Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Review Article

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

Mohammad Taghi Ahmadi * **and Ehsan Valadkhani**

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* corresponding author:(mahmadi@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 14 December 2024

Revised: 11 March 2025

Accepted: 5 April 2025

Keywords:

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

Abstract

Large dams are structures considered 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. Many 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Ahmadi, M. and Valadkhani, E. 2026. A review of damages and lessons learnt from major incidents in concrete dams, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 73-84. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65521.3380

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی مروری

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

محمدتقی احمدی * و احسان ولدخانی

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mahmadi@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

واژگان کلیدی:

سد بتنی،

شکست سد،

آسیب سازه‌ای،

عامل آسیب،

خطای انسانی،

عدم قطعیت.

چکیده

آسیب به سدهای بزرگ می‌تواند منجر به فاجعه شود. برخی از سدهای بتنی بدون شناخت کافی از شرایط پی و بارهای محیطی و با فرضیه‌های ناقص، طراحی و اجرا شده‌اند. همچنین ضعف کششی و برشی بتن بدنه‌ی سد می‌تواند باعث ترک‌های بزرگ ترد و ناگهانی شود؛ لذا ترکیب عوامل ذکرشده، تهدیدی جدی برای ایمنی سدهای بزرگ است. با وجود پیشرفت‌های علمی، احتمال خطا و عدم قطعیت در رفتار سازه‌های اخیر نفی نمی‌شود؛ لذا، مطالعه‌ی رخدادهای گذشته برای ارزیابی ریسک و مدیریت سدهای بزرگ حائز اهمیت است. با تحلیل سیستمی رفتار سدها، می‌توان شناخت بهتری از مجموعه‌ی سد- مخزن- پی به‌دست آورد و از وقوع حوادث مشابه جلوگیری کرد. در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی آسیب‌های تاریخی واردشده به سدهای بزرگ بتنی و تحلیل عوامل مؤثر پرداخته شده و براساس آن می‌توان گفت اغلب حوادث در اثر ترکیب عوامل مختلف، به‌ویژه خطاهای انسانی در مراحل طراحی، اجرا یا بهره‌برداری، و به‌خصوص هنگام اولین آبگیری رخ داده‌اند.

۱. مقدمه

شکست سدهای بتنی می‌تواند علاوه‌بر ایجاد خسارت‌های مالی، منجر به فاجعه شود و جان بسیاری از انسان‌ها را تهدید کند. براساس بولتن ۹۹ کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD)[1] (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 به‌جای‌ماندن و انباشتگی آسیب در آن‌ها شده است. براساس گزارش آژانس فدرال مدیریت بحران آمریکا (FEMA)[2]، فقط در آمریکا بیش از ۱۵۰۰۰ سد وجود دارند که در صورت آسیب، تهدیدهای سنگینی برای منطقه‌ی خود ایجاد خواهند کرد.[۱] نکته‌ی مهم آن است که طراحی و ساخت سدهای بزرگ بعضاً براساس فرضیات ساده‌کننده‌ای، نظیر: کم‌توجهی به تغییر رفتار مصالح در اثر حضور آب در پی، نایکنواختی مصالح در پی، عدم شناخت ویژگی‌های پنهان تکیه‌گاه‌ها و ناپیوستگی‌های آن‌ها، کم‌توجهی به تنش برجا در توده‌ی سنگ، ناچیزشمردن 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 در اثر نقص مدل مفهومی در عملکرد آن‌ها حاکم است. در مجموع، مطابق آمار کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ،[۲] سدهای قوسی ۰/۷٪، سدهای وزنی کمتر از ۰/۹٪، سدهای پشت‌بنددار حدود ۲/۳٪، ولی سدهای چندقوسی بیش از همه، یعنی ۳/۸٪ (هر یک نسبت به تعداد موجود در گروه خودشان)، دچار آسیب جدی شده‌اند. گرچه آمار اخیر 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 می‌شوند تا نیاز بیشتری برای شناخت رفتار سدهای سالخورده تحت بارهای محتمل حس شود. برای دستیابی به چنین شناختی لازم است از تجربیات گذشته درس گرفت و از همکاری‌های گسترده‌ی ملی و بین‌المللی برای به اشتراک‌گذاشتن اطلاعات و تجربیات درباره‌ی رفتار سدهای بتنی استفاده شود، تا شاید موجب کاهش عدم قطعیت‌ها و افزایش قابلیت اطمینان و سطح ایمنی سدهای بتنی شود.

از جمله عوامل اصلی وقوع آسیب‌های جدی به سازه‌ی 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 کرد. در آمار کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ ضمن بررسی عملکرد سدهای بزرگ، دو عامل اصلی برای شکست سدها مشاهده می‌شود؛ که بیش از ۳۰٪ 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

[1] International Commission on Large Dams

[2] Federal Emergency Management Agency

استناد به این مقاله:

احمدی، محمدتقی و ولدخانی، احسان، ۱۴۰۴. مروری بر آسیب‌ها و تجربیات حاصل از حوادث مهم در سدهای بتنی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۷۳-۸۴.

https://doi.org/10.24200/j30.2025.65521.3380

شاپا الکترونیکی: ۴۷۷۶-۲۶۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای مطرح است، در حالی که مسئله‌ی نارسایی پی برای کلیه‌ی سدهای بزرگ موضوعیت دارد. البته عوامل دیگری نیز می‌توانند باعث بروز خرابی در سدهاس بتنی شوند که فراوانی و اهمیت کمتری نسبت به موارد اصلی دارند؛ عواملی، همچون: بهره‌برداری نادرست، خوردگی یا زوال بتن، و خسارت جنگی در این دسته قرار می‌گیرند. نکته‌ی مهم آنکه معمولاً بیش از یک عامل، اعم از اصلی و یا فرعی از مجموعه‌های اخیر، در وقوع یک حادثه‌ی مهم نقش دارد. در شناخت عوامل مذکور، کارهای ارزنده‌ای تاکنون توسط افرادی نظیر لومباردی و دیگران صورت‌گرفته است؛ لذا در پژوهش حاضر، تدوین نوینی با استناد به آخرین حوادث و مشاهده‌های سدهای بتنی مدنظر بوده است.

۲. عوامل آسیب‌های مهم به سدهای بتنی

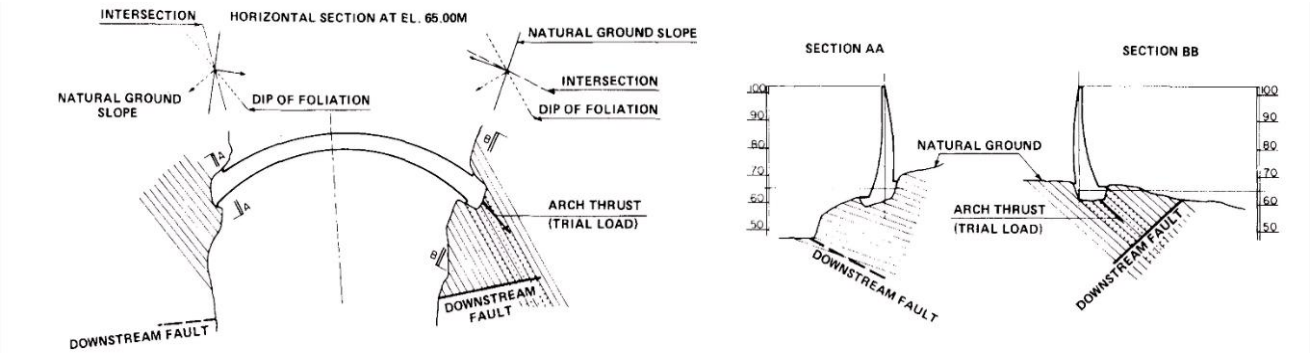
در ادامه، با استناد به مهم‌ترین حوادث رخداده و با هدف شناخت گونه‌های آسیب‌های سازه‌ای سدهای بتنی، نوع اثر و احیاناً نحوه‌ی ترمیم مؤثر در رفتار سد، ضمن اشاره به هر یک از عوامل اصلی مسبب حادثه، تشریح و تحلیل لازم مطرح شده است.

۱.۲. ضعف پی و کاستی‌های ژئوتکنیک

اساساً مهم‌ترین چالشی که در فرآیند 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 پرخطر آن شاید در مجموع به چند ده مورد نرسد، ولی تکرارپذیری آن ایجاب می‌کند که با هشیاری، تجربه‌های مثبت و منفی دیده شوند. وقوع حوادث متعدد به‌دلیل وجود نقص در پی‌های سدهای بتنی، که باعث آسیب‌های کوچک و بزرگ و بعضاً جدی و یا حتی انهدام در سدهای بتنی شده‌اند، نشانگر اهمیت بررسی‌های عمیق پی و تکیه‌گاه سد بتنی و یافتن هرگونه عامل مستعد برای ایجاد ناپایداری است.

سد قوسی مالپاسه[1] به ارتفاع ۶۶ متر و طول تاج ۲۳۳ متر در فرانسه، در سال ۱۹۵۹ ساخته و بهره‌برداری شده است. سد مالپاسه از نوع دو قوسی و بسیار نازک با ضخامت در تراز روی پی، ۶/۸ متر و در تراز تاج فقط ۱/۵ متر است؛ که در جریان اولین آبگیری در سال ۱۹۵۹، دچار لغزش در دیواره‌ی چپ شد و ترکی در رویه‌ی پایین‌دست سد در تراز نزدیک به پی به‌وجود آمد، که موردسنجش قرار نگرفت. به‌علاوه، بی‌توجهی در حین طراحی به گسلی که در پایین‌دست سد قرار داشت، مانع از شناخت سناریوی ناپایداری گوه‌ی بزرگ سمت چپ شده بود. از طرفی، برای سد مالپاسه، هیچ‌گونه پرده‌ی 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 فقط چند هفته پس از شروع بهره‌برداری از پروژه‌ی سد بود. سیل حاصل از شکست سد، شهر فرجوس[2] در پایین‌دست سد را به کلی نابود کرد و جان حدود ۵۰۰ نفر را گرفت. دلیل وقوع ترک ذکرشده، شرایط خاص چیدمانی در سیستم درزه و ضعف در سنگ پی سد مالپاسه بود. بخشی از پی سد از سنگ گنایس و با لایه‌هایی با مدول ضعیف درحدود ۱۰٪ مدول بتن بوده است. بنابراین، سنگ پی جناح چپ، کلاً سنگی ضعیف محسوب می‌شد. بدنه‌ی سد قوسی مالپاسه، نازک بوده و با توجه به نرمی پی، تمرکز تنش شدیدی در لایه‌ی نرم ایجاد کرده است. در تکیه‌گاه راست، فشار قوس‌ها در جهت عمود بر لایه‌ها بوده است؛ لذا، تنش به خوبی می‌توانست توزیع شود (شکل ۱). اما در تکیه‌گاه چپ فشار قوس، که تقریباً همه جا موازی با جهت‌های لایه‌ها بود، نمی‌توانست به‌خوبی توزیع یابد؛ به همین دلیل تمرکز فشاری در این ناحیه به‌وجود آمده و توسعه‌ی کرنش فشاری متمرکز موجب کاهش شدید نفوذپذیری در لایه‌ای از توده‌ی سنگ با ضخامت ثابت شده است. لایه‌ی اخیر تا صفحه‌ی گسلی با مقاومت برشی ناچیز در پایین‌دست ادامه داشته است. عملکرد ناحیه‌ی مذکور همانند یک پرده‌ی آب‌بند و البته بدون زهکشی، موجب توسعه‌ی فشار منفذی ناشی از هد هیدرواستاتیک کامل مخزن پر شده است. توده‌ی مزبور تحت فشار عظیم مخزن تمایل به پرتاب‌شدن به بیرون داشته و از ناحیه‌ی سطح گسل پایین‌دست لغزش کرده است. درنهایت، بلوک زیر پی حدود ۱/۲ متر جابجا شده است. سپس با رهاکردن بدنه، کل سد حول طره‌های سمت راست بدنه‌ی سد چرخیده و تحت فشار سیلاب مخزن از بلوک‌های سمت راست سد جدا شده است. وضعیت اتصال بدنه‌ی سد به تکیه‌گاه‌های چپ و راست سد مالپاسه و موقعیت گسل پایین‌دست سد در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

بحث: از عوامل وقوع حادثه‌ی ذکرشده، عمدتاً ضعف پی (جنس و هندسه‌ی توده‌ی سنگ و نیز گسل با مقاومت برشی ناچیز) محسوب می‌شود؛ لیکن عامل توقف یا کاهش موضعی تراوش و نیز عامل خطا در طراحی (عدم تأمین پرده‌ی آب‌بند و بی‌توجهی به سناریوهای ناپایداری گوه‌های تکیه‌گاهی) نقش مهمی در وقوع فاجعه داشته‌اند. نمونه‌ی سد مالپاسه، سناریوی پیچیده‌ی ترکیب چند عامل در انهدام یک سد بزرگ را بیان می‌کند. این نوع مکانیزم‌های تهدید،

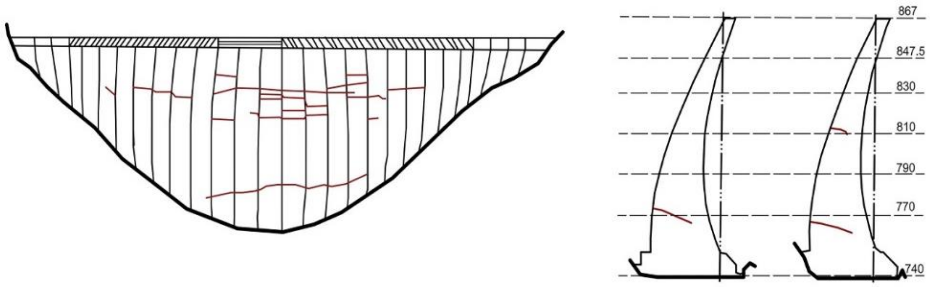


(**c**) (**b**) (**a**)

شکل ۱. موقعیت قرارگیری تکیه‌گاه‌های سد مالپاست و گسل پایین‌دست آن: (a) نمای مقطع (BB)،(b) نمای مقطع (AA)، (c) پلان سد.[۴]

[1] Malpasset

[2] Frejus



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

بالاترین خطر را برای پایداری سد دارند و در صورت خطا در زمان طراحی و عدم کشف موضوع قبل از اولین آبگیری‌ها، معمولاً چاره‌پذیر نیست.

سد قوسی ال‌آتازار[۳] به ارتفاع ۱۳۴ متر و طول تاج ۴۰۰ متر از نوع دو قوسی و دارای پولوینو و درز محیطی با نسبت دهانه به ارتفاع حدود ۳ در اسپانیا در سال ۱۹۷۲ به بهره‌برداری کامل رسیده است. اهمیت سد ال‌آتازار به‌دلیل تأمین آب شهر مادرید است. مخزن سد از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۲ به‌تدریج آبگیری و رفتار غیرعادی آن از اواخر سال ۱۹۷۱ آغاز شد. از همان اوایل آبگیری، رفتارسنجی سد نشانگر تغییرمکان بیشتر جناح چپ سد نسبت به جناح راست آن بوده است. این مسئله به‌دلیل سخت‌تربودن تکیه‌گاه سمت راست نسبت به تکیه‌گاه سمت چپ بوده است. بخشی از سختی آن از تکیه‌گاه بتنی ساخته‌شده در زیر سمت راست سد ناشی می‌شده است. اختلاف سختی و در نتیجه اختلاف میزان حرکت دو طرف سد نسبت به هم، باعث بازشدن برخی از درزهای قائم و نهایتاً ایجاد ترک افقی شدیدی در رویه‌ی بالادست سد و در تراز ۳۰ متر بالاتر از پی در سال ۱۹۷۷ شد. ترک مذکور موجب نشت آب به درون زهکش‌های سد با دبی ۹۰ لیتر در ثانیه می‌شده و متعاقباً رشد و افزایش طول آن به میزان ۴۵ متر باعث نشت آب با دبی ۵۴۰ لیتر در ثانیه شده است. به محل ترک ایجادشده در سال ۱۹۷۹، رزین خاصی در حالتی که مخزن تخلیه نشده بود، تزریق شد؛ زیرا مخزن سد ال‌آتازار، 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 شد. در سال ۱۹۸۳، تزریق پی برای تثبیت حرکت آن انجام شد، اما منجر به علاج‌بخشی قطعی نشد و رفتار پی در سال‌های بعد نیازمند تمهیدات اضافی، نظیر تزریق آب‌بندی و تحکیمی شد. نمای شماتیک ترک‌های روی سطح بالادست سد ال‌آتازار در شکل ۲ مشاهده می‌شود.[۳]

بازشدن درزهای انقباض ناشی از تفاوت شدید شکل‌پذیری تکیه‌گاهی در یک جناح از بدنه می‌تواند منجر به عقب‌نشینی تکیه‌گاه و در نتیجه، تضعیف قابل‌ملاحظه‌ی عملکرد قوسی و نهایتاً تحمیل بار اضافی هیدرواستاتیک بر طره‌ها و ترک‌خوردگی آن‌ها در وجه سراب، و حوادث بعدی باشد. به‌علاوه، بار وزن نیمه‌ی بالایی طره‌ها، که برآمدگی به سمت پایاب دارند، نیز موجب تشدید ترک‌خوردگی در نیمه‌ی بالایی بدنه شده است. باید توجه داشت که تحلیل بار وزن به روش توالی ساخت، نیازمند اتکاء بر عملکرد قوس‌هاست، که در مورد سد ال‌آتازار تضعیف شده بود. این نیز می‌تواند مصداقی از کاستی‌های ژئوتکنیکی پی به‌عنوان عامل اصلی و ضعف اطلاعات طراحی به‌عنوان عامل ثانوی تلقی شود.

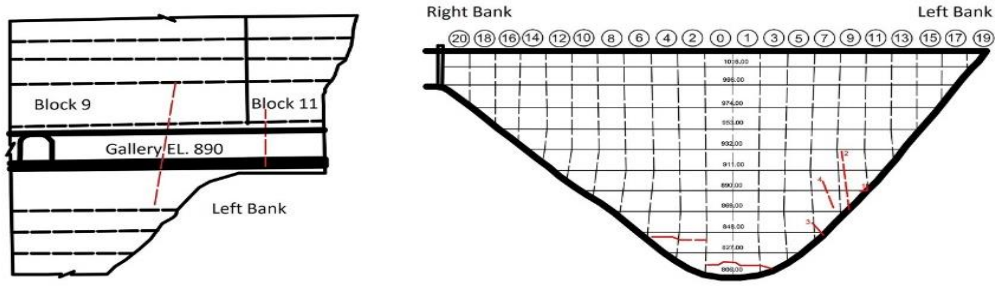
۲.۲. بارهای حرارتی

تنش‌های ناشی از بار حرارتی در سدهای بتنی به دو دسته‌ی تنش‌های حرارتی در زمان ساخت سد (ناشی از فرایند هیدراته‌شدن 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 می‌شود، که در حالت کنترل‌نشده موجب ترک‌های سطحی و حتی ترک‌های داخلی و عمیق می‌شود؛ لذا قسمت‌های ضخیم سدها بیشتر تحت تأثیر تهدید حرارت هیدراسیون سیمان خواهد بود. ترک‌های حرارتی حاد اگر در سطح بالادست رخ دهند، با وجود سطحی‌بودن، به‌دلیل امکان نفوذ آب در آن و گسترش حاصل‌شده، باید به‌وسیله‌ی تزریق ترمیم شوند. اما اگر ترک‌های مذکور، سطحی نباشند، ممکن است باعث آسیب جدی به سد شوند. از جمله سدهای آسیب‌دیده به دلیل بارهای حرارتی می‌توان به سدهای پیدرا دل آگیلا[۴]، کارون ۴، سد دانیل جانسون[۵]، و باگلیهار[۶] اشاره کرد؛ که در پژوهش حاضر به دو مورد از آن‌ها اشاره شده است.

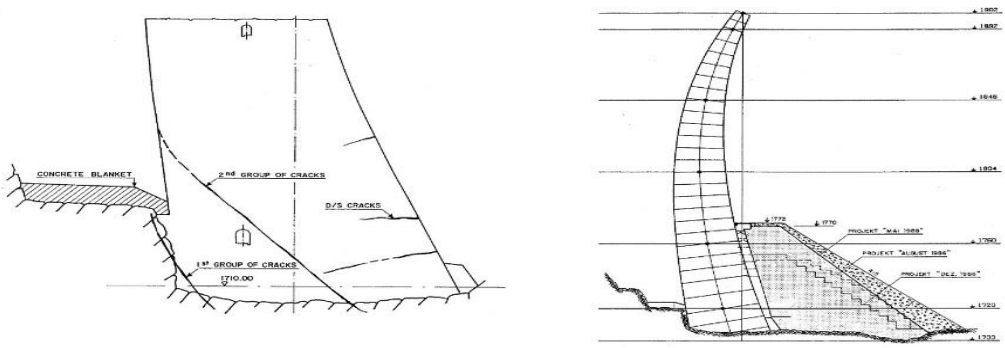
سد وزنی پیدرا دل آگیلا به ارتفاع ۱۸۰ متر و طول تاج ۸۰۰ متر در آرژانتین در سال ۱۹۹۲ به بهره‌برداری رسید؛ ولی برای آن، تأمین سیستم پس‌سرمایش کافی که امکان تعادل دمایی مناسب را ظرف چند ماه فراهم کند، منظور نشده بود. لذا بعد از مدتی، دمای بتن ناشی از هیدراسیون درون بدنه‌ی ضخیم سد وزنی به‌صورت احتمالاً آدیاباتیک رشد کرده و گرادیان حرارتی شدیدی نسبت به دمای سطح بالادست ایجاد شده 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 شد. نشت آب از درون ترک‌های مذکور در برخی گالری‌ها به حدود ۳۰۰ لیتر در ثانیه می‌رسید. رفتار سد پیدرا دل آگیلا، ابتدا با حفر تعداد زیادی چاهک زهکش در رویه‌ی بالادست منطقه‌ی ترک‌خورده برای کاهش رشد ترک‌ها کنترل شد. عملیات تزریق رزین و آب‌بندی ترک‌ها فقط 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[۷] و در حالت مخزن پر صورت گرفت.

احتمالاً مشابه همین اتفاق در سد قوسی کارون ۴ نیز رخ داده است؛ که با ۲۳۰ متر ارتفاع از پی و طول تاج ۴۴۰ متر به‌عنوان بلندترین سد کشور در سال ۱۳۹۰ بهره‌برداری شده و به‌دلیل آبگیری بسیار سریع و زودهنگام و انتخاب

[3] El Atazar
[4] Piedra del Águila
[5] Daniel-Johnson
[6] Baglihar
[7] Rodur method



شکل ۳. نمای ترک‌ها در گروه بلوک‌های ۷، ۹، و ۱۱، گالری تراز ۸۹۰ و گروه بلوک‌های ۰، ۱، ۲، و ۴ در سد کارون ۴.[۶]



شکل ۴. نمای شماتیک از ترک‌های ایجادشده در بدنه‌ی سد کولن‌براین و سازه‌ی پشتیبان آن.[۷]

فصل آبگیری نامناسب، ترک‌های حرارتی شدیدی را تجربه کرده است؛ لذا دو ترک قائم در بلوک‌های ۷ و ۹ نزدیک به تکیه‌گاه چپ آن، گسترش نزدیک به ۴۰ متری داشته و به‌صورتِ چند شاخه داخل بدنه امتداد یافته‌اند. جدا از پدیده‌ی اخیر، ترک‌های مورب دیگری نیز در سد پیدرا دل آگیلا رخ داده است، که در بخش بار تراوش در مورد آن بحث شده است (شکل ۳). ترک‌های مذکور توسط شرکت‌های اسپانیایی و ایرانی در سال‌های ۹۲ و ۹۳ با تزریق گراوت سیمانی و نیز رزین، تا حدودی ترمیم شده‌اند.

مشکل دیگری که در سد کارون ۴ وجود داشت، عدم تزریق کافی درزهای قائم در نیمه‌ی بالای بدنه بود، که موجب تغییر الگوی تغییرشکل بدنه و افزایش آن در قسمت بالایی طره‌ها شده است. هنگام تزریق درزهای انقباض در محدوده‌ی ۳۰ متر بالایی سد، به‌علت بار هیدرواستاتیک امکان تزریق فراهم نبوده و برای محدوده‌ی ۹۰ متر پایین‌تر از آن نیز، تزریق فقط در یک مرحله صورت گرفته است. اجرای عملیات تزریق مرحله‌ی دوم نیز بعد از پُرکردن عجولانه‌ی مخزن به علت بسته‌شدن جبری درزهای قائم ناشی از فشار مخزن ممکن نبوده است. از آنجایی که تزریق ناقص درزهای انقباض منجر به افزایش بار وارد بر طره‌ها می‌شود؛ لذا می‌تواند در شرایط بارهای غیرعادی، تنش‌های ناخواسته‌ی متعددی را در بدنه‌ی سد موجب شود. بدین ترتیب آسیب‌های سد کارون ۴ می‌توانند مصداقی از تأثیر دو عامل اصلی، یعنی بار حرارتی و خطاهای زمان ساخت، تلقی شوند. گرچه نمی‌توان ضعف موضعی پی و همان‌طور که در بخش بعدی مطرح شده است، اثر تراوش در زیر بدنه را نیز مرتبط ندانست.

۳.۲. بار تراوش

تراوش کنترل‌نشده در سدهای بتنی می‌تواند موجب ازدست‌رفتن آب داخل مخزن شود، از طرف دیگر، عدم هدایت صحیح آن، سبب افزایش فشار برکنش[۸] و فشار آب بر سطوح درزها و ترک‌های موجود در سطح بالادست سد می‌شود. فشارهای ذکرشده می‌توانند باعث ایجاد و رشد ترک‌ها در بدنه‌ی سد و محل اتصال پی به بدنه و نهایتاً منجر به ناپایداری سد شوند. انهدام سد مالپاسه درواقع طی سناریویی ترکیبی ناشی از مسائل پی و توقف پیش‌بینی‌نشده‌ی تراوش درون پی رخ داده است. مشکلات خاص حاصل از تراوش در سدهایی، نظیر: کولن‌براین[۹] ، اشلیگایس[۱۰]، و زیلرگروندل[۱۱] رخ داده است.

سد کولن‌براین به ارتفاع ۲۰۰ متر و طول تاج ۶۲۶ متر در اتریش در سال ۱۹۷۹ به بهره‌برداری رسیده است؛ که در یک دره‌ی (U) شکل وسیع ساخته شده است. این مسئله باعث تضعیف عملکرد قوسی و تحمیل بار اضافی خمشی به طره‌های سد شده است. طی اولین آبگیری سد کولن‌براین، ترکی در رویه‌ی بالادست سد و در پاشنه‌ی سد (تراز ۴۲ متر پایین‌تر از کف رودخانه) ایجاد شده است؛ که باعث نشت آب با دبی ۲۰۰ لیتر در ثانیه به پایین‌ترین گالری سد شده است (شکل ۴).[۷] علاوه‌بر این، پرده‌ی تزریق نیز هیچ‌گونه عملکردی از خود نشان نداده است؛ به‌گونه‌ای که هد فشار برکنش تقریباً معادل هد سطح آب مخزن بوده است. برای اصلاح شرایط ذکرشده، بلافاصله پرده‌ی تزریق با تزریق مجدد مقاوم‌سازی شده است. در سال ۱۹۸۰، با تخلیه‌ی مخزن و تزریق رزین پلی‌اورتان، ترک‌های رویه‌ی بالادست ترمیم شده‌اند. همزمان تزریق گراوت در درزهای قائم نیز تجدید شده است؛ لیکن در میزان آن کنترل دقیق صورت نگرفته و تزریق بیش از حد گراوت، موجب تغییرشکل طره‌ها به‌سوی بالادست شده است. در نتیجه، ترک‌های متعددی در رویه‌ی پایاب بخش پائینی طره‌های بزرگ رخ داده است. 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 شده است. نهایتاً، بدنه‌ی سد قابل‌اطمینان نبوده و چاره‌ای جز استفاده از یک سازه‌ی پشتیبان به‌عنوان سد پشت‌بند در پایین‌دست سد باقی نمانده بود. سازه‌ی مذکور با طراحی درز فعال خاصی در اتصال به بدنه‌ی سد اصلی ساخته شده است.

[8] Uplift pressure
[9] Koelnbrein
[10] Schlegeis
[11] Zillergründl Dam

بحث: در حادثه‌ی کولن‌براین، فرآیند تراوش و نقص پرده‌ی آب‌بند و نیز خطا در طراحی بدنه‌ی سد قوسی در یک دره‌ی وسیع، عامل اصلی ترک مرحله‌ی اول محسوب می‌شوند. لیکن عامل اصلی در ترک‌های مرحله‌ی دوم، که آسیب نهایی را موجب شده است، وقوع خطای اجرایی در حین عملیات ترمیم باید تلقی شود. البته ساخت یک سازه‌ی پشت‌بند، آخرین راه‌حل خطاهای غیرقابل جبران محسوب می‌شود.

سد قوسی اشلیگایس، نیز به ارتفاع ۱۳۱ متر و طول تاج ۷۲۵ متر در دره‌ای بسیار وسیع طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۱ در اتریش ساخته شده است. طی اولین آب‌گیری کامل در سال ۱۹۷۳، نشت غیرمنتظره‌ی ۲۰۰ لیتر در ثانیه در گالری تحتانی سد اشلیگایس مشاهده شد؛ که به‌دلیل تنش‌های کششی گسترده در سراب سد موجب بازشدگی درز اتصال بدنه و پی (درز محیطی سد) و رخداد ترک در پاشنه‌ی سد و ورود آب به داخل آن شده است. این مسئله به نوبه‌ی خود فشار برکنش قابل‌توجهی را در پاشنه‌ی سد به وجود آورده است، که منجر به گسترش ترک شده است. در سال ۱۹۸۳، با ساخت یک آب‌بند الاستیک که ۵ متر نیز در سنگ پی نفوذ داشته است، تهدید موجود تا حد مطلوبی کنترل شده است. به‌گونه‌ای که تا سال ۱۹۹۱ فقط یک‌بار دیگر نشت مشاهده شد، که آن هم با تزریق رزین برطرف شده است.

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

براساس یک فرضیه‌ی قابل‌اعتنا، مشابه این اتفاق در سد کارون ۴ نیز رخ داده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ترک‌هایی در بخش‌هایی پایینی طره‌های میانی و سمت راست بدنه‌ی سد کارون ۴ ایجاد شده و نفوذ آب را به گالری بدنه رقم زده است. به‌نظر می‌رسد اصلی‌ترین علت وقوع ترک‌های ایجادشده، آبگیری زودهنگام سد و نبود فرصت کافی برای پی جهت تأمین رفتار هماهنگ با پیکره‌ی سد طی زمان پُرشدن 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، حرکت‌های نسبی بین لایه‌های نفوذناپذیر شود. این در حالی است که بررسی‌های ژئوتکنیکی پی، وجود لایه‌ی رسی با نفوذپذیری کم را در زیر ناحیه‌ی میانی ترک‌خورده تأیید می‌کند.[۸] البته فرضیه‌های متعدد دیگری نیز برای توجیه علل دو گروه ترک مطرح‌شده در بدنه‌ی سد کارون وجود دارد، که ضعیف‌تر از دلایل اخیر است.

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

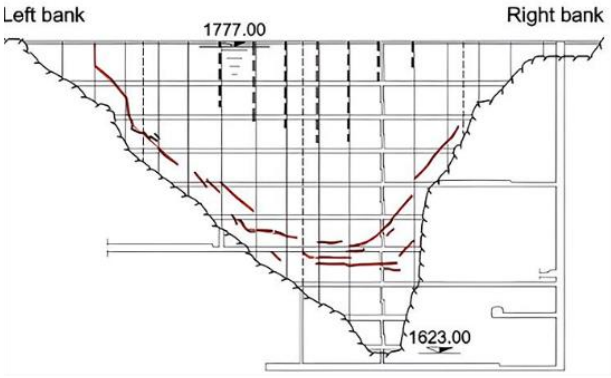
۴.۲. کاستی‌های زمین‌شناسی

با بررسی تاریخچه‌ی آسیب‌های جدی به سدهای بتنی می‌توان گفت مکانیزم‌هایی، نظیر: آزادسازی تنش‌های تکنونیک، زمین‌لغزش بزرگ مشرف به مخزن، نشست‌ها و تغییرمکان‌های ناشی از تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، نشست‌ها، و جابجایی‌های نامتقارن دیواره‌های دره، در بسیاری از سدها موجب بروز آسیب‌ها و ترک‌های جدی شده‌اند. سدهای زویزیر[۱۲]، وایونت[۱۳]، و جین‌پینگ[۱۴] از جمله سدهایی هستند که به‌دلیل 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 رسیده است؛ لغزش یک توده‌ی عظیم نابرجا به درون مخزن موجب روگذری بیش از ۱۵۰ میلیون مترمکعب از روی بدنه‌ی سد و ایجاد سیلی عظیم در پایاب شده است. یک شهر نابود شد و بیش از ۲۰۰۰ نفر کشته و مفقود شدند. ارتفاع روگذری به وجودآمده، بیشتر از ۹۰ متر تخمین زده شده است. بدنه‌ی سد، آسیب کمی در روی تاج متحمل شده بود؛ ولی بخش عمده‌ی حجم مخزن کاملاً از دست رفت. تجربه‌ی سد وایونت اهمیت مطالعات زمین‌شناسی را در دره‌های تنگ با دیواره‌های پر شیب، که معمولاً بهترین مکان برای مخزن سدها هستند، نشان می‌دهد. مطالعات زمین‌شناسی و پایداری باید روی دیواره‌ها و پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با توجه به اثر پُرشدگی مخزن و احتمال رخداد پدیده‌ی موئینگی در توده‌های فرسوده‌ی سطحی زمین، از قبل مورد پیش‌بینی و توجه خاص قرار گیرد. طراح سد وایونت از بابت کم‌توجهی به مطالعات زمین‌شناسی مربوط به شیب‌های مشرف به مخزن خودکشی کرده است. مطالب اخیر، 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 بوده است.[۹]

سد قوسی زویزیر نیز به ارتفاع ۱۵۶ متر و طول تاج ۲۵۶ متر در سوئیس در سال ۱۹۵۷ روی لایه‌ای از سنگ‌آهک ساخته شد و در زیر آن نیز یک سفره‌ی آب زیرزمینی محصورشده در یک لایه‌ی داگر[۱۵] قرار داشت. سد زویزیر تا سال ۱۹۷۸، عملکرد رضایت‌بخشی از خود نشان داد؛ اما ناگهان در سال ۱۹۷۸ طی چند روز، وقوع جابجایی‌های تاج به سمت بالادست و هم‌زمان نشست بدنه‌ی سد به‌صورت قابل‌توجهی مشاهده شده است.[۱۰] پس از بررسی‌ها مشخص شد که حفاری‌های مربوط به احداث یک معدن در اعماق زیر دره، موجب زهکشی آب از سفره‌ی زیرزمینی و نشست شدید لایه‌ی داگر شده است. این زهکشی شدید که در اعماق چند صد متری زیر سد بوده است، منجر به بازشدن دره‌های اطراف و بسته‌شدن دره‌ی زویزیر شده بود. در نتیجه، درزهای قائم در حدود ۵ میلی‌متر دچار بازشدگی و رویه‌ی پایاب تا ۱۵ میلی‌متر دچار ترک‌خوردگی‌های پراکنده شده‌اند. عرض دره‌ی زویزیر به میزان ۷ سانتی‌متر در تاج سد کاهش یافته و میزان نشست کف آن ۱۳ سانتی‌متر و حرکت محور سد در تاج آن به سمت سراب به ۱۲ سانتی‌متر رسیده است. تصمیم‌گیری محتاطانه برای کشف و چاره‌جویی و ترمیم سد زویزیر، منجر به خالی نگه‌داشتن مخزن به مدت ۱۰ سال شده است. طی این مدت سد با تزریق رزین اپوکسی درون ترک‌های آن و نیز آرماتورگذاری پرده‌ی تزریق در امتداد خط پی ترمیم شده است. در شکل ۵، ترک‌های ایجادشده بر رویه‌ی بالادست سد زویزیر مشاهده می‌شود. در سال ۱۹۸۸، که ۱۰ سال پس از حادثه است، سد کاملاً به عملکرد اولیه‌ی خود بازگشته است. در این حادثه، رفتار ناشناخته‌ی زمین که البته به‌خاطر دستبرد گروه ثالث در منطقه فعال شده بود، مسبب آسیب‌ها به یک سد سالم و با عملکرد خوب شد. هشیاری مهندسان در شناسایی به‌موقع عامل تحریک در حد یک نمونه‌ی تاریخی تلقی می‌شود. از طرفی، اهمیت پایش روزانه‌ی رفتار

[12] Zeuzier
[13] Vajont
[14] Jinping
[15] Dogger

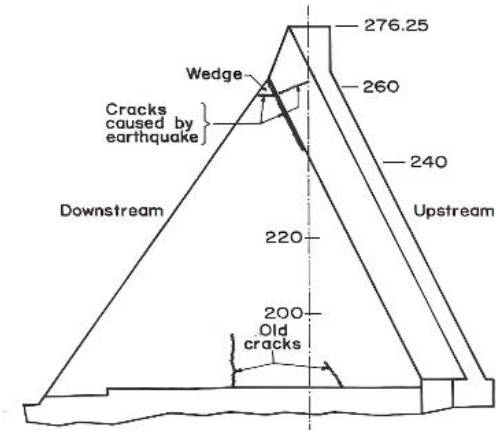


شکل ۵. بازشدگی برخی از درزهای انقباض و ترک‌های ایجادشده در رویه‌ی بالادست سد زویزیر.[۵ و ۱۱]

سدهای بزرگ موردتأکید قرار گرفته است؛ چرا که گذشت چند روز از ادامه‌ی نشست پی سد زویزیر، قطعاً منجر به فاجعه‌ای بزرگ می‌شد.

۵.۲. بار زلزله

اساساً تعداد بسیار کمی از سدهای بتنی بزرگ به‌دلیل زلزله دچار آسیب شده‌اند؛ و درواقع، تاکنون هیچ موردی از انهدام یا رهاسازی سریع آب مخزن ناشی از زلزله در سدهای بزرگ بتنی ثبت نشده است.[۱۲] فقط یک سد ساخته‌شده روی گسلی فعال، دچار شکست جدی و نه انهدام شده است؛ که البته با رهاسازی آرام آب، مخزن شده است. اما برخی از سدهای بتنی بزرگ، نظیر: سفیدرود، کویناً[۱۶]، پاکویما[۱۷]، و سین‌فنگ‌جیانگ[۱۸] به‌دلیل زلزله دچار آسیب‌های جدی شده‌اند. نکته‌ی مهم در شناخت عامل زلزله آن است که شدت زلزله در سایت سدهای بزرگ، ناشی از لرزه‌خیزی طبیعی منطقه و تا حد زیادی قابل‌پیش‌بینی بوده است؛ لیکن براساس برخی مشاهدات و مطالعات،[۱۳-۱۵] و بولتن ۱۳۷ کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ،[۱۶] ایجاد مخزن سد و تغییرات تراز سطح آب آن می‌تواند موجب تشدید لرزه‌خیزی منطقه‌ی اطراف سد شود. این پدیده با اصطلاح لرزه‌خیزی القایی مخزن (RTS)[۱۹] شناخته می‌شود و شامل مجموعه‌ای از رویدادهای لرزه‌ای حین و پس از آبگیری مخزن است. درواقع، به‌دلیل کنش وزنی آب مخزن و توسعه‌ی فشار آب منفذی در ناحیه‌ی گسله، که به‌صورت بحرانی تحت تنش تکتونیکی قرار گرفته است، رخداد لرزه‌ای شتاب می‌گیرد.[۱۶] بنابراین، لازمه‌ی وقوع پدیده‌ی RTS، وجود گسل یا گسل‌های فعالی است که به حد گسیختگی خود نزدیک باشند. معمولاً پدیده‌ی RTS، که تا حد زیادی تصادفی تلقی می‌شود، به مخزن سدهایی با ارتفاع بیش از ۱۰۰ متر، و یا با ظرفیت بیش از ۵۰۰ میلیون مترمکعب و یا با سدهای کوچک‌تر که در مناطقی با حساسیت تکتونیکی بالا قرار دارند، مرتبط دانسته می‌شود.[۱۷] تاکنون بیش از صد سد تحت زلزله‌های کوچک و بزرگ ناشی از پدیده‌ی RTS قرار گرفته‌اند، که از جمله‌ی 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[۲۰] در آمریکا با زلزله‌ی سال ۱۹۳۵ با بزرگای ۵ اشاره کرد. نکته‌ی مهم آنکه، گرچه زلزله‌های القایی کوچک حین اولین پُرشدن مخزن به وفور اتفاق می‌افتند، لیکن بزرگ‌ترین زلزله‌ی القایی معمولاً پس از پُرشدن کامل مخزن و در فاصله‌ی 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.

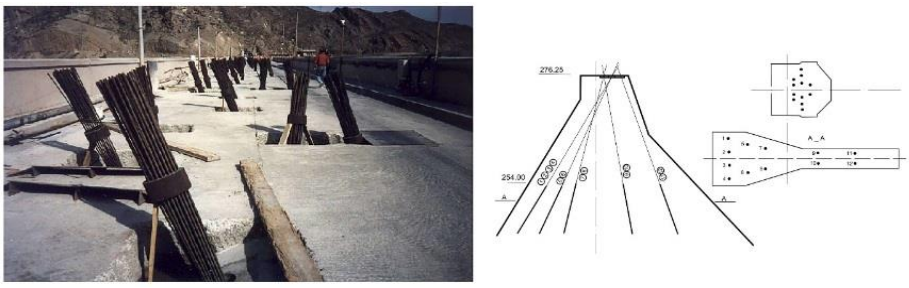


شکل ۶. ترک‌های سازه‌ای در سد سفیدرود پس از تحمل زلزله‌ی سال ۱۳۶۹.

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 شده و ضخامت آن در تراز تاج ۱۰/۵ متر و در تراز پی حدود ۱۰۰ متر بوده و بدنه‌ی آن از ۲۳ بلوک با عرض ۱۴ متر تشکیل شده است. سد سفیدرود در سال ۱۳۶۹ زلزله‌ی رودبار- منجیل را به بزرگای ۷/۴ و با عمق کانونی ۱۹ کیلومتر تجربه کرد. مرکز زمین‌لرزه‌ی مذکور در فاصله‌ی حدود ۳۴ کیلومتری از سد بود و همچنین بعد از آن، چندین پس‌لرزه با بزرگای بیش از ۶ ریشتر رخ داد. به‌علت نقص فنی در شتاب‌نگار واقع در محل سد حین وقوع زمین‌لرزه، نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت ثبت‌شده از زلزله، متعلق به شتاب‌نگاری در فاصله‌ی حدود ۴۰ کیلومتری از محل سد بوده است. مؤلفه‌ی افقی بیشینه‌ی شتاب زلزله معادل g ۰/۶۵ و مؤلفه‌ی قائم آن معادل g ۰/۲۵ بوده است. مقدار بیشینه‌ی شتاب افقی زلزله در محل سد معادل g ۰/۷ تخمین زده شده است. این در حالی بود که ضریب زلزله‌ی طراحی سد سفیدرود 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 (ترازمخزن پُر) بوده است. عمده‌ی خسارت‌ها شامل یک ترک افقی سراسری در امتداد درز اجرایی در همه‌ی بلوک‌ها (به استثناء بلوک ۵) در تراز تغییر شیب در وجه پایین‌دست سد بوده است. در یکی از بلوک‌های میانی، ترک در چهار تراز مختلف ایجاد شده است، که بیش از تعداد ترک‌های سایر بلوک‌ها بوده است. بخشی از دیوار جان‌پناه در تراز تاج سد دچار ترک و آسیب جدی شده و نیز در تراز مذکور، اتاق نگهبانی ساخته‌شده از مصالح بنایی تقریباً ناپدید شده بود. قطعات بزرگ سنگ تا مجاورت سازه‌ی پوسته‌ای جام سرریز نیلوفری ریزش کرد، که خوشبختانه توسط حفاظ بتنی موجود در آنجا از سقوط آن به درون سازه‌ی ظریف سرریز پیشگیری شده بود. در شکل ۶، ترک‌های سازه‌ای سد سفیدرود پس از وقوع زلزله مشاهده می‌شود.

علاوه‌بر ترک‌های افقی فوق، خردشدن بتن در امتداد برخی از درزهای قائم نیز مشاهده شده است.[۱۸] در اثر آسیب به درزهای قائم، جریان شدید آب در گالری تحتانی بدنه‌ی سد نیز به‌وقوع پیوسته است. به سبب اهمیت اقتصادی مخزن

[16] Koyna
[17] Pacoima
[18] Xinfengjiang
[19] Reservoir-Triggered Seismicity
[20] Hoover



(**c**) (**b**) (**a**)

شکل ۷. نصب مهارهای پس‌کشیده در سد سفیدرود: (a) پلان آرایش کابل‌های مهاری پس‌کشیده در تاج و در تراز ۲۵۰ از یک مونولیت؛ (b) نمای نیمرخ آرایش کابل‌های یک مونولیت؛ (c) تصویری از استقرار اولیه‌ی کابل‌های مهاری در سطح تاج سد.[۱۸]

برای کشتزارهای برنج گیلان، بلافاصله بعد از وقوع زلزله، مطالعات، محاسبات، قراردادها با پیمانکاران مجرب بین‌المللی، و نهایتاً عملیات ترمیم سد آغاز شد. عملیات مذکور به موقع انجام شد و در نتیجه، ظرف یک‌سال سد به بهره‌برداری کامل خود برگشت.[۱۹ و ۲۰] عملیات ترمیم و تعمیر با هدف آب‌بندکردن بلوک‌های ترک‌خورده، بالابردن مقاومت برشی درزهای اجرایی ترک‌خورده، و آب‌بندی با استفاده از تزریق رزین و بهبود مقاومت درزهای افقی فوقانی با نصب کابل‌های مهاری پس‌کشیده‌ی شبه‌قائم و با عبور از درزهای افقی گسیخته‌شده انجام پذیرفته است. در حادثه‌ی اخیر، که ناشی از یک زلزله‌ی طبیعی منطقه‌ای و به مراتب قوی‌تر از زلزله‌ی طراحی سد بود، حفاری‌هایی درون بدنه صورت گرفت که مشخص شد در هنگام ساخت بدنه‌ی سد نیز سهل‌انگاری‌های زیادی به‌ویژه در کیفیت بتن‌ریزی و نیز در آماده‌سازی درزهای افقی رخ داده بود. در شکل ۷، بخشی از عملیات نصب مهار و شکل شماتیک محل نصب مهارها مشاهده می‌شود.

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

سد پاکویما، یک سد بتنی قوسی نسبتاً ضخیم به ارتفاع ۱۱۳ متر و طول تاج ۱۸۰ متر بوده است، که در نزدیکی شهر لس‌آنجلس کالیفرنیا واقع شده و ساخت آن در سال ۱۹۲۸ به اتمام رسیده است. تکیه‌گاه سد پاکویما در جناح چپ فاقد گوشته‌ی کافی سنگی بوده است، ولی یک بلوک رانشی[۲۱] بتنی داشته است. بدنه‌ی سد از ۱۱ بلوک به عرض ۱۵/۳ متر با درزهای قائم تشکیل شده است، که در بین آن‌ها کلیدهای برشی به ارتفاع ۳۰سانتی‌متر تعبیه شده‌اند. طی زلزله‌ی سن‌فرناندو در سال ۱۹۷۱، بیشینه‌ی شتاب‌های ۱/۲۵g در هر دو راستای افقی و ۰/۷ g در راستای قائم در تکیه‌گاه مجاور تاج آن ثبت شده است، در حالی که بیشینه‌ی شتاب افقی زمین در کف دره فقط ۰/۵ g بوده است. مشاهده‌ی این موضوع، که آن زمان موردتردید قرار گرفته بود، مؤید بزرگ‌نمایی توپوگرافیک در ساختگاه‌های دره‌ای بوده است، که بعداً در زلزله‌ی ۱۹۹۴ نورثریج به بزرگی ۶/۷ نیز مجدداً مشاهده و پذیرفته شد. زلزله‌ی ۱۹۷۱ به بدنه‌ی سد آسیبی نزد، ولی منجر به جدایی قوس به میزان ۱۰ میلی‌متر از بلوک رانشی وزنی تکیه‌گاهی آن در تراز تاج و آسیب های محدودی به توده‌سنگ تکیه‌گاهی شد. آن‌زمان با پس‌تنیده‌کردن توده‌سنگ تکیه‌گاه فوقانی جناح آسیب‌دیده، بدنه‌ی سد تقویت شد و مورد پایش دائمی قرار گرفت. طی زلزله‌ی ۱۹۹۴، بیشینه‌ی شتاب افقی زمین درکف دره به ۰/۵ g و بیشینه‌ی شتاب افقی تکیه‌گاه سمت چپ تاج سد به ۱/۵۸ g رسید و منجر به بازشدگی ۵ سانتی‌متری درز انقباض مجاور بلوک رانشی در محل ترمیم‌شده‌ی قبلی شد. اما کابل‌های فولادی، از لغزش توده‌سنگی مجاور تراست بلوک جلوگیری کرد.[۲۱] به‌عنوان نمونه‌ای از مهندسی موفق، گرچه عامل زلزله با شدتی به مراتب بیش از سطح زلزله‌ی طراحی و حتی با تشدید توپوگرافیک در حادثه‌ی مذکور بروز کرد، لیکن با هشیاری متولیان سد به‌خوبی مهار شد و از حوادث سخت و تلخ احتمالی جلوگیری کرد.

سد شی‌کانگ[۲۲] در تایوان نیز یک سد بتنی وزنی به ارتفاع ۲۱/۴ متر و تاجی به طول ۳۵۷ متر با ۱۸ سرریز دریچه‌ای، در واقع یک سد انحرافی محدود، ولی با مخزنی نسبتاً بزرگ است، که بیشترین آسیب را طی زلزله‌ی چیچی[۲۳] به خود دیده است. زلزله‌ی مذکور در سال ۱۹۹۹ میلادی با بزرگای ۷/۶ ریشتر و در عمق ۸ کیلومتری زمین و در فاصله‌ی ۴۰ کیلومتری ساختگاه سد رخ داده است. شتاب بیشینه‌ی افقی زمین، در ساختگاه ۰/۵۱ g و شتاب قائم ۰/۵۳ g بوده است. گسل مسبب زلزله‌ی چیچی، گسل چلونگ‌پو[۲۴] بوده است، که از ۳۰۰ متری بدنه‌ی سد گذشته و در هنگام طراحی شناخته شده است. لیکن در هنگام زلزله‌ی مذکور، گسل چلونگ‌پو به چند شاخه‌ی گسل فرعی در منطقه تقسیم شده است، که یکی از شاخه‌های آن محور سد را قطع کرده و مطابق شکل ۸، توانسته است دریچه‌ی سرریز را در بلوک‌های ۱۶ تا ۱۸ در مجاورت تکیه‌گاه راست تخریب کند. سایر بلوک‌ها آسیب زیادی ندیده‌اند؛ که بیانگر عملکرد فوق‌العاده‌ای از یک سد وزنی در برابر زلزله‌ی شدید میدان نزدیک



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

[21] Thrust block
[22] Shihkang
[23] Chi-chi
[24] Chelung-pu fault

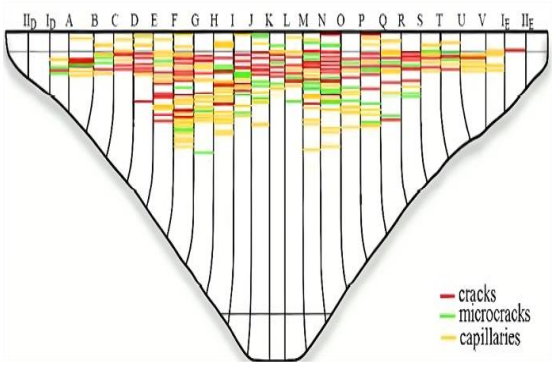
محسوب می‌شود. یکی دیگر از شاخه‌های فرعی گسل چلونگ‌پو، تونل آبگیر واقع در تکیه‌گاه چپ را قطع کرده و آن را از هم گسسته است. در نتیجه‌ی گسلش اخیر، محور سد حدود ۷ متر افقی جابجا شده و تغییرمکان نسبی قائم در حدود ۹ متر بین دو قسمت جداشده‌ی بدنه‌ی سد رخ داده است. حادثه‌ی اخیر، آزمونی موفق از طراحی هوشمندانه در سازه‌ی سد محسوب می‌شود، که در برابر زلزله‌ی شدید روی گسل با مؤلفه‌های بسیاربزرگ تغییرمکانی و شتاب بالا، عملکرد کاملاً قابل‌قبولی از خود نشان داده است. طی حادثه‌ی ذکرشده، درواقع سد منهدم نشده و نیز مخزن را به‌صورت ناگهانی رها نکرده است؛ بدین ترتیب ضابطه‌های ICOLD را برای زلزله‌های بیشینه به‌خوبی تأمین کرده است.

۶.۲. 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 است، به‌کارنگرفتن تجربه‌های فنی کافی و یا دانش فنی روز طی مراحل طراحی، اجرا، و حتی بهره‌برداری بوده است. علاوه‌بر این، موضوع دخالت مدیران اجرایی حاکم با انگیزه‌های سیاسی، شخصی، و غیراصولی نیز از بزرگ‌ترین عوامل آسیب‌های بزرگ به سدها بوده است. در چنین شرایطی که ناشی از خطای انسانی است، با نادیده‌گرفتن هر یک از ویژگی‌های مصالح، شرایط پی، مکانیزم سازه، و رژیم بارگذاری به‌صورت اثر حرارت، نارسایی پی، اثر تراوش، و غیره، هر اتفاقی اعم از آسیب درازمدت و یا انهدام سیستم، امکان رخداد خواهد داشت. سدهای کابریل[۲۵]، زروراپلا[۲۶]، ژیااووان[۲۷]، سنت‌فرانسیس[۲۸]، فلومن‌دوسا[۲۹]، گلنو[۳۰]، و وِگادِترا[۳۱] از جمله مشهورترین نمونه‌های سدهای آسیب‌دیده به‌دلیل نقص در محاسبه یا ساخت، یا تصمیم‌های غیرفنی مدیران اجرایی هستند.

در میانه‌ی 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 بدنه‌ی سد به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. لیکن در هنگام بهره‌برداری و در جریان اولین آبگیری، با شگفتی ترک‌های افقی فراوانی مطابق آنچه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، روی وجه پایین‌دست بخش فوقانی بدنه و منطبق بر درزهای انقطاع بتن‌ریزی به‌وجود آمدند، که آب‌دهی زیادی نیز نشان داده‌اند. علاوه‌بر این، سال‌ها بعد بتن سد کابریل به‌خاطر واکنش‌زابودن سنگ‌دانه‌ها، دچار واکنش‌های قلیایی نیز شده و ترک‌های بیشتری در آن رخ داده است. در سال ۱۹۸۱، عملیات تزریق روی ترک‌ها در کنار تزریق مجدد درزهای انقباض و اصلاح شرایط پی نیز انجام شده است، اما پس از آبگیری دوباره در سال ۱۹۹۶، ترک‌های مشابهی در همان نواحی مشاهده شده است.[۲۱] جدا از بحث واکنش قلیایی بتن، که در آن زمان ناشناخته بود، تغییرات غیرکارشناسانه در هندسه‌ی سد، نظیر افزایش ضخامت بالاترین قوس بدنه، موجب افزایش سختی آن و تغییر علامت گشتاور خمشی در طره‌های متکی بر آن شده و ترک‌های متعددی در طره‌ها ایجاد کرده است.

بحث: جدا از پدیده‌ی درازمدت واکنش قلیایی، رخداد ترک‌های مهم از ابتدای آبگیری، ناشی از تغییرات دستوری در طراحی، بدون مطالعه‌ی تفصیلی جامع



شکل ۹. وضعیت ترک‌های رویه‌ی پایین‌دست سد کابریل پس از اولین آب‌گیری.[۲۳]

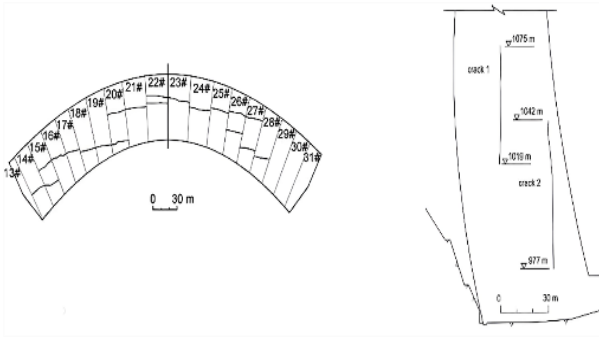
و صرف وقت کافی بوده‌اند و این نوع خطاها می‌توانند برای سدهای بزرگ بسیار مسئله‌آفرین باشند. گرچه این یک عامل خطا در طراحی محسوب می‌شود، لیکن ناشی از دخالت‌های مدیریتی در نقض حاکمیت دانشی و کارشناسانه رخ داده است. در بسیاری از سدهای دیگر نیز خطاهای ذکرشده، کم و بیش رخ داده و منجر به خسارت‌های سنگین به سرمایه‌های ملی شده‌اند.

همچنین، سد زروراپلا، یک سد قوسی به ارتفاع ۱۵۱ متر و طول تاج ۵۰۴ متر در سوئیس است، که عملیات ساخت آن در سال ۱۹۵۷ خاتمه یافته است. پی سد زروراپلا از لایه‌های گنایس کریستالی[۳۲] با شیب متمایل به سمت تکیه‌گاه چپ ساخته شده است. یکی از ویژگی‌های سد زروراپلا، شکل دره‌ی نامتقارن و مدول الاستیسیته‌ی نامتقارن پی است. این عدم تقارن حین ساخت کاملاً آشکار بوده است، به‌طوری که حفاری‌های بیشتری در تکیه‌گاه راست نسبت به تکیه‌گاه چپ به‌منظور رفع مشکل بلوک‌های سُست انجام شده است. به‌علاوه، 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 هندسه‌ی پی و پدیده‌ی تمرکز تنش ناشی از جنس سخت لایه‌های زمین بوده است، طی اولین سال‌های عمر سد و در سال ۱۹۶۰ موجب تغییرشکل‌های ناهمگن، ترک‌های عمیق در سطح پایین‌دست آن، و نیز بازشدگی درزهای قائم شده است.

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

سد قوسی ژیااووان نیز مشکلات مربوط به ساخت را البته به شکل دیگری تجربه کرده است. سد ژیااووان که با ارتفاع ۲۹۲ متر و طول تاج ۹۰۲ متر، یکی از چهار سد بلند بتنی جهان است؛ بدنه‌ای بسیار ضخیم و آسیب‌پذیر در برابر گرمای هیدراسیون سیمان داشته است. لذا در طراحی سیستم پس‌سرمایش آن، ضابطه‌ی اجرایی دقیق و آزموده‌ای به‌کار نرفته و در نتیجه، ترک‌های متعدد

[25] Cabril
[26] Zervreila
[27] Xiaowan
[28] St. Francis
[29] Flumendosa
[30] Gleno
[31] Vega de Terra
[32] Crystal Gneiss



شکل ۱۰. توزیع ترک‌های سد ژیااووان در یک تراز و یک نیمرخ نمونه.[۵ و ۲۵]

و قابل‌توجهی را به‌دلیل تنش‌های کششی زیاد در اثر کاهش دمای بیش از حد بتن طی دومین مرحله‌ی پس‌سرمایش، قبل از تزریق درزهای قائم، متحمل شده است. توزیع ترک‌های اخیر در بدنه‌ی سد ژیااووان در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. 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 استفاده شده و به هر حال عامل ایجاد شوک سرمایی در درون بدنه، موجب ترک‌های بسیار بزرگی در بدنه‌ی سد شده است.

شکست سد سن‌فرانسیس در آمریکا، نیز که در اثر تراوش رخ داده است؛ در واقع، نتیجه‌ی اشتباه فاحش انسانی بوده است. سد سن‌فرانسیس با دستور مدیریتی در حین ساخت، دو بار افزایش ارتفاع به میزان جمعاً حدود ۱۰٪ نسبت به ارتفاع طراحی اولیه داشته است. تصمیم‌سازی‌های متنوع در حین طراحی و ساختمان سد فقط به عهده‌ی یک فرد ارشد ناآشنا با پدیده‌های زمین‌شناسی بوده است. سد مذکور، ۵ روز بعد از آبگیری با ناپایداری تکیه‌گاهی منهدم شد.

سد گلنو، به ارتفاع ۴۶ متر در ایتالیا در سال‌های دهه‌ی ۱۹۲۰ به‌صورت یک سد پشت‌بنددار ساخته شد. در سد گلنو نیز در زمان ساخت، ۳۰٪ 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 شد.

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 و تلفاتی به میزان ۱۵۰ نفر را موجب شده است. علت آن اشتباه فاحش در تحلیل رفتار ترکیبی بتن و مصالح بنایی و عدم تأمین ایمنی لغزشی در بستر زیرین پشت‌بندها بوده است.[۹]

۳. تحلیل سیستمی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بحث و بررسی بزرگ‌ترین حوادث آسیب‌زا برای سدهای بتنی، که به دلایل متنوع رخ داده‌اند، پرداخته شده است. خلاصه‌ی مجموعه‌ی به‌دست‌آمده در جدول ۱ با ذکر عامل اصلی و عوامل ثانوی برای هر حادثه ارائه 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 تصمیم‌های سیاسی بوده است. نکته‌ی 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 کالیبره‌کردن آن (مدل تنظیم‌نشده- از نظر شناختی[۳۳]– مطابق ستون ششم جدول ۱) و یا ناشی از نقص فاحش در مدلی بدون توجه به یک یا چند مؤلفه‌ی مهم فیزیکی (مدل ناقص- از نظر هستی‌شناسی و فهم ساختاری[۳۴] – مطابق ستون هفتم جدول ۱) بوده است. به‌عبارتی، باز هم خطای انسانی به‌صورت غفلت از به‌کارگیری مدل مناسب یا نقص اطلاعات یا جهل در فهم مسئله، که همگی عمدتاً ناشی از به‌کارگیری افراد و کادر فنی ناکارآمد است، مقصر اصلی محسوب می‌شود. البته خطای آماری یا تصادفی در به‌کارگیری اطلاعات فنی ساختگاه (از نظر تصادف و شانس[۳۵] – مطابق ستون پنجم جدول ۱ همواره وجود دارد، ولی با هوشمندی و دانش لازم در به‌کارگیری آمار معتبر می‌توان از تهدید آن مصون ماند.

لذا همان‌طور که در ستون آخر جدول مشاهده می‌شود، اگرچه عوامل ثانویه‌ی متعددی در هر واقعه شرکت دارند، لیکن آنچه پای آن‌ها را در ایجاد شرایط کافی برای وقوع یک حادثه‌ی بزرگ باز می‌کند، بیشتر همان خطای انسانی است. در واقع، قریب به‌اتفاق حوادث سدهای بزرگ تحت‌تأثیر خطای انسانی (در موارد: طراحی، اجرا، تصمیم‌سازی، تأمین اطلاعات کافی فنی، و یا 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 به‌ترتیب اهمیت باز شناخت. پس از خطاهای انسانی، که در همه‌ی موارد انهدام حضور داشته‌اند، مشکلات و مسائل پی مطرح بوده است، که در سه مورد حضور مستقیم و نهایتاً بعد از آن، عامل تراوش درون پی که دست‌کم در دو مورد حضور داشته است، مهم‌ترین عوامل بعدی بوده‌اند. البته مسئله‌ی تراوش را می‌توان جزء مسائل پی فرض کرد؛ و به‌عبارت‌دیگر، در سدهای بتنی، خطاهای انسانی و مسائل پی با اختلاف زیاد، مهم‌ترین عوامل خطرپذیری هستند.

نکته‌ی دیگر آنکه از میان مجموعه‌ی حوادث بزرگ معرفی‌شده در پژوهش حاضر (که به نحوی معرف بزرگ‌ترین حوادث در سدهای بتنی محسوب می‌شوند)، بیشتر موارد مربوط به زمان اولین آبگیری و یا اولین سال‌های عمر سد و مخزن بوده‌اند. بدین ترتیب مشخص می‌شود که خطرپذیرترین زمان حیات سد، زمان اولین آبگیری مخزن آن است؛ بنابراین، باید طبق نظام انضباطی بسیار شدید و با رعایت استانداردهای سخت‌گیرانه‌ی کنترل کیفیت و با استفاده از دستورالعمل‌های کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ و با بهره‌گیری از تجربه‌ی ملت‌های دیگر، همراه با رفتارسنجی هدفمند، تجزیه‌وتحلیل مشاهده‌ها و سعی و خطای احتیاط‌آمیز، مخزن سد اولین آبگیری خود را تجربه کند. سازندگان باید بدانند که بسیاری از آسیب‌ها می‌توانند به انهدام پروژه منتهی شوند. برای آسیب‌های سازه‌ای دیگر حتی در صورت ترمیم پرهزینه و پیچیده، حاشیه‌ی ایمنی سد از دست می‌رود و یا بسیار کاهش می‌یابد. به هر حال، در بیشتر قریب به اتفاق موارد ذکرشده نیز اثر نهایی آسیب، جبران‌ناپذیر است و تاب‌آوری سد را در برابر عوامل حاد احتمالی و مهاجم بعدی، نظیر زلزله و یا کاستی‌های ناشناخته‌ی زمین‌شناسی به‌شدت کاهش می‌دهد.

[33] Epistemic

[34] Ontological

[35] Aleatory

جدول ۱. خلاصه‌ی حوادث بزرگ سدهای بتنی با تحلیل عوامل مسبب.

Primary Cause of Failure	Dam Name	Dam Type**	Year of Incident	Uncertainty of Accident Factors*			Time of Incident	Consequence	Secondary Factors & Other Considerations
				Aleatory	Model Calibration (Epistemic)	Model Deficiency (Ontological) & Human Error			
Foundation Weakness & Geotechnical Deficiencies	Malpasset	VA	1959	1	3	3	First impoundment	Total failure and collapse	Seepage load + design error
	El Atazar	VA	1971	1	3	1	Mid-life (Operation phase)	Repeated repairs	Design error
Thermal Loads	Piedra del Aguila	PG	1992	1	3	2	First impoundment	Repair	Construction error
Thermal Loads + Seepage	Karun-4	VA	2010	1	2	3	First impoundment	Partial repair	Construction error + foundation weakness
Seepage Load	Koelnbrein	VA	1979	1	2	2	First impoundment	Repair + Construction of a Supporting dam	Design and construction error
	Schlegeis	VA	1973	1	1	1	First impoundment	Repair	Design error
	St. Francis	GA	1928	2	3	3	First impoundment	Total failure and collapse	Multiple human, design, and construction errors
Geological Deficiencies	Vajont	VA	1960	2	1	3	First impoundment	Reservoir impairment (catastrophic outpouring)	Human error
	Zeuzier	VA	1978	1	1	-	Mid-life (Operation phase)	Repair	Timely awareness
Earthquake Load	Sefid-Rud	CB	1990	2	1	2	Mid-life (Operation phase)	Repair and strengthening	Construction Error
	Pacoima	VA	1971 & 1994	1	1	1	Mid-life (Operation phase)	Repair and strengthening	Awareness and lessons to learn
	Shihkang	PG	1999	2	-	1	Mid-life (Operation phase)	Not specified	Excellent performance
	Koyna	PG	1967	2	3	1	First impoundment	Repair + Construction of an additional buttress	Design and material quality deficiencies
Design and/or Construction Errors	Cabril	VA	1953	1	1	3	First impoundment	Repeated repairs	Material quality deficiencies
	Zervreila	VA	1960	2	2	1	First impoundment	Repeated repairs	Geometric and geotechnical inadequacies of foundation
	Xiaowan	VA	2009	1	3	2	First year of construction	Repair	Thermal loading
	Gleno	CB	1923	1	1	3	First impoundment	Total failure and collapse	Foundation and material deficiencies
	Vega de Terra	CB	1959	1	2	3	First impoundment	Total failure and collapse	Foundation and material deficiencies

* 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 پشت‌بندار.

قدردانی

اثر حاضر، تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره‌ی ۴۰۳۴۰۲۴ انجام شده است. بدین‌وسیله از بنیاد INSF قدردانی می‌شود.

References- منابع

1. Hariri-Ardebili, M.A., Salamon, J., Mazza, G., Tosun, H. and Xu, B., 2020. Advances in dam engineering. *Infrastructures*, *5*(5), pp. 39. DOI: https://doi.org/10.3390/infrastructures5050039.
2. ICOLD Incident database bulletin 99 update statistical analysis of dam failures committee on dam safety. 2019. International Commission on Large Dams (ICOLD). Available at: https://www.icoldchile.cl/boletines/188.pdf.
3. Jansen, R.B., 1988. Advanced dam engineering for design, construction, and rehabilitation. Van Nostrand Reinhold, New York.
4. Londe, P., 1987. The malpasset dam failure. *Engineering Geology*, *24*(1-4), pp.295–329. DOI: https://doi.org/10.1016/0013-7952(87)90069-x.
5. Conde, A., Toledo, M.Á. and Salete, E., 2024. Cracks in arch dams: an overview of documented instances. *Applied Sciences*, *14*(17), pp.7580. DOI: https://doi.org/10.3390/app14177580.
6. Amberg, F., Etaati, H. and Basereh, G., 2018. Assessment of karun IV abnormal behavior and estimated role of impervious clayey bed within the foundation. In *Twenty-Sixth International Congress on Large Dams*, pp.92–105. DOI: https://doi.org/10.1201/9780429465086-230.
7. Lombardi, G., 1991. Kölnbrein dam: an unusual solution for an unusual problem. *International Water Power & Dam Construction*, *43*(6), pp.31–34.
8. Soltani, N. and Ahmadi, M.T., 2015. Investigation of the causes of cracking and abnormal displacements in arch concrete dams. M.Sc. Thesis. Tarbiat Modares University. [In Persian].
9. Léger, P., 2023. Compendium on structural behavior, modeling, safety and rehabilitation of concrete dams. Polytechnique Montreal.
10. Lombardi, G., 2004. Case histories of concrete dams (structural cracks): structural safety assessment of dams. CISM *International Centre for Mechanical Sciences*, pp.21.
11. Bremen, R., Lombardi, G. and Amberg, F., 2001. Long term behaviour of three arch dams. In *Sixth Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, organised by ICOLD, Salzburg.
12. Chopra, A.K., 2020. Earthquake engineering for concrete dams: analysis, design, and evaluation. *John Wiley & Sons*. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119056102.
13. Tosun, H., 2015. 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.
14. Wieland, M., 2020. Effect of reservoir-triggered seismicity on safety of large dam projects. *INCOLD Journal*, *9*(2), pp.4–10.
15. Gupta, H.K., 2022. Artificial water reservoir-triggered seismicity (RTS): most prominent anthropogenic seismicity. *Surveys in Geophysics*, *43*, pp. 619–659 . DOI: https://doi.org/10.1007/s10712-021-09675-z.
16. International Commission on Large Dams (ICOLD), 2011. Reservoirs and seismicity: state of knowledge. Bull. 137.
17. Sêco e Pinto, P.S., 2015. Lessons learned from dams behavior under earthquakes. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, pp.187–246. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10786-8_9.
18. Wieland, M., 2021. Damage of sefid rud buttress dam project in iran caused by the magnitude 7.4 manjil earthquake of june 21, 1990. *INCOLD Journal*, *10*(2), pp.4–14.
19. Arcangeli, E. and Ciabarri, P., 1994. Menjil dam rehabilitation by resin grouting and high capacity anchors. *International Water Power & Dam Construction*, *46*(2), pp.19–25.
20. Ahmadi, M.T. and Khoshrang, G., 1992. Sefidrud dam's dynamic response to the large near-field earthquake of june 1990. *Dam Engineering*, *3*(2), pp.85–115.
21. Alves, S.W., 2005. Nonlinear analysis of pacoima dam with spatially nonuniform ground motion. PhD Thesis. California Institute of Technology.
22. Oliveira, S. and Mendes, P., 2008. Development of a cabril dam finite element model for dynamic analysis using ambient vibration tests results. Springer eBooks, pp.755. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-5370-3_755.
23. Henriques, M.J., Lima, J.N. and Oliveira, S., 2012. Measuring inclinations in cabril dam with an optoelectronic sensor. In FIG Working Week 2013, Roma.
24. Dungar, R., 1990. Observed and computer simulated movements in the 157 m high zervreila arch dam. In International Workshop on Arch Dams, pp.364–371.
25. Wang, W., Ding, J., Wang, G., Zou, L. and Chen, S., 2011. Stability analysis of the temperature cracks in xiaowan arch dam. *Science China Technological Sciences*, *54*(3), pp.547–555. DOI: https://doi.org/10.1007/s11431-010-4280-1.