختلف فنی است. بنابراین تعداد شبیه‌سازی کمتر در شبیه‌سازی مونت‌کارلو باعث خطا در برآورد پاسخ که همان احتمال خرابی است، می‌شود. در ادبیات فنی مطابق رابطه‌ی ۵، ضریب تغییرات احتمال خرابی کمتر از ۱/۱۰ را مقدار مناسبی برای کفایت تعداد شبیه‌سازی معرفی می‌کنند. برخی نیز تعداد چرخه‌ی مطلوب را چرخه‌ی می‌دانند که $COV(p_f) \leq 5\%$ باشد و یا به بیان دیگر، تعداد چرخه‌ی مطلوب زمانی تعیین می‌شود که مقدار $COV(p_f)$ ثابت

۴.۲. توابع احتمالاتی

برای آشنایی با توابع احتمالاتی، تابع چگالی احتمال (PDF)، تابع توزیع تجمعی احتمال (CDF) و تابع قابلیت اعتماد (S(x)) برای متغیرهای تصادفی ارائه شده است.

-- تابع چگالی احتمال (PDF): احتمال آنکه متغیر تصادفی X در بازه [a, b] واقع شود، از رابطه ۹ به دست می آید. مساحت زیر زنگوله‌ی تابع چگالی احتمال همواره برابر ۱ است.

$$\int_a^b f(x) dx = P_r [a \leq x \leq b] \quad (9)$$

-- تابع توزیع تجمعی (CDF): تابعی غیرصفر و هم‌نوی صعودی است که بُرد آن بازه [۰, ۱] بوده و احتمال آنکه متغیر تصادفی X مقداری کوچک‌تر از x داشته باشد، را نشان می‌دهد، یعنی: $F_X(x) = P(X \leq x)$ از این تعریف می‌توان رابطه ۱۰ را نتیجه گرفت

$$P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a) \quad (10)$$

تابع توزیع تجمعی را نیز می‌توان به صورت رابطه ۱۱ براساس تابع چگالی احتمال تعریف کرد:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (11)$$

-- تابع قابلیت اعتماد (S(x)): تابع قابلیت اعتماد اغلب در کاربردهای قابلیت اعتماد استفاده می‌شود و احتمال مقادیری بزرگ‌تر از مقدار خاص x را می‌دهد. تابع قابلیت اعتماد از ۱ شروع و به تدریج به مقدار صفر میل می‌کند و باید با CDF مقایسه شود (رابطه ۱۲):

$$S(x) = P_r [X > x] = 1 - F(x) \quad (12)$$

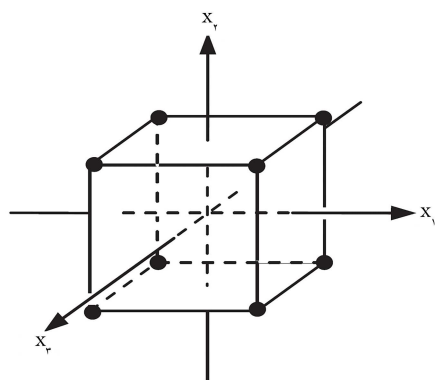
۳. طراحی آزمایش‌ها

متدولوژی سطح پاسخ به صورت اختصاراً RSM، یک مجموعه از روش‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چند متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است. یک آزمایش، یک سری از آزمون‌هاست که اجرا نامیده می‌شود. در هر آزمایش، تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. در طرح‌های سطح پاسخ، ساخت مدل‌های رویه‌ی پاسخ یک فرایند تکراری است. به محض اینکه یک مدل تقریبی به دست آمد، توسط روش نیکویی برآزش آزمون می‌شود که آیا جواب رضایت‌بخش است یا خیر؛ اگر جواب تأیید نشود، تخمین فرایند دوباره شروع می‌شود و آزمایش‌های بیشتری انجام می‌شود. هدف در طراحی آزمایش‌ها، شناسایی و تحلیل متغیرهای مؤثر در خروجی‌ها با کمترین تعداد آزمایش است. در مواردی که هزینه‌ی محاسباتی انجام چرخه‌های شبیه‌سازی برای تحلیل‌های عددی و نرم‌افزاری میسر نباشد یا انجام آزمایش واقعی مقدور نباشد، می‌توان با انجام طراحی آزمایش‌ها به اهداف مدنظر با تقریب دست یافت. در مسائل قابلیت اعتماد سازه‌هایی مانند سد بتنی قوسی

با درجه‌های آزادی زیاد و درجه‌ی نامعینی بالا، تحلیل‌های اجزاء محدود معمولاً در تعداد چرخه‌های زیاد، غیرمنطقی و غیرکاربردی است. در مسائلی با مقادیر بسیار کوچک احتمال خرابی، عملاً چنین تحلیل‌هایی در تعداد چرخه‌ی شبیه‌سازی چندصد میلیون غیرممکن و یا دست‌کم با ابررایانه‌ها یا رایانه‌هایی که به صورت سری و موازی متصل‌اند، شدنی است. روش‌های مختلف آزمایش‌های طراحی، مانند ستاره، طرح عاملی کامل (فاکتوریل)، طراحی مرکب مرکزی و باکس بنکن وجود دارد. در نوشتار حاضر، از روش طرح عاملی کامل استفاده شده است. اگر n تعداد متغیرهای تصادفی باشد، به تعداد $(2^n + 1)$ ، (2^n) ، $(2^n + 1)$ و $(2^{n-1} + 1)$ به ترتیب برای روش‌های گفته شده، نقطه‌ی آزمایش لازم است. [۱۶] طبق شکل ۳، تعداد نقاط روش استفاده شده مشاهده می‌شود. مقدار ضریب k در رابطه ۱۳، نیز اغلب ۱ الی ۳ در نظر گرفته می‌شود که در نوشتار حاضر مقدار ۱ انتخاب شده است. مقدار k در حقیقت حدود متغیرهای تصادفی را مشخص می‌کند. تابعی که مدنظر است تخمین زده شود، به صورت خطی از طریق رابطه ۱۴ مشاهده می‌شود که در پژوهش حاضر تابع عملکردی پیشینه‌ی تنش کششی است. می‌توان تابع تخمین را درجه‌ی دوم یا سوم نیز در نظر گرفت. انتخاب دقت آن بسته به میزان غیرخطی بودن تابع مورد ارزیابی دارد. در جدول ۱، برای طراحی آزمایش با ۳ متغیر تصادفی، تعداد ۸ نقطه‌ی آزمایش نشان داده شده است.

$$X_i = \mu_i \pm k\sigma_i \quad (13)$$

$$Y^{\text{exp}} = \beta_0' + \beta_1'X_1 + \beta_2'X_2 + \beta_3'X_3 + \beta_4'X_1X_2 + \beta_5'X_1X_3 + \beta_6'X_2X_3 + \beta_7'X_1X_2X_3 \quad (14)$$



شکل ۳. روش طرح عاملی کامل.

جدول ۱. انتخاب نقاط آزمایش.

شماره آزمایش	X_1 (NWL - US)	X_2 (DEN - Dam)	X_3 (EX - Dam)
DOE۱	-k	-k	-k
DOE۲	+k	-k	-k
DOE۳	-k	+k	-k
DOE۴	+k	+k	-k
DOE۵	-k	-k	+k
DOE۶	+k	-k	+k
DOE۷	-k	+k	+k
DOE۸	+k	+k	+k



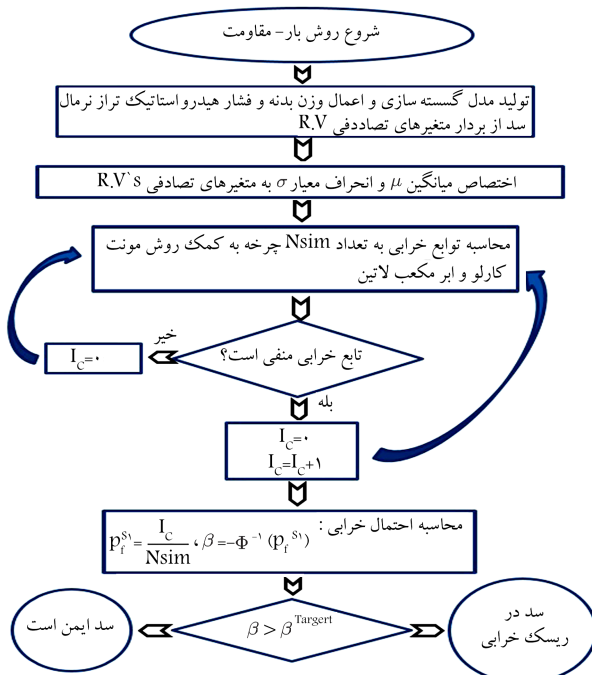
شکل ۴. تصویر هوایی از سد قوسی بتنی پاکویما.

۴. مطالعه‌ی موردی: توصیف و مدل‌سازی

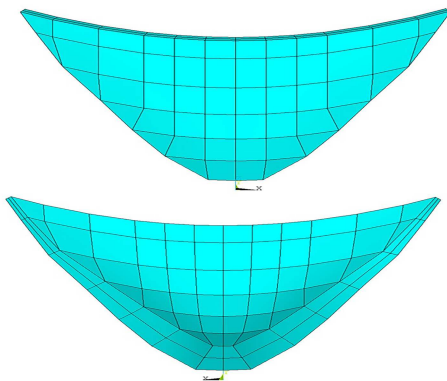
هدف از نوشتار حاضر، مطالعه‌ی احتمالاتی ایمنی سد بتنی قوسی در حالت حدی نهایی بیشینه تنش اصلی کششی تحت دو ترکیب بارگذاری عادی شامل بارگذاری فقط وزن بدنه‌ی سد به‌عنوان ترکیب بار اول و بارگذاری وزن بدنه‌ی سد و فشار هیدرواستاتیک تراز نرمال به‌عنوان ترکیب بار دوم در نظر گرفته شده است. در هر دو ترکیب، بار وزن بدنه‌ی سد با در نظر گرفتن تحلیل مراحل ساخت انجام گرفته است. مطابق شکل ۴، نمای سد بتنی پاکویما مشاهده می‌شود. ارتفاع و طول تاج بدنه‌ی سد مذکور به ترتیب ۱۱۳ و ۱۸۰ متر است. ساخت سد پاکویما در سال ۱۹۲۸ میلادی به پایان رسیده است. ضخامت بدنه‌ی سد از ۳ متر در بالاترین تراز آن (تاج سد) الی ۳۰ متر در پایین‌ترین ارتفاع آن (کف دره) است. در زمان طراحی، سد پاکویما فقط تحت بارگذاری عادی تحلیل و طراحی شده است. در شکل ۵، فلوجارت محاسبه‌ی قابلیت اعتماد به روش مونت‌کارلو و تحلیل اجزاء محدود مشاهده می‌شود. برای تأمین ایمنی سد، شاخص قابلیت اطمینان (β) باید از مقدار شاخص قابلیت اطمینان هدف (β^{Target}) بیشتر باشد.

۱.۴. مدل اجزاء محدود احتمالاتی

برای مصالح بتن بدنه‌ی سد، رفتار خطی کشسان در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی بدنه‌ی سد از روش مدل‌سازی ماکرو و همگن بودن مشخصات مکانیکی مصالح در راستاهای مختلف و از نرم‌افزار انیسس^۴ برای مدل اجزاء محدود استفاده شده است. از مدل‌سازی درزهای قائم بدنه نیز صرف‌نظر شده است. در شکل ۶، مدل گسسته‌سازی شده که در تحلیل اجزاء محدود در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شود. برای توانایی در محاسبه‌ی دقیق‌تر تنش در بالادست و پایین‌دست بدنه‌ی سد از دو لایه‌ی جزء ۸ گره‌ی ایزوپارامتریک در ضخامت استفاده شده است. هر گره، سه درجه آزادی انتقالی دارد. درجه‌های آزادی انتقالی تمامی گره‌های انتهای بدنه در محل تماس بدنه‌ی سد به جناحین و کف رودخانه مقید شده است. به عبارتی در تکیه‌گاه‌های سد و کف دره، جایی که سد به زمین متصل شده است، تکیه‌گاه گیردار اختصاص داده شده است. تعداد جزء‌ها و گره‌های مدل گسسته‌سازی به ترتیب ۱۰۴ و ۲۲۵ هستند (شکل ۶). ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح بدنه‌ی سد، شامل: مدول کشسانی بتن، $E_C = 21/9 GPa$ ، نسبت پواسون بتن $\nu = 0/2$ و چگالی بتن $\rho = 2230 kg/m^3$ در مدل اجزاء محدود انتخاب شده است. نحوه‌ی تأثیر پارامتر ساخت مرحله‌ی در تحلیل سازی مدل اجزاء محدود با استفاده از قابلیت مرگ و تولد اجزاء در نرم‌افزار انیسس انجام شده است. اگر مصالحی از یک سیستم

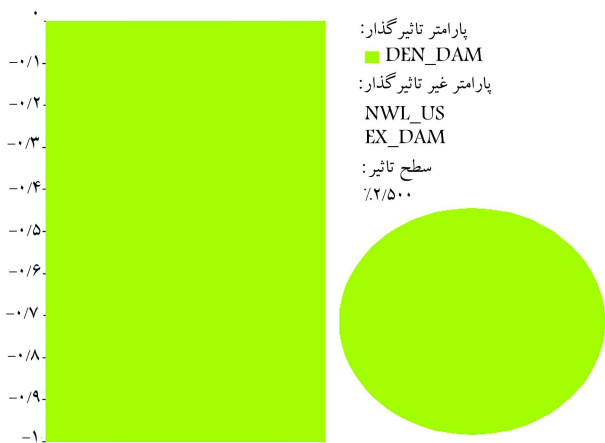


شکل ۵. فلوجارت محاسبه‌ی قابلیت اعتماد.



شکل ۶. تصویر بالادست و پایین دست مدل اجزای محدود سد.

حذف یا به آن اضافه شود، توسط اختصاص ویژگی تولد و مرگ به اجزاء آن بخش، قابل مدل‌سازی است. این قابلیت برای جزءهایی با ویژگی مرده‌ی اختصاص یافته در یک مرحله‌ی خاص از تحلیل سازه، ضریب نزدیک صفر (10^{-6}) به ماتریس سختی جزء ضرب می‌شود. جرم، میرایی و بارهای اختصاص یافته به اجزاء مرده نیز صفر در نظر گرفته می‌شوند. برای داشتن نتایج معنی‌دار باید گزینه‌ی تغییرشکل‌های بزرگ در تحلیل سازه فعال باشد. در شکل ۷، تعداد مراحل ساخت به صورت لایه‌های بتن‌ریزی افقی مشاهده می‌شود. بدنه‌ی سد قوسی در ۶ مرحله که هر مرحله‌ی آن یک ردیف افقی از اجزاء بدنه‌ی سد است، مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. برای برنامه‌نویسی پروسه از قابلیت تولد و مرگ اجزاء در نرم‌افزار استفاده شده است. در مرحله‌ی اول از ساخت، تمامی جزءهای لایه‌ی اول به‌صورت زنده تنظیم و اجزاء لایه‌های دوم الی پنجم به صورت مرده تنظیم می‌شوند. به همین صورت تا مرحله‌ی ششم ادامه می‌یابد. در مرحله‌ی ششم نیز تمامی جزءهای مدل (۱۰۴ جزء) به‌صورت زنده تنظیم می‌شوند. در ترکیب بارگذاری عادی پس از اتمام مراحل ساخت (۶ مرحله که در هر مرحله یک تحلیل سازه انجام می‌شود)، هفتمین تحلیل سازه برای بارگذاری فشار هیدرواستاتیک بالادست در تراز نرمال انجام شده است. تحلیل ارتعاش آزاد



شکل ۹. تحلیل حساسیت پیشینه‌ی تنش کششی به پارامترهای ورودی.

γ_w وزن مخصوص آب مخزن و h ارتفاع از پایه‌ی سد یا همان کف مخزن است.

$$P_{hs} = \frac{\gamma_w h^2}{5} \quad (15)$$

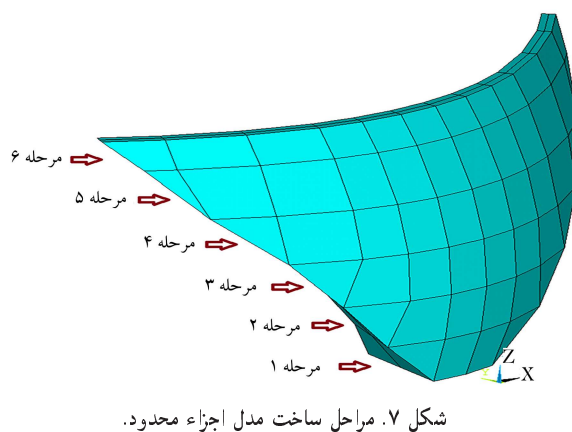
۲.۴. تحلیل حساسیت

جعبه ابزار تحلیل احتمالاتی سیستم با استفاده از روش رتبه‌بندی اسپیرمن، حساسیت متغیرهای تصادفی به پیشینه‌ی تنش کششی موجود در بدنه‌ی سد را مشخص کرده است. نتایج تحلیل حساسیت ترکیب بار بحرانی $ST(W + H)$ در شکل ۹ مشاهده می‌شود. وزن مخصوص مصالح بتن با $(r_i = -1)$ ، تأثیرگذارترین پارامتر در پیشینه‌ی تنش کششی موجود است، به این معنی که با تغییر جزئی در وزن مخصوص بتن، بیشترین تغییرات در پیشینه‌ی تنش کششی بدنه‌ی سد ایجاد می‌شود. تغییر جزئی در پارامترهای تصادفی تراز نرمال مخزن و مدول کشسانی، تأثیر محسوس‌ی در پیشینه‌ی تنش کششی ایجاد شده در بدنه‌ی سد ندارند.

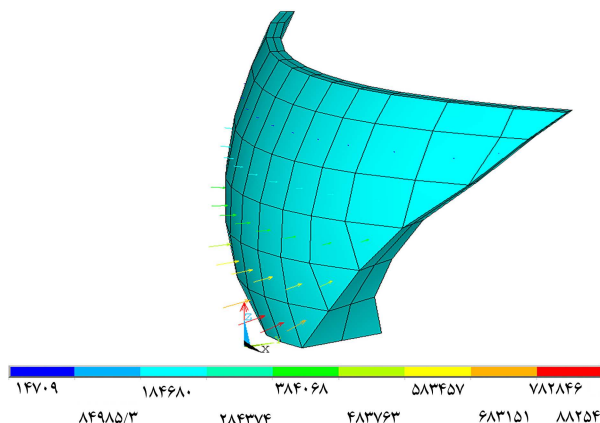
۳.۴. عدم قطعیت پارامترهای مدل

تحلیل قابلیت اعتماد به کمک روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شده است. روش مونت‌کارلو امکان تولید N نمونه از بردار متغیرهای تصادفی X را به منظور ارزیابی تابع خرابی $g(x)$ می‌دهد. روش لاتین هایپرکیوب^۵ برای نمونه‌گیری استفاده شده است. به منظور تحلیل احتمالاتی لازم است در ابتدا پارامترهای مقاومتی و حالت‌های بار تعریف شوند. در تحلیل احتمالاتی از توزیع احتمالاتی که طبق مراجع مختلف متداول بوده و برازش بهتری برای تابع چگالی احتمال متغیرهای ورودی داشته باشد، انتخاب و از تابع توزیع گاوس نرمال (N) استفاده شده است. برای تراز آب بالادست از توزیع نرمال محدود شده (TN) از بالا در نظر گرفته شده است. برای تولید متغیرهای تصادفی با توزیع‌های ذکر شده، نیاز به تعریف مقدار میانگین و انحراف معیار برای متغیرهای تصادفی است. در جدول ۲، مشخصات آماری متغیر، شامل: مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات ارائه شده است. در صورتی که داده‌های آزمایشگاهی برای سایت خاصی در دسترس نباشند، خصوصیات آماری مانند شکل تابع توزیع و مقادیر ضریب تغییرات موجود در منابع پژوهشی مشابه استفاده می‌شود.^[۲۹] مقدار تنش کششی مجاز مصالح با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه شده است.^[۳۰-۳۳]

$$f_t = \frac{f_c^{2/3}}{3.24} \quad (16)$$



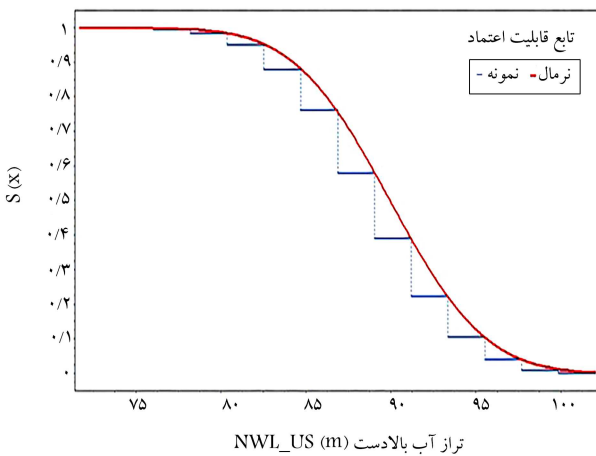
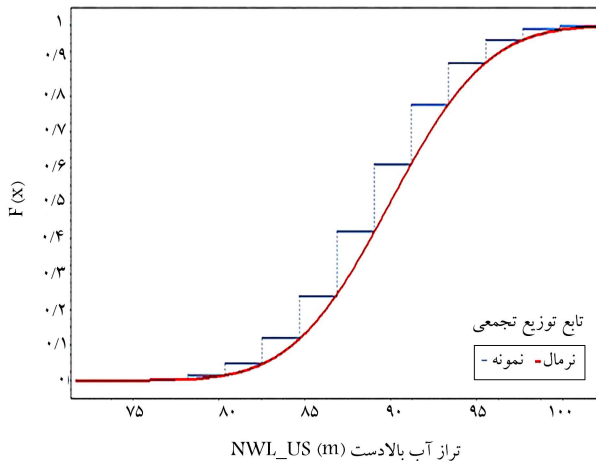
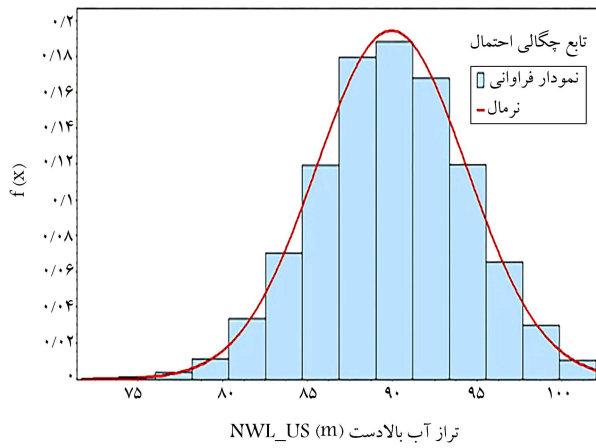
شکل ۷. مراحل ساخت مدل اجزاء محدود.



شکل ۸. فشار آب هیدرواستاتیک بالادست.

به منظور صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود انجام شده است. بسامد مود ارتعاشی اصلی با نسبت میرایی $\xi = 5\%$ برابر $\xi = 5/42Hz$ به دست آمده است. این مقدار با بسامد $f_{symm} = 5/35-5/45Hz$ با نسبت میرایی $5\%-7\%$ ارائه شده در نوشتار تارنژاد و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت خوبی دارد.^[۲۸] جهت به‌کارگیری روند تحلیل احتمالاتی ایمنی سد بتنی قوسی لازم است که قبلاً متغیرهای تصادفی تعریف و خصوصیات آماری مربوط به آن‌ها اختصاص داده شوند. برای تعریف و اختصاص پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی می‌توان از اطلاعات موجود در نوشتارهای علمی و یا از مشاهده‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. وزن مخصوص مصالح بتن بدنه و تراز نرمال آب مخزن در بالادست سد بارهایی هستند که به مدل اجزاء محدود سازه اعمال می‌شوند و باید به صورت پارامترهای تصادفی تعریف شوند. همچنین عمده‌ی ویژگی‌های معرف مقاومت سد، شامل: مدول کشسانی بتن، تنش مجاز کششی و فشاری بتن و نسبت پواسون بتن هستند. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن نشان داده شده در چرخه‌های تحلیل اجزاء محدود به طور تصادفی تولید و به‌کار گرفته می‌شوند. محور مختصات نیز در تراز کف رودخانه نشان داده شده است. محور Y در جهت رودخانه و محور X عمود بر رودخانه و محور Z راستای قائم را نشان می‌دهد. ارتفاع مدل اجزاء محدود با ساده‌سازی شکل دره و جناحین، 102 متر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۸، شرایط مرزی، بارگذاری هیدرواستاتیک مخزن، و شتاب ثقل مدل اجزاء محدود مشاهده می‌شود. بیشترین فشار، در پایه‌ی سد و فشار صفر، در تراز نرمال مخزن است. در هر نقطه، بردار فشار هیدرواستاتیک عمود بر سطح جزء در بالادست است. مقدار فشار در ارتفاع مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه شده است که



شکل ۱۰. توابع احتمالاتی متغیر تصادفی ورودی: تراز آب بالادست.

است. از نمودار قابلیت اعتماد نیز می‌توان مشاهده کرد که احتمال اینکه بیشینه تنش کششی بتن بیشتر از $1/25$ مگاپاسکال باشد، صفر است. با توجه به بیشینه تنش کششی موجود مشاهده شده و مقدار تنش کششی مجاز بتن سد پاکویما می‌توان گفت در $20/1000$ چرخه انجام شده، هیچ خرابی تجربه نخواهد شد و $5 \times 10^{-5} \leq p_f \leq 3/89$ $\beta \geq$ است. در صورت قبول هزینه محاسباتی بیشتر (انجام چرخه‌های شبیه‌سازی با تعداد بیشتر)، می‌توان به مقادیر کوچک‌تر احتمال خرابی و مقادیر بزرگ‌تر شاخص قابلیت اطمینان دست یافت.

در شکل ۱۲، توابع آماری تابع عملکردی خرابی که مربوط به بیشینه تنش

جدول ۲. ویژگی‌های احتمالاتی متغیرهای تصادفی و بتن.

مراجع	ضریب تغییرات $COV.$	توزیع آماری $Dist(\mu, \sigma)$	متغیر تصادفی X_i
[۶, ۷, ۱۵, ۳۰, ۳۱]	۰/۱	$N(21/9, 2/19)$	$E_C (GPa)$
[۳, ۱۶]	۰/۱	$N(2230, 223)$	$\rho (kg/m^3)$
[۲۲, ۳۱]	۰/۰۵	$TN(90, 4/5, 102)$	$NWL (m)$
[۲۰]	-	۲۳/۳۹	$f'_c (MPa)$
[۲۰]	-	۲/۶۵	$f_t (MPa)$

که در آن، f'_c مقاومت فشاری تک محوری بتن و f_t مقاومت مجاز کششی تک محوری بتن هستند که برای سد پاکویما به ترتیب برابر $23/39$ و $2/65$ مگاپاسکال به دست آمده است. در برنامه‌ی نوشته شده، بیشترین تنش اصلی اول در بدنه‌ی سد در هر چرخه‌ی شبیه‌سازی به عنوان بیشینه‌ی تنش کششی موجود ذخیره شده و در چرخه‌هایی از شبیه‌سازی، که این مقدار از f_t فراتر رود، یک تجربه از شکست $(N_{g(x)})$ ثبت و به شمارشگر I_c یک عدد افزوده می‌شود.

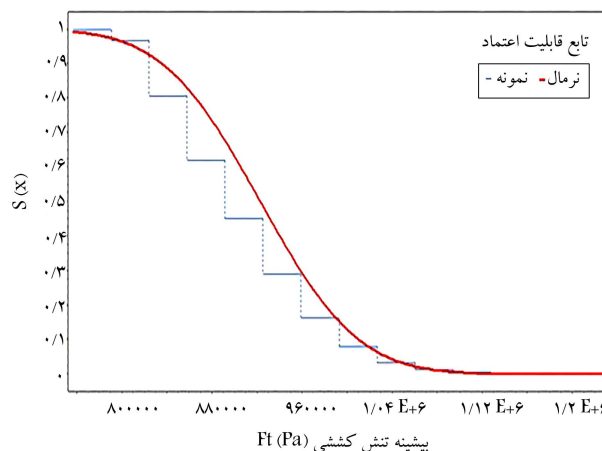
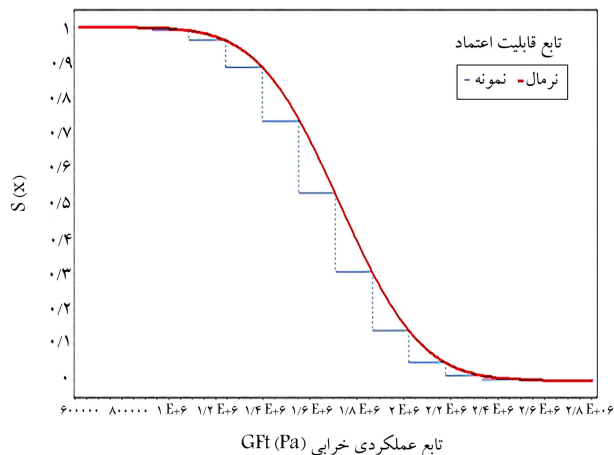
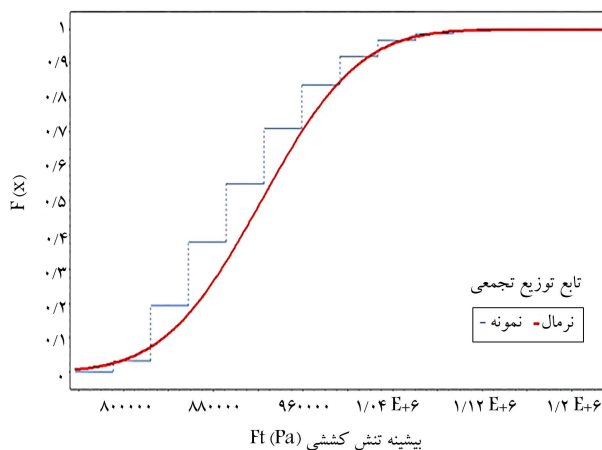
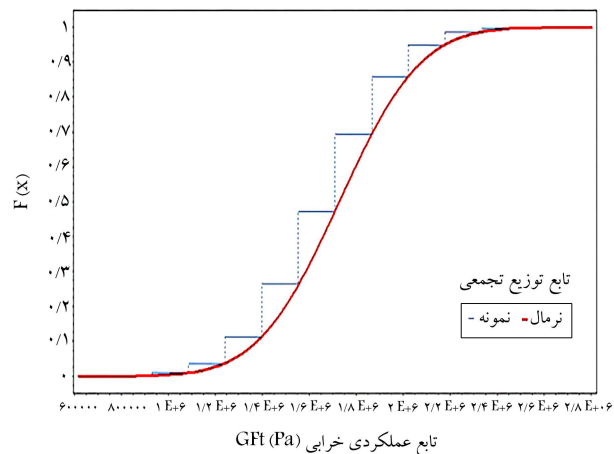
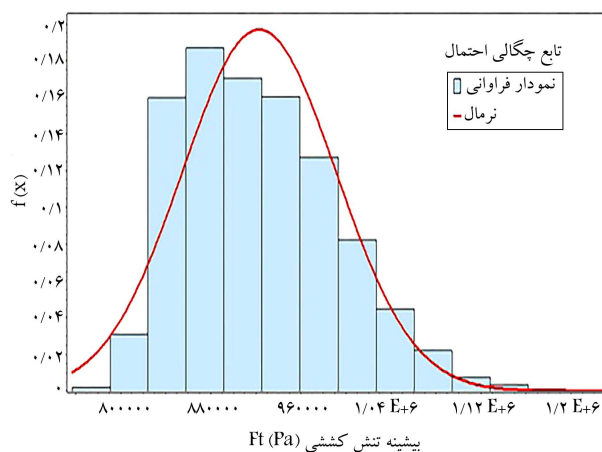
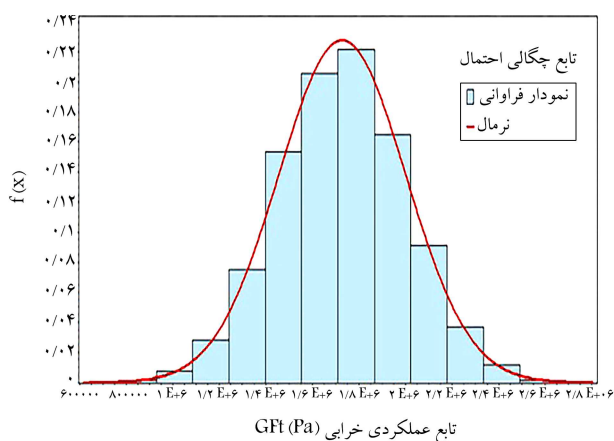
۴.۴. توابع آماری متغیرهای تصادفی

در شکل ۱۰، توابع آماری تراز نرمال آب بالادست مشاهده می‌شود. تابع چگالی احتمال تراز بالادست با میانگین 90 متر و انحراف معیار $4/5$ متر بوده است. احتمال اینکه تراز آب 90 متر (مقدار میانگین) باشد، 50% است. مقدار کمینه و بیشینه تولید شده به ترتیب حدود 75 و 102 متر هستند. نمودار توزیع تجمعی نشان می‌دهد احتمال اینکه تراز آب کمتر از 102 متر باشد، 100% است؛ به عبارتی، تمامی نمونه‌های تولید شده‌ی تراز بالادست کمتر از 102 متر هستند. از نمودار قابلیت اعتماد نیز می‌توان مشاهده کرد که احتمال اینکه تراز آب بالادست بیشتر از 102 متر باشد، صفر است.

نتایج توابع آماری وزن مخصوص بتن نشان داد تابع چگالی احتمال وزن مخصوص بتن با میانگین 2230 کیلوگرم بر مترمکعب و انحراف معیار 223 کیلوگرم بر مترمکعب است. احتمال اینکه وزن مخصوص بتن 2230 کیلوگرم بر مترمکعب (مقدار میانگین) باشد، 50% است. مقدار کمینه و بیشینه تولید شده به ترتیب حدود 1400 و 3000 کیلوگرم بر مترمکعب هستند.

نتایج توابع آماری مدول کشسانی بتن نشان داد تابع چگالی احتمال مدول کشسانی بتن با میانگین $21/9$ گیگاپاسکال و انحراف معیار $2/19$ گیگاپاسکال است. احتمال اینکه مدول کشسانی بتن $21/9$ گیگاپاسکال (مقدار میانگین) باشد، 50% است. مقدار کمینه و بیشینه تولید شده به ترتیب حدود $1/4$ و 3 گیگاپاسکال هستند.

مقادیر پارامترهای خروجی تصادفی به صورت خودکار در نرم افزار اجزاء محدود تولید شده است که توابع آماری آن‌ها در ادامه ارائه شده است. در شکل ۱۱، توابع آماری بیشینه تنش اصلی بتن مشاهده می‌شود. تابع چگالی احتمال بیشینه تنش کششی بتن با میانگین $9/22$ مگاپاسکال و انحراف معیار $0/68$ مگاپاسکال است. احتمال اینکه بیشینه تنش کششی بتن $9/22$ مگاپاسکال (مقدار میانگین) باشد، 50% است. مقدار کمینه و بیشینه محاسبه شده نیز به ترتیب حدود $0/67$ و $1/25$ مگاپاسکال هستند. نمودار توزیع تجمعی نشان می‌دهد احتمال اینکه بیشینه تنش کششی بتن کمتر از $1/25$ مگاپاسکال باشد، 100% است. به عبارتی در تمامی نمونه‌های به دست آمده، بیشینه تنش کششی بتن کمتر از $1/25$ مگاپاسکال بوده

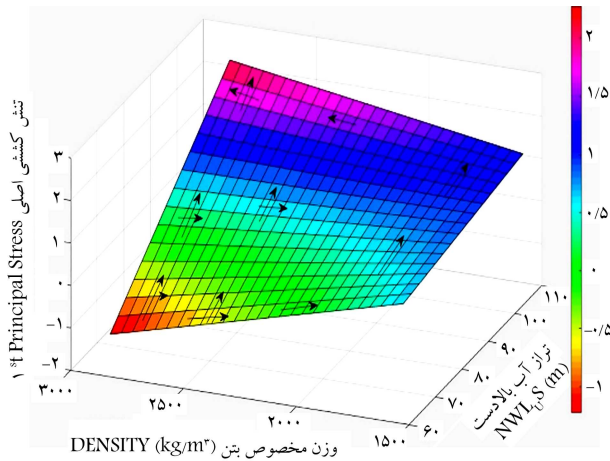


شکل ۱۲. توابع احتمالاتی متغیر تصادفی خروجی: تابع عملکردی بیشینه‌ی تنش.

شکل ۱۱. توابع احتمالاتی متغیر تصادفی خروجی: بیشینه‌ی تنش کششی بدنه.

تعداد بیشتر)، می‌توان به مقادیر کوچک‌تر احتمال خرابی و مقادیر بزرگ‌تر شاخص قابلیت اطمینان دست یافت و ممکن است تابع عملکردی منفی ایجاد شود. شاخص قابلیت اطمینان هدف سالیانه برای سدها باید دست‌کم $4/2$ باشد $(\beta^{Target} \geq 4/2)$ [۳۲،۳۰،۱۹] برای تعیین مقدار اخیر از شاخص قابلیت اطمینان، دست‌کم 100000 تکرار شبیه‌سازی لازم است که با استفاده از روش سطح پاسخ، هزینه‌ی محاسباتی کمتری نیاز است. در صورتی که تعیین سطح ایمنی لریزی سد مدنظر باشد، کمیته‌ی شاخص قابلیت اطمینان سالیانه حدود $1/55$ لازم است $(\beta^{Target} \geq 1/55)$ [۳۵]. سطح ایمنی موردنیاز در تحلیل استاتیکی سدهای بتنی قوسی در برخی منابع، [۳۶،۳۲،۲۵] ارائه شده است. سطح ایمنی لازم برای سازه‌های

کششی بتن است، مشاهده می‌شود. تابع چگالی احتمال تابع عملکردی، میانگین $1/73$ مگاپاسکال و انحراف معیار $0/27$ مگاپاسکال دارد. احتمال اینکه تابع عملکردی خرابی بتن $1/73$ مگاپاسکال (مقدار میانگین) باشد، 50% است. مقدار کمیته و بیشینه‌ی تولید شده به ترتیب حدود $0/62$ و $2/8$ مگاپاسکال هستند. نمودار توزیع تجمعی نشان می‌دهد احتمال اینکه تابع خرابی کمتر از 0 باشد، 0% است؛ به عبارتی، تمامی نمونه‌های به دست آمده تابع عملکردی خرابی، مقادیر مثبتی دارند. با توجه به مقادیر مثبت تابع عملکردی می‌توان گفت در 20000 چرخه‌ی انجام شده، هیچ خرابی تجربه نخواهد شد و $pf \leq 5 \times 10^{-5}$ و $\beta \geq 3/89$ است. در صورت قبول هزینه‌ی محاسباتی بیشتر (انجام چرخه‌های شبیه‌سازی با



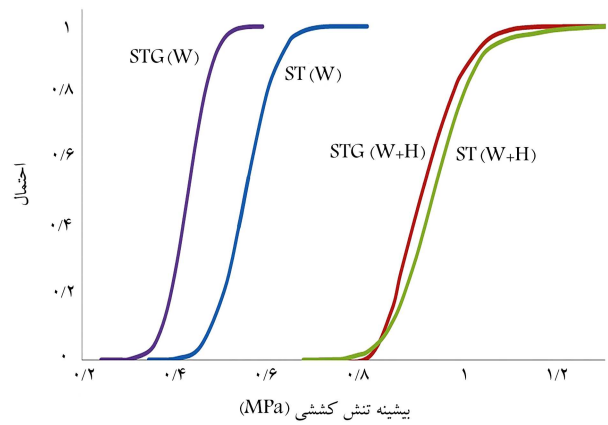
شکل ۱۴. رویه‌ی تنش کششی وابسته به متغیرهای تراز مخزن و جرم بتن

فاکتوریل)، که نوعی آزمایش طراحی است، استفاده شده است. با توجه به تعداد متغیرهای تصادفی $n = 3$ ، تعداد ۸ طراحی آزمایش ($8 = 2^3 = 2^n = N_{DOE}$) تولید شده است. در جدول ۱، نقاط طراحی یا ماتریس آزمایش‌های طراحی ارائه شده است. حدود متغیرهای تصادفی $85/5 \leq X_1 \leq 24/09$ و $2007 \leq X_2 \leq 2453$ تابع تخمین بیشینه‌ی تنش کششی بر حسب متغیرهای تصادفی سد و رویه‌ی غیرمسطح آن در شکل ۱۴ ارائه شده است. ضریب جملات مرتبه‌ی دوم $NWL * EX$ و $DEN * EX$ صفر به دست آمده است. طبق نتایج آزمایش‌های طراحی احتمال خرابی و شاخص قابلیت اعتماد برای سد پاکویما به ترتیب $pf \approx 2/52 \times 10^{-7}$ و $\beta \approx 5/02$ میانگین تنش کششی مجاز منهای ۳ برابر انحراف معیار محدود شود، آنگاه در 200 میلیون تکرار، احتمال خرابی و شاخص قابلیت اعتماد به ترتیب $pf \approx 1 \times 10^{-4}$ و $\beta \approx 3/72$ میانگین تنش کششی مجاز منهای ۲ برابر انحراف معیار محدود شود، آنگاه در 600 میلیون تکرار، احتمال خرابی و شاخص قابلیت اعتماد به ترتیب $pf \approx 3/6 \times 10^{-6}$ و $\beta \approx 4/49$ میانگین تنش کششی مجاز، $1/0$ تنش فشاری مجاز در نظر گرفته شود، آنگاه در 800 میلیون تکرار، احتمال خرابی و شاخص قابلیت اعتماد به ترتیب $pf \approx 1/14 \times 10^{-7}$ و $\beta \approx 5/16$ به دست می‌آید که در جدول ۳ ارائه شده است.

$$Y^{EXP} = 6/9 - 0/065NWL - 0/0046DEN + 0/00005NWL * DEN \quad (17)$$

۵. نتیجه‌گیری

هدف از نوشتار حاضر، بررسی احتمالاتی وضعیت ایمنی سد بتنی قوسی پاکویما با در نظر گرفتن مراحل ساخت در تحلیل سازه است. مدل سه‌بعدی ایجاد شده، قابلیت فراخوانی خودکار توسط برنامه و تغییر متغیرهای تصادفی را دارد. متغیرهای تصادفی، شامل: ارتفاع فشار هیدرواستاتیک تراز نرمال بالادست، وزن مخصوص بتن، و مدول کشسانی بتن با ضریب تغییرات ۵، ۱۰ و ۱۰ درصد است. شکل توزیع نرمال محدود شده از بالا، نرمال و برای متغیرها نیز نرمال در نظر گرفته شده است. ترکیب بار، شامل



شکل ۱۳. منحنی‌های شکنندگی.

با اهمیت زیاد، مانند سدهای بتنی نیز در برخی منابع دیگر، [۳۸،۳۷] ارائه شده است.

۵.۴. منحنی‌های شکنندگی

در ادامه، با استفاده از متغیر تصادفی خروجی بیشینه‌ی تنش، تابع توزیع تجمعی بیشینه‌ی تنش کششی به دست آمده است. برای مقایسه‌ی تأثیر در نظر گرفتن مراحل ساخت در تحلیل سازه، منحنی‌های شکنندگی برای دو ترکیب بارگذاری وزن بدنه‌ی سد $STG(W)$ و دیگری وزن بدنه‌ی سد به همراه فشار هیدرواستاتیک تراز نرمال $STG(W+H)$ در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. همین ترکیب بار برای تحلیل سازه بدون در نظر گرفتن مراحل ساخت به صورت استاتیکی فقط با نام‌های $ST(W)$ و $ST(W+H)$ نیز انجام شده است. مشاهده می‌شود که در نظر نگرفتن مراحل ساخت در تحلیل سازه منجر به نتایج همراه با خطا در منحنی‌های شکنندگی به ویژه در ترکیب بار اول (وزن سد) شده و در ترکیب بار دوم (وزن سد به همراه فشار هیدرواستاتیک)، خطای کمتری رخ داده است. در ترکیب بار $STG(W)$ ، بیشینه‌ی تنش کششی موجود در بدنه‌ی سد بین $0/52 \sim 0/32$ مگاپاسکال بوده است، در حالی که در ترکیب بار $ST(W)$ مقادیر $0/65 \sim 0/43$ مگاپاسکال داشته است. با توجه به اینکه مقادیر بیشینه‌ی تنش کششی ترکیب بار $STG(W)$ مقادیر دقیق‌تری ارائه می‌دهد، می‌توان گفت در نظر نگرفتن مراحل ساخت در مدل تحلیل سازه منجر به خطای بالای بیشینه‌ی تنش شده است. به عنوان مثال، احتمال رخداد بیشینه‌ی تنش کششی در ترکیب بار $STG(W)$ برابر $0/43$ مگاپاسکال و در $ST(W)$ برابر $0/56$ مگاپاسکال با 30% خطا در تنش مشاهده شده است.

در ترکیب بارهای $STG(W+H)$ و $ST(W+H)$ که تقریباً مقادیر بیشینه‌ی تنش در بازه‌ی $1/1 \sim 0/8$ مگاپاسکال قرار دارد و در نظر نگرفتن مراحل ساخت در مدل تحلیل سازه همچنان منجر به تنش‌های غیرواقعی بزرگ‌تری شده است، اما در قیاس با ترکیب بار اول، خطای مذکور کمتر است. در هر صورت برای هر دو ترکیب بار، سد پاکویما ایمن است و مقدار تنش مجاز کششی $2/65$ مگاپاسکال را تجربه نکرده است.

۶.۴. فرامدل سطح پاسخ خطی

برای دستیابی به مقادیر احتمال خرابی کوچک‌تر از 5×10^{-5} و شاخص ایمنی بزرگ‌تر از $3/89$ β بدون قبول هزینه‌ی محاسباتی زیاد از روش طرح عاملی کامل

جدول ۳. نتایج تحلیل قابلیت اعتماد به روش سطح پاسخ.

COV_{pf}	β	احتمال خرابی pf	تعداد چرخه $N_{sim} \cdot (\times 10^6)$	تنش f'_t	تنش کششی مجاز $f'_t = f_t - k\sigma$
۰/۷۱	۳/۷۲	$1/00 \times 10^{-4}$	۲۰۰	۱/۸۵	$k = 3$
۲/۱۵	۴/۴۹	$3/63 \times 10^{-6}$	۶۰۰	۲/۱۲	$k = 2$
۷/۰۴	۵/۰۲	$2/52 \times 10^{-7}$	۸۰۰	۲/۳۳	$f_t = 0/1f_c$
۱۰/۴۹	۵/۱۶	$1/14 \times 10^{-7}$	۸۰۰	۲/۳۸	$k = 1$
۰/۵۸	۵/۷۸	$3/75 \times 10^{-9}$	۸۰۰	۲/۶۵	$f_t(k = 0)$

و $\beta \approx 5/02$ است. به‌طورکلی نتایج نشان داده‌اند که در برابر بارگذاری استاتیکی وزن سد و فشار هیدرواستاتیک تراز نرمال، وضعیت ایمنی سد مناسب و ریسک خرابی آن بسیار کم بوده است. همچنین مشخص شد در نظر نگرفتن مراحل ساخت منجر به خطا در پاسخ برآورد تنش شده است، که این خطا در ترکیب بار وزن بدنه خیلی بیشتر از ترکیب بار وزن سد به همراه فشار هیدرواستاتیک بوده است. روش ارائه شده در نوشتار حاضر می‌تواند مورد استفاده طراحان و طراحان سدهای بتنی قرار گیرد و با بررسی وضعیت احتمالاتی ایمنی سدهای موجود یا سدهای جدید به طرح ایمن‌تر و قابل اطمینان‌تری دست یابند.

وزن سد و وزن سد به همراه فشار هیدرواستاتیک در تراز نرمال بالادست بوده است. با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نرم‌افزار اجزاء محدود در تعداد 20000 چرخه‌ی شبیه‌سازی، مقدار احتمال خرابی و شاخص قابلیت اعتماد سد به دست آمده است. نتایج نشان داد که هیچ خرابی تجربه نشده و $pf \leq 5 \times 10^{-5}$ و $\beta \geq 3/89$ بوده است. برای دستیابی به مقادیر دقیق‌تر احتمال خرابی و شاخص ایمنی لازم است که تعداد چرخه‌های بیشتری اجرا شود، که به دلیل غیرکاربردی بودن چرخه‌های اجرای اجزاء محدود از آزمایش‌های طراحی و روش طرح عملی کامل (فاکتوریل) استفاده شده است. نتایج نشان داد که $pf \approx 2/52 \times 10^{-7}$

پانویس‌ها

1. Basbolat
2. Chen
3. Fengjie
4. ANSYS
5. Latin Hypercube

منابع (References)

1. Hariri-Ardebili, M.A. "Safety and reliability assessment of heterogeneous concrete components in nuclear structures", *Reliability Engineering & System Safety*, **203**, 107104 (Nov., 2020).
2. Adeli, E., Rosic, B, Matthies HG. and et al. "Comparison of Bayesian methods on parameter identification for a viscoplastic model with damage", *Metals*, **10**(7), p. 876 (Jul., 2020).
3. Adeli, E., Rosic, B, Matthies HG. and et al. "Bayesian Parameter Determination of a C-T-Test described by a Viscoplastic-Damage Model considering the Model Error", *Metals*, **10**(9), 18 p. (Sep., 2020).
4. Altarejos-Garcia, L., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A. and et al. "Factor of safety and probability of failure in concrete dams", *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, pp. 251-256, CRC press: Boca Raton, FL, USA (2012).
5. Altarejos-Garcia, L., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A and et al. "Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis", *Structural Safety*, 36-37, pp. 1-13 (2012).
6. Başbolat. E.E. and Bayraktar. A. "Seismic reliability analysis of high concrete arch dams under near-fault effect", *4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Eskisehir, Turkey* (2017).
7. Chen, H., Xu, W., Wu, Q. and et al. "Reliability analysis of arch dam subjected to seismic loads", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **39**(11), pp. 7609-7619 (2014).
8. de Araújo, J. and Awruch, A.M. "Probabilistic finite element analysis of concrete gravity dams", *Advances in Engineering Software*, **29**(2), pp. 97-104 (1998).
9. Fengjie, T., Lahmer, T. and Siddappa, M.G. "Section optimization and reliability analysis of arch-type dams including coupled mechanical-thermal and hydraulic fields", *Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering*, pp. 186-193 (2015).
10. Gavabar, S.G. and Alembagheri, M. "Structural demand hazard analysis of jointed gravity dam in view of earthquake uncertainty", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**(10), pp. 3972-3979 (Oct., 2018).
11. Ganji, H.T., Alembagheri, M. and Khaneghahi, M.H. "Evaluation of seismic reliability of gravity dam-reservoir inhomogeneous foundation coupled system", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **13**(3), pp. 701-715 (Jun., 2019).

12. Goldgruber, M., Lampert, R. and Hinterdorfer, D. "Risk analysis- assessment of reliability for concrete dams", Presented at the 14th ICOLD International Benchmark Workshop in Stockholm (2017).
13. Hariri-Ardebili, M.A. "Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **31**, pp. 806-831 (Oct., 2018).
14. Hariri-Ardebili, M.A. and Pourkamali-Anaraki, F. "Simplified reliability analysis of multi hazard risk in gravity dams via machine learning techniques", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **18**(2), pp. 592-610 (Jun., 2018).
15. Hovde, E., Engseth, M., Konow, T. and Kristiansen S.A. "Probabilistic analysis of a gravity dam in Norway A new approach to dam safety in Norway", ICOLD2017 (2017).
16. Kartal, M.E., Basaga, H.B., Bayraktar, A. and et al. "Probabilistic nonlinear analysis of CFR dams by MCS using response surface method", *Applied Mathematical Modelling*, **35**(6), pp. 2752-2770 (2011).
17. Khaneghahi, M.H., Alembagheri, M. and Soltani, N. "Reliability and variance-based sensitivity analysis of arch dams during construction and reservoir impoundment", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **13**(3), pp. 526-541 (June, 2019).
18. MiarNaeimi, F., Azizyan, G. and Akbari, G. "Performance evaluation of monte carlo simulation and form method to calculate probability of failure for concrete gravity dams in sliding failure mode under static loading", *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(3), pp. 227-240 (Oct., 2016).
19. Pouraminian, M., Pourbakhshian, S. and Farsangi, E.N. "Reliability assessment and sensitivity analysis of concrete gravity dams by considering uncertainty in reservoir water levels and dam body materials", *Civil and Environmental Engineering Reports*, **30**(1), pp. 1-7 (Mar., 2020).
20. Pouraminian, M., Pourbakhshian, S., Farsangi, E.N. and Fotoukian, R. "Probabilistic safety evaluation of a concrete arch dam based on finite element modeling and a reliability L-R approach", *Civil and Environmental Engineering Reports*, **29**(4), pp. 62-78 (Dec., 2019).
21. Rivero, R. and Gigliotti, R. "Use of metamodels in uncertainty analysis of concrete arch dams", Ph.D. thesis, Sapienza University of Rome (2019).
22. Zacchei, E. and Molina, J.L. "Reviewing arch-dams' building risk reduction through a sustainability-safety management approach", *Sustainability*, **12**(1), p. 392 (Jan., 2020).
23. Pourbakhshian, S. and Ghaemian, M. "Investigating stage construction in high concrete arch dams", *Indian Journal of Science and Technology*, **8**(14), pp. 1-4 (Jul., 2015).
24. Federal Energy Regulatory Commission, "Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects", Chapter 11: Arch Dams, Washington, D.C. (1999).
25. Pouraminian, M. and Ghaemian, M. "Multi-criteria optimization of concrete arch dams", *Scientia Iranica, Transaction A, Civil Engineering*, **24**(4), pp. 1810-1820 (Aug., 2017).
26. Grooteman, F. "An adaptive directional importance sampling method for structural reliability", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **26**(2), pp. 134-141 (2011).
27. Reh, S., Beley, J.D., Mukherjee, S. and et al. "Probabilistic finite element analysis using ANSYS", *Structural Safety*, **28**(1-2), pp. 17-43 (2006).
28. Tarinejad, R., Pourgholi, M. and Yaghmaei-Sabegh, S. "System identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification", *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(1), pp. 53-64 (May, 2017).
29. Andreini, M., De Falco, A., Marmo, G. and et al. "Modelling issues in the structural analysis of existing concrete gravity dams", In *Proceedings of the 85th ICOLD Annual Meeting, Prague, Czech Republic*, pp. 3-7 (2017).
30. Xu, Q., Chen, J. and Li, J. "A study on the functional reliability of gravity dam", *Energy and Power Engineering*, **4**(2), pp. 59-66 (2012).
31. Fengjie, T. and Lahmer, T. "Shape optimization based design of arch-type dams under uncertainties", *Engineering Optimization*, **50**(9), pp. 1470-1482 (2018).
32. Pouraminian, M. and Pourbakhshian, S. "Shape optimization of concrete arch dams with SPSA algorithm and post-analysis of pareto front for selection the best alternatives", *Journal of Hydraulic Structures*, **6**(3), pp. 59-82 (2020).
33. Raphael, J.M. "Tensile strength of concrete", *ACI Journal Proceedings*, pp. 158-165 (Mar.-Apr., 1984).
34. Cordier M. and Leger, P. "Structural stability of gravity dams: a progressive assessment considering uncertainties in shear strength parameters", *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, **12**(2), pp. 109-122 (2018).
35. Segura, R., Padgett, J.E. and Paultre, P. "Metamodel-based seismic fragility analysis of concrete gravity dams", *Journal of Structural Engineering*, **146**(7), 04020121 (2020).
36. Pourbakhshian, S. and Ghaemian, M. "Shape optimization of arch dams using sensitivity analysis", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **20**(5), pp. 1966-1976 (2016).
37. Pouraminian, M., Pourbakhshian, S. and Hosseini, M.M. "Reliability analysis of Pole Kheshti historical arch bridge under service loads using SFEM", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, **4**(1), pp. 1-13 (2019).
38. Vrouwenvelder, T. "The JCSS probabilistic model code", *Structural Safety*, **19**(3), pp. 245-251 (1997).