



وزارت نیرو
معاونت امور آب و برق
دفتر مهندسی و معیارهای فنی
آب و برق

نشریه

بررسی، گردآوری و ارزیابی فنی تجارب کاربردی و اجرایی مطالعات شکست سدها در کشورهای پیشرو در این زمینه



نشریه

**بررسی، گردآوری و ارزیابی فنی تجارب
کاربردی و اجرایی مطالعات شکست سدها
در کشورهای پیشرو در این زمینه**

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور برای نیل به این هدف، با مشخص کردن رشته‌های اصلی صنعت آب اقدام به تشکیل مجامع علمی - تخصصی با عنوان کمیته های تخصصی کرده که نظارت بر تهیه این استاندارد ها را به عهده دارند.

استاندارد های صنعت آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین می گردد:

- استفاده از تخصص ها و تجارب کارشناسان و صاحب نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
 - استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین المللی
 - بهره گیری از تجارب دستگاه های اجرایی، سازمان ها، نهادهای، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
 - ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره برداری و ارزشیابی طرح ها
 - پرهیز از دوباره کاری ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
 - توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد
- طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور به منظور تسهیل در امر استفاده از استاندارد ها، تدوین و یا ترجمه نشریات و کتب تخصصی مرتبط با استانداردها را نیز در دستور کار خود داشته و نشریه حاضر در راستای نیل بدین هدف تهیه شده است .
- آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب نظرانی که فعالیت آنها به نوعی در ارتباط با تهیه استانداردهای صنعت آب می باشد موجب امتنان خواهد بود.

ترکیب اعضای تهیه کننده، کمیته و ناظران تخصصی

این نشریه در مرکز تحقیقات آب با مسوولیت جناب آقای محمدعلی تربتی و با همکاری افراد زیر به ترتیب حروف الفبا

تهیه شده است:

بابک بزرگی	مرکز تحقیقات آب	دکترای مهندسی عمران - هیدرولیک
محمدعلی تربتی	مرکز تحقیقات آب	فوق لیسانس مهندسی عمران - آب
عبدالمجید محمدیان	مرکز تحقیقات آب	دکترای مهندسی عمران - آب
مسعود نصیری	مرکز تحقیقات آب	دکترای مهندسی عمران - هیدرولیک محاسباتی

گروه نظارت که مسوولیت نظارت تخصصی بر تدوین این نشریه را به عهده داشته اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

مصطفی بزرگ زاده	کارشناس آزاد	فوق لیسانس مهندسی هیدرولیک
محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسين مشاور توان آب	فوق لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
چنگیز فولادی	شرکت مهندسين مشاور پیماب	دکترای عمران - سازه های آبی

اعضای کمیته تخصصی سد و تونل های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور که بررسی و تایید

نشریه حاضر را بر عهده داشته اند به ترتیب حروف الفبا عبارتند از:

مسعود حدیدی مود	شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس	فوق لیسانس مهندسی مکانیک
ناصر خیرخواه	شرکت مهندسين مشاور بهان سد	فوق لیسانس مهندسی راه و ساختمان
علیرضا دائمی	وزارت نیرو	فوق لیسانس مهندسی سازه های هیدرولیکی
رضا راستی اردکانی	دانشکده صنعت آب و برق	دکترای مهندسی عمران
نوشین رواندوست	طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور - وزارت نیرو	لیسانس مهندسی سازه

محمدطاهر طاهری بهبهانی	شرکت مهندسين مشاور توان آب	فوق لیسانس مهندسی منابع آب (هیدرولیک)
محمد رضا عسکری	شرکت مهندسين مشاور بند آب	دکترای مهندسی عمران
سیاوش لیتکوهی	شرکت مهندسين مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک	دکترای ژئوتکنیک

علی یوسفی	شرکت خدمات مهندسی برق ایران (مشانیر)	فوق لیسانس مهندسی معدن و زمین شناسی مهندسی
-----------	--------------------------------------	--

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۳	فصل اول- جستجو و بررسی سه نمونه مرجع یا استاندارد موجود در این زمینه
۵	۱-۱- کلیات
۷	فصل دوم- گردآوری و مدون نمودن استانداردهای بررسی شده
۹	۱-۲- مقدمه
۹	۲-۲- رهنمود کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) - تحلیل خطر سیل ناشی از شکست سد
۹	۱-۲-۲- کلیات
۹	۲-۲-۲- ایمنی سد
۱۰	۳-۲-۲- طبقه‌بندی خطر
۱۰	۴-۲-۲- نقشه آب‌گرفتگی
۱۰	۵-۲-۲- دستورالعمل برای اقدام‌های لازم در شرایط اضطراری
۱۰	۶-۲-۲- دستورالعمل عملیات نجات
۱۱	۷-۲-۲- ارزیابی ریسک شکست سد
۱۱	۸-۲-۲- تدوین قانون
۱۱	۹-۲-۲- سایر کاربردهای مدل‌های سیل ناشی از شکست سد
۱۱	۱۰-۲-۲- متدولوژی تحلیل خطر سیل ناشی از شکست سد
۱۲	۱۱-۲-۲- مکانیزم شکست سد
۱۳	۱۲-۲-۲- مدل‌سازی فیزیکی پدیده شکست سد
۱۴	۱۳-۲-۲- فرضیات پیشنهادی و روش‌های محاسبه برای شبیه‌سازی شکست
۱۴	۱۴-۲-۲- فرمول‌های تخمین بده حداکثر
۱۴	۱۵-۲-۲- مدل‌سازی ریاضی یک‌بعدی امواج شکست سد
۱۵	۱۶-۲-۲- جنبه‌های عملی محاسبات موج ناشی از شکست سد
۱۷	۱۷-۲-۲- رایج‌ترین نتایج آنالیز سیلاب ناشی از شکست سد
۱۷	۱۸-۲-۲- آنالیز حساسیت شکست سد
۱۸	۱۹-۲-۲- روندیابی سیل در دره پایین‌دست سد
۱۸	۲۰-۲-۲- نتایج روندیابی سیل با توجه خاص به ارزیابی خطر سیل مورد استفاده مسوولین تخلیه سد

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۸	۲-۲۱- کاربرد نقشه‌ها برای نمایش پوشش سیل، نتایج روندیابی سیل و ارزیابی ریسک (تهیه نقشه آب‌گرفتگی) و استفاده‌های دیگر از نقشه‌ها
۱۸	۲-۲۲- مدل‌های ریاضی دوبعدی امواج شکست سد
۱۹	۲-۲۳- رفتارهای خاص هیدرولیکی و مناطق شهری
۱۹	۲-۲۴- سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، ابزار پشتیبانی مناسب در مدل‌سازی دوبعدی انتشار سیل
۲۰	۲-۲۵- مدل‌سازی فیزیکی امواج شکست سد
۲۰	۲-۲۶- مدل‌های عددی شکست سد (امکانات و قابلیت‌ها)
۲۱	۲-۳- رهنمود ایالات متحده امریکا
۲۱	۲-۳-۱- کلیات
۲۱	۲-۳-۲- تحلیل سیل‌گرفتگی ناشی از شکست سد
۲۲	۲-۳-۳- برآورد مشخصات شکاف سد
۲۲	۲-۳-۴- روندیابی سیل ناشی از شکست سد در پایین‌دست
۲۲	۲-۳-۵- تهیه نقشه آب‌گرفتگی
۲۳	۲-۳-۶- آنالیز حساسیت
۲۴	۲-۳-۷- طبقه‌بندی خسارت پایین‌دست
۲۵	۲-۳-۸- گزارش‌های مهندسی برای تحلیل سیل‌گرفتگی شکست سد و طبقه‌بندی ریسک پایین‌دست
۲۵	۲-۴- رهنمود کشور نیوزیلند (NZSOLD)
۲۵	۲-۴-۱- کلیات
۲۶	۲-۴-۲- دیدگاه‌های فنی
۳۲	۲-۵- رهنمودهایی در مورد سیل‌های شکست سد
۳۲	۲-۵-۱- کلیات
۳۲	۲-۵-۲- مکانیزم و تشریح مراحل شکست سد
۳۳	۲-۵-۳- محاسبه جریان عبوری از شکاف
۳۳	۲-۵-۴- رفتار مخزن
۳۳	۲-۵-۵- انتشار موج سیلاب
۳۴	۲-۵-۶- مدل‌های پیشنهادی شکست سد
۳۵	فصل سوم - تاریخچه حوادث ناشی از شکست سد
۳۷	۳-۱- کلیات

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۳۷	۲-۳- شکست سد تتون
۴۷	۳-۳- شکست سد سنت فرانسیس
۴۸	۴-۳- شکست سد لاون لیک
۴۹	۵-۳- شکست سد بالدوین هیلز
۵۰	۶-۳- شکست سد رسوبگیر لوس فرایلس
۵۲	۷-۳- شکست سد کلی بارنز
۵۳	۸-۳- شکست سد اولد استونی ریور
۵۳	۹-۳- شکست سد بوفالو کریک
۵۴	۱۰-۳- سد گووهو
۵۴	۱۱-۳- جدول شکست سد در ایالت کالیفرنیا
۵۷	فصل چهارم- تبیین ضرورت انجام مطالعات شکست سد
۵۹	۱-۴- کلیات
۵۹	۲-۴- معرفی انواع شکست سد
۶۰	۳-۴- تقسیم‌بندی سدها به لحاظ اهمیت مطالعات شکست سد و عوامل موثر در آن
۶۰	۱-۳-۴- خسارت پایین‌دست
۶۲	۲-۳-۴- خصوصیات و ماهیت مواد ذخیره شده پشت سد
۶۳	۳-۳-۴- سدهای چندگانه
۶۳	۴-۳-۴- ارتفاع سد و ظرفیت مخزن
۶۵	۵-۳-۴- نوع سد
۶۷	۶-۳-۴- عمر سد
۶۸	۷-۳-۴- زمان ساخت
۶۸	۸-۳-۴- سایر عوامل
۷۰	۴-۴- اثر مطالعات شکست سد بر طراحی، بهره‌برداری، تنظیم و ایمنی عمومی سد
۷۳	منابع و مراجع

مقدمه

با توجه به نیاز جوامع به آب، موضوع تامین آب از دیرباز به عنوان دغدغه اصلی انسان‌ها مطرح و عملاً در شکل‌گیری تمدن‌ها نقشی اساسی داشته است. در این میان، مهار آب‌های سطحی با هدف تنظیم رژیم آبدهی و ذخیره‌سازی سیلاب‌ها برای دوره‌های کم‌آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و طرح‌های سدسازی از چندین هزاره قبل در نقاط مختلف جهان به اجرا درآمده‌اند. گسترش طرح‌های سدسازی متأثر از رشد جمعیت بوده و ناگزیر از توسعه اراضی پایاب سدها می‌باشد. به همین دلیل، به مرور زمان و با توسعه هرچه بیش‌تر مناطق زیردست سدها، نگرانی‌های ناشی از شکست احتمالی سدها افزایش می‌یابد.

امروزه به دلیل وقوع موارد عیدهای از شکست سد و افزایش نگرانی‌ها، موضوع در سطح بین‌المللی جایگاه ویژه‌ای یافته و بر لزوم انجام مطالعات شکست سد تاکید روزافزون می‌شود. با روند پرشتاب توسعه سدسازی در کشور، طبیعی است که سوژه مطالعاتی شکست سد نیز باید جایگاه واقعی خود را در داخل کشور پیدا کند.

ضرورت انجام مطالعات موضوع نشریه حاضر توسط کمیته تخصصی سد و تونل‌های انتقال طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور در سال‌های اخیر مورد تاکید قرار گرفت و انجام مطالعات مربوط به شکست سد و تاثیر آن در پایاب سدها در دو مرحله پیش‌بینی شد:

- الف- مطالعات مفهومی (تبیین ضرورت مطالعات شکست سد و طبقه‌بندی از نظر نیاز یا عدم نیاز مطالعاتی) به صورت بررسی، گردآوری و ارزیابی فنی تجارب کاربردی و اجرایی مطالعات در کشورهای پیش‌رو در این زمینه.
 - ب- مطالعات گسترده و پیشرفته (تحلیل هیدرولیکی شکست سد، تهیه نقشه‌های آبگرفتی پایاب، برنامه‌های هشدار، آمادگی و امدادسانی) به صورت تهیه راهنمای مطالعات شکست سد و تاثیر آن در پایاب سدها.
- نشریه حاضر در ارتباط با ردیف «الف» تنظیم گردیده است. انتظار می‌رود که پس از رفع ابهامات و روشن شدن طیف مطالعاتی، مطالعات مرحله «ب» نیز به سرانجام رسد. مهم‌ترین ابهامات در مورد طیف مطالعاتی را می‌توان به شرح زیر برشمرد:
- این مطالعات برای چه سدهایی باید انجام شود؟ آیا هر سد بزرگی طبق تعریف COLD را شامل می‌شود؟
 - مطالعات مورد نظر در چه مرحله یا مراحل باید انجام شود؟ سدهای در حال بهره‌برداری، سدهای در دست ساخت و یا سدهای در حال مطالعه و طراحی؟
 - چنانچه این مطالعات برای سدهای ساخته شده موجود باید انجام شود، آیا نباید تمایزی بین سدهای قدیمی‌تر (که الزاماً با آمار محدودتر و روش‌های تقریبی‌تری طراحی شده و شناخت کم‌تری از کیفیت مصالح و نحوه اجرای آنها وجود دارد) و سدهای جدید قایل شد؟ مواردی نظیر سیلاب طراحی که وابستگی زیادی به کیفیت و طول دوره آماری داشته و سدهای قدیمی‌تر عمدتاً در زمان طراحی با این معضل مواجه بوده‌اند، از جمله مواردی است که احتمالاً در تبیین ضرورت انجام مطالعات شکست سد می‌تواند نقش داشته باشد. علاوه بر این، اثرات این مطالعات بر دستورالعمل بهره‌برداری چگونه خواهد بود؟
 - چنانچه این مطالعات باید در مرحله مطالعاتی انجام شود، اثرات مطالعات شکست سد بر توجیه اقتصادی و جزییات طراحی چگونه خواهد بود؟

در این نشریه علاوه بر مطالعات بند الف در مورد نحوه برخورد با مساله در چند کشور را نیز بررسی صورت گرفته است.

فصل ۱

جستجو و بررسی سه نمونه مرجع یا

استاندارد موجود در این زمینه

۱-۱- کلیات

به منظور گردآوری و مدون نمودن تجارب کاربردی و اجرایی مطالعات شکست سد در کشورهای پیشرو در این زمینه، جستجو و تحقیقات وسیعی در شبکه اینترنت و کتابخانه‌های شرکت‌ها و موسسات مرتبط انجام شد و در نهایت سه مرجع انتخاب و بررسی گردید. در این جستجو از کلمات کلیدی زیر استفاده شد:

Dam break - Dam failure - Dam breach - Dam safety - Flood - Risk analysis - Hazard classification - Standard - Guideline - Technical note - ICOLD - USCOLD - SANCOLD - IRCOLD - CHINCOLD

در جدول (۱-۱) به برخی از سایت‌هایی که در آنها اطلاعات و رهنمودهایی راجع به شکست سد وجود دارد و در این جستجو از آنها استفاده شده است، اشاره شده است.

برخی از کشورهای پیشرو در زمینه سدسازی و مطالعات شکست سد عبارتند از ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی، چین، استرالیا و کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ. از میان این کشورها، کشور چین دارای منابع آبی بسیار غنی است و در زمینه سدسازی و مطالعات مربوط به آن از باتجربه‌ترین کشورهای دنیا محسوب می‌گردد و استفاده از مراجع و استانداردهای این کشور بسیار مفید به نظر می‌رسد. طی جستجو برای دستیابی به مراجع و استانداردهای مطالعات شکست سد این کشور، به اطلاعاتی در مورد چارت سازمانی وزارت منابع آب چین نیز دست یافتیم. وزارت منابع آب چین از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. از میان این بخش‌ها، اداره کل طرح‌های اجرایی، مسوولیت تنظیم قوانین و دستورالعمل‌های فنی را بر عهده دارد. اما دسترسی به این قوانین و دستورالعمل‌ها از طریق جستجو در اینترنت و کتابخانه‌ها یافت نشد. تنها منابع موجود قابل دسترسی در اینترنت به زبان چینی نوشته شده‌اند و هیچ مرجع قابل دسترسی به زبان انگلیسی یافته نشد.

در نهایت استانداردها و رهنمودهای کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ، ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی و نیوزیلند انتخاب شد که در بخش بعد توضیحاتی در مورد هریک از آنها آمده است.

جدول ۱-۱- فهرست برخی سایت‌ها در زمینه شکست سد و مطالعات آبی

Site Address	Description
http://www.qp.gov.bc.ca/statreg/reg/W/Water/44_2000.htm	(Water Act BRITISH COLUMBIA DAM SAFETY REGULATION)
http://www.quideme.com/Bookstores/DAMSAFE.HTM	
http://www.gov.ab.ca/ma/ema/planning_models/dam_breach.cfm	
http://www.amec.com/earthandenvironmental/what/services_2ndlevel.asp?pageID=1097	(AMEC, the international engineering services company providing design, project delivery and support for oil and gas, transport, infrastructure and industrial clients worldwide.)
http://www.smeccom.au/technical/water/dams/dsr.htm	(SMEC Group of Companies)
http://www.cda.ca/cda/main/guide.htm	(The Canadian Dam Association L'Association canadienne des barrages)
http://water.nv.gov/Engineering/damsafety.htm (Nevada Division of Water Resources)	
http://www.civilbookstore.com/index/page 1/keyword/safety_dams.html	(civil engineering bookstore on the Internet)
http://www.dnr.state.oh.us/water/pubs	
http://www.thelandgrp.com/water_resource_management.htm	
http://www.engineering.usu.edu/uwrl	
http://www.eng.ox.ac.uk/World/Research/Summary/B-Water.html#P-Borthwick.AGL.14	
http://www.damsafety.nsw.gov.au	
http://www.floodrisknet.org.uk/disciplines/section?section=application-dam_safety	
http://www.icold-cigb.net	
http://www.fema.gov/fima/damsafe	
http://www.icivilengineer.com/Hydraulic_Engineering/Dam_Engineering	
http://www.uscid.org/~uscold	
http://etd.pnl.gov:2080/data.html	
http://www.worlwate.org/links.htm	
http://www.dwaf.gov.za/default.asp	
http://www.ancold.org.au/index.html	
http://www.lifewater.ca/links.htm	
http://www.ferc.gov/default.asp	
http://www.efchina.org/applications.cfm	
http://www.bchydro.com/careers/postings/posting8376.html	
http://www.wes.army.mil/ITL/damsafe/WU-plan.html	
http://www.dnr.state.wi.us/org/water/wm/dsfm/staff.htm	
http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/breach/breach.links.html	
http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/damsafety/ds.html	
http://www.ecy.wa.gov/biblio/9255e.html	
http://www.dlr.enr.state.nc.us/dam.html	
http://www.enr.state.nc.us	
http://www.anr.state.vt.us/dec/fed/DSS.htm	
http://www.dcr.state.va.us/sw/dsveget.htm	
http://www.dnr.state.ne.us/docs/damsafety.html	
http://water.state.co.us/damsafety/dams.asp	
http://www.rmismfamily.com/sites/disasdamsa.php	
http://www.mde.state.md.us/Programs/WaterPrograms/Dam_Safety/techref/technicalreferences.asp	

فصل ۲

گردآوری و مدون نمودن

استانداردهای بررسی شده

۱-۲-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و معرفی استانداردهای منتخب می‌پردازیم، در معرفی این استانداردها تلاش شده تا چارچوب ساختاری هریک از آنها به انضمام خلاصه‌ای از هریک از زیرعنوان‌های معرفی شده، ارائه گردد.

۲-۲-۲- رهنمود کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ - تحلیل خطر سیل ناشی از شکست سد

۱-۲-۲-۱- کلیات

در این رهنمود ابتدا کلیاتی درخصوص دلایل کلی ضرورت انجام تحلیل خطر شکست سد و نیازهای مرتبط با آن به همراه واژه‌نامه گسترده‌ای از عبارات مورد استفاده در این رهنمود ارائه گردیده است. سپس متدولوژی تحلیل خطر سیل شکست سد مورد بررسی قرار گرفته و به دنبال آن مکانیزم شکست سد ارائه گردیده است. در ادامه، مدل‌سازی ریاضی یک‌بعدی امواج شکست سد و جنبه‌های کاربردی آن مورد بررسی قرار گرفته است. موضوعات اصلی ارائه شده در آنالیز خطر شکست سد در این رهنمود عبارتند از:

- ایمنی سد
- طبقه‌بندی خطر
- نقشه آب‌گرفتگی
- دستورالعمل عملیات اضطراری^۱
- دستورالعمل عملیات نجات^۲
- ارزیابی ریسک شکست سد
- تدوین قانون
- و سایر کاربردهای مدل‌های سیل شکست سد.

اولویت این موضوعات، از کشوری به کشور دیگر و از موسسه‌ای به موسسه دیگر متفاوت است، اما تمام این موضوعات باید به تفکیک در ارزیابی ریسک شکست سد در نظر گرفته شوند.

۲-۲-۲-۲- ایمنی سد

در طرح، ساخت و بهره‌برداری از سدها، نیازهای ایمنی باید در نظر گرفته شوند. این نیازها ممکن است مسوولیت‌های تخصصی یا قانونی باشند. هزینه‌های نیازهای ایمنی روی امکان‌پذیری پروژه تاثیر می‌گذارند و معمولاً نیازها با توجه به پتانسیل خطر تحمیل شده به وسیله شکست سد تعریف می‌گردند. از آنالیز شکست سد می‌توان برای تعیین طبقه‌بندی خطر و نیازهای ایمنی سد استفاده کرد.

۲-۲-۳- طبقه‌بندی خطر

«خطر سیل» عبارت است از پتانسیل خسارت جانی و مالی پایین دست سد ناشی از جریان سیل، مواد شناور یا رسوب رها شده از سد یا شکست سد. اهداف طبقه‌بندی خطر سیل عبارتند از:

- انتخاب سطح فعالیت‌ها (دستور کار)
- اولویت تصمیم‌گیری
- زمان‌بندی فعالیت‌ها
- تنظیم و تهیه استانداردهای طراحی
- آنالیز ریسک

طبقه‌بندی خطر باید خسارت مستقیم و غیرمستقیم را در بر گیرد.

۲-۲-۴- نقشه آب‌گرفتنی

نقشه‌های آب‌گرفتنی نمایش دهنده رقوم سیل‌های طبیعی با دوره بازگشت‌های مشخص (در اکثر موارد تا حداکثر سیل محتمل^۱) و خطوط تراز سیل‌های شکست سد در اثر شکست روز آفتابی^۲ یا شکست در شرایط سیلابی هستند. از این نقشه‌ها در کنترل فعالیت‌های ساخت در مناطق سیل‌گیر پایین دست سد با در نظر گرفتن طرح‌های تخلیه این مناطق در شرایط شکست سد، همچنین در برنامه‌ریزی زیربنایی ساخت در این مناطق استفاده می‌شود. اگر احتمال سیل گرفتنی منطقه‌ای در طول زمان تغییر کند، نقشه‌های سیل گرفتنی باید به‌طور منظم به‌روز شوند.

۲-۲-۵- دستورالعمل برای اقدام‌های لازم در شرایط اضطراری

دستورالعمل‌های اضطراری عملیاتی و اجرایی معمولاً به‌وسیله سازمان‌های دولتی سازماندهی و هدایت می‌شوند. بدیهی است که ارگان مسوول بهره‌برداری و نگهداری از سد باید اطلاعات و خدماتی را برای این سازمان‌ها به‌منظور برنامه‌ریزی و انجام تمام عملیات ممکن جهت جلوگیری از اثر حادثه شکست سد یا به حداقل رساندن آن فراهم کند. به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی زمان‌بندی این عملیات می‌توان از یک مدل عددی شکست سد استفاده کرد. در تمامی شرایط اضطراری مهم‌ترین عامل زمان‌بندی صحیح است.

۲-۲-۶- دستورالعمل عملیات نجات

جلوگیری از خسارت جانی و مالی ناشی از سیل طبیعی و غیرطبیعی مهم‌ترین دلیل توسعه سیستم‌ها و روش‌ها جهت دستیابی به درجه ایمنی بالا حتی برای شرایط اضطراری با سطح ریسک پایین می‌باشد. مدیریت اضطراری را به‌عنوان وسیله‌ای برای توسعه استاندارد با ایمنی بالا می‌توان به چهار بخش آمادگی، پیشگیری، واکنش و جبران تقسیم نمود. تحلیل سیل شکست سد باید شامل تخمین خسارت احتمالی جانی و مالی باشد.

1- Probable Maximum Flood (PMF)

2- Sunny day

۷-۲-۲- ارزیابی ریسک شکست سد

ریسک همواره بخشی از زندگی انسان بوده و مهندسان با ریسک خو گرفته‌اند. ولی در مورد موضوعات بسیار پیچیده، مانند پروژه‌های بزرگ و خطرات بالقوه زیاد در پایین دست سد، ریسک بسیار پیچیده شده و معمولاً در این موارد سطح قابل قبول ریسک به وسیله استانداردها و مقررات قانونی تعیین می‌شود. یک مدل ریاضی ارزیابی ریسک در صورت استفاده صحیح می‌تواند به ابزار تصمیم‌گیری تبدیل شود و اطلاعات معقول‌تری نسبت به قضاوت‌های مهندسی شخصی به دست دهد. افزایش دقت تحلیل شکست سد، دقت تحلیل ریسک را افزایش می‌دهد.

۸-۲-۲- تدوین قانون

اگر در کشوری انجام مطالعات شکست سد به صورت یک قانون تصویب شده باشد، تحلیل سیل ناشی از شکست سد به طور معمول برای سدهای با ریسک بالا انجام می‌شود. معمولاً قانون نیازهای تکنیکی تحلیل سیل شکست سد را تعیین نمی‌کند. عملکردهای مقتضی عموماً به وسیله استانداردهای تکنیکی یا رهنمودهای منتشر شده به وسیله سازمان‌های تخصصی یا مقامات تنظیم کننده ایمنی سد تعریف می‌شوند.

۹-۲-۲- سایر کاربردهای مدل‌های سیل ناشی از شکست سد

مدل‌های شکست سد، شکل خاصی از مدل‌های کلی روندیابی سیل هستند که دارای قابلیت شبیه‌سازی شرایط جریان غیردائمی می‌باشند.

مدل‌های شکست سد کاربردهای بسیار زیادی دارند، به خصوص هنگامی که در تهیه مدل، پتانسیل استفاده گسترده‌تر از آن نیز در نظر گرفته شود. امروزه با رایج شدن روندیابی دینامیک سیل می‌توان مولفه‌های دینامیک جریان را نیز به مدل وارد نمود. مدل‌سازی هیدرولوژیکی سیل طراحی، مدل‌سازی پیش‌بینی زمان واقعی سیل، مدل‌سازی کیفی آب، مطالعات زیست‌محیطی، مهندسی یخ^۱، مطالعات انتقال رسوب، برنامه‌ریزی کارهای حفاظت سیلاب و بررسی عملکرد کوتاه مدت طرح‌های برقابی از جمله موارد کاربردی این مدل‌ها در پروژه‌های مدل‌سازی هیدرولیک رودخانه می‌باشند.

۱۰-۲-۲- متدولوژی تحلیل خطر سیل ناشی از شکست سد

تحلیل خطر سیل شکست سد در این رهنمود به چهار گام اصلی تقسیم شده است:

- **گام یکم:** تعریف و شبیه‌سازی حادثه شکست سد به منظور دستیابی و تهیه هیدروگراف سیلاب شکست سد که در برخی موارد ممکن است با استفاده از مدل‌های فیزیکی نیز انجام پذیرد. در مواردی که شبیه‌سازی سیل شکست سد فقط اثرات جزئی را در مناطق پایین دست پیش‌بینی می‌کند، از نتایج این گام می‌توان برای طبقه‌بندی ریسک سد استفاده کرد و ادامه تحلیل در چنین مواردی غیرمفید به نظر می‌رسد.
- **گام دوم:** روندیابی سیل یا مدل‌سازی انتشار موج شکست سد به پایین دست که با مدل‌سازی فیزیکی یا عددی (ریاضی) امکان پذیر می‌باشد که البته امروزه مدل‌سازی عددی رایج‌تر است. در این گام، نتایج گام اول، یعنی هیدروگراف‌های

شکست سد به دست آمده در مرحله قبل، به عنوان شرایط مرزی بالادست در نظر گرفته می شوند. نقشه های سیل گرفتگی و ارزیابی های خطر سیل براساس نتایج این مرحله قابل تهیه و انجام هستند.

– **گام سوم:** در این مرحله نقشه های آب گرفتگی، ارزیابی های خطر سیل و دستورالعمل عملیات نجات با استفاده از نتایج تحلیل سیل شکست سد و اطلاعات مربوط به سازه ها، اموال و جمعیت تحت خطر در منطقه ای که در اثر شکست سد مستغرق می گردد، تهیه می شود.

– **گام چهارم:** سه گام قبلی با شبیه سازی حوادث شکست سد متفاوت و سیل های حاصل از آنها و نیز اثرات حاصل شامل خطرات و پتانسیل خسارات جانی در ارتباط هستند. در تحلیل ریسک هریک از حوادث انتخاب شده، احتمال اتفاق افتادن آن حادثه تعیین و با دیگر ریسک ها مانند وقوع سیل، ضعف های کیفی سازه ای و حوادث ناشی از نحوه بهره برداری در سدها یا سازه های هیدرولیکی ترکیب می شود. از ارزیابی کلی ریسک یک سری حوادث، می توان جهت تصمیم گیری استفاده نمود.

۲-۲-۱۱- مکانیزم شکست سد

شکست سدهایی که تا به حال رخ داده اند به ما هشدار می دهند که باید با پدیده های شکست سد زندگی کنیم. مشاهدات و تحلیل دقیق آنها به چندین دلیل اهمیت دارد:

– با بازسازی حوادث می توان به دلایل آنها پی برده و مقیاس سنجش مفیدی برای رسیدن به ایمنی و جلوگیری از حوادث یا کاهش شدت اثرات آنها ارائه داد.

– با درک دینامیک شکست و عوامل محدود کننده می توان مدل قابل اعتمادی از تشکیل و توسعه شکست سد ساخته و اطلاعات پایه مهمی را از تحلیل خطر شکست سد به دست آورد. برای واسنجی مدل و ارزیابی نتایج، اطلاعات حوادث قبلی مورد نیاز است.

– تحقیق و بازسازی جزئی یا شبیه سازی واقعه باید شامل اطلاعاتی در مورد دینامیک واقعه و ریسک های وقوع باشد. این مساله در فراهم نمودن سرویس های تخلیه اهمیت دارد.

در حال حاضر اطلاعات کمی از پدیده های مشاهده شده شکست سد (خود شکست یا انتشار موج سیل حاصل و اثرات آن) در دسترس است. برخی از این اطلاعات در بولتن ICOLD 99 جمع آوری و تحلیل شده اند. رایج ترین اطلاعات شکست سد، هندسه ی نهایی شکاف، اطلاعات حجم مخزن و جریان ورودی به مخزن می باشند. در مناطق سیل گیر پایین دست، اطلاعات رقوم حداکثر سیل و زمان رسیدن موج سیل به نقاط مشخص و مهم و سرعت جریان سیلابی رایج ترین مشاهدات هستند. در مورد سدهای کوتاه و متوسط (طبقه بندی ICOLD)، جریان و شرایط برگشت آب در پایین دست سد ممکن است در مکانیزم شکست سد موثر باشند.

عاملی که بیش از هر چیز دقت مدل سازی شکست سد را محدود می کند، فقدان اطلاعات در این مورد است که «سدها چرا و چطور شکسته اند؟» و «چرا بعضی وقایع باعث شکست سد می شوند و بعضی نمی شوند؟»

دلایل شکست سد عمدتاً عبارتند از:

– شکست سازه ای (رگاب یا ترک خوردن سدهای خاکی، لغزش یا واژگونی سدهای بتنی)

– روگذری (سرریز کوچک، اشتباه در بهره برداری، لغزش زمین به داخل مخزن)

- خرابکاری و کارشکنی عمدی
- پارامترهای اصلی در فرآیند شکست سد عبارتند از:
- زمان تکمیل شکست
- شکل شکاف
- عمق شکاف
- سرعت خرابی بخش‌های سازه‌ای سد
- این پارامترها به موارد زیر بستگی دارند:
- نوع سد
- فرسایش‌پذیری تکیه‌گاه‌ها در حالت روگذری
- حجم جریان خروجی (حجم مخزن + حجم سیل)
- دینامیک جریان در مخزن
- دینامیک جریان در پایین‌دست سد

در این بخش از رهنمود به تحلیل‌هایی از آمار شکست سدهای مشاهده شده نیز اشاره گردیده است که در اینجا از ذکر آنها صرف‌نظر می‌کنیم.

۲-۲-۱۲- مدل‌سازی فیزیکی پدیده شکست سد

مدل‌سازی فیزیکی با مدل‌سازی انتشار موج سیل و فرض آبی بودن شکست آغاز گردید. شکست آبی سدها اغلب در مورد سدهای قوسی کم‌عرض مشاهده شده است. برای بررسی فرضیات شکست‌های غیرآبی از مدل‌های فیزیکی فرسایش سدهای خاکی استفاده می‌شود. روش‌های مختلف مدل‌سازی فیزیکی مورد استفاده برای تحلیل شکست سد عبارتند از:

- مدل شکست سد در مقیاس آزمایشگاهی
- آزمایش‌های صحرایی بزرگ مقیاس
- آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی سرریز شسته شونده
- آزمایش‌های مقاومت روگذری انواع سد به لحاظ شکل و مصالح آن
- آزمایش‌های رگاب در سدهای خاکی

جریان عبوری از شکاف، عمدتاً به وسیله نیروهای ثقل و اینرسی هدایت می‌شود و معمولاً از سایر نیروها صرف‌نظر می‌گردد. بنابراین نسبت‌های بین مدل فیزیکی و نمونه اصلی تابعی از عدد فروود هستند. علیرغم نیاز آشکار به مطالعات مدل‌های فیزیکی در مورد شکست سد، به دلیل عدم قطعیت‌های بسیار، تحقیقات کمی در این زمینه انجام و منتشر شده است. اکثر مطالعات مدل‌های فیزیکی در مقیاس‌های کوچک انجام شده‌اند و این موضوع کاربرد نتایج را نامطمئن می‌سازد.

تست‌های بزرگ مقیاس برای تکمیل تست‌های آزمایشگاهی و تعیین اثر مقیاس‌های مختلف روی دقت مطالعات مورد نیاز است. تحقیقات بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس شکست سد بسیار نادرند و شامل نتایج تعدادی شکست سدهای موقت (فرازبند و نشیب‌بند) یا سدهای قدیمی که به طور پراکنده‌ای مستند شده‌اند، می‌باشد. مراجع موجود فقط شکست سدهای دست‌ساز را دربر می‌گیرند.

در تهیه یک مدل عددی شکست به نتایج آزمایش‌های مدل شکست سد با مقیاس آزمایشگاهی تست‌های صحرایی در خاکریزهای سرریز شسته شونده^۱ و مشاهدات شکست سدهای پیشین نیاز می‌باشد. نمونه‌هایی از مدل‌های انجام شده و مراجع آنها در این رهنمود ارائه شده است.

۲-۲-۱۳- فرضیات پیشنهادی و روش‌های محاسبه برای شبیه‌سازی شکست

خرابی یک سد اساساً به مشخصه‌های سازه‌ای آن بستگی دارد. سدهای بتنی می‌توانند در برابر روگذری‌های قابل توجهی مقاومت کنند. در چنین شرایطی عامل محدود کننده، فرسایش پی یا تکیه‌گاه‌ها می‌باشد. انواع اصلی شکست در سدهای خاکی از دید محل شروع شکست عبارتند از:

- شکست پی^۲ (فرسایش داخلی)
 - شکست رگاب^۳ (فرسایش داخلی بدنه سد)
 - شکست روگذری (که در آن فاز اولیه شکست روی شیب پایین دست سد اتفاق می‌افتد)
 - شکاف اولیه که در اثر بی‌توجهی و خرابکاری عمدی یا عملیات جنگی ایجاد می‌شود.
- در ادامه ۵ نوع مدل ریاضی شکست سد معرفی می‌شوند که در همه آنها سطح آب مخزن براساس روش روندیابی مخزن محاسبه می‌شود. تنها تفاوت آنها در روش محاسبه نرخ گسترش شکاف می‌باشد.

۲-۲-۱۴- فرمول‌های تخمین بده حداکثر

شکست یک سد خاکی پیچیده‌تر از آن است که با فرمول‌های ساده ریاضی به درستی ارزیابی شود. بنابراین هدف فرمول‌های ارائه شده در این بخش تنها دسترسی به محدوده‌ای از مقادیر بده حداکثر قابل انتظار و زمان رسیدن به این بده در شکست سدهای خاکی می‌باشد. استفاده از این مدل‌ها به هیچ‌وجه نباید صاحب‌نظران را از به‌کارگیری روش‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتر باز دارد.

۲-۲-۱۵- مدل‌سازی ریاضی یک‌بعدی امواج شکست سد

تاریخچه فرمول‌بندی ریاضی هیدرولیک کانال‌های باز یک بعدی غیردائمی به زمان سنت - ونان (۱۸۷۱) باز می‌گردد. اگرچه به‌جز مواردی خاص هیچ راه‌حل منسجمی برای معادلات دیفرانسیل جزیی وجود ندارد، اما تخمین‌های متعددی از نحوه انتشار موج سیل تهیه و ارائه شده است. مساله پیش‌بینی موج سیل حاصل از شکست سد به عنوان پدیده‌ای غیردائمی و سریع، بسیاری از دانشمندان را به‌جستجو برای یافتن راه‌حل‌هایی برای تحلیل نحوه ایجاد شکاف و انتشار موج سیل واداشته است. به‌دلیل عدم امکان حل دقیق معادلات کامل سنت - ونان برای مجاری نامنظم رودخانه‌های طبیعی و عملی نبودن انجام دستی محاسبات عددی، ساده‌سازی‌های مختلفی برای حل این معادلات انجام شده است. در این بخش از این رهنمود ضمن ارائه معادلات پایه سنت - ونان (پیوستگی و مومنتوم)، روش‌های حل این معادلات بررسی شده است. یکی از روش‌های حل این معادلات روش حل تحلیلی

می‌باشد. ولی معادلات سنت - ونان تنها برای مقاطع عرضی کانال‌های ساده و شرایط مرزی ساده به‌طور تحلیلی قابل حل هستند که به برخی از بهترین و شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها در این رهنمود اشاره شده است.

روش دیگر، روش حل عددی معادلات است که آنها را می‌توان بر طبق روش حل به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- روش مشخصه‌ها^۱
- روش‌های مستقیم^۲
- مدل‌های یک‌بعدی (شبه دوبعدی)^۳

شکست سد و انتشار موج هر دو به‌وسیله مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما به‌دلیل این که موج شکست سد ممکن است تا مسافت‌های طولانی پیشروی کند، مدل‌سازی عددی مناسب‌تر به‌نظر می‌رسد.

۲-۲-۱۶- جنبه‌های عملی محاسبات موج ناشی از شکست سد

بیش از صد سال است که روندیابی سیل شکست سد به صورت یک علم شناخته شده و به صورت عملی مورد استفاده قرار گرفته است. وجود پیچیدگی‌های کانال‌ها و سیستم‌های طبیعی و محدودیت تکنیک‌های در دسترس، ساده‌سازی‌های اساسی را در مدل‌سازی این فرآیند، اجتناب‌ناپذیر نموده است. در این راستا، تحول عظیم در گسترش کامپیوتر در دهه ۶۰، روش‌های عددی دقیقی را که هم‌اکنون حاضر و قابل استفاده‌اند، ایجاد کرده است. به‌علت وجود عدم اطمینان‌های فراوان در فرآیند شکست سد، حتی در پیشرفته‌ترین مدل‌های عددی، جهت توصیف فرآیندهایی نظیر فرسایش، انتقال رسوب، فرسایش کناره‌ها، جدایی و انتقال گیاهان، مشکلات یخ در مناطق سردسیر و مقاومت جریان (افت‌های اصطکاکی و افت‌های موضعی) نیاز به در نظر گرفتن فرضیات تجربی می‌باشد. محتمل‌ترین حد پایین و حد بالای رقوم آب، بده، سرعت جریان و طول مدت حادثه، تنها با تحلیل حساسیت جامع و قضاوت تجربی قابل تعیین است.

هر پروژه مدل‌سازی با یک مدل اولیه که هندسه و مسیرهای فرضی جریان را به شکل ساده شده‌ای توصیف می‌کند شروع می‌شود. در این مدل اولیه، حداقل تعداد مقاطع عرضی به‌همراه مهم‌ترین سازه‌های آبی در نظر گرفته می‌شوند. هدف این مدل، شناخت اولیه مشکلات عمده و مهم، به‌منظور پیدا کردن مناطقی است که در آنها مدل‌سازی دقیق‌تر مورد نیاز می‌باشد.

در مرحله بعد، مدل اولیه جهت نمایش مسیرهای اصلی جریان و مناطق اصلی ذخیره سیل^۴ تصحیح می‌شود. از این مدل ساده دوم می‌توان برای آنالیز حساسیت شکست سد استفاده کرد. بعد از به‌دست آوردن نتایج آنالیز حساسیت شکست سد، دقت و نیاز توسعه‌های محلی در ساختار مدل دوم ارزیابی می‌گردد. سپس مدل سومی با انعطاف‌پذیری و امکانات بیش‌تر تهیه می‌شود.

رایج‌ترین روش توصیف هندسه مدل، تعیین مقطع عرضی - فاصله می‌باشد. انواع روش‌های ورود اطلاعات هندسی به مدل در این رهنمود تشریح شده است. تعیین زبری سطوح جریان به‌عنوان عامل تولید مقاومت اصطکاکی و محاسبه سایر افت‌ها از دیگر مباحثی است که در این رهنمود به آن اشاره شده است.

1- Method of characteristics

2- Direct methods

3- One-dimensional network models (quasi two-dimensional models)

4- Flood-Storage Area

جهت معرفی زبری کانال، معمولاً از ضریب اصطکاکی کلی «f» یا ضریب زبری مانینگ «n» استفاده می‌شود. سایر ضرایب زبری مثل ضریب شزی «C» در مدل‌سازی دینامیکی رودخانه کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکثر مدل‌های موج سیل شکست سد، برای محاسبه جریان از فرمول مانینگ استفاده می‌کنند و از تغییرات زبری با تغییر عمق، صرف‌نظر می‌کنند. مقادیر حداکثر افت موضعی، در محل تنگ شدگی‌ها یا بازشدگی‌های کانال اتفاق می‌افتند. در روندیابی کانال‌های باز در رودهای بزرگ، تنگ شدگی‌ها و بازشدگی‌های کانال اهمیت چندانی ندارند، درحالی‌که در رودهای کوچک یا در مورد سیل گرفتگی شکست سد، افت‌های محلی با افت‌های اصطکاکی هم‌ارز هستند. این افت‌ها همچنین در محل اتصالات یک شبکه کانال اتفاق می‌افتند. در این حالت نوع و زاویه اتصال بر روی این افت اثر خواهد داشت.

۲-۲-۱۶-۱- شرایط مرزی مدل

مرزهای یک مدل به‌عنوان سطح تماس جریان مدل شده با محیط خارج آن محسوب می‌شوند. تمام مرزها روی فرآیند جریان تاثیر می‌گذارند و تعریف غیردقیق آنها می‌تواند تاثیر زیادی در کاهش دقت پیچیده‌ترین و پیشرفته‌ترین مدل‌ها داشته باشد. درستی شرایط مرزی انتخاب شده با تحلیل حساسیت ارزیابی می‌شود. شرایط مرزی به کار برده شده می‌تواند از نوع شرایط مرزی ثابت یا متحرک باشد. در شرایط مرزی ثابت، تمام مرزها تا انتهای محاسبات مدل ثابت باقی می‌مانند. درحالی‌که در شرایط مرزی متحرک، بعضی از شرایط مرزی با رخ دادن مقادیر بحرانی مشخصی از پروسه‌ی جریان مدل شده (رقوم، بده، سرعت جریان، ...) تغییر می‌کنند. در این قسمت توصیف کاملی از شرایط مرزی مدل، شامل شرایط بالادست و پایین‌دست، مرزهای درونی، جریان‌های ورودی و خروجی فرعی و تلفات ناشی از نفوذ ارائه شده است.

۲-۲-۱۶-۲- شرایط اولیه

شرایط اولیه تحلیل، شامل تعیین مقدار جریان و رقوم در کل منطقه و اطلاعات محلی قابل استفاده در شرایط مرزی درونی می‌باشد. معمولاً فرض می‌شود که شروع جریان از حالت دائمی باشد. شرایط اولیه باید به‌صورت زیر مشخص شوند:

- بده و رقوم آب در تمام سلول‌های محاسباتی مدل (منظور از سلول‌ها، نقاط گوشه‌ای یک شبکه محاسباتی است).
- شرایط اولیه مرزهای درونی مدل (بازشدگی دریچه، جریان توربین، نشت فرض شده از سد و ...)
- اگر شرایط هوای سرد مدل می‌شود، اطلاعات اولیه باید شامل توصیفی در مورد پوشش یخی یا اطلاعات ورودی برای مدل کردن لایه یخ باشد.

شرایط اولیه در مرزها به پیچیدگی مدل و شرایط جریان در مرزها (جریان زیر بحرانی یا فوق بحرانی) بستگی دارد. شرایط مرزی اولیه معمولاً به‌عنوان اولین مقدار یک سری زمانی یا یک رابطه تابعی مثل رابطه بده - اشل جریان دائمی در کانال، جریان بحرانی یا بده انتقال رسوب تعریف می‌شوند. تعریف صحیح شرایط اولیه در مرزهای مدل در پایداری محاسباتی شبیه‌سازی مدل اهمیت دارد. شرایط اولیه در یک سلول محاسباتی شامل تعریف جریان، رقوم و سایر عوامل در زمان شروع محاسبات در تمام نقاط محاسباتی مدل می‌شود.

۲-۲-۱۶-۳- آزمایش، واسنجی و تحلیل حساسیت مدل

به دلیل محدودیت‌های موجود در تعیین اندازه گام‌های زمانی مورد نیاز برای پایداری عددی مدل‌های صریح^۱، به جای آنها از مدل‌های ضمنی^۲ استفاده می‌شود. هر کاربر مدل‌های عددی، مشکلات ناپایداری را در طول تهیه و استفاده از مدل تجربه کرده است. اکثر بسته‌های نرم‌افزاری فرآیندهای اتوماتیکی برای از بین بردن شرایط ناپایداری دارند، مثل کاهش اتوماتیک گام‌های زمانی یا درونیابی مقاطع عرضی برای کاهش گام‌های مکانی. مدل بعد از راه‌اندازی باید کالیبره شود. اگر هیچ اطلاعات مشاهداتی سیل در دسترس نباشد، برای ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به تغییر عوامل فرض شده، از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود.

۲-۲-۱۷- رایج‌ترین نتایج آنالیز سیلاب ناشی از شکست سد

نتایجی که از تحلیل مدل برداشت می‌شود، بسته به هدف انجام تحلیل متفاوت هستند. همان‌گونه که اشاره شد، موضوعات اصلی مورد بحث در نتایج آنالیز سیلاب شکست سد عبارتند از: ایمنی سد، طبقه‌بندی خطر، نقشه آب‌گرفتگی، تهیه دستورالعمل عملیات اضطراری، دستورالعمل نجات، ارزیابی ریسک شکست سد و سایر کاربردهای مدل‌های شکست سد. نتایج ارائه شده باید واضح و روشن بوده و در ساختاری ساده تهیه و در نهایت توصیف شوند. ارائه نتایج تحلیل خطر شکست سد باید شامل خروجی نهایی از سیل‌های شکست سد انتخابی و اطلاعات پایه استفاده شده در تحلیل باشد. توضیحات تکنیکی نتایج باید به‌وضوح مشخص کنند که چه اطلاعاتی در مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند و این اطلاعات کجا ذخیره شده‌اند. در این قسمت از رهنمود، به فهرست موضوعات و بخش‌های مهمی که باید در گزارش تکنیکی تحلیل خطر شکست سد ذکر شوند، اشاره شده است.

۲-۲-۱۸- آنالیز حساسیت شکست سد

همان‌طور که ذکر شد، مکانیزم شکست سد هنوز کاملاً شناخته نشده است و تنها راه برخورد با عدم اطمینان در نتایج مدل‌های شکست سد، آنالیز حساسیت عوامل اصلی موثر بر روی این فرآیند است. عوامل زیر باید در تحلیل حساسیت شکست سد مشخص شوند:

- مقادیر نهایی شیب‌های جانبی شکاف سد
- رقوم نهایی کف شکاف سد
- عرض نهایی کف شکاف سد
- طول مدت زمان شکست
- رقوم مخزن در شروع شکست
- نوع شکست (ایجاد رگاب در بدنه سد یا پی، فرسایش سطحی، بهره‌برداری غلط یا خرابکاری عمدی)
- جریان حداکثر
- رقوم حداکثر پایین‌دست

1- Explicit models

2- Implicit models

۲-۲-۱۹- روندیابی سیل در دره پایین دست سد

با این که تصور می شود که مقدار بده ها مهم ترین نتایج باشند، اما خطرات سیل عمدتاً در اثر آب گرفتگی جزیی یا کامل به وسیله سیل و در اثر مواد شناور (گل و لای یا یخ) حمل شده به وسیله سرعت بالای سیل به وجود می آیند. اگر تمرکز رسوب زیاد باشد، انتقال رسوب و حرکت آن در مناطق دارای سرعت های پایین، مشکلاتی را ایجاد خواهد کرد. مهم ترین نتایج هر شبیه سازی روندیابی سیل در این رهنمود آمده است.

۲-۲-۲۰- نتایج روندیابی سیل با توجه خاص به ارزیابی خطر سیل مورد استفاده مسوولین تخلیه سد

ارزیابی خطر سیل و تهیه دستورالعمل عملیاتی تخلیه سد در مورد مناطق پیچیده شهری به اطلاعات وسیعی که معمولاً به شکل جدول و یا روی نقشه ها تهیه شده است نیاز دارد. خروجی به صورت جدول هایی که زمان، بده، سرعت جریان، رقوم سطح آب و عمق را مشخص می کنند ارائه می شود.

۲-۲-۲۱- کاربرد نقشه ها برای نمایش پوشش سیل، نتایج روندیابی سیل و ارزیابی ریسک (تهیه نقشه آب گرفتگی) و استفاده های دیگر از نقشه ها

نقشه های مورد استفاده برای ارائه نتایج می تواند به شکل کلی باشد. در این صورت مقیاس اهمیت زیادی ندارد، زیرا این نقشه ها فقط برای نشان دادن موقعیت سایر نتایج و جزئیات خاص مورد استفاده قرار می گیرند. در تهیه نقشه آب گرفتگی از نقشه های پایه (نقشه های توپوگرافی) استفاده می شود. مقیاس این نقشه ها براساس وسعت محدوده سیل گیر، طول دره و ... انتخاب می شود. نقشه های آب گرفتگی باید شامل اطلاعات خاصی نظیر این موارد باشند:

- خطوط تراز دره
- موقعیت مقاطع عرضی
- نام و شماره مقاطع عرضی
- اطلاعات موج سیل ورودی
- زمان رسیدن به رقوم حداکثر
- سرعت های جریان و ...

۲-۲-۲۲- مدل های ریاضی دوبعدی امواج شکست سد

مدل های یک بعدی در صورتی برای شبیه سازی انتشار سیل مناسب هستند که منطقه مورد نظر یک دره طویل و عمیق باشد، ولی در مواردی که تعریف یک محور غالب برای دره امکان پذیر نیست و سرعت آب را در مقاطع عرضی دره نمی توان یکنواخت فرض کرد، مدل های یک بعدی قابل استفاده نیستند. این موارد معمولاً در دره های بسیار عریض و مسطح اتفاق می افتد که در آنها مناطق شهری یا سازه ها و تاسیساتی مثل پل ها، جاده های متقاطع و خاکریزهای جاده ها یا خط آهن ها وجود دارند.

مدل‌های دوبعدی به عنوان وسیله‌ای ضروری برای تصحیح نتایج به دست آمده از مدل‌های انتشار یک بعدی استخراج گردیده‌اند. معادلات کلی کنترل کننده انتشار یک موج سیل دوبعدی، معادلات آب‌های کم عمق^۱ نامیده می‌شوند.

۲-۲-۱- مدل‌های دوبعدی براساس معادلات کامل

مثال‌های زیادی از حل‌های معادلات کامل آب‌های کم عمق تهیه و منتشر شده است که در آنها از هر دو روش تفاضل‌های محدود^۲ و المان‌های محدود^۳ استفاده شده است. اکثر این روش‌ها برای شبیه‌سازی جریان روی سطوح منظم و با اعداد فرود به اندازه کافی کوچک‌تر از یک، مناسب هستند و در غیراین صورت با مشکلات عددی جدی مواجه می‌شوند.

۲-۲-۲- مدل‌های دوبعدی ساده شده

معادلات پایه را می‌توان با حذف ترم‌های درونی ساده کرد. این تقریب تنها در صورتی مجاز است که عدد فرود بسیار کوچک‌تر از یک باشد. این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که منطقه تحت مطالعه، شیب نسبتاً ملایمی داشته باشد. اولین مدل‌های ساده شده که مدل‌های نیمه‌دوبعدی نامیده می‌شوند، براساس سلول‌های متغیر متصل به هم استوارند. مدل اولیه فرض می‌کند که سیل گرفتگی کاملاً به آرامی اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توانیم از ترم‌های درونی صرف‌نظر کنیم. در نتیجه سرعت تبادل جریان بین سلول‌ها از طریق یک رابطه تابعی مناسب به اختلاف رقوم سطح آب بین آنها بستگی دارد.

۲-۲-۳- رفتارهای خاص هیدرولیکی و مناطق شهری

برای مطالعه جریان آب از میان سازه‌هایی که در بستر رود یا در منطقه تحت سیل گرفتگی ساخته شده‌اند، توصیف هندسی هر سازه باید تا حد امکان دقیق و صحیح باشد. یک الگوریتم مناسب باید قادر به توصیف انواع مختلف جریان، مثل جریان تحت فشار، جریان سرریز، جریان آزاد، جریان مستغرق یا جریان با انواع مختلف بازشدگی باشد. به بیان دیگر، سازه‌های موجود در مسیر سیلاب مثل پل‌ها، بندها و ... باید در مدل منظور گردند.

۲-۲-۴- سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، ابزار پشتیبانی مناسب در مدل‌سازی دوبعدی

انتشار سیل

اجرای یک مدل دوبعدی موج سیل معمولاً به اطلاعاتی در مورد توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، شرایط اولیه رقوم سطح آب، سیر تکاملی شرایط مرزی و تعدادی از پارامترهای منطقه، بسته به حل ریاضی قابل قبول نیاز دارد. این حجم عظیم اطلاعات نیاز به یک استراتژی مدیریت کارآمد دارد که مراحل ذخیره‌سازی را بهینه کند، استراتژی‌ها را به روز کند و بین اطلاعات ورودی و مدل ریاضی فصل مشترکی ایجاد نماید.

به منظور فرآیند واسنجی مدل، استفاده از رقوم‌های سطح آب ثبت شده سیل‌های پیشین ضروری است. برای داشتن مدیریتی موثر روی تمام این اطلاعات و ساختن ورودی مدل در یک شکل مناسب، سیستم اطلاعات جغرافیایی واقعا مفید است. به علاوه این

1- Shallow water equations
2- Finite Difference Method
3- Finite Element

سیستم می تواند اطلاعات سازه های محلی مثل پل ها، کانال ها یا خاکریزها را که معمولاً برای شبیه سازی جریان آب ضروری اند ذخیره کند.

عبارت سنجش از دور به معنی جمع آوری اطلاعات در مورد اشیاء، به وسیله ی ابزاری که در فاصله زیاد از آنها قرار داد و با خود آنها در تماس نیست، می باشد. حس گرهای سنجش از دور که روی ماهواره ها و هواپیماها نصب می شوند و می توانند از فواصل مختلف عمل کنند، برای جمع آوری اطلاعات زمینی مورد استفاده قرار می گیرند.

در این رهنمود، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور به عنوان ابزارهای پشتیبانی ارزشمندی در تهیه مدل های دوبعدی به طور مختصر تشریح شده اند.

۲-۲-۲۵- مدل سازی فیزیکی امواج شکست سد

تشکیل و انتشار امواج سیل شکست سد پدیده ی بسیار پیچیده ای است. تغییرات بسیار سریعی در عمق آب و سرعت ها اتفاق می افتد و انتقال های مهمی بین انرژی های جنبشی و پتانسیل وجود دارد. آشفتگی به وجود آمده در اثر شکست، به طرف بالادست در مخزن و پایین دست در رودخانه منتشر می شود.

اگرچه شبیه سازی انتشار موج سیل با مدل های یک بعدی تحلیل دینامیکی (معادلات سنت - ونان) معمول شده است و در موارد خاصی استفاده از مدل های دوبعدی کارآتر پیشنهاد می شود، اما در مورد مقاطع عرضی بسیار نامنظم، شیب های تند، انحرافات شدید و تغییرات ناگهانی در دره های طبیعی، مدل های ریاضی کارآمد نیستند. امواج شوک ثانویه و پدیده های محلی موجود در چنین جریان های انحرافی، شبیه سازی را بسیار مشکل می کند. در این گونه موارد مدل سازی فیزیکی، برای درک بهتر پدیده انتشار در منطقه بسیار مفید خواهد بود.

مشکل مدل های فیزیکی، اندازه بزرگ و در نتیجه هزینه بالا و زمان طولانی ساخت و مطالعه آنهاست. به همین دلیل از آنها به طور گسترده استفاده نمی شود و زمینه کاربرد آنها به دره های طبیعی با شکل های پیچیده، وجود امواج شوک، امواج ثانویه و ... که نمی توانند به خوبی با مدل های عددی شبیه سازی شوند، محدود می شود.

۲-۲-۲۶- مدل های عددی شکست سد (امکانات و قابلیت ها)

مدل های شکست سد از نظر پیچیدگی و امکانات استفاده آسان در حال توسعه مداوم هستند. سالانه بیش از ده ها عنوان کتاب یا رساله در مورد هیدرولیک و منابع آب چاپ و منتشر می شود که اکثر آنها مربوط به دوره های تحقیقی هستند و ابزار دقیقی برای کاربرد عملی ارائه نمی کنند. ارزیابی ها و مقایسه بسته های مدل سازی مختلف شکست سد و اطلاعات پایه در مورد مدل ها و قابلیت های آنها، در این رهنمود ارائه شده است. همچنین قابلیت های تکنیکی مدل ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲- رهنمود ایالات متحده امریکا- تحلیل سیل گرفتگی شکست سد و طبقه‌بندی خسارت پایین دست

۳-۲-۱- کلیات

این یادداشت فنی به منظور تحلیل سیل گرفتگی شکست سد و ارزیابی خسارت وارده به پایین دست در اثر شکست سد تهیه شده است. تمرکز عمده این دستورالعمل بر روی سدهای خاکی بوده و در مورد سدهای بتنی هم اطلاعاتی ارائه شده است. تحلیل سیل گرفتگی شکست سد برای اهداف مختلفی در برنامه‌ریزی و طرح سدهای در دست مطالعه و برنامه‌ریزی و بهبود سدهای موجود به کار می‌رود. کاربردهای معمول آن عبارتند از:

- طبقه‌بندی خطر پایین دست
 - تهیه نقشه آب گرفتگی به منظور استفاده در تهیه دستورالعمل‌های عملکرد اضطراری
 - کمک به انتخاب سطوح طراحی و اجرا برای اجزای بحرانی پروژه
 - تحلیل افزایشی خسارت به عنوان یک فرآیند جایگزین برای تعیین اندازه سرریزهای اضطراری
- همچنین رهنمودی برای انتخاب سطح مناسب تقریب (خطا) در تحلیل سیل گرفتگی شکست سد، به منظور استفاده در کاربردهای مختلف ارائه شده است.
- موضوعات مطرح شده در این دستورالعمل در دو بخش عمده تحلیل سیل گرفتگی شکست و طبقه‌بندی خطر پایین دست دسته‌بندی و ارائه شده‌اند.

۳-۲-۲- تحلیل سیل گرفتگی ناشی از شکست سد

هیدروگراف جریان خروجی از شکست سد به عوامل زیادی بستگی دارد. عوامل اصلی عبارتند از: مشخصات فیزیکی سد، حجم مخزن و حالت شکست. عواملی که مقدار بده اوج و شکل هیدروگراف جریان خروجی را کنترل می‌کنند عبارتند از: ابعاد شکاف، مدت زمان و نحوه تشکیل شکاف، عمق و حجم آب ذخیره شده در مخزن و جریان ورودی به مخزن در زمان وقوع شکست.

جمع‌آوری اطلاعات شکست سد از سال‌های ۱۸۵۰ شروع شده است. میدل بروکس^۱ در مطالعه‌ای روی دلایل شکست ۲۲۰ سد خاکی در طول سال‌های ۱۹۵۰-۱۸۵۰، دلایل مشاهده شده برای شکست سدها و فرکانس وقوع آنها را جمع‌آوری کرده است. بر طبق نتایج این مطالعات که در این رهنمود به آنها اشاره شده است، معمولاً ۵۰٪ از شکست‌های مذکور در طول ۵ سال اول آگیری و ۱۹٪ از آنها بلافاصله پس از اولین آگیری رخ داده‌اند. بر طبق این آمار در هنگام وقوع شکست سد، مخزن در یکی از دو حالت زیر قرار دارد:

- شکست‌های ناشی از سیل که رقوم مخزن از رقوم تاج سد بیش تر است.
- سایر حالت‌های شکست (مثل شکست در اثر تراوش، فرسایش درونی، شکست شیروانی‌های خاکریز تحت بارگذاری استاتیکی یا زلزله) که تراز مخزن معمولاً در تراز نرمال یا تراز نزدیک به آن قرار دارد.

بنابراین در هر تحلیل شکست سد، حداقل دو حالت برای شرایط مخزن (رقوم نرمال و رقوم روگذری از سد) باید بررسی گردد.

۲-۳-۳- برآورد مشخصات شکاف سد

در این بخش براساس نتایج به دست آمده از شکست‌های مشاهده شده رهنمودهای واحد مهندسی ارتش آمریکا^۱، سرویس ملی هواشناسی^۲ و برخی از فرمول‌های علمی پیشنهاد شده، جدول، گراف‌ها و فرمول‌هایی برای تعیین و تخمین ابعاد شکاف و بده اوج خروجی از شکاف سد ارائه شده است.

۲-۳-۴- روندیابی سیل ناشی از شکست سد در پایین دست

روندیابی سیل برای توصیف حرکت موج سیل طی بازه‌ای از کانال به کار می‌رود. مسایل مورد توجه در روندیابی سیل عبارتند از: کاهش بده اوج در طی حرکت آن در پایین دست (میرایی)، زمان سفر اوج سیل بین نقاط مورد نظر، رقوم‌های حداکثر آب در نقاط مورد نظر و تغییرات شکل هیدروگراف در طی حرکت آن به پایین دست سد. موارد مذکور تحت کنترل عواملی از قبیل شیب بستر کانال، سطح مقطع و هندسه کانال اصلی و سیلابدشت، زبری کانال اصلی و جداره‌ها، وجود حجم ذخیره سیلاب در احجام مرده کانال و شکل هیدروگراف ورودی به کانال قرار دارند. بهترین و مناسب‌ترین راه برای روندیابی سیل‌های شکست سد استفاده از روش‌های محاسباتی برای محاسبه مشخصه‌های فیزیکی بازه کانال و هیدرودینامیک حرکت موج سیل می‌باشد. روش متفاوتی برای روندیابی سیل ناشی از شکست سد در کانال پایین دست و سیلابدشت وجود دارد. اداره عمران ایالات متحده آمریکا^۳ براساس شکست سدهای مشاهده شده، روشی ساده و مناسب را پیشنهاد کرده است که براساس آن منحنی‌های میرایی در یک گراف در این رهنمود تهیه و ارائه شده‌اند.

۲-۳-۵- تهیه نقشه آب گرفتگی

نقشه آب گرفتگی، توصیفی از وسعت اراضی که در اثر سیل ناشی از شکست سد زیر آب می‌رود را ارائه می‌کند. نمایش آب گرفتگی در مقاطع عرضی کانال و تعیین مناطقی در نقشه که در آنها سرعت جریان بالاست، ضروری است. این اطلاعات، خروجی استاندارد بسیاری از مدل‌های کامپیوتری روندیابی سیل هستند. در این رهنمود، جداول و منحنی‌هایی جهت دستیابی به یک تخمین قابل قبول از آب گرفتگی در یک منطقه مشخص ارائه شده است.

دقت تحلیل آب گرفتگی شکست سد، متناسب با مقیاس و پیچیدگی سد و مساحت تحت مطالعه پایین دست می‌باشد. برای سدهای کوتاهی که بر دره‌های پهناور با جمعیت پراکنده مشرف هستند، روش‌های تقریبی مناسب‌تر و مقرون به صرفه‌تر هستند. اما در مورد سدهای بلندی که بالادست مناطق پرجمعیت و روی سیلابدشتی پیچیده قرار گرفته‌اند، برای ارزیابی مناسب نتایج شکست سد، مدل‌سازی پیچیده و مطالعات اضافی مورد نیاز است. ترکیبات منطقی روش‌های مختلف تحلیل در این رهنمود ارائه شده است.

1- U.S. Army Corps of Engineers (COE)

2- National weather Service (NWS)

3- U.S. Bureau of Reclamation

از دیگر عوامل موثر در تحلیل آب‌گرفتگی شکست سد، شرایط مخزن در هنگام وقوع شکست می‌باشد.

هدف اصلی تحلیل آب‌گرفتگی شکست سد، ارزیابی نتیجه شکست سد و تخلیه آب مخزن است. بنابراین مقدار ذخیره مخزن در تحلیل شکست سد اهمیت زیادی دارد. معمولاً در ارزیابی نتایج شکست سد روی مناطق پایین‌دست دو حالت رقوم نرمال و رقوم حداکثر مخزن مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکست سد با تراز نرمال مخزن، شکست روز آفتابی نامیده می‌شود. اما شکست سد با رقوم حداکثر مخزن (رقوم تاج سد)، معمولاً با یک سیل شدید همراه است. این دو حالت شرایط مختلف مخزن از این نظر اهمیت دارند که پتانسیل دو مقدار مختلف سیل شکست سد را پدید می‌آورند و شرایط کاملاً متفاوتی را از نظر خسارات مالی و جانی به ساکنین پایین‌دست تحمیل می‌کنند. از دیگر عوامل مهم، مقدار جریان ورودی طبیعی به مخزن و جریان خروجی هم‌زمان سرریز در زمان مفروض شکست سد می‌باشد.

به‌عنوان یک تعریف صریح برای ایجاد شرایط روگذری سد، جریان ورودی به رودخانه باید از سیل حداکثر مورد استفاده در طراحی پروژه بزرگ‌تر باشد و اگر در طراحی پروژه از حداکثر سیلاب محتمل استفاده شده باشد، باید از حداکثر سیلاب محتمل به‌عنوان جریان سیل ورودی استفاده کرد. تبعیت از این تعریف صریح ممکن است در بر گیرنده زمان و هزینه زیاد غیرضروری، برای مدل‌سازی جریان سیل ورودی و جریان خروجی از سرریز باشد. درحالی‌که نتایج آن لزوماً بر نتایج روش‌های تقریبی ارجحیت ندارند. در این رهنمود، روش‌های دیگری برای محاسبه جریان‌های ورودی و خروجی مخزن برای استفاده در کاربردهای متفاوت پیشنهاد می‌شود. این روش‌ها منحصر برای سدهای کوتاه و متوسط پیشنهاد شده‌اند که از زمان و هزینه زیاد مدل‌سازی‌های کامپیوتری پیچیده جلوگیری شود. همچنین کاربردهای تحلیل سیل‌گرفتگی شکست سد برای حالت شکست سیلابی به‌طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته و رهنمودهایی برای انتخاب روش‌های تحلیلی ارائه شده است.

تحلیل طبقه‌بندی ریسک پایین‌دست، انتخاب رقوم طراحی و اجرا برای اجزای بحرانی پروژه و تحلیل خسارت افزایشی^۱ از موارد مورد بررسی در این رهنمود هستند.

یک کاربرد مهم دیگر تحلیل سیل‌گرفتگی شکست سد، استفاده از آن در انجام تحلیل خسارت افزایشی است. هدف این تحلیل، ارزیابی اثرات سیل ناشی از شکست سد در مقایسه با خسارت ناشی از سیل طبیعی قبل از ساخت سد می‌باشد.

۲-۳-۶- آنالیز حساسیت

در تحلیل شکست سد، درصد عدم اطمینان بالایی وجود دارد. در انتخاب ابعاد شکاف و مدت زمان تشکیل شکاف باید فرضیاتی صورت گیرد و پارامترهایی انتخاب شوند که مستقیماً روی مقدار سیل حاصل از شکست سد اثر می‌گذارند. به‌علاوه، شکست سد معمولاً یک سیل بی‌سابقه در دره پایین‌دست ایجاد می‌کند. مقدار زیاد سیل و پیچیدگی مدل کردن جریان سه‌بعدی، باعث ایجاد عدم اطمینان در مورد رقوم‌های محاسبه شده آب‌گرفتگی می‌شود.

مطالعات فرید^۲ نشان داده است که خوشبختانه خطاهای وابسته به مشخصه‌های شکاف، در هنگام انتشار جریان در سطح مقطع پایین‌دست، میرا می‌شوند. همچنین درصد خطا در محاسبه عمق جریان، از میزان خطا در روندیابی بده، سطح مقطع و یا پایداری جریان کمتر است. این مشخصات خطاها، عدم اطمینان‌های موجود در بسیاری از مراحل محاسباتی تحلیل را کاهش می‌دهند.

1- Incremental Damage Analysis

2- Fread

اما هر جا که تغییرات زیادی در عمق جریان وجود ندارد و سطح زیر آب رفته به طور جدی پتانسیل خطر مالی یا جانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، تحلیل حساسیت نیز باید در مطالعات انجام شود.

تحلیل حساسیت باید مشخص کند که عوامل اندازه شکاف، مدت زمان تشکیل شکاف، شرایط اولیه مخزن، کانال پایین‌دست، زبری جداره‌ها و ... چگونه روی عمق جریان محاسبه شده در مناطق پایین‌دست تاثیر می‌گذارند. در تحلیل نهایی باید عوامل را به گونه‌ای محافظه‌کارانه با در نظر گرفتن بهترین تخمین محتمل و با توجه به این که حل نهایی تا چد حد به عوامل انتخاب شده حساس است، انتخاب نمود.

۲-۳-۷- طبقه‌بندی خسارت پایین‌دست

خطر در پایین‌دست یک سد عبارتست از: «پتانسیل خسارت جانی یا مالی پایین‌دست سد در اثر سیل رها شده از سد یا سیل رها شده در اثر شکست جزئی یا کامل سد.»

طبقه‌بندی خطر پایین‌دست، به سد یا متعلقات آن و عملکرد یا کارایی پیش‌بینی شده آن بستگی ندارد، بلکه توصیفی از وضعیت و موقعیت (کاربری) اراضی پایین‌دست و شاخصی از پتانسیل اثر شکست سد بر زندگی ساکنین منطقه است. طبقه‌بندی خطر پایین‌دست به منظور دستیابی به اهداف مختلفی در قوانین ایمنی سد به کار می‌رود. برخی از این کاربردها عبارتند از:

- بررسی نتایج حاصل از شکست یک سد در پایین‌دست
 - شاخصی برای تهیه معیارها و نیازهای کلی طرح
 - شاخصی برای تعیین سدهایی که در مورد آنها دستورالعمل عملکرد اضطراری مورد نیاز است.
 - وسیله‌ای مدیریتی برای تخصیص زمان و اولویت‌بندی فعالیت‌های مربوط به ایمنی سد
 - یک سیستم طبقه‌بندی سازگار با معیار ملی طبقه‌بندی ریسک پایین‌دست و تلفیق آن با اطلاعات ملی مشخصه‌های سد
- در این رهنمود، سیستم طبقه‌بندی خطر پایین‌دست مناسب برای استفاده در ایالت واشنگتن ارائه شده است. این طبقه‌بندی شبیه به سیستم واحد مهندسی ارتش آمریکا است.

در طبقه‌بندی خطر پایین‌دست یک پروژه مشخص، شکست سدهای فرضی باید برای دو حالت مخزن در شرایط تراز نرمال و تراز حداکثر مخزن در هنگام وقوع سیل بررسی و ارزیابی شوند. از شدیدترین نتایج شکست (وخیم‌ترین این دو حالت) برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در اکثر موارد، شکست در تراز حداکثر مخزن نتایج شدیدتری ایجاد می‌کند. شرایطی نیز وجود دارد که در آنها یک شکست روز آفتابی در شرایط تراز نرمال مخزن می‌تواند نتایج وخیم‌تری را در بر داشته باشد، مثل مواردی که در پایین‌دست سد مناطقی تفریحی یا محل‌های استفاده موقت وجود دارد.

در این طبقه‌بندی سه مساله مورد توجه قرار گرفته است: پتانسیل خسارت جانی، پتانسیل خسارت مالی و خسارت اقتصادی متناظر و پتانسیل خسارات زیست‌محیطی.

برای تعیین تغییر احتمالی طبقه‌بندی در آینده، پتانسیل توسعه آینده پایین‌دست نیز باید مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

۲-۳-۸- گزارش‌های مهندسی برای تحلیل سیل گرفتگی شکست سد و طبقه‌بندی ریسک پایین‌دست

محاسبات یا تخمین سیل شکست سد به مشخصه‌های بسیاری از سد، حالت شکست و حجم ذخیره در زمان شکست بستگی دارد. در گزارش‌های مهندسی تحلیل سیل گرفتگی شکست سد، باید فهرست عوامل مناسب انتخاب شده و نیز موضوعاتی که در زیر آمده است، مشخص شود:

- سیل شکست سد
- رقوم مخزن و جریان ورودی فرض شده در زمان فرضی شکست
- روش تخمین و انتخاب ابعاد شکاف و مشخصه‌ها برای حالت فرض شده شکست
- مقدار بده اوج شکست سد تخمین زده شده در محل سد و میرایی اوج بده سیل، هنگام انتشار آن در دره پایین‌دست.
- تحلیل سیل گرفتگی
- زمان سفر موج سیل به محل‌های متفاوت در دره پایین‌دست
- نقشه آب‌گرفتگی نمایش دهنده گسترش سطحی سیل گرفتگی
- ارائه مقاطع عرضی کانال و دره که نشان دهنده عمق جریان و سرعت‌های متوسط جریان باشد.
- طبقه‌بندی خطر پایین‌دست
- یک توصیف کلی از دره و میزان توسعه‌یافتگی پایین‌دست
- روش مورد استفاده برای تعیین درجه ریسک پایین‌دست

۲-۴- رهنمود کشور نیوزیلند (NZSOLD)^۱ - رهنمودهای ایمنی سد

۲-۴-۱- کلیات

ارائه رهنمودهای مناسب به منظور استفاده در طراحی و ساخت سدهای جدید، ارزیابی و بهبود بخشیدن سدهای موجود و نگهداری و بهره‌برداری از همه سدها هدف این رهنمود می‌باشد. به بیان دیگر، تاکید این رهنمود بر تعریف معیاری برای ساختار و عملکرد این سدها، صرف‌نظر از نوع یا اندازه آنها است.

سدها، سازه‌های مرتبط با آنها و حجم ذخیره‌ای که تشکیل می‌دهند، به دلیل بزرگی مقیاسشان و وجود نیروهای آب ویژگی‌های خاصی دارند. در مورد سدها نکات زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- توپوگرافی منطقه سد که ایجاد تغییر در آن پرهزینه است و معمولاً تغییری در آن داده نمی‌شود.
- زمین‌شناسی منطقه سد و مخزن که تاثیر شدیدی روی نگهداری آب و ایمنی سازه‌ای ندارد.
- مناسب‌ترین مصالح برای ساخت و آرایش سازه سد جهت اطمینان از ایمنی عملی سد
- خصوصیات مواد ذخیره شده پشت سد
- مدیریت خطر سیل و انحراف سیل هنگام ساخت سد

- نیروهای زمین لرزه وارده به سد و محتویات مخزن
 - پایداری شیب مخزن که در ایمنی سد موثر است، زیرا این خطر وجود دارد که در اثر حجم زیاد آب مخزن و شکست‌های شیب ایجاد شده روگذری اتفاق بیفتد.
 - تغییرات سطح آب زیرزمینی که بر روی پایداری و کاربری اراضی اطراف مخزن و در بعضی موارد اطراف رودخانه پایین دست تاثیر می‌گذارد.
 - ته‌نشینی بار بستر رودخانه در مخزن که باعث کاهش عمق و در نتیجه کاهش حجم مخزن می‌شود.
 - تغییرات یا توسعه اجتماعی پایین دست که وضعیت بحران سیل را تغییر می‌دهد.
- این رهنمود به بررسی دو دیدگاه قانونی و تکنیکی در این زمینه می‌پردازد. در بخش دیدگاه‌های قانونی گروه‌های مسوول نظیر ارگان بهره‌بردار سد و مقامات ناظر، همچنین قراردادهای مشاوران فنی و قراردادهای دولتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این رابطه نیازهای قانونی شامل هماهنگی‌های عملی مدیریت منابع، نیازهای عملی سازه جدید، شرایط خدمات اضطراری جنبه‌های ایمنی ارائه شده است.

۲-۴-۲- دیدگاه‌های فنی

۲-۴-۲-۱- طبقه‌بندی سدها

خروج مهار نشده آب یا سایر محتویات ذخیره شده پشت سد، خسارت جانی، مالی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کند. سطح این خسارت به نتایج شکست و احتمال وقوع شکست بستگی دارد.

برای کاهش خطر سیل و رساندن آن به سطحی قابل قبول، می‌توان محاسباتی را انجام داد. درواقع مفهوم ایمنی سد نیز در همین امر خلاصه می‌شود.

بسیاری از کشورهایی که از برنامه‌های ایمنی سد استفاده می‌کنند، براساس نتایج شکست سد، سیستمی شامل ۳ تا ۵ گروه برای طبقه‌بندی سدها پایه‌ریزی کرده‌اند. در این رهنمود نیز از این سیاست کلی پیروی شده و سدها از نظر پتانسیل اثر شکست سد طبقه‌بندی گردیده‌اند.

طبقه‌بندی پتانسیل اثر شکست یک سد در طول عمر آن ممکن است به دلیل تغییرات طبیعی یا کاربری دره پایین دست یا اراضی بالادست آن تغییر کند. عوامل بسیاری روی پتانسیل اثر شکست سد تاثیر می‌گذارند. از جمله:

- ارتفاع سد
- حجم ذخیره شده پشت سد
- ماهیت مواد ذخیره شده
- شکل و مشخصات دره پایین دست
- شرایط پایین دست

در این رهنمود، طبقه‌بندی پتانسیل اثر سدها مورد بحث قرار گرفته است. این طبقه‌بندی براساس خسارت افزایشی در اثر شکست سد تعیین شده است. خسارت افزایشی، خسارت اضافی است که در اثر همان حادثه طبیعی در صورتی که سد نشکند، رخ می‌دهد. نتایج خسارت جانی و مالی تعیین کننده گروه پتانسیل اثر است.

۲-۴-۲-۲- مولفه‌های اصلی سد و موضوعات ایمنی مرتبط با آن

اکثر مردم با سدها آشنا نیستند و صاحبان جدید یا سازندگان ممکن است در ابتدا سد را تنها به عنوان مانعی در عرض دره که حجم ذخیره آب را می‌سازد بشناسند. مجموعه سد از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که می‌باید در برنامه‌ی ایمنی سد مد نظر قرار گرفته شوند.

در این رهنمود به مولفه‌های اصلی سد، نیازهای وابسته به آنها و مناطقی که معمولاً در آنها موضوع خطر یا ایمنی مطرح می‌شود، پرداخته شده است.

مخزن، سازه اصلی سد، فونداسیون، تونل‌ها، سرریزها، سازه‌های انحراف کارگاهی، پایاب و ... از مواردی است که در این رهنمود مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۴-۲-۳- تحقیق، طراحی، ساخت سدهای جدید

در این رهنمود در مورد مراحل و اصول توصیه شده برای سدها و طرح‌های جدید برای دستیابی به یک سد ایمن بحث می‌شود. همچنین به اصول بنیادی‌ای اشاره می‌شود که در طول تحقیقات، طراحی و ساخت باید به کار برده شوند. علاوه بر این مراحل که برای رسیدن به سطح ایمنی کافی باید انجام شوند نیز تشریح می‌گردند.

تحقیقات پیش طراحی و طراحی بسته به شرایط ممکن است شامل موارد زیر باشند:

- تعریف توپوگرافی
 - تعریف هیدرولوژی، به‌ویژه خصوصیات سیل
 - تعریف زمین‌شناسی و شرایط و خصوصیات شالوده خاص منطقه
 - تعریف خصوصیات مصالح ساخت
 - تعریف خطرات آتشفشانی و زمین‌لرزه‌ای و نیروهای زمین‌لرزه
 - آزمایش روش‌های ساخت پیشنهاد شده
 - تعریف پتانسیل اثر و اثرات زیست‌محیطی
 - شناخت محلی از طرح‌های قبلی موجود در مجاورت طرح
- طراحی سد، کاری بسیار پیچیده و نیازمند به محدوده‌ای از قوانین خاص و کوشش‌های قابل ملاحظه در تعریف موثرترین و بهترین طرح از نقطه نظر ایمنی سد می‌باشد. نکات کلیدی‌ای که در طراحی باید مد نظر قرار گیرند عبارتند از:
- ارزیابی پتانسیل اثر سد، تمام خطرات مرتبط و سطوح ایمنی که در هر منطقه طرح باید مدنظر قرار گیرند.
 - اطمینان از این که تیم طراحی به اندازه کافی کارآمد هستند.
 - به کارگیری هنر تحلیل و تعریف حالتی که از نظر صنعت قابل قبول باشد.

- در نظر گرفتن یک روش مهندسی دفاعی هوشیار در مناطقی که حداکثر ریسک وجود دارد.
- قابل اجرا بودن طرح، زیرا روش یا ترتیب ساخت می تواند روی طرح تاثیر بگذارد.
- کیفیت اجرا در ایمنی سد اهمیت بسیار دارد. اگر خصوصیات مصالح یا کیفیت اجرا پایین تر از مشخصه های طراحی باشند، اجزای سد سطح ایمنی مورد نظر طراحی را نخواهند داشت.
- یک تغییر کوچک و جزئی در منطقه ای که پتانسیل نیروی زیاد تراوش وجود دارد، می تواند به طور جدی به ایمنی سد در منطقه مورد نظر صدمه بزند و پیامدهای گسترده ای در بر داشته باشد. در اینجا به نکاتی که از نقطه نظر ایمنی سد ضروری اند، اشاره شده است.
- تجربه نشان داده است که مشکلات اساسی ایمنی، اغلب در طول آبیگری سد و اولین سال های عملکرد آن آشکار می شوند. در اینجا به مواردی اشاره شده است که برای شروع بهره برداری و حفظ ایمنی لازم است.

۲-۴-۲-۴- بهره برداری، نگهداری و مراقبت

- مراحل بهره برداری، نگهداری و مراقبت موثر مداوم، برای اطمینان از ادامه حیات و ایمنی سد و سازه های وابسته آن ضروری اند. عملکرد، بهره برداری و نظارت ضعیف باعث کاهش عمر سد و بالارفتن احتمال شکست می شود.
- هزینه این مراحل در مقایسه با هزینه ها و نتایج شکست سد که ممکن است شامل تغییرات اساسی و خسارت جانی و مالی شود، بسیار ناچیز است. اهداف این مراحل، اطمینان از این موضوع است که سد حداکثر بهره وری را دارد و در محدوده ایمنی استاندارد عمل می کند.
- مزایای بهره برداری، نگهداری و مراقبت خوب، عبارتند از شناسایی سریع و عملکرد ترمیمی به موقع برای بهبود وضعیت ایمنی و افزایش عمر مفید سد.
- معمولا برای سدی با پتانسیل اثر متوسط یا بالا، دستورالعمل های بهره برداری، نگهداری و نظارت، مسایل اساسی زیر را در بر می گیرند:

- توصیف خلاصه سد با تصاویر منتخب
- نیازهای ایمنی صاحبان
- تجهیزات و مراحل نگهداری سازه
- تجهیزات مورد نیاز بازرسی
- نیازهای بازرسی کنترل
- مراحل ارزیابی، تعریف رفتار غیرقابل قبول و عملکردهای لازم اجرا
- مراحل اضطراری
- این مراحل به طور کلی برای سدها با پتانسیل اثر بالا و متوسط مشابه هستند با این تفاوت که در سطح پتانسیل اثر پایین تر، سطح جزئیات کاهش می یابد. مهم ترین این مراحل به شرح زیرند:
- دیدگاه های بهره برداری و نگهداری که روی ایمنی سد و نگهداری تجهیزات مرتبط با آن تاثیر می گذارند.
- کنترل روزانه

- بازرسی‌های خاص
 - فعال کردن تجهیزات (شامل سیستم‌های اضطراری و پشتیبانی)
 - تهیه دستورالعمل عملکرد اضطراری
- برای سدهایی با ریسک پایین ابزارهای خاص مانند تجهیزات اندازه‌گیری سطح آب و فشار ضروری نیستند. به‌طور کلی سدها با پتانسیل اثر پایین ترتیب عملیاتی ساده‌ای دارند که روی ایمنی و مراحل بهره‌برداری و نگهداری و نظارت اثر می‌گذارند و شامل این موارد می‌باشند:

- بازرسی‌های منظم شرایط کلی سد به‌وسیله اپراتور
- قرائت روزانه سطح آب سد و تنظیم مسیرهای سرریز
- بازرسی‌های متناوب (هر سال یا دو سال یک‌بار) به‌وسیله یک متخصص

۲-۴-۲-۱- تهیه دستورالعمل عملکرد اضطراری

طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری سدها باید به‌گونه‌ای باشد که خطر شکست به حداقل میزان خود برسد. با این وجود، حوادث به‌طور طبیعی در اثر پدیده‌هایی مانند سیل، زمین‌لرزه، خرابکاری یا اشتباه در بهره‌برداری، شرایط اضطراری می‌آفرینند، به‌همین دلیل تهیه دستورالعمل‌های عملکرد اضطراری در مورد سدهای با پتانسیل اثر بالا و متوسط، به‌منظور حداقل کردن اثرات زیان‌بار چنین حوادثی ضروری است. مراحل تهیه این دستورالعمل مطابق زیر است:

- شناسایی راه‌های دسترسی ایمن به سد برای شرایط پیش‌بینی شده
- تعریف مناطق زیر سیل رفته از ارزیابی‌های اثرات احتمالی شکست سد (تحلیل شکست سد)
- تعیین و تشخیص شرایطی که ممکن است به شرایط اضطراری منجر شوند و تعیین عملیاتی که لازم است انجام شوند.
- تعیین موسسات و افرادی که در دستورالعمل، وظیفه‌ای بر عهده دارند.
- تعیین سیستم‌های ارتباطی بین گروه‌ها و افراد
- تعریف تجهیزات و منابع خاص مورد نیاز و موقعیت آنها
- آزمایش و بازبینی طرح در فاصله‌های زمانی منظم

۲-۴-۲-۲- تعلیم پرسنل

پرسنل باید به‌طور مناسبی آموزش دیده باشند که در محدوده مسوولیت خود نقش‌های مربوط به خود را به‌خوبی ایفا نمایند. این آموزش‌ها مخصوص مدیران، سرپرستان و کارمندان بهره‌برداری است که ممکن است بدون تجارب خاص قبلی در موقعیتشان به خدمت گرفته شوند.

۲-۴-۲-۳- ثبت اطلاعات

همه اطلاعات مربوط به ایمنی سد که طی بهره‌برداری، نگهداری و نظارت روزانه به‌دست آمده‌اند، باید گردآوری و ثبت شوند تا در صورت لزوم برای بازبینی‌های ایمنی و ارزیابی‌های مناظره‌ای (مجادلات حقوقی و قانونی) آینده در دسترس باشند.

این اطلاعات باید بخشی از کتاب اطلاعات سد را تشکیل دهند. در سدها با پتانسیل اثر بالا، باید از این اطلاعات ثبت شده به خوبی محافظت شود، به عنوان مثال با تهیه بایگانی ضد حریق و نگهداری دو نسخه از اطلاعات ثبت شده در دو مکان متفاوت.

۲-۴-۵- بررسی ایمنی سدهای موجود

در کشورهای توسعه یافته، سدهای در حال بهره‌برداری به طور منظم مورد بازرسی و بررسی قرار می‌گیرند. این بازرسی‌ها برای ایجاد شرایط ایمن در سدهای قدیمی‌تر که در زمان ساختشان تکنولوژی به اندازه امروز پیشرفت نکرده بود و اطلاعات کمی از فلسفه طراحی و جزئیات ساختشان ثبت شده است، ضروری‌اند.

بازدید و بازرسی، شامل بررسی سیستم‌های بهره‌برداری و نظارت براساس معیارهای مختلفی است که در این رهنمود به آنها اشاره شده است.

نیازهای کلی بسته به نوع، سن و طبقه‌بندی پتانسیل اثر سد و نوبت بازرسی (این که آیا بازرسی برای بار اول صورت می‌گیرد یا خیر) تغییر می‌کنند.

برخی از این نیازها به قرار زیرند:

- تهیه و نگهداری «کتاب‌های اطلاعات» که جزئیات ترکیبات سد، تاریخچه و عملکرد و بهره‌برداری آن را مستند می‌کنند.
- صلاحیت تیم بازرسی
- مراحل کلی برای هدایت بازرسی
- کتاب‌های اطلاعات جامع و کامل معمولاً شامل این موارد هستند:
- گزارش‌ها و اطلاعات تحقیقات
- مدارک و گزارش طرح
- نقشه‌های همچون ساخت^۱ و عکس‌ها و گزارش ساخت
- گزارش آگیری و تحویل سد
- دستورالعمل بهره‌برداری، نگهداری و نظارت
- نوشته‌های نظارت و یادداشت‌های بهره‌برداری
- گزارش‌های حوادث و یادداشت‌های تغییرات هریک از اجزا یا عملکردها
- گزارش‌های بازرسی قبلی

معمولاً اکثر این اطلاعات در مورد سدهای قدیمی‌تر موجود نیستند و در اولین بازرسی ایمنی باید تمام اطلاعات قبلی موجود، جمع‌آوری، ساماندهی و بررسی شوند.

در اینجا نیز نیازهای بازرسی ایمنی در مجموع برای سدهای با طبقه بندی پتانسیل اثر بالا و متوسط مشابه است ولی حوزه بازرسی و وسعت مهارت‌های تخصصی، با کاهش خطر کاهش می‌یابد. مراحل بازرسی ایمنی عبارتند از:

- انتخاب تیم بازرسی و راهنمایی آنها (دادن اطلاعات لازم)
- ارزیابی اطلاعات موجود در کتاب‌های اطلاعات

- بازبینی فیزیکی سد و سازه‌های وابسته
- آزمایش و ارزیابی عملکرد تجهیزات مکانیکی موثر در ایمنی سد
- ارزیابی مراحل بهره‌برداری، نگهداری و نظارت و یادداشت‌های اپراتورها شامل تشریح کامل موضوعات
- ارزیابی کفایت مقاومت سد و اجزای آن براساس استانداردهای طراحی رایج
- تهیه گزارشی از بازرسی انجام شده، شامل توصیه‌هایی برای انجام مطالعات خاص و انجام اقدامات علاج‌بخشی در قسمت‌هایی که لازم است.
- بررسی مراحل اضطراری، امکانات و تجهیزات

بازرسی‌های ایمنی قانونی برای سدهای با طبقه‌بندی پتانسیل اثر پایین معمول نیستند، اما در صورتی که لزوم انجام بازرسی ایمنی در موردی خاص احساس شود، مراحل آن بر طبق طرح کلی مراحل سدهای با پتانسیل اثر بالا خواهد بود و حوزه جزییات آن بسته به سطح مورد توجه صاحبان و سرمایه‌گذاری آنها متغیر است.

۲-۴-۲-۶- تعمیر، بازسازی یا حذف

تعمیر هر قسمت از سد، سازه‌های وابسته یا تجهیزات معمولاً به دلیل وارد آمدن خسارتی غیرمنتظره یا تشخیص شرایط ناامن در طی بازرسی ایمنی سد یا بازرسی روزانه انجام می‌شود.

منظور از بازسازی، ارتقای سطح قابلیت‌ها و امکانات به منظور افزایش عمر اقتصادی سدها و به روز کردن امکانات برای سودآورتر و از نظر تکنولوژیکی مناسب‌تر کردن آنهاست.

حذف یک سد یا از کار انداختن آن که همان اثر حذف را دارد، به این دلیل انجام می‌شود که عمر مفید سد به پایان رسیده است و یا سد به اقداماتی جهت ایمنی نیاز دارد که ارگان مسوول آن استطاعت مالی آنها را ندارد و یا این‌که عملیات مربوط به سد غیراقتصادی است.

۲-۴-۲-۷- حفاظت اطلاعات ثبت شده

یک جنبه ایمنی سد که اغلب نادیده گرفته شده است، نیاز به حفاظت اطلاعات ثبت شده است. این موضوع در مورد تمام سدها، صرف‌نظر از طبقه‌بندی ریسک آنها، صدق می‌کند. به خصوص در مواردی که طبقه‌بندی ریسک سدی ممکن است با زمان تغییر کند. تمام اطلاعات باید به طور مناسبی در یک فهرست که در محل مناسبی بایگانی شده و امکان بازبینی سریع آن وجود دارد ذکر شوند.

۲-۴-۲-۸- تهیه دستورالعمل‌های عملیات اضطراری

دستورالعمل عملکرد اضطراری دستورالعملی رسمی است که شرایط اضطراری یک سد را توصیف می‌کند و در آن به مراحل لازم برای حداقل کردن خسارت مالی و جانی اشاره شده است. نیاز به چنین دستورالعملی وقتی احساس می‌شود که یک حادثه غیرمنتظره شرایطی را می‌آفریند که ممکن است روی کل سد اثرات بدی بگذارد و یا جان و مال مردم را تهدید کند. همه سدهایی که در طبقه‌بندی سدهای با اثر متوسط یا بالا قرار می‌گیرند، باید یک دستورالعمل عملکرد اضطراری داشته باشند. در این قسمت به تشریح مواردی پرداخته شده است که در تهیه یک دستورالعمل عملکرد اضطراری باید مدنظر قرار گیرند.

۲-۵- رهنمودهایی در مورد سیل‌های شکست سد- کمیته ملی سدهای بزرگ آفریقای جنوبی (SANCOLD)- ارزیابی ایمنی سدها

۲-۵-۱- کلیات

تعیین پتانسیل خطر^۱ یکی از عواملی است که در طبقه‌بندی سدها مد نظر قرار می‌گیرد. پتانسیل خطر به میزان خطر جانی و مالی ناشی از شکست سد بستگی دارد. تعیین پتانسیل خطر جانی و مالی نیازمند بررسی و تحلیل موضوع برای حالت‌ها و شرایط مختلف و بررسی سطح خطر مرتبط می‌باشد. همچنین در تعیین دستورالعمل‌های اضطراری باید مناطقی که می‌توان آنها را هنگام حادثه شکست سد «امن» فرض کرد، مشخص گردیده و زمان لازم جهت تخلیه نیز تعیین گردد. بنابراین تحلیل شکست سد در فرآیند ارزیابی ایمنی سدها نقش مهمی را ایفا می‌کند.

دقت مورد نیاز نتایج، به زمینه کاربرد آنها بستگی دارد. با ردیابی موج سیلاب در بازه پایین‌دست، مقدار متغیرهایی نظیر بده حداکثر سیلاب، عمق و سرعت جریان و طول مدت سیل در نقاط مختلف تخمین زده می‌شود که دقت نتایج، به روش مورد استفاده و فرضیات انجام شده در مورد نحوه تشکیل شکاف و مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بستگی خواهد داشت.

در بخشی از این رهنمود به مفاهیم اصلی و تئوری‌های پایه و اصولی که در تهیه برنامه‌های کامپیوتری مورد استفاده قرار می‌گیرند، اشاره شده است و توصیه‌هایی نیز در مورد اجرای عملی تحلیل شکست سد به منظور دستیابی به نتایجی قابل قبول برای اهداف مختلف ارائه گردیده است. در این رهنمود تاکید شده است که از این رهنمودها باید تنها به‌عنوان ابزاری برای کمک به مهندسان در تحلیل شکست سدها و مسایل وابسته به آن استفاده شود و به‌کارگیری قضاوت مهندسی و استفاده از اطلاعات موجود برای هر سد به‌منظور دسترسی به بهترین و مطمئن‌ترین نتایج اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

۲-۵-۲- مکانیزم و تشریح مراحل شکست سد

مهم‌ترین فرآیند در شکست سد، مکانیزم ایجاد و توسعه شکاف در سد و انتشار موج سیل در دره پایین‌دست می‌باشد. مکانیزم شکست هر سد به نوع سازه آن بستگی دارد. مطالعه شکست سدهای پیشین نشان می‌دهد که شکست سدهای بتنی غالباً به‌طور ناگهانی بوده، درحالی‌که این امر در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای عموماً در اثر فرسایش و در طول مدت طولانی‌تری اتفاق می‌افتد. شکست سدهای بتنی قوسی و سدهای بتنی وزنی معمولاً به‌طور آنی و به سبب واژگونی و یا لغزش اتفاق می‌افتد. در تحلیل ایمنی سدهای بتنی قوسی، معمولاً فرض می‌شود که سد به‌طور ناگهانی در عرض ۱۰-۶ دقیقه خواهد شکست و شکل و اندازه شکاف حاصل، برابر مقطع عرضی دره پایین‌دست، بلافاصله بعد از محل سد فرض می‌شود. در مورد سدهای بتنی وزنی، شکست سد آنی و شکل شکاف مستطیلی در نظر گرفته می‌شود.

شکست سدهای خاکی و سنگریزه‌ای معمولاً در اثر فرسایش مصالح سد به‌وسیله عبور جریان آب از روی سد (روگذری) یا از میان سد (رگاب) صورت می‌گیرد. شکل، اندازه و زمان لازم برای تشکیل و توسعه شکاف، به فرسایش‌پذیری مصالح سد و مشخصه‌های جریان ایجاد کننده شکاف بستگی دارد. تشکیل چنین شکاف‌هایی معمولاً بین ۱ تا ۳ ساعت طول می‌کشد. عرض کف

نهایی شکاف در چنین سدهایی عموماً ۰/۵ تا ۳ برابر ارتفاع سد و شیب جانبی در دو طرف شکاف معمولاً ۱ عمودی به ۰/۵ افقی است.

۲-۵-۳- محاسبه جریان عبوری از شکاف

جریان عبوری از شکاف معمولاً از رابطه سرریز (در مورد شکست روگذری) و یا روزنه (در مورد شکست رگاب) پیروی می‌کند. در این بخش از رهنمود روابط و معادلاتی برای محاسبه بده جریان در هریک از حالت‌های مذکور ارائه شده است.

۲-۵-۴- رفتار مخزن

عملکرد مخزن در اثر شکست سد عموماً با روندیابی سطح آب مخزن تشریح می‌شود. در این حالت کلیه جریان‌های ورودی و خروجی مخزن نظیر جریان‌های سیلابی و بده سرریزها، جریان‌های خروجی قابل ملاحظه و جریان عبوری از شکاف سد می‌باید مدنظر قرار گیرند. در شرایطی که شکست سد سریع (تقریباً آنی) باشد، ممکن است یک موج منفی به طرف بالادست و به سمت بدنه سد انتشار یابد. چنین مواردی تنها در مورد شکست آنی سدهای بتنی قوسی و بتنی وزنی اهمیت خواهند داشت. هیدروگراف‌های سیل خروجی ناشی از شکست سد در پایین‌دست، بستگی زیادی به اندازه شکاف، سرعت تشکیل آن و حجم ذخیره مخزن دارند.

۲-۵-۵- انتشار موج سیلاب

شرایط جریان بلافاصله بعد از شکست سد، به نوع سد، نوع شکست و سرعت تشکیل شکاف بستگی دارد. در نتیجه عبور سیلاب حاصل از شکست سد، از دره رودخانه پایین‌دست، حداکثر هیدروگراف سیلاب فروکش کرده و به همراه آن سطح آب پایین می‌افتد. مقدار این افت به عوامل زیر بستگی دارد:

- شیب، شکل و زبری دره پایین‌دست سد
- حجم ذخیره در دره‌های مجاور
- جریان پایه^۱
- سایر جریان‌های ورودی
- رقوم سطح آب نیز به عوامل زیر بستگی دارد:
- زیربحرانی و یا فوق بحرانی بودن جریان
- تشکیل یا عدم تشکیل (Bore)
- موانع موضعی نظیر پل‌ها

شکست سد باعث انتشار متناوب دسته‌ای از امواج مثبت پیشرونده به سوی پایین‌دست سد می‌شود. هندسه کانال و اصطکاک موجود بر روی این امواج تاثیر می‌گذارند، به گونه‌ای که وجود اصطکاک و عریض شدن کانال جریان در دره پایین‌دست باعث کاهش ارتفاع امواج مثبت می‌شود. امواج منفی رفتاری مشابه امواج مثبت دارند، با این تفاوت که به دلیل وجود عمق بیش‌تر آب در محل

تشکیل آنها (مخزن سد) سرعت تضعیف آنها از امواج مثبت بیش تر است. در این قسمت از رهنمود به بررسی روابط و معادلات مربوط به امواج مثبت و منفی موج پرداخته شده است.

۲-۵-۶- مدل های پیشنهادی شکست سد

در این رهنمود به چند نمونه از مدل های ریاضی تحلیل شکست سد، نظیر مدل های DAMBRK و SMPDBK ارائه شده توسط سرویس ملی هواشناسی، HEC-1 ویرایش ایمنی سد واحد مهندسی ارتش امریکا و مدل SCS-TR66 اشاره و پرداخته شده است و در نهایت مقایسه ای بین مدل های مذکور صورت گرفته است. از زمان تهیه این دستورالعمل تاکنون مدل های جدیدتر، کامل تر و کارآمدتری به بازار آمده است، بنابراین از تشریح مدل های ارائه شده در این بخش اجتناب شده است.

فصل ۳

تاریخچه حوادث ناشی از شکست سد

۳-۱- کلیات

به منظور درک واضحی از حوادث ناشی از شکست سد و بررسی خسارت جانی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از حادثه شکست سد و همچنین خسارت ناشی از توقف بهره‌برداری از آن، در این بخش از گزارش به ذکر چند نمونه از موارد شکست سد پرداخته شده است.

۳-۲- شکست سد تتون^۱

این سد که در سه مایلی شمال شرقی نیودیل^۲ در ایالت آیداهو^۳ ایالات متحده آمریکا واقع بود، در ۵ ژوئن ۱۹۷۶ در زمان اولین آبیگیری دچار شکست شد. در نتیجه این حادثه حجم آبی در حدود ۳۷۰ میلیون مترمکعب از مخزن سد رها و شهرها و کشتزارهای پایین‌دست را به زیر آب فرو برد. این حادثه ۱۴ کشته بر جای گذاشت و در حدود یک میلیارد دلار خسارت مالی وارد نمود. سد خاکی تتون با ارتفاع ۹۳ متر از بستر رودخانه با گنجایش مخزن ۳۶۵ میلیون مترمکعب بر روی رودخانه تتون ساخته شده بود. هدف از ساخت سد تولید نیروی برق، آبیاری حدود ۴۰,۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی، کنترل سیلاب و تفریحات در نظر گرفته شده بود.

طراحی سد توسط اداره عمران ایالات متحده^۴ انجام پذیرفت. مکان‌یابی سد نتیجه انجام چندین مرحله مطالعات در طی چندین سال بوده است. اولین بررسی در سال ۱۹۳۲ انجام و بین سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۶۱، هشت گزینه دیگر در این راستا مورد مطالعه قرار گرفت.

در نهایت، گزارش مرحله شناسایی از سد تتون در ژوئن ۱۹۶۱ توسط اداره عمران ایالات متحده آماده و حفاری مغزه‌گیری در محل سد از ماه جولای همان سال آغاز گردید. هنگ مهندسین ارتش آمریکا^۵ در مارس ۱۹۶۲ در گزارشی ساخت پروژه تتون شامل سد تتون را پیشنهاد نمود.

در زمان حفاری ترانشه اصلی، درزه‌های بزرگی در نزدیکی انتهای راست سد مشاهده گردید. بعضی از این درزه‌ها با کلسیت (آهک) و برخی با خرده سنگ پر شده بودند. مصرف حجم آب زیاد در زمان حفاری مغزه‌گیری اکتشافی نیز نشان دهنده وجود درزه‌های بزرگ بود. از دست دادن این حجم آب و انجام آزمایش‌های نفوذپذیری حاکی از نفوذپذیرتر بودن سنگ تا عمق ۷۵ متری نسبت به سنگ زیر این عمق بود.

زمین لغزش یا هر پدیده مرتبط با ناپایداری در مطالعات زمین‌شناسی و آزمایشات اکتشافی تکیه‌گاه راست قبل از ساخت سد مشاهده نگردیده بود.

منطقه مورد مطالعه به لحاظ رده‌بندی در محدوده کم‌خطر به لحاظ زلزله قرار داشته و گسل فعالی در نزدیکی یا مجاورت سد وجود نداشته است.

1- Teton Dam

2- Newdale

3- Idaho

4- United States Bureau of Reclamation (USBR)

5- United States Army Corps of Engineers (USACE)

ساخت سد از فوریه ۱۹۷۲ شروع و آبیگیری سد از روز سوم اکتبر ۱۹۷۵ پس از تکمیل خاکریز سد آغاز گردید. این در حالی بود که مجراهای اصلی و کمکی خروجی سد هنوز تکمیل نشده بودند. به همین علت، مخزن با نرخ ۱ متر در روز افزایش سطح آب شروع به پر شدن کرد. که این مقدار از میزان مجاز $\frac{0}{3}$ تا $\frac{0}{6}$ متر (استاندارد اداره عمران ایالات متحده) در روز برای سالهای اولیه بیش تر بود.

شکست سد با تراوش از نزدیکی تکیه‌گاه راست سد آغاز شد، اولین نشست جدی در ساعت ۷:۳۰ تا ۸ صبح ۵ ژوئن رخ داد. به واسطه وقوع این نشست، جریان آبی در حدود ۵۵۰ تا ۸۵۰ لیتر بر ثانیه از تکیه‌گاه راست مشاهده شد که تا ساعت ۹ صبح به میزان ۱۱۰۰ تا ۱۴۰۰ لیتر بر ثانیه افزایش یافت. بین ساعت ۹:۳۰ تا ۱۰ صبح یک لکه مرطوب روی پایین‌دست سد و در حدود ۴۰ متر زیر تاج سد به وجود آمد که به سرعت شروع به رشد و تراوش نمود. فرسایش در خاکریز سد آغاز شد و متعاقب آن میزان بده جریان نیز به‌طور سریع افزایش یافت.

فرسایش در خاکریز سد منجر به ایجاد روزنه و شکاف در بدنه سد گردید. حدود ۲ تا ۲/۵ ساعت تلاش برای پر کردن این روزنه توسط چهار عدد بولدوز بی‌فایده بود و در نهایت با گسترش شکاف تاج سد، شکست کامل سد بین ساعت ۱۱:۱۵ تا ۱۱:۳۰ اتفاق افتاد و حدود ۳۰۰ میلیون مترمکعب آب به پایین‌دست سرازیر شد. اعلام خطر در این خصوص در ساعت ۱۰:۳۰ صبح به دفاتر کلانتران منطقه گزارش گردید.

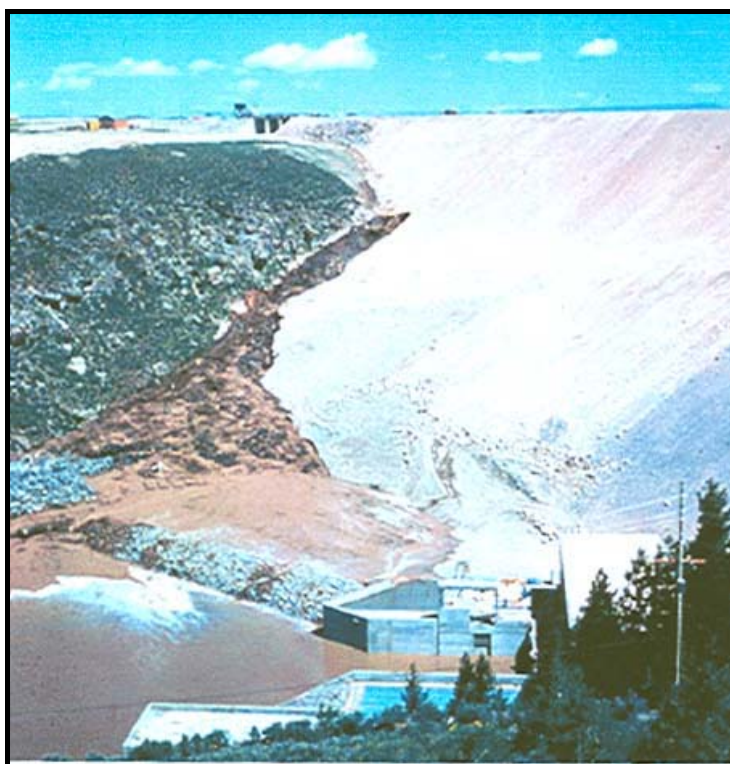
شکل‌های شمال (۳-۱) تا (۳-۲۱) مراحل شکست سد را به‌طور کامل نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱ - ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۱ صبح، نشست به صورت یک خط قهوه‌ای تیره در رویه سد در سمت چپ عکس مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲- افزایش نشت به صورت یک جریان گل‌آلود



شکل ۳-۳- خروج جریان گل‌آلود از رویه سد و جمع شدن آن در پنجه سد



شکل ۳-۴- افزایش ابعاد مجرای ایجاد شده در رویه سد



شکل ۳-۵- فرسایش تکیه‌گاه راست و ظهور یک نشت دیگر بالاتر از محل وقوع نشت قبلی و شکل گرفتن جریان سیلابی گل‌آلود در پایین‌دست سد



شکل ۳-۶- افزایش سریع ابعاد مجرای ایجاد شده در رویه سد و فرسایش شدید تکیه‌گاه راست



شکل ۳-۷- گسترش ابعاد سوراخ ایجاد شده در رویه سد تا نزدیکی تاج و هجوم آب و فرسایش عمیق در تکیه‌گاه راست سد



شکل ۳-۸- برش تاج سد با گسترش ابعاد مجرا و افزایش مداوم جریان سیلابی پایین دست



شکل ۳-۹- ایجاد شکاف در سد در ساعت ۱۱:۵۷ و ایجاد جریان سیلابی گل آلود شدید



شکل ۳-۱۰- افزایش ابعاد شکاف سد و سرریز بدون کنترل آب



شکل ۳-۱۱- افزایش مستمر ابعاد شکاف سد



شکاف ۳-۱۲- افزایش شدت جریان آب با افزایش ابعاد شکاف سد



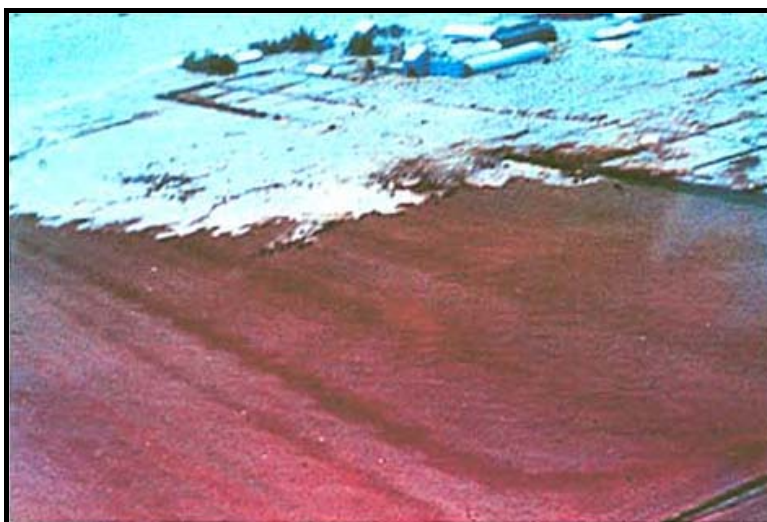
شکاف ۳-۱۳- نمایی دورتر از وضعیت شکاف سد و وضعیت سیلاب پایین دست



شکاف ۳-۱۴- افزایش مستمر ابعاد شکاف سد و متعاقب آن افزایش سیلاب



شکل ۳-۱۵- سیل گرفتگی دره



شکل ۳-۱۶- سیل گرفتگی اراضی کشاورزی و مزارع



شکل ۳-۱۷- سیل گرفتگی شهر



شکل ۳-۱۸- این عکس در آگوست ۲۰۰۱ از نزدیکی محلی که عکس‌های قبلی تهیه شده بود، گرفته شده است. تمام چیزی که از سد اصلی باقی مانده یک تپه هرمی شکل است.



شکل ۳-۱۹- نمایی از سرریز و سنگ بستر (آگوست ۲۰۰۱)



شکل ۳-۲- نمایی از پایین دست سد، حجم زیادی مصالح سنگی توسط سیلاب حمل و جمع آوری شده است.



شکل ۳-۲۱- نمایی از وضعیت نهایی سد پس از شکست

۳-۳- شکست سد سنت فرانسیس^۱

این سد در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده و در دره سن فرانسیسکوئیتو^۲ واقع شده بود. سد از نوع بتنی قوسی وزنی با گنجایش حدود ۴۷ میلیون مترمکعب، به طول ۱۸۰ و ارتفاع ۶۰ متر طرح و اجرا گردیده بود که به عنوان قسمتی از سیستم آبرسانی لوس آنجلس^۳ با هدف آبرسانی از دره اونز^۴ به لوس آنجلس به شمار می رفت. این سد در ماه مارس سال ۱۹۲۸ میلادی دچار حادثه

1- St. Francis
2- San Francisquito
3- Los Angeles
4- Owens

گردید و در نتیجه شکست آن در حدود ۴۵۰ نفر کشته شدند. این حادثه دومین فاجعه پس از زمین‌لرزه بزرگ سانفرانسیسکو^۱ و آتش‌سوزی حاصل از آن در سال ۱۹۰۶ به‌شمار آمده است.

نکته قابل توجه در مورد این سد، عدم انجام آزمایش‌های زمین‌شناسی قبل از ساخت سد می‌باشد. در حال حاضر مشخص گردیده است که از محدوده سد یک گسل غیرفعال عبور می‌کند. سنگ بستر این سد را نیز میکاشیست مهبای لغزش و ماسه سنگ قرمز و کنگلومرا تشکیل می‌داده است. در یکی از گزارش‌های تحقیقاتی انجام شده بر روی شکست این سد، اشاره شده است که شکست سد به علت قرارگیری تکیه‌گاه راست سد بر روی گسل تماسی بین کنگلومرا و شیست بوده است.

تحقیقات بعدی، عدم رعایت تئوری فشار برخاست را در طرح سد و تعیین عرض پی آن مطرح نموده و اشاره کرده‌اند که تکیه‌گاه چپ سد بر روی یک زمین‌لغزه بزرگ قدیمی قرار داشته و علاوه بر این سنگ کنگلومرای بستر آن پس از آبیگری نشست نموده است. علت این نشست، قابل حل بودن لایه‌های ژئیس موجود در سنگ در آب عنوان شده است.

مجموعه عوامل فوق موجب نشست و در نهایت شکست سد گردید. پس از شکست سد قسمت‌هایی از بدنه آن به وزن حدود ۱۰۰۰ تن توسط آب رها شده از مخزن سد تا مسافت یک کیلومتر به پایین دست حمل و فقط بخش مرکزی سد پایدار باقی ماند که بعداً به صورت یک جاذبه توریستی درآمد و سرانجام ویران گردید.

بعد از این حادثه، اولین آژانس جهانی ایمنی سد شکل گرفت و قانون یکپارچه نمودن مبانی مهندسی برای آزمایش تراکم مصالح خاکریز سد منتشر گردید. همچنین تمامی دیوارتمان‌های سد و مخازن آب و نیروی لوس‌آنجلس مورد ارزیابی مجدد قرار گرفت.

۳-۴- شکست سد لاون لیک^۲

این سد خاکی با ارتفاع ۸ متر در نزدیکی پارک ملی راکی مانتین^۳ ایالت کلرادو^۴ ایالات متحده قرار داشت. حادثه شکست سد در پانزدهم ژوئن ۱۹۸۶ میلادی اتفاق افتاد. زمان توسعه کامل شکاف ایجاد شده در بدنه سد حدود ۱۰ دقیقه بود که در نتیجه شکست سد حجم آبی در حدود ۸۳۰,۰۰۰ مترمکعب با بده حداکثر ۵۱۰ مترمکعب بر ثانیه به دره رودخانه رورینگ^۵ سرریز نمود. موج تولید شده در حدود ۸ تا ۹ متر ارتفاع داشت. ۳ نفر در این حادثه کشته شدند و خسارت کلی در حدود ۳۱ میلیون دلار برآورد گردید. در نتیجه سیلاب حاصله ۱۸ پل تخریب و راه‌های ارتباطی از بین رفت. سیلاب به ۱۷۷ واحد تجاری (۷۵ درصد از فعالیت‌های تجاری منطقه) و ۱۰۸ واحد مسکونی نیز آسیب وارد نمود. اغلب واحدهای تجاری در حدود ۱ متر آب و بیش از ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر گل و لجن را در واحدهای خود گزارش کردند. شایان ذکر است که این سیلاب در تابستان و در هنگامی که درآمد حاصل از جذب توریست بیش‌ترین مقدار خود را دارد اتفاق افتاد. این سیلاب همچنین سد کسکید^۶ در انتهای شرقی پارک هورس‌شو^۷ را که در سال ۱۹۰۹ ساخته شده بود، تخریب نمود.

1- San Francisco
2- Lawn Lake
3- Rocky Mountain
4- Colorado
5- Roaring
6- Cascade
7- Horseshoe

دفتر مهندسی ایالت کلرادو^۱ علت احتمالی شکست سد را بروز اشکال در آب‌بند مورد استفاده در اتصال بین لوله تخلیه^۲ و شیر کشویی^۳ عنوان نمود. نشت حاصل از این نقص باعث فرسایش خاکریز سد و توسعه رگاب حاصله باعث شکست سد گردید. قابل توجه است که این حادثه در یک صبح تابستانی و در هوای صاف و آفتابی افتاده است.

۳-۵- شکست سد بالدوین هیلز^۴

این سد از نوع خاکی بوده و در شهر لوس آنجلس در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده واقع شده بود. این سد در ماه دسامبر سال ۱۹۶۳ میلادی دچار شکست شد. در نتیجه شکست این سد در حدود ۲۴۵,۰۰۰ مترمکعب آب از مخزن سد رها شده و خانه‌های زیادی تخریب و ۵ نفر نیز کشته شدند. خوشبختانه به واسطه واکنش سریع پرسنل مستقر در محل سد و پلیس منطقه در امر اخطار به ساکنین پایین‌دست، از خسارت جانی بیش‌تر جلوگیری شد.

این سد در سال ۱۹۵۰ میلادی ساخته شد و در دوره ساخت سد زمین‌شناسان دو گسل را در محدوده مخزن و بدنه سد شناسایی نمودند. به واسطه احتمال فعال بودن یکی از این گسل‌ها، با تعبیه زهکش‌های ویژه‌ای در زیر مخزن سد، عبور بی‌خطر آب نفوذیافته در میان گسل فراهم گردیده بود.

با توجه به نزدیکی این سد به یک میدان نفتی بزرگ، استخراج نفت باعث نشست زمین و لغزش آن بین دو گسل گردید. باوجود مقدار بسیار کم این لغزش، قسمتی از مخزن تخریب و زهکش‌های تعبیه شده به سرعت با ماسه و آب پر شده و آب پشت سد به سرعت حفره‌ای در زیر و میان سد به وجود آورد.

ساخت سد در زمینی که در نزدیکی یک گسل فعال و در معرض نشست قرار داشته و عبور گسل‌های غیرفعال از داخل مخزن سد، از جمله عواملی است که نشان‌دهنده عدم قرارگیری سد در محلی مناسب بوده که در نهایت منجر به شکست آن گردیده است.



شکل ۳-۲۲- شکست سد بالدوین هیلز

- 1- The Colorado State Engineer
- 2- Outlet
- 3- Gate valve
- 4- Baldwin Hills



شکل ۳-۲۳- شکست سد بالدوین هیلز

۳-۶- شکست سد رسوبگیر لوس فرایلس^۱

در تاریخ ۲۵ آوریل سال ۱۹۹۸ میلادی این سد رسوبگیر معدن سرب و روی لوس فرایلس در ازنالکولار^۲ در اسپانیا دچار حادثه شد و حدود ۵ تا ۷ میلیون مترمکعب محتویات مخزن شامل مواد سمی آن در رودخانه ریگ آگریو^۳ جاری شد. موج آب آلوده و سمی، چندین هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی و پارک ملی دونانا^۴ و یک منطقه میراث جهانی سازمان ملل متحد^۵ را تخریب کرد. علت شکست این سد، از دست دادن انسجام مکانیکی خاک در پی سد جداکننده دو مخزن رسوبگیر و در نهایت شکست سد اصلی عنوان شده است. بدین ترتیب که لایه‌ای از خاک زیرین سد به پهنای حدود ۲۰ متر در حدود یک متر لغزش نموده و باعث شکاف سد گردیده است. در برخی از گزارش‌ها، علل این لغزش را تاثیر واکنش شیمیایی مایعات اسیدی بر روی مارن شکل‌دهنده پی سد می‌دانند. مارن شامل رس و کربنات کلسیم می‌باشد که کربنات کلسیم بر اثر واکنش اسیدی تجزیه شده و پایداری مکانیکی خاک را کاهش می‌دهد. برخی دیگر از بررسی‌های انجام شده وجود نقص در مطالعات سد را علت وقوع این حادثه می‌دانند. چرا که این سد بر روی یک لایه رس واگرا ساخته شده که قابلیت تغییر شکل داشته و بر اثر تراوش صورت گرفته در مارن، دچار افزایش حجم شده و متورم می‌گردد. برعکس این حالت نیز بر اثر خشک شدن آن رخ می‌دهد. جابه‌جایی‌هایی که در نتیجه این انقباض و انبساط به‌وجود می‌آیند، باید در مطالعات مدنظر قرار گیرند.

از دیگر عوامل قابل توجه در شکست سد، عرض نوار ساحلی بین تراز آب و تاج سد می‌باشد. برخی عوامل فنی با استناد به عکس‌های موجود، به وجود آب در ترازهایی از مخزن که انتظار می‌رفت در آن زمان خشک باشد، اشاره می‌نمایند. عرض ناکافی نوار ساحلی یکی از شرایط بحرانی در ایمنی سدهای رسوبگیر است. با توجه به این که در آن زمان طرحی جهت تصفیه آب در دست

1- Los Frailes

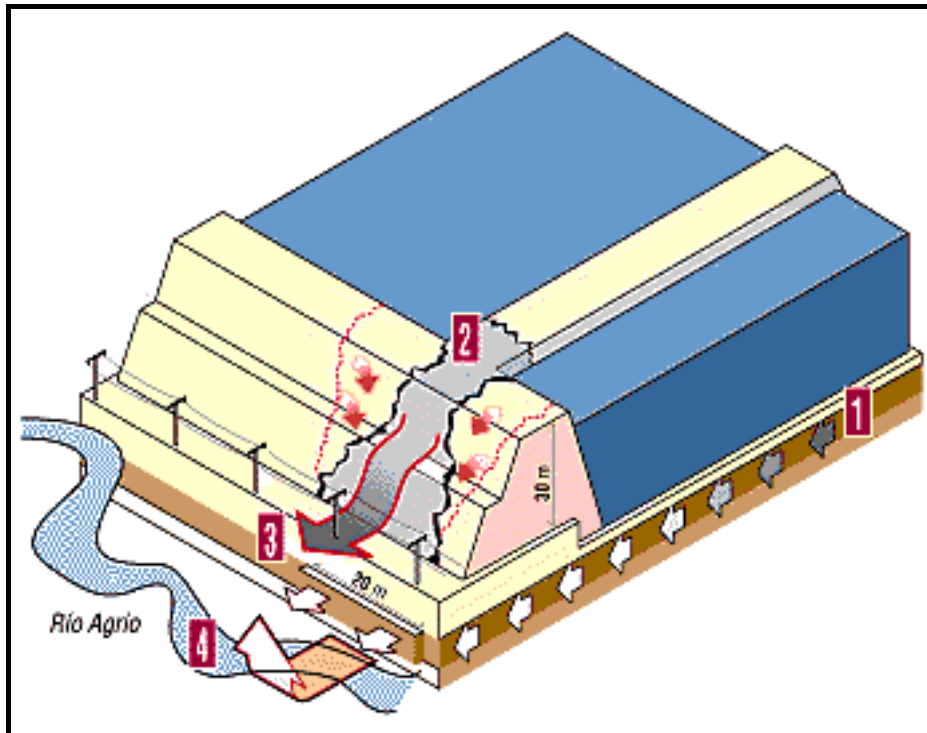
2- Aznalcollar

3- Rig Agrio

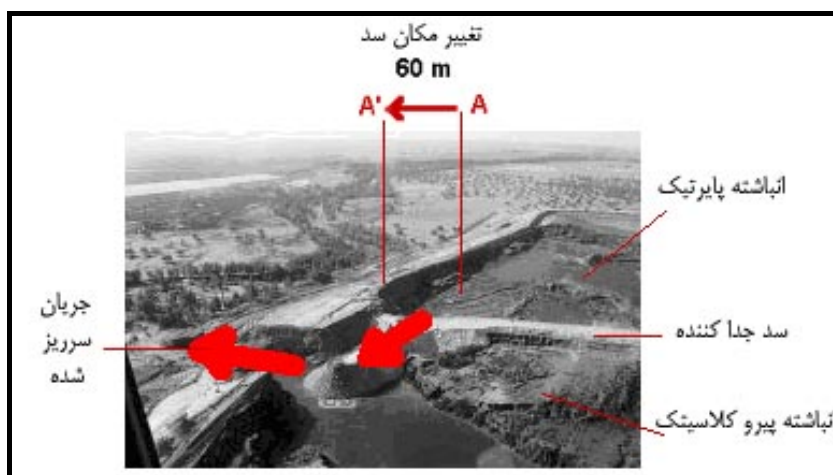
4- Donana

5- UN World Heritage Area

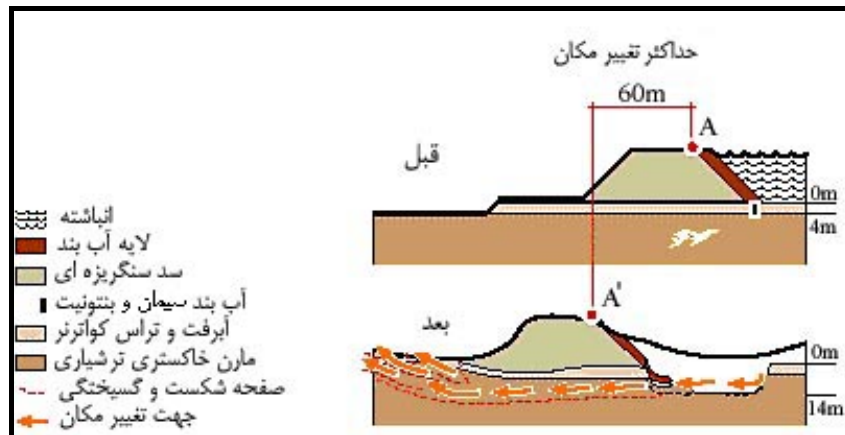
انجام بوده است که به واسطه آن ظرفیت سرریز از سد را تا دو برابر افزایش می‌داده است، برخی متخصصین بر این باورند که سد با نرخی بیش از میزان برآورد شده در طراحی آن، در حال پرشدن بوده است.



شکل ۳-۲۴- لغزش لایه خاک زیرین سد و ایجاد شکاف در سد



شکل ۳-۲۵- چگونگی شکست سد رسوبگیر لوس فرایلس



شکل ۳-۲۶- چگونگی شکست سد رسوبگیر لوس فرایلس



شکل ۳-۲۷- شکست سد رسوبگیر لوس فرایلس

۳-۷- شکست سد کلی بارنز^۱

این سد که بر روی رودخانه توکوتا^۲ نزدیک توکوتا در ایالت جورجیا^۳ ایالات متحده ساخته شده بود پس از یک دوره بارندگی شدید در ۶ نوامبر سال ۱۹۷۷ میلادی دچار حادثه شد. در جریان شکست این سد ۳۹ نفر کشته شده و خسارتی بالغ بر ۲/۸ میلیون دلار به جای ماند.

بدنه اصلی این سد از نوع سنگی در سال ۱۸۹۹ با هدف تولید نیروی برقابی در طرح یک نیروگاه آبی کوچک تکمیل گردید. مطالعات افزایش ارتفاع سد در سال ۱۹۳۷ به منظور افزایش انرژی تولیدی با ساخت یک سدخاکی روی بدنه سد اصلی مطرح و بعد

1- Kelly Barnes
2- Toccoa Creek
3- Georgia

از جنگ جهانی دوم انجام پذیرفت. میزان افزایش ارتفاع سد با توجه به قدرت نصب متناظر تعیین و تولید انرژی تا سال ۱۹۵۷ توسط این سد صورت پذیرفت. در این سال، بهره‌برداری از نیروگاه متوقف و سد به عنوان یک دریاچه تفریحی مورد استفاده قرار گرفت. این سد دارای ۱۲۰ متر طول، ۶ متر عرض تاج و ۱۲ متر ارتفاع در بزرگ‌ترین مقطع بود. مخزن سد در رقوم نرمال بهره‌برداری ۵۰۶,۰۰۰ مترمکعب گنجایش و مساحتی در حدود ۱۷ هکتار داشت. در زمان شکست سد حجم آب متناظر با رقوم حداکثر سطح آب در حدود ۷۸۰,۰۰۰ مترمکعب برآورد گردیده است.

بررسی‌های انجام شده، مجموعه‌ای از عوامل را در شکست سد موثر برشمرده‌اند. محتمل‌ترین علت، بروز یک لغزش موضعی در شیب تند پایین‌دست در اثر پدیده رگاب و به‌همراه آن ایجاد یک شکاف در تاج سد به علت فرسایش و اشباع شدن خاکریز پایین‌دست ذکر شده است.

۳-۸- شکست سد اولد استونی ریور^۱

اولین ثبت شکست سد در ایالت ویرجینیای غربی^۲ ایالات متحده، شکست سد اولد استونی ریور بوده است. سد از یک عرشه بتنی و تعدادی پایه‌های نگهدارنده ساخته شده بود، به‌گونه‌ای که پایداری هر قسمت به صورت مستقل تامین می‌گردید. شکست سد در ۱۵ ژانویه ۱۹۱۴ در هنگام اولین آگیری سد اتفاق افتاد. در این حادثه سه مقطع از سد به سبب تراوش و شسته شدن مصالح پی سد فرو ریخت. باوجود تخلیه کامل مخزن سد هیچ خسارت مالی یا جانی گزارش نگردید. پس از این حادثه، دوباره سد بازسازی و مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

۳-۹- شکست سد بوفالو کریک^۳

شکست این سد در ۲۶ فوریه ۱۹۷۲ به عنوان یک نمونه کلاسیک شکست سد در جهان شناخته شده است. این سد در شاخه میانی رودخانه بوفالو قرار داشت. بدنه سد از ضایعات زغال‌سنگ در سه مرحله خاکریزی ساخته شده بود. بدین ترتیب که پس از پر شدن مخزن خاکریز اول توسط پساب‌های ورودی، سد دیگری در پایین‌دست روی آن ساخته می‌شد. در زمان حادثه، شکست سد بالایی باعث شکست دو سد پایین‌تر و در نهایت رها شدن سیلاب به پایین‌دست و کشته شدن ۱۲۵ نفر و وارد آمدن خسارت مالی گردید. در این راستا شرکت پیتستون کول^۴، دستگاه بهره‌بردار سد، ۴۲/۵ میلیون دلار خسارت پرداخت کرد.

1- Old Stoney River

2- West Virginia

3- Buffalo Creek

4- Pittsto Coal

۳-۱۰- سد گووهو^۱

این سد در شمال غرب ایالت کینگهای^۲ چین در ساعت ۱۱ شب ۲۷ آگوست ۱۹۹۳ دچار شکست شد. در اثر شکست این سد موجی از آب با ارتفاع ۱۰ متر به پایین دست و شهر کوچک کیاپوکیا^۳ جاری شد. در جریان این حادثه بالغ بر ۳۰۰ نفر کشته شده و خسارت مالی وارده در حدود ۱۸ میلیون دلار برآورد گردید. مقامات مسوول علت این حادثه را عدم رعایت استانداردهای لازم در طراحی و ساخت و مدیریت ضعیف اعلام نمودند.

این سد دارای ارتفاع ۶۰ متر بود که در زمان وقوع حادثه حجم آبی در حدود ۲/۶ میلیون مترمکعب در مخزن آب ذخیره شده بود. سیلاب ناشی از شکست سد پس از حدود ۴۵ دقیقه شهر کیاپوکیا را در بر گرفت.

۳-۱۱- جدول شکست سد در ایالت کالیفرنیا

از سال ۱۸۸۳ تا ۱۹۶۵، چهل و پنج مورد شکست سد در ایالت کالیفرنیا ثبت شده است. بیشترین علت شکست را روگذری تشکیل می‌دهد. در بقیه موارد، بروز اشکال موضعی در سد یا عدم کفایت برآورد مشخصات زمین ریخت‌شناسی محدوده سد علت وقوع حادثه بوده است.

اولین حادثه قابل توجه در این زمینه در سال ۱۸۸۳ در سیرا کاونتی^۴ رخ داده است. عظیم‌ترین حادثه شکست سد مربوط به سد سنت فرانسیس در سال ۱۹۲۸ می‌باشد که در این فاجعه بزرگ در حدود ۴۵۰ نفر جان باختند. در جدول (۳-۱) خلاصه‌ای از مشخصات این سدها و علل شکست آنها ارائه شده است.

1- Guohou
2- Qinghai
3- Qiapuqia
4- Sierra County

جدول ۳-۱- جدول شکست سد در ایالت کالیفرنیا

نام سد	محل سد	سال ساخت	سال شکست	نوع سد	علت شکست
English	Sierra County	۱۸۵۸	۱۸۸۳	سنگریزه‌ای	از بین رفتن مصالح استفاده شده
Long Valley Creek	-	-	۱۸۹۲	-	بارش سنگین و شکست بر اثر سیلاب
The Angles	Calaveras county	-	۱۸۹۵	مصالح بنایی	پی ضعیف و شکست از پی در زمان سیلاب
Vornon Heights	Oakland	-	۱۸۹۶	بتنی	پی کم عمق و سطحی
Piedmont No.1	Oakland	۱۹۰۳	۱۹۰۵	خاکی و بتنی	شکست لوله خروجی در دیوار هسته
San Andreas	-	۱۸۶۸	۱۹۰۶	خاکی، سنگریزه‌ای، بتنی	ترک در طول محور
Yuba River (old)	-	-	۱۹۰۷	خاکی	ناکافی بودن ظرفیت سرریز در زمان سیلاب
Bishop Creek	Inyo County	۱۹۰۸	۱۹۰۹	-	سیلاب
Morena	San Diego	-	۱۹۱۲	سنگریزه‌ای	روگذری
Bear culch	San Francisquito River	۱۸۹۶	۱۹۱۴	خاکی	لغزش
Davis	-	-	۱۹۱۴	خاکی با رویه بتنی	تراوش سازه خروجی
Owen Reservoir	-	-	۱۹۱۴	خاکی	نشت سازه خروجی
Spulvida Canyon	-	-	۱۹۱۴	خاکی، بتنی مسلح	روگذری
Lower Otay	San Diego	-	۱۹۱۶	-	نشت و روگذری به سبب ناکافی بودن ظرفیت سرریز
Mendota	-	-	۱۹۱۶	بتنی	روگذری
Gem Lake	Rush Creek	۱۹۱۷	۱۹۲۵	-	شکست موردی
Sheffield	Santa Barbara	-	۱۹۲۵	خاکی	لغزش بر اثر زمین‌لرزه
Diandi	MC Mahan Creek	۱۹۲۴	۱۹۲۶	خاکی	روگذری به سبب نشست
Half Moon Bay	-	-	۱۹۲۶	خاکی	روگذری
Lake Hemet	Plam Springs	۱۸۹۵	۱۹۲۷	خاکی	روگذری
Saint Francis	San Francisquito Canyon	۱۹۲۶	۱۹۲۸	بتنی وزنی	شکست ناگهانی در حالت مخزن پر در پی سد
De Salba Forebay	Chico	۱۹۰۳	۱۹۳۲	خاکی	تراوش از میان خاکریز سد
Cogswell	Monrovia	۱۹۳۴	۱۹۳۴	سنگریزه‌ای	شکاف در پوشش بتنی
Newell Creek	Santa Cruz	-	۱۹۶۱	خاکی	لغزش در زمان حفاری پرده تزریق
Baldwin Hills	Log Angeles	-	۱۹۶۳	-	نشت از میان خاکریز
Hell Hole	Rubicon River	-	۱۹۶۴	سنگریزه‌ای	شکست در زمان ساخت به سبب بارش پی‌سابقه
Matilija	Ventura	۱۹۴۹	۱۹۶۵	بتنی وزنی	پی نامناسب و تجزیه بتن

فصل ۴

تبیین ضرورت انجام مطالعات

شکست سد

۴-۱- کلیات

در این بخش از گزارش با استفاده از مراجع ذکر شده، به بررسی بیش‌تر پدیده شکست سد پرداخته شده است. در این راستا انواع شکست سد همچنین عوامل و پارامترهای موثر در این پدیده ارائه گردیده و اهمیت انجام این مطالعات در شرایط متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- معرفی انواع شکست سد

شکست سد، پدیده‌ای است که در نتیجه آن جریان سیلی به سمت پایین‌دست جاری می‌گردد. عاملی که بیش از هر چیز دقت مدل‌سازی شکست سد را متاثر می‌سازد، فقدان اطلاعات در این مورد است که سدها چرا و چگونه شکسته‌اند.

انواع شکست سد را می‌توان در چهار گروه عمده زیر طبقه‌بندی نمود:

۱- شکست در رابطه با پی و فونداسیون سد

۲- شکست در رابطه با مصالح سد

۳- شکست در رابطه با رفتار سازه‌ای بدنه سد

۴- شکست در رابطه با سازه‌های وابسته

هریک از انواع شکست می‌تواند به تنهایی یا به شکل ترکیبی از سایر انواع دیگر در سد اتفاق بیفتد. از لحاظ موقعیت‌های شکست، یک سد می‌تواند در زمان ساخت، در شروع اولین آبگیری، در سال‌های اولیه بهره‌برداری و یا در سال‌های بعد دچار حادثه گردد.

فرضیه شکست سد اساساً به مشخصات سازه‌ای آن بستگی دارد. سدهای بتنی در مقابل واگذاری مقاومت قابل توجهی نشان می‌دهند. در چنین شرایطی عامل موثر می‌تواند فرسایش فونداسیون یا تکیه‌گاه‌ها باشد. شکست سازه‌ای معمولاً به سبب فونداسیون ضعیف، نقص یا عدم کارایی سازه‌ای یا خرابکاری می‌باشد. شکست سدهای قوسی و پشت‌بنددار معمولاً آنی فرض می‌گردد. زمان شکست سدهای قوسی وزنی نسبتاً کوتاه اما نه در حد آنی می‌باشد. لغزش و واژگونی یا خرابکاری عمومی‌ترین فرضیات شکست در این سدها می‌باشند. زمان شکست در این حالت مضربی از $0/05 - 0/1$ ساعت است.

در مقابل، شکست سدهای خاکی فرآیند زمان‌بری فرض می‌گردد، چرا که فرآیند فرسایش که عمده‌ترین علت شکست در این سدها می‌باشد، مستلزم صرف زمان است. شکست سدهای خاکی عموماً بر اثر فرسایش داخلی، پدیده رگاب یا روگذری اتفاق می‌افتد. همچنین ممکن است شکاف یا درز اولیه بر اثر خرابکاری عمومی یا عملیات جنگی ایجاد گردد.

یکی از اهداف اصلی تحلیلی شکست سد، ارزیابی نتیجه شکست و تخلیه آب مخزن است. بنابراین مقدار ذخیره مخزن در تحلیل شکست اهمیت زیادی دارد.

معمولاً در هنگام وقوع شکست سد، مخزن در یکی از دو حالت رقوم نرمال یا رقوم حداکثر قرار دارد. اهمیت این دو حالت از نظر پدید آوردن پتانسیل دو مقدار مختلف سیل ناشی از شکست سد می‌باشد که شرایط کاملاً متفاوتی را از نظر خسارت مالی و جانی به پایین‌دست تحمیل می‌کند.

شکست سد در شرایط تراز نرمال مخزن، شکست روز آفتابی نامیده می‌شود. در این شرایط سیل حاصل از شکست سد، عملاً به مقدار جریان‌های ورودی و خروجی مخزن حساس نیست، چرا که این جریان‌ها معمولاً در مقایسه با سیل شکست سد بسیار کوچکند. شکست سد در تراز حداکثر مخزن یا در شرایط سیلابی، سیل بزرگ‌تری را نسبت به شکست سد در تراز نرمال مخزن ایجاد می‌نماید. این نوع شکست معمولاً در اثر روگذری اتفاق می‌افتد، بنابراین رقوم مخزن در زمان مفروض شکست برابر با بالاتر از رقوم تاج سد می‌باشد. مگر زمانی که سد برای حداکثر سیلاب محتمل طراحی شده باشد، که در این صورت در هنگام وقوع حداکثر رقوم مخزن باز هم ارتفاع آزاد وجود خواهد داشت.

۴-۳- تقسیم‌بندی سدها به لحاظ اهمیت مطالعات شکست سد و عوامل موثر در آن

سدها بسته به میزان خسارتی که به واسطه شکست آنها به پایین‌دست وارد می‌گردد و میزان تاثیرپذیری اراضی پایاب سد از این واقعه دارای اهمیت متفاوت می‌باشند. همچنین میزان و کیفیت آب رها شده از سد نیز از دیگر عوامل تعیین اهمیت سد به لحاظ مطالعات شکست سد است. پارامترهایی نظیر نوع، ارتفاع و عمر سد در کنار مسایلی مانند کیفیت انجام مطالعات و نحوه ساخت، نگهداری و بهره‌برداری از عوامل موثر در شکست سد می‌باشند که در این بخش به آنها اشاره شده است.

۴-۳-۱- خسارت پایین‌دست

یکی از عوامل تعیین کننده در ضرورت انجام مطالعات شکست سد، خطر پایین‌دست آن یا به عبارتی پتانسیل خسارت مالی و جانی اراضی پایین‌دست در اثر سیلاب ناشی از شکست سد می‌باشد که بستگی به وضعیت و کاربری اراضی پایین‌دست آن دارد. در دستورالعمل ایمنی سد ارائه شده توسط ایالات متحده آمریکا، طبقه‌بندی خسارت پایین‌دست سد به شرح جدول (۴-۱) ارائه شده است.

جدول ۴-۱- طبقه‌بندی خسارت پایین‌دست سد ارائه شده توسط ایالات متحده آمریکا

پتانسیل خسارت پایین‌دست	طبقه‌بندی خسارت پایین‌دست	جمعیت در معرض خطر (نفر)	خسارت اقتصادی	خسارت زیست‌محیطی
کم	۳	۰	حداقل، عدم وجود ابنیه، توسعه محدود کشاورزی	عدم وجود مواد زیان‌آور در آب
قابل توجه	۲	۱ تا ۶	محسوس، وجود ۱ تا ۲ ابنیه، کشاورزی قابل توجه، وجود بزرگراه‌ها و یا خطوط آهن درجه ۲	تغییرات محدود کیفیت آب از مخزن
زیاد	C ۱	۷ تا ۳۰	زیاد، وجود ۳ تا ۱۰ ابنیه، ناحیه کم جمعیت حومه شهر با چند کارخانه و کارگاه، وجود بزرگراه‌ها و خطوط اصلی راه‌آهن	پتانسیل تغییرات شدید کیفیت آب از مخزن با تاثیر درازمدت روی موجودات
زیاد	B ۱	۳۱ تا ۳۰۰	خیلی زیاد، وجود ۱۱ تا ۱۰۰ ابنیه، ناحیه برون شهری یا شهری با چهره صنعتی	
زیاد	A ۱	بیش‌تر از ۳۰۰	خیلی زیاد، وجود بیش از ۱۰۰ ابنیه، منطقه پرجمعیت و پیشرفته شهری یا برون شهری	

در این جدول پتانسیل خسارت جانی، مالی و اقتصادی و خسارت زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. منظور از پتانسیل خسارت جانی، تعداد افرادی است که به واسطه شکست سد در معرض خطر قرار می‌گیرند و به تعداد افراد بستگی دارد که در صورت

احتمال شکست سد می‌باید اراضی پایین‌دست را تخلیه کنند. خسارت مالی و اقتصادی شامل خسارت وارد به ساختمان‌های مسکونی، تجاری، تولیدی، اراضی کشاورزی، باغ‌ها، دام، راه‌های ارتباطی و بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن و خدمات رفاهی عمومی دائم یا موقت می‌باشد.

ایجاد تاثیرات نامطلوب بر روی کیفیت آب بر اثر آب رها شده از مخزن در نتیجه شکست سد در زمره خسارت زیست‌محیطی محسوب می‌گردد. در صورتی که مخزن حاوی موادی باشد که مصرف آب آن برای سلامتی و حیات انسان یا آبزیان و به‌طور کلی محیط زیست زیان‌آور باشد، پتانسیل خسارت زیست‌محیطی افزایش می‌یابد. این مورد معمولاً در اثر شکست سدهای رسوبگیر معادن، لاگون‌های فاضلاب‌های کشاورزی، خانگی و یا صنعتی رخ می‌دهد.

در تعیین رده‌بندی خسارت می‌باید توسعه آینده پایین‌دست را نیز بررسی و در مطالعات مد نظر قرار داد. این امر می‌تواند به افزایش احتمالی رده‌بندی در آینده منجر گردد.

در رهنمود ایمنی سد کشور نیوزیلند، سیستمی بر اساس پتانسیل اثر شکست سد^۱ برای طبقه‌بندی سدها ارائه شده است. عوامل بسیاری از جمله ارتفاع سد، حجم ذخیره، ماهیت مواد ذخیره شده در مخزن سد و شکل و مشخصات دره پایین‌دست بر روی پتانسیل اثر شکست سد تاثیر می‌گذارند. این طبقه‌بندی براساس خسارت افزایشی^۲ در اثر شکست سد تعیین شده است. خسارت افزایشی خسارت اضافی هستند که در اثر همان حادثه طبیعی در صورتی که سد نشکند رخ می‌دهد. گروه‌بندی سدها بر این اساس به شرح جدول (۲-۴) ارائه شده است.

جدول ۲-۴- طبقه‌بندی پتانسیل اثر شکست سد بر اساس رهنمود ایمنی سد کشور نیوزیلند

زیاد	تلفات دارد	خسارت فاجعه برانگیز
متوسط	کمی امکان‌پذیر است	خسارت عمده
کم	قابل انتظار نیست	خسارت محدود
خیلی کم	ندارد	خسارت حداقل

بر طبق این دستورالعمل، سدهایی با عمق مخزن کم‌تر از ۳ متر را که حجم آب مخزن آنها از ۲۰,۰۰۰ مترمکعب تجاوز نمی‌کند، می‌توان در رده سدهای با پتانسیل اثر بسیار کم قرار داد. ارتفاع سد در این حالت معمولاً کم‌تر از ۴ متر است. سدهایی با ارتفاع کم‌تر از ۱۰ متر و یا کم‌تر از ۶ متر ولی با حجم مخزن کم‌تر از ۵۰,۰۰۰ مترمکعب در رده سدهای با پتانسیل کم قرار می‌گیرند.

سدهای با پتانسیل متوسط، شامل سدهایی با ارتفاع در حدود ۱۰ تا ۲۰ متر می‌باشد، به‌شرطی که حجم مخزن آنها از یک میلیون مترمکعب تجاوز ننماید. در غیر این صورت ارتفاع آنها محدود به ۱۵ متر می‌گردد.

در صورتی که ارتفاع و حجم مخزن سد از موارد بالا بیش‌تر باشد، سد در رده پتانسیل بالا قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که عوامل ارتفاع و حجم مخزن تنها به عنوان شاخص‌های اولیه در تخمین پتانسیل اثر سد قابل استفاده می‌باشند و نباید صرفاً براساس آنها طبقه‌بندی سد را انجام داد. در برخی از موارد تقسیم‌بندی به لحاظ ارتفاع و حجم سد با شرایط ذکر شده در طبقه‌بندی پتانسیل اثر سد همخوانی نداشته و باید مورد بازنگری قرار گیرد. مثلاً سدی با ارتفاع ۱۰ تا ۱۵ متر که شکست آن تلفات بی‌شماری را به‌جای

خواهد گذاشت باید در رده پتانسیل بالا قرار گیرد یا به صورت مشابه سدی با ارتفاع ۲۵ متر را که شکست آن هیچ گونه تلفاتی در بر نداشته و خسارت محدودی را نیز به همراه دارد، می توان در رده پتانسیل کم دسته بندی نمود.

طبقه بندی پتانسیل اثر یک سد در طول عمر آن ممکن است به دلیل تغییرات طبیعی یا تغییر کاربری اراضی دره پایین دست یا اراضی بالادست آن تغییر نماید.

۴-۳-۲- خصوصیات و ماهیت مواد ذخیره شده پشت سد

هزاران سد رسوبگیر در جهان میلیاردها تن پساب صنعتی عملیات معدن کاری را در مخزن خود ذخیره می کنند وقوع چندین مورد شکست در سدهای رسوبگیر توجه کارشناسان بین المللی را به ضرورت افزایش حاشیه ایمن این سدها معطوف نموده و انگیزه های جهت ارائه راهکارهای ارزشمند در زمینه های گوناگون مرتبط با این موضوع گردیده است.

سدهای رسوبگیر به منظور ذخیره پساب و رسوبات حاصل از عملیات معدن کاری ساخته می شوند. این سدها در عین تشابهات و مشترکات زیاد، تفاوت هایی نیز در طراحی، اجرا و بهره برداری با سدهای مخزنی دارند. نمونه ای از این تفاوت ها، ساخته شدن تدریجی این سدها، هم زمان با بهره برداری و همچنین ملاحظات ناشی از آن در طراحی و بهره برداری است. علاوه بر این، از آنجایی که معمولاً هدف از ساخت این سدها ذخیره آب نیست، بنابراین در طرح و بهره برداری حتی المقدور از جمع شدن آب در مخزن به میزان بیش از حد مورد نیاز جهت ته نشین سازی رسوبات جلوگیری به عمل می آید.

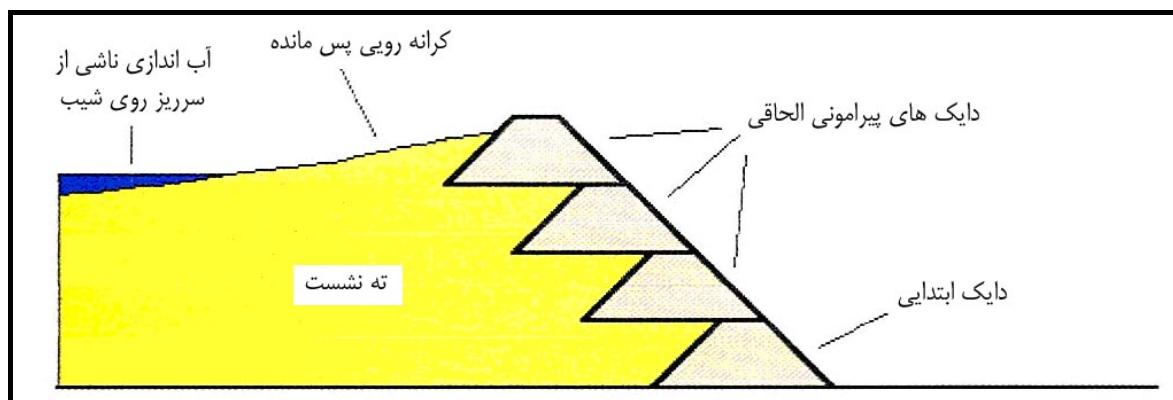
سدهای رسوبگیر مقادیر قابل ملاحظه ای گل و لای و آب را که غالباً سمی و آلوده هستند در مخزن خود جای می دهند، بنابراین عواقب خرابی یا عدم عملکرد مناسب آنها فاجعه به شمار می آید و از این روی، اعمال تمهیدات ویژه در طراحی و ساخت آنها ضروری است.

سدهای رسوبگیر به دو صورت کلی ساخته می شوند:

– سدهای مخزنی

– سدهای ترفیع شونده

سدهای ترفیع شونده به سه روش اجرای بالادست، پایین دست یا محوری ساخته می شوند. روش ساخت اغلب سدهای رسوبگیر در جهان سد ترفیع شونده از بالادست است. این روش در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- ساخت سدهای رسوبگیر به روش اجرای بالادست

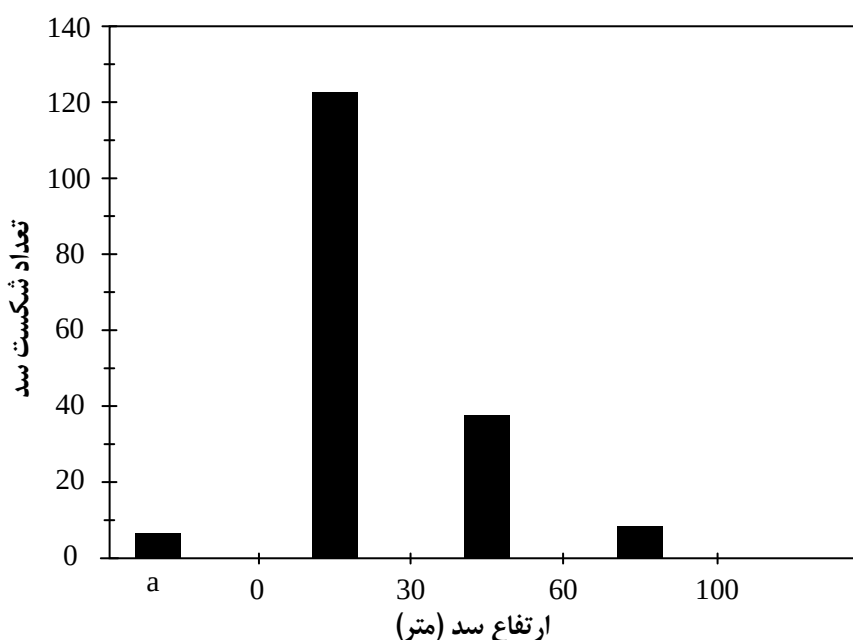
در این روش، ابتدا یک خاکریز موسوم به سد پایه^۱ ساخته شده و سپس رسوبات روی آن جریان داده می‌شوند تا ساحلی از رسوبات تشکیل گردد. این ساحل به‌عنوان پی یا بستر خاکریز بعدی عمل می‌کند. سدهایی که به این روش ساخته می‌شوند، بسیار اقتصادی بوده و به جهت بهره‌برداری ساده و سریع از این سدها از هزینه کمی برخوردار می‌باشند. ولی به علت عدم امکان پذیر بودن عملیات تراکم مکانیکی، این نوع سدها در مقابل زلزله بسیار حساس بوده و از پتانسیل روانگرایی نسبتاً بالایی نیز برخوردار هستند.

۴-۳-۳- سدهای چندگانه

گاهی اوقات دو یا چند سد بر روی یک رودخانه ساخته می‌شوند، به‌گونه‌ای که شکست سد واقع در بالادست ممکن است بر روی پایداری سد پایین دست تاثیرگذار باشد. در صورتی که شکست سد بالادست باعث شکست سد پایین دست گردد، خطرات و خسارت سد بالادست می‌باید مساوی یا بزرگ‌تر از سدهای پایین دست در نظر گرفته شود.

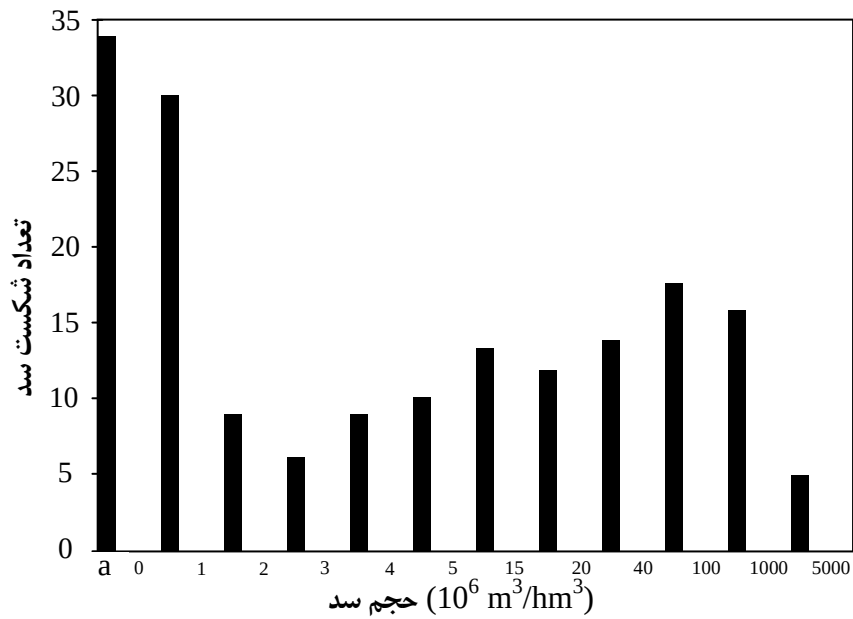
۴-۳-۴- ارتفاع سد و ظرفیت مخزن

به‌صورت مطلق می‌توان گفت که اغلب موارد شکست مربوط به سدهای کوچک می‌باشد، که البته بیش‌ترین تعداد را در میان سدهای موجود دارند. در نمودارهای (۱-۴) و (۲-۴) تغییرات تعداد شکست سد نسبت به ارتفاع و ظرفیت مخزن ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین شکست در مورد سدهای با ارتفاع متوسط اتفاق افتاده است. تقریباً در ۷۰ درصد از کل شکست‌هایی که در آنها ارتفاع سد گزارش گردیده است، سد کم‌تر از ۳۰ متر ارتفاع داشته است. سدهای کم‌تر از ۱۵ متر فقط در صورتی که حجم مخزن آنها بیش از یک میلیون مترمکعب بوده در آمار در نظر گرفته شده است.



ارتفاع گزارش نشده است (a)

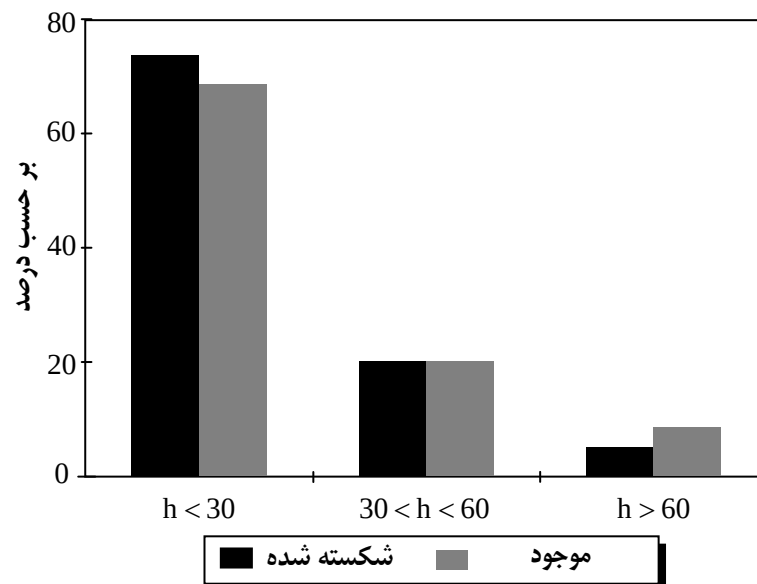
نمودار ۱-۴- تغییرات تعداد شکست سد نسبت به ارتفاع



(a) حجم گزارش نشده است

نمودار ۲-۴- تغییرات تعداد شکست سد نسبت به ظرفیت مخزن

همچنین مقایسه نسبت‌های تعداد شکست سد با ارتفاع h به تعداد کل شکست سد و همچنین تعداد کل سدهای موجود که در نمودار (۳-۴) ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که فراوانی تعداد حوادث ناشی از شکست سد با تغییرات ارتفاع به میزان کمی تغییر می‌کند.



نمودار ۳-۴- مقایسه نسبت تعداد شکست سد با ارتفاع h به تعداد کل شکست سد و نسبت تعداد کل سدهای موجود با ارتفاع h به تعداد کل سدهای موجود

۴-۳-۵- نوع سد

سدها را می‌توان در سه گروه کلی بتنی، خاکی و مصالح بنایی طبقه‌بندی کرد. سدهای بتنی شامل سدهای وزنی، پشت‌بنددار، تک‌قوسی و چندقوسی می‌باشند. سدهای خاکی نیز به دو گروه عمده خاکی و سنگریزه‌ای تقسیم می‌شوند. سدهای با مصالح بنایی را می‌توان به صورت وزنی، پشت‌بنددار و یا قوسی اجرا نمود. نمودار (۴-۴) تغییرات فراوانی تعداد شکست سد را در سه محدوده ارتفاعی برای انواع سدهای مذکور نشان می‌دهد. در این نمودار علامات اختصاری نیز جهت معرفی انواع سدها به کار رفته است.

PG: بتنی وزنی

CB: بتنی پشت‌بنددار

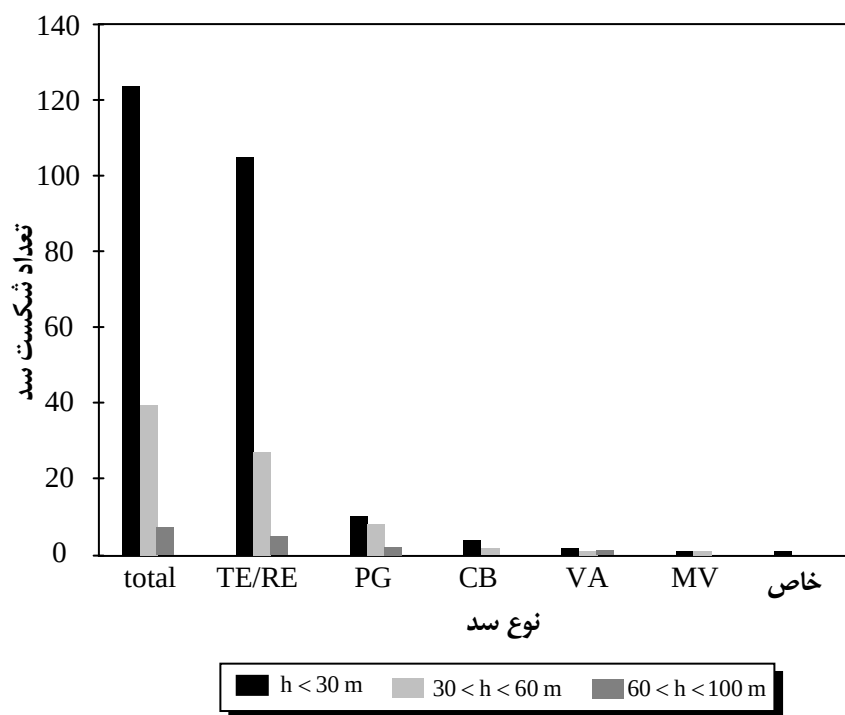
VA: بتنی قوسی

MV: بتنی چندقوسی

TE: خاکی

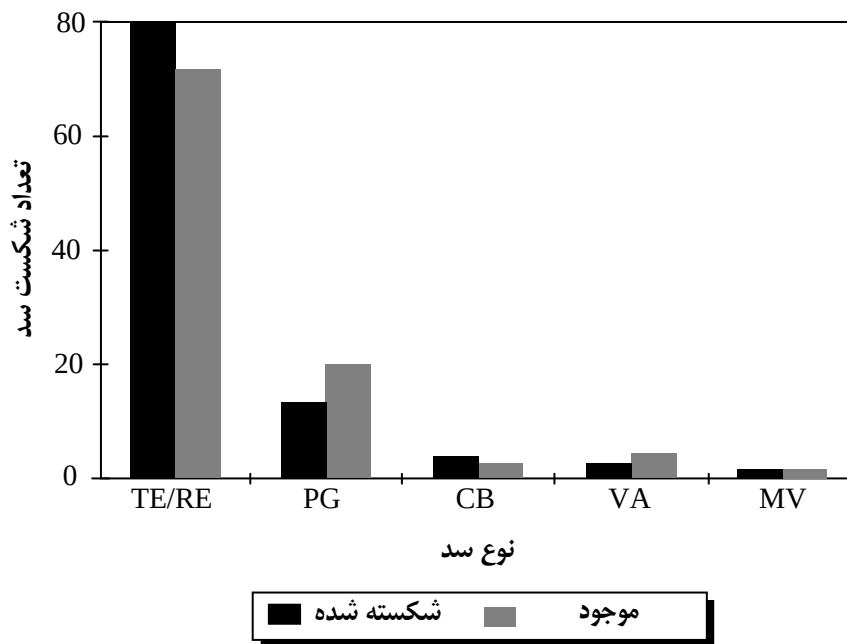
RE: سنگریزه‌ای

M: مصالح بنایی



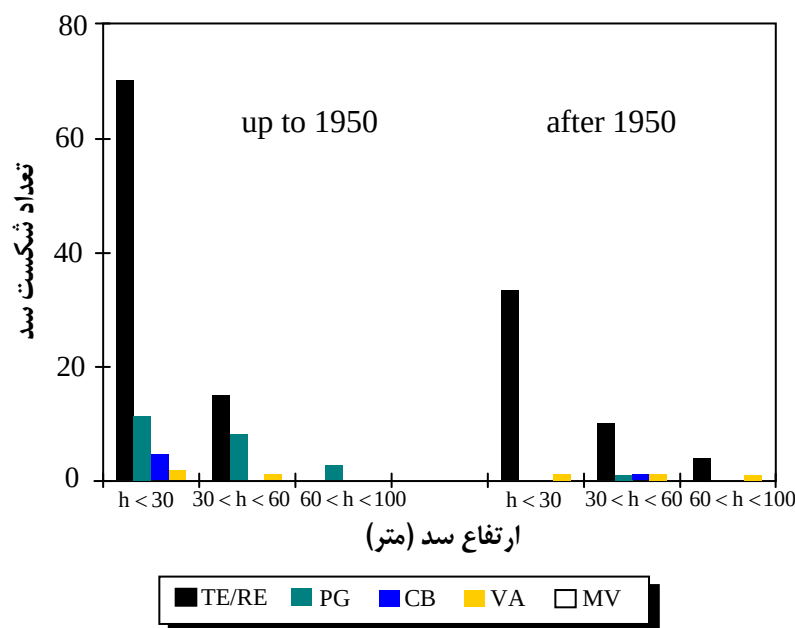
نمودار ۴-۴- تعداد شکست سد نسبت به ارتفاع و نوع سد

همان‌گونه که در نمودار (۴-۴) نشان داده شده است، اغلب شکست‌ها در سدهای خاکی اتفاق افتاده است، ولی با توجه به نمودار (۴-۵) می‌توان دریافت که نسبت تعداد شکست سد از نوع TE به کل تعداد شکست تقریباً شبیه به نسبت تعداد کل سد از نوع TE به تعداد کل سدهای موجود برای هر نوع سدی می‌باشد.



نمودار ۴-۵- مقایسه نسبت تعداد شکست سد از نوع TE به کل تعداد شکست و نسبت تعداد کل سد از نوع TE به تعداد کل سدهای موجود

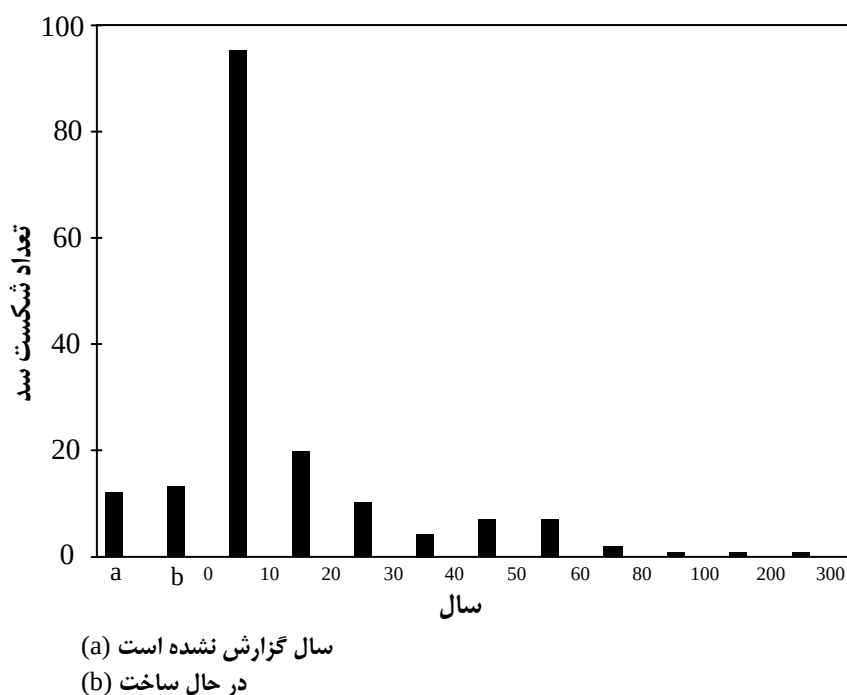
نمودار (۴-۶) تعداد شکست سد را در مقابل نوع و ارتفاع سد برای دو دوره زمانی ساخت نشان می‌دهد. این نمودار دارای یک روند کاهشی از دوره زمانی ساخت مربوط به قبل از سال ۱۹۵۰ نسبت به دوره زمانی ساخت بعد از این سال می‌باشد. اگرچه تعداد سدهای ساخته شده از سال ۱۹۵۰ بسیار بیش‌تر از تعداد کل سدهای ساخته شده تا قبل از این زمان می‌باشد (۱۲۱۳۸ درمقابل ۵۲۶۸).



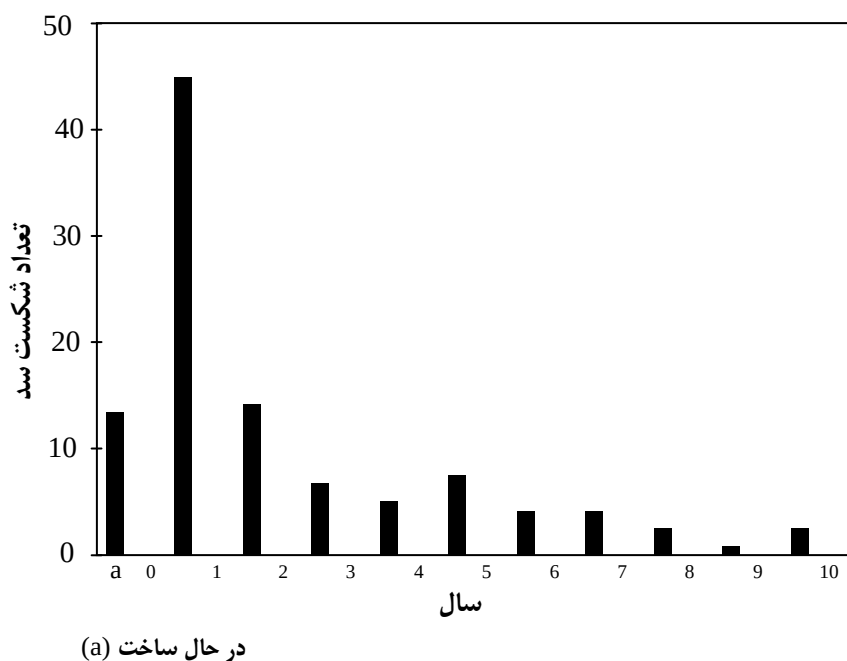
نمودار ۴-۶- تعداد شکست سد در مقابل نوع و ارتفاع سد و زمان ساخت

۴-۳-۶- عمر سد

تعداد زیادی از موارد شکست در سدهای خیلی جوان اتفاق افتاده است. نمودار (۴-۷) تفاوت قابل توجه تعداد شکست را در سدهای با عمر زیر ۱۰ سال نسبت به دیگر سدها نشان می‌دهد. در نمودار (۴-۸) جزییات بیش‌تری درخصوص تعداد شکست سد در دوره ۱۰ سال اول عمر سد ارائه شده است و همانگونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین فراوانی متعلق به سدهای با عمر کم‌تر از یک سال می‌باشد.



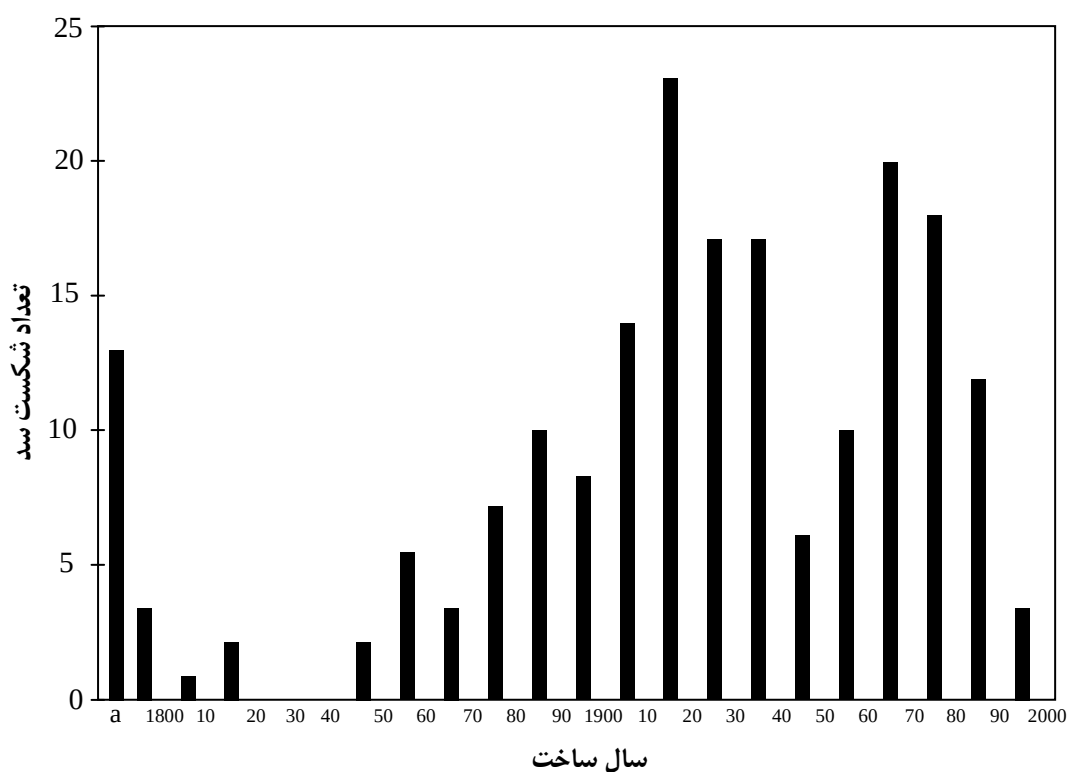
نمودار ۴-۷- تعداد شکست در مقایسه با عمر سد



نمودار ۴-۸- تعداد شکست در مقایسه با عمر سد (عمر کم‌تر از یک سال)

۴-۳-۷- زمان ساخت

بیشترین تعداد شکست سد در دهه‌های ۱۹۲۰ - ۱۹۱۰ و ۱۹۷۰ - ۱۹۶۰ اتفاق افتاده است که این روند در نمودار (۴-۹) مشاهده می‌شود. به گزارش دفتر ثبت جهانی سدها^۱، مجموعاً ۵۶۲۸ سد تا سال ۱۹۵۰ ساخته شده است که تعداد ۱۱۷ سد دچار شکست شده‌اند. در فاصله سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۸۶، ۱۲۱۳۸ سد ساخته شده که شکست سد در ۵۹ عدد از آنها رخ داده است (این آمار بدون احتساب کشور چین می‌باشد). بنابراین ۲/۲ درصد (۱۱۷ سد از ۵۶۲۸) از سدها تا سال ۱۹۵۰ دچار شکست شده‌اند و در مقابل درصد شکست سدهای ساخته شده در دوره زمانی ۱۹۸۶ - ۱۹۵۱ در حدود ۰/۵ درصد (۵۹ سد از ۱۲۱۳۸) می‌باشد. نکته قابل ذکر این است که ۸۰ درصد از شکست سدهای ساخته شده تا سال ۱۹۵۰ در ارتباط با سدهایی بوده است که کمتر از ۳۶ سال عمر داشته‌اند و ۵۰ درصد آنها سدهایی بوده‌اند که عمر آنها کمتر از ۴ سال بوده است.



نمودار ۴-۹- تعداد شکست در مقایسه با سال ساخت

۴-۳-۸- سایر عوامل

- علاوه بر موارد ذکر شده، با مرور موارد شکست سد می‌توان عوامل زیر را نیز در وقوع این امر موثر دانست:
- وجود ضعف در طراحی اولیه و مطالعات زمین‌شناسی شامل ارزیابی وضعیت پی، منابع قرضه و خاکریز
 - عدم رعایت استانداردهای طراحی و یا عدم توجه به برخی شرایط خاص یا غیرمعمول مانند شرایط خاص زمین‌شناسی منطقه در کاربرد استانداردهای طراحی
 - طراحی نامناسب فونداسیون و پی سد.

- مطالعات و بررسی‌ها نشان داده است که قرارگیری سد بر روی سنگی با درز و شکاف زیاد و وزن مخصوص پایین به سبب پتانسیل بالای آنها در فرسایش و نشست حتی در صورت طرح و اجرای یک سیستم پرده آب‌بند و پرده تزریق وسیع و گسترده، می‌تواند احتمال شکست سد را افزایش دهد. در طراحی و ساخت سدهای خاکی انتخاب مصالح مناسب که در مقابل پدیده رگاب مقاوم بوده و به حد تراکم مورد نیاز در رطوبت بهینه مورد نظر متراکم گردند، ضروری است.
- عدم رعایت اصول فنی ارائه شده در طراحی در زمان ساخت
- فرسایش داخلی که در سدهای خاکی به صورت پدیده رگاب و در نتیجه اختلاف فشار زیاد بین بالادست و پایین‌دست سازه اتفاق می‌افتد.
- شکست در اثر این پدیده از محل خروج تراوش آغاز می‌گردد و به طرف مرز بالادست پیش‌روی می‌کند. بده فزاینده تراوش و سرعت جریان باعث افزایش سرعت فرسایش مصالح فونداسیون و بدنه سد و در نهایت به شکست سد منجر می‌گردد. یکی از دلایل عمده شکست در این زمینه فقدان فیلتر محافظ مناسب است.
- فرسایش داخلی خاکریز سد می‌تواند باعث از دست رفتن انسجام هسته سد و در نهایت شکست آن گردد. فرآیند رگاب را به عبارت ساده می‌توان حرکت آزادانه ذرات ریزخاک از یک لایه تحت تاثیر نیروی تراوش از میان حفرات موجود در خاک درشت‌دانه‌تر لایه مجاور عنوان نمود. این امر به واسطه ناهمگونی زیاد ذرات خاک در لایه مجاور اتفاق می‌افتد. این فرآیند از فصل مشترک بین فیلتر و سنگریز متراکم شده آغاز می‌شود. از بین رفتن فیلتر باعث می‌شود که هسته پوشش محافظ خود را از دست داده و به همین سبب دچار خوردگی می‌شود. توسعه این پدیده باعث به‌وجود آمدن مجاری متعددی در هسته گردیده که نهایتاً منجر به هدایت آب از میان خاکریز سد خواهد شد و نتیجه آن به صورت یک حفره روی شیب بالادست آشکار خواهد شد.
- ضعف در اجرای طرح پرده تزریق و آب‌بند سد یا عدم آب‌بندی مناسب که سبب نشست می‌گردد. در صورت اجرای پرده آب‌بند می‌باید از یکپارچگی آن اطمینان حاصل نمود. همچنین می‌باید آب‌بندی مناسبی را تا سنگ بستر تامین نمود.
- نشست سامانه زهکشی
- فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای و وجود گسل فعال در نزدیکی سد
- زمین لغزش
- فرسایش‌پذیری مصالح خاکریز سدها در سدهای خاکی.
- در هنگام روگذری بلافاصله بعد از رسیدن به یک بده و عمق روگذری بحرانی، فرسایش شیب پایین‌دست آغاز می‌گردد. این مقادیر بحرانی به تندی شیب و پوشش آن (گیاه، سنگ، ریپرپ و ...) و عواملی نظیر وزن و تراکم مصالح بستگی دارد. پس‌زدگی آب در پایین‌دست تاثیر به‌سزایی در کاهش این فرسایش دارد.
- مقاومت یخ‌زدگی و قابلیت نفوذپذیری و عمر بتن در سدهای بتنی
- رس‌های واگرا
- تراکم مصالح خاکریز بدنه سدهای خاکی
- فشار برخاست در سدهای بتنی
- تغییر شکل و نشست زمین
- تراوش

- نشت مخزن
- بارش شدید و غیرقابل پیش‌بینی
- یکی از امکان‌پذیرترین مکانیزم‌ها، افزایش نشست سد تحت وزن سازه و آب می‌باشد که سبب شکست می‌شود این امر در سدهای خاکی تاثیر کم‌تری دارد، چرا که سدهای خاکی نسبت به جابه‌جایی و نشست‌هایی جزئی انعطاف‌پذیرتر می‌باشند.
- بروز پدیده قوس‌زدگی^۱ به سبب هندسه سدهای خاکی که باعث افزایش تنش‌ها در یک قسمت و کاهش آن در قسمت‌های دیگر می‌گردد. این امر به توسعه شکاف‌ها کمک نموده و باعث ایجاد مجرای جریان از میان مناطق فرسایش‌پذیر می‌گردد.
- شکست هیدرولیکی
- عدم رعایت نرخ پر شدن مخزن سد در آبیگیری اولیه
- عملکرد نامناسب سازه‌های جنبی.
- در این زمینه شایع‌ترین عامل کافی نبودن ظرفیت سرریز می‌باشد که سبب روگذری می‌گردد. این امر یکی از مهم‌ترین دلایل شکست سدهای خاکی به‌شمار می‌رود.
- افتتاح و آبیگیری سد قبل از اتمام عملیات ساختمانی تمامی سازه‌های سد.
- به عنوان مثال در صورتی که مجاری خروجی سد تکمیل و بهره‌برداری نشده باشند، در صورت بروز مشکل در زمان اولین آبیگیری، هیچ راهی جهت تخلیه مخزن و کاهش بار و فشار آب وارده برسد وجود نخواهد داشت.
- عدم جانمایی تجهیزات ابزار دقیق کافی و مناسب جهت اندازه‌گیری تغییرات احتمالی در شرایط بدنه و تکیه‌گاه‌ها.
- مدیریت ضعیف در بهره‌برداری و نگهداری

۴-۴- اثر مطالعات شکست سد بر طراحی، بهره‌برداری، تنظیم و ایمنی عمومی سد

از شکست سد به عنوان یک مصیبت و فاجعه نام برده می‌شود که باعث وارد آوردن خسارت و خرابی‌های فراوان و بروز مشکلات ناگهانی و جدی می‌گردد. به همین سبب آن‌را در رده حوادثی نظیر زمین‌لرزه و طوفان طبقه‌بندی می‌کنند. تا کنون در حدود ۲۰۰ حادثه قابل توجه شکست سد در دنیا به‌وقوع پیوسته که بیش از ۸۰۰۰ نفر کشته بر جای گذاشته است. این آمار و ارقام و نتایج حاصل از شکست چندین سد در نقاط مختلف جهان باعث تقویت اهمیت‌بخشی به مطالعات ایمن‌سازی سدها شده است. اهمیت این موضوع با افزایش جمعیت و بالطبع تعداد ساکنین پایین‌دست سدها و همچنین توسعه فعالیت‌های اقتصادی در اراضی پایاب سدها از رتبه بالاتری برخوردار می‌گردد. در برخی از موارد ایمن‌سازی، ایجاد تغییراتی در وضعیت سد را ایجاب می‌نماید. به‌گونه‌ای که در بعضی از موارد لزوم به جابه‌جایی سد یا متوقف کردن بهره‌برداری یا در نهایت تخریب سد در جایگاه فعلی آن می‌باشد.

با روند افزایش اطلاعات عمومی در مورد اهمیت شکست سد، اهمیت بیش تر برنامه فعالیت های اضطراری مطرح می گردد. از آنجایی که پروسه شکست سد در ظرف مدت چند ساعت یا چند دقیقه اتفاق می افتد، وجود یک برنامه تفصیلی و دقیق در این زمینه بسیار ضروری است. براساس این برنامه، مالکین سدها و مقامات محلی باید به محض مشاهده نشانه هایی از ظهور شکست سد، عملیات خود را به صورت موثر و با سرعت انجام دهند. شناسایی سریع و اولیه موقعیت های خطر آفرین، موجب در اختیار داشتن فرصت بیش تری جهت اعلام خطر و تخلیه ساکنین پایین دست سد گردیده و امکان جلوگیری یا به تاخیر انداختن شکست سد را فراهم می آورد.

بر طبق قوانین ایالت اوهایو^۱ ایالات متحده، مالکین سد در برابر بهره برداری و نگهداری سد بدون ایجاد هرگونه خطر به لحاظ جانی، مالی و سلامت افراد مسوول می باشند. به بیان دیگر مالکین سدها به صورت قانونی مجبور به تامین شرایط ایمن سد می باشند. در این راستا لزوم انجام برخی فعالیت ها نظیر تعمیرات و اندازه گیری های دوره ای^۲ باید در دستور کار آنها قرار گیرد که در حد لازم جهت رفع نیازها و تامین شرایط مناسب انجام پذیرد.

همچنین رییس بخش آب در ایالات متحده^۳، دارای قدرت و صلاحیت ملزم نمودن مالک سد به انجام تعمیرات و دیگر تسهیلاتی است که در حفاظت از جان، سلامت و اموال مردم مناسب و لازم تشخیص داده می شود. در برخی از این تسهیلات نیاز به ارائه خدمات از طرف مهندسين مجرب جهت اطمینان از حصول صحت انجام امور می باشد.

1- Ohio

2- Monitoring

3-Chief of Division of water

منابع و مراجع

- 1- "Dam Break Flood Analysis", review and recommendations, Bulletin 111, International Committee on Large Dams (ICOLD).
- 2- "New Zealand Dam Safety Guidelines", The New Zealand Society on Large Dams (NZSOLD).
- 3- "Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification", Technical Note No.1, Dam Safety Guidelines, Water Resources Program, Dam Safety Office, Washington State Department of Ecology.
- 4- "Comments and Recommendations for Notice of Proposed Rulemaking Regarding the Emergency Alert System", NATIONAL WEATHER SERVICE. EB Docket No. 01-66, RM-9156, RM-9215, June, 2001.
- 5- "Loss of life caused by dam failure, the RESCDAM LOL Method and its application to Kyrksirvi dam in Seinjoki", Summary of the final report by PR Vesisuunnittelu Oy PR Water Consulting Ltd. Peter Reiter, M.Sc. Helsinki, 19.06.2001.
- 6- "Dam Risk Management at Downstream Valleys, The Portuguese NATO. Integrated Project", Almeida, A.B. RESCDAM Seminar, Seinjoki, 2000.
- 7- "Guidelines for Developing a Comprehensive Flood Warning Program", Flood Control District of Maricopa County 2801 West Durango Street, Phoenix, Arizona 85009, (602) 506-1501, January, 1997.
- 8- "Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis", Final Report June 1999-March 2001.

۹- آشنایی با منابع آب و پروژه‌های مهم آبی جمهوری خلق چین - معاونت امور آب وزارت نیرو

