

به نام خدا



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل ریسک شکست سد باطله و مدیریت زیست محیطی ناشی از آن، مطالعه موردی روی معدن مس سونگون

نگارنده: مرضیه مینایی مبتکر

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی

شهریور ماه ۱۳۹۵

تقدیم به آنان که در راه آزادی قدم نهادند.

تشکر و قدردانی:

اکنون که محارث این پایان نامه به اتمام رسیده است، از اساتید ارجمند و بزرگوار خویش جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر فرامرز دولتی ابراهیم جانی بپاس راهبانی‌ها، زحمات، حیات و صبر و شکیبایی ایشان تشکر و قدردانی نمایم که بی‌شک بدون مساعدت و حمایت‌های ایشان قادر به اتمام این پایان نامه نبودم.

از استاد گران قدر و دانشمند جناب آقای دکتر مرتضی اصانلو بپاس آموزه‌ها، حیات و دلگرمی حضورشان تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از جناب آقای مهندس جمشید لک زایی و بکارانشان در مجموعه طراحی و اجرای پروژه سد باطله معدن مس سوگون، بپاس مساعدت‌های بی‌دریغ برای در اختیار قرار دادن تمامی اطلاعات لازم در تدوین پایان نامه، پاسکزارم. همچنین از مساعدت‌های جناب آقای دکتر فرزندک سرشکی، جناب آقای دکتر بهرام شکوری (مدیر عامل محترم شرکت راه‌سازی، سدسازی و معدنی مبین)، جناب آقای مهندس صالحی (مدیر محترم پروژه معدن مس سوگون، شرکت راه‌سازی، سدسازی و معدنی مبین)، جناب آقای مهندس رضوی، جناب آقای مهندس پیروز نیا و کلیه مهندسين و کارمندان مجتمع معدنی مس سوگون، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از سرکار خانم مهندس مریم سادات حسینی، آقای مهندس سید مهدی حسینی و از همه دوستانی که مراد محارث این پایان نامه یاری نمودند، پاسکزارم

تعهد نامه

اینجانب مرضیه مینایی مبتکر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **تحلیل ریسک شکست سد باطله و مدیریت زیست محیطی ناشی از آن، مطالعه موردی روی معدن مس سونگون** با راهنمایی جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر فرامرز دولتی ارده جانی متعهد می شوم:

- تحقیقات این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: مرضیه مینایی مبتکر

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تولید باطله‌های فرآوری به دلیل افزایش جمعیت جهانی، افزایش تقاضا و مصرف مواد معدنی، کاهش عیار و کیفیت مواد معدنی و بهبود تکنولوژی فرآوری رو به افزایش است. معمول‌ترین روش انباشت مواد باطله، سد باطله است. شکست سد باطله تبعات شدیدی بر محیط زیست و هزینه پاک سازی آن خواهد داشت. در این مطالعه با به کار گیری روش تحلیل ریسک، احتمال شکست سد و تبعات آن پیش بینی شده است. به این منظور با مطالعه ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵، فاکتورها و عوامل مؤثر در شکست سدهای باطله شناسایی گردید. این عوامل در چهار مکانیزم شکست، دسته بندی گردیند و سپس با استفاده از روش رأی گیری اولویتی وزن دهی شدند. مکانیزم‌های شکست و وزن آنها به ترتیب: شکست شیب ۴۸/۹٪، شکست لبریز ۲۳/۷٪، شکست رگاب ۲۰/۴٪ و شکست فونداسیون ۶/۹ درصد است. از آنجایی که ویژگی‌های مواد باطله در پایداری شیب مؤثر است، ویژگی‌های مهمی نظیر نرخ تحکیم، فشار آب منفذی و تنش برشی مواد باطله معدن مس سونگون مطالعه شد که نتایج آن در مقایسه با نتایج سایر معادن مس پورفیری، محدوده تغییرات یکسانی را نشان داد. یک مدل جدید تحلیل ریسک با استفاده از مفهوم درجه ریسک و نیز با استفاده از احتمال و وزن مکانیزم‌های شکست سد باطله ارائه گردید. احتمال شکست با استفاده از تئوری قابلیت اطمینان ساختاری، روش شبیه سازی مونت کارلو و توسط پارامترهای فاکتور ایمنی محاسبه شد. فاکتور ایمنی شکست شیب با در نظر گرفتن بیشینه مقاومت برشی مواد باطله اصلاح گردید. برای محاسبه تبعات شکست روش اصلاح شده فولچی ارائه گردید. سپس روش‌های ارائه شده، برای تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون به کار گرفته شد که در آن احتمال شکست شیب ۶۷/۳٪، شکست لبریز ۶۴٪، شکست رگاب در فونداسیون صفر درصد محاسبه شد. به این ترتیب احتمال شکست سد به دلیل عدم پایداری شیب یا شکست ساختاری در محدوده خطر است. همچنین در صورت وقوع بارش شدید پیش بینی نشده، احتمال شکست لبریز وجود دارد. تبعات شکست سد نیز به ترتیب زیر ارزیابی شد: تبعات اقتصادی ۱۰۰٪، تبعات زیست محیطی ۸۰٪ و تبعات اجتماعی ۶۵٪. در صورت شکست سد باطله معدن مس سونگون، خسارات شدیدی وارد خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: باطله‌های فرآوری، پیش‌بینی احتمال شکست، سد باطله، وزن دهی توسط روش رأی گیری اولویتی، روش قابلیت اطمینان ساختاری، پیش‌بینی تبعات شکست، روش فولچی.

۱	فصل اول مقدمه.....	۱
۳	۱.۱ بیان مسئله.....	۳
۵	۲.۱ ضرورت تحلیل ریسک شکست سدهای باطله.....	۵
۶	۳.۱ مروری بر پیشینه تحقیق.....	۶
۱۰	۴.۱ هدف از انجام تحقیق و روش کار.....	۱۰
۱۳	۲ فصل دوم باطله‌های فرآوری.....	۱۳
۱۴	۱.۲ باطله‌های فرآوری و ویژگی‌های آن.....	۱۴
۱۵	۱.۱.۲ منحنی توزیع دانه‌بندی.....	۱۵
۱۵	۲.۱.۲ نسبت تخلخل و چگالی نسبی.....	۱۵
۱۶	۳.۱.۲ درجه اشباع.....	۱۶
۱۶	۴.۱.۲ پوکی.....	۱۶
۱۶	۵.۱.۲ نفوذپذیری.....	۱۶
۱۶	۶.۱.۲ شاخص تراکم پذیری.....	۱۶
۱۷	۷.۱.۲ ضریب سفتی (تحکیم).....	۱۷
۱۷	۸.۱.۲ نیروی برشی.....	۱۷
۱۷	۹.۱.۲ ویژگی‌های جریان غیر اشباع.....	۱۷
۱۷	۱۰.۱.۲ شاخص اتربرگ.....	۱۷
۱۷	۲.۲ مراحل ته‌نشین شدن و تحکیم مواد باطله.....	۱۷
۱۸	۳.۲ رفتار فشار منفذی ناشی از آب محتوای مواد باطله.....	۱۸
۱۹	۴.۲ باطله‌های حاصل از فرآوری مس.....	۱۹
۲۱	۵.۲ انواع روش‌های انباشت باطله‌های فرآوری.....	۲۱
۲۱	۱.۵.۲ سدهای باطله.....	۲۱
۲۲	۲.۵.۲ انباشت مواد باطله در سطح.....	۲۲
۲۲	۶.۲ جمع بندی.....	۲۲
۲۳	۳ فصل سوم سدهای باطله و عوامل مؤثر در طراحی و شکست آنها.....	۲۳
۲۴	۱.۳ طراحی سدهای باطله و انواع آن.....	۲۴
۲۵	۱.۱.۳ سدهای بالا رونده.....	۲۵
۲۵	۲.۱.۳ سدهای پایین رونده.....	۲۵
۲۶	۳.۱.۳ سدهای مرکزی.....	۲۶
۲۶	۲.۳ عوامل مؤثر در طراحی و مکان یابی سدهای باطله.....	۲۶
۲۸	۳.۳ شکست سدهای باطله و تبعات ناشی از آن.....	۲۸

۲۸	.....	۴.۳	علت و مکانیزم شکست سدهای باطله
۲۹	.....	۱.۴.۳	شکست به دلیل لبریز
۲۹	.....	۲.۴.۳	شکست به دلیل افزایش درجه سیالی (در اثر زلزله و ایستا)
۳۰	.....	۱.۲.۴.۳	دینامیک
۳۰	.....	۲.۲.۴.۳	استاتیک
۳۰	.....	۳.۴.۳	شکست به دلیل نشی و رگاب
۳۱	.....	۴.۴.۳	شکست به دلیل فرسایش (سطحی و داخلی)
۳۱	.....	۵.۴.۳	شکست به دلیل عدم پایداری شیب
۳۲	.....	۶.۴.۳	شکست فونداسیون
۳۳	.....	۵.۳	تبعات ناشی از شکست سدهای باطله
۳۵	.....	۶.۳	جمع بندی
۳۷	.....	۴	فصل چهارم روش های تحلیل ریسک
۳۸	.....	۱.۴	ریسک و انواع روش های تحلیل ریسک
۴۱	.....	۲.۴	درخت خطا
۴۳	.....	۳.۴	شبکه بیزین
۴۴	.....	۴.۴	محاسبه احتمال شکست و روش تئوری عدم اطمینان ساختاری
۴۹	.....	۱.۴.۴	روش شبیه ساز مونت کارلو
۵۰	.....	۲.۴.۴	روش برآورد نقطه ای
۵۱	.....	۵.۴	وزدن دهی عوامل شکست با استفاده از روش رأی گیری اولویتی
۵۳	.....	۱.۵.۴	رویکرد پیشنهادی سیستم رأی گیری الویتی سلسله مراتبی
۵۳	.....	۲.۵.۴	اولویت دهی معیارها بر اساس ضریب اهمیت آن ها در شکست سد باطله
۵۴	.....	۶.۴	جمع بندی
		۵	فصل پنجم ارائه مدلی برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله و مدیریت زیست
۵۵	.....		محیطی آن
۵۶	.....	۱.۵	تحلیل ریسک شکست سدهای باطله و مشکلات آن
۶۰	.....	۲.۵	مروری بر سدهای شکسته شده و تبعات آن
۶۴	.....	۳.۵	مدل تحلیل ریسک شکست سد باطله
۶۸	.....	۱.۳.۵	مدل پیشنهادی درخت خطا در تحلیل ریسک شکست سد باطله
۶۹	.....	۲.۳.۵	مدل پیشنهادی شبکه بیزی
۷۱	.....	۴.۵	بررسی ضریب ایمنی در تحلیل ریسک شکست سد باطله
۷۱	.....	۱.۴.۵	فاکتور ایمنی پایداری شیب
۷۳	.....	۲.۴.۵	ضریب ایمنی لبریز
۷۵	.....	۳.۴.۵	ضریب ایمنی افزایش درجه سیالی
۷۶	.....	۱.۳.۴.۵	محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی
۷۷	.....	۴.۴.۵	ضریب ایمنی فرسایش داخلی، نشی و شکست رگاب

۷۸	..... محاسبه احتمال فرسایش داخلی	۱.۴.۴.۵
۷۹	..... فاکتور ایمنی شکست فونداسون و رانش	۵.۴.۵
۷۹	..... پیش بینی تبعات ناشی از شکست سدهای باطله	۵.۵
۸۰	..... روش فولچی	۱.۵.۵
۸۱	..... تعریف سناریو در روش فولچی	۲.۵.۵
۸۳	..... تحلیل هزینه بر سود	۱.۲.۵.۵
۸۴	..... ماتریس ریسک	۶.۵
۸۶	..... جمع بندی	۷.۵
۸۷	..... فصل ششم تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون	۶
۸۸	..... معدن مس سونگون	۱.۶
۸۹	..... ویژگی های معدن مس سونگون	۱.۱.۶
۹۰	..... معدن مس سونگون	۱.۱.۱.۶
۹۱	..... کارخانه فرآوری مجتمع معدنی مولیبدن-مس آذربایجان	۲.۱.۱.۶
۹۲	..... شرایط آب و هوایی و بارندگی در منطقه سونگون-اهر	۳.۱.۱.۶
۹۳	..... زمین شناسی	۴.۱.۱.۶
۹۳	..... محیط زیست و اکوسیستم	۵.۱.۱.۶
۹۵	..... وضعیت اجتماعی	۶.۱.۱.۶
۹۵	..... سد باطله معدن مس سونگون	۲.۶
۹۸	..... مواد باطله	۱.۲.۶
۱۰۱	..... فونداسیون سد	۲.۲.۶
۱۰۲	..... بدنه سد باطله	۳.۲.۶
۱۰۵	..... تاج سد	۴.۲.۶
۱۰۹	..... محاسبه احتمال شکست شیب	۵.۲.۶
۱۱۲	..... محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی	۱.۵.۲.۶
۱۱۶	..... محاسبه احتمال شکست لبریز	۶.۲.۶
۱۱۷	..... محاسبه فرسایش سطحی	۱.۶.۲.۶
۱۱۸	..... محاسبه احتمال شکست رگاب	۷.۲.۶
۱۲۰	..... شکست فونداسیون	۸.۲.۶
۱۲۴	..... تبعات ناشی از شکست سد باطله معدن مس سونگون	۹.۲.۶
۱۲۸	..... ماتریس ریسک	۱۰.۲.۶
۱۲۹	..... جمع بندی	۳.۶
۱۳۱	..... فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات	۷
۱۳۲	..... بحث	۱.۷
۱۳۵	..... نتیجه گیری	۲.۷

۱۳۷.....	پیشنهادها..... ۳.۷
۱۳۹.....	منابع و مراجع.....
۱۴۵.....	پیوست ۱.....
۱۵۷.....	پیوست ۲.....

صفحه

فهرست شکل‌ها

شکل ۱.۱	مکانیزم شکست سدهای خاکریزه‌ای	۴
شکل ۲.۱	مدل سه‌گانه توسعه پایدار	۶
شکل ۱.۲	تحکیم مواد باطله، فشار آب منفذی اضافی بر اساس نرخ تحکیم، ضخامت مواد باطله و زمان	۱۹
شکل ۱.۳	طراحی سد به روش بالا رونده	۲۵
شکل ۲.۳	طراحی سد به روش پایین رونده	۲۶
شکل ۳.۳	طراحی سد به روش مرکزی	۲۶
شکل ۱.۴	طبقه بندی عدم قطعیت در تحلیل ریسک	۴۱
شکل ۲.۴	نمادهای مورد استفاده در درخت خطا	۴۲
شکل ۳.۴	پارامترهای عملکرد دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان	۴۲
شکل ۴.۴	مثالی از شبکه بیزین	۴۴
شکل ۵.۴	احتمال شکست، تابع محدود، ناحیه امن و ناحیه شکست را در یک فضای دو بعدی	۴۵
شکل ۶.۴	تابع محدود حالت در تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه اول	۴۸
شکل ۷.۴	تابع محدود حالت در تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه دوم	۴۸
شکل ۸.۴	انتخاب متغیر تصادفی و احتمال شکست در شبیه ساز مونت کارلو	۴۹
شکل ۹.۴	روش برآورد نقطه‌ای برای دو متغیر تصادفی	۵۰
شکل ۱۰.۴	ساختار سلسله مراتبی سیستم رأی گیری الویتی	۵۳
شکل ۱.۵	الگوریتم پیشنهادی در تحلیل ریسک شکست سد باطله	۵۹
شکل ۲.۵	علت شکست ۳۰۶ سد باطله شکسته شده بین سال‌های ۱۹۱۴ - ۲۰۱۵	۶۰
شکل ۳.۵	تعداد شکست سدهای باطله در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵	۶۱
شکل ۴.۵	تعداد سدهای شکسته شده بر اساس نوع طراحی آنها	۶۲
شکل ۵.۵	ارتفاع سدهای باطله هنگام شکست	۶۲
شکل ۶.۵	تعداد سدهای شکسته شده بر اساس وضعیت فعالیت در زمان شکست	۶۳
شکل ۷.۵	علت شکست سد معادن مس	۶۳
شکل ۸.۵	مجموع وزن عوامل موثر در مکانیزمهای چهارگانه شکست سدهای باطله	۶۷
شکل ۹.۵	مجموع وزن عوامل موثر در تبعات شکست سدهای باطله	۶۸
شکل ۱۰.۵	مدل پیشنهادی شبکه بیزی در شکست سدهای باطله	۶۹
شکل ۱۱.۵	مدل پیشنهادی درخت خطا در شکست سدهای باطله	۷۰
شکل ۱۲.۵	افزایش فشار بر بدنه سد باطله ناشی از مقاومت برشی مواد باطله	۷۳
شکل ۱۳.۵	احتمال فرسایش سطحی	۷۴
شکل ۱.۶	موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون	۸۹
شکل ۲.۶	موقعیت سد باطله نسبت به پیت معدن در معدن مس سونگون	۹۶

- شکل ۳.۶ منحنی دانه بندی مواد باطله سد سونگون..... ۹۸
- شکل ۴.۶ منحنی دانه بندی مواد باطله تحت تاثیر افزایش درجه سيالی..... ۹۹
- شکل ۵.۶ منحنی دانه بندی مواد پی..... ۱۰۱
- شکل ۶.۶ مراحل ترفیع سد باطله سونگون و مصالح بهکار رفته در دیواره و تاج سد..... ۱۰۷
- شکل ۷.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست شیب..... ۱۱۰
- شکل ۸.۶ نمایش افزایش تنش برشی در مواد باطله (آ) در اثر نیروی وزن (ب) در اثر زه کشی..... ۱۱۲
- شکل ۹.۶ سری زمانی وقوع زلزله در منطقه اهر..... ۱۱۴
- شکل ۱۰.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست لبریز..... ۱۱۶
- شکل ۱۱.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب در بدنه سد..... ۱۱۹
- شکل ۱۲.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب پی سد..... ۱۲۲
- شکل ۱۳.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد به دلیل رانش زمین..... ۱۲۳

صفحه

فهرست جدول‌ها

جدول ۱.۱	مرور پیشینه مطالعات انجام شده بر روی تحلیل ریسک سدهای باطله.....	۸
جدول ۱.۲	پارامترهای ژئوتکنیکی باطله‌های مس.....	۲۰
جدول ۱.۳	عوامل مؤثر در طراحی سدهای باطله.....	۲۷
جدول ۲.۳	تبعات ناشی از شکست سدهای باطله.....	۳۴
جدول ۱.۴	دسته بندی اصلی روش‌های ریسک.....	۴۰
جدول ۲.۴	ساختار PVS.....	۵۱
جدول ۳.۴	ساختار PVS برای معیارها.....	۵۴
جدول ۵.۱	عوامل مؤثر در شکست سد باطله.....	۵۸
جدول ۵.۲	میانگین ضرایب مدل CRR با استفاده از فرآیند رگرسیون گیری.....	۷۶
جدول ۵.۳	مقاومت در برابر فرسایش داخلی.....	۷۸
جدول ۵.۴	فاکتورها و اجزای سیستم در شکست سدهای باطله.....	۸۱
جدول ۵.۵	تعریف سناریو در شکست سد باطله.....	۸۴
جدول ۵.۶	ماتریس ریسک شکست سدهای باطله.....	۸۵
جدول ۱.۶	نتایج محدوده نهایی معدن مس سونگون	۹۰
جدول ۲.۶	مشخصات کارخانه فرآوری و کنسانتره.....	۹۱
جدول ۳.۶	شدت جریان رودخانه‌های سونگون، پخیر و میانکافه را در سال‌های ۷۷ و ۷۸.....	۹۴
جدول ۴.۶	مشخصات فنی سد باطله معدن مس سونگون.....	۹۷
جدول ۵.۶	مشخصات مکانیک خاک باطله معدن مس سونگون.....	۱۰۰
جدول ۶.۶	مشخصات فونداسیون سد باطله معدن مس سونگون.....	۱۰۲
جدول ۷.۶	مشخصات منطقه ۳A، ۳B و ۳C از نظر ابعاد دانه بندی، ضخامت و هوازدگی.....	۱۰۴
جدول ۸.۶	ویژگیها ژئوتکنیکی دیواره سد (مصالح راکفیل).....	۱۰۶
جدول ۹.۶	پارامترهای استفاده شده در محاسبه فاکتور ایمنی شکست شیب.....	۱۰۹
جدول ۱۰.۶	توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست شیب و محاسبه احتمال شکست.....	۱۱۰
جدول ۱۱.۶	اطلاعات مربوط به زلزله در منطقه اهر.....	۱۱۳
جدول ۱۲.۶	پارامترهای لازم در محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی.....	۱۱۴
جدول ۱۳.۶	نتایج احتمال شکست شیب.....	۱۱۵
جدول ۱۴.۶	توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست لبریز و محاسبه احتمال شکست.....	۱۱۷
جدول ۱۵.۶	احتمال فرسایش سطحی سد.....	۱۱۷
جدول ۱۶.۶	نتایج احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست لبریز.....	۱۱۸
جدول ۱۷.۶	اطلاعات لازم در محاسبه ضریب ایمنی شکست رگاب در بدنه سد.....	۱۱۹
جدول ۱۸.۶	توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست رگاب بدنه سد و محاسبه احتمال شکست.....	۱۲۰

جدول ۱۹.۶	نتایج احتمال رگاب بدنه سد.....	۱۲۰
جدول ۲۰.۶	اطلاعات لازم در محاسبه شکست رگاب پی سد.....	۱۲۱
جدول ۲۱.۶	پارامترهای لازم در محاسبه فاکتور ایمنی رانش زمین.....	۱۲۲
جدول ۲۲.۶	توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست رگاب در پی و محاسبه احتمال شکست.....	۱۲۳
جدول ۲۳.۶	توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست به دلیل رانش و محاسبه احتمال شکست.....	۱۲۴
جدول ۲۴.۶	نتایج احتمال شکست فونداسیون سد باطله معدن مس سونگون.....	۱۲۴
جدول ۲۵.۶	اطلاعات لازم برای تخمین هزینه ناشی از شکست سد باطله به سال ۹۵.....	۱۲۵
جدول ۲۶.۶	اطلاعات لازم برای تخمین سود حاصل از بازسازی سد باطله به سال ۹۵.....	۱۲۶
جدول ۲۷.۶	نتایج مربوط به تخمین محدوده اثر سناریو.....	۱۲۷
جدول ۲۸.۶	نتایج ماتریس همبستگی.....	۱۲۷
جدول ۲۹.۶	نتایج ماتریس وزن نهایی تاثیر فاکتورها بر سیستم.....	۱۲۸
جدول ۳۰.۶	نتایج نهایی احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون.....	۱۲۸
جدول ۳۱.۶	نتایج نهایی تبعات شکست سد باطله معدن مس سونگون.....	۱۲۹

۱

فصل اول

مقدمه

مقدمه

معدنکاری از صنایع اولیه در تاریخ زندگی بشر بوده و نقش اساسی در توسعه شهرنشینی و فناوری ایفا کرده است. امروزه نیز محصولات ساخته شده از مواد معدنی نقش مهمی در زندگی انسان ایفا می‌کنند. بر اساس مطالعات انجمن بین‌المللی معدن و فلزات^۱، تولید ناخالص داخلی^۲ جهانی از سال ۱۹۹۲ تا سال ۲۰۱۴ با روند افزایش تولید مواد معدنی، افزایش یافته است. همچنین، این مطالعات نشان دهنده افزایش چشمگیر نرخ رشد شهرنشینی در کشورهای توسعه یافته نظیر آمریکا، همگام با روند افزایش تولید ناخالص داخلی است [۱].

مطالعات انجام شده در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد، کودکانی که در این سال در کشورهای توسعه یافته متولد می‌شوند، روزانه هر نفر ۴۹ کیلوگرم کانی، سالانه ۱۷۸۸۵ کیلوگرم و با امید به زندگی ۸۰ سال، در طول عمر خود حدود ۱۴۳۰/۸ تن کانی مصرف خواهند کرد [۲]. با وجود آمار قابل اطمینان از تولید و مصرف مواد معدنی، آمار دقیقی از میزان باطله برداری و تولید باطله جهت دسترسی به کانسنگ و تولید محصول نهایی وجود ندارد، ضمن آنکه با توجه به میزان مصرف زغال‌سنگ، فلزات قیمتی و متوسط عیار آنها، برآورد اولیه این است که میزان باطله برداری در بخش استخراج و میزان باطله‌ای که در بخش فرآوری تولید شده است، بین ۱۵ تا ۲۰ میلیارد تن بوده است [۳]. نظر به افزایش جمعیت که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ از مرز ۸/۵ میلیارد نفر تجاوز نماید [۴] و با توجه به مصرف بیشتر محصولات صنعتی، کشاورزی (جهت تولید محصولات کشاورزی، تولید سنگ فسفاته، پتاس به‌منظور تولید کود الزامی است)، دارویی، نظامی، الکترونیکی مصرف کانی‌ها به مراتب زیادتر و باطله‌های بیشتری تولید خواهد شد. به عبارت دیگر، چالش اصلی معدنکاری در سال‌های پیش رو حجم باطله‌های زیاد تولید شده در مرحله استخراج و فرآوری است. در تولید محصول نهایی ماده معدنی و به‌منظور استحصال و بازیابی چند گرم فلز، تناژ زیادی از باطله در مرحله فرآوری تولید می‌شود، که باطله فرآوری^۳ نام دارد. از بین روش‌های متعدد انباشت باطله‌های فرآوری، انباشت آنها در سد به‌عنوان معمول‌ترین روش، شناخته شده است. با توجه به گزارش‌های متعددی که هر ساله از شکست سدهای باطله^۴ و تبعات مخرب آن به‌ویژه اثرات آن بر محیط زیست، منتشر می‌شود، پیش‌بینی علت و زمان شکست سدهای باطله و مدیریت تبعات آن نیز بیش از گذشته اهمیت پیدا کرده است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه مواد معدنی سطحی، به آسانی قابل دسترس و با متوسط عیار بالا در حال استخراج هستند و یا استخراج مواد معدنی آنها به پایان رسیده است، از چالش‌های پیش روی آینده معدنکاری، افزایش عمق کانسار، عیار پایین و کیفیت نامطلوب مواد معدنی خواهد بود که خود باعث افزایش چشمگیر میزان تولید باطله می‌شود. همچنین،

¹ International Council on Mining and Metals (ICMM)

² Gross Domestic Product (GDP)

³ Tailings

⁴ Tailings Dam

با افزایش درجه و شدت خردایش، بهبود و پیشرفت در فناوری فرآوری، حجم بیشتری از باطله به‌ویژه در مرحله فرآوری تولید خواهد شد [۳]. بنابراین، انباشت ایمن باطله‌های فرآوری به‌عنوان بزرگ‌ترین چالش محیط زیستی صنعت معدنکاری و نیز از مهم‌ترین بخش هزینه‌های شرکت‌های معدنی محسوب می‌شود. با توجه به مطالب ارائه شده پیرامون اهمیت مواد معدنی و نیز انباشت ایمن باطله‌های فرآوری، در این فصل، ابتدا به تعریف شکست سدهای باطله، اهمیت تحلیل ریسک، مرور مطالعات انجام شده در این زمینه و در نهایت به هدف و روش تحقیق، ساختار پایان‌نامه و نوآوری‌های این تحقیق پرداخته می‌شود.

۱.۱ بیان مسئله

نیاز به ساخت سدهای باطله در فرآوری مواد معدنی، سال‌ها پس از ساخت سدهای آبی آنها ایجاد شد. کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۱ که در سال ۱۹۲۸ تأسیس گردید، تا بعد از تأسیس کمیته ثبت سدها^۲ در سال ۱۹۵۸، توجهی به سدهای باطله نداشت. موضوع سدهای باطله برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ در کنگره سدهای بزرگ در شهر مکزیکوسیتی مطرح شد و از آن پس کمیته سدهای باطله^۳ در کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ تشکیل گردید [۵]. سدهای باطله از جمله بزرگ‌ترین سازه‌های ساخته‌شده توسط بشر هستند و وسعت قابل توجهی از زمین‌های اطراف معدن تحت پوشش این سدها است. سدهای باطله مانند سدهای خاکریزهای^۴ طراحی و ساخته می‌شوند. هزینه احداث سدهای باطله بالا و جزء هزینه‌های تولید مواد معدنی محسوب می‌شود. همچنین، به دلیل اینکه این سدها حتی پس از پایان یافتن فعالیت معدنی و بسته شدن معدن^۵ باقی می‌مانند و برای عملیات بازسازی^۶ و استفاده دیگر برای نسل آینده آماده می‌شوند، لذا پایداری آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون بیش از ۳۰۰ مورد گزارش از شکست سدهای باطله منتشر شده است که تبعات ناشی از آن جان انسان‌های بسیاری را گرفته و خسارات بسیاری را به محیط‌زیست وارد نموده است. به دلیل اینکه باطله‌ها شامل فلزات سنگین بوده و نیز به دلیل غلظت بالای مواد باطله، خسارات ناشی از جریان مواد باطله بسیار وسیع‌تر و بزرگ‌تر از جریان آب ناشی از شکست سدهای آبی است. تعیین اینکه چه میزان از آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر آلودگی مواد باطله قرار می‌گیرند مشکل است و هزینه‌های پاک‌سازی آن نیز از مهم‌ترین دغدغه‌های شرکت‌های معدنی است. همچنین با توجه به

¹ International Commission on Large Dams (ICOLD)

² World Register of Dam

³ Committee on Tailings Dam & Waste Lagoons

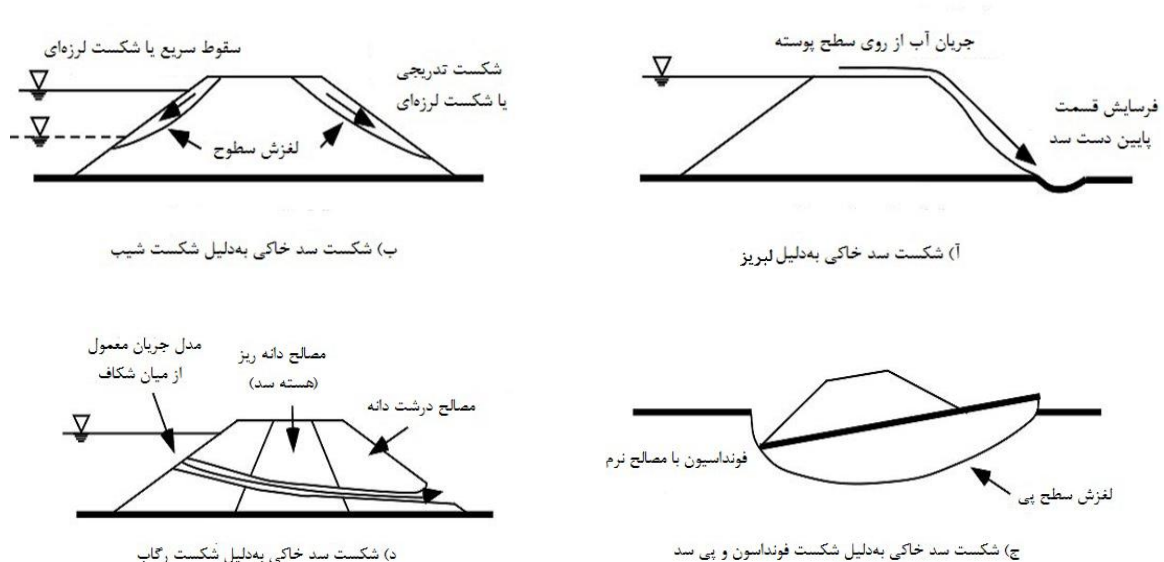
⁴ Embankment Dam

⁵ Mine Closure

⁶ Reclamation

افزایش جمعیت و مصرف مواد معدنی و افزایش تولید مواد باطله و در نتیجه افزایش تعداد و حجم سدهای باطله، بررسی عوامل شکست سد باطله و احتمال وقوع آن و نیز بررسی تبعات ناشی از شکست، یعنی تحلیل ریسک^۱ سدها برای جلوگیری از شکست آنها و مدیریت تبعات آن که موضوع این پایان نامه است، ضروری تلقی می گردد.

شکست سدهای خاکریزه‌ای، به هرگونه فرسایش و تغییر شکل در سد که باعث خروج غیرقابل کنترل محتویات سد (مواد باطله یا آب) و خسارات ناشی از آن شود، اطلاق می شود. برای بررسی شکست سدهای خاکریزه‌ای و تعیین احتمال شکست، لازم است مکانیزم انواع شکست شناسایی و مورد بررسی قرار گیرد. به طور کلی مکانیزم‌های شکست به چهار دسته تقسیم بندی می شوند: شکست شیب^۲، شکست فونداسیون و پی^۳، شکست رگاب^۴ و شکست لبریز^۵ [۶]. شکل ۱-۱ مکانیزم‌های شکست در سدهای خاکی را نشان می دهد. با مطالعه مکانیزم شکست، می توان بررسی‌های ژئوتکنیکی و سایر تحلیل‌های مهندسی را برای محاسبه احتمال شکست، پیش‌گیری شکست و پایش سدهای باطله انجام داد.



شکل ۱.۱ مکانیزم شکست سدهای خاکریزه ای [۶]

¹ Risk Analysis

² Slope Failure

³ Foundation Failure

⁴ Piping Failure

⁵ Overtopping Failure

۲.۱ ضرورت تحلیل ریسک شکست سدهای باطله

تحلیل ریسک به‌عنوان یکی از روش‌های مطالعه ایمنی سدها محسوب می‌شود که لازم است از همان ابتدای مکان‌یابی و طراحی سد مورد توجه و استفاده قرار گیرد. به‌دلیل عدم قطعیت در بسیاری از پارامترهای مؤثر در مکان‌یابی و به‌ویژه در طراحی و احداث سدها و نیز تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر در شکست بر یکدیگر، تحلیل ریسک به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در پیش‌بینی شکست تلقی می‌گردد. از سوی دیگر از آنجایی که برخلاف روش معمول ساخت سدهای خاکریزه‌ای، مراحل ترفیع سدهای باطله به‌تدریج و هم‌زمان با ورود باطله به سد صورت می‌گیرد، و نیز از آنجایی که خواص و رفتار مکانیکی و شیمیایی مواد باطله از عوامل مهم در پایداری این سدها هستند، تحلیل ریسک شکست سدهای باطله، پیچیدگی خاص خود را دارد که باید در مطالعات مورد توجه قرار گیرد. در دستورالعمل‌های طراحی سد و تحلیل ریسک، ویژگی‌ها و خواص مواد باطله و نیز خواص هیدرومکانیک آنها مورد توجه قرار نگرفته است که در این پایان‌نامه به آن پرداخته خواهد شد. همچنین ریسک شکست سد در طول چرخه عمر آن یکسان نخواهد بود. احتمال شکست سدها در سال‌های اولیه احداث بیشتر است چراکه هرگونه اشتباه در طراحی سد در سال‌های اولیه مشخص و باعث شکست خواهد شد. از سوی دیگر به‌دلیل اهمیت مدیریت ریسک، پیش‌بینی بیشینه جریان محتمل^۱ (با توجه به اثر پارامترهای مؤثر بر آن)، امری ضروری است.

از سوی دیگر اهمیت انجام این تحقیق از دیدگاه توسعه پایدار^۲ نیز مطرح است. در سال ۱۹۹۲ در اجلاس زمین^۳ در مقر سازمان ملل^۴ در ریودیزانیرو^۵ برزیل، توسعه پایدار چنین تعریف شد: «رفع نیازهای نسل حاضر با توجه به تأمین نیازهای نسل‌های آینده» [۷]. بر اساس تعریف ذکر شده، توسعه پایدار دارای سه رکن اساسی است: محیط‌زیست، اقتصاد، اجتماع و فرهنگ. شکل ۱-۲ ارتباط این سه اصل را در مدل توسعه پایدار نشان می‌دهد. در این مدل، توسعه پایدار زمانی رخ می‌دهد که هر سه رکن آن به یک اندازه رشد نمایند.

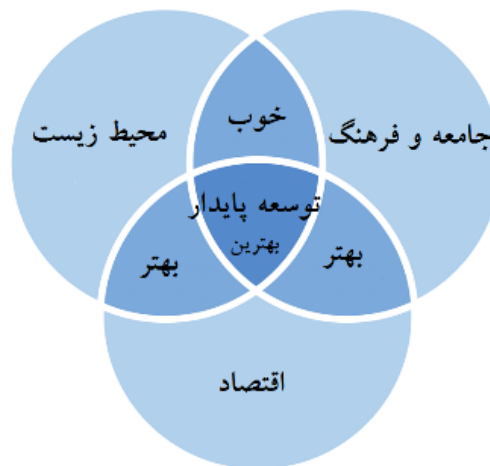
^۱ Maximum Probable Flood

^۲ Sustainable Development

^۳ Earth Summit Conference

^۴ United Nations

^۵ Rio de Janeiro



شکل ۲.۱ مدل سه‌گانه توسعه پایدار [۸].

تبعات ناشی از شکست سدهای باطله اثر منفی بر هر سه رکن توسعه پایدار خواهد داشت. ورود مواد باطله به آب‌های سطحی و زیرزمینی، آلودگی خاک، از بین رفتن پوشش گیاهی و مرگ حیوانات از مهم‌ترین تأثیرات شکست سد باطله بر محیط‌زیست است. مرگ و میر انسان‌ها از تبعات اجتماعی، تخریب منازل و زیرساخت‌ها، هزینه‌های تعمیر و بازسازی سد، هزینه‌های پاک‌سازی محیط، افت سهام شرکت‌ها، بسته شدن معدن و یا کاهش تولید نیز از تبعات اقتصادی مهم شکست سدهای باطله محسوب می‌شود.

۳.۱ مروری بر پیشینه تحقیق

با وجود تلاش‌های مهندسی برای طراحی صحیح سدهای باطله، هر ساله آمارهای متعددی از شکست سدهای باطله گزارش می‌شود. مطالعات بسیاری در زمینه سدهای خاکریزه‌ای و به‌ویژه سدهای باطله، دلایل شکست آنها، پایداری سدهای باطله تحلیل ریسک و احتمال شکست آنها انجام شده است. جدول ۱-۱ برخی از مهمترین مطالعات صورت گرفته در این زمینه را نشان می‌دهد. همچنین، در این بخش به بررسی بعضی از مطالعات مهم که از آنها در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته شده است، پرداخته می‌شود.

اولین مطالعات انجام شده روی سدهای شکسته شده، علت شکست، زمان شکست و تبعات ناشی از آن توسط کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ در سال ۲۰۰۱ منتشر شد که در آن علت و زمان شکسته

شدن ۲۲۱ سد باطله از انواع مواد معدنی فلزی و غیر فلزی از سال ۱۹۱۰ تا سال ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. از اطلاعات این منبع در مطالعات این پایان نامه بر روی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده، استفاده شده است.

موسسه سرویس اطلاعات جهانی انرژی، بخش پروژه اورانیم^۱ در وب سایت خود اطلاعات سدهای باطله شکسته شده از سال ۱۹۶۰ تا سال ۲۰۱۵ را منتشر کرده است که اطلاعات آن مکرراً به روز رسانی می شود [۱۰]. از اطلاعات این منبع، در مطالعات این پایان نامه بر روی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده، استفاده شده است.

در سال ۲۰۱۵ بوکر^۲ و چمبرز^۳ بر اساس مطالعات کمیته بین المللی سدهای بزرگ و اطلاعات موسسه سرویس اطلاعات جهانی انرژی بخش پروژه اورانیم، فهرستی از ۲۷۰ سد باطله شکسته شده در سال های ۱۹۱۵ تا ۲۰۱۵ به همراه بررسی علت شکست، مکانیزم شکست و تبعات آن تهیه کردند [۱۱].

آنها همچنین در تحقیقی به بررسی شکست سدهای باطله و مقایسه آن با تولید مواد معدنی و عیار پرداختند و بر اساس داده های تاریخی نرخ شکست سدها را بررسی و پیش بینی نمودند [۱۲]. از اطلاعات این منبع در مطالعات این پایان نامه بر روی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده، استفاده شده است. این نکته شایان ذکر است که بین اطلاعات منابع [۹، ۱۰، ۱۱] همپوشانی وجود دارد.

در سال های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵، اوبونی^۴ و همکاران به بررسی احتمال شکست سدها با توجه به داده های آماری پرداختند و نیز تبعات ناشی از شکست سدهای باطله را بر اساس هزینه و نیز فاکتور ایمنی تخمین زدند [۱۳، ۱۴].

در سال ۲۰۱۳ تارک حَمَد^۵ با استفاده از روش های تحلیلی تصادفی^۶ به تحلیل پایداری و طراحی سد بر اساس فاکتورهای ژئوتکنیکی پرداخت. در این تحقیق از روش مدل سازی عددی و روش های تعادلی حدی^۷، شیب سد و نیز فاکتور ایمنی، پایداری شیب سد محاسبه شد. برای مدنظر قرار گرفتن عدم

¹ World Information Service on Energy (WISE Uranium Project)

² Bowker

³ Chambers

⁴ Oboni

⁵ Tarek Hamade

⁶ Stochastic Methods

⁷ Limit Equilibrium Methods (LEM)

⁸ Monte Carlo Simulation

قطعیت عوامل ژئوتکنیکی سد، از روش شبیه‌ساز مونت کارلو^۸ استفاده گردید. همچنین در این تحقیق از مدل‌سازی دو بعدی در محیط نرم‌افزار FLAC2D و روش برآورد نقطه‌ای^۱ و با توجه به پارامترهای هیدرولیکی و روش قابلیت اطمینان، برای محاسبه احتمال شکست و فاکتور ایمنی پایداری شیب سد باطله استفاده شد [۱۵].

در سال ۲۰۱۳، ماسکورا^۲ با استفاده از روش‌های استاتیکی، شبه استاتیکی تحلیل پایداری^۳ و روش‌های احتمالی، مانند روش تعادلی حدی، شبیه‌سازی مونت کارلو، روش برآورد نقطه‌ای و تئوری قابلیت اطمینان به تحلیل پایداری سدهای باطله بالارونده پرداخت [۱۶].

در سال ۲۰۱۲، سی‌ایت^۴ به تحلیل پایداری شیب و همچنین نشستی^۵ در سدهای باطله با توجه و مطالعه ویژگی‌های ژئوتکنیکی و با استفاده از روش تعادلی محدود پرداخت [۱۷].

در سال ۲۰۱۱، زرداری^۶ به بررسی پایداری شیب سد باطله با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداخت. با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS، با توجه به تفاوت در فرآیند و نرخ تحکیم^۶ مواد باطله و همچنین با در نظر گرفتن اثر فشار آب منفذی، پایداری شیب سدهای باطله‌های بالارونده را بررسی کرد [۱۸].

در سال ۲۰۰۶، منطق^۷ با استفاده از سرعت موج الاستیک^۸ پتانسیل افزایش درجه سیالی^۹ مواد باطله در شرایط آزمایشگاهی را برای مواد باطله زه‌کشی نشده و آبدار ارزیابی کرد. [۱۹].

جدول ۱.۱ مرور پیشینه مطالعات انجام شده بر روی تحلیل ریسک سدهای باطله

توضیح	محقق (سال نشر)
تحلیل پایداری شیب سدهای باطله با تعیین فاکتور ایمنی با استفاده از روش‌های قطعی ^{۱۱} و احتمالی	نایت ^{۱۰} (۲۰۱۵) [۲۰]
بررسی ویژگی‌های مواد باطله، بررسی سدهای باطله شکسته شده و تبعات زیست‌محیطی آن	کُسوف و همکاران ^{۱۲} (۲۰۱۴) [۲۱]
مدل‌سازی فرسایش سدهای باطله به‌وسیله باد با استفاده از مدل‌سازی و برنامه‌نویسی	جیا و همکاران ^{۱۳} (۲۰۱۴) [۲۲]

¹Point Estimate Method (PEM)

¹ Mosquera

² Static and Pseudo-Static Stability Analysis

³ Sayit

⁴ Seepage

⁶ Zardari

⁵ Consolidatio

⁶ Mantegh

⁷ Elastic Wave Velocity

⁸ Liquefaction Potential

¹¹ Knight

⁹ Deterministic Methods

¹⁰ Kossoff and et al.

¹¹ Jia and et al.

ادامه جدول ۱.۱ مرور پیشینه مطالعات انجام شده بر روی تحلیل ریسک سدهای باطله

توضیح	محقق (سال نشر)
بررسی شکست سدهای خاکی به دلیل فرسایش	فرای ^۱ (۲۰۱۲) [۲۳]
مدل سازی ضریب ایمنی سدهای خاکی (آب) در شرایط نشتی آب	ژونگ ^۲ (۲۰۱۱) [۲۴]
تحلیل ریسک شکست سدهای باطله با توجه به خصوصیات ژئوتکنیکی و ضریب ایمنی پایداری سدها توسط آزمایش و تست سد	وئدین و همکاران ^۳ (۲۰۱۱) [۲۵]
تحلیل ریسک شکست سد باطله با تعریف ضریب شکست و ضریب تبعات بعد از شکست و استفاده از ماتریس ریسک برای تحلیل ریسک مطالعه موردی	شین و همکاران ^۴ (۲۰۱۱) [۲۶]
تحلیل ریسک شکست سدهای باطله به روش حالت شکست و تحلیل اثرات ^۶ با استفاده از داده‌های حاصل از پایش سد	کوریا دو سانتوس و همکاران ^۵ (۲۰۱۱) [۲۷]
تحلیل پایداری سدهای باطله توسط مدل سازی عددی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و داده‌های ژئوفیزیکی	میهای و همکاران ^۷ (۲۰۰۹) [۲۸]
بررسی سدهای باطله شکسته شده و ارائه مدل‌هایی برای پیش‌بینی جریان‌های خروجی ناشی از شکست سد باطله	ریکو و همکاران ^۸ (۲۰۰۷) [۲۹]
تحلیل ریسک شکست سدهای خاکی توسط شبکه‌های بی‌زی ^{۱۰} به دلیل عدم قطعیت پارامترهای شکست و همچنین تأثیر این پارامترها بر یکدیگر	اسمیت ^۹ (۲۰۰۶) [۳۰]
بررسی تأثیر آب محتوای مواد باطله بر روی رفتار ژئوتکنیکی و جریان مواد باطله در شرایط آزمایشگاهی	کواک و همکاران ^{۱۱} (۲۰۰۵) [۳۱]
محاسبه احتمال شکست و تبعات ناشی از شکست سد باطله با مطالعه سدهای شکسته شده و تهیه پرسشنامه	بروس ^{۱۲} و اوبونی (۲۰۰۳) [۳۲]
بررسی طراحی و ساخت سدهای باطله و پارامترهای فنی مؤثر در آن	دیویس و همکاران ^{۱۳} (۲۰۰۲) [۳۳]

¹ Fry² Zhong³ Vanden and et al.⁴ Xin and et al.⁵ Correia dos Santos and et al.⁶ Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)⁷ Mihai and et al.⁸ Rico and et al.⁹ Smith¹⁰ Bayesian Network Analysis¹¹ Kwak and et al.¹² Bruce¹³ Davies and et al.

۴.۱ هدف از انجام تحقیق و روش کار

در این پایان‌نامه، هدف از تحلیل ریسک شکست سدهای باطله، شناسایی عوامل مهم در شکست سدهای باطله، بررسی احتمال وقوع آنها و محاسبه احتمال شکست سدهای باطله با توجه به عوامل مؤثر در مکانیزم‌های شکست، و در نهایت بررسی تبعات ناشی از شکست است.

در تحلیل ریسک شکست باطله مطابق با تعریف تحلیل ریسک، به سه سؤال مهم زیر پاسخ داده خواهد شد [۳۴].

۱- چه حوادثی رخ خواهند داد که اخلاص در عملکرد و یا شکست سیستم را موجب می‌شوند؟

۲- حوادث پیش‌بینی‌شده با چه احتمالی رخ خواهند داد؟

۳- در صورت وقوع حوادث، هر یک با چه شدت به وقوع خواهند پیوست و تبعات ناشی از آنچه چیزی خواهد بود؟

بدین منظور در این پایان‌نامه در ابتدا به دلیل اهمیت شناخت باطله‌های فرآوری و نیز خواص آنها به‌عنوان یک پارامتر اثرگذار در شکست، در فصل دوم به مطالعه باطله‌های فرآوری و به‌ویژه باطله‌های مس پرداخته می‌شود. سپس در فصل سوم به مطالعه اهمیت مکان‌یابی و طراحی سدها در شکست سد، روش‌های طراحی و ساخت این سدها، علل شکست سدها، مکانیزم شکست و تبعات ناشی از شکست سدهای باطله پرداخته خواهد شد. در فصل چهارم به بررسی روش‌های تحلیل ریسک و روش‌های استفاده شده در این پایان‌نامه پرداخته خواهد شد. در فصل پنجم با ارائه الگوریتم تحلیل ریسک، مدلی برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله ارائه می‌شود. در این فصل با استفاده از روش وزن دهی رأی‌گیری اولویتی^۱ (PVS)، پارامترهای مهم شکست سدهای باطله وزن دهی می‌شود. تفاوت PVS با موارد مشابه آن در تحقیقات گذشته، در فرآیند محاسبه اوزان مربوط به جایگاه‌های رتبه‌ای است. روش PVS از یک مدل تحلیل پوششی داده‌ها^۲ (DEA) برای تعیین اوزان استفاده می‌کند. همچنین با استفاده از مفهوم تحلیل ریسک توسط روش درخت خطا^۳ و شبکه‌های بیزین^۴،

¹ Preference Voting System (PVS)

² Data Envelopment Analysis

³ Fault Tree Analysis (FTA)

⁴ Bayesian Network

مدل درخت خطا و شبکه بیزین شکست سدهای باطله برای بررسی عوامل مؤثر در شکست و نیز اثر آنها بر یکدیگر ارائه گردید. مکانیزم‌ها و عوامل مؤثر در شکست سدهای باطله در این مطالعه، بر اساس اطلاعات حاصل از مطالعه بر روی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵ به دست آمده است. اطلاعات بخشی از سدهای مورد مطالعه از منابع [۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲] برگرفته شده است.

با استفاده از روش قابلیت اطمینان ساختاری^۱ و نیز شبیه‌ساز مونت‌کارلو و روش سری تیلور و فاکتورهای ایمنی مکانیزم‌های شکست سدهای باطله، احتمال شکست سدهای باطله تعیین می‌شود. و در نهایت با استفاده روش فولچی^۲ تبعات ناشی از شکست سدها بررسی می‌گردد. در فصل ششم با مطالعه معدن مس سونگون، ویژگی‌های مواد باطله و سد باطله این معدن، تحلیل ریسک شکست سد با استفاده از روش‌های ارائه شده در فصل ۴ و ۵ انجام خواهد شد. در نهایت در فصل هفتم به بحث و بررسی نتایج حاصل از مطالعات و روش‌های استفاده شده در این پایان‌نامه پرداخته می‌شود و پیشنهادهایی برای مطالعات بعدی ارائه می‌گردد.

در این مطالعه وزن پارامترهای مؤثر در شکست برای اولین بار در تحلیل ریسک در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل پیشنهادی در تئوری قابلیت اطمینان ویژگی‌های مواد باطله به‌ویژه رفتار هیدرومکانیکی آن در نظر گرفته شده است. در پیش بینی تبعات ناشی از شکست، با توجه به اهمیت کمی سازی آنها با استفاده از روش فولچی و همچنین ویژگی‌های سد و مواد باطله تبعات شکست مطابق با معیارهای توسعه پایدار برآورد شده است.

¹ Structural Reliability Theory

² Folchi Method

۲

فصل دوم باطله‌های فرآوری

باطله‌های فرآوری

در دنیای پیشرفته امروز، ناگزیر از استخراج مواد معدنی هستیم. استخراج مواد معدنی با تولید انواع باطله به‌ویژه در مرحله فرآوری همراه است. معمولاً باطله‌های فرآوری در کنار معادن و در سدهای باطله انباشت می‌شوند. به دلیل اهمیت خواص این مواد در پایداری سدهای باطله، در این بخش باطله‌های فرآوری به‌ویژه باطله معادن مس و ویژگی‌های آنها و همچنین روش‌های انباشت این باطله‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱.۲ باطله‌های فرآوری و ویژگی‌های آن

باطله‌های فرآوری به مواد حاصل از مرحله آسیا و فرآوری مواد معدنی اطلاق می‌شود که به‌عنوان باطله بعد از جدایش و استحصال مواد معدنی به‌صورت دوغاب از سیستم کارخانه فرآوری خارج و به محل انباشت، انتقال داده می‌شود. باطله فرآوری از دو بخش جامد و مایع تشکیل شده است. بخش جامد آن شامل مواد دانه ریز^۱ (با ابعاد ۱-۶۰۰ میکرون)، و بخش مایع آن شامل آب فرآیندی که حاوی فلزات محلول و ماده معدنی، مواد شیمیایی افزوده شده در مرحله فرآوری و آلاینده‌های سمی است. ذرات جامد باطله بسیار گوشه دار و دارای زاویه^۲ هستند که این امر باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی^۳ در بین باطله‌های خشک می‌شود [۳۵]. پس از ته نشست مواد باطله، قسمت مایع آن از مواد جامد جدا شده و مجدداً به کارخانه فرآوری منتقل می‌گردد. همچنین، می‌توان عملیات جدا کردن آب از باطله را قبل از انباشت مواد انجام داد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی باطله‌های فرآوری بسته به کانی‌شناسی و نوع ذخیره، فرآیند طی شده در مرحله فرآوری، بازیابی مرحله فرآوری و درجه هوازدگی در محل انباشت، متفاوت است [۲۱]. از خصوصیات مواد باطله می‌توان به: کانی‌شناسی، ژئوشی، وزن مخصوص، نحوه رسوب گذاری، نفوذپذیری، پلاستیسیته، تراکم‌پذیری، گرانروی و رئولوژی، مقاومت ذرات جامد باطله، خواص شیمیایی بخش مایع و خاصیت لیچینگ اشاره کرد [۳]. در معادن مس، ۹۵ تا ۹۹ درصد از مواد استخراج شده به باطله فرآوری تبدیل می‌شوند

^۱ Fine Grained

^۲ Angular

^۳ Friction Angle

[۳۶]. در اثر فرآیند فرآوری، این باطله‌ها می‌توانند شامل فلزات و اسید باشند که باید قبل از انباشت خنثی شود. بخش جامد باطله معمولاً شامل سولفیدهای متناسب کانی زایی است که مشکلات زیست محیطی به همراه خواهد داشت. همچنین، بخش جامد شامل مواد دانه ریز و ماسه‌ای است که می‌تواند در پایداری سدهای باطله تأثیر گذار باشد. در بررسی مواد باطله و خواص آن، از علم مکانیک خاک استفاده می‌شود با این وجود ویژگی مواد باطله با خاک‌هایی که به صورت طبیعی تشکیل می‌شوند متفاوت است به عنوان مثال چگالی و مقاومت کمتری دارد که به تدریج در اثر گذشت زمان کمی افزایش می‌یابد. دوغاب باطله معمولاً از بین ۴۰ تا ۵۰ درصد از مواد جامد تشکیل شده و ۱۵۰ درصد آب محتوا دارد [۵].

در زیر مهم‌ترین ویژگی‌های باطله‌های فرآوری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱.۱.۲ منحنی توزیع دانه‌بندی^۱

بررسی منحنی دانه‌بندی مواد باطله، اولین وسیله به منظور بررسی ویژگی‌هایی نظیر مقاومت برشی، نفوذپذیری، تغییر شکل پذیری و تراکم پذیری آن صورت می‌پذیرد. از آنجایی که دانه بندی مواد باطله نقش مهمی در کنترل نشتی دارند، بنابراین طراحی فیلترها و زهکشی‌های سد، به این ویژگی وابسته است [۱۶]. همچنین، در تحلیل پتانسیل افزایش درجه سیالی مواد باطله، بررسی دانه بندی مفید خواهد بود. در بررسی منحنی دانه‌بندی، اندازه ذرات در سه دسته تقسیم بندی می‌شوند: ذرات با ابعاد رس، ذرات با ابعاد سیلت^۲ و ذرات با ابعاد ماسه. در مورد باطله‌های معادن مس به‌طور کلی می‌توان گفت که بسته به درجه آسیای میله‌ای، در ناحیه رس تا ماسه هستند [۱۶].

۲.۱.۲ نسبت تخلخل^۳ و چگالی نسبی^۴

از تخلخل در بررسی و کنترل نشتی استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد، افزایش نیروی برشی دریافت شده از باطله حاصل کاهش فشار منفذی در اثر خروج آب به دلیل تخلخل بالا است [۳۷]. بررسی تخلخل مواد باطله در طول عمر سد باطله باید مورد بررسی قرار گیرد. چگالی^۵ درجا^۵ منعکس

^۱ Gradation – Grain Size Distribution Curve

^۲ Silt

^۳ Void Ratio

^۴ Relative Density

^۵ In Place-Density

کننده میزان تخلخل است چرا که در ابتدای ورود مواد باطله به سد، باطله اشباع است. حجم مواد انباشته شده به دلیل تغییر چگالی کاهش پیدا می‌کند. علت تغییر چگالی ته نشین شدن^۱ مواد باطله تحت تأثیر رفتار گذار^۲ است [۳۸].

۳.۱.۲ درجه اشباع^۳

درجه اشباع از مهم‌ترین پارامترها در تعیین شاخص خواص^۴ و استحکام^۵ مواد باطله است [۱۶]. درجه اشباع نشان‌دهنده نیروی برشی مواد باطله و پتانسیل مایع‌شدگی در اثر نیروهای وارده است [۳۹].

۴.۱.۲ پوکی^۶

معمولاً باطله‌ها پوکی ۴۰ درصدی دارند [۴۰] که بعد از ته نشین این میزان بسته به ابعاد دانه بندی و آب محتوا تغییر می‌کند. همچنین پوکی با افزایش ابعاد دانه بندی افزایش می‌یابد و به دلیل تجمع مواد دانه ریزتر باطله مقاومت بیشتری نسبت به تراکم‌پذیری نشان می‌دهد [۳۸].

۵.۱.۲ نفوذپذیری^۷

به طور کلی نفوذپذیری به تخلخل، ابعاد ذرات و کانی شناسی مواد باطله بستگی دارد و تحت تأثیر حالت رسوب گذاری قرار دارد. نفوذپذیری با افزایش ذرات دانه ریز، افزایش می‌یابد [۳۸].

۶.۱.۲ شاخص تراکم‌پذیری^۸

شاخص تراکم‌پذیری بیان‌کننده میزان تراکم خاک تحت فشار بارهای وارده به آن است که توسط تست تراکم پذیری یک بعدی اندازه گیری می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد، تحت بار ثابت دو نوع تراکم پذیری اولیه و ثانویه وجود دارد که تحت تأثیر کاهش فشار منفذی بوده و به مدت زمان فشار وارد شده وابسته است [۳۸].

¹ Settlement

² Transient Behavior

³ Degree of Saturation

⁴ Index Properties

⁵ consistency

⁶ Porosity

⁷ Permeability

⁸ Compression Index

۷.۱.۲ ضریب سفتی (تحکیم)^۱

این شاخص نرخ زمان تحکیم تحت تأثیر بارهای وارد را نشان می‌دهد. ذرات دانه ریزی که از آب اشباع باشد با سرعت کم و در مدت زمان طولانی ته نشین می‌شود مگر اینکه آب آن گرفته شود [۳۸].

۸.۱.۲ نیروی برشی

از اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری نیروی برشی تحلیل پایداری‌های کلاسیک در طراحی سدهای باطله استفاده می‌شود [۳۸].

۹.۱.۲ ویژگی‌های جریان غیر اشباع^۲

این ویژگی بیان‌کننده قابلیت خاک در جذب یا از دست دادن آب است [۳۸].

۱۰.۱.۲ شاخص اتربرگ^۳

به کمک شاخص اتربرگ در تعیین درجه سفتی (تحکیم)، انسجام و چسبندگی ذرات دانه ریز برای دسته بندی سایر خواص باطله انجام می‌شود. این شاخص در پیش بینی میزان تراکم پذیری، پتانسیل ته نشینی، نفوذپذیری و نیروی برشی مواد باطله مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶].

۲.۲ مراحل ته‌نشین شدن و تحکیم مواد باطله

بررسی مراحل ته‌نشین شدن و تحکیم مواد باطله به‌دلایلی که در ذیل به آن اشاره می‌شود اهمیت دارد [۳۸]:

(أ) پیش بینی صحیح از ظرفیت سدهای باطله

(ب) محاسبه پایداری شیب و سد

^۱ Coefficient of Consolidation

^۳ Atterberg Index Limits

^۲ Unsaturated Flow Characteristics

(ت) پیش بینی میزان نشتی [۳۸]

(ث) تعیین روش بستن و بازسازی سد و تعیین استفاده بعدی آن برای نسل آینده

(ج) ارزیابی مراحل ترفیع و ساخت سد

مراحل ته نشین شدن مواد باطله در سد به شرح زیر است [۳۸]:

- ته نشینی استوکیزین^۱: در این مرحله ته نشین شدن مواد به دلیل نیروی جاذبه و یا نیروی تعاملی^۲ ایجاد شده در فعالیت‌های سطحی رخ می‌دهد. غلظت جامد در این مرحله کم و بین صفر تا یک درصد است تا شرایط برای موانع پروگزیمال^۳ آماده شود.
 - ته نشینی با مانع^۴: این مرحله زمانی که ته نشینی استوکیزین کامل انجام می‌شود و مواد در کنار هم قرار گرفته‌اند، به دلیل افزایش چگالی واکنش‌های سطحی مواد به شدت افزایش می‌یابد.
 - جامد شدن: جامد شدن زمانی رخ می‌دهد که نیروهای بین مولکولی افزایش یافته و مواد ته نشین شده، شکل خاک را به خود می‌گیرند. در این مرحله با انتقال تنش با فشار منفذی غیر قابل تشخیص و افزایش تنش مؤثر، جامد شدن اتفاق می‌افتد.
- دو مرحله اول در مقایسه با مرحله جامد شدن، به سرعت و در طی چند روز اتفاق می‌افتد (با سرعت چندین فوت در روز).

۳.۲ رفتار فشار منفذی ناشی از آب محتوای مواد باطله

همان طور که اشاره شد، باطله‌های فرآوری دارای آب هستند. فشار منفذی ناشی از آب محتوای مواد باطله، خود فشاری ایجاد می‌کند که رفتار آن به صورت مثلثی است. شکل ۱-۲، رفتار فشار منفذی آب مواد باطله و رفتار آن در مطالعات گیبسون^۵ در سال ۱۹۵۸ نشان می‌دهد. با افزایش ارتفاع مواد باطله، گذر زمان، چگالی مواد باطله افزایش خواهد یافت. از طریق منحنی‌های رسم شده در شکل ۱-۲، و با

¹ Stokesian settling

² Interactive Forces

³ Proximal Hindrances

⁴ Hindered Settling

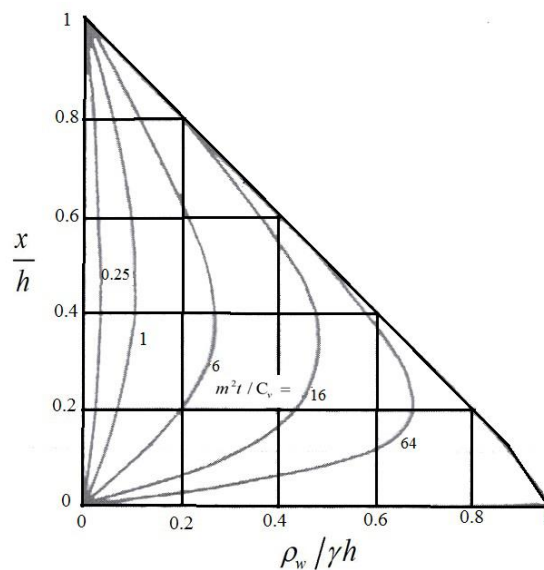
⁵ Gibson

محاسبه ضریب بدون بعد T ، می‌توان میزان تحکیم مواد باطله و رفتار فشار آب منفذی آنها را بر اساس رابطه ۱-۲ که توسط گیبسون ارائه شده است، محاسبه کرد.

$$T = m^2 t / C_v \quad (1.2)$$

$$m = D / t$$

که در آن، C_v نرخ تحکیم (واحد سطح بر واحد زمان)، t زمانی که تحکیم مواد باطله شروع شده است، و D ارتفاع مواد باطله در سد را نشان می‌دهد [۴۱].



شکل ۱.۲ تحکیم مواد باطله، فشار آب منفذی اضافی بر اساس نرخ تحکیم، ضخامت مواد باطله و زمان [۴۱]

۴.۲ باطله‌های حاصل از فرآوری مس

مطالعات انجام شده بر روی باطله‌های مس توسط والر^۱ ۱۹۷۴ [۴۲]، وُلپ^۲ در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۷۹ [۴۴، ۴۳]، میتال و مورگن^۳ در سال ۱۹۷۵ [۴۵]، و شمسانی و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر روی باطله‌های معدن مس سرچشمه [۴۶]، نشان داد که متوسط پارامترهای ژئوتکنیکی باطله‌های مس مشابه یکدیگر هستند. جدول ۱-۲ محدوده تغییرات برخی از پارامترهای مربوط به مطالعات انجام شده روی باطله‌های مس را نشان می‌دهد.

¹ Wahler

² Volp

³ Mittal and Morgenstern

جدول ۱.۲ پارامترهای ژئوتکنیکی باطله‌های مس [۴۶-۴۲]

محدوده تغییرات	واحد	باطله مطالعه شده	پارامتر ژئوتکنیکی مورد مطالعه
۲/۶-۲/۸	بدون واحد	باطله ماسه مس در غرب آمریکا	چگالی (G_s)
۲/۶-۲/۸		باطله دانه ریز مس در غرب آمریکا	
۲/۷۹		باطله‌های مس سرچشمه	
۰/۶-۰/۸	بدون واحد	باطله ماسه مس در غرب آمریکا	نسبت تخلخل (e)
۰/۹-۱/۴		باطله دانه ریز مس در غرب آمریکا	
۰/۴-۱		باطله‌های مس سرچشمه	
۱/۵۹-۱/۷۹	تن بر متر مکعب ton/m^3	باطله ماسه مس در غرب آمریکا	وزن مخصوص (γ_d)
۲/۶۸-۲/۰۷		باطله دانه ریز مس در غرب آمریکا	
۱/۷۸		باطله‌های مس سرچشمه	
۴۰	درصد %	باطله مس غرب آمریکا	حد مایع شدگی (LL)
۰-۳۰		باطله مس در بریتیش کلمبیا-کانادا	
۲۶-۳۹		باطله‌های مس سرچشمه	
۱۳-۱۸	درجه	باطله‌های مس در غرب آمریکا	زاویه شکست (Φ)
۱۴-۲۴		باطله‌های مس در شیلی	
۸-۳۷		باطله‌های مس سرچشمه	
۰-۰/۹۸	کیلوگرم بر سانتی	باطله مس غرب آمریکا	نیروی چسبندگی (C)
۰-۰/۶۴	متر مربع	باطله‌های مس در شیلی	
۰/۰۸-۰/۹۸	Kg/cm^2	باطله‌های مس سرچشمه	

۵.۲ انواع روش‌های انباشت باطله‌های فرآوری

روش‌های انباشت سدهای باطله تحت تأثیر عوامل زیست محیطی، تغییر روش‌های آسیا، اهمیت چشم‌انداز منطقه و نیز پتانسیل‌های کاربری پس از بستن و بازسازی آن است. از انواع روش‌های انباشت مواد باطله می‌توان به روش دره متقابل^۱، سد در دامنه کوه‌ها^۲، سدهای خاکریزهای^۳، انباشت خشک و ضخیم مواد روی سطح زمین^۴، انباشت در پیت و یا معدن زیرزمینی رها شده، انباشت مستقیم در دریاچه‌ها یا اقیانوس‌ها^۵ اشاره کرد. روش انباشت در زیر رودخانه برای چهار معدن در اندونزی مورد استفاده قرار گرفته است. انباشت مواد باطله در معادن متروکه در چند مورد استفاده شده است و باید توجه داشت که این روش در پیت و یا معدن زیرزمینی در حال بهره برداری قابل استفاده نیست [۳۵]. در زیر چند روش از مهمترین روش‌های انباشت توضیح داده خواهد شد. در مورد انباشت مواد در سدهای باطله این مورد شایان ذکر است که علاوه بر خطر ناپایداری و شکست سدهای باطله، مشکلات مهم دیگری در مورد انباشت سدهای باطله وجود دارد که از جمله آن می‌توان به تولید زهاب اسیدی، نشتی آب فرآیندی و ورود مواد باطله و سمی به محیط اشاره کرد.

۱.۵.۲ سدهای باطله

سدهای باطله معمول ترین و مهم‌ترین روش در انباشت مواد باطله است. به دلایل اقتصادی سدها معمولاً در نزدیکی معادن ساخته می‌شوند و مواد باطله توسط لوله‌های انتقال، مواد را از کارخانه به سد منتقل می‌کنند. در سال ۲۰۱۰ تعداد حدود ۳۵۰۰ سد باطله فعال در دنیا تخمین زده شده است [۴۷] که در سال ۲۰۱۵ این تعداد در ایالت بریتیش کلمبیا^۶ کانادا، ۱۲۳ عدد سد فعال اعلام شده است [۴۸]. در تعیین نوع روش طراحی سد، عوامل متعددی مؤثر هستند که در فصل سه به آن اشاره شده است. از آنجایی که هزینه ساخت سدهای باطله جزء هزینه‌های تولید مواد معدنی محسوب می‌شود، بنابراین باید هزینه ساخت تا حد ممکن کاهش یابد. سدهای باطله از نوع سدهای خاکریزهای هستند و مانند آنها طراحی و ساخته می‌شوند [۴۹]. مهمترین تفاوت ساخت سدهای باطله و سدهای خاکریزهای که برای نگه داری آب ساخته می‌شوند، در این است که برخلاف سدهای آبی، مراحل

¹ Cross Valley

² Hillside Dams

³ Raised Embankments/Impoundments

⁴ Dry-stacking of Thickened Tailings on Land (Backfill)

⁵ Ocean Surface and Submarine Tailings Disposal

⁶ British Columbia

ساخت سدهای باطله به تدریج و همراه با انباشت مواد باطله پشت سد است. این موضوع از مهمترین دلایل شکست سدهای باطله محسوب می‌شود. همچنین، از آنجایی که خواص و رفتار فیزیکی و شیمیایی مواد باطله بسیار با آب متفاوت است لذا بررسی این خواص به‌ویژه رفتار هیدرو مکانیکی آنها در پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سدهای باطله خود به سه روش طراحی و ساخته می‌شوند که جزییات آن در فصل سه آمده است. از میان انواع روش‌های ساخت سد، روش بالارونده ارزان‌ترین و سریع‌ترین روش ساخت محسوب می‌شود اما این روش از کمترین پایداری برخوردار است و برای مناطق با پتانسیل لرزه خیزی بالا توصیه نمی‌گردد.

۲.۵.۲ انباشت مواد باطله در سطح

انباشت مواد در سطح به معنی انباشت مواد باطله همراه آب و یا بدون آب در یک ایستگاه خالی است. از قرن بیستم انباشت مواد باطله در معادن زیرزمینی در معادن آفریقا آغاز شد و امروزه از این روش در بسیاری از معادن مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش پس از گذشت یک زمان معین، به‌عنوان تحکیم کننده زمین در این معادن عمل می‌کند. ۴۰ تا ۶۰ درصد باطله‌های تولید شده در معادن به این روش قابل انباشت هستند [۳۵].

۶.۲ جمع بندی

میزان تولید باطله‌های در بخش فرآوری با افزایش تولید مواد معدنی روبه افزایش است. سدهای باطله متداول‌ترین روش انباشت این باطله‌ها در اطراف معدن است. با توجه به اینکه رفتار، ویژگی‌ها و خواص فیزیکی و شیمیایی باطله‌های فرآوری، از مهم‌ترین عوامل پایداری سدهای باطله است، لذا در این بخش به بررسی این ویژگی‌ها و نقش آنها در پایداری سد پرداخته شد. مهمترین ویژگی‌های مواد باطله شامل تخلخل، مقاومت برشی، نرخ نه نشینی و سفت شدن، است که نقش مهمی در پایداری سد دارند.

۳

فصل سوم

سدهای باطله و عوامل مؤثر در طراحی و شکست آنها

سدهای باطله و عوامل مؤثر در طراحی و شکست آنها

همان‌گونه که در فصل دوم توضیح داده شد، روش‌های متعددی برای انباشت باطله‌های حاصل از مرحله فرآوری مواد معدنی وجود دارد که از پرکاربردترین آنها انباشت مواد در سدهای باطله است. در این فصل به بررسی سدهای باطله، طراحی سدها، مکانیزم و علت‌های شکست سدهای باطله پرداخته می‌شود.

۱.۳ طراحی سدهای باطله و انواع آن

سدهای باطله از نوع سدهای خاک ریزه‌ای محسوب می‌شوند. در چنین سدهایی مصالح طبیعی بدون اضافه کردن هیچ گونه مصالح چسبنده، به صورت لایه لایه (و گاه به صورت توده) ریخته شده و توسط ماشین آلات سنگین کوبیده و متراکم می‌شوند. سدهای خاک ریزه‌ای به دو دسته مهم سدهای خاکی^۱ و سدهای سنگریزه‌ای^۲ تقسیم می‌شوند. انتخاب نوع سد خاک ریزه‌ای به وجود مصالح انتخابی، دسترسی و فاصله حمل آنها تا محل سد بستگی دارد [۴۹].

سدهای باطله باید به گونه‌ای طراحی و ساخته شوند که:

۱. پایداری طولانی مدت در مقابل فرسایش و جابه‌جایی داشته باشند.

۲. از آلودگی آب‌های زیر زمینی و سطحی اطراف سد جلوگیری به عمل آید.

۳. برگرداندن منطقه برای استفاده بعدی میسر شود.

بهترین مکان برای احداث سدهای باطله، مکانی با نفوذپذیری زیر 10^{-9} m/s است. از آنجایی که از نظر مهندسی این امر محقق نمی‌شود، لذا لازم است برای محافظت از آب‌های زیرزمینی تمهیدات مهندسی لازم صورت پذیرد [۵۰]. در مکان‌یابی و طراحی سدهای باطله سه رکن اساسی وجود دارد.

^۱ Earth Dam

^۲ Rockfill Dam

^۳ Cost-Benefit Analysis

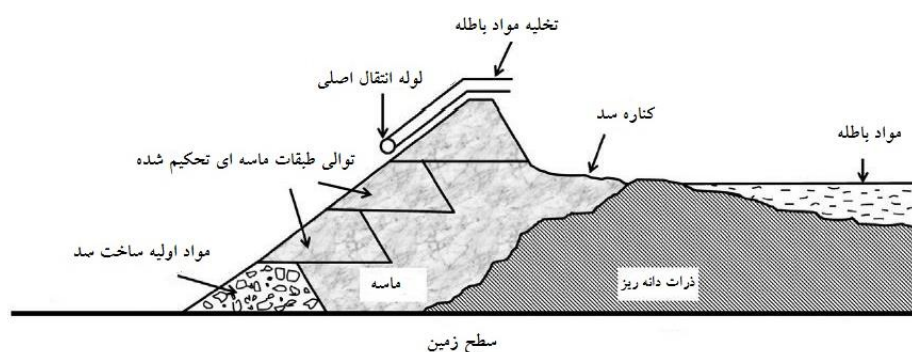
(۱) طراحی و ساخت سد باید از نظر فنی و اقتصادی توجیه پذیر باشد و تحلیل سود بر هزینه^۳ در مورد آن انجام شود.

(۲) سدهای باطله باید برای یک دوره طولانی پایدار باشند.

(۳) از نظر زیست محیطی کم‌ترین آلودگی را ایجاد نمایند [۵۱].

۱.۱.۳ سدهای بالا رونده

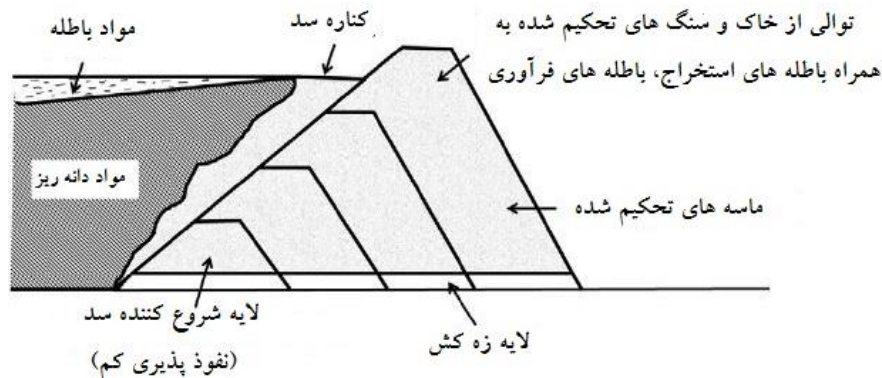
در این روش، خط مرکزی سد، به صورت بالا رونده روی مواد قرار می‌گیرد. اما این روش برای مناطق با پتانسیل لرزه خیزی بالا مناسب نیست چراکه در هر مرحله از ترفیع، دیواره سد روی دیواره قبلی ساخته می‌شود به طوری که مواد دانه ریزی که به خوبی محکم نشده در پشت دیواره باقی می‌ماند [۵۲]. شکل ۳-۱ نحوه طراحی سد به روش بالا رونده را نشان می‌دهد.



شکل ۱.۳ طراحی سد به روش بالا رونده [۵۲]

۲.۱.۳ سدهای پایین رونده

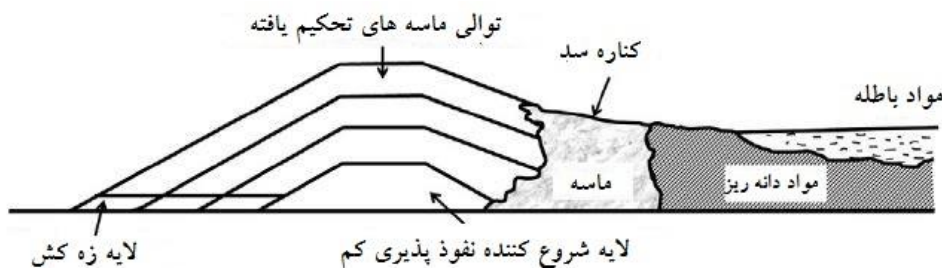
این روش برای طراحی سدهای بزرگ و ایمن‌تر، به‌ویژه در مقابل امواج و نیروهای ایستا و لرزه‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرد و تنها روشی است که تمامی اصول استاندارد مهندسی در آن وجود دارد. این روش برخلاف روش بالا رونده، با افزایش ارتفاع دیواره، خط مرکزی به صورت پایین رونده است و سد روی مواد درشت دانه باطله قرار می‌گیرد. در این روش از سیکلون‌ها برای تأمین مواد به کار رفته در ساخت سد استفاده می‌شود. مهمترین اشکال این روش نیاز به حجم بالایی از مواد و خاک در ساخت سد است که ممکن است در تأمین آن به‌ویژه در اولین مراحل ساخت دشوار باشد که این امر باعث افزایش هزینه خواهد شد [۵۲]. شکل ۳-۲ سد باطله به پایین رونده را نشان می‌دهد.



شکل ۲.۳ طراحی سد به روش پایین رونده [۵۲]

۳.۱.۳ سدهای مرکزی

این روش نوعی از سدهای پایین رونده است، به طوری که در حین مراحل ترفیع سد، هسته در موقعیت افقی باقی می ماند تا نسبت به آن به حجم کمتری از خاک و مصالح نیازمند است. همچنین اجرای این روش آسانتر و سریعتر بوده و با مشکلات کمتری نظیر جلوگیری از ایجاد اختلال مواد باطله در ترفیع سد، همراه خواهد بود. شکل ۳-۳ طراحی سد به روش مرکزی را نشان می دهد [۵۲].



شکل ۳.۳ طراحی سد به روش مرکزی [۵۲]

۲.۳ عوامل مؤثر در طراحی و مکان یابی سدهای باطله

طراحی سدهای باطله به عوامل مختلفی چون ویژگی های مواد باطله تولید شده در معدن، شرایط زمین شناسی منطقه، عوامل هیدرولوژی و پارامترهای ژئوتکنیکی مکان سد بستگی دارد. در مطالعات انجام شده در این پایان نامه، عوامل مؤثر در طراحی سد، به شرح جدول ۳-۱ دسته بندی شده است.

جدول ۱.۳ عوامل مؤثر در طراحی سدهای باطله

عوامل مؤثر در طراحی سدهای باطله	زیرشاخه عوامل مؤثر در طراحی سدهای باطله
عوامل زمین شناسی، عوامل ژئوتکنیکی و ژئو مکانیکی منطقه	ویژگی‌های پی (زاویه اصطکاک داخلی، نیروی به هم چسبندگی، نفوذ پذیری، درزه و شکاف)
	پتانسیل رانش زمین
	توپوگرافی منطقه و شیب زمین
	گسل‌ها، شرایط زمین لرزه و پتانسیل لرزه خیزی منطقه
عوامل هیدرولوژی منطقه	پتانسیل بارش و وقوع سیلاب در منطقه و دوره بازگشت باران و سیلاب‌های جدید، توجه به اثر گرم شدن کره زمین و تغییرات ایجاد شده در شرایط آب و هوا و اثر آن بر دوره بازگشت باران‌های شدید
	میزان رطوبت در خاک اشباع نشده، فشار هیدرو استاتیکی آب در منافذ و فشار هیدرودینامیکی آب زیر زمینی، حوزه آبخیز منطقه
ویژگی‌های مواد باطله	پتانسیل افزایش درجه سیالی مواد باطله، خواص فیزیکی و شیمیایی آنها، رئولوژی، توزیع ابعاد دانه بندی، ویژگی‌های هیدرومکانیک، زمان سفت شدن مواد
عوامل توسعه پایدار	پایداری زیست محیطی (آب، هوا، خاک، گیاهان و جانداران): مکان‌یابی با احتمال کمترین تخریب و آلودگی زیست محیطی به‌ویژه در دراز مدت، بازسازی مطابق با شرایط اکوسیستم منطقه پایداری اجتماعی: ایجاد کمترین تغییر در زندگی، کسب اجازه از افراد بومی و محلی، کمترین مرگ و میر در صورت شکست سد، ایجاد شغل پایدار در محل، ایجاد شغل پس از بازسازی پایداری اقتصادی: کمترین هزینه ساخت، با کمترین احتمال شکست، بازسازی مناسب به همراه اشتغال زایی

مهمترین پارامتر مهندسی در طراحی سد پیش بینی حجم سد است. در تعیین حجم سد و مواد باطله تولید شده، عدم قطعیت عیار و تناژ ماده معدنی مؤثر است.

تعادل آب در سدهای باطله نیز از دیگر پارامتر مهندسی طراحی سدهای باطله است.

سدهای باطله باید به گونه‌ای جانمایی، طراحی و مدیریت شوند تا بیشترین حجم مواد باطله، کمترین آلودگی زیست محیطی را ایجاد نمایند و برای بلند مدت پایدار باشند.

۳.۳ شکست سدهای باطله و تبعات ناشی از آن

شکست سد باطله زمانی رخ می‌دهد که سد ساختار خود را از دست داده باشد و محتوای درون سد از آن خارج شود. جریان مواد خارج شده توسط نیروی گرانش زمین بسیار سریع تر رخ می‌دهد و شامل مواد مایع و جامد است و در برخی موارد نتایج بسیار سهمگینی به دنبال خود دارد. این جریان می‌تواند حاوی میلیون‌ها مترمکعب آب و مواد جامد باشد و مسیر طولانی را با سرعت بیش از ۶۰ کیلومتر بر ساعت طی کند. ارتفاع سدها از ۵ تا ۵۰ متر متغیر است. مواد خارج شده از سد می‌تواند تا بیش از ۱۰۰ کیلومتر هم طی کند. مثال‌های زیادی از شکست سدهای باطله از کوچک تا سدهای بزرگ وجود دارد. شکست در اثر بارهای وارد بر فونداسیون، دیواره و تکیه گاه سد رخ می‌دهد. بارهای وارد بر سدهای خاکریزه‌ای عبارت‌اند از: فشار ناشی از مواد باطله و شدت نرخ ورود مواد، فشار آب (آب محتوای مواد باطله و آب‌های سطحی)، نیروی وزن، نیروهای ناشی از نشت آب و مواد باطله، نیروی وزن و نیروهای القایی ناشی از زلزله و امواج لرزه‌ای و فشار ناشی از مایع شدگی ایستا [۴۹].

۴.۳ علت و مکانیزم شکست سدهای باطله

به‌منظور پیش بینی احتمال شکست، علت شکسته شدن سدهای باطله، مکانیزم و فرآیند رخداد آن را بررسی کرده و پارامترهای ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی مؤثر بر آن مورد بحث قرار خواهند گرفت:

مکانیزم یا حالت شکست به مجموعه‌ای از رخدادها گفته می‌شود که وقوع متوالی و به ترتیب آن موجب شکست سیستم خواهد شد [۵۳]. عوامل شکست سدها در ادامه توضیح داده شده است.

۱.۴.۳ شکست به دلیل لبریز

لبریز جریان‌ها، از مکانیزم و حالت‌های شکست سدها است که نتیجه سیل و طغیان جریان آب و محتویات سد رخ می‌دهد. ورود بیش از اندازه آب (بیش از حجم سد یا بیش از ظرفیت خروج سرریز) که از تاج سد لبریز می‌شود، گاه خسارات شدیدی به سد وارد می‌کند و باعث شکست سد می‌شود. این مکانیزم و حالت شکست از زمان شکست سد بتی کوزا^۱ در ایتالیا در سال ۱۹۸۵ گزارش شد [۵۴]. این نوع شکست زمانی اتفاق می‌افتد که ظرفیت سرریز^۲ کم باشد، ارتفاع آزاد^۳ و فضای بین بالای سد و سطح آب مواد باطله کافی نبوده و آب پشت سد به دلایلی نظیر باران شدید، سیل و یا خطای عملیاتی بالا رود و یا تغییر شکل و یا نشست تابع زمان در پی یا بدنه ایجاد شود [۴۹]. سدهای خاک ریزه‌ای به دلیل محدود بودن میزان پسماند فرسایش^۴ خاک‌ها، تحمل لبریز شدن را ندارند. بیشترین میزان فرسایش در شیب پایین دست سد رخ می‌دهد چرا که سرعت امواج آب و شیب فرآیند فرسایش را آسان‌تر می‌نماید. لبریز و سرریز مواد تا زمانی ادامه می‌یابد تا در اثر فرسایش تاج سد شکسته شود. پیش بینی اینکه آیا شکست رخ می‌دهد یا خیر، یک فرآیند پیچیده است [۵۴].

۲.۴.۳ شکست به دلیل افزایش درجه سیالی (در اثر زلزله و ایستا)

بررسی شکست سد به دلیل افزایش درجه سیالی از دو دیدگاه قابل بررسی است. در سدهای خاکی به دلیل مصالح خاکی استفاده شده در بدنه سد، در اثر نیروهای وارده ناشی از زلزله، با کاهش تنش برشی مؤثر، به حالت مایع درآمده و باعث شکست در بدنه سد می‌شود.

از سوی دیگر، همانطور که اشاره شد، مواد باطله نیز ویژگی‌هایی مشابه خاک دارند. لذا احتمال افزایش درجه سیالی در مواد باطله انباشته شده پشت سد وجود دارد. با افزایش درجه سیالی، فشار هیدرولیکی ایجاد شده پشت دیواره سد، باعث شکست شیب و عدم پایداری در سد می‌گردد. پارامترهای مؤثر در ارزیابی پتانسیل افزایش درجه سیالی شامل: بررسی نرخ تنش، فشارهای وارده، و میزان مواد دانه ریز است.

¹ Cosa

² Spillway

³ Freeboard

⁴ Limited Erosion Resistance

با توجه به مطالب فوق، بررسی احتمال و پتانسیل افزایش درجه سیالی در سد و مواد باطله در دو حالت دینامیک و استاتیک قابل بررسی است.

۱.۲.۴.۳ دینامیک

افزایش درجه سیالی در حالت دینامیک، در اثر وارد شدن تنش بالا و زلزله رخ می‌دهد. در ارزیابی رفتار خاک و باطله در شرایط زلزله، باید رابطه تغییر شکل و تنشی-برشی دینامیک در محدوده‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. این عوامل از طریق مدول تنش و فاکتور تعدیل تعیین می‌شوند. [۱۹]

۲.۲.۴.۳ استاتیک

افزایش درجه سیالی در حالت استاتیک نیاز به نیروی قوی مانند زلزله و یا تنش شدیدی ندارد [۱۹]. این نوع شکست سدهای باطله از متداول‌ترین علت در شکست سدهای باطله، به‌ویژه در سدهای بالارونده است. از آنجایی که مراحل ترفیع سد، با ورود دوغاب باطله همراه است، با افزایش فشار ناشی از فشار منفذی و افت مقاومت برشی، شرایط مناسبی برای شکست‌های برشی مانند افزایش درجه سیالی استاتیک را فراهم می‌کند [۳۸].

۳.۴.۳ شکست به دلیل نشتی و رگاب

نشتی در سدها باعث افزایش فشار منفذی بینابینی شده و باعث کاهش تنش نرمال مؤثر و نقطه‌ای و نیز تنش برشی باقی مانده می‌شود. همچنین نشتی باعث فرسایش داخلی و ایجاد مجرا یا لوله می‌شود و شکست هیدرولیکی رگاب را ایجاد می‌کند [۶].

در طراحی سدهای خاکی، هدف اصلی، مهار نشتی به صورت کامل نخواهد بود اما زه کشی نشتی برای جلوگیری از افزایش بیش از حد مجاز آب و حذف عوامل ناپایداری شیب در حالت پایدار انجام می‌شود. برای کنترل نشتی، در سدها معمولاً یک هسته از ذرات ریز خاک (برای کمینه کردن نشتی) در کنار یک منطقه با ذرات درشت دانه خاک (برای کنترل و جلوگیری از فشار آب) تعبیه شده است. با این وجود اگر طراحی برای جلوگیری از جابجایی ذرات ریز خاک و تراوش مناسب نباشد، حفرات می‌توانند به داخل سد گسترش پیدا کنند. ترک‌ها نیز می‌توانند گسترش پیدا کنند خصوصاً اگر از

عمق سنگ بستر ارتفاع‌های مختلفی داشته باشد. حفره‌ها و درزه‌ها می‌توانند مسیر حرکت آب شده و سد را از درون ساییده و خالی کنند. این پدیده شکست رگاب نام دارد و می‌تواند باعث شکست ناگهانی سد شود. درزه و شکاف، نفوذپذیری بالا و کارست در فونداسیون هم می‌تواند باعث شکست رگاب شود [۶].

۴.۴.۳ شکست به دلیل فرسایش (سطحی و داخلی)

فرسایش سطحی به دلیل وزش باد و یا بارندگی بر پایداری سد اثرگذار خواهد بود که به کمک ایجاد پوشش گیاهی و استفاده از مقاوم‌سازی شیمیایی می‌توان از این پدیده جلوگیری کرد. فرسایش به‌ویژه در نواحی پایین سد باعث کاهش پایداری شیب شده و سبب شکست نقطه‌ای می‌شود. فرسایش داخلی زمانی رخ می‌دهد که سرعت تراوش و رسوخ آب از طریق سد به اندازه‌ای زیاد باشد که بتواند ذرات خاک را جابجا کند. با جابجایی ذرات خاک، فضای کانال بیشتر شده و جریان آب بیشتری را به سمت خود جذب می‌کند، ادامه این فرایند باعث شکست سد می‌شود. همچنین، بین فرسایش داخلی، نشتی و شکست سد رابطه نزدیکی برقرار است. سدهای مدرن، تجهیزاتی از جمله ابزار دقیق‌های کامپیوتری برای اندازه‌گیری جابجایی توده خاک برای پایش جابجایی سد دارند [۶].

۵.۴.۳ شکست به دلیل عدم پایداری شیب

شکست به دلیل عدم پایداری شیب وقتی اتفاق می‌افتد که تنش برشی وارد بر سد بیش از تنش باقی مانده از مواد سد شود و در نتیجه آن باعث شکست چرخشی یا کشویی در بخشی از سد و یا شیب پایین رونده شده یا باعث شکست سد می‌شود. بر یک توده خاکی دو نوع نیروی مؤثر وارد می‌شود. (۱) نیروی ناشی از وزن و (۲) نیروی مقاومت در اثر استحکام خاک، در برابر توده خاک یا سطح لغزش جهت نگه داری توده خاک در محل. بررسی پایداری توده خاک توسط ضریب ایمنی سنجدیده می‌شود که در آن نسبت نیروی مقاوم به نیروی محرک مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر ضریب ایمنی کمتر از یک باشد، توده ناپایدار خواهد بود. در محاسبه ضریب ایمنی فرض می‌شود شکل توده خاک هلالی شکل و نیروی لغزشی سطح دایره‌ای باشد. پایش این شکست مستلزم در اختیار داشتن داده‌ها و مدل سازی کامپیوتری است. در سدهای خاکی سه نوع شکست عدم پایداری شیب وجود دارد، که عبارت‌اند از:

- **حالت استاتیک:** در این حالت شکست در قسمت پایین دست سد و در اثر نشتی رخ می‌دهد. همچنین این شکست می‌تواند در اثر افزایش فشار منفذی آب پشت دیواره سد نیز حاصل شود.

- **حالت لرزه‌ای:** در این نوع شکست، نیروی پیشران روی توده خاک به دلیل نیروی عمودی زلزله افزایش می‌یابد در حالی که نیروی مقاومتی می‌تواند به دلیل افزایش شدت مایع شدگی بخشی از سد یا فونداسیون کاهش یابد. در طی مایع شدگی، ذرات خاک به یک ساختار متراکم‌تر تغییر چینش می‌دهند که باعث جابجایی آب داخل منافذ می‌شود. از آنجایی که آب داخل منافذ نمی‌تواند به سرعت تخلیه شود، لذا فشار ناشی از آب منفذی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. اگر این فشار به اندازه کافی زیاد باشد، ذرات خاک توسط آب منفذی احاطه می‌شود که مقاومت برشی ندارد در نتیجه مقاومت برشی خاک صفر می‌شود. مطالعات نشان داده است که در حین زلزله وقتی که لرزش زمین بیشینه است، ضریب ایمنی زیر ۱ خواهد شد و تغییر شکل رخ خواهد داد. مقدار تغییر شکل از ۵ تا ۱۰ فوت بسته به ارتفاع سد است.

- **حالت سقوط ناگهانی:** در این نوع شکست، در قسمت بالا دست سد در اثر کاهش ناگهانی سطح مخزن رخ می‌دهد.

سدهای باطله معمولاً دارای سیستم‌های زه کشی و آبراهه هستند که اگر این سیستم‌ها به درستی عمل نکنند باعث عدم پایداری شیب و یا لبریز مواد و آب می‌گردد.

۶.۴.۳ شکست فونداسیون

خاک ضعیف و یا لایه‌های خاکی با فشار منفذی بالا در زیر سد باعث شکست برشی در فونداسیون سد شده و باعث چرخش سد یا جابجایی کامل سد می‌گردد. هنگام طراحی سد، مواد فونداسیون باید تحمل وزن سد و محتویات آن را داشته باشد. اگر فونداسیون از مواد ضعیف نظیر رس نرم ساخته شده باشد، شکست فونداسیون رخ می‌دهد. شکست فونداسیون همچنین می‌تواند در حالت استاتیک هم در محل وجود درزه ضعیف یا نفوذپذیر در فونداسیون رخ دهد. اگر نشتی در راستای درزه رخ دهد، افزایش فشار منفذی و آب درون درزه باعث کاهش مقاومت در راستای درزه شده، در این راستا

شکست رگاب رخ خواهد داد. ویژگی‌های کارستی هم می‌تواند بر ظرفیت فونداسیون اثر گذار باشد با جریان پیدا کردن آب و ایجاد استرس در فونداسیون سنگ فرصت برای انحلال سنگ آهک پدید می‌آید. در نهایت، افزایش درجه سیالی دانه‌های ریز خاک در اثر زلزله باعث ناپایداری فونداسیون و شکست خواهد شد.

۵.۳ تبعات ناشی از شکست سدهای باطله

روزانه در اثر نشت، شکست‌های کوچک و یا تراوش آب فرآیندی از سدهای باطله، مواد آلاینده وارد محیط زیست می‌شود با این وجود به دلیل حوادث فاجعه بار شکست برخی از سدهای باطله، میزان و حجم آلودگی ناشی از شکست سدهای باطله بیش از پیش توجهات را به سوی خود جلب کرده است. آلودگی زیست محیطی نه تنها از دید حجم مواد رها شده در محیط بلکه به دلیل سموم و فلزات سنگینی (عناصر که در هنگام تشکیل ذخایر معدن با آنها همراه هستند) که وارد محیط زیست (آب، خاک و هوا) می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرند، مانند ورود سولفیدها (که معمولاً در ذخایر مس وجود دارند) به آب و تولید اسید سولفوریک. از سوی دیگر آلاینده توسط آب به ویژه آب‌های سطحی در وسعت قابل توجهی گسترش می‌یابند. پاک سازی این وسعت از آلودگی ضمن دشوار بودن، نیازمند زمان و هزینه بسیار به ویژه در مورد آب‌ها و سفره‌های زیر زمینی خواهد بود. مطالعات سدهای باطله نشان می‌دهد که جریمه‌های زیست محیطی شرکت‌ها در اثر آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از شکست سد، به مهمترین چالش و دغدغه شرکت‌های معدنی تبدیل شده است. به عنوان مثال، شکست سد باطله در رومانی که مواد آلوده (ماسه قرمز) تا وسعت ۴۰ کیلومتر گسترش یافت [۳۶]. اگرچه تبعات زیست محیطی شکست سدهای باطله به عنوان مهمترین نتیجه شکست سد تلقی می‌شود، اما تبعات شکست سدها در مورد سایر ارکان توسعه پایدار و در مورد جامعه و اقتصاد نیز قابل بحث و بررسی است. از این رو، بررسی تبعات ناشی از شکست سدهای باطله مدیریت آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که موضوع این بخش است.

با توجه به مطالعات آماری سدهای شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵، تبعات ناشی از شکست سدهای باطله با توجه به عوامل توسعه پایدار در سه گروه تبعات زیست محیطی، اجتماعی و

اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲-۳ دسته‌بندی تبعات ناشی از شکست سدهای باطله را نشان می‌دهد.

جدول ۲.۳ تبعات ناشی از شکست سدهای باطله

زیرشاخه تبعات	تبعات ناشی از شکست سد باطله
آلودگی خاک	تبعات زیست محیطی
آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی	
از بین رفتن پوشش‌های گیاهی	
مرگ و میر حیوانات	
مرگ و میر افراد	تبعات اجتماعی
از بین رفتن شغل	
از بین رفتن منازل و زیرساخت‌ها	تبعات اقتصادی
توقف یا کاهش تولید معدن یا بسته شدن آن	
خسارات وارد شده به معدن و ماشین آلات	
جریمه‌های زیست محیطی	
از بین رفتن هزینه‌های سرمایه‌ای ساخت سد و زیرساخت‌ها	
هزینه‌های پاک‌سازی زیست محیطی، تعمیر سد، زیرساخت‌ها، خرید ماشین آلات	
افت سهام شرکت	

۶.۳ جمع بندی

در تحلیل ریسک و ارزیابی شکست سدهای باطله، طراحی سد و شناسایی عوامل مؤثر در شکست و مکانیزم آن نقش اساسی دارد. در این فصل با بررسی سدهای شکسته شده، مکانیزم شکست آنها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این مکانیزمها شامل شکست شیب، شکست فونداسیون، شکست رگاب و شکست لبریز هستند.

۴

فصل چهارم روش‌های تحلیل ریسک

روش‌های تحلیل ریسک

تحلیل و ارزیابی ریسک همانند سایر روش‌های پیشرفته در تحلیل ایمنی سدها، بعد از شکست سد تِتون^۱ در ژانویه سال ۱۹۷۶ در آمریکا، آغاز شد. از آن پس، فعالیت‌های گسترده‌ای در زمینه مطالعه بر روی سدها و جریان‌های خروجی ناشی از شکست سدها^۲ صورت گرفت. با وجود اینکه مطالعات تحلیل ریسک مدت کوتاهی پس از شکست سد تِتون آغاز شد، اما باید اشاره کرد که مهم‌ترین فعالیت در این زمینه به اواسط دهه ۱۹۹۰ و مطالعات دفتر بازسازی آمریکا^۳ برمی‌گردد [۵۵]. در حال حاضر، نیاز به افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان در سدها بیش از گذشته وجود دارد. مناسب‌ترین روش برای نیل به این هدف، بررسی طراحی سدها، ساختار سد، نحوه عملکرد و پایش آنها از طریق تحلیل ریسک شکست سد است. در مبحث سدها و ایمنی آنها، شناسایی و تحلیل عوامل موثر بر شکست، بررسی زمان و علت وقوع آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لکن نیازمند یک سیستم و مدل دقیق خواهد بود تا تصمیم‌گیرنده از امنیت و پایش سد اطمینان حاصل کرده و یا در صورت نیاز اقدامات لازم برای جلوگیری از وقوع شکست را انجام دهد. از طرف دیگر، ویژگی‌های طراحی و ساختاری سد تنها عوامل تاثیرگذار بر پایداری آن نخواهد بود. همچنین متفاوت بودن عوامل تحلیل ریسک از سدی به سد دیگر از پیچیدگی‌های تحلیل ریسک سدها محسوب می‌شود که شایان توجه است. در این فصل در ابتدا به تعریف ریسک و چگونگی محاسبه آن پرداخته می‌شود، سپس روش‌های تحلیل ریسک معرفی خواهند شد و از میان آنها روش‌هایی که در این پایان‌نامه از آنها استفاده شده است به تفصیل بررسی خواهند شد.

۱.۴ ریسک و انواع روش‌های تحلیل ریسک

برای درک بهتر از تحلیل ریسک، در اولین قدم لازم است مفهوم ریسک مورد بررسی قرار گیرد. واژه ریسک به روش‌های متعددی تعریف شده است اما مفهوم تعاریف همگی در راستای تعیین "احتمال وقوع پدیده‌ای که تبعات منفی دارد [۵۶]" قرار دارد. در واقع ریسک از طریق ترکیب سه

¹ Teton Dam

² Flood from Tailings Dam Failure

³ The Bureau of Reclamation

مفهوم تعریف می‌شود: چه حوادثی رخ خواهند داد که اخلاص در عملکرد و یا شکست سیستم را موجب می‌شوند؟، حوادث پیش بینی شده با چه احتمالی رخ خواهند داد؟ و در صورت وقوع حوادث، هر یک با چه شدتی به وقوع خواهند پیوست و تبعات ناشی از آن، چه چیز خواهد بود؟ [۳۴]

در زیر به تعریف برخی از واژه‌های مرتبط با ریسک که در این پایان نامه از آن استفاده شده است پرداخته می‌شود.

ریسک کل^۱: مجموع ریسک شامل احتمال وقوع همه وقایعی است که باعث خروج آب و مواد باطله از سد می‌شود (فارق از اینکه آیا سد شکسته می‌شود یا خیر) و میزان تبعات ناشی از آن که مطابق فرمول (۱-۴) محاسبه می‌شود [۵۳].

$$R_T = \sum p(l) \cdot [p(f/l) \cdot C(l, f) + p(nf/l) \cdot C(l, nf)] \quad (1.4)$$

که در آن $p(l)$ احتمال وقوع رخداد l ، $p(f/l)$ احتمال شکست به دلیل رخداد l ، $C(l, f)$ تبعات ناشی از رخداد l در صورت شکست، $p(nf/l)$ احتمال وقوع رخدادی است که منجر به شکست نمی‌شود و $C(l, nf)$ تبعات ناشی از وقوع آن است.

ریسک شکست^۲: ریسک شکست، بخشی از ریسک کل است و شامل احتمال وقوع پدیدای است که شکست سد را به دنبال دارد و از فرمول (۲-۴) محاسبه می‌شود [۵۳]:

$$R_f = \sum p(l) p(f/l) \cdot C(l, f) \quad (2.4)$$

به‌طور کلی می‌توان روش‌های تحلیل ریسک را بر حسب سطح مدل‌سازی آنها از سیستم، که شامل مدل‌سازی با استفاده از بارش فکری^۳ تا مدل‌سازی ریاضی است، به سه گروه اصلی روش‌های تحلیل ریسک ساده^۴، روش‌های تحلیل ریسک استاندارد^۵ و روش‌های تحلیل ریسک بر اساس مدل‌سازی^۶ تقسیم بندی نمود که تعریف هر یک از این روش‌های نام برده در جدول ۱-۴ آمده است [۵۷].

¹ Total Risk

² Risk of Failure

³ Brain Storming

⁴ Simplified Risk Analysis

⁵ Standard Risk Analysis

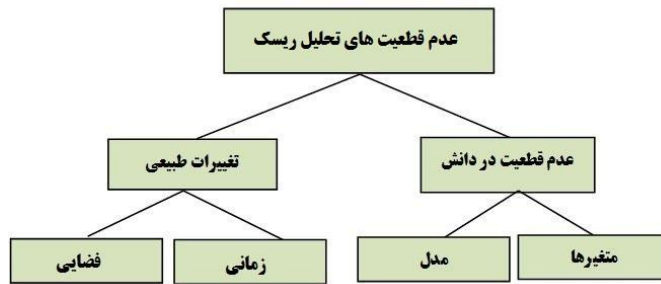
⁶ Model-based Risk Analysis

جدول ۱.۴ دسته بندی اصلی روش‌های ریسک [۵۷]

تعریف روش	نوع روش تحلیل ریسک	دسته بندی اصلی
تحلیل ریسک به صورت غیر رسمی از طریق روش بارش فکری و بحث و گفت و گوی گروهی صورت می‌گیرد و برای بیان ریسک از واژه‌هایی نظیر کم، زیاد و متوسط استفاده می‌شود.	کیفی	روش‌های تحلیل ریسک ساده
این روش تحلیل ریسک تا حدودی از ریاضیات برای تحلیل و از ارقام برای بیان ریسک استفاده می‌شود. ماتریس ریسک برای بیان نتایج حاصل از این روش استفاده می‌شود. از روش‌هایی که در این دسته از تحلیل ریسک قرار دارند.	کیفی یا کمی	روش‌های تحلیل ریسک استاندارد
روش‌های تحلیل ریسک بر اساس مدل سازی در این دسته جای دارند. در این گروه روش‌های درخت رخداد ^۱ و درخت خطا جای دارند.	کمی و پارامتری	روش‌های تحلیل ریسک بر اساس مدل سازی

عدم قطعیت^۲ در تحلیل: فرآیند تحلیل ریسک شامل عدم قطعیت‌هایی است که بر فهم و تفسیر روی مدل احتمال رخدادها و نتایج آن تاثیر گذار است. واژه عدم قطعیت به طور کلی به دو دسته از مفاهیم اشاره دارد: متغیرهای طبیعی و عدم قطعیت‌های مفهومی. شکل ۴-۱ طبقه بندی عدم قطعیت در تحلیل ریسک را نشان می‌دهد. عدم قطعیت‌های طبیعی، به متغیرهای تصادفی مربوط به ماهیت پدیده‌ها اشاره دارد که بسته به زمان وقوع و یا مکان آنها می‌تواند متفاوت باشد. گرچه در این دسته با افزایش تعداد داده‌ها، از عدم قطعیت کاسته می‌شود اما حذف آن اجتناب ناپذیر است. عدم قطعیت در دانش مربوط به میزان اطلاعات و دانش ما در مورد پدیده مورد مطالعه و فهم و تفسیر از داده‌ها است. این عدم قطعیت در مدل سازی مربوط به این است که تا چه میزان پارامترهای موثر در تحلیل ریسک سیستم در نظر گرفته شده است و آیا مدل کالیبره شده است؟ و خطای تخمین در محاسبه پارامترهای مدل چقدر است؟ [۵۸]

^۱ Event Tree Analysis (ETA)^۲ Uncertainty

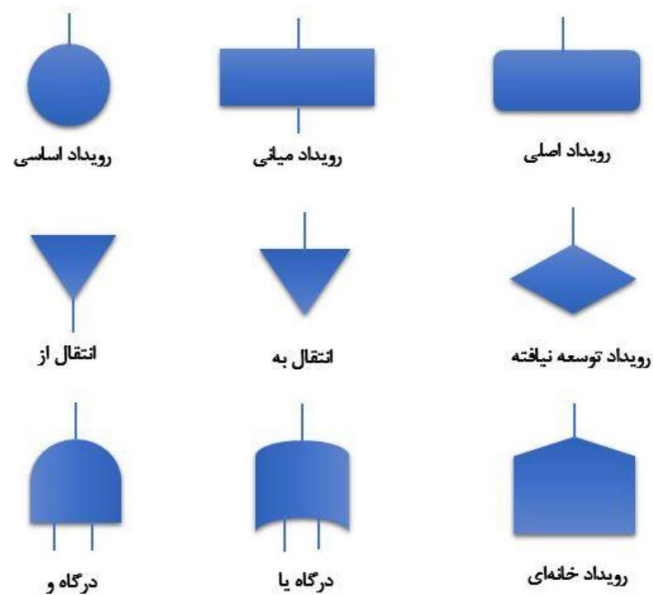


شکل ۱.۴ طبقه بندی عدم قطعیت در تحلیل ریسک [۵۸]

۲.۴ درخت خطا

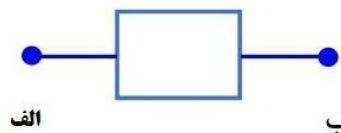
درخت خطا برای اولین بار در موسسه تلفن بل^۱ در سال ۱۹۶۲ ابداع شد. بعد از آن این روش هم به صورت کیفی و هم بصورت کمی مورد استفاده قرار گرفت امروزه این روش، به عنوان یکی از روش‌های تحلیل ریسک با قابلیت اطمینان بالا تلقی می‌شود. درخت خطا نمایشی گرافیکی از کلیه علل منطقی است که می‌تواند هر یک به تنهایی و یا به صورت ترکیبی باعث رخ دادن یک رویداد ناخواسته شود [۵۷، ۵۹]. این روش نشان دهنده یک نمودار منطقی است که ارتباط بین شکست سیستم توسط رخدادها نامطلوب را نشان می‌دهد. رخداد نامطلوب به عنوان رویداد مورد بررسی، در بالای درخت خطا قرار می‌گیرد و سایر اجزای شکست سیستم به عنوان رخدادها پایه و اصلی درخت هستند. درخت خطا از نمادهایی تشکیل شده است که رابطه بین رخداد اصلی سیستم و سایر اجزای شکست را نشان می‌دهد. این نمادهای گرافیکی دریچه‌های منطقی نام دارند. خروجی دریچه‌های منطقی از طریق اجزای ورودی تعیین می‌شود. نمادهای مهم و استاندارد مورد استفاده در تحلیل ریسک به روش درخت خطا در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است [۵۷]

¹ Bell



شکل ۲.۴ نمادهای مورد استفاده در درخت خطا [۵۷]

درخت خطا که بین "و" و "یا" مقایسه می‌کند می‌تواند توسط بلوک دیاگرام نمایش داده شود. بلوک دیاگرام یک نمایش منطقی است که توانایی عملکردی سیستم را نشان می‌دهد. شکل ۳-۴، رابطه پارامترهای عملکرد دیاگرام بلوکی را نشان می‌دهد



شکل ۳.۴ پارامترهای عملکرد دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان [۵۷]

اگر بین الف و ب ارتباط برقرار باشد به این معنی است که عملکرد آن (شکست) بر اساس معیارهایی است که برای آن روش بررسی مشخص، تعیین شده است. نحوه کار درخت خطا به این صورت است که رخداد بالا، نقطه شروع در تحلیل است. بعد از آن رخدادها شکست محتمل قرار دارند. که می‌توانند مستقیماً شکست رخداد بالا را باعث شوند. این رخدادها توسط درگاه‌های منطقی به رخداد اولیه متصل می‌شوند. سپس به بررسی پی در پی سایر اجزا پرداخته می‌شود. این بررسی به صورت استقرایی یا قیاسی است و همواره به این سوال پاسخ می‌دهد که چگونه این رخداد حادث می‌شود؟ و علل وقوع این حادثه چیست؟ این فرآیند زمانی تمام می‌شود که تحلیل ریسک به درجه مناسبی از

بررسی جزئیات یا همان رویدادهای اساسی^۱ رسیده باشد. درخت خطا اطلاعات مفیدی در مورد اینکه چه ترکیبی از وقایع منجر به وقوع رخداد نامطلوب می‌شود، در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد که به این ترکیب مجموعه برش^۲ می‌گویند. مجموعه برش یک مجموعه از رخداد است که منجر به وقوع رخداد بالا می‌شود. کمینه ترین مجموعه برش، آن دسته از وقایعی است که برای وقوع رخداد بالا لازم است. به تعداد رخدادهایی که در یک مجموعه برش قرار دارد، ترتیب مجموعه برش گفته می‌شود. برای محاسبه احتمال شکست، احتمال هر رخداد را از پایین با توجه به قانون "و" و "یا" محاسبه می‌شود [۵۷، ۵۹]. در درخت خطا، مجموعه برشی با کمترین تعداد رویداد اساسی را مجموعه برشی حداقل^۳ می‌نامند. از مهمترین اقدام در تحلیلی ریسک به روش درخت خطا، تعیین مجموعه برشی حداقل است. تعیین مجموعه برشهای حداقل، توسط روش‌های جبر بول^۴ روش ماتریسی^۵، رسم نمودار دودویی^۶ و روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان^۷ محاسبه می‌شود.

۳.۴ شبکه بیزین

پیش بینی احتمال شکست به دلیل پیچیدگی پارامترهای موثر در آن و نیز عدم قطعیت آنها کار دشواری است. همچنین معمولاً در شکست سد تنها یک پارامتر موثر نبوده و عوامل مختلف بریکدیگر موثر هستند. توسط روش شبکه‌های بیزین می‌توان روابط متقابل پارامترهای موثر در شکست را مورد بررسی قرار داد. شبکه‌های بیزین از رخدادها (گره‌ها) و پیکان‌ها تشکیل شده است. کمان‌ها ارتباط و وابستگی گره‌ها را به یکدیگر نشان می‌دهد. هر گره می‌تواند در گروه‌های متعددی باشد. تعداد این گروه‌ها توسط تحلیل کننده ریسک تعیین می‌شود. در تحلیل ریسک کمی، باید احتمال گره‌ها با توجه به وضعیتی که در گروه دارند، مشخص باشد. احتمال‌ها می‌تواند بر اساس بحث مستقیم یا با استفاده از روش خاص دیگری محاسبه شود. شکل ۴-۴ مثالی از عملکرد یک شبکه بیزین را نشان می‌دهد [۵۷].

¹ Basic Events

² Cut Set

Minmal

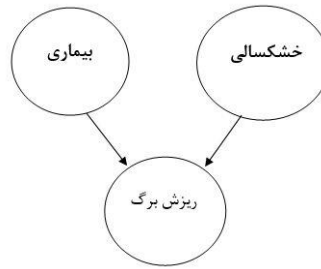
³ Cut Set

⁴ Boolean Algebra

⁵ Matrix Method

⁶ BDD

⁷ Reliable Block



شکل ۴.۴ مثالی از شبکه بی‌زین [۵۷]

۴.۴ محاسبه احتمال شکست و روش تئوری عدم اطمینان ساختاری

در ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم، مهمترین مسئله محاسبه احتمال شکست سیستم است. به طور کلی هر اتفاقی که به تبع آن سیستم متحمل هزینه گردد و یا بر محیط زیست یا انسان اثر گذار باشد، مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان یک واقعه شکست^۱ محسوب می‌شود. تحلیل قابلیت اطمینان یک روش محاسبه احتمال شکست است که از طریق انتگرال چندگانه از تابع توزیع احتمال پارامترها، محاسبه می‌شود. رخداد شکست به شکل یک تابع حالت حدی^۲ و مطابق رابطه ۳-۴ تعریف می‌شود [۶۰].

$$F = \{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0\} \quad (۳.۴)$$

که در آن اعضای بردار x نشان دهنده متغیر تصادفی X هستند و تمامی عدم قطعیت‌های احتمال شکست^۳ را شامل می‌شوند. بنابراین مطابق رابطه ۳-۴، F شامل مقادیری است که در آن $g(x)$ کوچکتر و یا مساوی صفر است. احتمال شکست P_F توسط رابطه ۴-۴ محاسبه می‌شود.

$$P_F = \int \dots \int_{g(x) \leq 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (۴.۴)$$

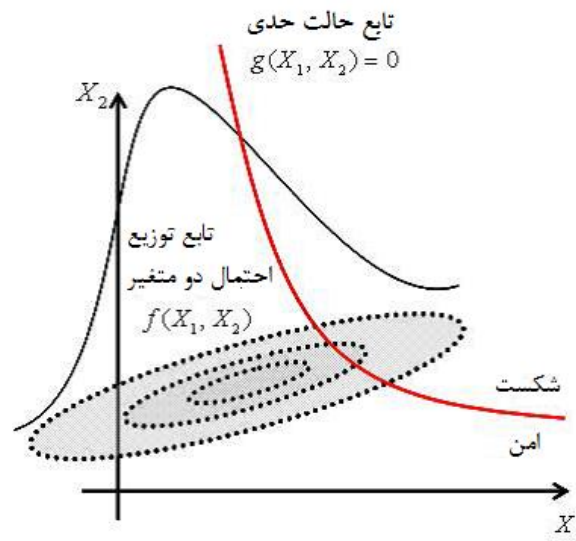
که در آن $f_X(X)$ تابع توزیع احتمال^۴ متغیر تصادفی X است. شکل ۴-۵ احتمال شکست، تابع حالت حدی، ناحیه امن و ناحیه شکست را در یک فضای دو بعدی نشان می‌دهد [۶۱، ۶۲].

¹ Failure Events

² Limit State Function

³ Probability of Failure

⁴ Probability Density Function(PDF)



شکل ۵.۴ احتمال شکست، تابع محدود، ناحیه امن و ناحیه شکست را در یک فضای دو بعدی

[۶۲]

روش‌های متعددی از جمله روش شبیه ساز مونت کارلو برای حل رابطه ۴-۴ معرفی شده است. ثابت می‌شود که برای یک تابع حالت حدی خطی و متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال، احتمال شکست مطابق زیر محاسبه می‌شود.

تابع $M=g(x)$ تابع حاشیه اطمینان معرفی می‌شود که برابر حاصل تفریق نیروهای مقاوم و مخرب است. رابطه ۵-۴ تابع $M=g(x)$ را نشان می‌دهد.

$$g(x) = R - Q \quad (۵.۴)$$

که در آن R نیروهای مقاوم و Q نیروهای مخرب است. بنابراین احتمال شکست مطابق فرمول ۶-۴ محاسبه می‌شود [۶۰]:

$$P_F = p(g(X) \leq 0) = p(M \leq 0) \quad (۶.۴)$$

با توجه به فرض که خطی بودن تابع F و نرمال بودن تابع توزیع متغیرهای تصادفی احتمال شکست برابر است با رابطه ۷-۴:

$$P_F = 1 - \Phi(\beta) \quad (۷.۴)$$

که در آن، β شاخص قابلیت اطمینان^۱ است و مطابق رابطه ۴-۸ محاسبه می‌شود [۶۳].

$$\beta = \frac{\mu_x - 1}{\sigma_x} \quad (۸.۴)$$

در محاسبه میانگین و انحراف معیار فرمول ۴-۸ می‌توان از تابع توزیع احتمال فاکتور ایمنی استفاده کرد.

به طور کلی مراحل مطالعه سیستم از طریق روش تئوری عدم اطمینان ساختاری به شرح زیر است:

۱. انتخاب سطح قابلیت اطمینان مورد نظر.
۲. تعیین مکانیزم و حالت‌های اصلی شکست سیستم.
۳. تعیین زنجیره شکست سیستم از طریق تعریف حلقه‌های شکست (حالت‌هایی از شکست که منجر به شکست نهایی سیستم می‌شود)
۴. تعریف تابع شکست (تابع محدود حالت) برای هر یک از حالت‌های شکست
۵. تعیین متغیرهای تصادفی^۲ و پارامترهای تعیین کننده در تابع شکست
۶. پیش بینی قابلیت اطمینان هر حالت شکست
۷. تغییر پارامترها برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم
۸. پیش بینی مجدد قابلیت اطمینان هر حالت شکست

در تعیین متغیرهای تصادفی و قابلیت اطمینان سیستم، چهار نوع عدم قطعیت وجود دارد:

عدم قطعیت فیزیکی: این عدم قطعیت معرف ماهیت متغیر است.

عدم قطعیت در اندازه‌گیری: عدم قطعیت توسط روش‌های اندازه‌گیری ایجاد می‌شود.

عدم قطعیت آماری: این عدم قطعیت به دلیل محدودیت در نمونه‌گیری است [۶۱]

^۱ Reliability Index

^۲ Stochastic Variables

عدم قطعیت مدل: این عدم قطعیت مربوط به مناسب نبودن مدل و تابع توزیع احتمال استفاده شده برای متغیرها در مدل است. چراکه بدست آوردن تابع توزیع احتمال متغیر تقریباً امکان‌پذیر نیست و اگر تابع توزیع احتمال در دسترس باشد، محاسبه انتگرال چندگانه دشوار خواهد بود [۶۰، ۶۱].

به‌طور کلی در حل مسئله قابلیت اطمینان و کاهش عدم قطعیت‌های اشاره شده در بالا، سه سطح از حل مدل وجود دارد:

روش سطح ۱: در این روش، مقادیر ثابتی از پارامتر، در تعیین قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

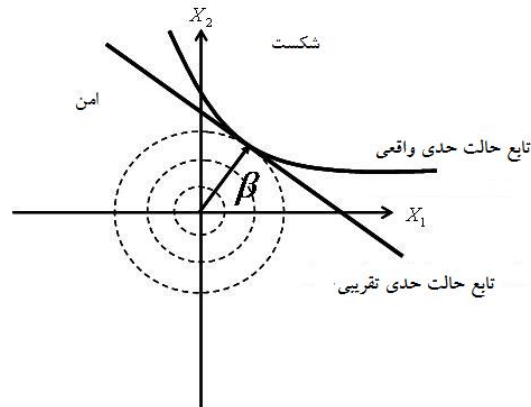
روش سطح ۲: در این روش، از میانگین و انحراف معیار پارامترها در تعیین قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

روش سطح ۳: در این روش، از تابع توزیع احتمال پارامترها در تعیین قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان ساختاری در سطوح ۲ و ۳ وجود دارد که از جمله آن می‌توان به روش‌های شبیه‌سازی اشاره کرد. روش‌های شبیه‌سازی با استفاده از انتخاب داده‌های تصادفی احتمال شکست را محاسبه می‌کنند و در انتخاب داده‌های تصادفی با هم متفاوت هستند. در این روش‌ها، قابلیت اطمینان به دو روش که در آن تابع حالت حدی مرتبه اول و مرتبه دوم تخمین زده می‌شود، به محاسبه احتمال شکست می‌پردازند. این دو نوع روش در تخمین تابع توزیع احتمال تابع حالت حدی و در نتیجه نحوه محاسبه شاخص قابلیت اطمینان (β) تفاوت دارند.

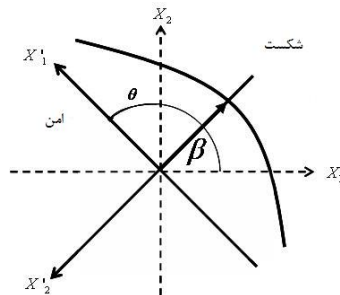
- روش قابلیت اطمینان مرتبه اول^۱: در این روش تابع محدود حالت به شکل خطی تخمین زده می‌شود و قابلیت اطمینان در سطح ۲ و ۳ محاسبه می‌شود. شکل ۴-۶ تابع حالت حدی در تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه اول را نشان می‌دهد [۶۰، ۶۱، ۶۲].

¹ First Order Reliability Methods (FORM)



شکل ۶.۴ تابع محدود حالت در تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه اول [۶۲]

- تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه دوم^۱: در این روش با استفاده از تئوری تقریب مجانب^۲ یک تابع درجه دوم به عنوان تابع شکست تعیین می‌شود و احتمال شکست در سطح مرتبه دوم تخمین زده می‌شود. در این روش شاخص قابلیت اطمینان (β) همانند روش درجه اول محاسبه می‌شود. شکل ۴-۷ تابع محدود حالت در تکنیک قابلیت اطمینان درجه دوم را نشان می‌دهد [۶۲، ۶۰]



شکل ۷.۴ تابع محدود حالت در تکنیک قابلیت اطمینان مرتبه دوم [۶۰]

- در محاسبه احتمال شکست در تئوری قابلیت اطمینان دو روش شبیه ساز مونت کارلو و روش برآورد نقطه‌ای توضیح داده می‌شوند.

¹ Second Order Reliability Methods (SORM)

² Asymptotic Approximations

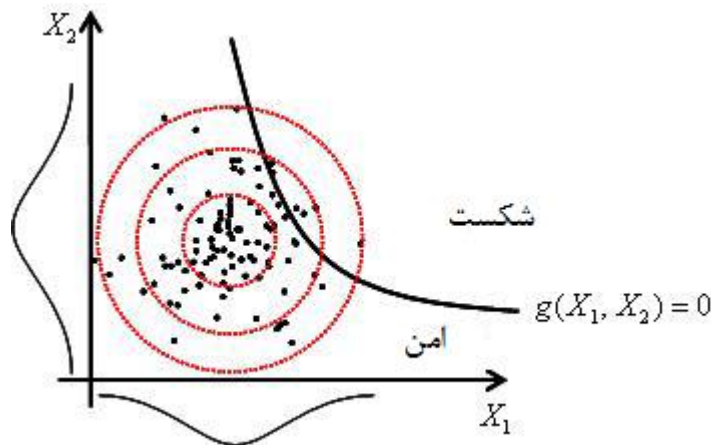
۱.۴.۴ روش شبیه ساز مونت کارلو

در روش شبیه سازی مونت کارلو، هدف اصلی بررسی و یادگیری در مورد عملکرد سیستم توسط شبیه سازی آن توسط متغیرهای تصادفی است. در روش قابلیت اطمینان با استفاده از شبیه ساز مونت کارلو، تابع توزیع احتمال شکست از طریق انتخاب متغیرهای تصادفی بر اساس تابع توزیع احتمال آنها محاسبه می‌شود. احتمال شکست در این روش شبیه ساز مونت کارلو عبارت است از تعداد احتمال شکست منفی به کل تعداد شبیه سازی صورت گرفته که مطابق فرمول ۴-۹ محاسبه می‌شود:

$$p_f = \int \dots \int I[g(x) < 0] f_x(x) dx \quad (۹.۴)$$

$$\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i) < 0] \approx \frac{n_f}{N}$$

که در آن، $I[0]$ عملگر مشخص کننده است، در صورتی که برابر ۱ باشد $[0]$ درست و در صورتی که برابر صفر باشد $[0]$ غلط است. [۶۰، ۶۲]



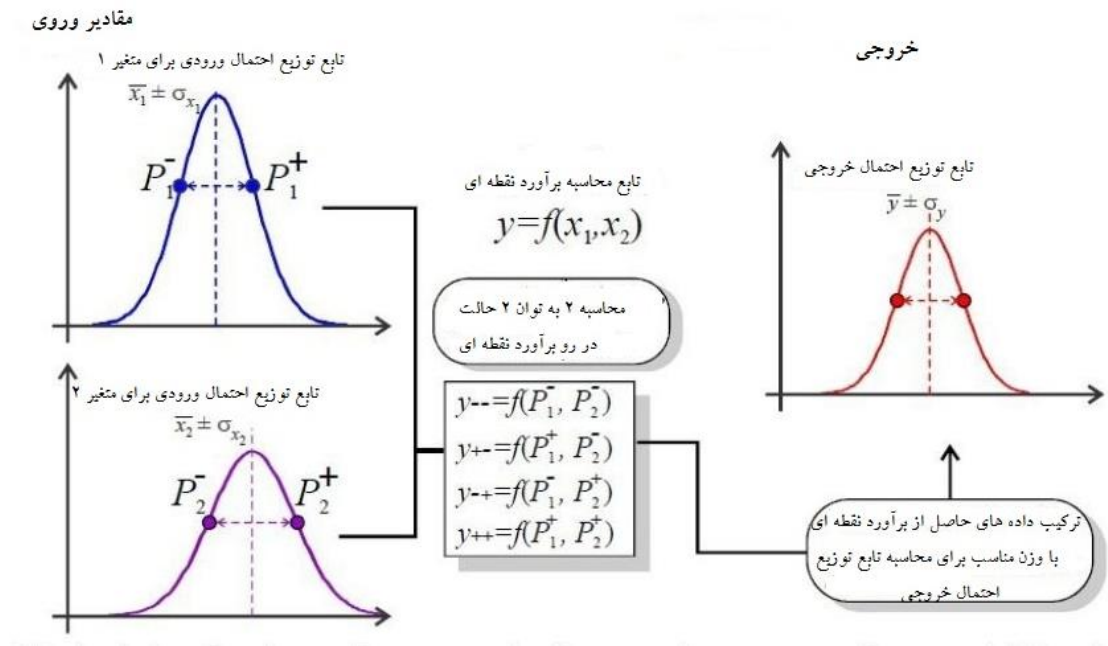
شکل ۸.۴ انتخاب متغیر تصادفی و احتمال شکست در شبیه ساز مونت کارلو [۶۲]

با توجه به شکل ۴-۸ و با توجه به اینکه از تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد و با علم به اینکه در تابع توزیع احتمال نرمال، انتخاب متغیرهای تصادفی نزدیک به میانگین احتمال بیشتری دارد، لذا انتخاب روش مناسب انتخاب متغیرهای تصادفی برای کاهش خطای تخمین اهمیت خواهد داشت. در شبیه ساز مونت کارلو روش‌های متعددی برای انتخاب

متغیرهای تصادفی^۱ وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به تولیدکننده اعداد یکنواخت (انتخاب داده تصادفی از تابع توزیع یکنواخت)، انتخاب متغیر تصادفی توسط روش انتقال معکوس^۲ اشاره کرد. [۶۰]

۲.۴.۴ روش برآورد نقطه‌ای^۳

در روش برآورد نقطه‌ای (PEM)، مقدار ارزش هر پارامتر در مدل توسط جمع و تفریق از آن پارامتر به اندازه یک انحراف معیار جایگزین می‌شود. اگر فرض شود که داده‌ها از تابع توزیع احتمال نرمال پیروی می‌کنند، کلیه حالاتی که یک پارامتر وارد مدل می‌شود به شرح شکل ۹-۴ است [۶۴، ۶۵]. گرنل^۴ برای SORM یک روش خطی سازی توسط سری تیلور برای تابع محدود حالت معرفی کرد که در این گروه قرار می‌گیرد [۶۶].



شکل ۹.۴ روش برآورد نقطه‌ای برای دو متغیر تصادفی [۶۶]

¹ Sampling Random Numbers

² Inverse Transform Method

³ Point Estimate Method (PEM)

⁴ Cornell

۵.۴ وزن دهی عوامل شکست با استفاده از روش رأی گیری اولیته

در سیستم وزن دهی اولیته دهی (PVS)، هر رأی دهنده، m کاندیدا را از میان n کاندیدا ($n \geq m$) انتخاب کرده و آنها را به ترتیب از اولیته بالاتر تا پایین‌تر مرتب می‌کند. هر کاندیدا ممکن است تعدادی رأی را در هر جایگاه رتبه‌ای بدست آورد. نمره کل هر کاندیدا برابر است با مجموع وزن آرایه‌ای که او در جایگاه‌های رتبه‌ای مختلف بدست آورده است [۶۷] که طبق رابطه ۴-۱۰ تعریف می‌شود.

$$z_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j \quad i = 1, \dots, n. \quad (10.4)$$

w_j میزان اهمیت، عملکرد یا به عبارتی وزن جایگاه رتبه‌ای j ($j = 1, \dots, m$) و v_{ij} تعداد آرایه‌ای است که کاندیدای i در جایگاه رتبه‌ای j بدست آورده است. ساختار محاسبات در PVS، در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲.۴ ساختار PVS [۶۷]

کاندیدا	جایگاه رتبه ای					امتیاز کل
	p_1	...	p_j	...	p_m	
	وزن جایگاه رتبه ای					
	w_1	...	w_j	...	w_m	
تعداد رأی هر کاندیدا در هر جایگاه رتبه ای						
$candidate_1$	v_{11}	...	v_{1j}	...	v_{1m}	$z_1 = \sum_{j=1}^m v_{1j} w_j$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$candidate_i$	v_{i1}	...	v_{ij}	...	v_{im}	$z_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$candidate_n$	v_{n1}	...	v_{nj}	...	v_{nm}	$z_n = \sum_{j=1}^m v_{nj} w_j$

در این ساختار، برنده کسی خواهد بود که بیشترین نمره کل را بدست آورد. بنابراین واضح است که مطلب کلیدی در تجمیع آرا در PVS، طریقه محاسبه اوزان جایگاه‌های رتبه‌ای خواهد بود (یعنی

w_j). روش برودا-کندال^۱ (BK) [۶۷]، روش مشهور در تعیین اوزان به شمار می‌رود. این روش، اوزان $1, 2, \dots, m-1, m$ را به m جایگاه رتبه‌ای به ترتیب از بیشترین اهمیت تا کمترین، اختصاص می‌دهد. در این روش، اوزان به سادگی تولید می‌شوند، اما فرآیند تعیین آنها کاملاً ذهنی است. برای کاهش اعمال ذهنیت، کوک^۲ و کرس^۳ و [۶۸]، کاربرد DEA را برای تولید اوزان در PVS ارائه کردند که کاندیداها در این رویکرد به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری^۴ (DMUs) در نظر گرفته می‌شدند. DEA روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است و ابتدا آن را چارنس^۵ و همکاران در سال ۱۹۷۸ ارائه نمودند [۶۹]. این روش برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری که وظایف یکسانی انجام می‌دهند به کار می‌رود. مدل پیشنهادی کوک و کرس وزن‌هایی را برای هر کاندیدا محاسبه می‌کرد که نمره کل او را بیشینه کند. بنابراین مدل برای هر کاندیدا یکبار حل شده و نمره کل برای او محاسبه می‌شد و در نهایت کاندیدایی که بیشترین نمره کل از یک را بدست می‌آورد به عنوان گزینه کارا معرفی می‌شد. مدل پیشنهادی آنها در رابطه ۴-۱۱ نشان داده شده است.

$$\text{Maximize } z_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j \quad (11.4)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j \leq 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$w_j - w_{j+1} \geq d(j, \varepsilon) \quad j = 1, \dots, m-1$$

$$w_m \geq d(m, \varepsilon)$$

که $d(j, \varepsilon)$ در این مدل عبارتست از تابع شدت افتراق^۶. پیداست که رویکرد بر پایه DEA که در بالا بیان شد. آنها همچنین در تحقیق خود برای محدود کردن گزینه برنده، کمینه کردن اختلاف میان اوزان جایگاه‌های مجاور را پیشنهاد کردند. گرین^۷ و همکاران [۷۰] روش ارزیابی کارایی متقاطع^۸ در DEA را به منظور انتخاب تنها یک کاندید برنده، مورد استفاده قرار دادند. نوقچی^۹ و همکاران [۷۱] از همان تکنیک استفاده نمودند؛ اما آنها یک محدودیت مرتب سازی قوی برای اوزان پیشنهاد کردند که مدل پیشنهادی آنها در زیر نشان داده شده است. مدل پیشنهادی آنها در رابطه ۴-۱۲ نشان داده شده است.

¹ Broda-Kendall

⁴ Decision Making Units

⁷ Green

² Cook

⁵ Charnes

⁸ Cross-Efficiency Evaluation Technique

³ Kress

⁶ Discrimination Intensity Function

⁹ Noguchi

پیداست که رویکرد بر پایه DEA که در بالا بیان شد، نیازی به تعیین اوزان جایگاه‌های رتبه‌ای به صورت ذهنی ندارد و این خود یک حسن خواهد بود.

$$\text{Maximize } z_i = \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j \quad (12.4)$$

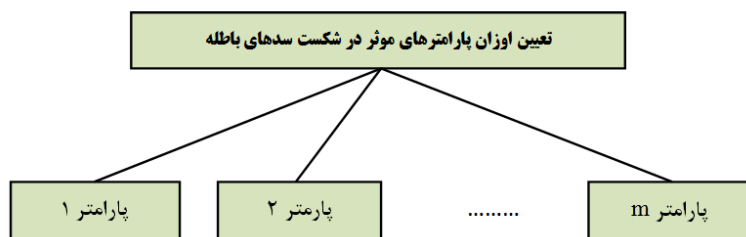
$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^m v_{ij} w_j \leq 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$w_1 \geq 2w_2 \geq \dots \geq mw_m$$

$$w_m \geq \varepsilon = \frac{2}{Nm(m+1)}$$

۱.۵.۴ رویکرد پیشنهادی سیستم رأی‌گیری الویتی سلسله‌مراتبی^۱

در این بخش رویکرد پیشنهادی (HPVS) به صورت جداگانه بر پایه مفاهیم بیان شده در بخش قبل ارائه خواهد شد و پس از پایان معرفی رویکرد، مطالعه موردی برای نشان دادن قابلیت‌های آن، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این رویکرد، تعیین اوزان و اولویت دهی عوامل موثر در شکست سدهای باطله، به صورت یک ساختار سلسله‌مراتبی تصویر می‌شود که در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۰.۴ ساختار سلسله‌مراتبی سیستم رأی‌گیری الویتی

۲.۵.۴ اولویت دهی معیارها بر اساس ضریب اهمیت آن‌ها در شکست سد باطله

در این رویکرد از یک PVS به منظور تعیین وزن هر معیار استفاده شده است. شایان ذکر است که انجام تصمیم‌گیری گروهی در روش‌های ذکر شد، مستلزم تلاش محاسباتی فراوانی خواهد بود،

¹ Hierarchical Preference Voting System (HPVS)

درحالی‌که بوسیله PVS، این کار به سادگی صورت می‌پذیرد. ساختار PVS برای معیارها در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

برای توصیف اهمیت هر معیار در این تحقیق مجموعه‌ای از سطوح اهمیت به عنوان جایگاه‌های رتبه-ای تعریف شده است. $IL_1, \dots, IL_k, \dots, IL_p$ بطوریکه $\{IL_1, \dots, IL_k, \dots, IL_p\}$ بیانگر درجه اهمیت، از بیشتر تا کمتر هستند و p تعداد سطوح اهمیت را نشان می‌دهد. سپس از تصمیم‌گیرندگان خواسته می‌شود تا معیارها را در p سطح اهمیت ارزیابی کنند. v_{jk} تعداد تصمیم‌گیرندگانی است که سطح اهمیت معیار j را، IL_k ارزیابی می‌کنند.

جدول ۳.۴ ساختار PVS برای معیارها

پارامتر	سطح اهمیت					امتیاز کل	وزن
	IL_1	...	IL_k	...	IL_p		
	وزن سطح اهمیت						
	w_1	...	w_k	...	w_p		
	تعداد رأی هر پارامتر در هر جایگاه رتبه‌ای						
F_1	v_{11}	...	v_{1k}	...	v_{1p}	$TF_1 = \sum_{k=1}^p v_{1k} w_k$	W_1
	\vdots		\vdots		\vdots		
F_j	v_{j1}	...	v_{jk}	...	v_{jp}	$TF_j = \sum_{k=1}^p v_{jk} w_k$	W_j
	\vdots		\vdots		\vdots		
F_m	v_{m1}	...	v_{mk}	...	v_{mp}	$TF_m = \sum_{k=1}^p v_{mk} w_k$	W_m

۶.۴ جمع بندی

در ابتدا به تعریف تحلیل ریسک و انواع مختلف روش‌های تحلیل ریسک پرداخته شد. در این پایان نامه بررسی کمی تحلیل ریسک شکست سد باطله به روش تئوری قابلیت اطمینان ساختاری محاسبه و از روش درخت خطا و شبکه بیزین، روش کیفی برای بررسی شکست سدهای باطله استفاده شده است.

۵

فصل پنجم

ارائه مدلی برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله و مدیریت
زیست محیطی آن

ارائه مدلی برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله و مدیریت زیست محیطی آن

در این فصل، با توجه به روش‌های اشاره شده در فصل چهارم و همچنین بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵، مدلی برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله ارائه می‌گردد. در این مدل وزن و عملکرد پارامترهای مؤثر بر شکست سدهای باطله که توسط روش PVS محاسبه شده است، مد نظر قرار گرفته شده است. همچنین از روش فولچی به منظور پیش بینی تبعات ناشی از شکست، استفاده خواهد شد.

۱.۵ تحلیل ریسک شکست سدهای باطله و مشکلات آن

به طور کلی به منظور تحلیل ریسک سدهای باطله به اطلاعات آزمایشگاهی و تجربی نیاز است که از پایش سدها می‌توان اطلاعاتی از تغییر پارامترهای مؤثر در شکست سد به دست آورد. با این وجود، تا زمانی که سد شکسته نشود عامل و مکانیزم شکست سد مشخص نمی‌شود. در برخی موارد نیز تنها یک عامل در شکست سد مؤثر نیست و چندین عامل هم زمان شکست سد را باعث می‌شوند. همچنین زمانی که سد شکسته می‌شود دیگر زمانی برای مطالعه آن و جلوگیری از شکست نخواهد بود. در تحلیل ریسک شکست سدهای باطله علاوه بر مشکلات فوق از آنجایی که مراحل ترفیع سد به یکباره صورت نمی‌پذیرد، و نیز از آنجایی که حجم مواد وارد شده به سد می‌تواند بر اساس عیار و تناژ ماده معدنی در طول عمر معدن تغییر کند، ظرفیت سد از عدم قطعیت برخوردار است و همچنین ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد باطله نظیر ته نشینی و سفتی و افزایش مقاومت برشی نیز از عوامل تأثیرگذار بر پایداری سد است. همچنین، به دلیل واکنش مواد باطله‌ای که وارد سد می‌شود، احتمال تشکیل کانی ثانویه و در نتیجه احتمال فرسایش در نتیجه واکنش‌های شیمیایی، عدم قطعیت را در مدل سازی افزایش داده و تحلیل ریسک شکست سد باطله را از سایر سدهای خاکی متمایز می‌سازد. احتمال افزایش درجه سیالی مواد داخل سد چه در شرایط دینامیک و چه در شرایط استاتیک نیز از نکات تأثیرگذار در تحلیل ریسک خواهد بود. از آنجایی که عوامل مؤثر در شکست سدهای باطله بر

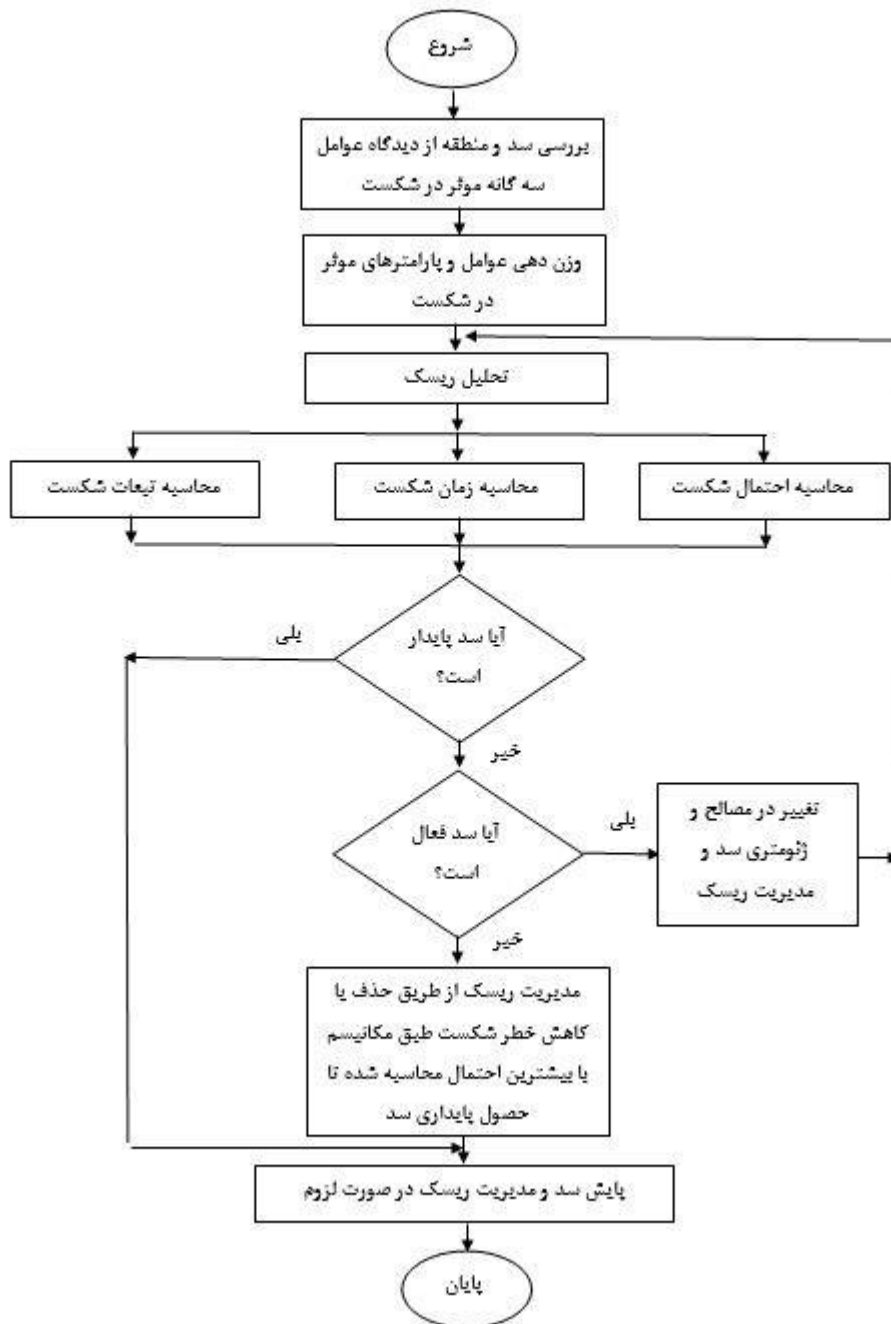
روی هم اثر گذار هستند و نیز هر عامل می‌تواند در چند دسته از مکانیزم شکست قرار گیرد لذا در محاسبه احتمال شکست باید درهم کنش این عوامل را مد نظر قرار داد.

به طور کلی سه دسته از عوامل بر شکست سدهای باطله موثر هستند که عوامل بیرونی، عوامل درونی و ویژگی‌های مواد باطله را شامل می‌شوند. ویژگی‌های بیرونی به آن دسته از عواملی که به محیط و مکانی که سد در آن احداث می‌شود، اطلاق می‌گردد که می‌توان به ویژگی‌های زمین شناسی، شرایط آب و هوای منطقه و جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی اشاره نمود. عوامل درونی تمامی مواردی را شامل خواهد شد که در طراحی و ساخت سد موثر هستند که می‌توان به عواملی نظیر فونداسیون سد، ارتفاع سد، ارتفاع سطح آزاد سد و سر زیر آن اشاره نمود. ویژگی‌های مواد باطله شامل ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن است که بر پایداری سد موثر است. از میان این ویژگی‌ها می‌توان به نرخ ته نشینی و سفتی، پتانسیل افزایش درجه سیالی اشاره کرد که در فصل دو به تفصیل بیان شده است. جدول ۵-۱ سه عوامل موثر (به صورت دسته بندی شده) در شکست سدهای باطله را در نشان می‌دهد.

همان گونه که اشاره شد عوامل متعددی در سه گروه اصلی بر شکست سد باطله موثر هستند. از سوی دیگر اشاره شد که دو دسته عدم قطعیت در تحلیل ریسک شکست سدها موثر است. علاوه بر موارد مشترک در سدهای خاکی، سدهای باطله به دلیل مواردی نظیر ترفیع تدریجی در سطح، نیروی برشی ایجاد شده به دلیل انباشت مواد باطله در پشت سد همگی از پیچیدگی‌های تحلیل ریسک سد باطله است. برای حل مشکلات فوق الگوریتمی حل مسئله تحلیل ریسک شکست سد باطله به شرح شکل ۵-۱ ارائه می‌شود. در این الگوریتم به دلیل اهمیت فاکتورهای موثر در شکست ابتدا به بررسی عوامل اشاره شده در جدول ۵-۱ می‌پردازیم. سپس وزن و عملکرد هر یک از عوامل در شکست سد مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس در تحلیل ریسک شکست سد به محاسبه احتمال شکست سد بر اساس مکانیزم شکست سد که در فصل سه به آن اشاره شد می‌پردازیم. محاسبه احتمال شکست توسط هر مکانیزم در ادامه این فصل به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. بعد از آن محاسبه زمان شکست (یا زمانی قابلیت اطمینان سیستم) باید مورد محاسبه و بررسی قرار گیرد در نهایت به بررسی تبعات ناشی از شکست پرداخته می‌شود. در صورت عدم پایداری سد و نیز بسته به اینکه آیا سد فعال است یا خیر، مدیریت ریسک مناسب برای حذف یا کاهش عوامل شکست انتخاب می‌گردد. پیش بینی زمان شکست و مدیریت ریسک موضوع بحث در این تحقیق نخواهد بود.

جدول ۱.۵ عوامل موثر در شکست سد باطله

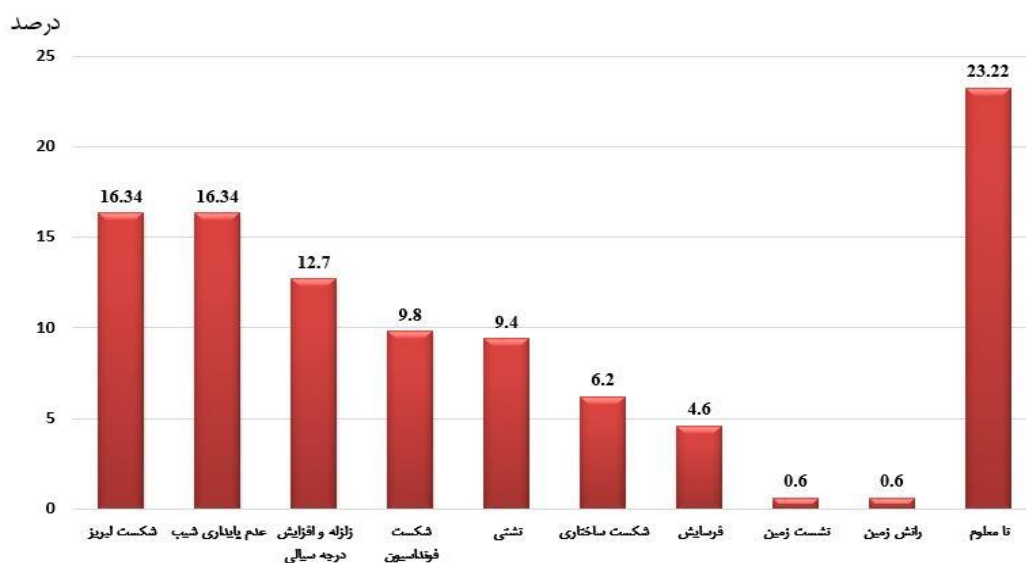
ردیف	عوامل درونی (طراحی سد)	عوامل بیرونی (منطقه‌ای)	ویژگی مواد باطله
۱	فونداسیون سد	لرزه خیزی منطقه	ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد باطله
۲	مواد پرکننده دیواره سد	آب و هوا و شرایط جوی منطقه	نرخ ته نشین شدن مواد باطله
۳	جانمایی سد	شرایط توپوگرافی منطقه	فشار منفذی
۴	طراحی سد	شرایط زمین شناسی منطقه	پتانسیل افزایش درجه سیالی
۵	نشست زمین در اطراف سد	پتانسیل رانش زمین در اطراف سد	میزان آب محتوای مواد باطله
۶	عمر سد	شدت امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار اطراف سد و یا رفت و آمد ماشین آلات سنگین	شیب و نرخ ته نشین شدن مواد باطله در سد در مقایسه با نرخ دریافت مواد باطله
۷	کنترل نشستی و پایش سد	جریان آب‌های سطحی و زیر زمینی	نفوذ پذیری
۸	فرسایش سطحی و داخلی سد	وزش باد	نیروی برشی
۹	ارتفاع سد	عدم قطعیت تناژ و عیار	منحنی دانه بندی
۱۰	سطح آزاد سد	عدم قطعیت تولید	-
۱۱	شیب نامناسب دیواره سد	بارهای وارد بر سد	-
۱۲	طراحی سرریز	-	-



شکل ۱.۵ الگوریتم پیشنهادی در تحلیل ریسک شکست سد باطله

۲.۵ مروری بر سدهای شکسته شده و تبعات آن

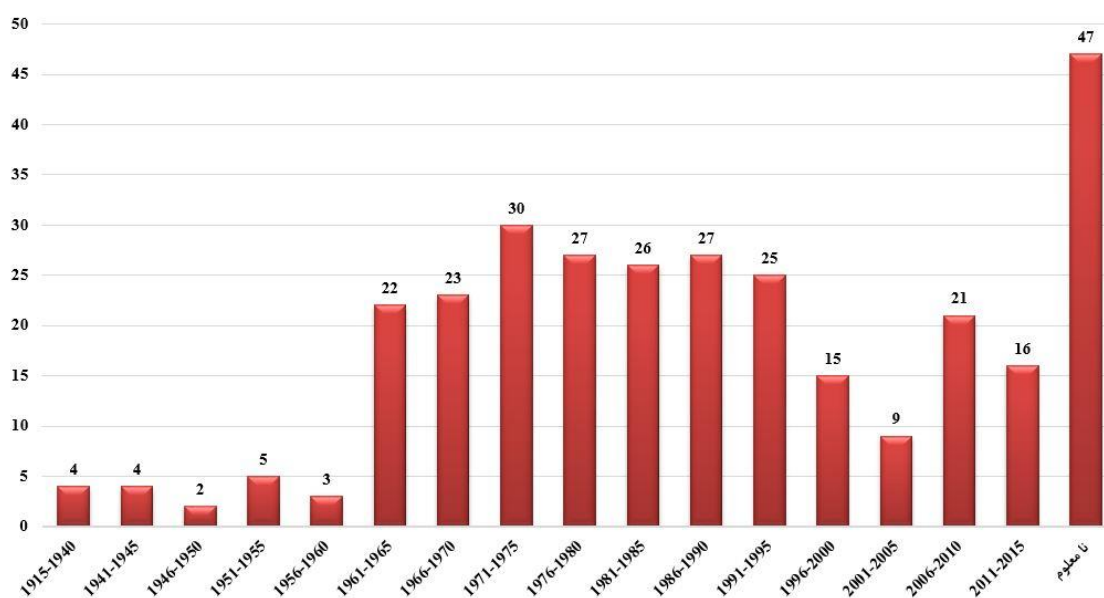
در این پایان نامه، ابتدا برای شناسایی عوامل و مکانیزم‌های شکست سدهای باطله به بررسی ۳۰۶ سد باطله که در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا سال ۲۰۱۵ شکسته شده‌اند، پرداخته شد که اطلاعات حدود ۲۷۰ سد از منابع [۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲] برگرفته شده است. در این بررسی محل معدن، نوع ماده معدنی، زمان شکست، علت و تبعات شکست و ویژگی‌های سد مورد بررسی قرار گرفت. بعضا همه اطلاعات در منابع ذکر شده موجود نبود که برای تکمیل آنها و همچنین برای شناسایی سایر سدهای باطله شکسته شده از منابع متعددی استفاده گردید. در این بررسی مشخص گردید که از بین سدهایی که دلیل شکست آنها مورد مطالعه قرار گرفته است و علت و مکانیزم شکست آن بررسی و گزارش شده است، ۱۶/۳۴ درصد سدها (۵۰ سد) به دلیل شکست لبریز شکسته شده است. علت اصلی شکست به دلیل شکست سرریز بارندگی شدید و طراحی نامناسب سد بوده است. همچنین، ۱۶/۳۴ درصد سدها به دلیل عدم پایداری شیب، ۱۲/۷ درصد در اثر زلزله شدید و افزایش درجه سیالی، ۹/۸ درصد به دلیل شکست فونداسیون، ۹/۴ درصد به دلیل نشتی، ۶/۲ درصد به دلیل شکست ساختاری (به دلایلی متعددی که بعضا گزارش نشده است، ساختار سد به کلی شکسته می‌شود)، ۴/۶ درصد در اثر فرسایش، ۰/۶ درصد به دلیل نشست زمین و ۰/۶ درصد رانش زمین شکسته شده‌اند. دلیل شکست ۲۳/۲۲ درصد سدها گزارش نشده است. شکل ۵-۲ دلایل شکست این سدها را نشان می‌دهد.



شکل ۲.۵ علت شکست ۳۰۶ سد باطله شکسته شده بین سال‌های ۱۹۱۴-۲۰۱۵

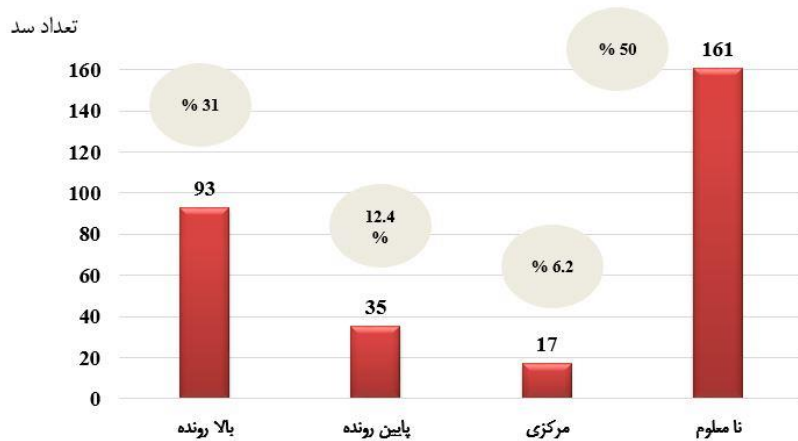
در شکل ۳-۵ تعداد سدهای شکسته شده در هر سال را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، از بین سدهایی که زمان شکست آنها گزارش شده است، ۶۴ درصد سدها بین سال‌های ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۰ رخ داده است. بیشترین شکست سدها بین سال‌های ۱۹۷۱ تا سال ۱۹۷۵ گزارش شده است. و نیز ۱۵/۷ درصد سدها بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ شکسته شده است دلیل افزایش شکست سدهای باطله در این دوره افزایش بی سابقه قیمت مواد معدنی در سال ۲۰۰۰ و افزایش تولید معادن بوده است.

تعداد سد



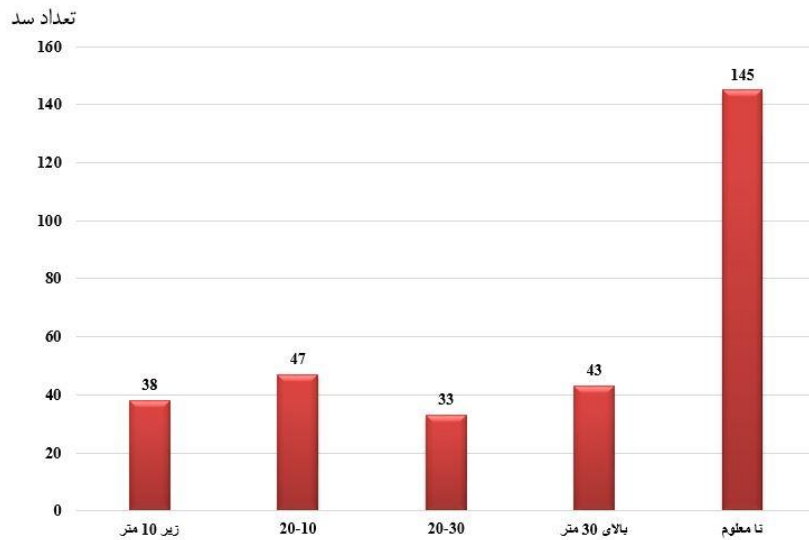
شکل ۳.۵ تعداد شکست سدهای باطله در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵

در میان سدهای شکسته شده‌ای که از طراحی آنها گزارش موجود است، ۳۱ درصد سدها از نوع بالارونده، ۱۲/۴ درصد پایین رونده و حدود ۶/۲ درصد سدها به روش مرکزی طراحی شده بودند. شکل ۴-۵ تعداد سدهای شکسته شده بر اساس نوع طراحی آنها را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که سدهای بالارونده ناپایدارترین نوع طراحی است و با توجه به پراکندگی علت شکست سدها، نتیجه می‌شود که سدهای بالا رونده در مقابل لبریز، پایداری شیب و افزایش درجه سیالی از ایمنی کمتری نسبت به سایر سدها برخوردار هستند.



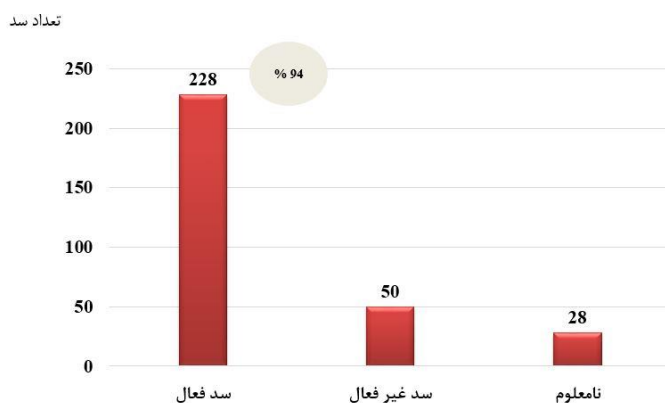
شکل ۴.۵ تعداد سدهای شکسته شده بر اساس نوع طراحی آنها

در بررسی ارتفاع سدها هنگام شکست، مشخص گردید ۱۲/۴۱ درصد سدها در زمان شکست ارتفاعی کمتر از ۱۰ متر داشته‌اند. همچنین ۱۵/۳۶ درصد سدها ارتفاع بین ۱۰ تا ۲۰ متر، ۱۰/۷۸ درصد بین ۲۰ تا ۳۰ متر و ۱۴ درصد آنها ارتفاع بیش از ۳۰ متر در زمان شکست داشته‌اند که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵.۵ ارتفاع سدهای باطله هنگام شکست

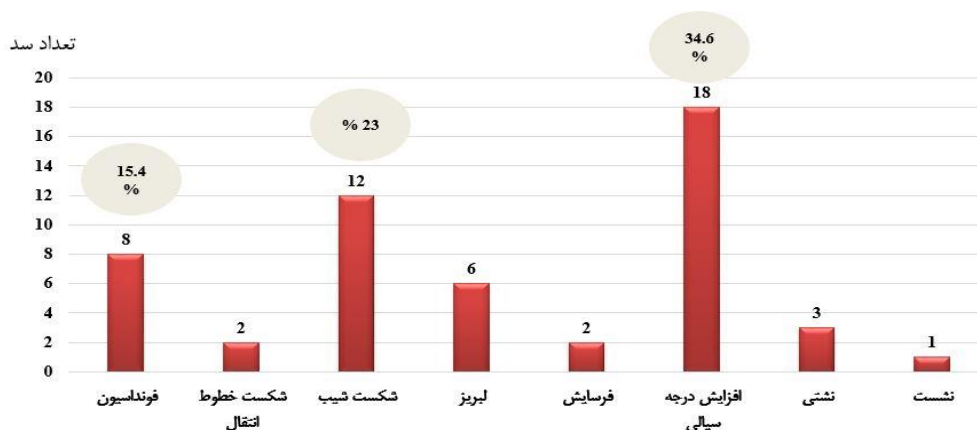
در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود که ۹۴ درصد سدهای باطله شکسته شده در زمان شکست فعال بوده‌اند. علت این امر دلایلی نظیر افزایش تدریجی ارتفاع، فشار منفذی و تنش برششی ناشی از مواد باطله باشد.



شکل ۶.۵ تعداد سدهای شکسته شده بر اساس وضعیت فعالیت در زمان شکست

با توجه به اینکه موضوع اصلی این پایان نامه در مورد شکست سدهای باطله معادن مس است، دلایل شکست این معادن به تحلیل گذاشته شد. بر این اساس، از بین سدهایی که نوع ماده معدنی آنها گزارش شده است، شکست ۵۲ (حدود ۱۷ درصد) سد از ۳۰۶، مربوط به معادن مس بوده است. در این میان، ۳۴/۶ درصد این سدها به دلیل افزایش درجه سیالی، ۲۳ درصد به دلیل شکست شیب و ۱۵/۴ درصد به دلیل شکست فونداسیون شکسته شده اند. شکل ۷-۵ دلایل شکست معادن مس را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که تا کنون گزارش شکست دو سد باطله در ایران گزارش شده است. که اولین آن در سال ۱۳۸۵ در سد باطله معدن مس مزرعه رخ داد. علت شکست سد باطله معدن مس مزرعه بارندگی شدید و شکست لبریز گزارش شده است. همچنین سد معدن سنگ آهن گل‌گهر نیز در سال ۱۳۹۴ در حین عملیات ترفیع شکسته شد. در هر دو مورد گزارش‌های کاملی در دست نیست.



شکل ۷.۵ علت شکست سد معادن مس

۳.۵ مدل تحلیل ریسک شکست سد باطله

همان‌گونه که اشاره شد، در اولین قدم به منظور تحلیل ریسک شکست سد باطله، لازم است تا احتمال شکست سد تحت مکانیزم‌های شکست محاسبه گردد. با توجه به عوامل شکست سدهای شکسته شده در یکصد سال گذشته و مکانیزم شکسته آنها که در فصل سوم به آن اشاره شد، و همچنین تبعات آنها و با توجه به رویکرد تحلیل ریسک سدها که در الگوریتم شکل ۵-۱ ارائه شد، در این بخش مدلی تحلیل ریسک و محاسبه احتمال شکست سدهای باطله تحت مکانیزم‌های شکست شیب، شکست سد به دلیل لبریز، شکست ناشی از افزایش درجه سیالی، فرسایش داخلی، نشستی و در نتیجه شکست رگاب و در نهایت شکست فونداسیون سد به همراه محاسبه وزن و عملکرد هر یک از مکانیزم‌ها بیان ارائه می‌شود. در فصل‌های گذشته اشاره شد که در شکست سد تنها یک عامل موثر نخواهد بود و تاثیر هم زمان آنها شکست را ایجاد می‌کند. بدین معنا که نشستی، بارش‌های جوی، بارهای مخرب وارد شده بر دیواره و پی سد و سایر مکانیزم‌های شکست به صورت پیوسته (با تابع توزیع احتمال پیوسته) و هم‌زمان رخ می‌دهند. از سوی دیگر در فصل سوم اشاره شده که برخی از عوامل موثر در شکست بر یکدیگر اثر گذاشته و همبستگی دارند و در محاسبه احتمال شکست باید این تاثیر متقابل دیده شود. همچنین توجه به این نکته ضروری است که وزن و عملکرد همه پارامترهای موثر در شکست به یک اندازه نخواهد بود. به این معنی که تنها محاسبه احتمال وقوع آنها نمی‌تواند معرف احتمال شکست سد باشد. به‌ویژه اینکه بسته به موقعیت جغرافیایی و مکانی که در آن احداث شده است، عملکرد و وزن این عوامل از سدی به سد دیگر متفاوت خواهد بود. برای محاسبه احتمال شکست مکانیزم‌های چهارگانه از مفاهیم و روابط ارائه شده در مدل درخت خطا و مدل بی‌زی در شکست سدهای باطله استفاده می‌شود. برای اعمال عملکرد و وزن مکانیزم شکست در ریسک شکست سد باطله از مفهوم درجه ریسک که ویلیامز^۱ در سال ۱۹۹۳ ارائه کرد [۷۲] استفاده می‌شود.

ویلیامز مفهوم درجه ریسک را با دو معیار زیر ارائه کرد.

(آ) احتمال وقوع رخدادی که تبعات منفی دارد.

¹ Williams

ب) درجه و مقیاس اثر آن رخداد بر سیستم و یا سایر رخدادهای مخرب فرمول ۱-۵ نحوه محاسبه درجه ریسک شکست سیستم را نشان می‌دهد.

$$R = P \times D_i \quad (1.5)$$

که در آن R درجه ریسک، P احتمال رخداد پدیده‌ای که تبعات منفی دارد و D_i درجه و مقیاس اثر آن رخداد بر سیستم است [۷۲].

بنابراین در تحلیل ریسک شکست سدهای باطله، درجه ریسک شکست سد با اعمال احتمال وقوع شکست تحت مکانیزم‌های شکست چهارگانه و همچنین وزن و عملکرد آنها مطابق فرمول ۲-۵ محاسبه می‌شود. بنابراین درجه ریسک شکست سد باطله (D_{RTDF}) برابر است با مجموع احتمال وقوع هر یک از مکانیزم‌های شکست در وزن آنها.

$$D_{RTDF} = \sum (W_{sf} P_{sf} + W_{of} P_{of} + W_{pf} P_{pf} + W_{ff} P_{ff}) \quad (2.5)$$

که در آن W_{sf} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در شکست سد باطله به دلیل شکست شیب، P_{sf} احتمال شکست سد به دلیل شکست شیب، W_{of} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در شکست سد باطله به دلیل شکست لبریز، P_{of} احتمال شکست سد به دلیل شکست لبریز، W_{pf} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در شکست سد باطله به دلیل شکست رگاب، P_{pf} احتمال شکست سد به دلیل شکست رگاب، W_{ff} مجموع وزن عوامل و عملکرد موثر در شکست سد باطله به دلیل شکست فونداسیون و P_{ff} احتمال شکست سد به دلیل شکست فونداسیون است.

نحوه محاسبه احتمال وقوع عوامل و احتمال‌های شکست به شرح زیر و بر اساس فرمول‌های ۳-۵ تا ۷-۵ محاسبه می‌شوند.

احتمال شکست سد باطله به دلیل شکست شیب در فرمول ۳-۵ نشان داده شده است.

$$P_{sf} = P_{si} + P_{lf} \quad (3.5)$$

که در آن P_{si} احتمال عدم پایداری شیب، P_{lf} احتمال شکست سد به دلیل شکست سد ناشی از افزایش درجه سیالی است که مطابق فرمول ۴-۵ محاسبه می‌شود.

$$P_{lf} = P_{lw} + P_{lt} + P_e \quad (4.5)$$

که در آن P_{lw} احتمال افزایش درجه سیالی در دیواره سد، P_{lt} احتمال افزایش درجه سیالی درمواد باطله و P_e احتمال وقوع زمین لرزه است.

احتمال شکست سد به دلیل لبریز در فرمول ۵-۵ نشان داده شده است.

$$P_{of} = P_o + P_{se} + P_{rain} \quad (۵.۵)$$

که در آن P_o احتمال سر زیر سد، P_{se} احتمال فرسایش سطح، و P_{rain} احتمال بارش‌های جوی شدید است.

احتمال شکست سد به دلیل شکست رگاب در فرمول ۶-۵ نشان داده شده است.

$$P_{pf} = P_{sp} + P_{ie} \quad (۶.۵)$$

که در آن P_{sp} احتمال نشی در دیواره و سد و P_{ie} احتمال فرسایش داخلی است. احتمال شکست سد به دلیل شکست فونداسون در فرمول ۷-۵ نشان داده شده است.

$$P_{ff} = P_{pf} + P_{ls} \quad (۷.۵)$$

که در آن P_{sp} احتمال شکست رگاب در پی سد و P_{ls} احتمال رانش زمین در پی سد است.

محاسبه احتمال‌ها مربوط به مکانیزم شکست با استفاده از پارامترهای فاکتور ایمنی هر مکانیزم و تئوری قابلیت اطمینان ساختاری در ادامه این فصل ارائه می‌شود.

همان‌گونه که در فصل سوم اشاره شد، شکست سدهای باطله به صورت مستقیم و غیر مستقیم تبعات مخربی به دنبال خواهد داشت. تبعات شکست بر اساس ارکان اصلی توسعه پایدار در سه بعد عوامل زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی بیان شد. نحوه محاسبه تبعات ناشی از شکست سدهای باطله توسط فرمول ۸-۵ به شرح زیر است:

$$C_{TDF} = \sum (W_{en} C_{en} + W_{so} C_{so} + W_{ec} C_{ec}) \quad (۸.۵)$$

که در آن W_{en} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در تبعات زیست محیطی شکست سد، C_{en} تبعات زیست محیطی شکست سد، W_{so} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در تبعات اجتماعی شکست سد،

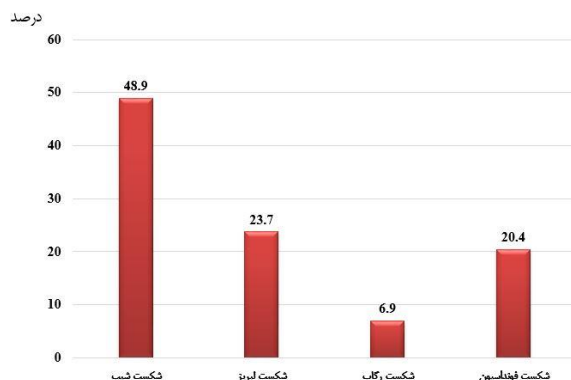
C_{so} تبعات اجتماعی شکست سد، W_{ec} مجموع وزن و عملکرد عوامل موثر در تبعات اقتصادی شکست سد و C_{ec} تبعات اقتصادی شکست سد است.

نحوه محاسبه تبعات شکست سدهای باطله به روش فولچی در ادامه این فصل ارائه می‌شود.

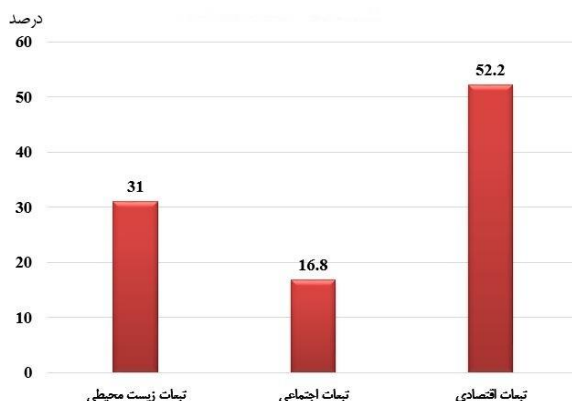
برای محاسبه وزن مکانیزم شکست و تبعات سدهای باطله به روش رای گیری اولویت‌ی، طی پرسشنامه‌ای نظرات ۱۶ نفر از دانشجویان، طراحان و مشاوران طراحی و ساخت سدهای باطله در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری در داخل و خارج از کشور، ضریب اهمیت پارامترهای موثر در شکست سد باطله، جمع آموری و مورد تحلیل قرار گرفت. نمونه این پرسشنامه در ضمیمه ۱ آورده شده است.

شکل ۵-۸ نتایج حاصل از وزن دهی عوامل موثر در مکانیزم‌های چهارگانه شکست سدهای باطله را نشان می‌دهد. به این ترتیب، شکست شیب با ۲۸/۹٪ بیشترین وزن را در مکانیزم شکست سدها به دست آورد. سپس شکست لبریز ۲۳/۷٪، شکست فونداسیون با ۱۰/۴٪ و شکست رگاب با ۶/۹٪ وزن دهی شدند. بنابراین، نتایج حاصل از وزن دهی عوامل با نتایج تاریخی شکست سدهای باطله مطابقت دارد.

مجموع وزن‌های عوامل موثر در شدت تبعات سه گانه سدهای باطله در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، وزن عوامل موثر در تبعات اقتصادی ۵۲/۲ درصد، زیست محیطی ۳۱ درصد و تبعات اجتماعی ۱۶/۸ درصد به دست آمد. از آنجایی که هزینه‌های پاک سازی زیست محیطی پس از شکست سدهای باطله، جزء تبعات اقتصادی دسته بندی شده است، بنابراین اوزان محاسبه شده برای عوامل موثر در شدت تبعات شکست سدهای باطله با نتایج تاریخی آن مطابقت دارد.



شکل ۵.۸ مجموع وزن عوامل موثر در مکانیزم‌های چهارگانه شکست سدهای باطله



شکل ۹.۵ مجموع وزن عوامل موثر در تبعات شکست سدهای باطله

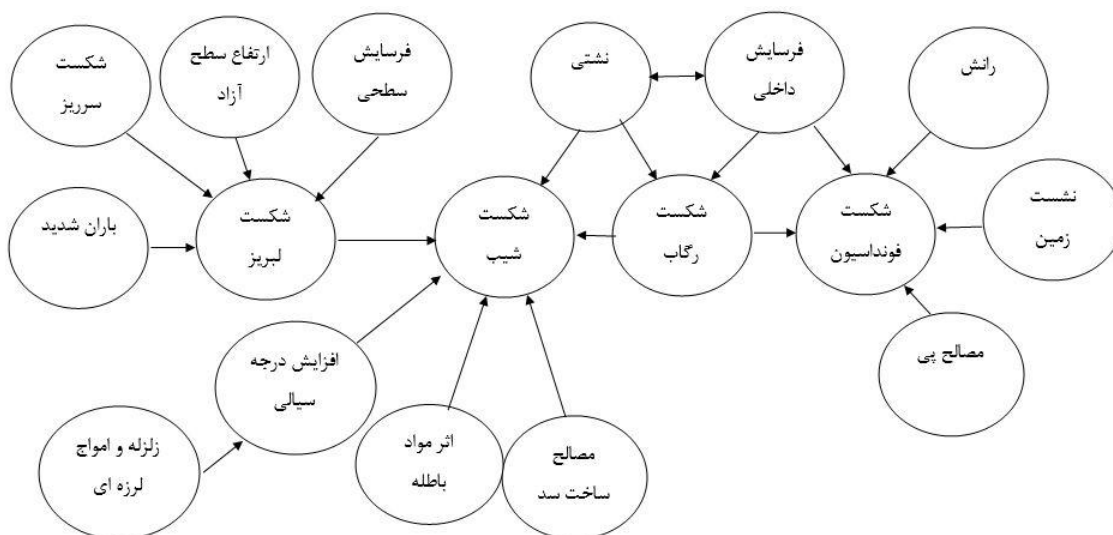
۱.۳.۵ مدل پیشنهادی درخت خطا در تحلیل ریسک شکست سد باطله

در فصل سوم اشاره شد که برای درک بهتر از علل شکست سدهای باطله، گزارش شکست و علل و مکانیزم ۳۰۶ سد باطله که در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵ شکسته شده‌اند، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. پس از مطالعه و استخراج علت شکست سدها مشخص گردید که در هر یک از مکانیزم‌های شکست، مجموعه‌ای از عوامل دخیل هستند تا شکست رخ دهد. با توجه به تفاوت ویژگی‌های مواد باطله، عوامل درونی و بیرونی این مجموعه متفاوت خواهد بود بنابراین مجموعه همه این عوامل به شکل درخت خطای تحلیل ریسک سدهای باطله که شامل مجموعه کلیه عوامل موثر در شکست سدهای باطله است در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مکانیزم‌های شکست سدهای باطله در چهار گروه نشان داده شده است. در شکست به دلیل لبریز فرسایش سطحی، باران شدید و شکست سرریز موثر هستند. همانطور که در فصل سه اشاره شد طراحی نامناسب سر زیر و سطح آزاد سد نقش مهمی در این شکست دارند. عواملی مانند نشتی باعث فرسایش داخلی و شکست رگاب خواهد شد. افزایش فشار منفذی ناشی از آب محتوای مواد باطله، افزایش درجه سیالی مواد باطله (ناشی از امواج لرزه‌ای)، بالا بودن نرخ ورود مواد باطله نسبت به نرخ ته نشینی و سفت شدن آن و حین ترفیع سد، عدم پایداری شیب و افزایش نیروی برشی ناشی از سفت شدن مواد باطله عوامل موثر در شکست شیب هستند. نشتی و فرسایش داخلی شکست رگاب را موجب می‌شوند. نشتی در پی به دلیل بالا بودن نفوذ پذیری، مقاومت کم پی در مقابل بارها (تنش و

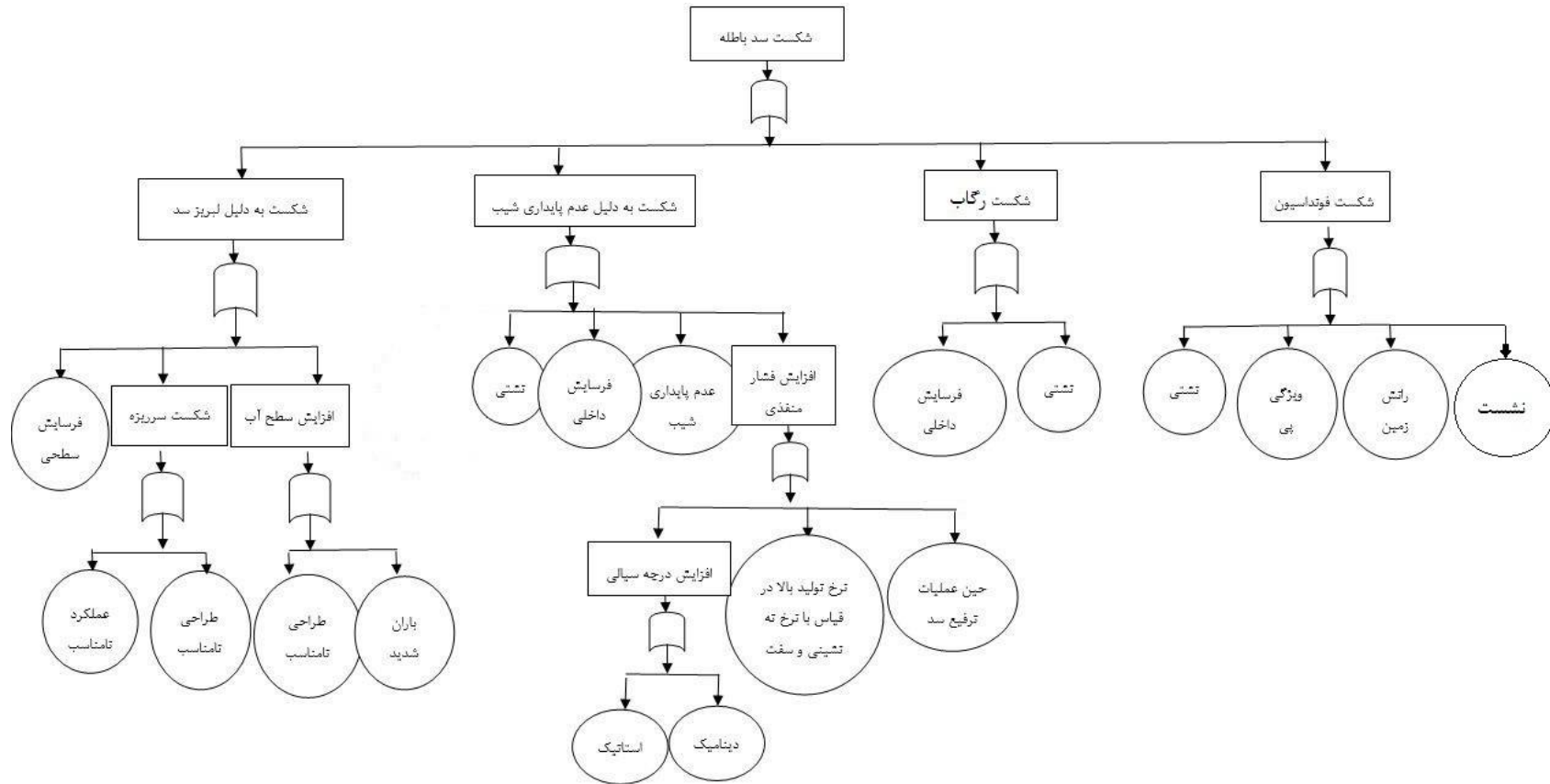
کرنش مواد باطله و یا امواج لزره‌ای) به دلیل انتخاب مواد نامناسب در پی، و رانش زمین و نشست نیز از عوامل مهم در شکست فونداسیون هستند.

۲.۳.۵ مدل پیشنهادی شبکه بیزی

در شکست سدهای باطله، فرسایش داخلی در شکست شیب، افزایش احتمال نشی به دلیل نوع مصالح دیوار یا پی سد، و یا افزایش فشار منفذی، شکست رگاب در دیواره یا پی را موجب می‌شود. باران شدید و عملکرد نامناسب سرریز باعث افزایش فشار هیدرولیکی، عدم پایداری شیب و شکست لبریز خواهد شد. همچنین فرسایش سطحی بدنه سد و نیز میزان بارش‌های جوی و مدیریت زمان سرریز از عوامل مهم شکست لبریز هستند در ارتباط با یکدیگر عمل می‌کند. رانش و نشست زمین که خود در عوامل زمین‌شناسی منطقه باید مورد بررسی قرار گیرند بر شکست پی موثر هستند. این نکته شایان ذکر است که شدت زلزله به دلیل تاثیر آن بر پتانسیل مایع شدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد و اینکه زلزله و قدرت تخریب آن چه نقشی در پایداری سد دارد از عوامل دیگری است که باید در بررسی نیروهای وارد بر سد در شرایط زلزله مورد بررسی قرار گیرد. ارتباط پارامترهای مختلف شکست سد باطله در شبکه بیزی در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰.۵ مدل پیشنهادی شبکه بیزی در شکست سدهای باطله



شکل ۱۱.۵ مدل پیشنهادی درخت خطا در شکست سدهای باطله

۴.۵ بررسی ضریب ایمنی در تحلیل ریسک شکست سد باطله

در تحلیل ریسک شکست سد باطله برای تعیین احتمال شکست سد، از تئوری قابلیت اطمینان ساختاری استفاده می‌شود. در این روش، مطابق گام‌های اشاره شده، لازم است تابع محدود حدی هر یک از حالت‌های شکست سدهای باطله تعریف و تعیین شود. همان طور که در فصل ۴ به آن اشاره شد، بر اساس مطالعات این پایان نامه که بر روی ۳۰۶ سد شکسته شده در بین سال‌ها ۱۹۱۴ تا ۲۰۱۵ انجام شده بود، مشخص گردید، معمول‌ترین حالت‌های شکست سدهای باطله شامل شکست شیب سد به دلیل لبریز آب و یا مواد باطله افزایش درجه سیالی (دیواره سد و یا مواد باطله)، شکست سد به دلیل نشتی، فرسایش و رگاب، و در نهایت شکست فونداسیون در اثر رانش یا نشست زمین و رگاب در پی هستند. بنابراین، برای محاسبه احتمال شکست سد باطله، محاسبه احتمال شکست به دلیل هر یک از حالت‌های فوق ضروری است. بدین منظور، در این بخش، ضریب ایمنی هر یک مکانیزم‌ها و حالت‌های شکست فوق و در نتیجه تابع حالت حدی، برای محاسبه احتمال شکست سدهای باطله ارائه می‌شود.

۱.۴.۵ فاکتور ایمنی پایداری شیب

به‌طور کلی، روش‌های تحلیل پایداری شیب، به دو دسته روش تقسیم بندی می‌شوند: (۱) روش تحلیل تنش کل^۱ (TSA) و (۲) روش تحلیل تنش موثر^۲ (ESA). با توجه به ظرفیت زه‌کشی از مواد باطله، و نیز زمان لازم برای به تعادل مواد باطله در سد (با توجه به نرخ ورود مواد باطله و نرخ تحکیم آنها)، تحلیل پایداری را در سه مقطع کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت مورد بررسی قرار می‌دهند [۷۳]. روش TSA تحت شرایطی که مواد باطله زه‌کشی نشده‌اند و در کوتاه مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ESA در شرایطی که مواد باطله زه‌کشی شده و مقاومت برشی موثر به حداکثر رسیده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۸، ۴۰، ۷۳]. فاکتور ایمنی پایداری شیب از تقسیم مقاومت برشی بر تنش برشی است که توسط قانون موهر-کلکب تعریف شده است. روش‌های متعددی نظیر روش

^۱ Total Stress Analysis (TSA)

^۲ Effective Stress Analysis (ESA)

تعادلی محدود^۱، روش کاهش مقاومت^۲ و روش المان محدود^۳ برای به دست آوردن فاکتور ایمنی شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد.

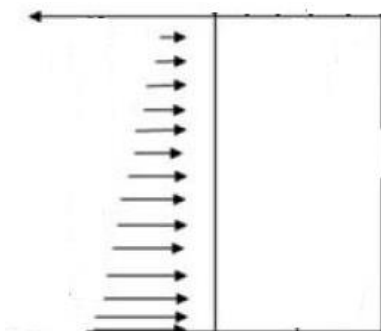
در محاسبه تحلیل پایداری شیب سدهای باطله بالا رونده، پایداری شیب سد، فقط به بررسی ویژگی‌های دیواره سد و بارهای وارد ناشی از وزن آن توجه شده است. در حالی که در سدهای باطله پس از اینکه باطله مراحل سفت شدن و تحکیم را طی کرد، با کاهش فشار منفذی، مقاومت برشی آن افزایش می‌یابد. در این شرایط، فشار ناشی از این مقاومت برشی، فشاری بر دیواره سد وارد می‌کند، که بزرگی آن با افزایش عمق و نزدیک شدن به پی سد افزایش می‌یابد. در شکل ۵-۱۲ روند افزایش فشار ناشی از افزایش مقاومت برشی بر دیواره سد نشان داده شده است [۷۴]. در مطالعات صورت گرفته در تحلیل ضریب ایمنی دیواره سد در این پایان نامه با اصلاح فرمول پایداری شیب موهر-کلمب (رابطه ۵-۹)، این عامل به عنوان نیروی مخرب معرفی می‌شود. بنابراین ضریب ایمنی تحلیل پایداری شیب سد مطابق رابطه ۵-۱۰ اصلاح می‌شود. که در آن C نیروی چسبندگی موثر مواد دیواره سد، Φ زاویه شکست موثر مواد دیواره سد، σ تنش نرمال مواد دیواره سد، τ_{Soil} مقاومت برشی مواد تشکیل دهنده دیواره سد و $\tau_{Maxtail}$ بیشینه مقاومت برشی مواد باطله در حالت زه کشی شده (در حالتی که مواد باطله آب خود را از دست داده اند و یا زه کشی شده اند، به این معنا که تحکیم مواد کاملاً رخ داده است) است. در رابطه ۵-۹، با اضافه شدن عامل $\tau_{Maxtail}$ ، ضریب ایمنی سد باطله اصلاح شده است. بیشینه مقاومت برشی مواد باطله رابطه ۵-۱۱ محاسبه می‌شود. که در آن $\Delta\sigma'$ افزایش تنش موثر قائم در اثر افزایش نیروی مواد باطله و ϕ' زاویه شکست مواد باطله در شرایطی است که مواد باطله آب خود را از دست داده اند [۷۵].

$$FoS = \frac{C' + \sigma' \tan \Phi'}{\tau_{Soil}} \quad (9.5)$$

¹ Limit Equilibrium Method (LEM)

² Strength Reduction Technique (SRT)

³ Finite Element Method (FEM)



شکل ۱۲.۵ افزایش فشار بر بدنه سد باطله ناشی از مقاومت برشی مواد باطله [۷۴]

$$FoS = \frac{C' + \sigma' \tan \Phi'}{\tau_{Soil} + \Delta \tau_{Maxtail}} \quad (10.5)$$

$$\Delta \tau_{Maxtail} = \Delta \sigma' \tan \phi' \quad (11.5)$$

۲.۴.۵ ضریب ایمنی لبریز

در فصل سوم اشاره شد که در صورت طراحی نامناسب سد شامل طراحی سرریز و سطح آزاد دیواره سد، و همچنین در اثر فرسایش سطحی، بارش‌های پیش‌بینی نشده و شدت امواج آب بر دیواره سد، سد خاکی مقاومت خود را از دست داده و شکسته می‌شود. در تحلیل شکست لبریز، احتمال فرسایش سطحی سد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای محاسبه احتمال فرسایش سطحی، در سدهای آبی، از شاخص فرسایش و بیشینه فشار هیدرولیکی آب بر تاج سد، استفاده می‌شود. شاخص فرسایش تحت تاثیر قدرت باد و طوفان در منطقه است. رابطه بین قدرت طوفان و شاخص فرسایش و احتمال فرسایش سطحی در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. این روش برای اولین بار به وسیله مطالعات انجام شده توسط آناندل^۱ در سال ۱۹۹۵ بر روی ۱۵۰ کانال سرریز سد آبی و رگرسیون گیری بین متغیرهای اشاره شده، محاسبه و ارائه شد. پس از آناندل، ویبو^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۵ توسط رگرسیون گیری لاجستیک^۳ آن را کامل و مطابق شکل ۵-۱۳ ارائه نمودند. از طریق خطوط مشکی، سبز، قرمز و آبی می‌توان احتمال فرسایش سطحی را محاسبه نمود. خط مشکی مشخص کننده شروع فرسایش با احتمال ۱ درصد است، خط سبز مشخص کننده ناحیه فرسایش پذیر و فرسایش ناپذیر

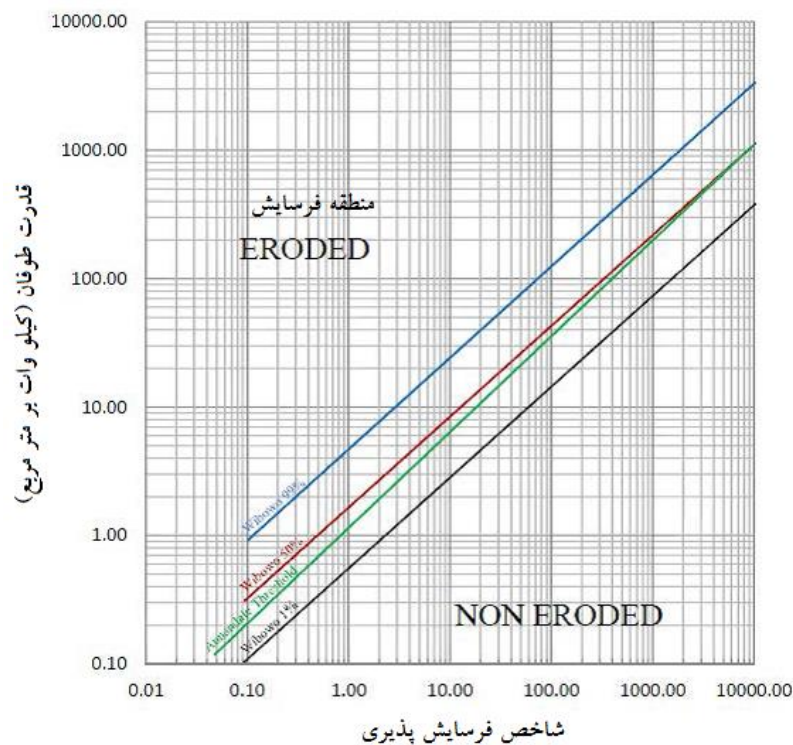
¹ Annandale

² Wibowo et al

³ logistic regression

ارائه شده توسط آناندیل، خط قرمز، شروع فرسایش با احتمال ۵۰ درصد و خط آبی احتمال ۹۹ درصد را بیان می‌کند. تخمین به میزان شاخص فرسایش پذیری مقاومت تک محور خاک، میزان هوازدگی تاج سد، درصد درزه و شکاف، زاویه و میزان بازشدگی آنها، زاویه سرریز و دانه بندی خاک وابسته است و تعیین آن برای محاسبه احتمال فرسایش و شکست لبریز در ارتفاع‌های متعدد و مناطق مختلف دیواره سد ضروری است [۷۶]. مدت زمان لبریز نیز تاثیر ویژه‌ای بر شکست لبریز دارد. لذا عملکرد سرریز در شکست لبریز می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای داشته باشد. برای محاسبه ضریب ایمنی لبریز، از آنجایی که در صورت شکست سرریز به هر دلیلی، آب حاصل از باران پشت دیواره سد جمع شده و فشار ناشی از آن باعث شکست سد خواهد شد، بنابراین فاکتور ایمنی لبریز با استفاده رابطه ۵-۱۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه، تاثیر فشار ناشی از آب پشت دیواره سد و نیز فشار ناشی از مقاومت برشی مواد باطله در نظر گرفته شده است و تاثیر مدت زمان لبریز صرف نظر شده است که در آن ρgh فشار ناشی از آب پشت دیواره سد است.

$$FoS = \frac{C' + \sigma' \tan \Phi'}{\tau_{Soil} + \tau_{Maxtail} + \rho gh} \quad (12.5)$$



شکل ۱۲.۵ احتمال فرسایش سطحی [۷۶].

۳.۴.۵ ضریب ایمنی افزایش درجه سیالی

پتانسیل افزایش درجه سیالی در زمان لرزه از مهمترین دلایل شکست سدهای باطله به‌ویژه در معادن مس است. در بررسی ضریب ایمنی افزایش درجه سیالی دینامیک (در اثر زمین زلزله)، از مقایسه دو نسبت مقاومت حلقوی^۱ و نسبت تنش حلقوی^۲ استفاده می‌شود و مطابق رابطه ۵-۱۳ محاسبه می‌شود [۷۷].

$$Fos = \frac{CRR}{CSR} \times MSF \quad (13.5)$$

که در آن MSF فاکتور بزرگی زلزله است. و CSR مطابق فرمول ۵-۱۴ محاسبه می‌شود [۷۷].

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left(\frac{\sigma'_{vo} a_{max}}{\sigma'_{vo} g} \right) r_d \quad (14.5)$$

که در آن، τ_{av} متوسط تنش برشی حلقوی، σ'_{vo} تنش کل بار قائم، σ'_{vo} تنش موثر بار قائم، a_{max}/g بیشترین شتاب افقی سطح زمین (ضریبی از نیروی جاذبه زمین)، و r_d فاکتور کاهش تنش برشی که واکنش دینامیکی خاک را محاسبه می‌کند. برای تخمین r_d به عنوان تابعی از عمق و بزرگی زلزله از فرمول ۵-۱۵ استفاده می‌شود [۷۷].

(۱۵.۵) الف: برای عمق کمتر از ۳۴ متر

$$\ln(r_d) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) + 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

(۱۴.۵) ب: برای عمق بیشتر از ۳۴ متر

$$MSF = \frac{174}{M^{2.56}} \quad (16.5)$$

که در آن M بر حسب ریشتر اندازه است [۷۷].

¹ cyclic resistance ratio (CRR)

² cyclic stress ratio (CSR)

۱.۳.۴.۵ محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی

در سال ۲۰۰۴ ستین و همکاران^۱ با استفاده از روش بیزین اصلاح شده و استفاده از اطلاعات آزمون نفوذ استاندارد^۲ (CPT) و رگرسیون گیری، احتمال افزایش درجه سیالی را به شکل مطابق رابطه ۱۷-۵ به دست آوردند [۷۸، ۷۹].

$$P_L = \Phi \left[-\frac{(N_1)_{60} (1 + \theta_1 FC) - \theta_2 \ln CSR_{eq} - \theta_3 \ln M_w - \theta_4 \ln (\sigma_{ov} / p_a) + \theta_5 FC + \theta_6}{\sigma_\varepsilon} \right] \quad (17.5)$$

که در آن، Φ تابع توزیع احتمال نرمال، $(N_1)_{60}$ میزان STP باقی مانده تصحیح شده، FC میزان مواد ریز دانه (درصد)، CSR_{eq} نسبت تنش حلقوی (فرمول ۵-۱۳)، M_w بزرگی زلزله بر حسب ریشتر، σ_{ov} میزان تنش موثر قائم، p_a فشار هوا (هم واحد با σ_{ov}) و θ_1 تا θ_6 ضرایبی هستند که از طریق رگرسیون گیری بدست آمده است و σ_ε میزان عدم قطعیت در مدل و پارامترهای آن است. بر اساس مطالعات ستین، میانگین ضرایب رگرسیون گیری بر اساس دو حالت با در نظر گرفتن عدم قطعیت مقدار اندازه گیری شده تقسیم بر خطای تخمین (حالت ۱) و بدون در نظر گرفتن آن (حالت ۲) محاسبه شده است که مقادیر آنها در حالت ۱ در جدول ۲-۵ ارائه شده است [۷۸، ۷۹].

جدول ۲.۵ میانگین ضرایب مدل CRR با استفاده از فرآیند رگرسیون گیری [۷۸، ۷۹].

حالت	مقدار اندازه گیری شده تقسیم بر خطای تخمین	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_5	σ_ε
۱	در نظر گرفته شد	۰/۰۰۴	۱۳/۷۹	۲۹/۰۶	۳/۸۲	۰/۰۶	۱۵/۲۵	۴/۲۱

همچنین در مطالعات ستین میزان $(N_1)_{60}$ بین ۱۰ تا ۲۲ متغیر بوده است [۷۸، ۷۹].

¹ Cetin and et al.

² standard penetration test (SPT)

۴.۴.۵ ضریب ایمنی فرسایش داخلی، نشتی و شکست رگاب

نشتی عملکرد هیدرولیکی سد را با توجه به توزیع فشار منفذی، سطح ایستابی آب و ورود آب، کنترل می‌کند. همچنین مکانیزم‌های شکست بر اساس فشار منفذی (مانند رگاب و افزایش درجه سیالی) و نیز پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط نشتی کنترل می‌شود. فرسایش داخلی نیز از مهمترین دلایل شکست سد باطله است [۳۸، ۴۰، ۷۱].

در محاسبه میزان نشتی، علاوه بر روش گرافیکی، روش مدل سازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رابطه ۵-۱۸ معادله دیفرانسیل لاپلاس در شرایط نشتی دو بعدی و همگن نشان داده شده است. روش‌ها متعددی از جمله مدل سازی عددی در حل معادله زیر استفاده شده است [۷۱].

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (18.5)$$

ضریب ایمنی فرسایش داخلی از طریق نشت مواد مطابق رابطه ۵-۱۹ است:

$$FoS = \tau_{cr} / \tau_{available} \quad (19.5)$$

که در آن، $\tau_{available}$ تنش برشی خاک و τ_{cr} تنش برشی بحرانی است که توسط رابطه ۵-۲۰ محاسبه می‌شود.

$$\tau_{cr} = \gamma_w h_p i_{cr} \quad (20.5)$$

که در آن، γ_w وزن مخصوص آب، h_p فشار ناشی از هد آب و i_{cr} گرادیان هیدرولیک بحرانی زمانی که رگاب شروع می‌شود [۸۰].

گرادیان هیدرولیک مطابق رابطه ۵-۲۱ محاسبه می‌شود [۸۱].

$$i_{cr} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \quad (21.5)$$

که در آن ρ_w چگالی آب و ρ چگالی مواد پی و یا دیواره است.

۱.۴.۴.۵ محاسبه احتمال فرسایش داخلی

روش دیگری برای محاسبه احتمال فرسایش داخلی، روشی است که در سال ۱۹۵۳ توسط شرارد^۱ ارائه شد و دفتر بازسازی آمریکا آن را در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ به‌روز رسانی کرد. در این روش احتمال فرسایش داخلی بر اساس حد مایع شدگی خاک و در اصل بر اساس دانه بندی ذرات خاک است. به این ترتیب، مقاومت در برابر فرسایش داخلی و احتمال شکست رگاب در جدول ۳-۵ نشان داده شده است [۸۲].

جدول ۳.۵ مقاومت در برابر فرسایش داخلی [۸۲]

پتانسیل رگاب	حد پلاستیسیته و دانه بندی	احتمال ایجاد رگاب
پتانسیل کم	رس پلاستیکی، متراکم شده ($PI > 15$)	۰-۱۵ درصد
	رس پلاستیکی، متراکم نشده ($PI > 15$)	
پتانسیل متوسط	مواد رسی با توزیع دانه بندی یکنواخت، متراکم شده ($6 < PI < 15$)	۱۶-۷۵
	مواد با توزیع دانه بندی یکنواخت- بدون نیرو چسبندگی، متراکم شده ($6 < PI < 15$)	
پتانسیل بالا	مواد با توزیع دانه بندی یکنواخت- بدون نیرو چسبندگی، متراکم نشده ($PI < 6$)	۷۶-۱۰۰
	مواد با توزیع دانه بندی یکدست- ماسه ریز دانه بدون نیرو چسبندگی، متراکم شده ($PI < 6$)	
	مواد با توزیع دانه بندی یکدست- ماسه ریز دانه بدون نیرو چسبندگی، متراکم نشده ($PI < 6$)	

¹ Sherard

۵.۴.۵ فاکتور ایمنی شکست فونداسون و رانش

فونداسیون سد از مهمترین ویژگی یک سد خاکی محسوب می‌شود. علاوه بر اهمیت میزان نفوذپذیری آب و باطله از پی سد در آلودگی آب‌های زیر زمینی، پی سد در تعیین ارتفاع و گنجایش سد، مهمترین پارامتر محسوب می‌شود [۳۸]. همچنین در بررسی ریسک شکست سدهای باطله در اثر شکست پی، دو عامل نشتی و رگاب و همچنین رانش زمین موثر است. فاکتور ایمنی شکست رگاب در بخش ۴-۴-۵ مورد بررسی قرار گرفت که کافی است در رابطه‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱، پارامترهای پی سد جایگزین شود. در زیر به بررسی فاکتور ایمنی رانش پرداخته می‌شود.

رابطه ۵-۲۲، از یک مدل دو بعدی در تحلیل رانش استفاده می‌کند که مدل شیب بی‌نهایت^۱ نام دارد.

$$F = \frac{C' + (\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (۲۲.۵)$$

که در آن، C' نیروی چسبندگی موثر، γ وزن مخصوص خاک، γ_w وزن مخصوص آب، Z عمق محل شکست نسبت به سطح زمین، Z_w ارتفاع سطح آب زیر زمینی بالای سطح شکست، $m = \frac{Z_w}{Z}$ ، β شیب زمین، ϕ' زاویه تنش موثر است [۸۳].

۵.۵ پیش بینی تبعات ناشی از شکست سدهای باطله

همان‌گونه که مطرح شد، تبعات شکست سدهای باطله بر هر سه رکن توسعه پایدار (محیط زیست، اجتماع و اقتصاد) اثر منفی دارد. به‌منظور برآورد میزان تبعات و نیز کمی سازی آنها از روش فولچی تصحیح شده استفاده می‌شود. در این بخش، ابتدا به توضیح روش فولچی پرداخته می‌شود، سپس با تصحیح این روش برای کمی سازی تبعات ناشی از شکست سدهای باطله، اجزای سیستم، فاکتورهای موثر بر اجزای سیستم و سناریوهای این روش که در آن میزان تاثیر فاکتورها بر اجزای سیستم را مشخص می‌کند، ارائه می‌گردد.

^۱ Infinite Slope Model

۱.۵.۵ روش فولچی

روش فولچی، روشی برای ارزیابی کمی تاثیرات زیست محیطی معدنکاری، در سال ۲۰۰۳، در معدن فعالی در استرالیا مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی کمی تاثیرات زیست محیطی، هفت مرحله زیر دنبال می‌گردد.

۱. تعیین اجزای زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی منطقه که قبل از معدنکاری وجود داشته‌اند (جدول ۴-۵).

۲. تعیین فاکتورهای تاثیر گذار در فرآیند معدنکاری (جدول ۴-۵).

۳. تعریف سناریو برای تعیین میزان اثرگذاری فاکتورها بر اجزای سیستم (جدول ۵-۵).

۴. تعیین ارتباط بین فاکتورهای موثر و اجزای سیستم از طریق امتیاز دهی در ماتریس همبستگی. بر اساس میزان تاثیر آن، به این ترتیب که اگر تاثیر فاکتور اول بر جز اول از سیستم صفر^۱ باشد امتیاز ۰، اگر کم‌ترین^۲ میزان تاثیر را داشته باشد، امتیاز X، اگر اثرگذاری آن متوسط^۳ باشد امتیاز ۲X و اگر بیشترین اثر^۴ را داشته باشد امتیاز ۴X به آن تعلق می‌گیرد. مجموع تاثیر هر فاکتور موثر بر جزء سیستم برابر ۱۰ خواهد بود که به این ترتیب مقدار X محاسبه شده و میزان اثر گذاری فاکتور بر جزء مشخص می‌شود.

۵. تعیین دقیق تاثیر گذاری فاکتورها بر اجزای سیستم بر اساس سناریوهای تعریف شده.

۶. محاسبه وزن هر یک از اجزای محیط زیست، اقتصاد و جامعه در ماتریس وزن دهی فاکتورها. به این ترتیب که وزن هر فاکتور از حاصل مقدار محاسبه در بند چهار ضرب در مقدار محاسبه در بند پنج، محاسبه می‌شود. تعیین وزن عوامل پیش از معدنکاری که از حاصل جمع وزن‌های فاکتور بر اجزای سیستم محاسبه می‌شود [۸۴، ۸۵]. در جدول ۴-۵ اجزای سیستم و فاکتورهای موثر بر آن در اثر شکست سد باطله، نشان داده شده است. در این جدول در بخش محیط زیست، میزان اثر شکست

¹ Nil
² Minimum

3 Medium
4 Maximum

سد بر اساس دو معیار حجم مواد خارج شده از سد و وسعتی که مواد در اثر حرکت و انتقال آلوده خواهند نمود، بررسی شده است.

در تبعات اجتماعی، تعداد جمعیت در معرض خطر مرگ^۱ در اثر شکست سد مورد بررسی قرار گرفت. در تبعات اقتصادی، کلیه هزینه‌های ایجاد شده در اثر شکست سد، اعم از هزینه‌های پاک‌سازی محیط زیست و هزینه‌های اکولوژی وارد بر اکوسیستم، هزینه از بین رفتن زیرساخت‌ها، تعمیر و ساخت سد، از بین رفتن شغل، افت سهام شرکت، جریمه‌های زیست محیطی، هزینه‌های ناشی از کاهش تولید و یا بسته شدن معدن و سایر خسارت‌های وارد شده به معدن و ماشین آلات، و افت سهام شرکت بر حسب ارزش فعلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴.۵ فاکتورها و اجزای سیستم در شکست سدهای باطله

اجزای سیستم		فاکتورهای موثر
آب	محیط زیست	شکست سد باطله
خاک		
هوا		
اکوسیستم		
تعداد جمعیت در خطر مرگ	جامعه	جریان آب و مواد باطله
هزینه پاک‌سازی زیست محیطی	اقتصاد	
هزینه تامین زیرساخت‌ها		
هزینه تحمیل شده به معدن		

۲.۵.۵ تعریف سناریو در روش فولچی

در روش فولچی به منظور کمی سازی اثر گذاری تبعات شکست سد، از تعریف سناریو و محدوده اثرگذاری سناریو استفاده می‌شود. در بخش تأثیرات زیست محیطی ناشی از شکست سد باطله، سه

¹ Population at Risk

سناریو مختلف تعریف شد که شامل حجم مواد خارج شده از سد، تعداد جمعیت در خطر مرگ، و خسارت‌ها اقتصادی می‌شوند. برای پیش بینی حجم مواد خارج شده از سد در اثر شکست، ریکو^۱ و همکاران [۸۶] در سال ۲۰۰۷، از داده‌های ۲۹ سد باطله که در سال‌ها ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۵ شکسته شده بودند، استفاده کرد. پیش از این، پیش بینی حجم مواد خارج شده ناشی از شکست سدهای باطله برای اولین بار توسط گستا^۲ در سال ۱۹۸۵ و با مطالعه بر روی ۳۱ سد باطله شکسته شده بین سال‌های ۱۹۶۴ تا سال ۱۹۸۳، انجام شد [۸۷]. بر اساس مدل ارائه شده توسط ریکو و همکاران، میزان حجم مواد خارج شده از سد توسط رابطه ۵-۲۳ محاسبه می‌شود. با توجه به این فرمول در شکست سد به طور متوسط حتماً تا یک-سوم محتویات سد خارج می‌شود. بدین ترتیب، محدوده سناریو تعریف شده بر اساس حجم مواد خارج شده از سد، در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

$$V_F = 0.354 \times V_T^{1.01} \quad (23.5)$$

$$r^2 = 0.86$$

که در آن، V_F حجم مواد خارج شده از به دلیل شکست سد و V_T حجم محتویات درون سد باطله است.

برای تخمین وسعت حرکت مواد باطله روی زمین، ناشی از شکست سد، از رابطه ۵-۲۴ که توسط ریکو و همکاران ارائه شده است، استفاده می‌شود [۸۶]. در این فرمول H ارتفاع سد است.

$$D_{\max} = 1.61 \times (HV_f)^{0.66} \quad (24.5)$$

$$R^2 = 0.57$$

در رابطه ۵-۲۳، از تاثیر عواملی نظیر توپوگرافی زمین در جریان مواد صرف نظر شده است. از آنجایی که در این پایان نامه وزن عوامل موثر بر شدت تبعات ناشی از شکست و جریان مواد باطله از طریق روش رای گیری سلسله مراتبی محاسبه شده است، این مهم در تحلیل ریسک لحاظ شده است. از سوی دیگر، تخمین میزان گسترش آلودگی، در اثر آلودگی آب‌های سطحی و زیر زمینی نیز در رابطه ۵-۲۴ بررسی نشده است. از آنجایی که در این پایان نامه، با استفاده از روش فولچی تصحیح شده، میزان اثر گذاری این فاکتور بر اجزای سیستم بررسی می‌شود، لذا تبعات ناشی آلودگی آب‌ها مورد

¹ Rico

² Costa

توجه قرار گرفته است. محدوده سناریو تعریف شده بر اساس وسعت حرکت مواد خارج شده از سد، در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

در تعیین تعداد افراد در خطر مرگ، در اثر شکست سد، روابط متعددی در مقالات و گزارشات مربوط به سد ارائه شده است. در تخمین افراد در خطر مرگ عواملی نظیر حجم مواد خارج شده از سد، افراد مشغول به کار و ساکن در منطقه، توپوگرافی منطقه، سرعت حرکت مواد باطله، میزان آلاینده‌گی مواد، سیستم هشدار در زمان شکست سد موثر هستند. در تعریف سناریو جدول ۵-۵ از سناریوهای ارائه شده توسط انجمن بازسازی آمریکا استفاده شده است [۸۸].

برای تخمین تبعات اقتصادی شکست سدهای باطله از تحلیل هزینه بر سود^۱ استفاده می‌شود.

۱.۲.۵.۵ تحلیل هزینه بر سود

تحلیل هزینه بر سود، یکی از روش‌های مهم ارزیابی پروژه‌ها به‌ویژه در بررسی زیست محیطی آنها است [۸۹].

پیامدهای اقتصادی ناشی از شکست سدهای باطله، هزینه‌های پاک‌سازی زیست محیطی، تخریب زیرساخت‌ها، هزینه‌های وارد بر معدن، هزینه تعمیر و ساخت سد را شامل می‌شود. در محاسبه سود در مورد سدهای آبی با مطالعات انجمن بازسازی آمریکا، سود ناشی از آبیاری و آب‌رسانی به مناطق کشاورزی و مسکونی در نظر گرفته شده است. در مورد سدهای باطله، تا زمانی که حجم سد تکمیل نشده است، مواد باطله داخل آن انباشته خواهد شد. پس از آن بر طبق معیارهای توسعه پایدار، سد باید برای بازسازی و استفاده نسل‌های آتی آماده شود. بر این اساس، در تحلیل هزینه بر سود، سود از دست رفته بازسازی سد باطله به دلیل شکست سد مورد بررسی قرار می‌گیرد. سود حاصل بازسازی از طریق کسر هزینه‌های بازسازی از درآمد حاصل از آن به دست خواهد آمد. در مورد نحوه محاسبه هزینه‌های بازسازی و نیز درآمد حاصل از آن و عوامل تاثیر گزار در هزینه و سود، در این پایان‌نامه بحث نخواهد شد بلکه این موضوع به عنوان روشی برای محاسبه تبعات اقتصادی شکست سدهای باطله در این تحقیق برای نخستین مرتبه ارائه می‌شود.

¹ Cost Benefit Analysis

جدول ۵.۵ تعریف سناریو در شکست سد باطله

محدوده اثرگذاری	سناریو	فاکتورهای موثر
۱-۳	حجم مواد خارج شده از سد تا یک-سوم حجم سد	شکست سد
۴-۶	حجم مواد خارج شده از سد تا دو-سوم حجم سد	
۱۰-۷	حجم مواد خارج شده از سد تا یک سوم حجم سد	
۱-۳	تعداد جمعیت در خطر مرگ ۲-۱۰ نفر	
۴-۶	تعداد جمعیت در خطر مرگ ۱۰-۱۰۰ نفر	
۱۰-۷	تعداد جمعیت در خطر مرگ بیش از ۱۰۰	
۱-۳	وسعت آلودگی تا ۵۰ کیلومتر	شکست سد و جاری شدن آب و مواد باطله
۴-۶	وسعت آلودگی ۵۰-۱۰۰ کیلومتر	
۱۰-۷	وسعت آلودگی بیش از ۱۰۰ کیلومتر	
۱-۳	تعداد جمعیت در خطر مرگ ۲-۱۰ نفر	
۴-۶	تعداد جمعیت در خطر مرگ ۱۰-۱۰۰ نفر	
۱۰-۷	تعداد جمعیت در خطر مرگ بیش از ۱۰۰	
۱-۳	خسارت ناشی از جاری شدن مواد $0/4 \leq C/B < 1$	خسارت ناشی از جاری شدن مواد
۴-۶	خسارت ناشی از جاری شدن مواد $0/3 \leq C/B < 0/4$	
۱۰-۷	خسارت ناشی از جاری شدن مواد $0 \leq C/B < 0/3$	

۶.۵ ماتریس ریسک

در ارزیابی ریسک شکست سدهای پس از محاسبه احتمال شکست و تبعات آن برای تعیین ریسک شکست سد باطله از ماتریس ریسک استفاده می‌شود. ماتریس ریسک در جدول ۵-۶۹ نشان داده شده

و بر گرفته از منبع [۵۶] است. در ماتریس ریسک تبدیل اعداد درجه ریسک محاسبه شده و تبعات به محدوده ۱ تا ۱۰، مکان ریسک شکست سد، در ماتریس ریسک مشخص می‌شود.

جدول ۶.۵ ماتریس ریسک شکست سدهای باطله، برگرفته از [۵۶]

درجه تبعات	۱۰ (قطعی)	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱ (نادر)
۱۰	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
۹	۹۰	۸۱	۷۲	۶۳	۵۴	۴۵	۳۶	۲۷	۱۸	۹
۸	۸۰	۷۲	۶۴	۵۶	۴۸	۴۰	۳۲	۲۴	۱۶	۸
۷	۷۰	۶۳	۵۶	۴۹	۴۲	۳۵	۲۸	۲۱	۱۴	۷
۶	۶۰	۵۴	۴۸	۴۲	۳۰	۳۰	۲۴	۱۸	۱۲	۶
۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵
۴	۴۰	۳۶	۳۲	۲۸	۲۴	۲۰	۱۶	۱۲	۸	۴
۳	۳۰	۲۷	۲۴	۲۱	۱۸	۱۵	۱۲	۹	۶	۳
۲	۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶	۴	۲
۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱

۷.۵ جمع بندی

با مطالعه تاریخی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌ها ۱۹۱۴ تا سال ۲۰۱۵، به بررسی عوامل و مکانیزم‌های مهم و تاثیر گزار در شکست سدهای باطله پرداخته شد. و عوامل مهم در شکست سد و نیز تبعات بعد از شکست، با استفاده از روش رای گیری اولییتی (PVS) وزن دهی شدند. بر اساس وزن‌های به دست آمده شکست شیب و شکست لبریز مهم ترین مکانیزم‌های شکست سدهای باطله شناسایی شدند. سپس با استفاده از مفهوم درجه ریسک تاثیر هر یک از وزن‌های به دست آمده بر روی احتمال شکست سد باطله مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه احتمال شکست سدهای باطله مدلی ارائه شد که در آن، احتمال شکست مکانیزم سدهای باطله از طریق محاسبه فاکتور ایمنی به دست می‌آید. در محاسبه فاکتور ایمنی شکست شیب، به دلیل تاثیر افزایش مقاومت برشی مواد باطله بر دیواره سد، با مد نظر قرار گرفتن بیشینه مقاومت برشی مواد باطله به عنوان نیروی مخرب، فاکتور ایمنی شکست شیب، اصلاح گردید.

در محاسبه تبعات ناشی از شکست سدهای باطله، از روش فولچی برای کمی سازی تأثیرات شکست سد، و با در نظر قرار دادن میزان مواد خارج شده از سد به دلیل شکست، وسعت جریان مواد باطله، تعداد افراد در خطر مرگ و تبعات اقتصادی ناشی از شکست، استفاده شد. برای محاسبه تبعات اقتصادی ناشی از شکست سدهای باطله از روش تحلیل هزینه بر سود استفاده شد. در این روش تمامی هزینه‌های ناشی از شکست سد باطله به عنوان هزینه‌های ناشی از شکست سد و سود حاصل از عملیات بازسازی به عنوان سود در تحلیل هزینه بر سود، مد نظر قرار گرفته می‌شود.

۶

فصل ششم

تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون

تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون

همانطور که در فصل‌های پیشین اشاره شد، بررسی و پیش بینی علت و زمان شکست سدها، به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای موثر در آن بسیار دشوار و پیچیده است. در فصل سوم عوامل موثر در شکست سدهای خاکی به ویژه سدهای باطله مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در فصل‌های ۴ و ۵ به بررسی احتمال شکست سدهای باطله با استفاده از روش قابلیت اطمینان، محاسبه تبعات ناشی از شکست سد نیز مطالعه شد و مدلی بر اساس احتمال، تبعات و وزن آنها برای تحلیل ریسک شکست ارائه گردید. در این فصل، تحلیل ریسک سد باطله معدن مس سونگون با استفاده از مدل ارائه شده در فصل ۵، صورت می‌پذیرد. برای این منظور ابتدا معدن مس سونگون، ویژگی‌های منطقه و سد باطله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. ویژگی‌های مواد باطله معدن مس سونگون بر اساس مطالعات و آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده بر آنها، مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت. در این بررسی دانه بندی، نیروی چسبندگی، زاویه شکست، نیروی برشی و پتانسیل افزایش درجه سیالی از جمله ویژگی‌های مورد بحث خواهند بود. همچنین به منظور بررسی پایداری سد باطله، به مطالعه و بررسی ویژگی‌های دیواره سد، تاج و فونداسیون سد پرداخته خواهد شد. در این بررسی از مطالعاتی که توسط طراحان سد باطله سونگون صورت گرفته است و نیز مطالعات مرتبط با سدهای خاکریزه‌ای و باطله استفاده شده است. سپس با استفاده از روش شبیه ساز مونت کارلو، به محاسبه احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون پرداخته خواهد شد. سپس با استفاده از روش فولچی، تبعات ناشی از شکست سد باطله سونگون، با توجه ویژه به تحلیل هزینه بر سود، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت، ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون محاسبه خواهد شد.

۱.۶ معدن مس سونگون

مجتمع مس سونگون دومین معدن بزرگ مس پورفیری در ایران است که در استان آذربایجان شرقی و در ۱۳۰ کیلومتری شهر تبریز، ۷۵ کیلومتری شمال غرب اهر و ۲۸ کیلومتری شمال شهر ورزقان واقع گردیده است. این معدن در ارتفاع تقریبی ۲۰۰۰ متری از سطح دریا و در بخشی از رشته کوه‌های قره داغ قرار گرفته است. راه اصلی دسترسی معدن از طریق جاده آسفالت تبریز ورزقان

سونگون است. زمستان سرد و یخ بندان و تابستان معتدل از خصوصیات آب و هوایی این منطقه است. حداکثر درجه حرارت منطقه در تابستان ۳۳ درجه سانتی گراد و در زمستان ۲۰- درجه سانتی گراد ثبت گردیده است. میزان بارندگی سالیانه حدود ۳۵۰ میلی متر و رطوبت نسبی در سال بین ۵۲ تا ۸۵ درصد متغیر است [۹۰]. موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون در نقشه مطابق شکل ۱-۶ نشان داده می شود.



شکل ۱.۶ موقعیت جغرافیایی معدن مس سونگون [۹۰].

۱.۱.۶ ویژگی های معدن مس سونگون

به منظور تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون، به دلیل اهمیت ویژگی ماده معدنی، و نیز عیار، تناژ و تاثیر مراحل فرآوری بر باطله های تولید شده و نقش آنها در شکست سد باطله، ابتدا معدن مس، عیار و تناژ قابل استخراج و کارخانه فرآوری مواد، بررسی می شود و در ادامه شرایط آب و هوایی، بارندگی، زمین شناسی، لرزه خیزی، محیط زیست و اکوسیستم منطقه، روستاها و ساکنین

منطقه، وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی بررسی خواهد شد. سپس ویژگی و دانه بندی مواد باطله، و در نهایت سد باطله این معدن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱.۱.۱.۶ معدن مس سونگون

میزان کل تناژ ماده معدنی مس سونگون بر اساس اطلاعات دفتر فنی معدن، ۶۰۴ میلیون تن با متوسط عیار ۰/۶۳۷ درصد تخمین زده شده است [۹۱]. اصالو و رحمانپور در سال ۲۰۱۳، به‌منظور بررسی تأثیرات زیست محیطی معدن مس سونگون بر محدوده نهایی معدن به روش فولچی، پس از تعیین محدوده نهایی معدن مس سونگون، ذخیره قطعی معدن مس را تقریباً ۷۴۰ میلیون تن با عیار ۰/۶ درصد و ذخیره استخراج پذیر ۳۲۲ میلیون تن با متوسط عیار ۰/۶۲ درصد بیان نموده‌اند. همچنین نزدیک به ۱/۷ میلیارد تن ذخیره احتمالی برای آن مطرح کردند [۸۴]. ذخیره این معدن به‌طور میانگین دارای ۲۴۰ ppm ذخیره مولیبدن در هر تن می‌باشد. ظرفیت اولیه کارخانه فرآوری در فاز اول ۱۵۰ هزار تن بوده و در فاز دوم به ۳۰۰ هزار تن توسعه یافته است. سومین طرح توسعه آن، ظرفیت ۵۰۰ هزار تنی کنسانتره مس و در نهایت هدف تولید سالیانه ۲ میلیون تن مس کاتد می‌باشد [۹۲ و ۹۳]. معدن مس سونگون به روش روباز^۱ استخراج می‌گردد که پارامترهای استخراجی در محدوده نهایی آن به شرح جدول ۱-۶ است.

جدول ۱.۶ نتایج محدوده نهایی معدن مس سونگون [۹۳]

پارامتر	مقدار	واحد پارامتر
کل تناژ کانسنگ	۶۰۴۲۹۰۸۹۶	متریک تن ماده معدنی
کل تناژ باطله	۱۱۰۷۷۲۶۵۱۷	متریک تن باطله
نسبت باطله برداری	۱/۸۳۳	-
عیار متوسط ماده معدنی	۰/۶۳۷	درصد (%)
عمر معدن	۴۳	سال

^۱ Open pit

۲.۱.۱.۶ کارخانه فرآوری مجتمع معدنی مولیبدن-مس آذربایجان

کارخانه فرآوری مجتمع معدنی مولیبدن-مس آذربایجان، شامل دو بخش صنعتی و نیمه صنعتی است. بخش نیمه صنعتی با ۲۵۰۰ متر مربع مساحت شامل آزمایشگاه، تعمیرگاه، بخش‌های اداری و خدماتی، و بخش صنعتی با ۱۷ هزار متر مربع مساحت شامل سنگ شکن، سیستم نوار نقاله انتقال مواد، انبار مواد دانه درشت، خردایش، فلوتاسیون و آبگیری است که هر یک از این واحدها تجهیزات خاص خود را دارا هستند. میزان تولید، خوراک کارخانه، درصد بازیابی، عیار خروجی کارخانه فرآوری در جدول ۲-۶ آمده است. بررسی عملکرد کارخانه فرآوری از منظر نرخ تولید باطله، میزان آب محتوای باطله، دانه بندی، ویژگی‌های شیمیایی و سایر ویژگی‌های مواد باطله اهمیت دارد [۹۳].

جدول ۲.۶ مشخصات کارخانه فرآوری و کنسانتره [۹۳]

پارامتر	مقدار	واحد پارامتر
تعداد روزهای کاری در سال کارخانه	۳۳۰	روز
فاز اول	مدت زمان پروژه	۶ سال
	میزان خوراک سالانه ماده معدنی	۷ میلیون تن
	تولید سالانه کنسانتره	۱۵۰ هزار تن
فاز دوم	مدت زمان پروژه	۲۵ سال
	میزان خوراک سالانه ماده معدنی	۱۴ میلیون تن
	تولید سالانه کنسانتره	۳۰۰ هزار تن
ظرفیت کارخانه	۹۰۰	تن/ساعت
عیار خوراک ورودی	۳۰	درصد
بازیابی کل	۲۵/۸۶	درصد
درصد بازیابی مس سولفید	۹۲	درصد
عیار کنسانتره تولیدی	۶۱	درصد
رطوبت کنسانتره	۹	درصد

۳.۱.۱.۶ شرایط آب و هوایی و بارندگی در منطقه سونگون-اهر

ویژگی‌هایی نظیر کوهستان‌های متعدد، عرض جغرافیایی بالا، دریای خزر-مدیترانه و سیاه، دریاچه ارومیه و همچنین عبور توده هوای سرد سیبری، تاثیر ویژه‌ای در آب و هوای منطقه سونگون-اهر، دارند [۹۴].

جهت حرکت باد:

به‌طور کلی جهت حرکت باد در این منطقه به سمت جنوب غربی است. بررسی جهت حرکت بادهای و شدت آنها در این منطقه، به‌منظور بررسی حرکت و انتقال مواد باطله با ابعاد رس از سطح سد باطله و یا تعیین جهت و گستره آلودگی به‌ویژه بعد از شکست سد اهمیت بسیار دارد. همچنین میزان وزش باد، قدرت و محدوده زمانی از سال که بادهای شدید می‌وزد در تعیین فرسایش سطحی تاج سد و در نتیجه شکست به‌دلیل لبریز اهمیت خواهد داشت.

در این منطقه بادهای متعدد با ویژگی‌های متعدد می‌وزند که مهمترین آنها به شرح زیر می‌باشند:

- بادهای شرقی: این بادهای سرد و مرطوب بوده و در تمام فصول سال می‌وزند.
- بادهای غربی: این بادهای در تبخیر و خشکاندن زمین موثر است و به دنبال آن ابرهای باران را به حرکت در می‌آیند.
- بادهای خاصه منطقه: این باد در بیشتر ایام سال می‌وزد و نقش بسزایی در تعادل دما دارد [۹۴].

رطوبت:

متوسط میزان نسبی رطوبت بین ۳۰ تا ۸۰ درصد متغیر است [۹۴].

درجه حرارت:

درجه حرارت در محدوده مجتمع مس سونگون، بین ۳۰+ درجه سانتی‌گراد در تابستان و ۲۰- درجه سانتی‌گراد در زمستان است [۹۴].

بارندگی:

در منطقه اهر و سونگون، بارندگی در فصل زمستان به علت ارتفاع زیاد به صورت برف بوده و در سایر فصول سال به صورت بارندگی است. پیش‌بینی حداکثر بارش و همچنین پیش‌بینی دوره بازگشت بارندگی‌های شدید و سیلاب در تحلیل ریسک شکست سدها به دلیل لبریز اهمیت دارد. برای این منظور اطلاعات تاریخی بارش در منطقه اهر-سونگون مطالعه شد. پیش‌بینی می‌شود میزان بارندگی و سیلاب محتمل با دوره بازگشت ۵۰ سال به میزان ۱۸۰ مترمکعب در حوضه آبریز منطقه باشد [۹۴].

۴.۱.۱.۶ زمین‌شناسی

در زمان پیدایش ارتفاعات و ناهمواری‌های آذربایجان، دو دسته از عوامل دخالت داشته‌اند:

- ۱- تحولات زمین‌شناسی دوران سوم که رشته کوه‌های نسبتاً کم ارتفاعی را به‌وجود آورده است.
- ۲- فعالیت‌های آتشفشانی که موجب پیدایش کوه‌های مرتفع و عظیمی در منطقه شده است. رشته کوه‌های قوسی ارسباران واقع در ساحل رود ارس، مهمترین کوه آذربایجان است. در این منطقه شیب زمین بین ۴۰ تا ۶۰ درصد، و فرسایش خاک از متوسط تا زیاد برآورد شده است. منطقه تبریز از نظر زمین لرزه جزء مناطق با پتانسیل بالا تلقی می‌گردد. در این منطقه ۷ گسل مهم فعال وجود دارد که طی ۵۰ سال گذشته زمین لرزه‌های متعددی با بزرگی بیش از ۵ ریشتر را موجب شده‌اند. دوره بازگشت زمین لرزه با بزرگی ۹/۵ و ۶/۲ به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ سال تخمین زده شده است [۹۴].

۵.۱.۱.۶ محیط زیست و اکوسیستم

این بخش از منظر بررسی میزان تبعات شکست سد باطله بر روی محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است.

آب‌های سطحی:

آب‌های سطحی این منطقه رودخانه‌ها هستند که در طول سال از چشمه‌های مختلف تغذیه می‌شوند. حوضه آبریز منطقه به‌طور کلی از دو رودخانه، رودخانه پخیر (شمال توده معدنی) و سونگون (جنوب محدوده معدنی) جریان دارند که پس از به هم پیوستن در شمال شرق منطقه معدن، رودخانه میان کافه را تشکیل داده به رودخانه ایلگینه چای و در نهایت به رود ارس می‌پیوندند. رودخانه سونگون

پر آب‌ترین جریان دائمی در اطراف توده معدن است. جدول ۳-۶ شدت جریان رودخانه‌های سونگون، پخیر و میانکافه را در سال‌های ۷۷ و ۷۸ نشان می‌دهد [۹۴].

بررسی آب‌های سطحی در زمان شکست سدهای باطله از اهمیت ویژه برخوردار است. مهمترین عامل گسترش آلودگی‌های ناشی از شکست سد از طریق آب‌های سطحی و زیرزمینی بوده است.

جدول ۳.۶ شدت جریان رودخانه‌های سونگون، پخیر و میانکافه را در سال‌های ۷۷ و ۷۸ [۹۴]

نام رودخانه	میانگین دبی آب (لیتر بر ثانیه)	دبی ماکزیمم (لیتر بر ثانیه)	دبی مینیمم (لیتر بر ثانیه)
سونگون	۹۰/۷	۱۳۸۰	۱۰/۵
پخیر	۴۲/۴	۴۲۰/۵	- (یخ شدن آب)
میانکافه	۲۲۲/۸	۲۱۱۹/۵	۵۱

آب‌های زیر زمینی:

با توجه به شرایط خاص زمین شناسی منطقه سونگون، رسوبات ضخیمی که بتوانند سفره‌های آب زیرزمینی عمده ای را در خود تشکیل داده و به‌عنوان منبع آب محسوب شود در منطقه وجود ندارد. با این وجود به‌خاطر ویژگی‌های تکتونیکی و وجود درزه و شکاف‌های متعدد و شرایط توپوگرافی آن، در بیشتر دره‌های منطقه، چشمه‌های آب دائمی دیده می‌شود [۹۴].

خاک:

با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد نظر، در نواحی کم وسعتی زمین‌های هموار و نسبتاً مسطح مشاهده می‌شود. این سرزمین‌ها غالباً از مواد آبرفتی و رسوبی تشکیل شده‌اند و برای کشاورزی بسیار مناسب هستند [۹۴].

پوشش گیاهی:

پوشش گیاهی این منطقه به‌دلیل شرایط خاص بسیار متنوع بوده و شامل موارد زیر می‌شود:

- پوشش گیاهی جنگلی: به صورت تنک و پراکنده شامل راش، بلوط، افرا، ون، گردو، فندق، گیلاس، تنوعی از گیاهان
- پوشش گیاهی مراتع و اراضی مزروعی: مراتع ثروت مهمی است و غالباً برای دامپروری مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۹۴].

همچنین لازم به ذکر است جنگل‌های ارس باران به‌عنوان منطقه حفاظت شده از سوی سازمان ملل تعیین شده است. این زیستگاه حفاظت شده به فاصله ۷ کیلومتری معدن قرار دارد [۹۴].

۶.۱.۱.۶ وضعیت اجتماعی

شهرستان‌های نزدیک به محدوده مطالعاتی، شهرستان‌های ورزقان، اهر و کلیبر می‌باشند. طبق سرشماری آمار جمعیت سال ۱۳۸۵، اهر دارای جمعیت ۱۴۷۷۸۱ نفر، ورزقان ۴۶۸۳۳ نفر و کلیبر ۸۷۲۵۹ نفر بوده است [۹۳].

۲.۶ سد باطله معدن مس سونگون

سد باطله در جنوب غرب معدن سونگون (فاصله هوایی تقریباً ۶ کیلومتر از معدن) بر روی بخش فوقانی حوزه آبریز رودخانه آیت‌کندی احداث شده است. شکل ۶-۲ موقعیت سد باطله نسبت به پیت معدن را با مقیاس ۱:۵۰۰ نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت دیواره سد، راه‌های انتقال مواد باطله از کارخانه به سد (راه دسترسی شماره ۲، سیکلون و تیکنرهای باطله)، موقعیت پاتون‌ها و پمپ انتقال آب از سد با کارخانه فرآوری و محدوده نهایی سد باطله مس سونگون پس از ۳۰ سال نمایش داده شده است [۹۵]. طراحی سد باطله معدن مس سونگون به‌روش بالارونده، با هسته رسی و از مصالح راکفیل و ماسه است. مشاوران این طرح در ابتدا و در سال ۲۰۰۳ (۸۲-۱۳۸۱) شرکت مشاور سد باطله ویلیامز استرالیا^۱ بود. در حال حاضر شرکت مهندسی مشاور طوس آب است که اجرای آن از سال ۸۳ به شرکت پارس اولنگ واگذار گردید. این سد تاکنون سه مرحله ترفیع (با حجم ۸/۵ میلیون متر مکعب خاک) داشته است و ارتفاع آن در حال حاضر ۱۲۰ متر و حجم مواد داخل آن (آب و تیلینگ) ۴۱/۸ میلیون متر مکعب است [۹۵].



شکل ۲.۶ موقعیت سد باطله نسبت به پیت معدن در معدن مس سونگون [۹۵].

نرخ ورود باطله و آب به سد روزانه ۲۶۶۰۰ متر مکعب (با ترکیب ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد مواد باطله) است. برای ورود مواد از کارخانه به سد، سه موقعیت در نظر گرفته شده است که به ترتیب روی تاج سد، سیکلون و هد تانک هستند. از این سه محل ورود باطله، به صورت مقطعی برای کنترل بهتر جریان و توزیع یکنواخت باطله در مخزن استفاده می‌شود. pH مواد باطله بیش از ۷/۵ است. دبی نشستی آب از سد، ۱۲ تا ۴۰ لیتر در ثانیه است که این آب پشت سد نشستی در جلو سد اصلی جمع آوری شده مجدداً به کارخانه باز می‌گردد. در داخل سد، مواد باطله با شیب ۰/۵ درجه از باطله جدا شده و آب توسط سه پاتون تعبیه شده در سد، که به صورت شناور در آب قرار دارند، مجدداً به کارخانه بازگردانده می‌شود. حداکثر عمق آب در مخزن سد، ۹ متر است. وسعت حوضه آبریز اطراف سد ۱۷ کیلومتر مربع با شیب ۴۰ تا ۶۰ درجه است [۹۵]. جدول ۴-۶ مشخصات فنی و مهندسی سد باطله معدن مس سونگون را نشان می‌دهد. در این جدول با استناد به اطلاعات موجود از سد سونگون، که از دفتر فنی آن طی بازدید به عمل آمده در مرداد ماه ۱۳۹۴ تهیه گردیده است، و اطلاعات آن در مرداد ۱۳۹۵ به روز رسانی شده است در دو حالت وضعیت فعلی و وضعیت نهایی تشریح شده است. همان‌طور که در جدول به آن اشاره شده است، ارتفاع نهایی سد ۱۸۳ متر و عرض تاج ۲۰ متر خواهد بود. بیشترین عمق سد ۱۰۳ متر در پشت دیواره سد است که در حال حاضر از مواد باطله پر شده

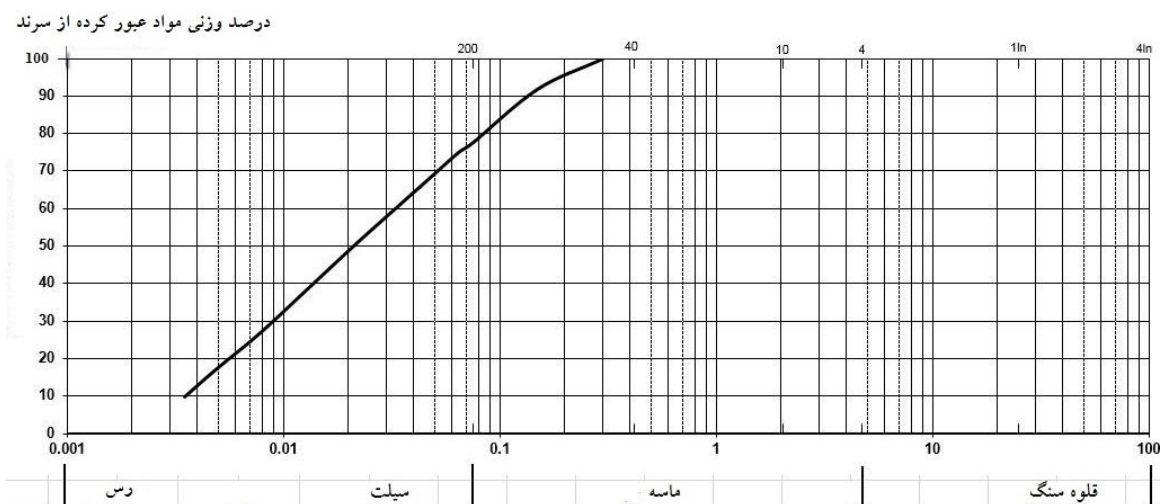
است. در این سد، شیب دیواره بالایی ۲:۱، و شیب دیواره پایینی ۱: ۱/۵ در نظر گرفته شده است. در پیوست شماره ۲، تصاویر سد باطله معدن مس سونگون از دو نمای کلی سد و تاج و دیواره سد آورده شده است.

جدول ۴.۶ مشخصات فنی سد باطله معدن مس سونگون [۹۵].

مشخصات فنی سد باطله معدن مس سونگون	واحد	وضعیت فعلی	وضعیت نهایی
تراز پی از سطح آزاد دریا	متر	۲۱۳۰	-
تراز سد از سطح آزاد دریا	متر	۲۲۵۰	۲۳۱۳
ارتفاع سد	متر	۱۲۰	۱۸۳
طول تاج سد	متر	۶۰۰	۱۲۰۰
عرض تاج	متر	۷۰	۲۰
حجم آب	میلیون متر مکعب	۱/۸	۲
حجم باطله موجود	میلیون متر مکعب	۴۰	۲۳۵
حجم کل مخزن	میلیون متر مکعب	۶۷	۲۷۰
بیشترین عمق سد	متر	۱۰۳	-
شیب دیواره بالایی	بدون واحد	۲:۱	-
شیب دیواره پایینی	بدون واحد	۱: ۱/۵	-
ضخامت هسته رسی	متر	۵/۲ (تا ارتفاع ۴۰ متری سد) ۴۰ (تا ارتفاع ۷۰ متری سد)	-
حجم خاکریزی	میلیون متر مکعب	۸/۵	-
ارتفاع سطح آزاد	متر	۵	-

۱.۲.۶ مواد باطله

در فصل دوم اشاره شد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد باطله تاثیر مهمی در پایداری شیب سدهای باطله دارند. لذا در این بخش به بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد باطله معدن مس سونگون پرداخته می‌شود. برای طراحی و ترفیع سد باطله سونگون مطالعات متعددی توسط شرکت مشاور مهندسی آب طوس و توسط حفر لاگ صورت گرفته است. ۲۲ لاگ در دو تکیه گاه شمالی و جنوبی، سه لاگ در مواد باطله و پشت دیواره سد، دو لاگ در دیواره سد و یک لاگ در تاج سد حفر شده است. در نمونه برداری‌های انجام شده از مواد باطله و آزمایش‌های ژئوتکنیکی صورت گرفته (تحت استاندارد ASTM)، مشخص گردید که دانه بندی مواد باطله از محدوده رس تا ماسه است و بیشترین مواد باطله دانه بندی در ابعاد رس قرار دارند، به طوری که ۸۰ درصد مواد باطله از سرند ۲۰۰ مش عبور می‌کنند. شکل ۳-۶ منحنی دانه بندی مواد باطله را نشان می‌دهد [۹۶].

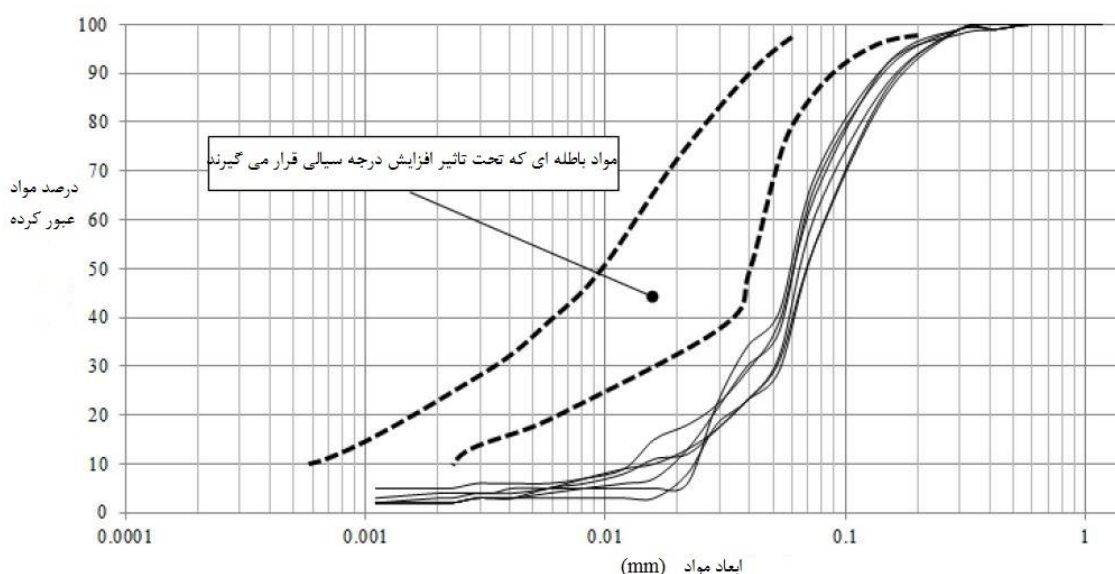


شکل ۳.۶ منحنی دانه بندی مواد باطله سد سونگون [۹۶]

منحنی دانه بندی موادی که تحت تاثیر افزایش درجه مایع شدگی قرار می‌گیرند در سال ۱۹۸۰ توسط ایشی هارا^۱ ارائه شد [۷۷، ۹۷]. شکل ۴-۶ منحنی توزیع دانه بندی این مواد باطله را نشان داده می‌دهد. موادی که تحت تاثیر امواج لرزه‌ای و تنش‌های حلقوی، پتانسیل افزایش درجه سیالی

^۱ Ishihara

دارند، با ابعادی بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی متر بوده به طوری که در این ناحیه توزیع دانه بندی یکنواختی ندارند. در این مواد پس از عبور از ناحیه d_{40} تا ناحیه d_{70} ، مواد باطله دارای ابعاد یکسان است. این امر می تواند با ویژگی کانی سازی ماده معدنی مرتبط باشد. با توجه به این شکل می توان دریافت که منحنی دانه بندی مواد باطله معدن مس سونگون با توزیع دانه بندی یکنواخت، با نمونه های مورد مطالعه در تحقیق ایشی هارا مطابقت ندارند. در مطالعه مواد باطله این معدن، حد مایع شدگی برای آنها در آزمایشات تعیین نشد که با برخی از نتایج معادن مس در کانادا مطابقت دارد.



شکل ۴.۶ منحنی دانه بندی مواد باطله تحت تاثیر افزایش درجه سیالی [۹۷، ۷۷]

بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی مواد باطله سد سونگون، اطلاعات برخی از ویژگی های مواد باطله اندازه گیری شده است. بر این اساس، نیروی چسبندگی موثر مواد باطله $5/52 \text{ kg/cm}^2$ و زاویه شکست موثر $25/8$ درجه است. از این دو ویژگی برای محاسبه تنش برشی و بیشینه نیروی برشی وارد بر سد باطله استفاده خواهد شد. فشار منفذی مواد باطله با میانگین $1/76$ روی پایین بودن نیروی چسبندگی تاثیر گذار بوده است. این موضوع می تواند نشان دهنده زمان نمونه گیری ها باشد چرا که ته نشینی مواد باطله کامل صورت نگرفته است و ممکن است مربوط به زمانی باشد که مواد باطله از روی تاج سد وارد می شوند. جدول ۵-۶ خلاصه ای ویژگی های ژئوتکنیکی مواد باطله را نشان می دهد. متوسط چگالی مواد باطله $2/67$ بوده است و نمونه ها در شرایط اشباع با متوسط درجه اشباع 92 درصد به ثبت رسیده اند. متوسط نسبت تخلخل $0/16$ درصد و متوسط ضریب تحکیم $0/36$

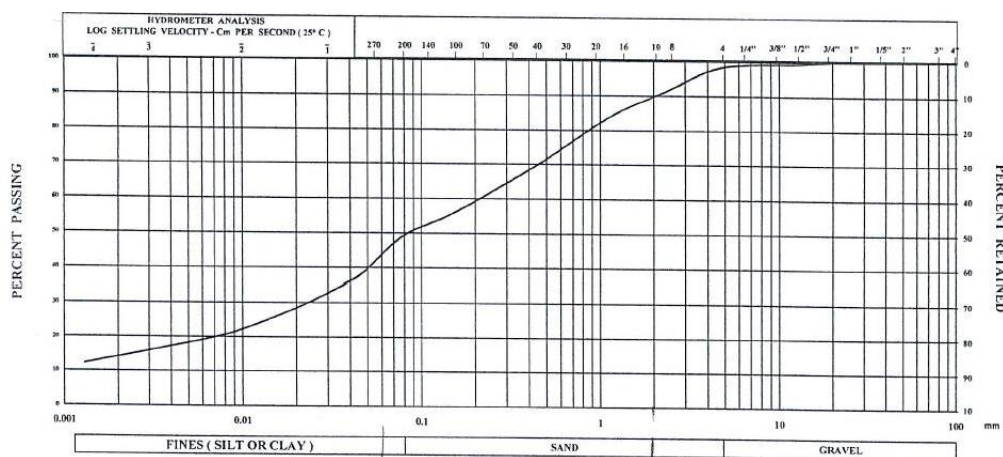
cm^2/min اندازه گیری شد. که ارقام حاصل با متوسط مواد باطله دانه ریز مطابقت دارد. همچنین ضریب تحکیم با نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد. متوسط نرخ نفوذپذیری مواد باطله معدن مس سونگون $0.1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ثبت شده است. همچنین لازم به ذکر است عمق لاگ‌های حفر شده در مواد باطله کم و تا عمق ۵۰ سانتی متری بوده است. با توجه به ارتفاع مواد باطله پشت سد، که بیش از ۱۰۰ متر است، برای بررسی خواص مواد باطله تحکیم یافته، لازم است عمق بیشتری از مواد موردی بررسی قرار گیرد. اطلاعات جدول ۵-۶ بر گرفته از منبع [۹۶] است.

جدول ۵.۶ مشخصات مکانیک خاک باطله معدن مس سونگون بر گرفته از [۹۶]

مشخصات مواد سد باطله معدن مس سونگون	واحد	میانگین	واریانس (بدون واحد)	بیشترین میزان	کمترین میزان
نیروی چسبندگی موثر	kg/cm^2	۵/۵۲	۰/۰۷	۰/۴	۰/۶
زاویه شکست موثر	درجه	۲۵/۸	۰/۹	۲۴/۷	۲۷/۱
وزن مخصوص	بدون واحد	۲/۷	۰/۰۱	۲/۶۹	۲/۶۶
مقاومت برشی	kg/cm^2	۱/۵۹	۰/۸۵	۴/۱۱	۰/۷۷
تنش نرمال	kg/cm^2	۴	۳/۴۴	۱۸/۳	۰/۹۹۷
فشار منفذی	kg/cm^2	۱/۷۶	۰/۹۶	۳/۳	۰
نسبت تخلخل	درصد	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۷۷	۰/۴۸
نفوذ پذیری	cm/s	0.1×10^{-7}	1.03×10^{-7}	4.6×10^{-7}	1.58×10^{-8}
نرخ تحکیم (C_v)	cm^2/min	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۷۴	۰/۲

۲.۲.۶ فونداسیون سد

در آماده سازی فونداسیون، در ابتدا منطقه مناسب توسط شرکت ATC تعیین گردید. پس از پاک سازی منطقه از سکنه، منازل و گیاهان، لایه فوقانی^۱ خاک پاک سازی شد. سپس آماده سازی نوع ۱ از عمق ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی متری سطح پی صورت گرفت. در این قسمت، لایه‌های سطحی و هوازده برداشته شد تا به سنگ بستر مناسب دسترسی حاصل شود. در مناطقی که شیب افقی یا عمودی بیش از ۱:۰/۵ باشد لازم است تا شیب پی اصلاح گردد. این کار یا از طریق انفجار در پی و برداشت مواد اضافی صورت می‌پذیرد و یا ناحیه توسط موادی با مقاومت فشاری ۱۵ مگا پاسکال پر می‌شود. از این مواد در مناطقی از پی که دارای درزه و شکست بودند نیز استفاده شد. توسط ماشین آلات سنگین و بولدوز متراکم شد نمونه برداری و آزمایش چگالی درجا بر روی فونداسیون تحت شرایط استاندارد ASTM^۲ بر روی فونداسیون صورت گرفت. بعد از آن جاده و رمپ مورد نیاز برای حمل مواد و ساخت سد احداث گردید. دانه بندی فونداسیون بیشتر در ابعاد قلوه سنگ است. شکل ۵-۶ دانه بندی مواد پی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های ژئوتکنیکی پی از طریق حفر لاگ برای مطالعه نفوذپذیری صورت گرفت. ویژگی‌های پی سد نیز توسط ژئوفیزیکی لرزه‌ای (انکساری) و ژئوفیزیک الکتریکی (محاسبه مقاومت ویژه ظاهری با آرایه شلومبرژه) صورت گرفت که نتایج آن پی مناسب بدون درزه و شکاف را اعلام نمود [۹۸، ۹۶].



شکل ۵.۶ منحنی دانه بندی مواد پی [۹۸]

¹ Top Soil

² American Society for Testing and Materials

جدول ۶-۶ ویژگی‌های ژئوتکنیکی فونداسیون سد را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، میانگین نفوذپذیری پی سد $39/4 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه است که با توجه به میزان مناسب برای پی سدهای باطله (زیر 10^{-9} m/s)، میزان نفوذپذیری بالا است. متوسط وزن مخصوص پی $1/57$ gr/cm² گیری شده است. متوسط گرادیان هیدرولیک نیز $124/5$ تخمین زده شده است. از گرادیان هیدرولیک و میزان نفوذ پذیری می‌توان در بررسی نشتی و شکست رگاب در پی سد استفاده کرد. اطلاعات جدول ۶-۶ از منبع [۹۶] بر گرفته شده است.

جدول ۶.۶ مشخصات فونداسیون سد باطله معدن مس سونگون بر گرفته از [۹۶]

مشخصات مکانیک خاک فونداسیون معدن مس سونگون	واحد	میانگین	واریانس (بدون واحد)	بیشترین میزان	کمترین میزان
نیروی چسبندگی موثر	MPa	۰/۴۶	۰/۱۷	۰/۶	۰/۱۵
زاویه شکست موثر	درجه	۳۰/۷۵	۲/۷۵	۳۵	۲۷/۵
تنش برشی	KPa	۲۲	۰/۸۵	۳/۷	۱/۴
حد مایع شدگی	%	۴۰	۷/۵	۵۵	۲۶
حد پلاستیسیته	%	۱۷	۴/۸۶	۲۴	۱۰
نفوذپذیری	متر بر ثانیه	$39/4 \times 10^{-7}$	$29/6 \times 10^{-7}$	$87/7 \times 10^{-7}$	$0/11 \times 10^{-7}$
گرادیان هیدرولیک	بدون واحد	۱۲۴/۵	۷۴	۲۱۵	۸/۶
چگالی	gr/cm ³	۱/۵۷	۰/۰۷۱	۱/۷۴	۱/۴۸

۳.۲.۶ بدنه سد باطله

دیواره و بدنه سد از انباشت ۱۰ منطقه سنگ و خاک تشکیل شده است. این مناطق به شرح زیر است.

منطقه ۱: هسته که از مواد رس، شن و ماسه رسی، و یا شن رسی تشکیل شده است که از قسمت جنوبی سد بالارونده و سد شروع کننده^۱ آغاز می‌شود.

منطقه ۲A و ۲B که مواد فیلترکننده هستند و زون ۲C که راکفیل است که به عنوان زه کش عمل می‌کند. از سنگ‌های خرد شده اطراف سد در این منطقه استفاده می‌شود.

منطقه ۳A، ۳B و ۳C که مواد راکفیل هستند. در این منطقه نیز از سنگ‌های خرد شده اطراف سد در استفاده می‌شود.

منطقه ۳D که منطقه ای است که مواد آن به صورت تصادفی انتخاب شده و می‌تواند انواع مختلفی داشته باشد.

منطقه ۴A نیز از مصالح راکفیل است و به‌عنوان محافظ و نگه دارنده شیب از آن استفاده می‌شود. ابعاد این منطقه نباید از ۰/۶ متر بیشتر باشد.

خصوصیات مناطق فوق به شرح زیر است [۹۶].

منطقه ۱ هسته:

هسته رسی از نوع متقارن بوده که در بالادست و پایین دست با شیب ۰/۵ درصد افقی و ۱ درصد عمودی اجرا شده است. این زون طبق مشخصات فنی حائز مشخصات زیر است:

۱- حداکثر مواد آلی نباید بیش از ۱ درصد مصالح حاصل از عبوری از الک ۰/۴۲۵ میلی‌متر (الک نمره ۴۰) باشد. همچنین بیشینه حد پلاستیسیته هسته ۳۰ و کمینه آن ۱۰ درصد است. و حد مایع شدگی هسته در بیشترین حالت ۶۰ و در کمترین حالت ۳۰ درصد خواهد بود.

۲- حداقل مواد ریزدانه این مصالح از لحاظ وزنی باید دارای بیش از ۳۰ درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر (الک نمره ۲۰۰) باشد.

۳- حداکثر اندازه مصالح موجود در این زون نباید بیش از ۱۵۰ میلی‌متر باشد [۹۶].

¹ Starter Dam

منطقه ۲A و ۲B:

این منطقه از مصالح ریز دانه تشکیل شده است و بهتر است از شن و ماسه با منحنی دانه بندی با توزیع خوب و یکنواخت استفاده کرد. برای تامین مواد این قسمت نیز از سنگ‌های اطراف سد استفاده می‌شود. اما با توجه به اینکه کوه‌های اطراف از سنگ‌های آذرین هوازده تشکیل شده است، نباید از مواد هوازده شده در این زون استفاده کرد. همچنین مواد نباید حد پلاستیسیته بالایی داشته باشند. تراکم پذیری این ناحیه در سد باید به خوبی صورت پذیرد [۹۶].

منطقه ۳A، ۳B و ۳C:

این منطقه از مصالح راکفیل است و ویژگی‌های آن از نظر ابعاد دانه بندی، ضخامت و هوازده‌گی مطابق جدول ۶-۷ است. مصالح این زون باید از منحنی دانه بندی خوب و با توزیع دانه بندی یکنواخت باشد. میزان مواد ریزدانه آن به قدر کافی باشد تا فضای خالی بین قطعه سنگ‌های بزرگ‌تر پر شود. حداکثر مواد آلی نباید بیش از ۱ درصد مصالح حاصل از عبوری از الک ۰/۴۲۵ میلی‌متر (الک نمره ۴۰) باشد [۹۶].

جدول ۶.۶ مشخصات منطقه ۳A، ۳B و ۳C از نظر ابعاد دانه بندی، ضخامت و هوازده‌گی [۹۶]

منطقه راکفیل	میزان مجاز هوازده‌گی	ضخامت لایه (mm)	بیشترین اندازه مجاز ابعاد (mm)	کمترین اندازه مجاز ابعاد (mm)	درصد عبوری از الک ۱۹ میلی‌متر (درصد)	درصد عبوری از الک ۲/۳۶ میلی‌متر (درصد)
۳A	بدون محدودیت	۴۰۰	۴۰۰	> ۱۰۰	۴۰-۰	۱۵-۰
۳B	از سنگ بکر تا هوازده‌گی متوسط	۸۰۰	۸۰۰	> ۱۰۰	۳۰-۰	۱۰-۰
۳C	بدون محدودیت	۸۰۰	۸۰۰	> ۱۰۰	۴۰-۰	۱۵-۰

شکل ۶-۶ بدنه سد باطله معدن مس سونگون را پس از پایان سه مرحله ترفیع و در ارتفاع حدود ۱۲۰ متری نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بخش بیشتری از بدنه سد مواد باطله از ۳B تشکیل شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است، هسته رسی در ابتدای سد شروع کننده قرار دارد. پس از آن در مراحل بعدی سد، هسته رسی در مرکز سد بالارونده قرار می‌گیرد. این بخش در توالی مختلف از خاکریزی و متراکم سازی به صورت یکنواخت نبوده و حالت Z دارد. علت این امر افزایش مقاومت سد در برابر نشتی احتمالی آب از بدنه سد است. با وجود اطلاعات مورد بحث و بررسی، برای بررسی و تخمین احتمال شکست سد باطله به اطلاعات ژئوتکنیکی مواد و مصالح به کار رفته در سد نیازمند است. به این منظور، با توجه به اینکه قسمت اصلی دیواره سد باطله از مصالح راکفیل تشکیل شده است، ویژگی‌های ژئوتکنیکی بدنه سد در این پایان نامه، از اطلاعات جدول ۶-۸ که از منابع [۱۰۱، ۱۰۰، ۹۹] استخراج شده است، مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از مطالعات منابع ذکر شده که بر روی مصالح راکفیل با دانه بندی حدود ۸۰-۱۰۰ میلیمتر و بالاتر، میانگین و واریانس زاویه شکست محاسبه گردید. میانگین زاویه شکست برای مصالح راکفیل، ۴۲ درجه محاسبه گردید. در محاسبه تنش نرمال، نیروی چسبندگی، و تنش برشی از اطلاعات حاصل از حفر و برداشت لاگ در معدن مس سونگون استفاده شد. بر این اساس میانگین نیروی چسبندگی موثر ۶/۸۴ مگاپاسکال محاسبه شد. میانگین تنش برشی ۵۴/۱۳ مگاپاسکال و میانگین تنش نرمال ۴۸ مگاپاسکال محاسبه شد [۱۰۱، ۱۰۰، ۹۹].

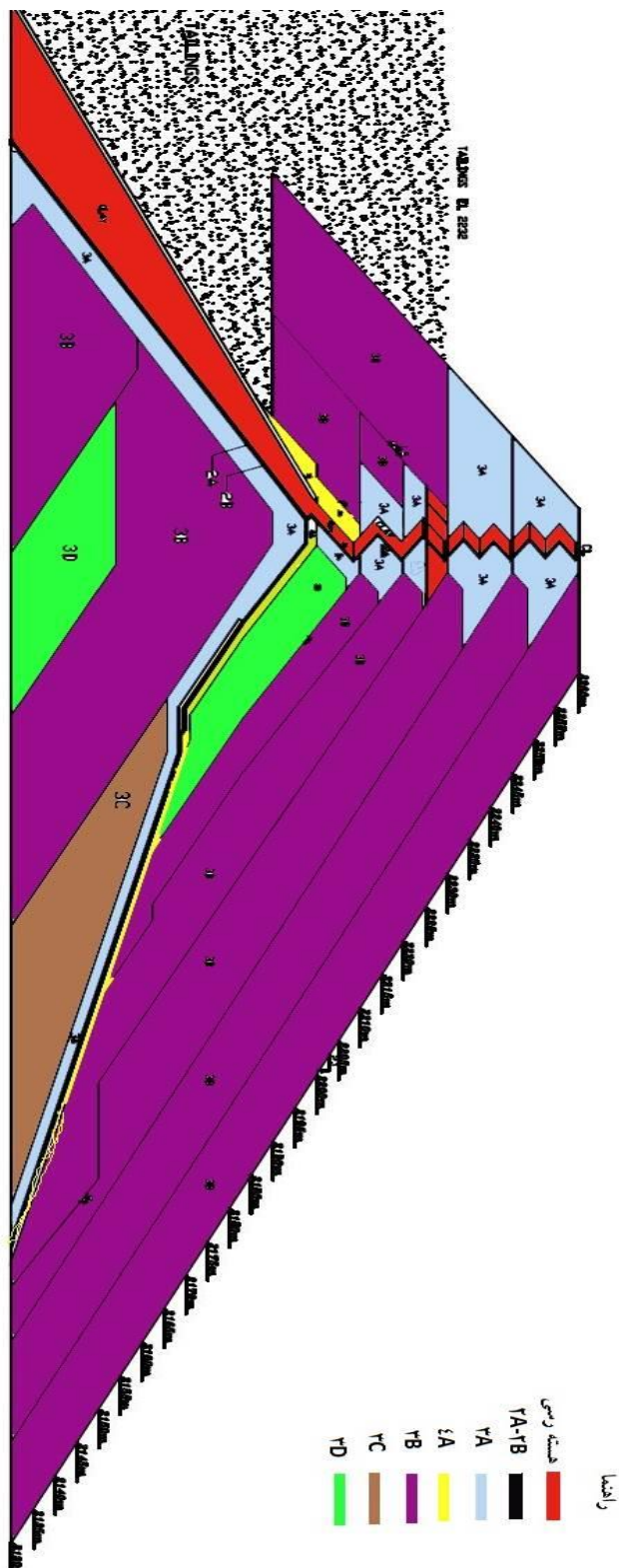
همچنین، داده‌های حاصل از حفر گمانه‌ها بر روی بدنه سد، مصالح دارای درزه و شکاف با زاویه ۶۰ تا ۷۰ درجه هستند. میزان بازشدگی درزه‌ها باز برآورد شده است. از نظر هوازدگی در درجه هوازدگی متوسط بوده و ذرات آن در ابعاد شن و ماسه است [۹۶].

۴.۲.۶ تاج سد

ویژگی‌های ژئوتکنیکی تاج سد باطله با استفاده از داده‌های حاصل از حفر گمانه، مصالح تاج سد از نظر هوازدگی در دسته هوازدگی متوسط تا به شدت هوازده تقسیم بندی می‌شوند. زاویه درزه و شکاف این مصالح به طور متوسط ۶۰ درجه و بازشدگی درزه‌ها در حالت باز هستند. میانگین وزن مخصوص مصالح تاج سد ۲/۷ است. نیروی چسبندگی موثر 0.6 kg/cm^2 با زاویه شکست ۲۴ درجه ثبت شده است [۹۶].

جدول ۸.۶ ویژگی‌ها ژئوتکنیکی دیواره سد (مصالح راکفیل) [۱۰۱،۱۰۰،۹۹]

مشخصات مکانیک دیواره سد معدن مس سونگون	واحد	میانگین	واریانس (بدون واحد)	بیشترین میزان	کمترین میزان
نیروی چسبندگی	KPa	۶۸۴	۱/۵	-	-
زاویه شکست	درجه	۴۲	۳/۷	۵۴/۶	۳۵/۴
تنش برشی	KPa	۵۴۱	۲۵/۸	۱۷۲/۵	۶/۸۴
تنش نرمال	KPa	۴۸۰	۱۷	۴۸	۰
حد مایع شدگی	%	-	-	۶۰	۳۰
حد پلاستیسیته	%	-	-	۳۰	۱۰



شکل ۶.۶ مراحل ترفیع سد باطله سونگون و مصالح به کار رفته در دیواره و تاج سد برگرفته از

[۹۶]

روش مورد استفاده در برای محاسبه احتمال به صورت زیر خواهد بود:

- در مورد پارامترهایی که برای آنها فاکتور ایمنی تعریف شده است، با توجه به عدم قطعیت پارامترهای ورودی مدل، از روش شبیه ساز مونت کارلو و نیز تابع توزیع احتمال آنها استفاده خواهد شد. تابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی نرمال فرض شده‌اند. شبیه سازی در محیط نرم افزار @Risk ویرایش ۷/۵ انجام گرفت. میانگین و واریانس پارامترهای ورودی برای محاسبه توسط نرم افزار @Risk محاسبه گردید.
- شبیه ساز مونت کارلو با انتخاب متغیر تصادفی و پیدا کردن نظیر آن در معکوس تابع توزیع تجمعی (تابع توزیع احتمال متغیر) به تعدادی که به آن دستور داده می‌شود شبیه سازی را انجام می‌دهد. تعداد شبیه سازی‌های صورت گرفته در این تحقیق ۱۰ هزار بار خواهد بود. با افزایش تعداد شبیه سازی‌ها، تابع توزیع تابع محدود حالت با تابع محاسبه احتمال شکست به تابع توزیع نرمال نزدیک تر و سطح آن یکنواخت تر خواهد شد. به این ترتیب در محاسبه احتمال شکست با استفاده از تئوری قابلیت اطمینان ساختاری، قابلیت اطمینان در سطح سه و از نوع مرتبه اول محاسبه می‌شود.
- در این بخش ذکر این نکته ضروری است که داده‌های حاصل از حفر لاگ و مطالعات ژئوتکنیکی سد باطله بیشتر مربوط به دو تکیه گاه شمالی و جنوبی سد معطوف است. لذا بخشی از اطلاعات مورد نیاز این پروژه از نتایج مطالعات محققین دیگر (در محاسبه احتمال شکست شیب و اطلاعات مورد نیاز آن در مورد مصالح استفاده شده در دیواره سد) استفاده شده است.
- برای محاسبه سایر پارامترهای موثر در شکست سد که فاکتور ایمنی آن تعریف نشده است، از مقادیر اندازه گیری شده و یا میانگین آنها استفاده خواهد شد که در این حالت قابلیت اطمینان در سطح ۱ و ۲ محاسبه می‌شود. همچنین تابع توزیع احتمال داده‌ها نرمال فرض شده است.

۵.۲.۶ محاسبه احتمال شکست شیب

در فصل پنجم برای محاسبه شکست سد باطله، به دلیل شکست شیب و دیواره سد، رابطه ۵-۱۰ ارائه شد. در این رابطه حداکثر میزان افزایش تنش برشی و نیروی حاصل از آن بر دیواره سد در نظر قرار داده شد.

حداکثر میزان تنش برشی مواد باطله معدن مس سونگون، از رابطه ۵-۱۱ محاسبه می‌شود. به این ترتیب، $\Delta\tau_{Maxtail}$ با توجه به وزن مخصوص مواد باطله معدن مس سونگون که حدود 27 kN/m^3 و زاویه شکست موثر حدود ۴۲ محاسبه گردیده است، مطابق رابطه ۶-۱ است. حداکثر تنش برشی کل مواد باطله پشت دیواره سد با ارتفاع ۱۰۰ متر برابر ۲۴۳۱ کیلو پاسکال محاسبه شد.

$$\Delta\tau_{Maxtail} = 27H \tan 42 = 24.31H$$

$$\Delta\tau_{Maxtail} = 24.31 \times 100 = 2431 \text{ kN} / \text{m}^2 \quad (۱.۶)$$

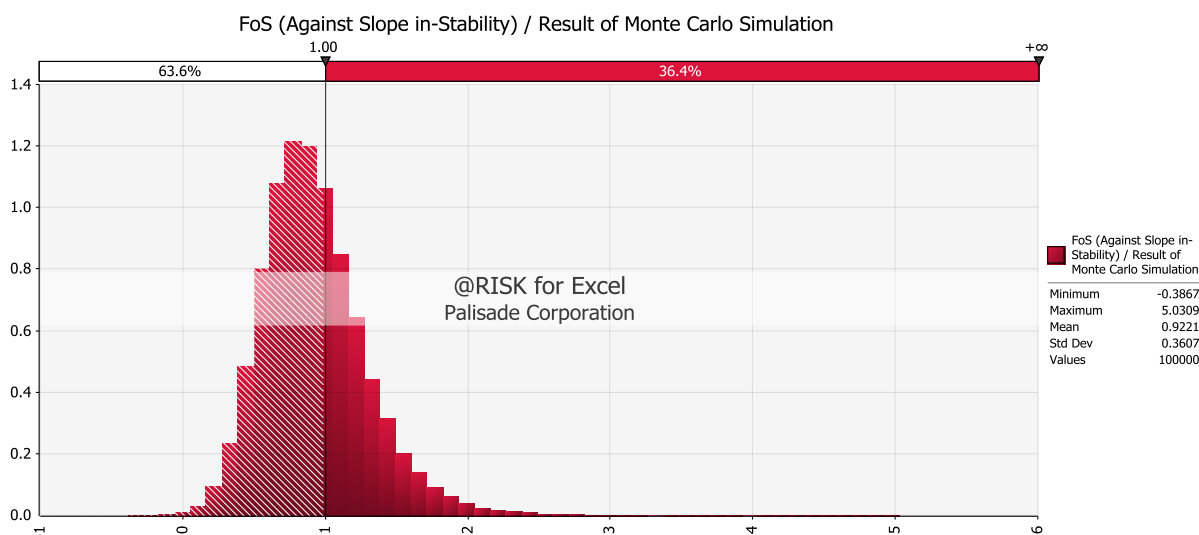
برای محاسبه فاکتور ایمنی پایداری شیب سد از پارامترهای جدول ۶-۹ استفاده شد.

جدول ۹.۶ پارامترهای استفاده شده در محاسبه فاکتور ایمنی شکست شیب بر گرفته از [۹۶]

پارامتر	واحد	میانگین	واریانس
نیروی چسبندگی موثر	KPa	۶۸۴	۱/۵
زاویه شکست موثر	درجه	۴۲/۲	۸/۳
تنش نرمال	KPa	۴۸۰	۱۷
تنش برشی موثر	KPa	۵۴۱	۱۰
حداکثر میزان تنش برشی مواد باطله	KPa	۲۴۳۱	-

پس از ورود داده‌ها به مدل، شبیه سازی مونت کارلو، شبیه سازی در محیط نرم افزار @RISK انجام شد. شبیه سازی ۱۰ هزار بار تکرار انجام شد. پس از انجام شبیه سازی احتمال شکست سد باطله سونگون در اثر شکست شیب، ۵۹ درصد محاسبه گردید. تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست شیب، در شکل ۶-۷ نشان داده شده است. با توجه به

نتایج حاصل، احتمال اینکه ضریب ایمنی شکست دیواره سد کمتر از ۱ باشد، ۶۳/۶ درصد است. نتایج حاصل از محاسبه احتمال شکست سد به دلیل شکست شیب در جدول ۱۰-۶ آورده شده است.



شکل ۷.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست شیب

خلاصه نتایج شبیه سازی مونت کارلو روی دیواره سد باطله و در اثر شکست شیب، در جدول ۱۰-۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۰.۶ توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست شیب و محاسبه احتمال شکست

احتمال (درصد)	ضریب ایمنی و احتمال شکست
۶۳/۶	احتمال $FOS < 1$
۰/۹۲	میانگین تابع توزیع احتمال FOS
۰/۳۶	انحراف معیار تابع توزیع احتمال FOS
-۰/۲۲	شاخص قابلیت اطمینان (β)
۵۹	احتمال شکست قابلیت اطمینان (P_F)

در مطالعات ویلیامز در سال ۲۰۱۵ بر روی مواد باطله و تاثیر کاهش آب محتوا و فشار منفذی در اثر تحکیم مواد و تاثیر وزن آنها در اثر زه کشی مواد باطله^۱، نشان داد که با کاهش آب محتوا و تحکیم مواد باطله تنها در اثر نیروی وزن تنش برشی موثر تا عمق ۵ متری تا مرز ۵۰ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد در حالی که تنش موثر و افزایش فشار تنش برشی تا عمق ۵ متری در اثر زه کشی به بیش از ۲۰۰ کیلو پاسکال خواهد رسید. شکل ۶-۸ نمایش شماتیکی از رفتار مکانیکی مواد باطله و روند افزایش تنش برشی را نشان می‌دهد. هدف بررسی افزایش فشار، تعیین ارتفاع مناسب دیواره سد است [۷۵].

در معدن مس سونگون، باطله‌ها از کارخانه مستقیماً و بدون زه کشی وارد سد می‌شوند. میزان تنش برشی محاسبه شده برای عمق ۵ متری، بیش از محاسبات در مطالعه ویلیامز است که علت آن تفاوت در وزن مخصوص مواد باطله و تاثیر آن است. با این وجود با افزایش زمان میزان تحکیم و با کاهش فشار منفذی، تنش برشی افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر تاثیر امواج لرزه‌ای، در میزان تنش برشی مواد باطله موثر خواهد بود. با وجود اینکه زه کشی مواد باطله، باعث افزایش فشار ناشی از افزایش تنش برشی در مواد باطله می‌شود، خطر افزایش درجه سیالی که یکی از مهمترین عوامل شکست سدهای باطله است، را کاهش می‌دهد. همچنین در صورت زه کشی مواد باطله، میزان و نرخ تحکیم قابل ارزیابی بوده و با محاسبه تنش برشی، طراحی مناسب سد محقق خواهد شد.

بر اساس فرمول ۲-۱، رفتار فشار آب منفذی اضافی مواد باطله به شرح رابطه زیر است [۴۱].

$$D = 100m$$

$$T = 13years$$

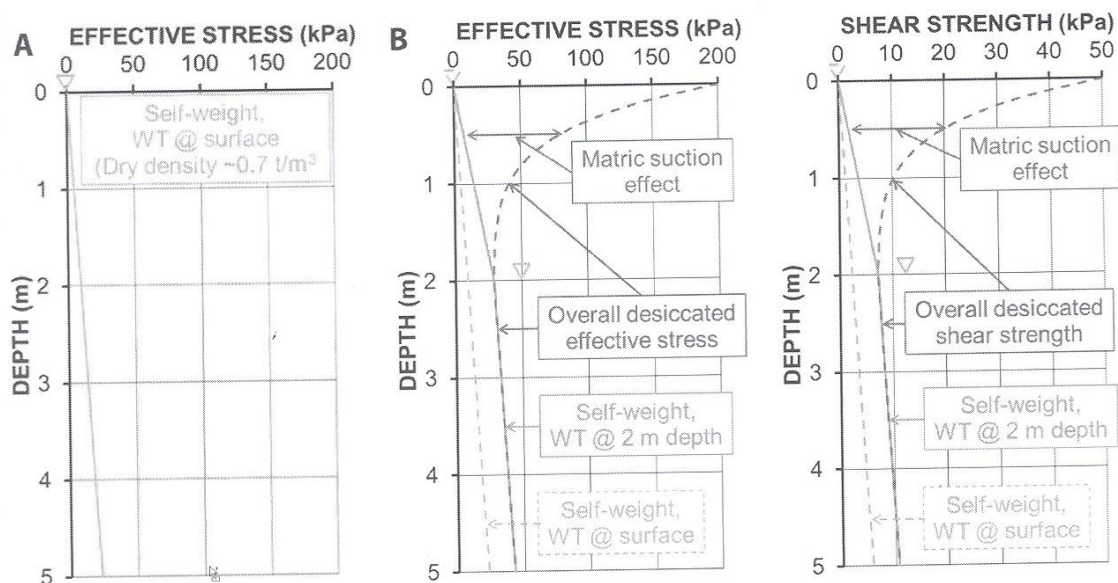
$$m = 100/13 = 7.7m / year \quad (2.6)$$

$$C_v = 18.9m^2 / year$$

$$T = 7.7^2 \times 13/18.9 = 3.137$$

با توجه به شکل ۲-۱ و نمودار رفتار آب منفذی اضافی ارائه شده توسط گیبسون، بیشترین میزان T برابر ۶۴ است. T محاسبه شده برای معدن مس سونگون نشان می‌دهد که درصد قابل توجهی مواد باطله تحکیم یافته‌اند و با کاهش فشار آب منفذی اضافی، احتمال افزایش درجه سیالی کاهش اما مقاومت برشی مواد افزایش می‌یابد.

¹ Dewatering of Tailings



شکل ۸.۶ نمایش افزایش تنش برشی در مواد باطله (آ) در اثر نیروی وزن (ب) در اثر زه کشی [۷۵]

۱.۵.۲.۶ محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی

در مورد سدهای باطله، احتمال افزایش درجه سیالی برای دیواره سد و مواد باطله محاسبه خواهد شد. در محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی، از رابطه ۵-۱۷ استفاده شده است. در محاسبه نسبت تنش حلقوی CSR برای تعیین تنش کل بار قائم مواد باطله و دیواره سد، از رابطه ۶-۳ استفاده شد [۱۰۲].

$$\Delta\sigma_{vo} = \frac{p}{z^2} I_1$$

$$I_1 = \frac{3}{2\pi} \times \frac{1}{\left[\left(\frac{r}{z} \right)^2 + 1 \right]^{5.2}} \quad (3.6)$$

در این رابطه، تنش کل بار قائم، p برابر است با σ_3 تنش اصلی وارد بر سد و مواد باطله در عمق $Z=100$ ، r فاصله شعاعی محل p تا محل اندازه گیری تنش کل بار قائم است که در این حالت برابر صفر است. برای محاسبه تنش موثر بار قائم، باید فشار آب منفذی از تنش کل بار قائم کسر گردد.

بیشینه شتاب افقی سطح زمین، از منبع [۱۰۳] اخذ شده است. در این تحقیق که توسط رمزی و جلالی در سال ۲۰۱۵ بر روی منطقه اهر-ورزقان صورت گرفته است، با مطالعه تاریخی زلزله در این منطقه، و همچنین مطالعه بیشینه شتاب افقی سطح زمین ثبت شده در زلزله‌های منطقه اهر-ورزقان، با استفاده از روش شبیه سازی بر روی داده‌های لرزه‌ای و همچنین مطالعات زمین آماری، شتاب افقی سطح زمین، ۰/۲۲ برابر شتاب جاذبه زمین در منطقه مورد مطالعه تخمین زده شد [۱۰۳].

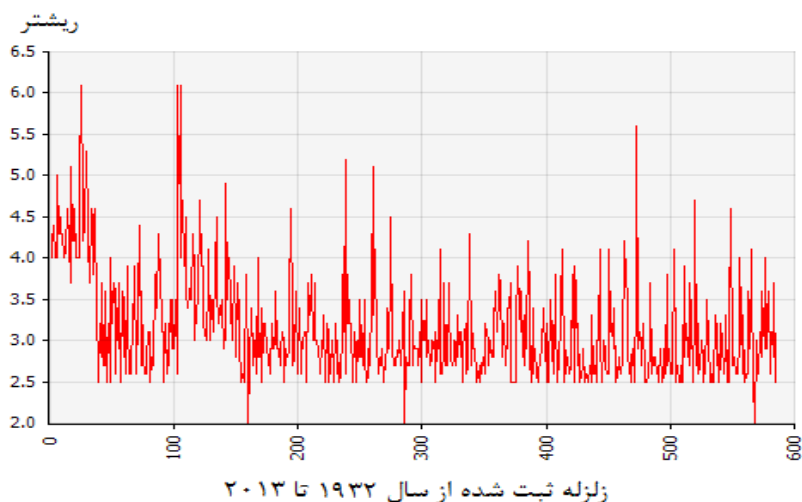
برای محاسبه ضریب کاهش تنش برشی (r_d)، با توجه به عمق ۱۰۰ متری، از رابطه ۵-۱۵ استفاده شد. در این رابطه برای پیش بینی بزرگی زمین لرزه در این منطقه از اطلاعات زمین لرزه در منطقه اهر آذربایجان از سال ۱۹۳۲ تا سال ۲۰۱۳، استفاده شد. جدول ۶-۱۱ خلاصه اطلاعات زلزله در این منطقه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه میانگین بزرگی زلزله در این منطقه ۳/۱۵ ریشتر است، همین عدد در محاسبه r_d مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به زلزله در منطقه اهر ورزقان از دفتر فنی معدن مس سونگون اخذ شده است [۱۰۴].

جدول ۱۱.۶ اطلاعات مربوط به زلزله در منطقه اهر بر گرفته از [۱۰۴]

اطلاعات آماری زلزله	واحد	میانگین	واریانس	بیشترین میزان	کمترین میزان
زلزله در منطقه اهر	ریشتر	۳/۱۵	۰/۶	۶/۱	۲

شکل ۶-۹ سری زمانی مربوط به اطلاعات زمین لرزه‌های ثبت شده از سال ۱۹۳۲ تا ۲۰۱۳ که ۵۸۵ زمین لرزه است را نشان می‌دهد (برگرفته از [۱۰۳]). در این بررسی مشخص شد که به ازای هر ۵۰ زلزله با متوسط حدود ۳ ریشتر یک زلزله با بزرگی بیش از ۵ ریشتر رخ می‌دهد. در محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی، برای محاسبه بزرگی زلزله در مقیاس مومنت^۱، با توجه به مطالعات انجام شده توسط موسوی و همکاران [۱۰۵] در بالاترین شدت زلزله در این مقیاس برابر ۶/۳۵ بوده است.

^۱ Moment Magnitude



شکل ۹.۶ سری زمانی وقوع زلزله در منطقه اهر بر گرفته از [۱۰۴]

پارامترهای لازم برای محاسبه افزایش درجه سیالی در جدول ۶-۱۲ محاسبه شده است. همچنین ضرایب رگرسیون گیری از جدول ۵-۲ استخراج شده است.

جدول ۱۲.۶ پارامترهای لازم در محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی

کمترین میزان	واحد	نماد علمی	پارامتر
۰/۲۲g	m/s^2	a_{max}	بیشترین شتاب افقی سطح زمین در منطقه اهر-ورزقان
۳/۱۵	ریشتر	M	متوسط بزرگی زلزله در منطقه اهر-ورزقان
۰/۵	-	r_d	ضریب کاهش تنش برشی
۶/۳۵	مومنت	M_w	شدت زلزله در مقیاس مومنت
۱۰/۱۳	پاسکل	P_a	فشار هوا
۲۲	-	$(N_1)_{60}$	میزان STP باقیمانده تصحیح شده
۳۴۰	کیلو پاسکل	$\Delta\sigma_{vo}$	تنش کل بار قائم مواد باطله
۳۲۰	کیلو پاسکل	$\Delta\sigma'_{vo}$	تنش موثر بار قائم مواد باطله
۷۰	درصد	FC	میزان مواد دانه ریز باطله

ادامه جدول ۱۲.۶ پارامترهای لازم در محاسبه احتمال افزایش درجه سیالی

پارامتر	نماد علمی	واحد	کمترین میزان
تنش کل بار قائم دیواره سد	$\Delta\sigma_{vo}$	کیلو پاسکل	۱۰۰۰
تنش موثر بار قائم دیواره سد	$\Delta\sigma'_{vo}$	کیلو پاسکل	۹۰۰
میزان مواد دانه ریز دیواره سد	FC	درصد	۳۰
نسبت تنش حلقوی مواد باطله	CSR	-	۰/۰۸
نسبت تنش حلقوی دیواره سد	CSR	-	۰/۰۸

پس از محاسبه ضریب ایمنی شکست شیب، احتمال افزایش درجه سیالی برای مواد باطله و بدنه سد، و همچنین احتمال وقوع زلزله در منطقه اهر-آذربایجان، نتایج احتمال شکست شیب سد باطله سونگون و درجه ریسک آن مطابق جدول ۶-۱۳ است. بر این اساس، احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست شیب، ۵۹ تخمین زده شد و درجه ریسک ۳۲۹۱ درصد به توان دو محاسبه گردید.

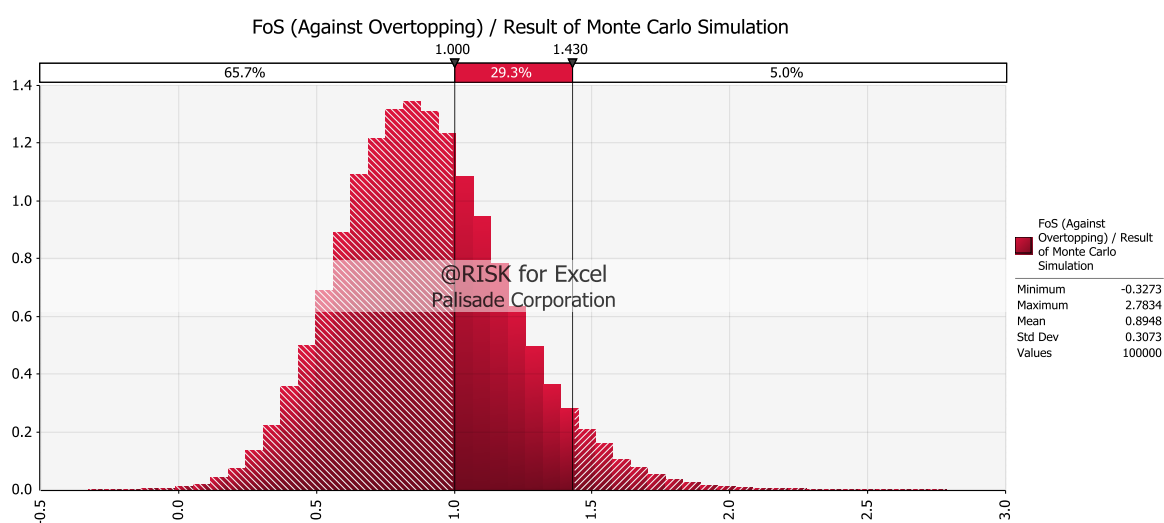
جدول ۱۳.۶ نتایج احتمال شکست شیب

احتمال عدم پایداری شیب (درصد)	احتمال افزایش درجه سیالی خاک (درصد)	احتمال افزایش درجه سیالی باطله (درصد)	احتمال وقوع زلزله بیش از ۴ ریشتر (درصد)	وزن موثر در شکست شیب سد (درصد)
۵۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۸/۳	۴۸/۹
مجموع احتمال شکست شیب = ۶۷/۳۰۶ درصد				
درجه ریسک = ۳۲۹۱ درصد به توان دو				

۶.۲.۶ محاسبه احتمال شکست لبریز

در محاسبه شکست لبریز، پس از بارش باران یا بالا آمدن سطح آب درون سد باطله، به میزان اختلاف ارتفاع دیواره سد و ارتفاع مواد باطله، آب پشت دیواره سد ۲۰ متر در نظر گرفته شد. بنابراین، فشار ناشی از آب پشت دیواره سد معادل ۰/۲ مگاپاسکال محاسبه شد. سایر پارامترهای موثر در محاسبه شکست شیب لبریز، مطابق جدول ۶-۹ است و از رابطه ۵-۱۲ استفاده شده است.

پس از ورود داده‌ها به مدل، شبیه سازی مونت کارلو، شبیه سازی در محیط نرم افزار @RISK انجام شد. شبیه سازی ۱۰ هزار بار تکرار انجام شد. پس از انجام شبیه سازی احتمال شکست سد باطله سونگون در اثر شکست لبریز، ۶۴ درصد محاسبه گردید. تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست لبریز، در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، احتمال اینکه ضریب ایمنی شکست دیواره سد به دلیل لبریز، کمتر از یک باشد، ۶۵/۷ درصد است.



شکل ۱۰.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست لبریز

خلاصه نتایج شبیه سازی مونت کارلو روی دیواره سد باطله و در اثر شکست شیب به دلیل لبریز، در جدول ۶-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۱۴.۶ توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست لبریز و محاسبه احتمال شکست

احتمال (درصد)	ضریب ایمنی و احتمال شکست
۶۵/۷	احتمال $FOS < 1$
۰/۸۹	میانگین تابع توزیع احتمال FOS
۰/۳۱	انحراف معیار تابع توزیع احتمال FOS
-۰/۳۵	شاخص قابلیت اطمینان (β)
۶۴	احتمال شکست قابلیت اطمینان (P_F)

۱.۶.۲.۶ محاسبه فرسایش سطحی

با توجه به فرسایش شدید تاج سد، درزه و شکاف و نیروی چسبندگی ناچیز، و البته قدرت متوسط بادهای محلی احتمال فرسایش سطحی، بر اساس جدول ۱۵-۶ در حد فرسایش متوسط در نظر گرفته شد.

جدول ۱۵.۶ احتمال فرسایش سطحی سد

احتمال فرسایش (درصد)	درجه آسیب سطح سد
۰/۰۵-۰	بدون آسیب
۱۵-۰/۰۶	آسیب کم
۴۰-۱۶	آسیب متوسط
۷۵-۴۱	خسارت شدید
۱۰۰-۷۶	شکست سطح و تاج سد

نتایج احتمال شکست لبریز در جدول ۱۶-۶ آمده است. که بر این اساس، احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست لبریز، ۶۴ درصد و درجه ریسک آن ۱۴۲۲ درصد به توان دو تخمین زده شد.

جدول ۱۶.۶ نتایج احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست لبریز

وزن موثر در شکست شیب سد به دلیل لبریز (درصد)	احتمال فرسایش سطحی (درصد)	احتمال عدم پایداری شیب لبریز (درصد)
۲۳/۷	۱۶	۶۴
مجموع احتمال شکست لبریز = ۸۰ درصد		
درجه ریسک = ۱۴۲۲ (درصد به توان دو)		

۷.۲.۶ محاسبه احتمال شکست رگاب

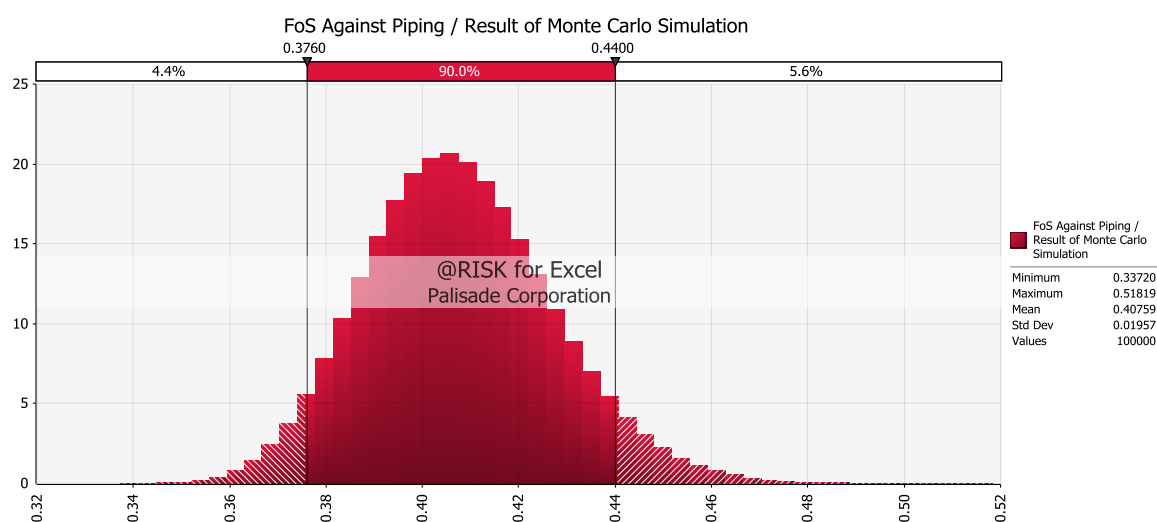
در این بخش برای محاسبه احتمال شکست رگاب در بدنه و پی سد، از اطلاعات مربوط به بدنه سد باطله استفاده می‌شود تا احتمال شکست رگاب در دیواره سد محاسبه شود. در محاسبه شکست رگاب از رابطه ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ استفاده می‌شود.

اطلاعات لازم در محاسبه ضریب ایمنی شکست رگاب در دیواره سد، در جدول ۶-۱۷ ارائه شده است. در محاسبه فشار ناشی از هد آب، در سدهای خاکریزه‌ای شکسته شده در اثر شکست رگاب به‌طور متوسط برابر با ۲۰ متر بوده است.

پس از ورود داده‌ها به مدل، شبیه سازی مونت کارلو، شبیه سازی در محیط نرم افزار @RISK انجام شد. شبیه سازی ۱۰ هزار بار تکرار انجام شد. پس از انجام شبیه سازی احتمال شکست سد باطله سونگون در اثر شکست لبریز، ۹۹ درصد محاسبه گردید. تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست شیب، در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، احتمال اینکه ضریب ایمنی شکست دیواره سد به دلیل لبریز، کمتر از یک باشد، ۱۰۰ درصد است.

جدول ۱۷.۶ اطلاعات لازم در محاسبه ضریب ایمنی شکست رگاب در بدنه سد

پارامتر	نماد علمی	واحد	میانگین	واریانس
تنش برشی موثر	$\tau_{available}$	KPa	۵۴۱	۱۰
وزن مخصوص آب	γ_w	$\frac{kN}{m^3}$	۱۰	-
چگالی مصالح بدنه و بدنه سد	ρ_w	$\frac{kg}{m^3}$	۲۱۰۰	-
چگالی آب	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰	-
فشار ناشی از حد آب در دیواره سد	h_p	m	۲۰	-
گرادیان هیدرولیک بحرانی	i_{cr}	-	۱/۱	-
تنش برشی بحرانی	τ_{cr}	KPa	۲۲۰	-



شکل ۱۱.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب در بدنه سد

خلاصه نتایج شبیه سازی مونت کارلو روی دیواره سد باطله و در اثر شکست رگاب، در جدول ۶-۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۸.۶ توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست رگاب بدنه سد و محاسبه احتمال شکست

احتمال (درصد)	ضریب ایمنی و احتمال شکست
۱۰۰	احتمال $FOS < 1$
۰/۴۱	میانگین تابع توزیع احتمال FOS
۰/۰۲	انحراف معیار تابع توزیع احتمال FOS
-۲/۹۵	شاخص قابلیت اطمینان (β)
۹۹	احتمال شکست قابلیت اطمینان (P_F)

نتایج احتمال شکست رگاب در دیواره سد باطله معدن مس سونگون در جدول ۱۹-۶ آمده است. که بر این اساس، احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست رگاب، ۹۹ درصد و درجه ریسک آن ۶۸۳ درصد به توان دو تخمین زده شد.

جدول ۱۹.۶ نتایج احتمال رگاب بدنه سد

وزن موثر در شکست شیب سد رگاب (درصد)	احتمال عدم پایداری ده دلیل شکست رگاب دیواره سد (درصد)
۶/۹	۹۹
مجموع احتمال شکست لبریز = ۹۹ درصد	
درجه ریسک = ۶۸۳ (درصد به توان دو)	

۸.۲.۶ شکست فونداسیون

برای محاسبه شکست فونداسیون، ضریب ایمنی شکست رگاب در پی سد و شکست در اثر رانش زمین محاسبه می‌گردد. در محاسبه شکست رگاب از رابطه ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ استفاده می‌شود. اطلاعات لازم در محاسبه شکست رگاب پی سد در جدول ۶-۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۲۰.۶. اطلاعات لازم در محاسبه شکست رگاب پی سد

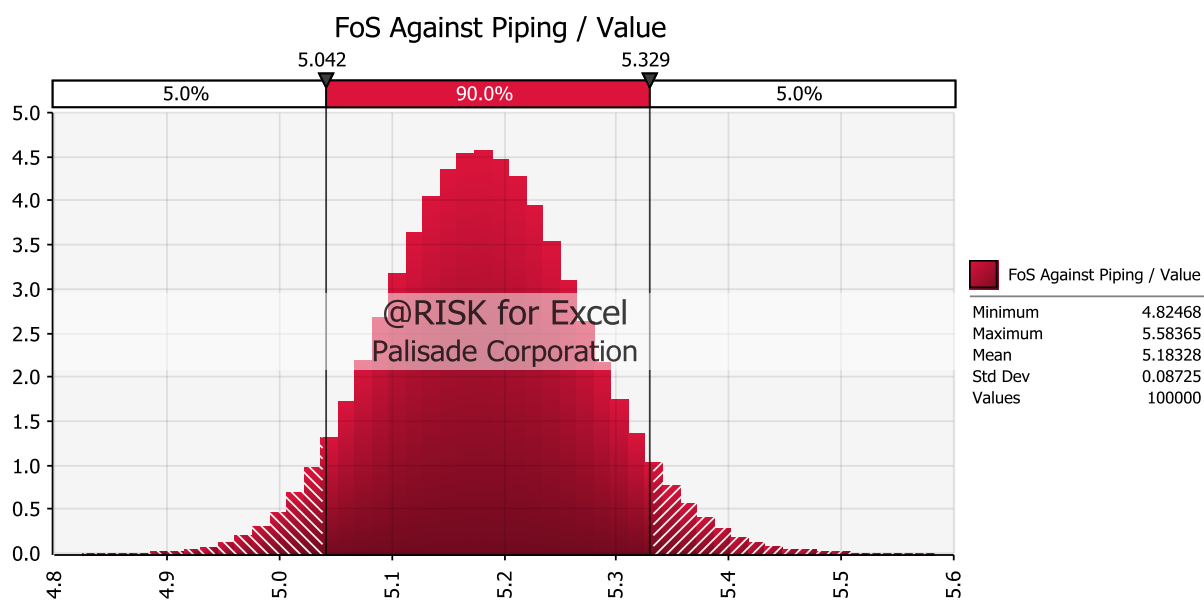
پارامتر	نماد علمی	واحد	میانگین	واریانس
تنش برشی موثر	$\tau_{available}$	KPa	۲۲	۰/۳۷
وزن مخصوص آب	γ_w	$\frac{kN}{m^3}$	۱۰	-
چگالی مصالح پی	ρ_w	$\frac{kg}{m^3}$	۱۵۷۰	-
چگالی آب	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	۱۰۰۰	-
فشار ناشی از حد آب در دیواره سد	h_p	m	۲۰	-
گرادیان هیدرولیک بحرانی	i_{cr}	-	۰/۶	-
تنش برشی بحرانی	τ_{cr}	KPa	۱۱۴	-

برای محاسبه احتمال شکست فونداسیون به دلیل رانش زمین از رابطه ۵-۲۲ استفاده می‌شود. پارامترهای لازم در محاسبه این فاکتور ایمنی در جدول ۶-۲۱ ارائه شده است. به دلیل اینکه آب زیرزمینی در زیر پی سد وجود ندارد، در این محاسبه $m = 0$ است.

پس از ورود داده‌ها به مدل، شبیه سازی مونت کارلو، شبیه سازی در محیط نرم افزار @RISK انجام شد. در شبیه سازی ۱۰ هزار بار تکرار انجام شد. پس از انجام شبیه سازی احتمال شکست سد باطله سونگون در اثر شکست رگاب پی، صفر درصد محاسبه گردید. تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست رگاب پی سد، در شکل ۶-۱۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، احتمال اینکه ضریب ایمنی شکست دیواره سد به دلیل لبریز، کمتر از یک باشد صفر درصد است.

جدول ۲۱.۶ پارامترهای لازم در محاسبه فاکتور ایمنی رانش زمین

پارامتر	نماد علمی	واحد	میانگین	واریانس
نیروی چسبندگی موثر	C	Mpa	۰/۴۶	۰/۱۷
وزن مخصوص آب	γ_w	$\frac{kN}{m^3}$	۱۰	-
وزن مخصوص مصالح پی	γ	$\frac{kN}{m^3}$	۱۵/۷	-
عمق محل شکست نسبت به سطح زمین	Z	m	۱۵	-
شیب زمین	β	درجه	۲۳/۶	-
زاویه شکست موثر	ϕ'	درجه	۳۰/۷۵	۲/۷۵



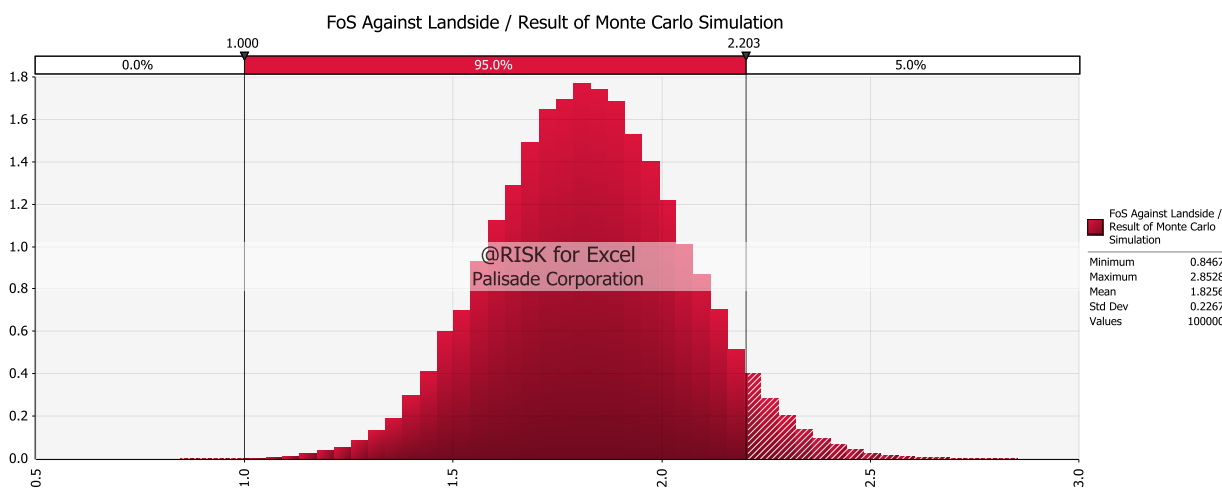
شکل ۱۲.۶ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب پی سد

خلاصه نتایج شبیه سازی مونت کارلو روی دیواره سد باطله و در اثر شکست رگاب، در جدول ۶-۲۲ نشان داده شده است.

جدول ۶-۲۲ توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست رگاب در پی و محاسبه احتمال شکست

احتمال (درصد)	ضریب ایمنی و احتمال شکست
۰	احتمال $FOS < 1$
۵/۲	میانگین تابع توزیع احتمال FOS
۰/۱	انحراف معیار تابع توزیع احتمال FOS
۴۲	شاخص قابلیت اطمینان (β)
۰	احتمال شکست قابلیت اطمینان (P_F)

تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل رانش زمین، در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل، احتمال اینکه ضریب ایمنی شکست دیواره سد به دلیل رانش زمین، کمتر از یک باشد، صفر درصد است.



شکل ۶-۱۳ تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست سد به دلیل رانش زمین

خلاصه نتایج شبیه سازی مونت کارلو روی دیواره سد باطله و در اثر رانش زمین، در جدول ۶-۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۲۳.۶ توزیع احتمال فاکتور ایمنی شکست به دلیل رانش و محاسبه احتمال شکست

احتمال (درصد)	ضریب ایمنی و احتمال شکست
۰	احتمال $FOS < 1$
۱/۸۲	میانگین تابع توزیع احتمال FOS
۰/۲۳	انحراف معیار تابع توزیع احتمال FOS
۳/۶	شاخص قابلیت اطمینان (β)
۰	احتمال شکست قابلیت اطمینان (P_F)

نتایج احتمال شکست فونداسیون سد باطله معدن مس سونگون در جدول ۶-۲۴ آمده است. که بر این اساس، احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون به دلیل شکست رگاب، صفر درصد و در نتیجه درجه ریسک آن صفر درصد به توان دو تخمین زده شد.

جدول ۲۴.۶ نتایج احتمال شکست فونداسیون سد باطله معدن مس سونگون

وزن موثر در شکست شیب فونداسیون (درصد)	احتمال شکست رگاب (درصد)	احتمال عدم پایداری سد به دلیل رانش زمین (درصد)
۲۰/۴	۰	۰
مجموع احتمال شکست لبریز = ۰ درصد		
درجه ریسک = ۰ (درصد به توان دو)		

۹.۲.۶ تبعات ناشی از شکست سد باطله معدن مس سونگون

برای محاسبه تبعات ناشی از شکست سد باطله معدن مس سونگون با استفاده از رابطه‌های ۵-۲۳ و ۵-۲۴، میزان حجم مواد خارج شده از سد در اثر شکست و همچنین وسعت حرکت آنها مطابق زیر محاسبه می‌شود.

رابطه ۴-۶ حجم مواد خارج شده از سد باطله را ۱۵ میلیون متر مکعب تخمین می‌زند که بیشتر از یک-سوم محتویات سد باطله است.

$$V_F = 0.345 \times 42.2^{1.01} = 15 \quad (۴.۶)$$

رابطه ۵-۶ وسعت حرکت مواد خارج شده از سد را حدود ۲۶۷ کیلومتر تخمین می‌زند.

$$D_{\max} = 1.61 \times (120 \times 15)^{0.66} = 266.6 \quad (۵.۶)$$

برای محاسبه تبعات اقتصادی ناشی از شکست سدهای باطله همان‌طور که در فصل ۵ اشاره شد، از تحلیل هزینه بر سود استفاده می‌شود. هزینه‌های ناشی از شکست سد باطله مطابق جدول ۶-۲۵ خواهد بود. همچنین فرض می‌شود سد باطله معدن مس سونگون پس از پر شدن حجم سد، در راستای توسعه پایدار، برای بازسازی و استفاده نسل‌های آتی آماده می‌شود. بنابراین در اثر شکست سد باطله، درآمدهای حاصل از بازسازی سد باطله که در تحلیل هزینه بر سود به عنوان سود تلقی می‌گردد از بین می‌رود. اطلاعات استفاده شده برای تخمین سود حاصل از بازسازی سد باطله در جدول ۶-۲۶ ارائه شده است. سود بازسازی از کسر هزینه‌های بازسازی از درآمدهای آن خواهد بود.

جدول ۶-۲۵.۶ اطلاعات لازم برای تخمین هزینه ناشی از شکست سد باطله به سال ۹۵ [۱۰۶]

مقدار	واحد	پارامتر مورد استفاده در تخمین هزینه ناشی از شکست سد باطله
۲۳/۸	میلیارد تومان	هزینه‌های پاک‌سازی مواد باطله برای ۹۴۲ هکتار
۶۴۸	میلیون تومان	سود از دست رفته ناشی از خدمات کشاورزی سد پس از بازسازی در طی سه سال
۶۰۴	میلیارد تومان	هزینه بازسازی سد باطله
۲۰۰	میلیارد تومان	هزینه ناشی از تخریب زیرساخت‌ها
۸۲۸ میلیارد تومان		مجموع هزینه‌های ناشی از شکست سد

جدول ۲۶.۶ اطلاعات لازم برای تخمین سود بازسازی سد باطله به سال ۹۵ [۱۰۷،۱۰۶]

مقدار	واحد	پارامتر مورد استفاده در تخمین سود بازسازی سد باطله
۷۱۲/۲	hm ²	مساحت سد باطله
۱۸۵	میلیارد تومان	هزینه تسطیح و بازسازی سد باطله
۷۵۶	میلیون تومان	هزینه‌های اجرایی و نگه داری
۲۳۰	میلیون تومان	مجموع درآمدهای پس از بازسازی در طی ۳۵ سال پس از اتمام معدنکاری
۶/۵	میلیارد تومان	ارزش حفاظتی منطقه بازسازی شده در طی ۳۵ سال در طی ۳۵ سال پس از اتمام معدنکاری
۱۵۴	میلیارد تومان	ارزش بدست آمده از خدمات غیر مستقیم اکولوژیکی منطقه بازسازی شده در طی ۳۵ سال پس از اتمام معدنکاری
۴۳/۲	میلیارد تومان	ارزش افزوده به‌ازای هر شغل برای ۱۰۰ نفر در طی ۳۵ سال پس از اتمام معدنکاری
۱۸۵/۸ میلیارد تومان		مجموع هزینه‌های بازسازی سد باطله
۴۳۳/۷ میلیارد تومان		مجموع ارزش و درآمدهای حاصل از بازسازی سد
۲۴۸ میلیارد تومان		سود حاصل از بازسازی سد باطله

بنابراین، در تحلیل هزینه بر سود مقدار C/B مطابق رابطه ۶-۶ محاسبه می‌شود.

$$C / B = \frac{828}{248} = 3/3 \quad (۶.۶)$$

برای تعیین محدوده اثر هر فاکتور با استناد به سناریوهای در نظر گرفته شده برای کمی سازی، از روابط ۴-۶ تا ۶-۶، و جدول سناریو در فصل چهار، استفاده می‌شود. نتایج مربوط به تخمین محدوده اثر هر سناریو در جدول ۲۷-۶ نشان داده شده است.

جدول ۲۷.۶ نتایج مربوط به تخمین محدوده اثر سناریو

محدوده اثرگذاری	سناریو	فاکتورهای موثر
۴	حجم مواد خارج شده از سد	شکست سد
۵	تعداد جمعیت در خطر مرگ	
۸	وسعت آلودگی	شکست سد و جاری شدن آب و مواد باطله
۸	تعداد جمعیت در خطر مرگ	
۱۰	خسارت ناشی از جاری شدن مواد $C/B=3/3$	

پس از تعیین محدوده اثر فاکتورهای با توجه به سناریوهای تعریف شده، برای تعیین میزان اثرگذاری فاکتورهای موثر در شکست سد باطله بر اجزای سیستم، مطابق ماتریس همبستگی که در جدول ۲۸-۶ نشان داده شده است، عمل کرده و درجه اثر هر فاکتور بر اجزای سیستم تعیین می‌شود.

جدول ۲۸.۶ نتایج ماتریس همبستگی

اقتصادی	اجتماعی	زیست محیطی	فاکتورهای موثر
$4X=5$	$2X=3/3$	$4X=5$	شکست سد
$4X=5$	$4X=6/6$	$4X=5$	شکست سد و جاری شدن آب و مواد باطله

با ضرب درجه اثرگذاری هر فاکتور در محدوده تعیین شده در جدول ۲۷-۶، مجموع اثرگذاری هر فاکتور بر اجزای سیستم کمی سازی می‌شود و ماتریس وزن نهایی تاثیر فاکتورها بر سیستم تشکیل می‌شود که در جدول ۲۹-۸ نشان داده شده است.

جدول ۲۹.۶ نتایج ماتریس وزن نهایی تاثیر فاکتورها بر سیستم

اقتصادی	اجتماعی	زیست محیطی	فاکتورهای موثر
$5 \times 10 = 50$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 5 = 25$	شکست سد
$5 \times 10 = 50$	$5 \times 8 = 40$	$5 \times 8 = 40$	شکست سد و جاری شدن آب و مواد باطله
۱۰۰	۸۰	۶۵	مجموع

۱۰.۲.۶ ماتریس ریسک

همان طور که در فصل چهار اشاره شد، پس از محاسبه درجه ریسک شکست سد باطله برای احتمال شکست و تبعات آن، از ماتریس ریسک استفاده می شود. نتایج نهایی مربوط به درجه ریسک احتمال شکست و تبعات آن به ترتیب ۵۳۹۶ و ۸۵۵۹ درصد به توان دو تخمین زده شده است و خلاصه آنها در جدول های ۳۰-۶ و ۳۱-۶ نشان داده شده است. پس از تبدیل درجه ریسک بدست آمده در محدوده صفر تا ده، میزان احتمال شکست $1/4$ که در محدوده ۲ احتمال و تبعات آن $2/8$ که در محدوده ۳ تبعات قرار دارند، تعیین شد. بنابراین در تحلیل ریسک، ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون ۳ و از دسته نادر تعیین شد.

جدول ۳۰.۶ نتایج نهایی احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون

مکانسیم شکست	احتمال (P)	درجه ریسک ($D=W \times P$)
شکست شیب	$67/306$	$48/9 \times 67/306 = 3291$
شکست لبریز	۶۴	$23/7 \times 64 = 1422$
شکست رگاب در بدنه سد	۹۹	$6/9 \times 99 = 683$
شکست فونداسیون	۰	$20/4 \times 0 = 0$
مجموع	۲۳۰	۵۳۹۶

جدول ۳۱.۶ نتایج نهایی تبعات شکست سد باطله معدن مس سونگون

تبعات شکست	تبعات (C)	درجه ریسک (D=W×C)
زیست محیطی	۶۵	$۳۱ \times ۶۵ = ۲۰۱۵$
جامعه	۸۰	$۱۶/۸ \times ۸۰ = ۱۳۴۴$
اقتصاد	۱۰۰	$۵۲/۲ \times ۱۰۰ = ۵۲۰۰$
مجموع	۲۴۵	۸۵۵۹

۳.۶ جمع بندی

در این بخش به منظور تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون، ابتدا به بررسی معدن مس، کاخانه فرآوری معدن و شرایط زیست محیطی منطقه اهر- ورزقان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سپس به دلیل اهمیت ویژگی های سد در تحلیل ریسک شکست، بررسی سد باطله معدن پرداخته شد. ویژگی های طراحی و ژئومتری سد، دیواره سد، تاج سد و فونداسیون سد به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی های مواد باطله معدن مس سونگون نیز به صورت مفصل و دقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل ارائه شده در فصل چهارم، به بررسی و تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون پرداخته شد. پس از محاسبه احتمال شکست سد باطله، احتمال شکست شیب ۶۷/۳ درصد تخمین زده شد. پس از آن احتمال شکست سد به دلیل لبریز ۶۴ درصد تخمین زده شد. بدیهی است این احتمال زمانی در منطقه سد باطله با بارش شدید باران، طوفان و سیلاب مواجه شود رخ خواهد داد. احتمال رگاب در پی سد صفر درصد محاسبه گردید. که با توجه به ویژگی های پی که از سنگ های ولکانیکی بدون هوازدگی و درزه و شکاف تشکیل شده است توجیه پذیر است. با این وجود با توجه به تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب پی سد، خطر رگاب در پی سد وجود ندارد. احتمال شکست فونداسیون نیز به دلیل مشابه در پی سد صفر درصد محاسبه شد. احتمال شکست رگاب در بدنه سد ۹۹ درصد محاسبه شد. در بدنه سد نیز با توجه به تابع توزیع احتمال شکست رگاب دیواره، خطر ایجاب رگاب وجود دارد.

در بررسی تبعات ناشی از شکست سد، شدت تبعات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی به ترتیب ۶۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد محاسبه گردید. نتایج نشان میدهد که در صورت رخداد شکست، تبعات اقتصادی شدیدی به منطقه وارد خواهد شد.

۷

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱.۷ بحث

سد باطله، برای انباشت باطله‌های حاصل از مرحله فرآوری مواد معدنی، معمولاً در کنار معادن طراحی و ساخته می‌شود. سدهای باطله از نوع سدهای خاک ریزه‌ای بوده و مشابه آنها طراحی و ساخته می‌شوند. این سدها که بزرگ‌ترین سازه ساخته شده توسط بشر نامیده می‌شوند در دو زمینه با سدهای خاکریزه‌ای تفاوت دارند. (۱) در سدهای باطله بر خلاف سدهای خاکریزه‌ای، مراحل ترفیع سد به تدریج و هم‌زمان با ورود مواد باطله صورت می‌گیرد. این مهم خود باعث شکست سدهای باطله شده است. (۲) در سدهای باطله علاوه بر اثر و فشار وارد شده بر بدنه سد ناشی از آب، نیروی ناشی از فشار آب منفذی و فشار ناشی از مقاومت برشی مواد باطله پشت سد، به‌ویژه پس از تحکیم مواد باطله، باید مد نظر قرار گیرد.

لذا به دلیل اهمیت مواد باطله و خواص آن بر پایداری سد، ابتدا در فصل دوم به بررسی ویژگی‌های مواد باطله پرداخته شد. از مهم‌ترین ویژگی مواد باطله می‌توان به منحنی توزیع دانه بندی آنها، نسبت تخلخل، نرخ تحکیم، رفتار فشار آب منفذی و مقاومت برشی آنها اشاره کرد.

با وجود مطالعات متعدد و تلاش‌های مهندسی در طراحی سدهای باطله، هر ساله گزارش‌های متعددی از شکست سدهای باطله منتشر می‌شود. در بررسی تاریخی سدهای شکسته شده، این نتیجه حاصل شد که بیشتر سدهای باطله در اثر شکست لبریز، شکست شیب و شکست فونداسیون شکسته شده‌اند. از آنجایی که بیشتر سدهای شکسته شده به روش بالا رونده طراحی شده بودند، می‌توان نتیجه گرفت که سدهای بالارونده بیشترین خطر شکسته شدن در اثر مکانیزم‌های نامبرده را دارا هستند.

پس از بررسی ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا سال ۲۰۱۵، عوامل مهم و همچنین ساز و کارهای اصلی در شکست سدهای باطله شناسایی شد. در این بررسی مشخص گردید که عوامل موثر در شکست، از یکدیگر مستقل نبوده و هر یک دارای یک وزن عملکرد هستند. برای تعیین اینکه هر عامل چگونه بر شکست سدهای باطله اثر گذار خواهد بود، از روش تحلیل ریسک درخت خطا استفاده شد. با توجه به مدل درخت خطای ارائه شده در فصل ۴، چهار مکانیزم اصلی در شکست سدهای باطله شناسایی شدند. به این ترتیب که سدهای باطله تحت تاثیر هر یک از عوامل

شکست سد، در نهایت طی مکانیزم‌های شکست لبریز، شکست شیب، شکست رگاب (در دیواره و پی سد) و شکست فونداسیون شکسته خواهند شد. عامل فرسایش در شکست رگاب، شکست فونداسیون و شکست لبریز تاثیر گذار است. برای بررسی تاثیر این عوامل بر یک دیگر، از مدل شبکه بیزین استفاده شد. از مدل درخت خطا و مدل شبکه بیزین ارائه شده در تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون استفاده شد. این مدل برای تحلیل ریسک شکست سدهای باطله دیگر در دنیا نیز قابل استفاده است. اما از آنجایی که ضریب هر یک از عوامل موثر در شکست سدهای باطله می‌تواند از معدنی به معدن دیگر متفاوت باشد، برای حل این مشکل تاثیر وزن هر یک از عوامل موثر در شکست سد باطله به روش رای گیری سلسله مراتبی (PVS)، تعیین گردید. بدین منظور طی پرسشنامه‌ای، نظرات خبرگان داخلی خارجی در این مورد جمع آوری شد و توسط PVS وزن مربوط به عوامل موثر در مکانیزم شکست و همچنین تبعات ناشی از آن محاسبه گردید. وزن مکانیزم شکست شیب ۴۸/۹ درصد، شکست لبریز ۲۳/۷ درصد، شکست فونداسیون ۲۰/۴ درصد و شکست رگاب ۶/۹ درصد محاسبه شد. همان طور که در فصل چهار اشاره شد، بیشترین تعداد شکست سدهای باطله به دلیل شکست شیب و شکست رگاب رخ داده است. بنابراین وزن محاسبه شده برای عوامل موثر در مکانیزم‌های شکست، مطابق نتایج داده‌های تاریخی شکست سدهای باطله است. از اوزان بدست آمده نیز در تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون استفاده شد. علاوه بر اینکه از وزن‌های محاسبه شده می‌توان در تحلیل ریسک همه سدهای باطله استفاده کرد، از روش رای گیری ارائه شده در تعیین وزن نیز می‌توان برای تحلیل ریسک و بررسی شکست همه سدهای باطله در دنیا استفاده نمود. وزن مربوط به تبعات شکست سدهای باطله نیز به ترتیب به شرح زیر است: شدت تبعات ناشی از شکست سد به محیط زیست، ۳۱ درصد، جامعه ۱۶/۸ درصد و اقتصاد ۵۲/۸ درصد. بنابراین در اثر شکست سدهای باطله بیشترین خسارات، اقتصادی خواهند بود. هزینه‌های پاکسازی محیط زیست، هزینه‌های تخریب زیر ساخت، هزینه تعمیر و بازسازی سد، هزینه وارد شده به معدن و شرکت‌های معدنی همگی در کلاس تبعات اقتصادی طبقه بندی می‌شوند. سپس برای تحلیل ریسک کمی شکست سدهای باطله از روش قابلیت اطمینان ساختاری استفاده شد. در این روش با تعیین تابع محدود حدی احتمال شکست سیستم محاسبه می‌شود. سیستم زمانی شکسته می‌شود که مقدار تابع حدی محدود کوچکتر از صفر باشد. روش‌های متعددی برای حل تابع محدود وجود دارد که در این پایان نامه از روش شبیه ساز مونت کارلو استفاده می‌شود. شبیه ساز مونت کارکو با انتخاب متغیر

تصادفی و استفاده از تابع توزیع احتمال آنها، مقدار تابع توزیع احتمال تابع محدود حدی را محاسبه می‌کند.

برای تحلیل ریسک شکست سد باطله با توجه به ضرایب عملکرد، از مفهوم درجه ریسک استفاده شد. سپس بر اساس مدل درخت خطا و شبکه بیزن ارائه شده، مدل کمی محاسبه احتمال و تبعات شکست سد باطله ارائه گردید. در محاسبه احتمال شکست هر یک از مکانیزم‌های چهارگانه شکست سد باطله، و با استفاده از تئوری قابلیت اطمینان ساختاری، فاکتور ایمنی هر یک مکانیزم‌های چهارگانه شکست ارائه گردید. در محاسبه فاکتور ایمنی شکست شیب، به دلیل تاثیر افزایش مقاومت برشی مواد باطله بر دیواره سد، با مد نظر قرار گرفتن بیشینه مقاومت برشی مواد باطله به عنوان نیروی مخرب، فاکتور ایمنی شکست شیب، اصلاح گردید.

در محاسبه تبعات ناشی از شکست سدهای باطله، از روش فولچی برای کمی سازی تاثیرات شکست سد، و با در نظر قرار دادن میزان مواد خارج شده از سد به دلیل شکست، وسعت جریان مواد باطله، تعداد افراد در خطر مرگ و تبعات اقتصادی ناشی از شکست، استفاده شد. برای محاسبه تبعات اقتصادی ناشی از شکست سدهای باطله از روش تحلیل هزینه بر سود استفاده شد. در این روش تمامی هزینه‌های ناشی از شکست سد باطله به عنوان هزینه‌های ناشی از شکست سد و سود حاصل از عملیات بازسازی به عنوان سود در تحلیل هزینه بر سود، مد نظر قرار گرفته می‌شود.

در فصل پنجم، به منظور تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون، ابتدا به بررسی معدن مس، کارخانه فرآوری معدن و شرایط زیست محیطی منطقه اهر- ورزقان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سپس به دلیل اهمیت ویژگی‌های سد در تحلیل ریسک شکست، بررسی سد باطله معدن پرداخته شد. ویژگی‌های طراحی و ژئومتری سد، دیواره سد، تاج سد و فونداسیون سد به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های مواد باطله معدن مس سونگون نیز به صورت مفصل و دقیق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل ارائه شده در فصل چهارم، به بررسی و تحلیل ریسک شکست سد باطله معدن مس سونگون پرداخته شد. پس از محاسبه احتمال شکست سد باطله، احتمال شکست شیب ۸/۴ درصد تخمین زده شد. پس از آن احتمال شکست سد به دلیل لبریز ۴۶/۱ درصد تخمین زده شد. بدیهی است این احتمال زمانی که منطقه سد باطله با بارش شدید باران، طوفان و سیلاب مواجه شود، رخ خواهد داد. احتمال رگاب در پی سد صفر درصد محاسبه گردید. که

با توجه به ویژگی‌های پی که از سنگ‌های ولکانیکی بدون هوازدگی و درزه و شکاف تشکیل شده است، توجیه پذیر است. با این وجود با توجه به تابع توزیع احتمال ضریب ایمنی شکست رگاب پی سد، خطر رگاب در پی سد وجود دارد. احتمال شکست فونداسیون نیز به دلیل مشابه در پی سد صفر درصد محاسبه شد. احتمال شکست رگاب در دیواره سد نیز صفر درصد محاسبه شد. در دیواره سد نیز با توجه به تابع توزیع احتمال شکست رگاب دیواره، خطر ایجاد رگاب در دیواره سد وجود دارد.

در بررسی تبعات ناشی از شکست سد، شدت تبعات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی به ترتیب ۶۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در صورت رخداد شکست، تبعات اقتصادی شدیدی به منطقه وارد خواهد شد.

مدل ارائه شده در تحلیل کمی ریسک شکست باطله در همه معادن دنیا قابل استفاده خواهد بود.

۲.۷ نتیجه‌گیری

همانگونه که اشاره شد، از آنجایی که عوامل متعددی در تحلیل ریسک شکست سدهای باطله تاثیر گذار هستند، و با توجه به اینکه مدل سازی و بررسی هر یک از مکانیزم‌های شکست به دلیل رفتار مکانیک خاکی مواد، عدم قطعیت داده‌ها، خطا در پیش بینی رخدادها، پیچیده خواهد بود، در این پایان نامه تلاش شد تا ضمن بررسی عمیق و دقیق سدهای شکسته شده، تمامی عوامل موثر در شکست سد شناسایی و بررسی شود. پس از بررسی این عوامل، تلاش شد تا مدلی کمی برای محاسبه احتمال شکست و تبعات ناشی از آن ارائه گردد. پس از بررسی داده‌های تاریخی شکست سدهای باطله، وزن دهی عوامل موثر در شکست و نیز تحلیل ریسک کمی شکست سد باطله معدن مس سونگون، نتایج زیر حاصل شد.

- خواص و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد باطله از عوامل مهم در پایداری سدهای باطله هستند که از مهمترین آنها می‌توان به منحنی توزیع دانه بندی آنها، نسبت تخلخل، نرخ تحکیم، رفتار فشار آب منفذی و مقاومت برشی آنها اشاره کرد.
- در مطالعه ۳۰۶ سد باطله شکسته شده در بین سال‌های ۱۹۱۴ تا سال ۲۰۱۵، مشخص شد که شکست سد به دلیل عدم پایداری شیب، شکست لبریز و شکست فونداسیون مهم ترین عوامل در شکست سدهای باطله است.

- از بین سدهایی که زمان شکست آنها گزارش شده است، ۶۴ درصد سدها بین سال‌های ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۰ رخ داده است. بیشترین شکست سدها بین سال‌های ۱۹۷۱ تا سال ۱۹۷۵ گزارش شده است. و نیز ۱۵/۷ درصد سدها بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ شکسته شده است که نرخ بیشتری را نسبت به سال‌های ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۰ را نشان می‌دهد که دلیل آن افزایش بی سابقه قیمت مواد معدنی در سال ۲۰۰۰ و افزایش تولید معادن بوده است.
 - از بین سدهایی که نوع ماده معدنی آنها گزارش شده است، شکست ۵۲ سد (حدود ۱۷ درصد) از ۳۰۶ سد، مربوط به معادن مس بوده است. در این میان، ۳۴/۶ درصد این سدها به دلیل افزایش درجه سیالی، ۲۳ درصد به دلیل شکست شیب و ۱۵/۴ درصد به دلیل شکست فونداسیون شکسته شده اند.
 - در بررسی عوامل موثر در شکست سدهای باطله، چهار مکانیزم اصلی شکست شیب، شکست لبریز، شکست رگاب و شکست فونداسیون شناسایی شد.
 - در بررسی عوامل موثر در شکست باطله مشخص گردید که این عوامل از یکدیگر مستقل نبوده و هر یک وزن و عملکرد مخصوص به خود را دارند که می‌تواند تحت تاثیر نوع ماده معدنی و مکان سد، از معدنی به معدن دیگر متفاوت باشد.
 - در تعیین وزن و عملکرد مکانیزم‌های چهارگانه، وزن شکست سد به دلیل عدم پایداری شیب ۴۸/۹ درصد، شکست لبریز ۲۳/۷ درصد، شکست فونداسیون ۲۰/۴ درصد و شکست رگاب ۶/۹ درصد محاسبه گردید.
 - شدت تبعات ناشی از شکست سدهای باطله بر ارکان توسعه پایدار، محیط زیست ۳۱ درصد، اجتماع ۱۶/۸ درصد و اقتصاد ۵۲/۲ درصد محاسبه گردید.
- در بررسی احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون توسط مدل ارائه شده و با استفاده از روش تئوری قابلیت اطمینان ساختاری و شبیه ساز مونت کارلو، احتمال شکست شیب ۶۷/۳ درصد، احتمال شکست سد به دلیل لبریز ۶۴ درصد، احتمال رگاب در پی سد صفر درصد و احتمال شکست رگاب در بدنه سد ۹۹ درصد محاسبه شد.

- با توجه به نتایج حاصل از محاسبه احتمال شکست سد باطله معدن مس سونگون، احتمال شکست در بدنه سد در شرایط نیمه بحرانی قرار دارد و پایش پایداری آن ضروری خواهد بود. همچنین احتمال شکست در اثر باران شدید در این سد نیز در شرایط نیمه بحرانی است.
- با توجه به تابع توزیع احتمال شکست رگاب در بدنه باطله معدن مس سونگون، لازم است پایش‌های لازم برای جلوگیری از شکست رگاب صورت گیرد.
- در بررسی تبعات ناشی از شکست سد، شدت تبعات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی به ترتیب ۶۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در صورت رخداد شکست، تبعات اقتصادی شدیدی به منطقه وارد خواهد شد.

۳.۷ پیشنهادها

- پس از انجام مطالعات این پایان نامه و نتایج حاصل شده، موارد زیر برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌گردد.
- به دلیل محدودیت اطلاعات در دسترس در این پایان نامه، لازم است در مطالعات بعدی از داده‌هایی با عدم قطعیت کمتر استفاده شود.
- بررسی اینکه یک سیستم تا چه مدت می‌تواند پایدار باشد، از دیگر مسائل مهم در مدیریت ریسک است بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی پیش بینی زمان شکست سد انجام شود.
- در سد باطله سونگون، تاج سد یکی از محل‌های ورود باطله است در این حالت فشار بیشتری به دیواره سد وارد می‌شود که در این مطالعه در نظر گرفته نشده است. همچنین از نرخ ته نشینی و تحکیم مواد باطله و اثر آن بر سد نیز در این مطالعه صرف نظر شده است.
- بارهای وارد بر سد با نرخ ثابت فرض شده اند که در مطالعات بعدی قابل بررسی است.
- به دلیل اینکه در ساخت دیواره سد باطله سونگون از بیش از ۱۰ نوع مصالح مورد استفاده قرار گرفته است، از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی بررسی پایداری دیواره سد با زون بندی سد بسته به نوع مواد به کار گرفته شده انجام شود.

- در محاسبه شکست لبریز، لازم است تاثیر مدت زمان لبریز تا شکست سد و تاثیر شدت امواج وارد بر تاج سد مورد بررسی قرار گیرد. همچنین عملکرد سرریز و کانال انحراف نیز در شکست لبریز باید بررسی شود.

منابع و مراجع

- [۱] *The Role of Mining in National Economies*, 2nd Edition, International Council on Mining and Metals (ICMM), 2014.
- [۲] The Minerals Education Coalition's (MEC); Mineral Usage Statistics; <http://www.mineralseducationcoalition.org/mineral-resource-statistics>, July, 2016.
- [۳] اصانلو، مرتضی؛ *باطله‌های معدن (خصوصیات، رفتار و تاثیرات زیست محیطی آنها)*؛ انتشارات صدا، تهران، ۱۳۹۳.
- [۴] Worldometers; World Population: Past, Present, and Future; <http://www.worldometers.info/world-population/>, July, 2016.
- [۵] *Case Studies on Tailings Management*, International Council on Metals and the Environment (ICME), 1998.
- [۶] Alturffy, U.; "Failure Mechanism for Earth Dams", <http://studylib.net/>, July, 2016.
- [۷] اصانلو، مرتضی؛ *توسعه پایدار و معدنکاری ذغال سنگ*، سخنران کلیدی دومین کنگره ملی ذغال ایران، کرمان، شهریور ۹۳
- [۸] اصانلو، مرتضی؛ *بازسازی معادن*، (جزوه درس دکتری)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۲
- [۹] ICOLD Committee on Tailings Dam & Waste Lagoons; Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences (Lessons learnt from practical experiences); 2001.
- [۱۰] World Information Service on Energy (WISE Uranium Project); Chronology of major tailings dam failures; <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. July, 2016.
- [۱۱] Chambers, M., Bowker, L.N, Center for Science in Public Participation, ; Tailings Dam Failures 1915 – 2014, <http://www.csp2.org/tailings-dam-failures-1915-2014>, July, 2015.
- [۱۲] Bowker, L.N; and Chambers, M. "The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures", *Earthworks*, 22 pages, July, 2015.
- [۱۳] F., Oboni, C., Oboni, J., Caldwell, "Risk assessment of the long-term performance of closed tailings", Tailings and Mine Waste 2014, Keystone, Colorado, USA, October 5-8, 2014
- [۱۴] J., Caldwell, F., Oboni, C., Oboni, Tailings Facility Failures in 2014 and an Update on Failure Statistics, Tailings and Mine Waste 2015, Vancouver, Canada, October 25-28
- [۱۵] Hamade, T.; *Geotechnical Design of Tailings Dams -A Stochastic Analysis Approach*, A thesis submitted to the degree of Doctorate of Philosophy, McGill University, Montreal, Canada, March, 2013.
- [۱۶] Mosquera, J.; *Static and Pseudo-Static Stability Analysis of Tailings Storage*

- Facilities Using Deterministic and Probabilistic Methods*, A Thesis submitted to Master of Engineering in Mining Engineering, McGill University, Montreal, Canada, April, 2013.
- Sayit, E.; *An Investigation of Geotechnical Characteristics and Stability of a Tailings Dam*, A Thesis submitted to the degree of Master of Science in Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Turkey, June 2012. [١٧]
- Zardari, M. A.; *Stability of Tailings Dams (Focus on Numerical Modelling)*, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, March 2011. [١٨]
- Mantegh, A.; *Evaluation of liquefaction potential of mine tailings using elastic wave velocity*, A thesis submitted to the degree of Doctor of Philosophy in Mining Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 2006. [١٩]
- Knight, Z.; *Slope stability analysis of tailings dam embankments*, A thesis submitted to the Bachelor of Engineering, Charles Darwin University, Australia, May 2015. [٢٠]
- Kossoff, D, and et al.; “Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation”, *Applied Geochemistry 51*, Elsevier, p.p. 229-245, October, 2014. [٢١]
- Jia, Q., and et al.; “Modeling of Wind Erosion of the Aitik Tailings Dam Using SWEEP Model”, *Journal of engineering, Scientific Research (An Academic Publisher)*, p.p. 355-364, 2014.s [٢٢]
- Fry, J.J, an et al.; “Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases”, *Proceeding of 6th International Conference on Scour and Erosion (ICSE6)*, p.p. 273-280, Paris, August 27-31, 2012 [٢٣]
- Zhong, D. and et al.; “Dam break threshold value and risk probability assessment for an earth dam”, *Journal of Nat Hazards*, Springer, p.p. , January 2011 [٢٤]
- Vanden, J, F., and et al.; “Risks of Tailings Dams Failure”, *proceeding of International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (eds), Germany, 19 pages, 2011. [٢٥]
- Xin, Z., and et al.; “Study on the Risk Assessment of the Tailings Dam Break”, *Procedia Engineering 26*, Elsevier, p.p. 2261-1169, 2011. [٢٦]
- Correia dos Santos, R. N. and et al.; “FMEA of a tailings dam”, *FMEA of a tailings dam*, Taylor & Francis, p.p. 1-17, 2011. [٢٧]
- Mihai, S. and et al.; “Tailings dams stability analysis using numerical modelling of geotechnical and geophysical data”, *Proceeding of EGU General Assembly*, Vienna, Austria, p.p. 3219, 19-24 April, 2009. [٢٨]
- Rico, M. and et al; “Floods from tailings dam failures”, *Journal of Hazardous Materials 154*, Elsevier, p.p. 79-87, September, 20007. [٢٩]
- Smith, M,; “Dam Risk Analysis Using Bayesian Networks”, *Proceeding of International Engineering Conferences on Geohazards*, ECI Digital Archives, Article 10, Norway, 2006. [٣٠]
- Kwak, M. and et al., “Flow behaviour of tailings paste for surface disposal”, *Int. J. Miner. Process. 77*, Elsevier, p.p.139-153, 2005. [٣١]
- Bruce, I. G, and Oboni, F.,(2002) “Risk-management process for tailings control”, *Environmental Division News vol. 54, no10, pp. 27-30* , Society for [٣٢]

- Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, CO, ETATS-UNIS (1949), pp. 27-30.
- Davies, M. P, and et al.; “Design of Tailings Dams and Impoundments”, [٣٣] *Keynote Address Tailings and Mine Waste Practices AGM*, SME, p.p. 1-18, Phoenix, Arizona, United State, 2002.
- Bedford, T. and Cooke, R.; *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*, Sixth printing, Cambridge University Press, New York, 2009. [٣٤]
- Bjelkevick, A.; Water Cover Closure Design for Tailings Dams: State of the Art Report. <<http://wpub.ltu.se/1402-1528/2005/19/LTU-FR-0519-SE.pdf>> [٣٥]
- Edraki, M. and et al.; “Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches”, *Journal of Cleaner Production* 84, Elsevier, p.p. 411-420, 2014. [٣٦]
- Blight, G.E., and Steffen, O.K.H.; “*Geotechnics of Gold Mining Waste Disposal*, In *Current geotechnical practice in mine waste disposal*”, Edited by The Committee on Embankment Dams and Slopes of the Geotechnical Engineering Division. American Society of Civil Engineering, New York, p.p. 1-52, 1979 [٣٧]
- Saad, B.; Transient Coupled Analysis of Upstream Tailings Disposal Facilities Construction, A thesis submitted to the degree of Doctorate of Philosophy, McGill University, Montreal, Canada, July, 2008. [٣٨]
- Avila, J.; “*The Drained Stacking of Granular Tailings: A Disposal Method for a Low Degree of Saturation of the Tailings Mass*”, *Proceedings Tailings and Mine Waste*, 2011, Vancouver, B.C., p.p. 1-11, 2011. [٣٩]
- Vick, S.G; Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams, 1. *John Wiley & Sons*, New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore, 1983. [٤٠]
- Seddon.K D, Pemberton. D A, (2015), Characterisation of a deep, under-consolidated coal tailings deposit, Proceeding of conference on tailings and mine waste management for the 21th centuries, edited by Rashidi Nejad, F. Australia, PP.231-238. [٤١]
- Wahler WA, and Assoc.; Evaluation of mill tailings disposal practices and potential dam stability problems in Southwestern United States. U.S. Bureau of Mines, OFR50 (1)-75–OFR50 (5)-75, 1975. [٤٢]
- Volpe. R; Geotechnical engineering aspects of copper tailings dams. ASCE, Pre-print 2696:1–30, 1975. [٤٣]
- Volpe. R; Physical and engineering properties of copper tailings, Current geotechnical practice in mine waste disposal, ASCE, p.p. 242–260, 1979. [٤٤]
- Mittal, HK. and Morgenstern, NR.; Parameters for the design of tailings dams. *Can Geotech J* 12:235–261, 1975. [٤٥]
- Shamsai. M, and et al.; “Geotechnical Characteristics of Copper Mine Tailings: A Case Study”, *Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 25, *Springer*, p.p. 259-602, 2007. [٤٦]
- Lottermoser, B. G, *Mine Wastes (Characterization, Treatment, Environmental Impacts)*, Second Edition, Australia, *Springer*, 2007. [٤٧]
- International Water Power Magazine, Tailings dams: the path to zero failure, 2016, <http://www.waterpowermagazine.com/features/featuretailingsdams4650916/> [٤٨]
- Wills, B. A, and Finch, J; *Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition)*, *Elsevier Science & Technology Books*, 2016. [٤٩]

- [۵۰] طاحونی، شاپور؛/اصول مهندسی ژئوتکنیک؛ (مکانیک خاک)؛ موسسه انتشاراتی پارس آیین، تهران، جلد اول، ویرایش دوم، ۱۳۹۰
- [۵۱] Water Quality Protection Guidelines for Mining and Mineral Processing No 2, (Tailings facilities), 2000, Water and Rivers commission.
- [۵۲] TECHNICAL REPORT, DESIGN AND EVALUATION OF TAILINGS DAMS, (1994), U.S. Environmental Protection Agency
- [۵۳] Wills. B; (2016), Mineral Processing Technology, Chapter 16 (Tailings Disposal), Elsevier, pp. 439-449.
- [۵۴] "Technical guild on operation of dams and reservoirs, vol. 1, Risk analysis applied to management of dam safety, Spain national committee on large dam, (2013).
- [۵۵] Best practices in dam and levee safety risk analysis, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (2012), Chapter 16, PP. 18 pages.
- [۵۶] Laurence D., (2006), "Optimization of the mine closure process", Journal of cleaner production 14, Elsevier, PP. 285-298.
- [۵۷] Aven, T. (2008), Risk Analysis (Assessing uncertainties beyond expected values and probabilities), John Wiley & Sons, P.P. 1-20
- [۵۸] Hartford, Desmond N. D. and Gregory B. Baecher, (2004), Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford Limited.
- [۵۹] عطایی، م. (۱۳۹۴)، مدیریت تحلیل ریسک (جزوه درسی)، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۶۰] Faber, H, M. (2012), Statistics and Probability Theory, Springer, PP. 129-142
- [۶۱] Dalsgaard Sørensen, J. Notes in structural reliability theory and risk analysis, (2004), Aalborg, PP. 28-48
- [۶۲] Lee, K, Y. and Hwang, S. D, (2008), A STUDY ON THE TECHNIQUES OF ESTIMATING THE PROBABILITY OF FAILURE, JOURNAL OF THE CHUNGCHONG MATHEMATICAL SOCIETY, Volume 21, No. 4, pP. 573-583
- [۶۳] Malkawi, A.I.H., Hassan, W.F. and Abdulla, F.A., (2000). Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. Struct Saf, 22(2): 161-187.
- [۶۴] Rosenblueth, E., 1975. Point Estimates for Probability Moments. Proceedings of the National Academy of Sciences, 72(10): 3812-3814.
- [۶۵] Rocscience, 2007. Phase2. 2D Finite Element Analysis for Excavations and Slopes.
- [۶۶] C. A. Cornell, A Probability-based Structural Code, ACI J. 66 (1969), no. 12, 974-985
- [۶۷] Wang, Y.M., Chin, K.S., Yang, J.B., (2007), "Three new models for preference voting and aggregation", Journal of the Operational Research Society, 58, 1389-1393.
- [۶۸] Crouch S.L., Starfield A.M., 1983, Boundary Element Method in Solid Mechanics, Allen and Unwin Pubi.
- [۶۹] Opricovic, S., (1998), "Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems", Faculty of Civil Engineering Belgrade.
- [۷۰] Green, R.H., Doyle, J.R., Cook, W.D., (1996), "Preference voting and project

- ranking using DEA and cross-evaluation”, *European Journal of Operational Research*, 90, 461-472.
- Noguchi, H., Ogawa, M., Ishii, H., (2002), "The appropriate total ranking method using DEA for multiple categorized purposes", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 146, 155-166. [٧١]
- Williams. T.M, (1996), The two-dimensionality of project risk, *International Journal of Project Management* Vol. 14, No. 3, Elsevier Science, pp 185-186, [٧٢]
- Duncan, J.M. and Wright, G.W., 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley&Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, P.P 295 [٧٣]
- Yang, K. and et al, (2012), Reliability analysis of tailings dams under both seepage and earthquake actions, *Proceeding of conference on Rock Mechanics: Achievements and Ambitions*, Taylor & Francis Group, London, PP. 891-894 [٧٤]
- Williams, D. (2015), Towards the elimination of conventional surface slurred tailings storage facilities, *Proceeding of conference on tailings and mine waste management for the 21th centuries*, edited by Rashidi Nejad, F. Australia, PP.11-23. [٧٥]
- Best practices in dam and levee safety risk analysis, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (2012), Chapter 15, PP. 24 pages. [٧٦]
- Rourke. H, Holmes. C, (2013), Liquefaction assessments of tailings facilities in low-seismic areas, *Proceeding of conference on tailings and mine waste*, Canda, 9 pages. [٧٧]
- Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., and Moss, R.E.S. (2004). “Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(12), 1314-1340. [٧٨]
- Kramer. S.L, Mayfield. R. T, Hunag, Y, (2008), *Performance-Based Liquefaction Potential Evaluation*, USGS Research Award, 53 pages. [٧٩]
- Richards. K. S, (2012), Internal erosion-potential failure mode, Federal energy regulatory commission, 31 pages. [٨٠]
- Jantzer. J, Knutsson. S, Critical gradients for tailings dam design. [٨١]
- Best practices in dam and levee safety risk analysis, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (2012), Chapter 12,18, PP. 24 pages. [٨٢]
- Westen. C.J. van, *Deterministic landslide hazard zonation*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Department of Earth Resources Surveys, Netherlands, 12 pages. [٨٣]
- Folchi, Roberto. *Environmental impact statement for mining with explosives: a quantitative method*. I.S.E.E 29th annual conference on explosive and blasting technique, USA. 2003. 12 pages [٨٤]
- Osanloo. Morteza. M.rahmanpour. mine design selection considering sustainable development, *proceeding of conference on Mine Planning and Equipment Selection (MPES)*. 2013, 13 pages [٨٥]
- Rici. M et al, (2007), Floods from tailings dam failures, *Journal of Hazardous Materials* 154- Elsevier, PP 79-87 [٨٦]
- Costa, J. E, (1985), Floods from tailings dam failure, united state department of the interior, 59 pages [٨٧]
- Best practices in dam and levee safety risk analysis, U.S. Department of the [٨٨]

- Interior Bureau of Reclamation, (2012), Chapter 21, PP. 24 pages.
- Pearce, D. et al, (2006), Cost-benefit analysis and the environment (recent development), ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 318 pages [۸۹]
- مطالعات ارزیابی ریسک محیط زیستی در مجتمع معدن مس سونگون (گزارش نهایی ۱)، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، شرکت ملی صنایع مس ایران، مجتمع سونگون، بهمن ماه ۱۳۹۰ [۹۰]
- مرادی، گلناز، بررسی شاخص های توسعه پایدار و نقش آن در طراحی معادن روباز (مطالعه موردی: معدن مس پورفیری سونگون)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۳ [۹۱]
- Osanloo M., Rahmanpour M., “Mine design selection considering sustainable development”, Proceedings of the 21th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, MPES (2013). [۹۲]
- گزارش عملکرد معدن و کارخانه مجتمع مولیبدن مس آذربایجان، ۱۳۹۴ [۹۳]
- گزارش زمین شناسی معدن مس سونگون، شرکت پارس اولنگ، ۱۳۹۳ [۹۴]
- گزارش طراحی و ساخت سد باطله معدن مس سونگون، شرکت پارس اولنگ، ۱۳۹۳ [۹۵]
- گزارش های ترفیع سد باطله معدن مس سونگون، شرکت طوس آب، ۱۳۹۳ [۹۶]
- Ishihara, K. et al. 1980. Cyclic strength characteristics of tailings materials, soils and foundations. 20(4). [۹۷]
- Tailings storage stat-up civil work, Sungun copper project, Australian tailings consultant, ATC Williams, Vol, 1 to 4, 2004. [۹۸]
- Pankaj. Sh, er al, (2013), Estimation of Shear Strength of Prototype Rockfill Materials, International Journal of Engineering Sciences, 2(8), PP 421-426 [۹۹]
- Chen.Q, (2011), probabilistic slope stability analysis of a 300 m high embankment dam, GeoRisk, ASCE, PP 452-460 [۱۰۰]
- Soroush.A, Jannatiaghdam.R, (2012), Behavior of rockfill materials in triaxial compression testing, International Journal of Civil Engineering, Elsevier, pp 153-161 [۱۰۱]
- Vertical stress increases in soil, (2015), UMASS [۱۰۲]
- Ramazi, H. R, Jalali. M, (2015) Seismological and Geostatistical Study of the Ahar-Varzaghan Earthquake, August 11, 2012, Geodynamics Research International Bulletin, 16 pages. [۱۰۳]
- اطلاعات لرزه نگاری دفتر فنی مجتمع مس سونگون، به روز شده در سال ۹۵ [۱۰۴]
- Mousavi. M, Test of goodness of the NGA ground motion equations to predict the strong-motions of the 2012 Ahar–Varzaghan dual earthquakes in north-west of Iran, 2International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 27 pages. [۱۰۵]
- Economic consequence methodology for dam failure scenarios, (2009), U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 47 pages. [۱۰۶]
- Green. M, (2014), The economic consequence of restoration, Headwaters Econimices, 16 pages [۱۰۷]

پیوست ۱

نمونه پرسشنامه فارسی

پاسخ دهنده گرامی

با سلام و احترام

ضمن قدردانی از وقتی که صرف تکمیل این پرسشنامه می‌فرمایید، به استحضار می‌رساند، این پرسشنامه به منظور بررسی عوامل موثر در شکست سد باطله معادن مس تنظیم گردیده است. لطفاً تاثیر هر یک از این عوامل را با دادن امتیاز ۱ تا ۱۰ (از خیلی کم تا خیلی زیاد) مشخص فرمایید.

۱. هریک از عوامل زیر تا چه میزان در شکست سد باطله به دلیل سرریز (Overtopping

Failure) اثرگذار است؟

شکست سد به دلیل سرریز										
اثرگذاری کم ← اثرگذاری زیاد										
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
										بارندگی شدید و پیش بینی نشده (با توجه به مدت زمان بارش)
										ژئومتری سد (ارتفاع سد، ارتفاع تاج سد، شیب دیواره بالایی و پایینی)
										شکست یا عدم طراحی مناسب ظرفیت و نرخ تخلیه سرریز (Spillway)
										ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد استفاده شده در دیواره و تاج سد
										شکست سد به دلیل سرریز مواد باطله
										فرسایش سطحی سد

۲. هریک از عوامل زیر تا چه میزان در شکست سد باطله به دلیل شکست رگاب (Piping Failure) اثرگذار است؟

شکست سد به دلیل شکست رگاب										
اثرگذاری کم ←					اثرگذاری زیاد					
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
										نشستی دیواره یا کف سد
										فرسایش داخلی (هوازدگی، درزه، شکاف، اصطکاک داخلی مواد)
										اثر واکنش‌های تیلینگ با دیواره سد (شیمایی، مکانیکی)

۳. هریک از عوامل زیر تا چه میزان در شکست سد باطله به دلیل شکست پی و فونداسیون (Foundation Failure) اثرگذار است؟

شکست سد به دلیل شکست پی و فونداسیون										
اثرگذاری کم ←					اثرگذاری زیاد					
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
										مصالح نامناسب فونداسیون
										رانش زمین
										ویژگی‌های زمین شناسی پی (نفوذپذیری، درزه، شکاف)
										ویژگی‌های ژئوتکنیک پی (زاویه اصطکاک داخلی، نیروی بهم چسبندگی)
										افزایش فشار هیدرواستاتیک
										تنش و کرنش‌های وارد شده به پی سد

۴. هر یک از عوامل زیر تا چه میزان در شکست سد باطله به دلیل شکست شیب و دیواره سد

(Slop Failure) اثرگذار است؟

شکست سد به دلیل شکست شیب و دیواره سد										
اثرگذاری کم ← اثرگذاری زیاد										
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
										نوع طراحی سد
										شیب نامناسب دیواره سد
										نشستی
										شکست شیب سد حین عملیات افزایش ارتفاع
										افزایش فشار هیدرولیکی ناشی از باران شدید
										افزایش فشار هیدرواستاتیک ناشی از افزایش درجه سیالی (در اثر زلزله یا بعد از وقوع زلزله)
										افزایش فشار هیدرواستاتیک ناشی از افزایش درجه سیالی به صورت ایستا
										شکست هسته سد
										شکست سد حین عملیات بازسازی

۵. هریک از عوامل زیر (به صورت مستقل) تا چه میزان در شکست سد باطله موثر هستند؟

اثرگذاری کم ← اثرگذاری زیاد										عوامل موثر در شکست سد
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
										لرزه خیزی منطقه
										آب و هوا و شرایط جوی منطقه
										شرایط توپوگرافی منطقه
										شرایط زمین شناسی منطقه
										پتانسیل رانش زمین در اطراف سد
										شدت امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار اطراف سد و یا رفت و آمد ماشین آلات سنگین
										جریان آب‌های سطحی و زیر زمینی
										فونداسیون سد
										مواد پرکننده دیواره سد
										جانمایی سد
										طراحی سد
										خواص فیزیکی و شیمیایی مواد باطله
										نرخ ته نشین شدن مواد باطله
										عدم قطعیت تناژ و عیار
										عدم قطعیت تولید
										عمر سد
										کنترل نشستی و پایش سد
										فرسایش سطحی و داخلی سد
										میزان آب محتوای مواد باطله
										شیب و نرخ ته نشین شدن مواد باطله در سد در مقایسه با نرخ دریافت مواد باطله
										پتانسیل افزایش درجه سیالی
										نشست زمین در اطراف سد

۶. هر یک از تبعات شکست سد باطله تا چه میزان اثرگذاری و خسارت بیشتری دارد؟

تبعات ناشی از شکست سد باطله											
اثرگذاری کم ←					اثرگذاری زیاد						
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
										آلودگی خاک	زیست محیطی
										آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی	
										از بین رفتن پوشش‌های گیاهی	
										از بین رفتن گونه‌های جانوری	
										مرگ و میر	اجتماعی
										از بین رفتن شغل	
										از بین رفتن منازل و زیرساخت‌ها	اقتصادی
										توقف یا کاهش تولید معدن یا بسته شدن آن	
										خسارات وارد شده به معدن و ماشین آلات	
										جریمه‌های زیست محیطی	
										از بین رفتن هزینه‌های سرمایه‌ای ساخت سد و زیرساخت‌ها	
										هزینه پاک سازی زیست محیطی	
										افت سهام شرکت	

۷. هر یک از عوامل زیر تا چه میزان در شدت تبعات شکست سد باطله موثر است؟

عوامل موثر در شدت تبعات شکست سد باطله										اثرگذاری کم ← اثرگذاری زیاد									
										۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
حجم مواد باطله در سد (تخمین نادرست در حجم سد)																			
توپوگرافی منطقه																			
شرایط آب‌های سطحی																			
اکوسیستم منطقه																			
حجم مواد خارج شده از سد پس از شکست سد																			
سرعت حرکت مواد باطله پس از شکست																			
سیستم های پایش سد و هشدار																			
افراد ساکن در منطقه																			
خواص فیزیکی و شیمیایی مواد باطله																			

با تشکر از شما ، لطفا برای تکمیل مطالعات مستدعی است مشخصات زیر را تکمیل فرمایید.

عنوان و سمت:
تحصیلات:
میزان تجربه کاری:
سن :

“Questionnaire”

This questionnaire is prepared for analyzing the effects and the importance of parameters in copper mine tailings dam failure. Please determine the effects and the importance of each parameter by given number from 1 to 10 (low effect to high effect).

- 1- Please determine the effect of each parameter on Overtopping tailings dam failure?

Tailings Dam Failure Due to Overtopping	low Effect					High Effect				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Excessive and unpredictable rainfall (considering the rainfall duration)										
Dam's geometry (Dam high, Dam crest, up/down stream slope of the dam shell)										
Spillway Failure or insufficient spillway capacity and discharge rate										
Geotechnical property of materials used in dam construction										
Overtopping of tailings material										
Surface erosion of dam										

- 2- Please determine the effect of each parameter on Piping tailings dam failure?

Tailings Dam Failure Due to Piping	low Effect					High Effect				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Seepage through the dam or foundation										
Internal erosion (weathering, joints and fractures, erodes and carries of embankment's materials)										
Tailings physical and chemical treatment by earthfill material										

3- Please determine the effect of each parameter on Foundation tailings dam failure?

Tailings Dam Failure Due to Foundation Failure	Low Effect					High Effect				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inappropriate foundation material										
Landside										
Geological characteristic of the foundation (Permeability, joints and fractures)										
Geotechnical characteristic of foundation (cohesive force, angle of internal friction)										
Increasing in hydrostatic pressure										
Strain and shear stress's effect on foundation										

4- Please determine the effect of each parameter on Slop tailings dam failure?

Tailings Dam Failure Due to Slop Failure	Low Effect					High Effect				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Type of dam design										
Unsuitable slop of dam shell										
Seepage through the dam or foundation										
Slope failure during dam operation										
Increasing in hydraulic pressure due excessive rainfall										
Increasing in hydrostatic pressure due to liquefaction (as an earthquake result)										
Increasing in hydrostatic pressure due to static liquefaction										
Core failure										
Dam break during reclamation process										

5- Please determine the effect of each parameter (independently) on tailings dam failure?

Effective parameters on tailings dam failure	low Effect → High Effect									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Regional seismicity										
Weather and climate conditions of the region										
Topographic conditions										
Geological conditions										
Potential landslides around the dam area										
Intensity seismic waves caused by explosions or traveling around the dam and heavy machinery										
Surface and underground water flow										
Dam foundation										
Embankment material										
Dam location										
Dam design										
Physical and chemical characteristic of tailings										
Rate of material settlement										
Grade and tonnage uncertainty										
Mine production uncertainty										
Years of dam activity										
Seepage and dam monitoring system										
Surface and internal erosion										
Water contaminate of tailings										
Rate of tailings internal in comparison with tailings settlement										
Liquefaction potential										
Land subsidence near the dam area										

6- Please determine the intensity of tailings dam failure consequence for each category?

Consequence of dam failure		Low Effect —————▶ High Effect									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Environment	Soil contamination										
	Surface and underground water contamination										
	Destruction of vegetation										
	Loss of animal species										
Social	Fertility										
	Loss of job										
Economy	Destruction of house and infrastructure										
	Pause or decrement of mine production or premature mine closure										
	Damage to the mine and equipment										
	Environmental penalty										
	The loss of capital costs of dam construction and infrastructure										
	The cost of environmental cleanup										
	The company stock drop										

7- Please determine the effect of parameter on intensity of tailings dam failure consequence?

Important parameters effects on intensity of tailings dam failure consequence	Low Effect → High Effect									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tailings dam volume (miss estimation of tailings dam's volume)										
Topography of the region										
Surface water condition										
Ecosystem of the region										
Outflow after dam failure										
Speed of outflow										
Dam monitoring and warning system										
Living people										
Physical and chemical characteristic of tailings material										

For analysis the result of questionnaire please fill out the bellow information.

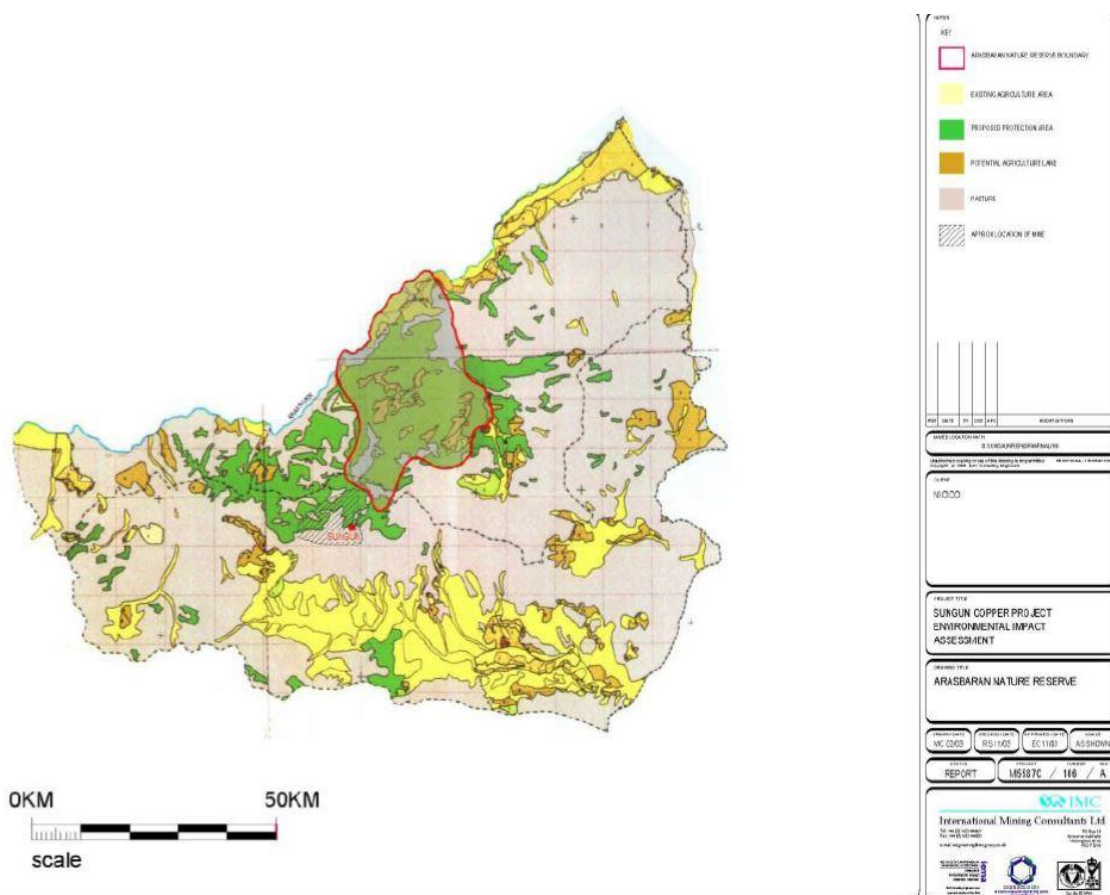
<p>Affiliation:</p> <p>Education:</p> <p>Years of experience:</p> <p>Age:</p>

Thanks a lot for your time

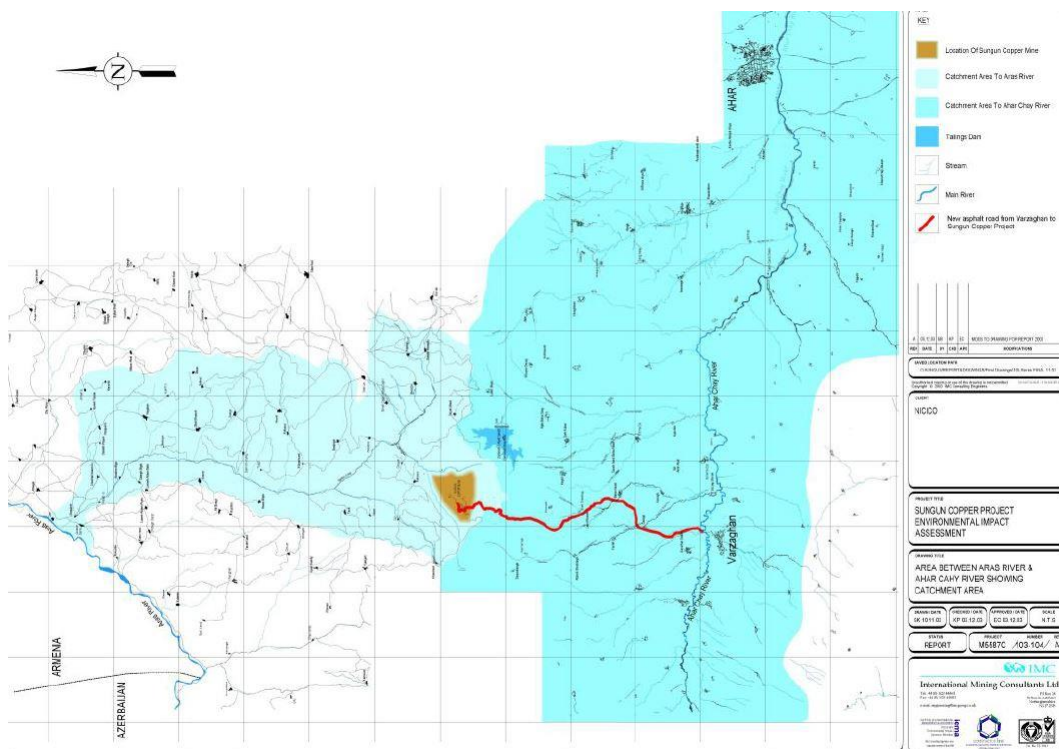
پیوست ۲

اطلاعات سد باطله معدن مس سونگون

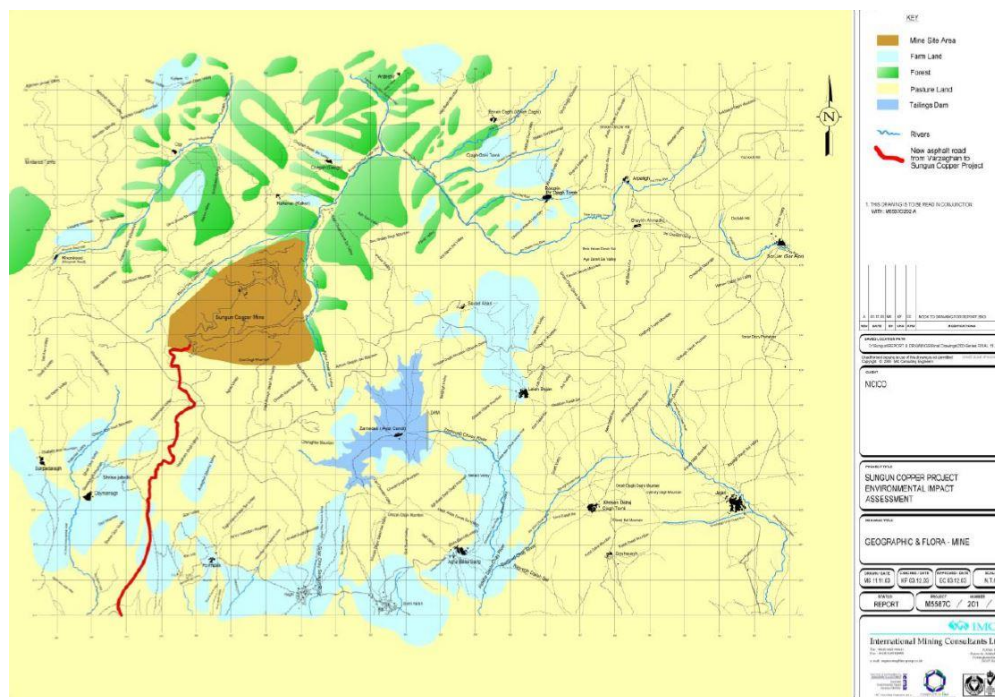
به دلیل اهمیت موقعیت مکانی سد باطله در مطالعات تحلیل ریسک شکست سد، موقعیت مکانی سد باطله نسبت به معدن، عوارض طبیعی، رودخانه، منطقه حفاظت شده ارس باران و مناطق مسکونی پایین دست، پوشش گیاهی، حوضه‌های آبریز و رودخانه‌ها، همچنین موقعیت توپوگرافی منطقه، در شکل‌های (پ-۱) تا (پ-۶) نشان داده شده است.



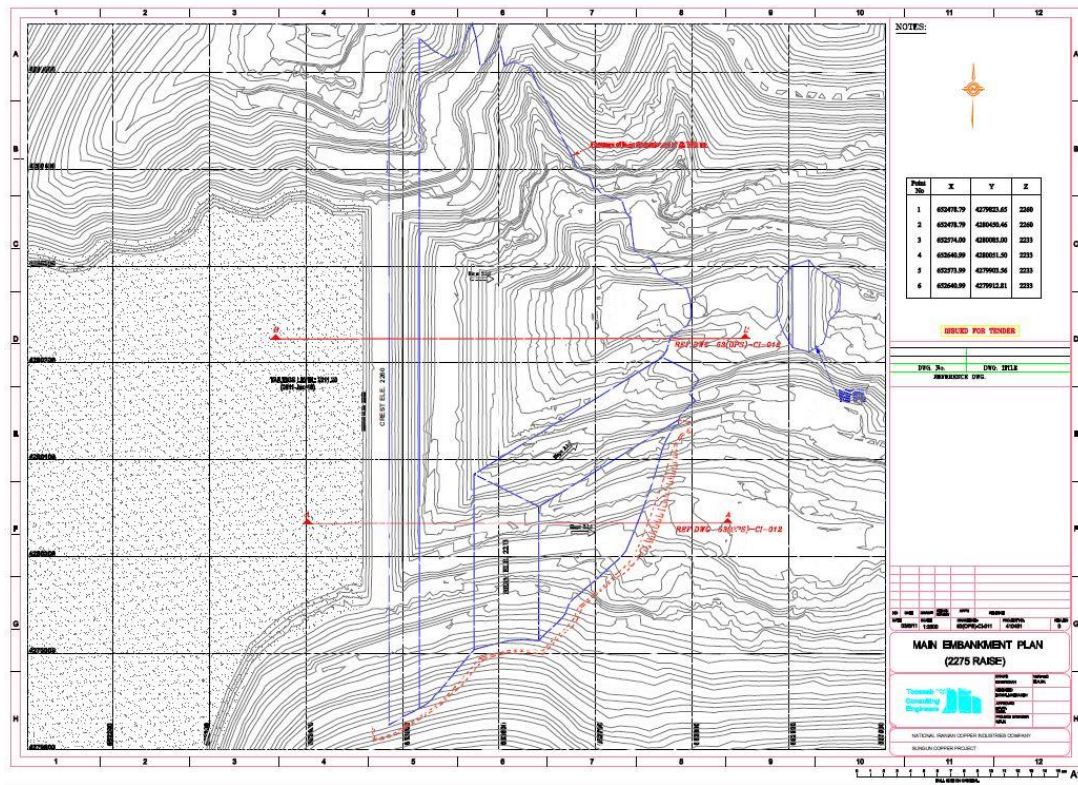
جدول پ-۱: محدوده ذخیره گاه زیست‌کره ارسباران و موقعیت آن نسبت به محدوده معدن



جدول پ-۲: محدوده حوضه‌های آبریز ایلگینه چای و اهر چای که به ترتیب به رود ارس و سد ستارخان منتهی می‌شوند.



جدول پ-۳: پوشش گیاهی اطراف محدوده جغرافیایی ذخیره‌گاه زیست‌کره ارسباران



جدول پ-۴: توپوگرافی محل سد باطله معدن مس سونگون



جدول پ-۵: بدنه سد باطله معدن مس سونگون



جدول پ-۶: نمای کلی سد باطله معدن مس سونگون

Abstract

Tailings production is going to increase due to world's population growth, high demand and consumption of metals and minerals, ore deposits with low grade and quality and new mineral processing technology. Tailings dam failure causes catastrophic result to the environment and high cleanup cost. In this study, the implementation of risk analysis of tailings dam failure is used to predict the probability of tailings dam failure and its consequences. In this study, the reasons and the results of more than 300 tailings dam failure, between 1914 up to 2015, are studied. The important factors of tailings dam failure are recognized based on the studied tailings dam failures. These 24 factors are classified into four failure mechanism and the weights and the performances of factors are evaluated using Preference Voting System (PVS) method. The mechanism and their weighting results namely are: slope failure by 48.9%, overtopping failure by 23.7%, piping failure by 20.4% and foundation failure by 6.9% respectfully. As the analysis of tailings characteristics is vital for tailings dam failure analysis, the most important characteristic such as tailings void ratio, consolidation rate, pore water pressure and shear stress are studied for Sungun copper mine of Iran. The results of comparison between Sungun tailings characteristic and other copper mine's tailings, indicated the similar range of change. The new degree risk method of failure is developed based on weight and the probability of dam failure due to each failure mechanism. The probability of failure is estimated using structural reliability analysis and elements in factor of safety. The elements in factor of safety for slope stability of tailings dam failure is modified by considering the shear stress of tailings materials. The Monte Carlo simulation is applied to evaluate the probability of failure. The modified Folchi method is applied for the consequence evaluation of tailings dam failure. The consequence of failure is classified in to three category based on the criteria of sustainable development namely social, environment and economy. Cost-Benefit analysis is used for prediction the economic consequence of tailings dam failure considering the benefit of tailings dam reclamation (forestry reclamation) and the cost of dam break and cleanup. The proposed methodologies are applied for Sungun copper mine. The results of this study shown that the probability of tailings dam failure in Sungun, due to slope failure 67.3 %, overtopping 64 %, foundation failures are zero. In this investigation, the results indicated that the probability of failure due to slope instability or structure failure is in dangere zone. Overtopping failure is in high risk in unpredictable raining weather. The consequence of failure using modified Folchi method indicated that in the case of Sungun tailings dam failure, the consequences are, economy 100%, social 80 % and environmental 65% which catastrophic result of will happen.

Key Words: Tailings, Probability of Failure, Tailings Dam, Weighting Method, Structural Reliability Theory, Monte Carlo Simulation, Failure Consequence, Folchi Metho



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Mining Exploration Engineering

**Risk analysis of tailings dam failure and its environmental
management, a case study: Sungun copper mine**

By: Marziyeh Minaei Mobtaker

Supervisors:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Faramarz Doulati Ardejani

July 2016