

مروری بر آسیب‌ها و تجربیات حاصل از حوادث مهم در سدهای بتنی

محمدتقی احمدی^{۱*}، احسان ولدخانی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- mahmadi@modares.ac.ir

۲- e.valadkhani@modares.ac.ir

چکیده:

آسیب به سدهای بزرگ می‌تواند منجر به فاجعه گردد. برخی از سدهای بتنی بدون شناخت کافی از شرایط پی و بارهای محیطی و با فرضیات ناقص طراحی و اجرا شده‌اند. همچنین ضعف کششی و برشی بتن بدنه سد می‌تواند باعث ترک‌های بزرگ ترد و ناگهانی شود؛ لذا ترکیب این عوامل تهدیدی جدی برای ایمنی این سدها است. با وجود پیشرفت‌های علمی، احتمال خطا و عدم قطعیت در رفتار این سازه‌ها نفی نمی‌شود. از این رو، مطالعه رخدادها و گذشته برای ارزیابی ریسک و مدیریت سدهای بزرگ اهمیت دارد. با تحلیل سیستمی رفتار سدها، می‌توان شناخت بهتری از مجموعه سد-مخزن-پی به دست آورد و از وقوع حوادث مشابه جلوگیری کرد. این مطالعه به بررسی آسیب‌های تاریخی وارد شده به سدهای بزرگ بتنی و تحلیل عوامل مؤثر پرداخته و بر اساس آن می‌توان گفت اغلب حوادث در اثر ترکیب عوامل مختلف، به‌ویژه خطاهای انسانی در مراحل طراحی، اجرا یا بهره‌برداری و به‌خصوص هنگام اولین آگیری رخ داده است.

واژگان کلیدی:

سد بتنی، شکست سد، آسیب سازه‌ای، عامل آسیب، خطای انسانی، عدم قطعیت.

* محمدتقی احمدی، استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست — دانشگاه تربیت مدرس

ایمیل: mahmadi@modares.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

A Review of Damages and Lessons Learnt from Major Incidents in Concrete Dams

M.T. Ahmadi^١, E. Valadkhani^٢

١- Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

٢- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract:

Large dams are structures considered as national assets, and any incident involving them can be catastrophic in terms of loss of life, property, and social impact. Most large concrete dams have been gradually constructed over the past century. Some of these dams were built without sufficient understanding of the foundation and abutment conditions, without a proper grasp of load processes and probable environmental conditions in their design, or with incorrect assumptions about the behavior of materials and structural systems. Given that the weakness of unreinforced concrete used in the main body of dams under tensile and shear conditions leads to sudden and brittle cracks of large dimensions, a combination of various incidents can create a concerning scenario, either gradually or abruptly, posing a serious threat to the safety of the dam and reservoir system. Even modern knowledge and technology cannot entirely rule out the possibility of errors or unintended uncertainties in the behavior of these strategic structures. As a result, risk management practices, including the study of past events and minor and major incidents, have become crucial in the evaluation and assessment of large dam systems. Through systematic or case studies on the behavior and service life processes of these systems, there is hope for a deeper understanding of the dam-reservoir-foundation system's behavior, thereby enabling the prevention of similar incidents in the future. The objective of this study is to investigate the most significant historical damages sustained by large concrete dams and analyze the factors contributing to each incident and its various dimensions. In most cases of dam failure, it is impossible to attribute the damage to a single factor. Typically, major damage or failure in a concrete dam results from a combination of factors that interact with one another or form a chain of events leading to the primary failure. Overall, based on past incidents and research, it becomes clear that although factors such as overall foundation weakness, unforeseen mechanisms resulting from geological or geotechnical deficiencies within the foundation and abutment, issues arising from complex thermal loads, seepage, and unforeseen earthquake characteristics are recognized as the most common causes of severe incidents, in most cases, it is human error—stemming from a lack of sufficient knowledge about the system, ignorance of available knowledge, or non-technical managerial decisions—that enables these physical factors to take effect. Such errors during the design, construction, and operation phases provide the opportunity for the above-mentioned physical factors to exert their influence. Finally, it should be noted that most major incidents occur during the early years of the dam's life, particularly during the initial reservoir filling, underscoring the absolute necessity of a gradual, step-by-step approach and the strict enforcement of monitoring regulations during this critical period.

Keywords: Concrete dam, dam failure, structural damage, damage factor, human error, uncertainty.

۱- مقدمه

شکست سدهای بتنی می‌تواند علاوه بر ایجاد خسارت‌های مالی، منجر به فاجعه گردد و جان بسیاری از انسان‌ها را تهدید نماید. بر اساس بولتن ۹۹ کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۱ در سال ۲۰۱۹ حدود ۵۸۰۰۰ سد بزرگ در دنیا ثبت شده است. در حال حاضر بسیاری از سدهای موجود سال‌خورده هستند و طی عمر خود حوادث و شرایطی را تجربه کرده‌اند که موجب بجای ماندن و انباشتگی آسیب در آن‌ها شده است. بر اساس گزارش آژانس فدرال مدیریت بحران آمریکا^۲، تنها در این کشور بیش از ۱۵۰۰۰ سد وجود دارند که در صورت آسیب، تهدیدهای سنگین برای منطقه خود ایجاد خواهند کرد [۱]. نکته مهم آن که طراحی و ساخت این سدها بعضاً بر اساس فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر کم توجهی به تغییر رفتار مصالح بر اثر حضور آب در پی، نا یکنواختی مصالح در پی، عدم شناخت ویژگی‌های پنهان تکیه‌گاه‌ها و ناپیوستگی‌های آن، کم توجهی به تنش برجا در توده سنگ، ناچیز شمردن خزش و یا حرکت در تکیه‌گاه‌ها و تغییر مسیر بار ناشی از آن بوده است. در نتیجه عدم قطعیت‌های گوناگونی اعم از شناختی، تصادفی و یا بر اثر نقص مدل مفهومی بر عملکرد آن‌ها حاکم است. در مجموع وفق آمار کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ [۲]، سدهای قوسی ۰.۷ درصد، سدهای وزنی کمتر از ۰.۹ درصد، سدهای پشت‌بنددار حدود ۲.۳ درصد ولی سدهای چند قوسی بیش از همه یعنی ۳.۸ درصد (هر یک نسبت به تعداد موجود در گروه خودشان) دچار آسیب جدی شده‌اند. گرچه این آمار نسبت به آمار حوادث سدهای خاکی و سایر سازه‌ها به مراتب کوچک‌تر است؛ لیکن اهمیت سدهای بزرگ بتنی اقتضای آن دارد که ریسک‌ها کمینه شوند. این تجربیات همگی سبب می‌شود تا نیاز بیشتری برای شناخت رفتار سدهای سال‌خورده تحت بارهای محتمل حس گردد. برای دستیابی به چنین شناختی لازم است از تجربیات گذشته درس گرفته و از همکاری‌های گسترده ملی و بین‌المللی برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات و تجربیات درباره رفتار سدهای بتنی بهره گرفته شود، شاید موجب کاهش عدم قطعیت‌ها و افزایش قابلیت اطمینان و سطح ایمنی سدهای بتنی گردد.

از جمله عوامل اصلی وقوع آسیب‌های جدی به سازه سدهای بتنی می‌توان به ضعف کلی پی، کاستی‌های زمین‌شناسی، مشکلات ناشی از بارهای حرارتی، تراوش، زلزله و خطا در طراحی و یا خطا در ساخت اشاره نمود. در آمار کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ ضمن بررسی عملکرد سدهای بزرگ دو عامل اصلی برای شکست سدها دیده می‌شود؛ بیش از ۳۰ درصد موارد شکست‌ها ناشی از روگذری سیلاب از روی بدنه و مواردی با همین فراوانی نیز ناشی از نارسایی پی و یا مسائل زمین‌شناسی بوده است. روگذری عمدتاً در مورد سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای مطرح است، درحالی‌که مسئله نارسایی پی برای کلیه سدهای بزرگ موضوعیت دارد. البته عوامل دیگری نیز می‌توانند باعث بروز خرابی در سد بتنی گردند که از فراوانی و اهمیت کمتری نسبت به موارد اصلی برخوردارند؛ عواملی همچون بهره‌برداری نادرست، خوردگی یا زوال بتن و خسارت جنگی در این دسته قرار می‌گیرند. نکته مهم آنکه معمولاً بیش از یک عامل، اعم از اصلی و یا فرعی از این مجموعه‌ها در وقوع یک حادثه مهم نقش دارد. در شناخت این عوامل کارهای ارزنده‌ای تاکنون توسط افرادی نظیر لومباردی و دیگران صورت گرفته است؛ لذا در این سخن، تدوین نوینی با استناد به آخرین حوادث و مشاهدات سدهای بتنی مدنظر خواهد بود.

۲- عوامل آسیب‌های مهم به سدهای بتنی

در ادامه با استناد به مهم‌ترین حوادث رخ داده و با هدف شناخت گونه‌های آسیب سازه‌ای سدهای بتنی، نوع اثر و احیاناً نحوه ترمیم مؤثر در رفتار سد؛ ضمن اشاره به هر یک از عوامل اصلی مسبب حادثه، شرح و تحلیل لازم مطرح می‌گردد.

۲-۱- ضعف پی و کاستی‌های ژئوتکنیک

اساساً مهم‌ترین چالشی که در فرایند ساخت و بهره‌برداری یک سد بتنی و به‌خصوص سد بتنی قوسی وجود دارد؛ شناسایی کامل رفتار پی آن است. حوادث کوچک در سدها بسیار فراوان است، اگرچه موارد پر خطر آن در مجموع شاید به چند ده مورد نرسد، ولی تکرار پذیری آن ایجاب میکند که با هشیاری تجربه‌ها ی مثبت و منفی دیده شود. وقوع حوادث متعدد به دلیل وجود نقص در پی سدهای بتنی که باعث آسیب‌های کوچک و بزرگ و بعضاً جدی و یا حتی

^۲ Federal Emergency Management Agency(FEMA)

^۱ International Commission on Large Dams(ICOLD)

انهدام در سدهای بتنی شده است؛ نشان‌دهنده اهمیت بررسی‌های عمیق پی و تکیه‌گاه سد بتنی و یافتن هرگونه عامل مستعد برای ایجاد ناپایداری می‌باشد.

سد قوسی مالپاسه^۱ به ارتفاع ۶۶ متر و طول تاج ۲۳۳ متر در فرانسه و در سال ۱۹۵۹ ساخته و بهره‌برداری شده بود. این سد از نوع دو قوسی و بسیار نازک بود به گونه‌ای که ضخامت آن در تراز روی پی ۶.۸ متر و در تراز تاج تنها ۱.۵ متر بود. در جریان اولین آبیگری در سال ۱۹۵۹ این سد دچار لغزش در دیواره چپ شده و ترکی در رویه‌ی پایین‌دست سد در تراز نزدیک به پی ایجاد شد که مورد سنجش قرار نگرفت. به علاوه عدم توجه در حین طراحی به گسلی که در پایین‌دست سد قرار داشت مانع از شناخت سناریوی ناپایداری گوه بزرگ سمت چپ شده بود. از طرفی برای این سد هیچگونه پرده آب‌بند دیده نشده بود و لذا تراوش به راحتی راه خود را در پی و تکیه‌گاه‌ها گسترش می‌داد. در زمان حادثه افزایش بسیار سریع تراز آب مخزن ناشی از بارش شدید باران شکست سد را در پی داشت و این تنها چند هفته پس از شروع بهره‌برداری از پروژه بود. سیل حاصل از شکست سد شهر فرجوس^۲ در پایین دست سد را به کلی نابود کرد و جان حدود ۵۰۰ نفر را گرفت. دلیل وقوع آن ترک، شرایط خاص چیدمانی در سیستم درزه و ضعف در سنگ پی این سد بود. بخشی از پی سد از سنگ گنایس و دارای لایه‌هایی با مدول ضعیف؛ در حدود ۱۰ درصد مدول بتن بود. بنابراین سنگ پی جناح چپ، کلاً سنگی ضعیف محسوب می‌شد. بدنه‌ی این سد قوسی نازک بوده و با توجه به نرمی پی، تمرکز تنش شدیدی را در لایه‌ی نرم ایجاد می‌کرد. در تکیه‌گاه راست، فشار قوس‌ها در جهت عمود بر لایه‌ها بوده، از این رو تنش به خوبی می‌توانست توزیع گردد (شکل (۱)). اما در تکیه‌گاه چپ فشار قوس که تقریباً همه جا موازی با جهات لایه‌ها بود، نمی‌توانست به خوبی توزیع یابد، به همین دلیل تمرکز فشاری در این ناحیه به وجود آمده و توسعه کرنش فشاری متمرکز موجب کاهش شدید نفوذپذیری در لایه‌ای از توده سنگ با ضخامت ثابت گردید. این لایه تا صفحه‌ی گسلی با مقاومت برشی ناچیز در پایین دست ادامه داشت. عملکرد این ناحیه همانند یک پرده آب‌بند و البته بدون زهکشی، موجب توسعه فشار منفذی ناشی از هد هیدرواستاتیک

کامل مخزن پرگشت. توده مزبور تحت فشار عظیم مخزن تمایل به پرتاب شدن به بیرون داشته و از ناحیه سطح گسل پایین‌دست، لغزش کرده است. در نهایت بلوک زیر پی حدود ۱.۲ متر جابجا شده و با رها کردن بدنه، کل سد حول طره‌های سمت راست بدنه سد چرخیده و تحت فشار سیلاب مخزن از بلوک‌های سمت راست سد جدا گردید. وضعیت اتصال بدنه سد به تکیه‌گاه‌های چپ و راست این سد و موقعیت گسل پایین‌دست سد در شکل (۱) نشان داده شده است.

بحث: عوامل وقوع این حادثه عمدتاً ضعف پی (جنس و هندسه توده سنگ و نیز گسل با مقاومت برشی ناچیز) محسوب می‌شود لیکن عامل توقف یا کاهش موضعی تراوش و نیز عامل خطا در طراحی (عدم تامین پرده آب‌بند و عدم توجه به سناریوهای ناپایداری گوه‌های تکیه‌گاهی) نقش مهمی در وقوع فاجعه داشته‌اند. نمونه سد مالپاسه سناریوی پیچیده ترکیب چند عامل در انهدام یک سد بزرگ را بیان می‌دارد. این نوع مکانیزم‌های تهدید دارای بالاترین خطر برای پایداری سد بوده و در صورت خطا در زمان طراحی و عدم کشف موضوع قبل از اولین آبیگری‌ها، معمولاً چاره‌پذیر نیست.

سد قوسی ال‌آتازار^۳ به ارتفاع ۱۳۴ متر و طول تاج ۴۰۰ متر در اسپانیا در سال ۱۹۷۲ به بهره‌برداری کامل رسید. این سد از نوع دو قوسی و دارای پولوینو و درز محیطی با نسبت دهانه به ارتفاع حدود ۳ است. اهمیت این سد به دلیل تامین آب شهر مادرید است. مخزن سد از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۲ به تدریج آبیگری شد و رفتار غیرعادی سد از اواخر سال ۱۹۷۱ آغاز شد. از همان اوایل آبیگری، رفتارسنجی سد نشان دهنده تغییر مکان بیشتر جناح چپ سد نسبت به جناح راست آن بود. این مسئله به دلیل سخت‌تر بودن تکیه‌گاه سمت راست نسبت به تکیه‌گاه سمت چپ بود. بخشی از این سختی از تکیه‌گاه بتنی ساخته شده در زیر سمت راست سد ناشی می‌شد. اختلاف سختی و در نتیجه اختلاف میزان حرکت دو طرف سد نسبت به هم، باعث باز شدن برخی از درزهای قائم و نهایتاً ایجاد ترک افقی شدیدی در رویه بالادست سد و در تراز ۳۰ متر بالاتر از پی در سال ۱۹۷۷ شد. این ترک موجب نشت آب به درون زهکش‌های سد با دبی ۹۰ لیتر در ثانیه می‌شد. متعاقباً رشد این ترک و افزایش طول آن به

^۱ El Atazar

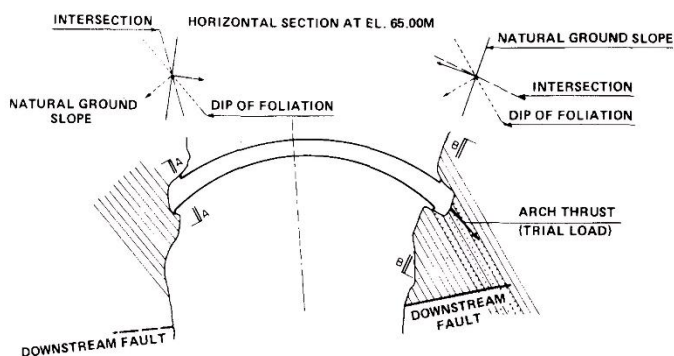
^۱ Malpasset

^۲ Frejus

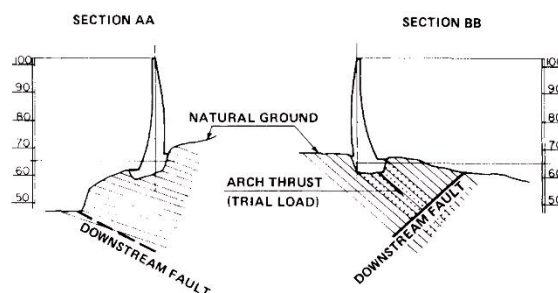
باز شدن درزهای انقباض ناشی از تفاوت شدید شکل پذیری تکیه‌گاهی در یک جناح از بدنه می‌تواند منجر به عقب‌نشینی تکیه‌گاه و در نتیجه تضعیف قابل‌ملاحظه عملکرد قوسی و نهایتاً تحمیل بار اضافی هیدرواستاتیک بر طره‌ها و ترک‌خوردگی آن‌ها در وجه سراب، و حوادث بعدی باشد. بعلاوه بار وزن نیمه بالایی طره‌ها که برآمدگی به سمت پایاب دارند، نیز موجب تشدید ترک‌خوردگی در نیمه بالایی بدنه شده‌است. باید توجه داشت که تحلیل بار وزن به روش توالی ساخت نیازمند اتکای بر عملکرد قوس‌هاست که در مورد این سد تضعیف شده بود.

این نیز مصداقی از کاستی‌های ژئوتکنیکی پی به‌عنوان عامل اصلی و ضعف اطلاعات طراحی به‌عنوان عامل ثانوی تلقی گردد.

میزان ۴۵ متر باعث نشت آب با دبی ۵۴۰ لیتر در ثانیه گشت. این ترک در سال ۱۹۷۹ با رزین خاص مورد تزریق قرار گرفت. این تزریق در حالی صورت گرفت که مخزن تخلیه نشده بود زیرا مخزن این سد محل تأمین آب شرب شهر مادرید بود. با این حال حرکت تکیه‌گاه ادامه یافت و منجر به شکست سنگ پی و در نتیجه افزایش شدید آب‌گذرانی در پی گردید. در سال ۱۹۸۳ تزریق پی برای تثبیت حرکت آن انجام شد. اما این تزریق نیز منجر به علاج بخشی قطعی نشد و رفتار پی در سال‌های بعد نیازمند تمهیدات اضافی نظیر تزریق آب‌بندی و تحکیمی گشت. نمای شماتیک ترک‌های روی سطح بالادست این سد در شکل (۲) نشان داده شده است [۳].



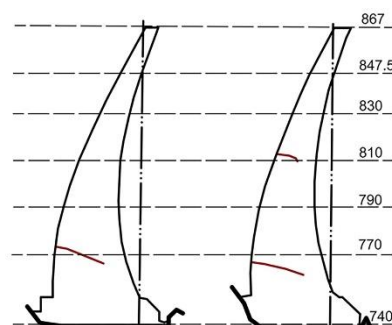
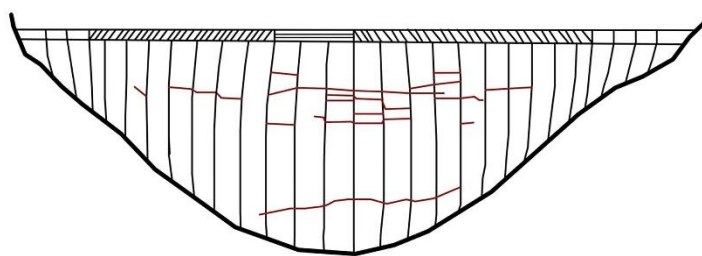
(ج)



(ب)

(الف)

شکل ۱: موقعیت قرارگیری تکیه‌گاه‌های سد مالپاست و گسل پایین‌دست آن: (الف) نمای مقطع (BB)، (ب) نمای مقطع (AA)، (ج) پلان سد [۴]



شکل ۲: نمای شماتیک ترک‌های روی سطح بالادست سد ال‌آتازار [۵]

۲-۲- بارهای حرارتی

تنش‌های ناشی از بار حرارتی در سدهای بتنی به دو دسته‌ی تنش‌های حرارتی در زمان ساخت سد (ناشی از فرایند هیدراته شدن سیمان) و تنش‌های حرارتی حین بهره‌برداری ناشی از حرارت محیطی تقسیم می‌شوند. ترک‌های ناشی از حرارت محیطی معمولاً سطحی هستند و قسمت‌های نازک‌تر بدنه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. معمولاً تفاوت دمای حاصل از هیدراسیون سیمان و دمای محیطی در سطح خارجی بتن (که سردتر است) موجب گرادیان دمایی می‌گردد که در حالت کنترل نشده موجب ترک‌های سطحی و حتی ترک‌های داخلی و عمیق می‌گردد؛ لذا قسمت‌های ضخیم سدها بیشتر تحت تأثیر تهدید حرارت هیدراسیون سیمان خواهد بود. ترک‌های حرارتی حاد اگر در سطح بالادست رخ دهند، با وجود سطحی بودن، به دلیل امکان نفوذ آب در آن و گسترش حاصله، باید به‌وسیله تزریق ترمیم شوند. اما اگر این ترک‌ها سطحی نباشند ممکن است باعث آسیب جدی به سد شوند. از جمله سدهای آسیب‌دیده به دلیل بارهای حرارتی می‌توان به سدهای پیدرا دل آگیلا^۱، کارون^۴، سد دانیل جانسون^۲ و باگلیهار^۳ اشاره کرد. که در این جا به دو مورد اشاره می‌گردد.

سد وزنی پیدرا دل آگیلا به ارتفاع ۱۸۰ متر و طول تاج ۸۰۰ متر در آرژانتین در سال ۱۹۹۲ به بهره‌برداری رسید. برای این سد وزنی تأمین سیستم پس‌سرمایش کافی که امکان تعادل دمایی مناسب را ظرف چند ماه فراهم می‌کند، منظور نشده بود؛ لذا بعد از مدتی دمای بتن ناشی از هیدراسیون درون بدنه ضخیم سد وزنی بصورت احتمالاً آدیاباتیک رشد کرده و گرادیان حرارتی شدیدی نسبت به دمای سطح بالادست ایجاد گشته است. همزمان تماس سطح بالادست بدنه با آب سرد مخزن که طبق برنامه ولی بدون توجه به اثر تشدید گرادیان حرارتی وارد مخزن شده بود، باعث رشد ترک‌های قائم موازی درزهای انقباض گشت. نشت آب از درون این ترک‌ها در برخی گالری‌ها به حدود ۳۰۰ لیتر در ثانیه می‌رسید. رفتار این سد ابتدا با حفر تعداد زیادی چاهک زهکش در رویه بالادست منطقه ترک‌خورده برای کاهش رشد ترک‌ها کنترل شد. عملیات تزریق رزین و آب‌بندی

ترک‌ها تنها پس از ۱۸ سال و در سال ۲۰۱۰ بعد از ایجاد تعادل بین دمای درون و بیرون بتن و رسیدن به حالت تقریباً پایدار حرارتی انجام گرفت. عملیات تزریق رزین با تکنولوژی پیشرفته‌ای به روش رودور^۴ و در حالت مخزن پر صورت گرفت.

احتمالاً مشابه همین اتفاق در سد کارون^۴ نیز رخ داده است. این سد قوسی که با ۲۳۰ متر ارتفاع از پی و طول تاج ۴۴۰ متر به‌عنوان بلندترین سد کشور در سال ۱۳۹۰ بهره‌برداری شد؛ بخاطر آبیگری بسیار سریع و زودهنگام و انتخاب فصل آبیگری نامناسب، ترک‌های حرارتی شدیدی را تجربه کرد و دو ترک قائم در بلوک‌های ۷ و ۹ نزدیک به تکیه‌گاه چپ، گسترش نزدیک به ۴۰ متری داشته و به‌صورت چند شاخه داخل بدنه امتداد یافته‌اند. جدا از پدیده فوق، ترک‌های مورب دیگری نیز در این سد رخ داده که در بخش بار تراوش مورد بحث قرار می‌گیرد (شکل (۳)).

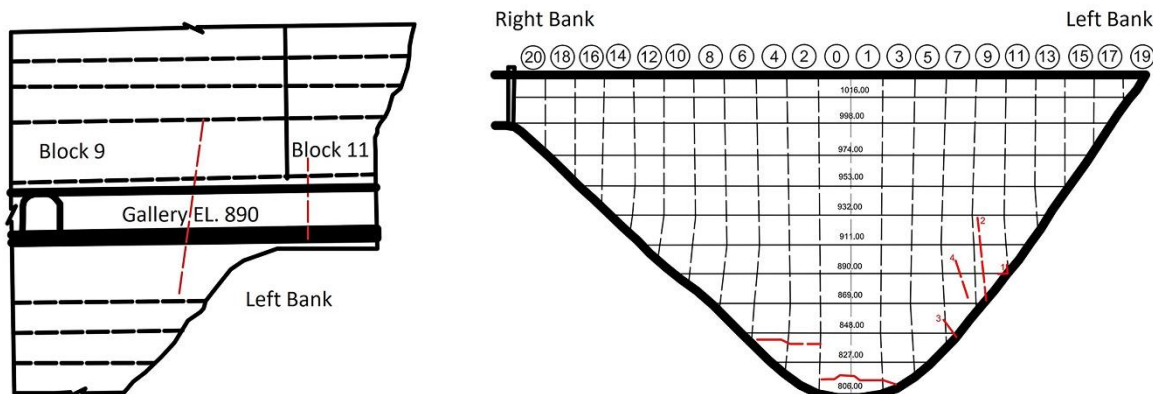
این ترک‌ها توسط شرکت‌های اسپانیایی و ایرانی در سال‌های ۹۲ و ۹۳ با تزریق گراوت سیمانی و نیز رزین تا حدودی ترمیم شد. مشکل دیگری که در سد کارون^۴ وجود داشت، عدم تزریق کافی درزهای قائم در نیمه بالای بدنه بود که موجب تغییر الگوی تغییر شکل بدنه و افزایش آن در قسمت بالایی طره‌ها شد. هنگام تزریق درزهای انقباض در محدوده‌ی ۳۰ متر بالایی سد، به علت بار هیدرواستاتیک امکان تزریق فراهم نبوده و برای محدوده‌ی ۹۰ متر پایین‌تر از آن نیز، تزریق تنها در یک مرحله صورت گرفته است و اجرای عملیات تزریق مرحله دوم نیز بعد از پر کردن عجولانه مخزن به علت بسته شدن جبری درزهای قائم ناشی از فشار مخزن ممکن نبوده است. از آنجایی که تزریق ناقص درزهای انقباض منجر به افزایش بار وارد بر طره‌ها می‌گردد؛ می‌تواند در شرایط بارهای غیرعادی تنش‌های ناخواسته متعددی را در بدنه سد موجب شود. بدین ترتیب آسیب‌های سد کارون^۴ می‌تواند مصداقی از تأثیر دو عامل اصلی یعنی بار حرارتی و خطاهای زمان ساخت تلقی گردد. گرچه نمی‌توان ضعف موضعی پی و همان‌طور که در بخش زیرین آمده، اثر تراوش در زیر بدنه را نیز مرتبط ندانست.

^۳ Baglihar

^۴ Rodur method

^۱ Piedra del Águila

^۲ Daniel-Johnson



شکل ۳: نمای ترک‌ها در گروه بلوک‌های ۷، ۹، ۱۱، گالری تراز ۸۹۰ و گروه بلوک‌های ۱، ۲ و ۴ در سد کارون [۶]

۲-۳- بار تراوش

تراوش کنترل نشده در سدهای بتنی می‌تواند موجب ازدست‌رفتن آب داخل مخزن می‌شود، از طرف دیگر در صورت عدم هدایت صحیح آن سبب افزایش فشار برکنش^۱ و فشار آب بر سطوح درزها و ترک‌های موجود در سطح بالادست سد می‌گردد. این فشارها می‌توانند باعث ایجاد و رشد ترک‌ها در بدنه سد و محل اتصال پی به بدنه شده و نهایتاً منجر به ناپایداری سد گردند. انهدام سد مالپاسه در واقع طی سناریویی ترکیبی ناشی از مسائل پی و توقف پیش‌بینی نشده تراوش درون پی رخ داده است. مشکلات خاص حاصل از تراوش در سدهایی نظیر کولن‌براین^۲، اشلیگایس^۳ و زیلرگروندل^۴ رخ داده است.

سد کولن‌براین به ارتفاع ۲۰۰ متر و طول تاج ۶۲۶ متر در اتریش در سال ۱۹۷۹ به بهره‌برداری رسید. این سد در یک دره‌ی (U) شکل وسیع ساخته شد. این مسئله باعث تضعیف عملکرد قوسی و تحمیل بار اضافی خمشی به طره‌های سد می‌گردد. طی اولین آگیری سد کولن‌براین، ترکی در رویه بالادست سد و در پاشنه سد (تراز ۴۲ متر پایین‌تر از کف رودخانه) ایجاد شد. این ترک باعث نشت آب با دبی ۲۰۰ لیتر در ثانیه به پایین‌ترین گالری سد می‌شد (شکل (۴) [۷]). علاوه بر این پرده تزریق نیز هیچ‌گونه عملکردی از خود نشان نمی‌داد؛ به‌گونه‌ای که هد فشار برکنش تقریباً معادل هد سطح آب مخزن بود. برای اصلاح این شرایط بلافاصله پرده تزریق با تزریق مجدد مقاوم‌سازی شد. در سال ۱۹۸۰ با تخلیه مخزن به‌وسیله تزریق رزین پلی‌اورتان ترک‌های رویه بالادست ترمیم شد. هم‌زمان تزریق گراوت در درزهای قائم نیز تجدید شد لیکن در میزان آن کنترل دقیق

صورت نگرفت و تزریق بیش از حد گراوت موجب تغییر شکل طره‌ها به‌سوی بالادست گردید. در نتیجه ترک‌های متعددی در رویه پایاب بخش پائینی طره‌های بزرگ رخ داد. بعد از ترمیم ترک‌ها در سال ۱۹۸۳ با افزایش سطح آب به تراز ۱۰ متر پایین‌تر از تراز تاج، ترک دیگری در رویه‌ی بالادست ایجاد شد. نهایتاً بدنه سد قابل‌اطمینان نبود، و چاره‌ای جز استفاده از یک سازه پشتیبان به‌عنوان سد پشت‌بند در پایین‌دست سد باقی نماند. این سازه با طراحی درز فعال خاصی در اتصال به بدنه سد اصلی ساخته شد.

بحث: در حادثه کولن‌براین عامل اصلی ترک مرحله اول فرآیند تراوش و نقص پرده آب‌بند و نیز خطا در طراحی بدنه سد قوسی در یک دره وسیع محسوب می‌شود. لیکن عامل اصلی در ترک‌های مرحله دوم که آسیب نهایی را موجب شد، وقوع خطای اجرایی در حین عملیات ترمیم باید تلقی شود. البته ساخت یک سازه پشت‌بند آخرین راه حل خطاهای غیر قابل جبران محسوب می‌شود.

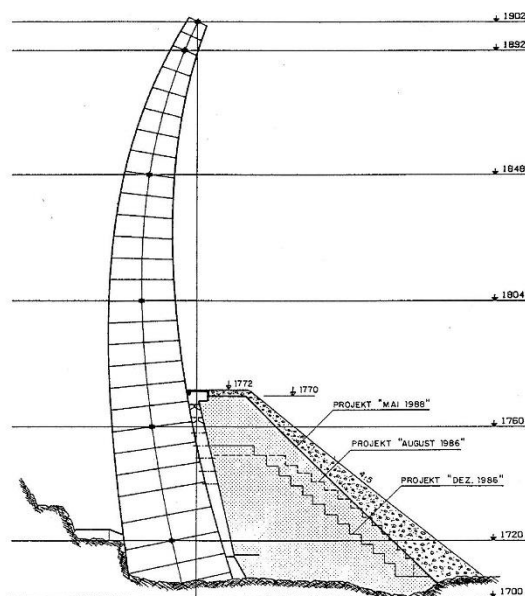
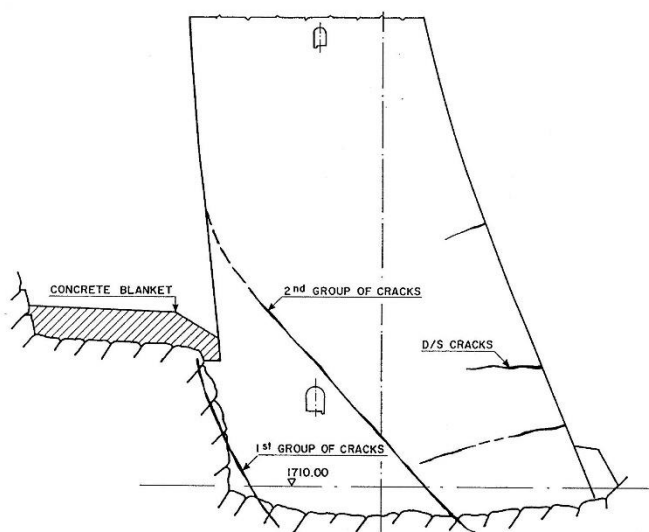
سد قوسی اشلیگایس به ارتفاع ۱۳۱ متر و طول تاج ۷۲۵ متر در دره‌ای بسیار وسیع طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۱ در اتریش ساخته شد. طی اولین آب‌گیری کامل در سال ۱۹۷۳، نشت غیرمنتظره‌ی ۲۰۰ لیتر در ثانیه در گالری تحتانی این سد مشاهده گردید. بررسی علت این موضوع نشان داد؛ تنش‌های کششی گسترده در سراب سد موجب بازشدگی درز اتصال بدنه و پی (درز محیطی سد) و رخداد ترک در پاشنه سد و ورود آب به داخل آن شده است. این مسئله به نوبه خود فشار برکنش قابل‌توجهی را در پاشنه سد به وجود آورد که

^۳ Schlegeis

^۴ Zillergründl Dam

^۱ Uplift pressure

^۲ Koelnbrein



شکل ۴: نمای شماتیک از ترک‌های ایجاد شده در بدنه سد کولن‌براین و سازه پشتیبان آن [۷]

به‌عنوان مورد حاد دیگری از حوادث ناشی از بار برکنش، سد قوسی سن فرانسیس در آمریکا به ارتفاع ۶۵ متر بود که طی اولین ابگیری مخزن در سال ۱۹۲۸ به علل ترکیبی مختلف شامل خطا در طراحی و ساخت، تحت اثر تراوش و اثر برکنشی حاصل در گوه تکیه‌گاهی نهایتاً دچار ناپایداری و انهدام کامل گشت [۹].

۲-۴- کاستی‌های زمین‌شناسی

با بررسی تاریخچه‌ی آسیب‌های جدی به سدهای بتنی می‌توان گفت مکانیزم‌هایی نظیر آزادسازی تنش‌های تکنیک، زمین‌لغزش بزرگ مشرف به مخزن، نشست‌ها و تغییر مکان‌های ناشی از تغییر سطح آب زیرزمینی، نشست‌ها و جابجایی‌های نامتقارن دیواره‌های دره؛ در بسیاری از سدها موجب بروز آسیب‌ها و ترک‌های جدی شده‌اند. سدهای زویزیر^۱، وایونت^۲ و سد جین‌پینگ^۳ از جمله سدهایی هستند که به دلیل وجود چنین مکانیسم‌هایی در پی و تکیه‌گاه خود دچار آسیب‌های خطرناکی شده‌اند.

در سد قوسی وایونت با ارتفاع ۲۶۲ متر که ساخت آن در سال ۱۹۶۰ در ایتالیا به اتمام رسید؛ لغزش یک توده‌ی عظیم نابرجا به درون مخزن موجب روگذری بیش از ۱۵۰ میلیون مترمکعب از روی بدنه سد و ایجاد سیلی عظیم در پایاب شد. یک شهر نابود شد و بیش از ۲۰۰۰ نفر کشته و مفقود شدند. ارتفاع روگذری به وجود آمده، بیشتر از ۹۰ متر تخمین زده شد. بدنه سد آسیب کمی در

منجر به گسترش ترک شد. در سال ۱۹۸۳ با ساخت یک آب‌بند الاستیک که ۵ متر نیز در سنگ پی نفوذ داشت، تهدید موجود تا حد مطلوبی کنترل گردید. به‌گونه‌ای که تا سال ۱۹۹۱ تنها یک‌بار دیگر نشت دیده شد که آن هم با تزریق رزین برطرف گردید.

بحث: عامل اصلی آسیب را می‌توان مکانیزم و اثر تراوش آب و عامل فرعی را می‌توان خطا در طراحی یک سد قوسی در دره ای وسیع دانست.

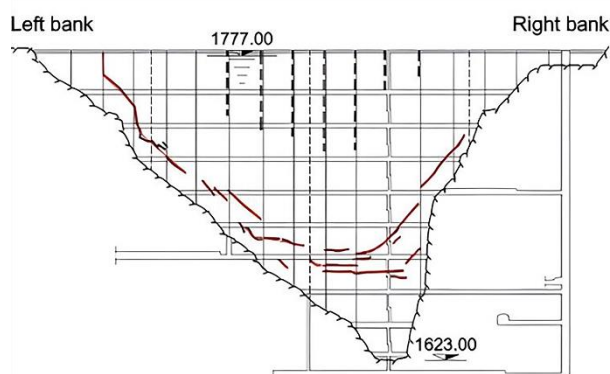
بر اساس یک فرضیه قابل‌اعتنا، مشابه این اتفاق در سد کارون ۴ نیز رخ داده است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شد ترک‌هایی در بخش‌هایی پایینی طره‌های میانی و سمت راست بدنه سد کارون ۴ ایجاد گردیده و نفوذ آب را به گالری بدنه رقم زده است. به نظر می‌رسد اصلی‌ترین علت وقوع این ترک‌ها آبگیری زودهنگام سد و نبود فرصت کافی برای پی جهت تأمین رفتار هماهنگ با پیکره سد طی زمان پرشدن مخزن باشد. درواقع آبگیری سریع بدون ایجاد فرصت کافی برای نفوذ و استقرار آب در داخل پی، می‌تواند سبب اعمال فشار زیادی بر لایه‌های نفوذناپذیر پی و در نتیجه حرکات نسبی بین این لایه‌ها گردد. این در حالی است که بررسی‌های ژئوتکنیکی پی، وجود لایه رسی با نفوذپذیری کم را در زیر ناحیه میانی ترک‌خورده تأیید می‌کند [۸]. البته فرضیه‌های متعدد دیگری نیز برای توجیه علل دو گروه ترک مطرح شده در بدنه این سد و وجود دارد که ضعیف‌تر از دلایل فوق می‌نماید.

^۳ Jinping

^۱ Zeuzier

^۲ Vajont

نمونه تاریخی تلقی می‌شود. از طرفی اهمیت پایش روزانه رفتار سدهای بزرگ مورد تأکید قرار گرفته است؛ چرا که گذشت چند روز از ادامه نشست پی این سد قطعاً منجر به فاجعه‌ای بزرگ می‌گشت.



شکل ۵: بازشدگی برخی از درزهای انقباض و ترک‌های ایجاد شده در رویه‌ی بالادست سد زویزیر [۵] و [۱۱]

۲-۵- بار زلزله

اساساً تعداد بسیار کمی از سدهای بتنی بزرگ به دلیل زلزله دچار آسیب شده‌اند و در واقع تا کنون هیچ موردی از انهدام یا رهاسازی سریع آب مخزن ناشی از زلزله در سدهای بزرگ بتنی ثبت نشده است [۱۲]. تنها یک سد ساخته‌شده روی گسلی فعال، دچار شکست جدی و نه انهدام و البته با رهاسازی آرام آب مخزن گشته است. اما برخی از سدهای بتنی بزرگ نظیر سفیدرود، کوینا^۱، پاکوینما^۲ و سین‌فنگ‌جیانگ^۳ به دلیل زلزله دچار آسیب‌های جدی شده‌اند. نکته مهم در شناخت عامل زلزله آن است که شدت زلزله در سایت سدهای بزرگ، ناشی از لرزه‌خیزی طبیعی منطقه بوده و تا حد زیادی قابل پیش‌بینی است، لیکن بر اساس مشاهدات و مطالعاتی نظیر [۱۳]، [۱۴]، [۱۵] و بولتن ۱۳۷ کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ [۱۶]، ایجاد مخزن سد و تغییرات تراز سطح آب آن می‌تواند موجب تشدید لرزه‌خیزی منطقه اطراف سد گردد. این پدیده با اصطلاح لرزه‌خیزی القایی مخزن^۴ (RTS) شناخته می‌شود و شامل مجموعه‌ای از رویدادهای لرزه‌ای حین و پس از آبگیری مخزن است. در واقع به دلیل کنش وزنی آب مخزن، و توسعه فشار آب منفذی در ناحیه گسله که به‌صورت بحرانی تحت تنش تکتونیکی قرار گرفته است، رخداد لرزه‌ای شتاب می‌گیرد [۱۶]. بنابراین لازمه وقوع این پدیده، وجود گسل یا گسل‌های فعالی است که به حد گسیختگی خود نزدیک باشد. معمولاً این پدیده که تا حد زیادی تصادفی تلقی می‌شود، به مخزن سدهایی با ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر، و یا با ظرفیت

روی تاج متحمل شد؛ ولی بخش عمده حجم مخزن کاملاً از دست رفت. تجربه سد وایونت اهمیت مطالعات زمین‌شناسی را در دره‌های تنگ با دیواره‌های پر شیب که معمولاً بهترین مکان برای مخزن سدها می‌باشد، نشان می‌دهد. مطالعات زمین‌شناسی و پایداری باید روی دیواره‌ها و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش باتوجه به اثر پرشدگی مخزن و احتمال رخداد پدیده مؤینگی در توده‌های فرسوده سطحی زمین، از قبل مورد پیش‌بینی و توجه خاص قرار گیرد. طراح این سد از بابت کم‌توجهی به مطالعات زمین‌شناسی مربوط به شیب‌های مشرف به مخزن خودکشی کرد. این نمونه‌ای از سناریوی تهدید و خسارت به پروژه‌های سدسازی و عواقب مصیبت‌بار آن ناشی از پیچیدگی‌های شرایط زمین‌شناسی و کوتاهی و غفلت طراحان در پیش‌بینی آن بود [۹].

سد قوسی زویزیر نیز به ارتفاع ۱۵۶ متر و طول تاج ۲۵۶ متر در سوئیس در سال ۱۹۵۷ ساخته شد. این سد روی لایه‌ای از سنگ‌آهک ساخته شده و در زیر این لایه نیز یک سفره آب زیرزمینی محصور شده در یک‌لایه داگر^۱ قرار دارد. این سد تا سال ۱۹۷۸ عملکرد رضایت‌بخشی از خود نشان داد؛ اما ناگهان در سال ۱۹۷۸ طی چند روز وقوع جابه‌جایی‌های تاج به سمت بالادست و هم‌زمان نشست بدنه سد به‌صورت قابل توجهی مشاهده شد [۱۰]. پس از بررسی‌ها مشخص شد حفاری‌های مربوط به احداث یک معدن در اعماق زیر دره موجب زهکشی آب از سفره زیرزمینی و نشست شدید لایه داگر شده است. این زهکشی شدید که در اعماق چند صد متری زیر سد بود، منجر به باز شدن دره‌های اطراف و بسته شدن دره زویزیر شد. در نتیجه‌ی این اتفاق؛ درزهای قائم در حدود ۵ میلی‌متر دچار بازشدگی شدند. رویه پایاب تا ۱۵ میلیمتر دچار ترک‌خوردگی‌های پراکنده شد. عرض دره زویزیر به میزان ۷ سانتی‌متر در تاج سد کاهش یافت. میزان نشست کف آن ۱۳ سانتی‌متر و حرکت محور سد در تاج آن به سمت سراب به ۱۲ سانتی‌متر رسید. تصمیم‌گیری محتاطانه برای کشف و چاره‌جویی و ترمیم این سد منجر به خالی نگه‌داشتن مخزن به مدت ده سال گردید. طی این مدت سد با تزریق رزین اپوکسی درون ترک‌های آن و نیز آرماتورگذاری پرده تزریق در امتداد خط پی ترمیم شد. در شکل (۵) ترک‌های ایجاد شده بر رویه‌ی بالادست این سد نشان داده شده است. در سال ۱۹۸۸ که ۱۰ سال پس از حادثه می‌باشد، سد کاملاً به عملکرد اولیه خود بازگشت. در این حادثه، رفتار ناشناخته زمین که البته به‌خاطر دستبرد گروه ثالث در منطقه فعال شده بود مسبب آسیب‌ها به یک سد سالم و با عملکرد خوب گشت. هشکاری مهندسان در شناسایی به‌موقع عامل تحریک در حد یک

^۱ Xinfengjiang

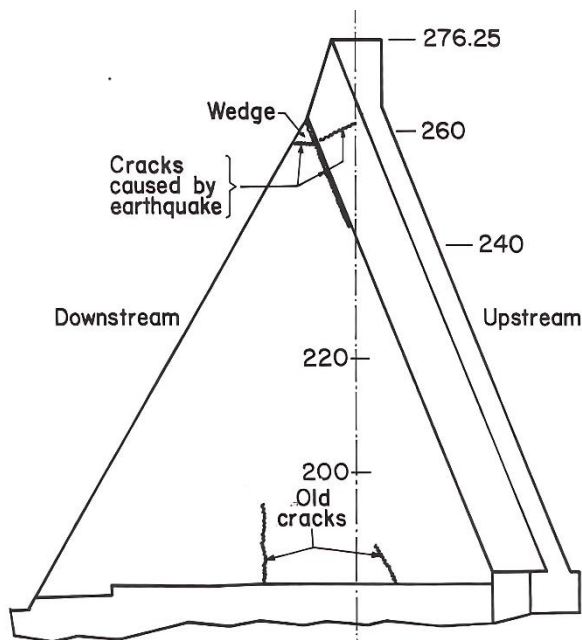
^۴ Reservoir-Triggered Seismicity (RTS)

^۱ Dogger

^۲ Koyuna

^۳ Pacoima

پیشگیری شده بود. شکل (۶) ترک‌های سازه‌ای سد سفیدرود را پس از وقوع زلزله نشان می‌دهد.



شکل ۶: ترک‌های سازه‌ای در سد سفیدرود پس از تحمل زلزله‌ی سال ۱۳۶۹

علاوه بر ترک‌های افقی فوق، خردشدن بتن در امتداد برخی از درزهای قائم نیز دیده شد [۱۸]. بر اثر آسیب به درزهای قائم، جریان شدید آب در گالری تحتانی بدنه سد نیز به وقوع پیوست. به سبب اهمیت اقتصادی مخزن برای کشتزارهای برنج گیلان، بلافاصله بعد از وقوع زلزله، مطالعات، محاسبات، قراردادهای پیمانکاران مجرب بین المللی، و نهایتاً عملیات ترمیم سد آغاز شد. این عملیات به موقع انجام گشت و در نتیجه ظرف یک سال سد به بهره‌برداری کامل خود برگشت [۱۹] و [۲۰]. عملیات ترمیم و تعمیر با هدف آب‌بند کردن بلوک‌های ترک‌خورده، بالا بردن مقاومت برشی درزهای اجرایی ترک‌خورده و آب‌بندی با استفاده از تزریق رزین و بهبود مقاومت درزهای افقی فوقانی با نصب کابل‌های مهاری پس‌کشیده شبه قائم و با عبور از درزهای افقی گسیخته شده انجام پذیرفت. در این حادثه که ناشی از یک زلزله طبیعی منطقه‌ای و به مراتب قوی‌تر از زلزله طراحی سد بود، حفاری‌هایی درون بدنه صورت گرفت که مشخص گردید در هنگام ساخت بدنه سد نیز سهل انگاری‌های زیادی به‌ویژه در کیفیت بتن ریزی و نیز در آماده‌سازی درزهای افقی رخ داده بود. در شکل (۷) بخشی از عملیات نصب مهار و شکل شماتیک محل نصب

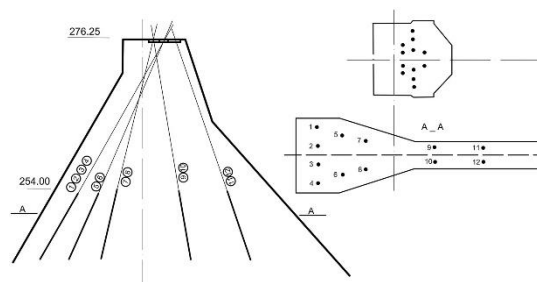
بیش از ۵۰۰ میلیون مترمکعب و یا با سدهای کوچک‌تر که در مناطقی با حساسیت تکنیکی بالا قرار دارند، مرتبط دانسته می‌شود [۱۷]. تا کنون بیش از صد سد تحت زلزله‌های کوچک و بزرگ ناشی از این پدیده قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها در مورد سدهای بتنی می‌توان به سد سین‌فنگ‌جیانگ در چین تحت زلزله‌ی سال ۱۹۶۲ با بزرگای ۶.۱، سد کوینا در هند با زلزله‌ی سال ۱۹۶۷ با بزرگای ۶.۳ و سد هوور^۱ در آمریکا با زلزله سال ۱۹۳۵ با بزرگای ۵ اشاره نمود. نکته مهم آنکه گرچه زلزله‌های القایی کوچک حین اولین پر شدن مخزن به وفور اتفاق می‌افتد، لیکن بزرگ‌ترین زلزله القایی معمولاً پس از پر شدن کامل مخزن و در فاصله زمانی کوتاهی می‌تواند رخ دهد. سد کوینا که از مصالح ضعیف و خطای هندسی در طراحی ساخته شده بود، چنین شرایطی را با آسیب فراوان در بخش فوقانی تجربه کرد، و نهایتاً با احداث پشت‌بند اضافی بازسازی شد.

سد وزنی پشت‌بنددار سفیدرود به ارتفاع ۱۰۶ متر و طول تاج ۴۲۵ متر در ۷۵ کیلومتری جنوب شهر رشت و در مجاورت شهر منجیل در سال ۱۳۴۱ احداث گردید. ضخامت این سد در تراز تاج ۱۰.۵ متر و در تراز پی حدود ۱۰۰ متر است و بدنه آن از ۲۳ بلوک با عرض ۱۴ متر تشکیل شده است. این سد در سال ۱۳۶۹ زلزله رودبار- منجیل را به بزرگای ۷.۴ و با عمق کانونی ۱۹ کیلومتر تجربه نمود. مرکز این زمین‌لرزه در فاصله حدود ۳۴ کیلومتری از سد بود و همچنین بعد از این زلزله چندین پس‌لرزه با بزرگای بیش از ۶ ریشتر رخ داد. به علت نقص فنی در شتاب‌نگار واقع در محل سد حین وقوع زمین لرزه، نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت ثبت‌شده از زلزله، متعلق به شتاب‌نگاری در فاصله حدود ۴۰ کیلومتری از محل سد است. مؤلفه افقی حداکثر شتاب زلزله معادل (۰.۶۵ g) و مؤلفه قائم آن معادل (۰.۲۵ g) بود. مقدار حداکثر شتاب افقی زلزله در محل سد معادل (۰.۷ g) تخمین زده می‌شود. این در حالی بود که ضریب زلزله طراحی این سد با اتکا به دانش زمان ساخت، حدود ۰.۱ فرض شده بود. تراز مخزن در زمان وقوع زلزله حدود ۶ متر پایین‌تر از تراز نرمال (تراز مخزن پر) بود. عمده خسارات شامل یک ترک افقی سراسری در امتداد درز اجرایی در همه بلوک‌ها (به استثنای بلوک ۵) در تراز تغییر شیب در وجه پایین دست سد بود. در یکی از بلوک‌های میانی ترک در چهار تراز مختلف ایجاد شد که بیش از تعداد ترک‌های سایر بلوک‌ها بود. بخشی از دیوار جان‌پناه در تراز تاج سد دچار ترک و آسیب جدی شد و نیز در این تراز اتاق نگهداری ساخته شده از مصالح بنایی تقریباً ناپدید شده بود. قطعات بزرگ سنگ تا مجاورت سازه پوسته‌ای جام سرریز نیلوفری ریزش کرد که خوشبختانه توسط حفاظ بتنی موجود در آنجا از سقوط آن به درون سازه ظریف سرریز

^۱ Hoover



(ج)



(ب)

(الف)

شکل ۷: نصب مهارهای پس کشیده در سد سفیدرود: (الف) پلان آرایش کابل‌های مهارهای پس کشیده در تاج و در تراز ۲۵۰ از یک مونولیت. (ب) نمای نیم‌رخ آرایش

کابل‌های یک مونولیت. (ج) تصویری از استقرار اولیه کابل‌های مهارهای در سطح تاج سد. [۱۸]

رسید و منجر به بازشدگی ۵ سانتی‌متری درز انقباض مجاور بلوک رانشی در محل ترمیم شده قبلی گشت. اما کابل‌های فولادی، از لغزش توده سنگی مجاور تراست بلوک جلوگیری کرد [۲۱]. به‌عنوان نمونه‌ای از مهندسی موفق، گرچه عامل زلزله با شدتی به مراتب بیش از سطح زلزله طراحی و حتی با تشدید توپوگرافیک در این حادثه بروز کرد، لیکن با هشیاری متولیان سد به‌خوبی مهار شده و از حوادث سخت و تلخ احتمالی جلوگیری کرده است.

سد شی‌کانگ^۲ در تایوان نیز یک سد بتنی وزنی به ارتفاع ۲۱۰۴ متر و تاجی به طول ۳۵۷ متر با ۱۸ سرریز دریچه‌ای است. این سد در واقع یک سد انحرافی محدود ولی با مخزنی نسبتاً بزرگ می‌باشد که بیشترین آسیب را طی زلزله چیچی^۳ به خود دیده است. این زلزله در سال ۱۹۹۹ میلادی با بزرگای ۷.۶ ریشتر و در عمق ۸ کیلومتری زمین و در فاصله ۴۰ کیلومتری ساختگاه سد رخ داد. شتاب بیشینه‌ی افقی زمین، در ساختگاه (g ۰.۵۱) و شتاب قائم (g ۰.۵۳) بوده است. گسل مسبب این زلزله، گسل چلونگ‌پو^۴ بود که از ۳۰۰ متری بدنه سد می‌گذرد و در هنگام طراحی شناخته شده بود. لیکن در هنگام زلزله چیچی این گسل به چند شاخه گسل فرعی در منطقه تقسیم شد که یکی از این شاخه‌ها محور سد را قطع کرد تا مطابق شکل (۸) دریچه‌ی سرریز را در بلوک‌های ۱۶ تا ۱۸ در مجاورت تکیه‌گاه راست تخریب کند. سایر بلوک‌ها آسیب زیادی ندیدند و بیانگر عملکرد فوق‌العاده‌ای از یک سد وزنی در برابر زلزله شدید میدان نزدیک محسوب می‌شوند. یکی دیگر از شاخه‌های فرعی گسل، تونل آبگیر واقع در تکیه‌گاه چپ را قطع کرده و آن را از هم گسست. در نتیجه

مهارها نشان داده شده است. علت این آسیب‌های بزرگ را باید به کمبود اطلاعات درباره استعداد لرزه‌خیزی منطقه، مدل‌های ساده و ابتدایی تحلیل لرزه‌ای و نیز خطاهای زمان ساخت در عمل‌آوری بتن و درزهای قطع بتن‌ریزی نسبت داد.

سد پاکوئیم یک سد بتنی قوسی نسبتاً ضخیم به ارتفاع ۱۱۳ متر و طول تاج ۱۸۰ متر است که در نزدیکی شهر لس‌آنجلس کالیفرنیا واقع شده و ساخت آن در سال ۱۹۲۸ به اتمام رسیده است. تکیه‌گاه این سد در جناح چپ فاقد گوشه کافی سنگی بوده، ولی دارای یک بلوک رانشی^۱ بتنی است. بدنه سد از ۱۱ بلوک به عرض ۱۵.۳ متر با درزهای قائم تشکیل شده که در بین آن‌ها کلیدهای برشی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تعبیه شده‌اند. طی زلزله سن‌فرناندو در سال ۱۹۷۱ بیشینه شتاب‌های g ۱.۲۵ در هر دو راستای افقی و g ۰.۷ در راستای قائم در تکیه‌گاه مجاور تاج آن ثبت شد، در حالی که بیشینه شتاب افقی زمین در کف دره فقط g ۰.۵ بود. مشاهده این موضوع که آن زمان مورد تردید قرار گرفته بود، مؤید بزرگ‌نمایی توپوگرافیک در ساختگاه‌های دره‌ای بود که بعداً در زلزله ۱۹۹۴ نورتریج به بزرگی ۶.۷ نیز مجدداً مشاهده و پذیرفته شد. زلزله ۱۹۷۱ به بدنه سد آسیبی نزد ولی منجر به جدایی قوس به میزان ۱۰ میلی‌متر از بلوک رانشی وزنی تکیه‌گاهی آن در تراز تاج و آسیب‌های محدودی به توده سنگ تکیه گاهی شد. آن‌زمان با پس تنیده کردن توده سنگ تکیه‌گاه فوقانی جناح آسیب‌دیده، بدنه سد تقویت شد و مورد پایش دائمی قرار گرفت. طی زلزله ۱۹۹۴ بیشینه شتاب افقی زمین در کف دره به g ۰.۵۳ و بیشینه شتاب افقی تکیه‌گاه سمت چپ تاج سد به g ۱.۵۸

^۲ Chi-chi

^۴ Chelung-pu fault

^۱ Thrust block

^۲ Shihkang

این گسلش، محور سد حدود ۷ متر افقی جابه‌جا شد و تغییر مکان نسبی قائم در حدود ۹ متر بین دو قسمت جدا شده بدنه سد رخ داد. این حادثه آزمونی موفق از طراحی هوشمندانه در سازه سد محسوب می‌شود که در برابر زلزله شدید روی گسل با مولفه‌های بسیار بزرگ تغییر مکانی و شتاب بالا، عملکرد کاملاً قابل‌قبولی از خود نشان داده است. طی این حادثه در واقع سد منهدم نشد و نیز مخزن را به‌صورت ناگهانی رها نکرد، و بدین ترتیب ضابطه‌های ICOLD را برای زلزله‌های پیشینه به‌خوبی تأمین کرده است.



شکل ۸: تخریب سرریز بلوک‌های ۱۶ تا ۱۸ سد شی‌کانگ ناشی از زلزله چیچی در سال ۱۹۹۹

۲-۶- خطا در طراحی و یا ساخت

در طول تاریخ سدسازی همواره یکی از عوامل مهم و شایع که باعث ایجاد مشکلات و خرابی‌های کوچک و بزرگ در سدهای بتنی شده، عدم به‌کارگیری تجربه‌های فنی کافی و یا دانش فنی روز طی مراحل طراحی، اجرا و حتی بهره‌برداری بوده است. علاوه بر این موضوع دخالت مدیران اجرایی حاکم با انگیزه‌های سیاسی، شخصی و غیر اصولی نیز از بزرگ‌ترین عوامل آسیب‌های بزرگ به سدها بوده است. در چنین شرایطی که ناشی از خطای انسانی است با نادیده گرفتن هریک از ویژگی‌های مصالح، شرایط پی، مکانیزم سازه و رژیم بارگذاری به‌صورت اثر حرارت، نارسایی پی، اثر تراوش و غیره هر اتفاقی اعم از آسیب دراز مدت و یا انهدام سیستم امکان رخداد

خواهد داشت. سدهای کابریل^۱، زرورایلا^۲، ژیاووان^۳، سنت‌فرانسیس^۴، فلومن‌دوسا^۵، گلنو^۶ و وگادترا^۷ از جمله مشهورترین نمونه‌های سدهای آسیب‌دیده به دلیل نقص در محاسبه، یا ساخت، یا تصمیمات غیر فنی مدیران اجرایی هستند.

در میانه زمان ساخت سد قوسی کابریل به ارتفاع ۱۳۲ متر در سال ۱۹۵۳ در کشور پرتغال تصمیمی ابلاغ می‌شود که شرایط عبور یک بزرگراه از روی آن فراهم شود. مجریان بدون توجه به فرضیات طراحی، ضخامت تاج سد را به‌صورت یکپارچه با بدنه سد بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. لیکن در هنگام بهره‌برداری و در جریان اولین آبگیری، با شکستگی ترک‌های افقی فراوانی مطابق آنچه در شکل (۹) نشان داده شده است روی وجه پایین‌دست بخش فوقانی بدنه و منطبق بر درزهای انقطاع بتن‌ریزی مشاهده گردید. این ترک‌ها آب‌دهی زیادی نیز نشان می‌داد. علاوه بر این، سال‌ها بعد بتن این سد به‌خاطر واکنش‌زا بودن سنگ‌دانه‌ها دچار واکنش‌های قلیایی نیز شده و ترک‌های بیشتری در آن رخ داد. در سال ۱۹۸۱ عملیات تزریق روی ترک‌ها در کنار تزریق مجدد درزهای انقباض و اصلاح شرایط پی نیز انجام شد، اما پس از آبگیری دوباره در سال ۱۹۹۶، ترک‌های مشابهی در همان نواحی مشاهده گردید [۲۱]. جدا از بحث واکنش قلیایی بتن که در آن زمان ناشناخته بود، تغییرات غیرکارشناسانه در هندسه سد نظیر افزایش ضخامت بالاترین قوس بدنه موجب افزایش سختی آن و تغییر علامت گشتاور خمشی در طره‌های متکی بر آن گشته و ایجاد ترک‌های متعدد در طره‌ها کرده بود.

بحث: جدا از پدیده دراز مدت واکنش قلیایی، رخداد ترک‌های مهم از ابتدای آبگیری ناشی از تغییرات دستوری در طراحی، بدون مطالعه تفصیلی جامع و صرف وقت کافی بوده و این نوع خطاها می‌تواند برای سدهای بزرگ بسیار مسئله‌آفرین باشد. گرچه این یک عامل خطا در طراحی محسوب می‌شود لیکن ناشی از دخالت‌های مدیریتی در نقض حاکمیت دانشی و کارشناسانه رخ داده است. در بسیاری از سدهای دیگر نیز این خطاها کم و بیش رخ داده است و منجر به خسارت‌های سنگین به سرمایه‌های ملی گشته است.

^۵ Flumendosa

^۶ Gleno

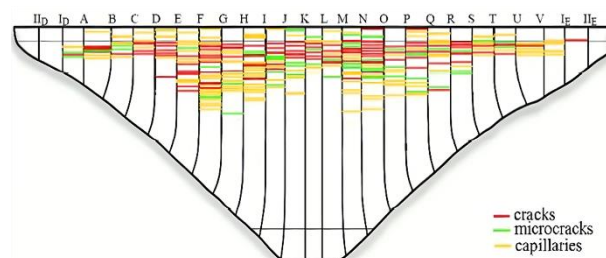
^۷ Vega de Terra

^۱ Cabril

^۲ Zervreila

^۳ Xiaowan

^۴ St. Francis



شکل ۹: وضعیت ترک‌های روبه‌ی پایین‌دست سد کابریل پس از اولین

آب‌گیری [۲۳]

سد زرورایلا یک سد قوسی به ارتفاع ۱۵۱ متر و طول تاج ۵۰۴ متر در سوییس است که عملیات ساخت آن در سال ۱۹۵۷ خاتمه یافته است. پی سد زرورایلا از لایه‌های گنایس کریستالی^۱ با شیب متمایل به سمت تکیه‌گاه چپ ساخته شده است. یکی از ویژگی‌های این سد شکل دره نامتقارن و مدول الاستیسیته نامتقارن پی می‌باشد. این عدم تقارن حین ساخت کاملاً آشکار بوده، به‌طوری که حفاری‌های بیشتری در تکیه‌گاه راست نسبت به تکیه‌گاه چپ به‌منظور رفع مشکل بلوک‌های سست انجام شده است. بعلاوه اجباراً ۱۵ بار تزریق در تکیه‌گاه راست بیشتر از تکیه‌گاه چپ نیاز بوده است. این مسئله که عمدتاً ناشی از اشتباه در شناخت شرایط مکانیکی و هندسه پی و پدیده تمرکز تنش ناشی از جنس سخت لایه‌های زمین بود طی اولین سال‌های عمر سد و در سال ۱۹۶۰ موجب تغییر شکل‌های ناهمگن، ترک‌های عمیق در سطح پایین‌دست این سد و نیز بازشدگی درزهای قائم شد.

بحث: در مورد علت آسیب‌های این سد دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد که عمدتاً به خزش و آب‌رفتگی بتن، رفتار غیرخطی و خمیری پی برمی‌گردد [۲۴]. لیکن به نظر نگارنده مهم‌ترین عامل ناشی از خطا در طراحی به‌صورت بی‌توجهی به عدم تقارن شدید در هندسه و سختی پی در دو طرف بدنه سد و نهایتاً بی‌توجهی نسبت به تمرکز تنش درون بدنه سد ناشی از تکیه‌گاه محدب و بسیار سخت بوده است.

سد قوسی ژیاووان نیز مشکلات مربوط به ساخت را البته به شکلی دیگر تجربه نموده است. این سد که با ارتفاع ۲۹۲ متر و طول تاج ۹۰۲ متر یکی از چهار سد بلند بتنی جهان است؛ دارای

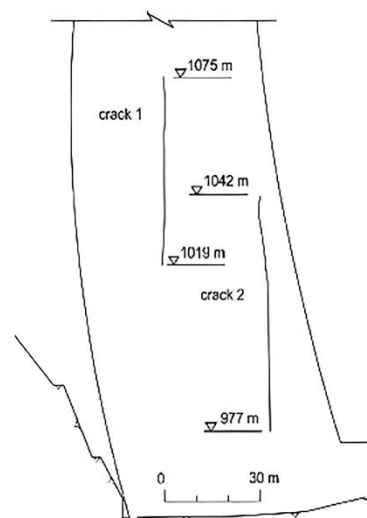
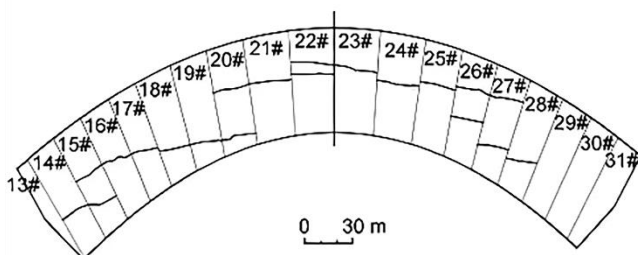
بدنه‌ای بسیار ضخیم و آسیب پذیر در برابر گرمای هیدراسیون سیمان بوده است. لذا در طراحی سیستم پس‌سرمایش آن ضابطه اجرایی دقیق و آزموده‌ای به‌کار نرفته و در نتیجه ترک‌های متعدد و قابل توجهی را به دلیل تنش‌های کششی زیاد در اثر کاهش دمای بیش از حد بتن طی دومین مرحله‌ی پس‌سرمایش، قبل از تزریق درزهای قائم متحمل شده است. توزیع این ترک‌ها در بدنه این سد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این حادثه نیز مصداقی از نارسایی و خطای در زمان ساخت است که برای مقابله با حرارت ناشی از هیدراسیون بتن، پس‌سرمایش بیش از حدی بکار گرفته شد و به هرحال عامل ایجاد شوک سرمایی در درون بدنه موجب ترک‌های بسیار بزرگی در بدنه سد شد.

شکست سد سن‌فرانسیس در آمریکا نیز که بر اثر تراوش رخ داد، در واقع نتیجه اشتباه فاحش انسانی بوده است. این سد با دستور مدیریتی در حین ساخت دو بار افزایش ارتفاع به میزان جمعاً حدود ۱۰ درصد نسبت به ارتفاع طراحی اولیه داشته است. تصمیم‌سازی‌های متنوع در حین طراحی و ساختمان سد صرفاً به عهده یک فرد ارشد ناآشنا با پدیده‌های زمین‌شناسی بوده است. این سد ۵ روز بعد از آبگیری با ناپایداری تکیه‌گاهی منهدم شد.

سد گلتو به ارتفاع ۴۶ متر در ایتالیا در سال‌های دهه ۱۹۲۰ به‌صورت یک سد پشت‌بنددار ساخته شد. در این سد نیز در زمان ساخت ۳۰ درصد افزایش ارتفاع به‌صورت دستوری صورت گرفته بود. این خطای بزرگ هم‌زمان با خطاهای در طراحی پی مناسب درون سنگ بستر و عدم رعایت کیفیت بتن در هنگام اجرا، موجب انهدام سد و تلفات بزرگ مالی و جانی در حدود ۶۰۰ نفر گشت.

سد وگادترا به ارتفاع ۴۳ متر، سدی پشت‌بنددار مرکب از بتن و مصالح بنایی در اسپانیا، طی اولین آبگیری مخزن در سال ۱۹۵۹ بعد از یک بارندگی شدید منهدم شده و تلفاتی به میزان ۱۵۰ نفر را موجب شد. علت آن اشتباه فاحش در تحلیل رفتار ترکیبی بتن و مصالح بنایی و عدم تأمین ایمنی لغزشی در بستر زیرین پشت‌بندها بوده است [۹].

^۱ Crystal Gneiss



شکل ۱۰: توزیع ترک‌های سد ژیاووان در یک تراز و یک نیمرخ نمونه [۵] و [۲۵]

۳- تحلیل سیستمی و نتیجه گیری

ساختمانگاه (از نظر تصادف و شانس^۳ - مطابق ستون پنجم جدول ۱) همواره وجود دارد، ولی با هوشمندی و دانش لازم در به کارگیری آمار معتبر می‌توان از تهدید آن مصون ماند.

لذا همان‌طور که در ستون آخر جدول مشاهده می‌شود اگرچه عوامل ثانوی متعددی در هر واقعه شرکت دارند، لیکن آنچه پای آن‌ها را در ایجاد شرایط کافی برای وقوع یک حادثه بزرگ باز می‌کند بیشتر همان خطای انسانی است. در واقع قریب به اتفاق حوادث سدهای بزرگ تحت تأثیر خطای انسانی (در طراحی، در اجرا، در تصمیم‌سازی، در تأمین اطلاعات کافی فنی و یا در جهل دانشی کادر فنی مسئول) بوده است؛ بنابراین با نگاهی مجدد به جدول ۱ و با توجه به چهار مورد رخداد منتهی به انهدام سدهای بتنی مهم، می‌توان عوامل تأثیرگذار را به ترتیب اهمیت بازشناخت. پس از خطاهای انسانی که در همه موارد انهدام حضور داشته، مشکلات و مسائل پی مطرح است که در سه مورد حضور مستقیم داشته و نهایتاً بعد از آن، عامل تراوش درون پی که حداقل در دو مورد حضور داشته، مهمترین عامل بعدی است. البته مسئله تراوش را می‌توان جزو مسائل پی فرض کرد و به عبارت دیگر در سدهای بتنی خطاهای انسانی و مسائل پی با اختلاف زیاد، مهم‌ترین عوامل خطرپذیری هستند.

در این تحقیق بزرگ‌ترین حوادث آسیب‌زا برای سدهای بتنی که به دلایل متنوع رخ داده است بیان شده و مورد بحث قرار گرفت. خلاصه این مجموعه در جدول (۱) با ذکر عامل اصلی و عوامل ثانوی برای هر حادثه آورده شده است. عوامل اصلی (ستون اول جدول ۱) معمولاً عوامل فنی هستند که موجب رخداد شده‌اند، لیکن موارد خاصی نیز وجود دارد که عامل اصلی همان خطای انسانی اعم از خطاهای فاحش طراحی، یا اجرایی و یا حتی خطای مدیریتی و تصمیمات سیاسی بوده است. نکته بسیار مهم آنکه حتی در مواردی که عامل اصلی حادثه یک عامل فنی بوده است، این موضوع ناشی از مدل‌سازی مهندسی بدون تأمین اطلاعات لازم و یا بدون کالیبره کردن آن (مدل تنظیم نشده - از نظر شناختی^۱ - مطابق ستون ششم جدول ۱) و یا ناشی از نقص فاحش در مدلی بدون توجه به یک یا چند مؤلفه مهم فیزیکی (مدل ناقص - از نظر هستی‌شناسی و فهم ساختاری^۲ - مطابق ستون هفتم جدول ۱) بوده است. به عبارتی باز هم خطای انسانی به صورت غفلت از به کارگیری مدل مناسب یا نقص اطلاعات یا جهل در فهم مسئله که همگی عمدتاً ناشی از به کارگیری افراد و کادر فنی ناکارآمد است، مقصر اصلی محسوب می‌شود. البته خطای آماری یا تصادفی در به کارگیری اطلاعات فنی

^۳ Aleatory

^۱ Epistemic

^۲ Ontological

جدول ۱ : خلاصه حوادث بزرگ سدهای بتنی با تحلیل عوامل مسبب

عامل اصلی حادثه	نام سد	نوع بدنه سد **	سال حادثه	عدم قطعیت عوامل حادثه *			زمان حادثه	نتیجه حادثه	عوامل ثانوی و ملاحظات دیگر
				تصادفی	تنظیم مدل	نقص مدل و خطای انسانی			
ضعف پی و کاستی‌های ژئوتکنیک	Malpasset	VA	۱۹۵۹	۱	۳	۳	اولین آگیری	شکست و انهدام	بار تراوش + خطای طراحی
	El Atazar	VA	۱۹۷۱	۱	۳	۱	میانه عمر سد	ترمیم مکرر	خطای طراحی
بارهای حرارتی	Piedra del Aguila	PG	۱۹۹۲	۱	۳	۲	اولین آگیری	ترمیم	خطای ساخت
بارهای حرارتی + تراوش	Karun-4	VA	۲۰۱۰	۱	۲	۳	اولین آگیری	ترمیم بخشی	خطای ساخت + ضعف پی
بار تراوش	Koelnbrein	VA	۱۹۷۹	۱	۲	۲	اولین آگیری	ترمیم + ایجاد سد پشتیبان	خطای طراحی + خطای اجرا
	Schlegeis	VA	۱۹۷۳	۱	۱	۱	اولین آگیری	ترمیم	خطای طراحی
	St.Francis	GA	۱۹۲۸	۲	۳	۳	اولین آگیری	شکست و انهدام	انواع خطاهای انسانی، طراحی و ساخت
کاستی‌های زمین‌شناسی	Vajont	VA	۱۹۶۰	۲	۱	۳	اولین آگیری	نقص مخزن	خطای انسانی
	Zeuzier	VA	۱۹۷۸	۱	۱	-	میانه عمر سد	ترمیم	هشیاری به موقع
بار زلزله	Sefidroud	CB	۱۹۹۰	۲	۱	۲	میانه عمر سد	ترمیم و تقویت	خطای ساخت
	Pacoima	VA	۱۹۷۱ و ۱۹۹۴	۱	۱	۱	میانه عمر سد	ترمیم و تقویت	هشیاری و درس‌آموزی
	Shihkang	PG	۱۹۹۹	۲	-	۱	میانه عمر سد	نامشخص	عملکرد عالی
	Koyna	PG	۱۹۶۷	۲	۳	۱	اولین آگیری	ترمیم + ایجاد پشتیبان اضافی	نارسایی طراحی + کیفیت مصالح
	Cabril	VA	۱۹۵۳	۱	۱	۳	اولین آگیری	ترمیم مکرر	کیفیت مصالح
خطا در طراحی و یا ساخت	Zervreila	VA	۱۹۶۰	۲	۲	۱	اولین آگیری	ترمیم مکرر	نارسایی هندسی و ژئوتکنیکی پی
	Xiaowan	VA	۲۰۰۹	۱	۳	۲	اولین سال ساخت	ترمیم مکرر	بارحرارتی
	Gleno	CB	۱۹۲۳	۱	۱	۳	اولین آگیری	شکست و انهدام	ضعف پی و مصالح
	Vega de Terra	CB	۱۹۵۹	۱	۲	۳	اولین آگیری	شکست و انهدام	ضعف پی و مصالح

* بازه عددی (۱ تا ۳) بیانگر شدت تأثیر هر گروه از عدم قطعیت‌ها در وقوع حادثه است؛ عدد ۱ کمترین و عدد ۳ بیشترین تأثیر را بیان می‌کند.

** VA سد قوسی، GP سد وزنی، GA سد قوسی وزنی، CB سد پشت‌بنددار

instances. *Applied Sciences*, 14(17), pp. 7080. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14177080>.

۶. Amberg, F., Etaati, H. and Basereh, G., ۲۰۱۸. Assessment of karun IV abnormal behavior and estimated role of impervious clayey bed within the foundation. *Twenty-Sixth International Congress on Large Dams*, pp. ۹۲-۱۰۵. DOI: https://doi.org/10.1201/9780429465086_230.
۷. Lombardi, G., ۱۹۹۱. Kölnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem. *International Water Power & Dam Construction*, 43(7), pp. ۳۱-۳۴.
۸. Soltani, N. and Ahmadi, M.T., ۲۰۱۵. Investigation of the causes of cracking and abnormal displacements in arch concrete dams. M.Sc. Thesis. Tarbiat Modares University. [In Persian].
۹. Léger, P., ۲۰۲۳. *Compendium on structural behavior, modeling, safety and rehabilitation of concrete dams*. Polytechnique Montreal.
۱۰. Lombardi, G., ۲۰۰۴. Case histories of concrete dams (structural cracks): structural safety assessment of dams. *CISM International Centre for Mechanical Sciences*, pp. ۲۱.
۱۱. Bremen, R., Lombardi, G. and Amberg, F., ۲۰۰۱. Long term behaviour of three arch dams. *Sixth Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, organised by ICOLD, Salzburg.
۱۲. Chopra, A.K., ۲۰۲۰. *Earthquake engineering for concrete dams: analysis, design, and evaluation*. John Wiley & Sons. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119056102>.
۱۳. Tosun, H., ۲۰۱۵. Earthquakes and dams. In *Earthquake engineering - from engineering seismology to optimal seismic design of engineering structures*. InTech. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/59372>.
۱۴. Wieland, M., ۲۰۲۰. Effect of reservoir-triggered seismicity on safety of large dam projects. *INCOLD Journal*, 9(2), pp. ۴-۱۰.
۱۵. Gupta, H.K., ۲۰۲۲. Artificial water reservoir-triggered seismicity (RTS): most prominent anthropogenic seismicity. *Surveys in Geophysics*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09675-Z>.
۱۶. International Commission on Large Dams (ICOLD) ۲۰۱۱. Reservoirs and seismicity: state of knowledge. *Bull.* 137.
۱۷. Sêco e Pinto, P.S., ۲۰۱۵. Lessons learned from dams behavior under earthquakes. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, pp. ۱۸۷-۲۴۶. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10786-8_9.

نکته دیگر آنکه از میان مجموعه حوادث بزرگ معرفی شده در این تحقیق (که به نحوی معرف بزرگ‌ترین حوادث در سدهای بتنی محسوب می‌شوند) اکثریت موارد مربوط به زمان اولین آبرگیری و یا اولین سال‌های عمر سد و مخزن بوده است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که خطرپذیرترین زمان حیات سد، زمان اولین آبرگیری مخزن آن است؛ بنابراین باید طبق نظام انضباطی بسیار شدید و با رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه کنترل کیفیت و با استفاده از دستورالعمل‌های کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ و با بهره‌گیری از تجربه ملت‌های دیگر، همراه با رفتارسنجی سیستماتیک، تجزیه و تحلیل مشاهدات و سعی و خطای احتیاط‌آمیز؛ مخزن سد اولین آبرگیری خود را تجربه کند. سازندگان باید بدانند که بسیاری از آسیب‌ها می‌تواند به انهدام پروژه منتهی شود. برای آسیب‌های سازه‌ای دیگر حتی در صورت ترمیم پرهزینه و پیچیده، حاشیه ایمنی سد از دست رفته و یا بسیار کاهش می‌یابد. به‌هرحال در اکثر قریب به اتفاق این موارد نیز اثر نهایی آسیب، جبران‌ناپذیر بوده و تاب‌آوری سد را در برابر عوامل حاد احتمالی و مهاجم بعدی نظیر زلزله و یا کاستی‌های ناشناخته زمین‌شناسی به‌شدت کاهش می‌دهد.

۴- قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۴۰۲۴ انجام شده است. بدین‌وسیله از آن بنیاد قدردانی می‌گردد.

۵- منابع

۱. Hariri-Ardebili, M.A., Salamon, J., Mazza, G., Tosun, H. and Xu, B., ۲۰۲۰. Advances in dam engineering. *Infrastructures*, 5(5), pp. ۳۹. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures505039>.
۲. ICOLD Incident database bulletin ۹۹ update statistical analysis of dam failures committee on dam safety. ۲۰۱۹. *International Commission on Large Dams (ICOLD)*. Available at: <https://www.icoldchile.cl/boletines/188.pdf>.
۳. Jansen, R.B., ۱۹۸۸. *Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation*. New York: Van Nostrand Reinhold.
۴. Londe, P., ۱۹۸۷. The malpasset dam failure. *Engineering Geology*, 24(1-4), pp. ۲۹۵-۳۲۹. DOI: [https://doi.org/10.1016/0132-7952\(87\)90069-x](https://doi.org/10.1016/0132-7952(87)90069-x).
۵. Conde, A., Toledo, M.Á. and Salete, E., ۲۰۲۴. Cracks in arch dams: an overview of documented

۱۸. Wieland, M., ۲۰۲۱. Damage of sefid rud buttress dam project in iran caused by the magnitude ۷,۴ manjil earthquake of june ۲۱, ۱۹۹۰. *INCOLD Journal*, 10(۲), pp. ۴-۱۴.
۱۹. Arcangeli, E. and Ciabbari, P., ۱۹۹۴. Menjil dam rehabilitation by resin grouting and high capacity anchors. *International Water Power & Dam Construction*, 46(۲), pp. ۱۹-۲۵.
۲۰. Ahmadi, M.T. and Khoshrang, G., ۱۹۹۲. Sefidrud dam's dynamic response to the large near-field earthquake of june ۱۹۹۰. *Dam Engineering*, 3(۲), pp. ۸۵-۱۱۵.
۲۱. Alves, S.W., ۲۰۰۵. Nonlinear analysis of pacoima dam with spatially nonuniform ground motion. PhD Thesis. California Institute of Technology.
۲۲. Oliveira, S. and Mendes, P., ۲۰۰۸. Development of a cabril dam finite element model for dynamic analysis using ambient vibration tests results. *Springer eBooks*, pp. ۷۵۵. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-0370-3_700.
۲۳. Henriques, M.J., Lima, J.N. and Oliveira, S., ۲۰۱۲. Measuring inclinations in cabril dam with an optoelectronic sensor. *FIG Working Week 2013*, Roma.
۲۴. Dungar, R., ۱۹۹۰. Observed and computer simulated movements in the ۱۵۷ m high zervreila arch dam. *International Workshop on Arch Dams*, pp. ۳۶۴-۳۷۱.
۲۵. Wang, W., Ding, J., Wang, G., Zou, L. and Chen, S., ۲۰۱۱. Stability analysis of the temperature cracks in xiaowan arch dam. *Science China Technological Sciences*, 54(۳), pp. ۵۴۷-۵۵۵. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4280-1>.