به نام خداوند بخشنده مهربان

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

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

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب

نیکو منصوری

استاد راهنما

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

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

Risk Analysis for Dam Overtopping Considering Hydraulic and Hydrologic Parameters (Vanak Dam as a Case Study)

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب

نیکو منصوری

استاد راهنما

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

۱۳۹۰

سپاس خدای متعال را که در تمام لحظات زندگی، همراه و پشتیبان من است.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

همسر عزیزم

و خانواده بزرگوارم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول کلیات

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ سدسازی و ذخیره‌ی آب ۲

۱-۳ عدم قطعیت و آنالیز ریسک ۴

۱-۴ هدف و روند انجام تحقیق ۸

فصل دوم پیشینه‌ی علمی

۲-۱ مقدمه ۱۰

۲-۲ مروری بر کاربرد آنالیز ریسک در علوم مهندسی ۱۰

۲-۳ مروری بر کاربرد آنالیز ریسک در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران ۱۲

۲-۴ مروری بر کاربرد آنالیز ریسک در مهندسی سازه‌های هیدرولیکی ۱۵

۲-۵ مروری بر کاربرد آنالیز ریسک در محاسبه ریسک روگذری آب از سد ۱۹

۲-۶ جمع‌بندی فصل ۲۷

فصل سوم مبانی تئوری و معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه ۲۹

۳-۲ مفاهیم آماری و احتمالاتی بنیادی در آنالیز اعتمادپذیری ۲۹

۳-۲-۱ متغیر تصادفی و تابع احتمال ۳۰

۳-۲-۲ مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی ۳۰

۳-۲-۳ توابع توزیع احتمال ۳۱

۳-۲-۴ تخمین پارامترهای آماری و صحت‌سنجی توزیع‌ها ۳۷

۳-۲-۵ تحلیل فراوانی ۳۹

۳-۳ تحلیل ریسک ۳۹

۳-۳-۱ مفهوم کلی ریسک ۴۰

۳-۳-۲ حساسیت ریسک نسبت به عدم قطعیت عناصرآن ۴۲

۳-۳-۳ روش‌های محاسبه ریسک ۴۵

۳-۴ جمع‌بندی فصل ۵۲

فصل چهارم مدل‌سازی ریسک روگذری سد

۴-۱ مقدمه ۵۳

۴-۲ مدل‌سازی ریسک روگذری ۵۵

۴-۳ فرمول‌بندی تابع عملکرد ۵۶

۴-۳-۱ ارتفاع سد ۵۶

۴-۳-۲ ارتفاع اولیه‌ی آب مخزن ۵۸
۴-۳-۳ افزایش ارتفاع آب ناشی از سیلاب ۵۹
۴-۳-۴ افزایش ارتفاع آب ناشی از وزش باد ۶۵
۴-۴ جمع‌بندی فصل ۷۱
فصل پنجم مطالعه‌ی موردی: سد ونک
۵-۱ مقدمه ۷۲
۵-۲ معرفی مطالعه‌ی موردی ۷۲
۵-۳ تشریح متغیرهای تصادفی مؤثر در تابع شکست ۷۵
۵-۳-۱ ارتفاع سد ۷۵
۵-۳-۲ ارتفاع اولیه‌ی آب مخزن ۷۶
۵-۳-۳ هیدروگراف سیلاب ورودی ۷۶
۵-۳-۴ رابطه‌ی دبی- ارتفاع سرریز ۸۰
۵-۳-۵ رابطه‌ی حجم- ارتفاع مخزن ۸۳
۵-۳-۶ روندیابی سیلاب ۸۴
۵-۳-۷ اثر باد ۸۴
۵-۴ آنالیز ریسک روگذری در سد ونک ۸۸
۵-۴-۱ تراز اولیه‌ی آب مخزن ۸۹
۵-۴-۲ دبی پیک سیلاب ۹۲
۵-۴-۳ رابطه‌ی دبی- ارتفاع سرریز ۹۳
۵-۴-۴ رابطه‌ی حجم- ارتفاع مخزن ۹۳
۵-۴-۵ تعداد دریچه‌های کارآمد سرریز ۹۵
۵-۴-۶ سرعت وزش باد ۹۶
۵-۴-۷ ضریب تصحیح مدل‌سازی افزایش ارتفاع ناشی از باد ۹۶
۵-۴-۸ تحلیل اثر باد در ریسک روگذری ۹۸
۵-۴-۹ مقایسه روش‌های MCS و LHS در تحلیل ریسک ۹۸
۵-۵ جمع‌بندی فصل ۹۹
فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ مقدمه ۱۰۱
۶-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی ۱۰۲
۶-۳ پیشنهادات ۱۰۳
مراجع **۱۰۵**
پیوست ۱
پ۱-۱ روش گشتاورها ۱۱۰
پ۱-۲ روش درستنمایی حداکثر ۱۱۱

پ۱-۳ آزمون نیکویی برازش ۱۱۲
پیوست ۲
پ۲-۱ تولید اعداد تصادفی ۱۱۳
پ۲-۲ الگوریتم‌های تولید متغیر تصادفی ۱۱۴
پ۲-۳ انتگرال‌گیری به روش مونت‌کارلو ۱۱۶
پیوست ۳
پ۳-۱ تعیین موقعیت نقطه‌ی طراحی و تقریب تابع عملکرد در روش AFOSM ۱۱۸
پیوست ۴
پ۴-۱ مدل آنالیز ریسک به روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزار متلب ۱۲۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نتایج آنالیز در شرایط کارکرد صحیح سرریزها با تراز اولیه آب ۱۶۳/۶ متر [۳۶] ۲۴

شکل ۳-۱: تابع چگالی احتمال بار و مقاومت ۴۱

شکل ۳-۲: تابع عملکرد یا تابع شکست ۴۱

شکل ۳-۳: تغییرات ریسک در مقابل تغییرات μ_R/μ_L ۴۳

شکل ۳-۴: تغییرات ریسک در مقابل تغییرات δ_L و δ_R ۴۴

شکل ۴-۱: عوامل مختلف تأثیرگذار بر پدیده‌ی شکست سدها ۵۴

شکل ۴-۱: الف)هیدروگراف ورودی و خروجی ب) تغییرات حجم ذخیره و ج) تراز آب در یک مخزن بدون کنترل ۶۰

شکل ۴-۲: مقادیر ارتفاع موج مهم ۶۶

شکل ۴-۳: ارتفاع بالاروی موج ناشی از باد ۶۷

شکل ۵-۱: محدوده‌ی جغرافیای سد ونک ۷۳

شکل ۵-۲: روند ارزیابی ریسک روگذری ناشی از باد و سیلاب ۷۵

شکل ۵-۳: منحنی آبگذری سرریزهای سد ونک ۸۲

شکل ۵-۴: اثر تغییرات میانگین تراز اولیه آب بر ریسک ۹۰

شکل ۵-۵: اثر تغییرات انحراف معیار تراز اولیه آب بر ریسک ۹۱

شکل ۵-۶: روندیابی سیلاب ۱۰۰۰۰ ساله با تراز اولیه متفاوت ۹۱

شکل ۵-۷: اثر تغییرات دبی پیک بر ریسک ۹۳

شکل ۵-۸: اثر تغییرات انحراف معیار ضرایب O_R و R_S بر ریسک ۹۴

شکل ۵-۹: اثر تعداد دریچه‌های کارآمد سرریز بر ریسک ۹۵

شکل ۵-۱۰: اثر سرعت وزش باد بر ریسک ۹۶

شکل ۵-۱۱: اثر سرعت وزش باد بر ریسک ۹۷

شکل ۵-۱۲: نتایج آنالیز ریسک در شرایط مختلف ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۳-۱: مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی ۳۲

جدول۳-۲: توابع توزیع احتمال و مشخصه‌های آماری مهم آن‌ها ۳۸

جدول۴-۱: ضریب ارتفاع موج طراحی ۶۷

جدول۴-۲: نسبت سرعت باد از سطح آب به خشکی ۶۷

جدول۴-۳: ارتفاع موج مهم بر حسب فاکتور b ۶۸

جدول۴-۴: ضرایب a و b در رابطه (۴-۲۰) ۶۹

جدول۵-۱: روابط مختلف تعیین مقدار فراوانی نسبی ۷۷

جدول۵-۲: آمار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه سولگان بر حسب m^3/s ۷۸

جدول۵-۳: آمار دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه سولگان برحسب m^3/s پس از تصحیح و تکمیل ۷۹

جدول۵-۴: نتایج تحلیل فراوانی دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه سولگان بر حسب m^3/s ۸۱

جدول۵-۵: مشخصات دبی پیک با دوره‌های بازگشت مختلف در محل سد ونک بر حسب m^3/s ۸۱

جدول۵-۶: مشخصات دبی پیک با دوره‌های بازگشت مختلف در محل سد ونک ۸۲

جدول۵-۷: مشخصات هندسی مخزن ۸۳

جدول۵-۸: نتایج روندیابی سیل در سد ونک ۸۴

جدول۵-۹: نتایج افزایش ارتفاع آب ناشی از وزش باد ۸۵

جدول۵-۱۰: آمار سرعت حداکثر باد در ایستگاه شهرکرد بر حسب m/s ۸۶

جدول۵-۱۱: نتایج تحلیل فراوانی سرعت حداکثر باد در ایستگاه شهرکرد بر حسب m/s ۸۷

جدول۵-۱۲: مشخصات سرعت حداکثر باد با دوره‌های بازگشت مختلف در محل سد ونک بر حسب m/s ۸۷

جدول۵-۱۳: خلاصه مشخصات آماری متغیرهای تصادفی ۸۸

جدول۵-۱۴: اثر تراز اولیه آب ۸۹

جدول۵-۱۵: اثر دبی پیک ۹۲

جدول۵-۱۶: اثر O_R و R_S در سیلاب ۱۰۰۰ ساله ۹۴

جدول۵-۱۷: اثر تعداد دریچه ۹۵

جدول۵-۱۸: اثر سرعت باد ۹۶

جدول۵-۱۹: اثر ضریب تصحیح مدل‌سازی باد ۹۷
جدول۵-۲۰: تحلیل اثر باد ۹۸
جدول۵-۲۱: مقایسه روش *MCS* و روش *LHS* ۹۹

چکیده

شکست سدها همواره تهدیدی برای جان و مال انسان‌ها محسوب می‌شود. برای دست‌یابی به میزان ایمنی و اعتمادپذیری یک سد، محاسبه ریسک شکست آن راه‌کاری اساسی و مهم است. در میان تمام عواملی که باعث شکست سدها می‌شوند، روگذری خصوصاً در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بزرگ‌ترین خطر محسوب می‌شود. به طوری که بیش از یک سوم شکست سدها در جهان به علت روگذری رخ داده است. در این تحقیق به منظور توسعه کاربرد آنالیز ریسک در تحلیل ایمنی سدها، به محاسبه‌ی خطر روگذری یک سد خاکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در این پدیده پرداخته شده است. این پارامترها شامل ارتفاع سد، تراز اولیه آب مخزن، دبی پیک سیلاب، هندسه‌ی مخزن، دبی خروجی سرریز، خطای روندیابی، سرعت باد و خطای مربوط به محاسبه‌ی افزایش ارتفاع ناشی از وزش باد است. برای برآورد ریسک از روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و LHS استفاده شده است. برای درک بهتر و نشان دادن کاربرد آنالیز ریسک، اعتمادپذیری سد ونک در برابر روگذری بررسی 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 پیک سیلاب نقش بسزایی در کاهش ریسک روگذری سد دارد. در حالی که تأثیر تراز اولیه آب بر میزان خطرپذیری سد قابل اغماض است. بر اساس نتایج آنالیز ریسک، با تلفیق اثر باد و سیل میزان ریسک سد به طور محسوسی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، تحلیل ریسک، روگذری، شبیه‌سازی، مونت‌کارلو، سد ونک

فصل اول
کلیات

۱-۱ مقدمه

آب مایه‌ی حیات و فراوان‌ترین ماده‌ی مرکب بر روی سطح کره زمین است. بیش از ۷۰ درصد سطح کره زمین را آب پوشانده‌است (نزدیک به ۳۶۰ میلیون از ۵۱۰ میلیون کیلومتر مربع). ۹۷ درصد از کل آب‌های جهان در اقیانوس‌ها واقع هستند و تنها ۳ درصد آن‌ها را آب‌های شیرین تشکیل می‌دهد. ۶۸/۷ درصد از آب‌های شیرین به صورت یخچال‌های طبیعی‌اند و ۳۰/۱ درصد آنها در زیر زمین قرار دارند. بنابراین تنها ۰/۳ درصد از آبهای شیرین به صورت آبهای سطحی هستند. بدین ترتیب ۹۹ درصد کل آب‌ها غیرقابل استفاده است و از یک درصد باقی‌مانده حجم زیادی از آن دور از دسترس است.

۱-۲ سدسازی و ذخیره‌ی آب

از گذشته‌های بسیار دور تا به امروز، کنترل و تأمین آب جزء دغدغه‌های اصلی انسان برای بقاء و تداوم حیات وی مخصوصاً در مناطق خشک جهان محسوب می‌شده است. بنابراین بشر همواره در جستجوی راه‌هایی برای کنترل و ذخیره‌سازی آب بوده است. ساده‌ترین راه، احداث سدها و بندهایی در مسیر جریان آب است. در ابتدا ساخت سدها با مشکلات زیادی مواجه بود ولی با گذشت زمان بر تجربه و دانش بشر افزوده شد و انسان موفق به ساخت سدهایی

شد که هنوز آثار آنها به جا مانده‌است. سد الکافرا قدیمی‌ترین سد شناخته شده جهان در ۱۱ کیلومتری جنوب شرقی حلوان مصر بین سالهای ۲۹۵۰ تا ۲۷۵۰ قبل از میلاد با طول ۱۱۵ متر و ارتفاع ۱۲ متر ساخته شده‌است.

در سرزمین ایران نیز که از قدیم در معرض سیلاب و طغیان رودخانه‌ها قرار داشته، سدسازی از قدمتی بسیار طولانی برخوردار است. در دوره هخامنشیان سدها و بندهای زیادی در بخش‌های جنوب غربی و جنوبی ایران ساخته‌شد. در آن زمان بر روی رودخانه کر در فارس بندهایی برای آبیاری زمین‌های پیرامون تخت جمشید ایجاد شد. با این که آثاری از تمامی سدهای ساخته شده در زمان هخامنشی‌ها در دست نیست، ولی برخی از بندها که تا به امروز بر روی رودخانه‌ها بر جای مانده‌اند دارای پایه‌های هخامنشی هستند. از جمله این سدها بند ناصری و بند فیض‌آباد است. در نزدیکی شهرک کوار در جنوب شیراز سد هخامنشی دیگری به نام بند بهمن بر روی رودخانه مند بنا شده است. در زمان ساسانیان سد شادروان شوشتر بر روی رودخانه کارون ساخته‌شد. بیش‌تر سدها به منظور مهار و کنترل سیلاب ساخته می‌شوند. هرچند سدها فواید دیگری نیز دارند که در ادامه به ذکر برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

- تأمین آب لازم برای کشاورزی، صنعت و شرب
- تولید انرژی برقابی
- ایجاد امکان کشتیرانی و حمل و نقل
- جلوگیری از فرسایش سطح زمین و تغذیه‌ی سفره‌های آب زیرزمینی
- تلطیف محیط و ایجاد تفرجگاه.

در کنار تمام مزایایی که برای سد می‌توان ذکر کرد، سدسازی دارای معایبی نیز می‌باشد. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- خسارات اجتماعی و اقتصادی ناشی از جابه‌جایی میلیون‌ها نفر به علت ایجاد دریاچه سد
- مهاجرت نیروهای عظیم کار به منطقه و اثرات آن بر فرهنگ بومی مردم
- زیر آب رفتن آثار باستانی و زمین‌های حاصل‌خیز سواحل رودخانه
- خطر نابودی گونه‌هایی از حیوانات و گیاهان در اثر تغییرات زیست‌محیطی ناحیه
- انباشته شدن حجم زیادی از رسوبات در مخزن و عدم انتقال آن به پایین‌دست وکاهش حاصل‌خیزی اراضی زراعی
- بالا آمدن نامطلوب سطح آب‌های زیرزمینی
- تأثیرات نامطلوب ژئوتکنیکی
- لغزش دامنه‌ها و سقوط صخره‌های عظیم به داخل دریاچه و آسیبی که موج تولید شده بر سد اعمال می‌کند
- افزایش احتمال وقوع زلزله القایی

- خسارت‌های سنگین ناشی از شکست سد.

در جهان بیش از ۴۵۰۰۰ سد با ارتفاع بین ۱۰ تا ۳۰ متر، ۷۰۰۰ سد با ارتفاع بین ۳۰ تا ۶۰ متر و ۲۰۰۰ سد با ارتفاع بیش از ۶۰ متر وجود دارد. از مجموع این ۲۰۰۰ سد بلندتر از ۶۰ متر، ۳۰ درصد آنها بتنی وزنی، ۳۰ درصد بتنی قوسی و مابقی از نوع خاکی هستند. بر اساس آمار، حدود ۲ درصد از سدهای جهان دچار شکست شده‌اند، که رقم قابل ملاحظه‌ای از قربانی‌ها و افت سرمایه‌های ملی در کشورهای مختلف را دربر می‌گیرد. بیش‌ترین شکست مربوط به سدهای کوچک است که البته تعداد زیادی از سدها را نیز شامل می‌شود. علاوه بر این حدود ۷۰ درصد شکست سدها در ۱۰ سال اول بهره‌برداری آن‌ها اتفاق می‌افتد و از این میان تعداد زیادی در همان سال‌های اول بهره‌برداری تخریب می‌شوند.

شکست در سدهای بتنی می‌تواند به هر یک از دلایل؛ ناپایداری، نشست پی، فرسایش درونی (وقوع پدیده‌ی *piping*)، ضعف در مقاومت برشی، لبریز شدن آب از سد، شکست سازه‌ای بدنه و یا تعمیر و نگهداری نامناسب اتفاق بیافتد. هر کدام از این موارد نیز به نوبه‌ی خود می‌تواند از عوامل دیگری سرچشمه بگیرد. مثلا روگذری می‌تواند ناشی از سیلاب، باد، لغزش دیواره‌های مخزن و یا اثر هم‌زمان دو یا هر سه مورد اتفاق بیافتد [۱]. بر اساس آمار، مهم‌ترین عامل شکست در سدهای بتنی مشکلات پی بوده‌است، در حالی که در سدهای خاکی روگذری آب از سد مهم‌ترین عامل شکست محسوب می‌شود. هم‌چنین فرسایش داخلی در بدنه سد نظیر پدیده‌ی *piping* و ضعف در پی از دیگر عوامل مؤثر در شکست سدهای خاکی هستند. در مورد سدهای در حال ساخت، تخریب فرازبند یا بدنه اصلی در اثر روگذری تنها دلیل شکست بوده، که گاهی خسارات مالی سنگین و تأخیر طولانی در روند اجرای پروژه را به همراه داشته است. شایان ذکر است که در بین شکست‌هایی که در سدها به وقوع پیوسته است، بیش‌ترین تعداد شکست مربوط به سدهای خاکی است. یکی از از روش‌های مفید در زمینه‌ی برآورد احتمال شکست سدها در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها است.

سدها و سازه‌های هیدرولیکی همواره تحت تأثیر عوامل تصادفی‌اند و از قابلیت آن‌ها برای ارائه عملکرد خواسته شده نمی‌توان مطمئن بود. در چنین شرایطی عدم قطعیت یک عامل مهم در ارزیابی اعتمادپذیری یا شکست سازه است که در ادامه به توصیف این موضوع پرداخته می‌شود.

۱-۳ عدم قطعیت و آنالیز ریسک

توصیف پدیده‌ها در قالب مدل‌های ریاضی همواره با عدم قطعیت روبرو است. درک ناقص از ماهیت پدیده‌ها، پویایی هر پدیده، دانش ناکافی از نحوه‌ی اندازه‌گیری صحیح و خطاهای انسانی از عوامل ایجاد عدم قطعیت

می‌باشند. با انجام تحقیقات جامع، جمع‌آوری داده‌ها، ساخت دقیق تجهیزات و بهره‌گیری از ابزارهای آماری می‌توان عدم قطعیت را کاهش داد.

عوامل عدم قطعیت در پروژه‌های مهندسی منابع آب بسیار متنوع‌اند و شامل عدم قطعیت طبیعی، عدم قطعیت مدل‌سازی، عدم قطعیت پارامترهای مدل، عدم قطعیت داده‌ها و عدم قطعیت عملکردی سیستم است. عدم قطعیت طبیعی تحت تأثیر ذات نوسانی و زودگذر روندهای طبیعی است. عدم قطعیت مدل‌سازی شامل ناتوانی‌ها در شبیه‌سازی و طراحی مدل در ارائه رفتار فیزیکی صحیح سیستم است. عدم قطعیت پارامترهای مدل ناشی از تغییر در نحوه‌ی تعیین آن‌هاست. عدم قطعیت داده‌ها نیز خطاهای اندازه‌گیری، نسخه‌برداری و دسترسی به داده‌ها را منعکس می‌کند. عدم قطعیت عملکردی در ارتباط با ساخت، تولید، نگهداری و دیگر فاکتورهای انسانی است که در مدل‌سازی یا طراحی در نظر گرفته نشده‌اند [۲]. به طور کلی در طراحی و تحلیل سیستم‌های مهندسی منابع آب در جنبه‌هایی چون هیدرولوژی، هیدرولیک، سازه و اقتصاد عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی به دلیل ماهیت تصادفی و مشاهده‌ای پدیده‌های هیدرولوژیکی، کمبود دانش و نقص در مدل‌سازی به وجود می‌آیند. این عدم قطعیت به همراه خطا در ساخت و ضعف مصالح از طریق به کار بردن مدل یا فرمول ساده‌سازی شده برای تعریف رفتار هیدرولیکی سازه، به سازه‌های هیدرولیکی منتقل می‌شود. عدم قطعیت اقتصادی ناشی از عدم قطعیت در هزینه‌های ساخت، خسارت، درآمد، اجرا و نگهداری، تورم و عمر پروژه است [۳]. هر یک از پارامترهای به کار رفته در طراحی و تحلیل سازه‌های هیدرولیکی دارای درجه‌ای از عدم قطعیت است. بر حسب اهمیت پروژه و پیچیدگی مدل ریاضی آن و در نظر گرفتن اثرگذاری، نوع و دقت اندازه‌گیری پارامترها، برخی از آن‌ها به صورت قطعی و برخی دیگر با عدم قطعیت وارد سیستم می‌شوند. به پارامترهای غیر قطعی به جای یک کمیت، یک توزیع آماری مناسب نسبت داده می‌شود و متناسب با آن، میانگین و انحراف معیار برای آن پارامتر تعریف می‌شود. در روند طراحی و تحلیل، عدم قطعیت پارامترهای ورودی به پاسخ‌های سیستم سرایت می‌کند. لذا، برای برآورد پاسخ‌های متاثر از عدم قطعیت‌های ورودی نیاز به فنون خاص ریاضی و آماری است که تحت عنوان تحلیل عدم قطعیت[1] شناخته شده‌اند. در واقع هدف آنالیز عدم قطعیت تعیین خصوصیات آماری خروجی یا پاسخ سیستم است که تحت تأثیر پارامترهای غیر قطعی در سیستم هستند.

در یک سیستم مهندسی، شکست به عنوان نقص در ایجاد رابطه‌ها و رسیدن به اهداف مطلوب است. شکست می‌تواند

1- Uncertainty Analysis

به دو صورت سازه‌ای و عملکردی اتفاق بیافتد. یک مثال خوب در این باره سیستم توزیع آب است. شکست سازه‌ای مانند خرابی لوله یا پمپ باعث می‌شود، تقاضای آب ارضا نشود. از جنبه‌های شکست عملکردی سیستم توزیع آب ناتوانی در تأمین هد فشار مورد نیاز در محل تقاضا بدون بروز هیچگونه خرابی است. در چنین سیستمی، شکست وقتی رخ می‌دهد که بار موجود (L) از ظرفیت مقاومت سیستم (R) بیش‌تر شود. منظور از بار تنش خارجی است، که بر سیستم اعمال می‌شود و مقاومت، ظرفیت سیستم برای غلبه بر بار است. بنابراین اعتمادپذیری سیستم (α) برابر با احتمال وقوع شرایطی است که در آن $R \geq L$ باشد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha = P[R \geq L] \qquad (۱-۱)$$

که در آن $P[]$ احتمال است. به بیان دیگر، خطر پذیری به عنوان احتمال شکست ($\acute{\alpha}$) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\acute{\alpha} = 1 - \alpha \qquad (۲-۱)$$

به عنوان مثال در مسئله شکست سد به علت روگذری، مقاومت، ارتفاع سد است و بیش‌ترین تراز آب مخزن به عنوان بار در نظر گرفته می‌شود. پس شکست سد وقتی رخ می‌دهد که تراز بیشینه‌ی آب مخزن از ارتفاع سد تجاوز کند. در هر دو مورد بار و مقاومت، متغیرهای غیر قطعی وجود دارد که باعث می‌شود این دو به عنوان متغیر تصادفی وارد مسائل شوند. به عنوان یک مثال ساده می‌توان سیستم فاضلاب را در نظر گرفت. در این سیستم مقدار دبی خروجی نقش بار را دارد و ظرفیت سیستم همان مقاومت است. از رابطه‌ی منطقی برای برآورد بار و از رابطه‌ی مانینگ برای محاسبه‌ی مقاومت استفاده می‌شود. هیچ یک از متغیرهای رابطه منطقی را نمی‌توان با قطعیت تعیین کرد. هم‌چنین در رابطه مانینگ مقدار شیب اصطکاکی و ضریب زبری دارای عدم قطعیت‌اند. بنابراین اگرچه هر دو متغیر بار و مقاومت از طریق روابط کاملاً قطعی تعریف شده‌اند، اما همان‌طور که دیده می‌شود هر دو مقدار، تابع متغیرهای غیرقطعی دیگری هستند که منجر به عدم قطعیت در آن‌ها می‌شود. در این مثال مانند انواع دیگر سازه‌های هیدرولیکی عدم قطعیت بار در واقع عدم قطعیت هیدرولوژیکی است و عدم قطعیت مقاومت ناشی از عدم قطعیت‌های هیدرولیکی است [۴].

به طور کلی پارامترهای غیر قطعی در برآورد ریسک سد را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد [۱]:

پارامترهای هیدرولوژیکی: شامل توزیع‌های مربوط به فراوانی سیلاب، حجم، زمان و مقدار دبی پیک سیلاب، رابطه بارش- رواناب، تراز اولیه آب در مخزن قبل از وقوع سیلاب، رسوبات مخزن و گرفتگی ناشی از یخ و زباله

پارامترهای هیدرولیکی: شامل دبی سرریز، روندیابی سیل، خیزاب موج، آبگیر، سیستم‌های آبگیری و تخلیه‌کننده، فرسایش و خرابی دریچه‌ها یا شیرها

پارامترهای زمین‌شناسی: شامل شرایط نامطلوب خاک مانند لایه‌های ضعیف، شکاف و درزه‌ها، تراوش، فرسایش

درونی، ناپایداری شیب، زمین لغزش، نشست غیر یکنواخت و فشار آب منفذی غیر مجاز

پارامترهای لرزه‌ای: شامل پایداری لرزه‌ای سد، روانگرایی، تسونامی، ترک‌های ناشی از زلزله و امواج

پارامترهای سازه‌ای و ساخت: شامل طرح سازه‌ای نامناسب، استفاده از مصالح ضعیف، خطاهای ساخت و کنترل کیفیت ضعیف

پارامترهای عملکردی و بهره برداری: شامل نگهداری ضعیف، بهره برداری ناصحیح و خطاهای انسانی.

تمام این پارامترها تحت تأثیر عدم قطعیت‌هایی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی ریسک سد باید تمام این پارامترها را در نظر گرفت که به زمان طولانی و محاسبات زیاد نیاز دارد. در این تحقیق عدم قطعیت‌هایی که تأثیر بیش‌تری در افزایش احتمال وقوع شکست سد دارند، لحاظ می‌شوند. محاسبه ریسک (احتمال شکست)تحت عنوان آنالیز خطرپذیری[1] (RA) انجام می‌شود. در واقع RA روشی است برای ارزیابی عدم قطعیت و خطرپذیری سیستم که از شیوه‌های ریاضی و فنون آماری بهره می‌گیرد.

شکست در یک سیستم هیدرولیکی نظیر سد، از عوامل مختلفی سرچشمه می‌گیرد. از طریق RA می‌توان خطرپذیری هر یک از این عوامل را محاسبه کرد و با ترکیب آن‌ها تابع شکست سد را تشکیل داد و خطرپذیری کلی را به کمک RA محاسبه نمود. با در اختیار داشتن میزان خطرپذیری شکست یک سد می‌توان تصمیم‌های لازم مانند عدم احداث سد، بازنگری در طراحی، اصلاح سازه‌ی سد، افزایش ایمنی از طریق اقداماتی چون آموزش پرسنل، تهیه‌ی دستگاه‌های هشدار خطر، افزایش کیفیت و دقت تجهیزات و یا حتی تخلیه‌ی پایین‌دست را اتخاذ نمود. هر یک از این تصمیم‌ها را می‌توان با RA دوباره تحلیل کرد و به تصمیم بهینه دست یافت. در واقع خروجی RA اطلاعات گسترده‌ای است که امر تصمیم‌گیری را در زمینه‌های مهندسی، سیاسی، اجتماعی و اقتصادی میسر می‌سازد.

روش‌های عدم قطعیت و خطر پذیری متنوع‌اند و هر یک از آن‌ها از سطح پیچیدگی و آماری خاصی برخوردار است. به همین دلیل، انتخاب روش به اطلاعاتی از جمله پیچیدگی مدل، داده‌های در دسترس و دقت مورد نیاز در خروجی‌ها بستگی دارد. این روش‌ها به دو دسته‌ی تحلیلی و تقریبی تقسیم می‌شوند که روش‌های تحلیلی مانند روش انتقال انتگرال[2] و توزیع محرکه[3] اطلاعات دقیقی ارائه می‌دهند. اما در عمل کاربرد آن‌ها غیر ممکن است. زیرا با وجود تابع چگالی احتمال پارامترهای غیر قطعی، به روابط بغرنج منجر می‌شود. به همین دلیل روش‌های تقریبی

1- Risk Analysis
2- Integral Transformation
3- Derived Distribution

کاربردی‌ترند. روش‌های تحلیل عدم قطعیت شامل تبدیل توانی فوریه[۱] *(FET)*، تبدیل ملین[۲] *(MT)*، تحلیل واریانس یک‌طرفه[۳] *(FOVEM)*، تخمین نقطه‌ای آماری رزونبلت[۴] *(RPEM)* و تخمین نقطه‌ای آماری هار[۵] *(HPEM)* است. روش‌های تحلیل خطرپذیری شامل شاخص اعتمادپذیری و عملکردی[۶] *(PFRT)*، تجمیع مستقیم[۷] *(DIM)*، ممان دوم مرتبه اول مقدار میانه[۸] *(MFOSM)* و ممان دوم مرتبه اول پیشرفته[۹] *(AFOSM)* است. از جمله روش‌های دیگری که در آنالیز ریسک به کار می‌رود می‌توان به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو[۱۰] *(MCS)* و روش[۱۱] *LHS* اشاره کرد، که از تکنیک‌های شبیه‌سازی بهره می‌گیرند [۲ و ۳]. اطلاعات کامل‌تر در مورد برخی از این روش‌ها در فصول بعدی ارائه خواهد شد.

۱-۴ هدف و روند انجام تحقیق

ایران از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود. توزیع زمانی بارش در ایران در طول سال غیر یکنواخت است و با نیازمندی‌های کشاورزی و تولید انرژی همزمان نیست. علاوه بر آن توزیع مکانی بارش نیز بسیار ناهمگون است، به طوری که بخش وسیعی از مناطق مرکزی ایران از حداقل بارش برخوردار بوده و قسمت عمده‌ی بارش تنها در بخش کمی از ایران جذب می‌شود. تحت چنین شرایط اقلیمی، میزان آب جاری در اکثر رودخانه‌های ایران با تغییر فصل به شدت متغیر است و در بسیاری از موارد سیلاب‌های بزرگ‌تری نسبت به دبی متوسط سالانه رخ می‌دهد. بنابر آنچه گفته شد حفظ، کنترل و انتقال آب در ایران اهمیت زیادی داشته و از گذشته‌های دور تاکنون سدسازی بر روی رودخانه‌های ایران رایج بوده است.

در کنار تمام منافعی که سدها دارند، خطر شکست آن‌ها همواره تهدیدی برای جان و مال انسان محسوب می‌شود. به علت عدم قطعیت موجود در طبیعت سدها و فعالیت‌های انسانی وابسته به آن‌ها، شکست سد یک پدیده قطعی نیست. به همین دلیل برای ارزیابی مقدار عددی امنیت سد، تئوری احتمال به کار برده می‌شود. این مطالعه تلاشی برای

1- Fourier Exponential Transforms
2- Mellin Transforms
3- First-Order Variance Estimation Method
4- Rosenblueth's Probabilistic Point Estimation Method
5- Harr's Probabilistic Point Estimation Method
6- Performance Functions and Reliability Index
7- Direct Integration Method
8- Mean Value first-Order Second-Order Method
9- Advanced First-Order Second-Order Method
10- Monte Carlo Simulation
11- Latin Hypercube Sampling