مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک دوره ۱۳ شماره ۲ سال ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) ۷۸-۶۵

بسمه تعالی

مکانیزم خرابی سدهای پسماند: مطالعه مروری و بررسی موردی

حسن خسروی [۱]، احمدرضا غلامی‌نژاد [۲] مرتضی نوروزی [۳]

۱- کارشناس ارشد عمران – ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر،تهران، ایران
Hasankhosravi1359@yahoo.com

۲- دکترای عمران - ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی،تهران، ایران
Ahmadreza.gh@gmail.com

۳- دکترای عمران گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،تهران، ایران
morteza.noruzi@srbiau.ac.ir

چکیده

سدهای پسماند که برای نگهداری پسماندهای حاصل از فرآیند معدنی ساخته می‌شوند از جمله سازه‌های ژئوتکنیکی هستند که به علت فقدان آئین‌نامه‌های مرتبط با ساخت، نگهداری و تعمیر آنها به خصوص در کشورهای در حال توسعه و عدم توجه کافی در طراحی و نگهداری به علت هزینه اضافه وارد بر شرکت‌های معدنی، مستعد خرابی در طول زمان بهره‌برداری هستند. در عین حال به علت ماهیت پسماندهای معدنی، خرابی و رها شدن این پسماندها می‌تواند آسیب‌های محیط‌زیستی، مخاطرات انسانی و صدمات زیرساختی به همراه داشته باشد. در این مقاله با مطالعه خرابی سدهای پسماند در گذشته، سازوکارها و عوامل مؤثر بر خرابی سدهای پسماند بررسی شده و در پایان مطالعه موردی خرابی سد پسماند «مونت پولی» انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: سد پسماند، باطله معدنی، خرابی، ژئوتکنیک زیست محیطی

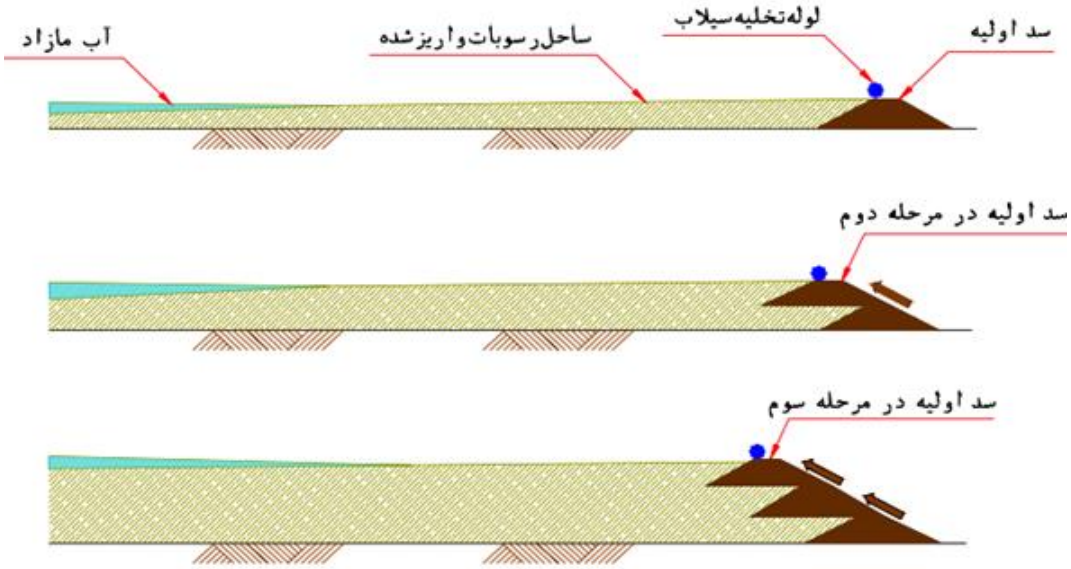
۱. مقدمه

در اولین مرحله از یک فرآیند معدنی بلوک‌های سخت سنگ معدن به اندازه چند میلی‌متر خرد شده و سپس با اضافه کردن آب این ذرات را آسیاب می‌کنند تا ذرات ریزتری بدست آید و در مرحله بعد با روش‌هایی نظیر جداسازی مغناطیسی، جداسازی گرانشی و معلق‌سازی مواد اضافی را از ماده معدنی مورد نظر جدا میکنند. فرآورده اصلی این فرآیند، کنسانتره معدنی و باقیمانده مواد به عنوان پسماند معدنی شناخته می‌شود. مواد پسماندمعدنی بصورت بالقوه می‌توانند یکی از عمده‌ترین عوامـل منفی تاثیرگذار بر محیط‌زیست باشند

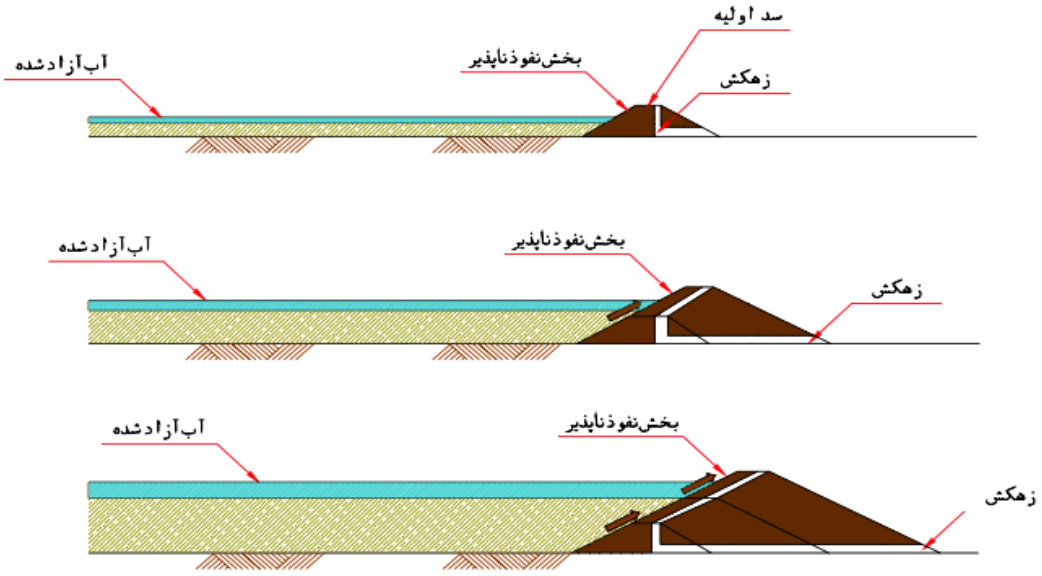
که نگهداری آنها تنها مربوط به دوره‌ی بهره‌برداری معادن نیست، بلکه می‌تواند در دوران طولانی پس از بسته شدن معدن و توقف فعالیت‌های فرآوری نیز ادامه داشته باشد. «سد پسماند» به سازه‌ای اتلاق می‌شود که محتوی پسماند بوده و یا برای ذخیره‌سازی پسماند ساخته شده باشد. مطابق این تعریف سدهای پسماند را می‌توان با استفاده از مصالح قرضه و یا با استفاده از خودِ مواد پسماند احداث نمود. به طور کلی روش ساخت سدهای پسماند به سه روش بالارو، پایینرو و محور ثابت تقسیم‌بندی می‌شود.

در روش بالارو ابتدا سد اولیه (با نفوذپذیری بالا) ساخته می‌شود سپس مواد پسماند در آن تخلیه می‌شود. با ته‌نشین شدن ذرات درشت دانه‌تر در نزدیکی سد ساحلی از پسماند تشکیل می‌شود که از این ساحل به عنوان پی یا بستر خاکریز مرحله‌ی بعدی استفاده می‌شود و این عمل تا رسیدن به ارتفاع نهایی سد ادامه می‌یابد. سدهای پسماندی که با این روش ساخته می‌شوند اقتصادی‌ترین سدها هستند. از آنجا که انجام عملیات تراکم مکانیکی در این نوع

از سدها امکانپذیر نیست، پتانسیل روانگرایی نسبتا بالایی در آنها وجود دارد.در مناطق لرزه‌خیز غالبا از روش پایینرو استفاده می‌شود. روش پایینرو در عین اینکه بیشترین پایداری و ضریب اطمینان را دربین سدهای ترفیع شونده دارد، گرانترین روش نیز محسوب می‌شود چون باید توسط ابزار مناسبی مواد پسماند درشت دانه را از آب و رسوبات ریزدانه جدا و شیب یکنواختی در پایین‌دست سد ایجاد کرد. یکی از محدودیت‌های احداث سد با این روش این است که حجم مواد درشت‌دانه پسماند که برای ساخت بدنه سد و ترفیع آن به‌کار گرفته می‌شود باید به مقداری باشد که حجم کافی در مخزن سد تشکیل دهد به‌طوریکه پاسخگوی حجم مورد نیاز برای ذخیره باقیمانده‌ی آب و مواد پسماند باشد. با توجه به این محدودیت، غالبا عرض بستر سد محدود شده و این محدویت موجب محدودیت ارتفاع سد خواهد شد. برای جبران این محدودیت لازم است که سد اولیه‌ی بزرگتری احداث شود که این سد اولیه باید حداقل زه‌آب را از خود عبور دهد. بر خلاف سدهای ساخته شده به روش بالارو، دراین روش سرعت ترفیع سد محدود نبوده و تابعی از خواص تحکیم‌پذیری مواد پسماند نیست.

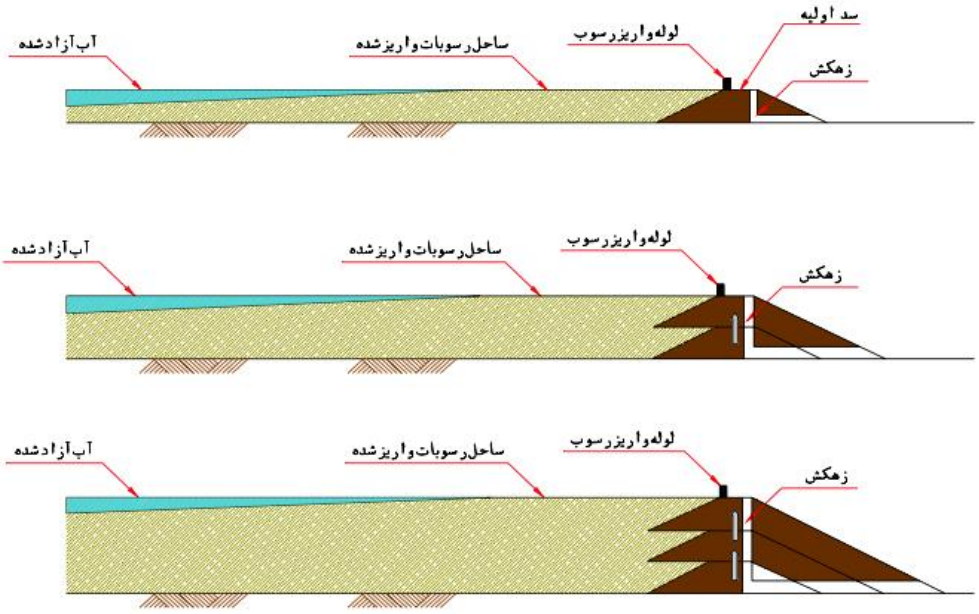


شکل ۱: ساخت به روش بالارو



شکل ۲: ساخت به روش پایین‌رو

در روش محور ثابت امتداد محور اصلی سد، برخلاف روش‌های بالارو و پایینرو، در راستای محور اصلی سد اولیه باقی می‌ماند. این روش در واقع روشی بین دو روش پایینرو و بالارو است. یعنی مقاومت آن در مقابل زلزله نسبتا مطلوب است و به عملیات ساختمانی کمتری نسبت به روش پایینرو نیاز دارد. در این روش، شیب بالادست بر روی مواد پسماند فرونشسته واقع میشود؛ بنابراین تکیه‌گاه مناسبی نخواهد داشت ولی خاکریزهای پایین‌دست از وضعیت مطلوبتری برخوردار خواهند شد و می‌توان این خاکریزها را متراکم کرد.

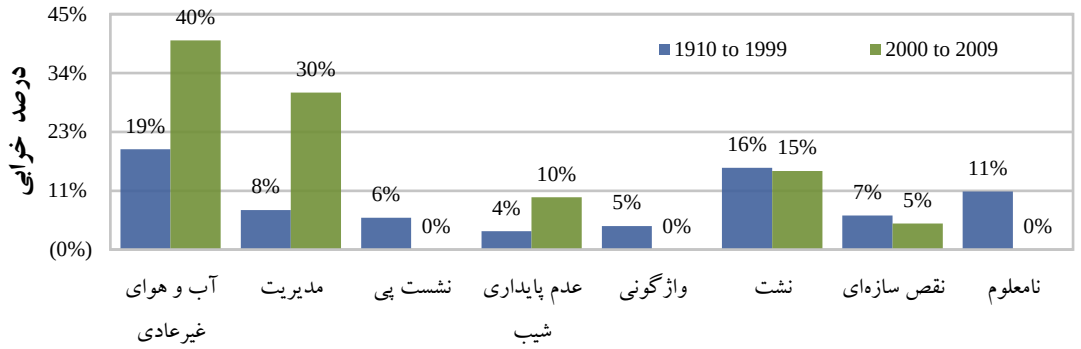


شکل ۳: ساخت به روش محورثابت

۲- مروری بر گسیختگی سدهای پسماند

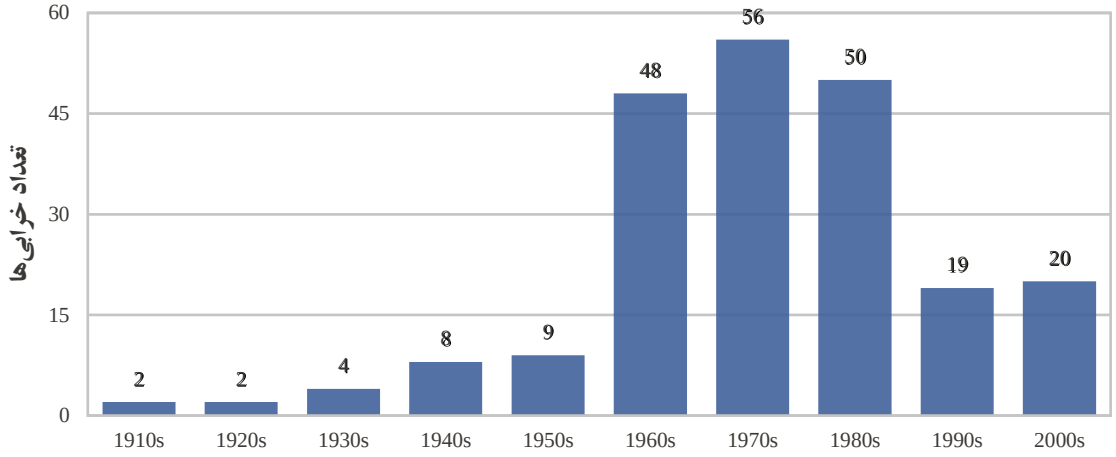
به طورکلی سدهای پسماند به دلایل پیش‌رو نسبت به سدهای ذخیره آب بیشتر مستعد خرابی هستند: ۱) ساخت سد با مصالح پسماند یا هر مصالح قرضه موجود در محل جهت کاهش هزینه‌ها که مشخصات مکانیکی مطلوبی ندارند؛ ۲) افزایش ارتفاع سد به همراه افزایش حجم مواد پسماند در طول مدت بهره‌برداری که احتمال ناپایداری را افزایش می‌دهد؛ ۳) عدم وجود آئین‌نامه‌ای برای ساخت، نگهداری و تعمیر سدهای پسماند بخصوص در کشورهای در حال توسعه؛ ۴) هزینه بالای نگهداری از تاسیسات نگهداری پسماند پس از بسته شدن معدن. مهمترین دلایل خرابی سدهای پسماند را می‌توان به صورت پیش‌رو برشمرد: ۱) روانگرایی: پسماندها و سد در هنگام زلزله می‌توانند روان شوند. روانگرایی همچنین در هنگام انفجارهای معدنکاری یا حرکات و ارتعاشات نزدیک ماشین‌آلات سنگین نیز ممکن است ایجاد شود؛ ۲) افزایش سریع ارتفاع سد: اگر در روش بالارو ارتفاع سد سریع بالا رود فشار منفذی آب در داخل مصالح سد زیاد شده که موجب کاهش پایداری سد می‌شود؛ ۳) گسیختگی پی: اگر بستر سد زیادی ضعیف باشد حرکت در صفحه گسیختگی ایجاد می‌شود؛ ۴) افزایش بیش از حد ارتفاع آب: اگر سطح فریاتیک به مقدار بحرانی برسد یعنی ساحل ایجاد شده بین پسماند و تاج سد زیادی کوچک شود ممکن است خرابی سد رخ دهد؛ ۵)نشت بیش از حد: نشت از داخل یا زیر سد موجب فرسایش در راستای خط جریان می‌شود. نمودارهایی که در ادامه آورده شده است از داده‌های مربوط به ۲۱۸ حادثه خرابی سد پسماند بدست آمده است.

شکل ۴ دلایل خرابی سدهای پسماند را نشان می‌دهد. زیاد شدن خرابی ناشی از سوءمدیریت نشان از افزایش نیاز به مواد اولیه در کنار عدم وجود استانداردهای مهندسی در زمینه‌های مختلف دارد. از جمله موارد سوءمدیریت می‌توان به روش نامناسب ساخت، عدم تعمیر مناسب زهکش‌ها و نامناسب بودن برنامه‌های درازمدت مانیتورینگ اشاره نمود. شرایط آب و هوایی و سوءمدیریت بر تمامی سازوکارهای خرابی دیگر نیز اثرگذار هستند.



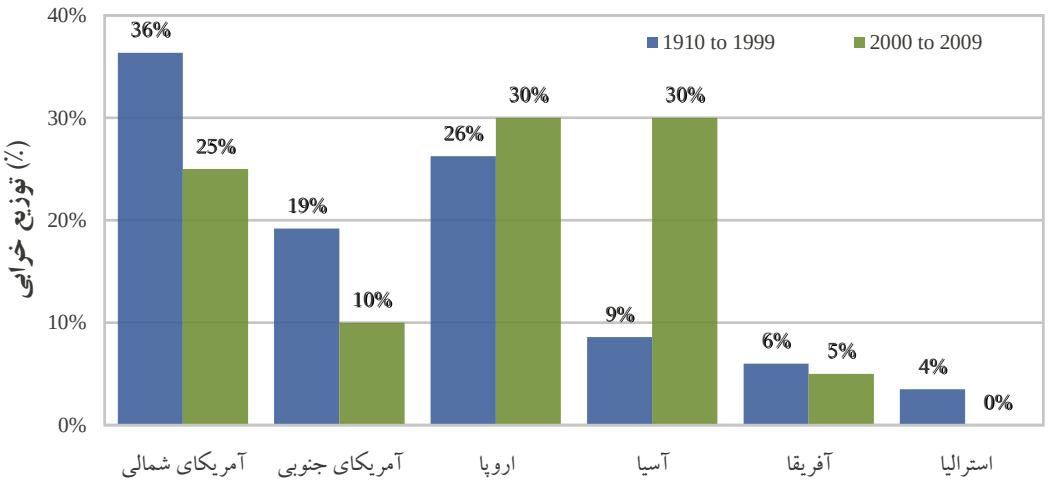
شکل ۴: دلایل خرابی سدهای پسماند

شکل ۵ خرابی سدهای پسماند را در طول تاریخ نشان می‌دهد. در دهه‌های ۴۰ و ۵۰ میلادی تعداد خرابی در حدود ۸ مورد بوده‌است اما به یکباره تعداد خرابی‌ها به حدود ۵۰ مورد در دهه‌های ۶۰، ۷۰ و ۸۰ افزایش کرده است. این مساله می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت‌های معدنی پس از جنگ جهانی دوم به علت بازسازی‌های پس از جنگ در اروپا، آمریکا و کشورهای تازه استقلال یافته باشد. با افزایش تجربه‌های مهندسی و بکارگیری معیارهای ایمن‌تر و بهبود ساخت، تعداد خرابی‌ها در دهه‌های بعد کاهش چشمگیری داشته است.

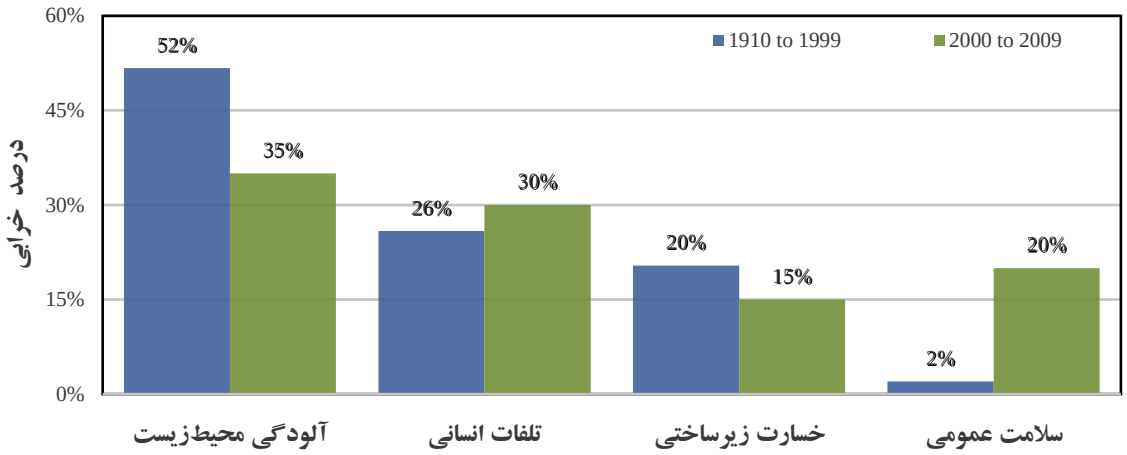


شکل ۵: خرابی سدهای پسماند در طول تاریخ

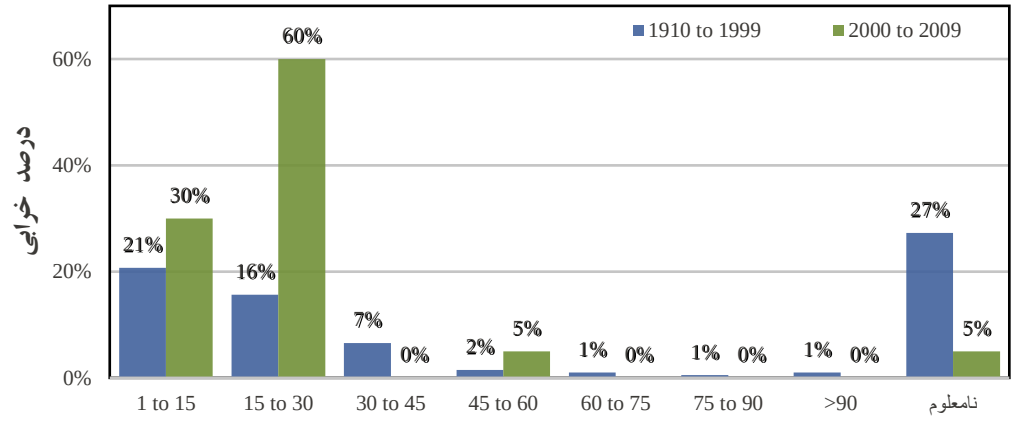
نمودار شکل ۶ توزیع منطقه‌ای خرابی را نشان می‌دهد. تا قبل از سال ۲۰۰۰ اکثر خرابی‌ها در قاره آمریکا و اروپا بوده است اما بعد از سال ۲۰۰۰ بیشتر خرابی‌ها در آسیا و اروپا رخ داده‌است. کاهش خرابی به رغم بالا بودن فعالیت‌های معدنی در آمریکا و اروپا به علت بهبود عملیات مهندسی و افزایش خرابی در آسیا و اروپا به علت انفجار اقتصادی چین و نیاز عظیم آن به مواد اولیه که از آسیا و اروپای شرقی بدست می‌آمده، بوده است. این نمودار نشان می‌دهد که خرابی سدهای پسماند از کشورهای توسعه یافته به کشورهای در حال توسعه انتقال یافته است.



شکل ۶: خرابی سدهای پسماند براساس منطقه



شکل ۷ خرابی سدهای پسماند را بر اساس ارتفاع آنها نشان می‌دهد. اکثر خرابی‌ها برای سدهای تا ارتفاع ۳۰ متر رخ داده‌است. یک دلیل شاید این باشد که مصالح تحکیم نیافته با فشار منفذی بالا در چنین سدهای نسبتا کوتاعی موجب می‌شود که مقاومت برشی کافی بسیج نشود. این موضوع بخصوص در سدهای با روش ساخت بالارو صادق است.



شکل ۷: خرابی سدهای پسماند براساس ارتفاع

تاثیرات ناشی از خرابی سدهای پسماند در شکل ۸ نشان داده‌شده‌است. مهم‌ترین اثر آلوده شدن محیط‌زیست است. آلودگی محیط‌زیست و خسارات زیرساختی بخش بیشتری از خرابی‌ها را دربر می‌گیرد که به علت خراب شدن سدهای کوتاه است و تلفات انسانی ناشی از خرابی سدهای بلند می‌باشد.

شکل ۸: تاثیرات خرابی سدهای پسماند

۳- بررسی موردی گسیختگی سد پسماند «مونت پولی»

تاسیسات ذخیره پسماند معدن طلا و مس «مونت پولی» در ایالت بیریتیش کلمبیا کانادا واقع شده که از ۳ سد جنوبی، سد اصلی و سد محیطی که از سمت غرب به ارتفاعات طبیعی محدود شده تشکیل شده‌است.(شکل ۹). ساخت این تاسیسات از سال ۱۹۹۵ و خرابی آن در سال ۲۰۱۴ و در سد محیطی رخ داده‌است. در نتیجه این خرابی از ۶/۱۰ میلیون مترکعب آب آزاد آن تمامی آن آزاد شده و در مجموع از ۹/۷۳ میلیون مترمکعب پسماند و آب ذخیره شده ۴۲/۲۴ میلیون مترمکعب آن رها شد. سدها باهسته به صورت نفوذناپذیر با مصالح قرضه به همراه فیلتر و زهکش مناسب ساخته شده که در شیب پایین‌دست جهت حفظ پایداری با راکفیل پوشیده شده‌است. روش ساخت با محور ثابت بوده که به علت صرفه‌جویی در مصالح هسته سد اندکی به سمت بالادست متمایل شده‌است. این روش ساخت به عنوان روش با محور ثابت اصلاح شده شناخته می‌شود. خرابی سد به صورت ناگهانی و بدون نشانه‌ی قبلی رخ داده‌است. علاوه براین درحالت مقایسه‌ای، سد محیطی از سد اصلی کمتر مستعد خرابی بوده‌است. قبل از خرابی، پی سد اصلی اندکی جابجایی داشته که موجب تغییر طراحی برای مراحل بعدی شده است اما سد محیطی هیچ نشانه‌ای از خرابی نداشته است. در نتیجه احتمال خرابی محلی در این سد وجود داشته است. براین اساس چهار مکانیزم خرابی احتمالی در نظر گرفته شد: ۱) خطاهای انسانی: مانند تخلیه پسماند از لوله‌ها به صورتیکه موجب فرسایش سازه سد شود. در هنگامی خرابی لوله‌های تخلیه فعال نبودند. ۲) زیاد بود ارتفاع آب و پسماند پشت سد: با توجه به رکوردهای حجم پشت سد این مورد هم رد شد. ۳) ترک و آب شستگی: قبل از خرابی و بررسی‌های بعد از خرابی نشانه‌ای از وجود ترک و آب‌شستگی را تایید نکرد. ۴) خرابی پی: بررسی‌های بعد از خرابی نشان داد که این سازوکار عامل خرابی بوده است. شکل ۹ نمای بالادست خرابی را نشان می‌دهد. در طرفین برآمدگی بقایای هسته قابل مشاهده است. برآمدگی سمت راست مانند یک اسکله عمل کرده و سیلاب را به سمت چپ هدایت می‌کند. این سیلاب هدایت شده موجب فرسایش راکفیل سمت راست شده‌است. بقایای هسته در سمت راست موجب می‌شود که راکفیل سمت راست فرسایش محافظت شود.

یک برآمدگی (whaleback) در قسمت جلوی سد ایجاد شده که ناشی از دوران پی سد است (شکل ۱۰).

شکل ۹: نمای خرابی سد

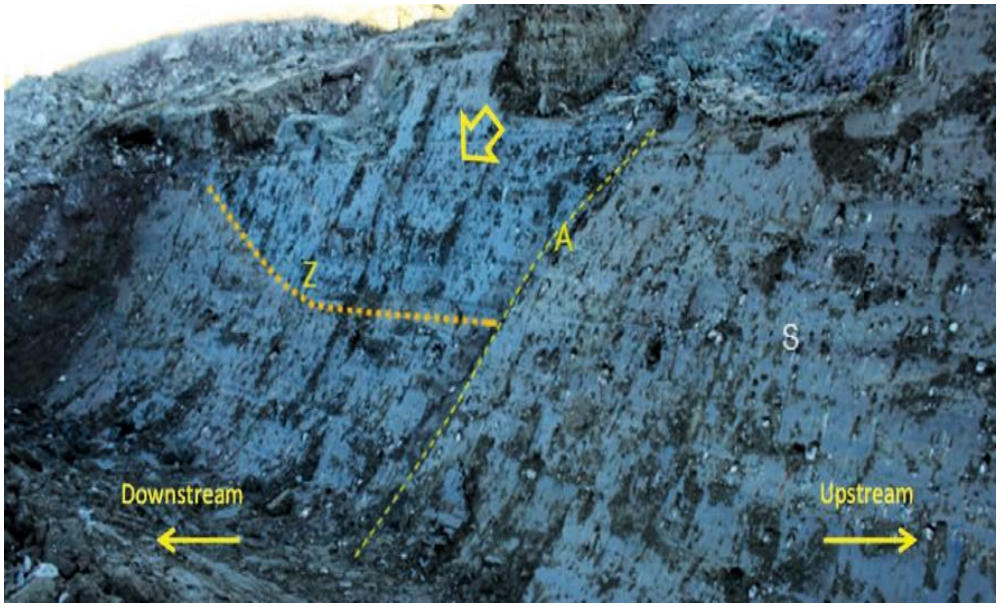
شکل ۱۰: بالازدگی پی سد

شکل ۱۱ نمای پایین‌دست خرابی را نشان می‌دهد. در این نقطه دو کانال جریان اصلی توسعه یافته‌است که در بالادست سد به هم پیوسته‌اند. لغزش جریانی در قسمت B آثار دایروی شکل به جای گذاشته که به سمت عقب و داخل بدنه سد که محافظ قسمت بالادست هسته است پیشروی کرده است. لغزش کمانی اولیه A جریان آب‌های سطحی مانده در پسماند را گرفته و متمرکز می‌کند که موجب انتقال راحت پسماند و همچنین فرسایش پسرونده کمان لغزش می‌شود. بررسی‌ها نشان دادند که لغزش پی سازوکار اولیه خرابی سد بوده است که به راحتی از سطح برش هسته سد (A) در شکل ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است. در شکل ۱۲ اگر چه لایه نشانه Z در سمت پایین‌دست به راحتی قابل مشاهده بوده اما در بالادست هیچ اثری از آن نیست. در نتیجه یک جابجایی نسبی در صفحه برش به مقدار ۳/۳ متر اتفاق

افتاده است. دیگر نشانه لغزش و دوران پی براساس خطوط لایه های هسته است. این لایه‌ها بین ۷ تا ۱۰ درجه دوران داشته‌اند (خطوط خط‌چین در شکل ۱۴).

آنالیز تغییرشکل با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود plaxis نیز نشان داد تاج سد در حدود ۳ متر نشست کرده و جلوی سد بالازدگی ایجاد می‌شود. با یافته‌های حاصل از بررسی‌های محلی و آنالیز نرم‌افزاری می‌توان توسعه خرابی سد را به صورت شکل ۱۵ توضیح داد: در مرحله اول نشست سد موجب سرریز شدن شده و فرسایش سد آغاز می‌شود. در مرحله دوم فرسایش روبه پایین بیشتر به سمت چپ متمایل می‌شود. در مرحله سوم ادامه فرسایش در سمت چپ موجب می‌شود که هسته سمت راست به صورت برجسته باقی بماند. این هسته‌ی باقیمانده مانند یک اسکله عمل کرده و جریان را بیشتر به سمت چپ هدایت می‌کند و فرسایش این قسمت را تشدید می‌کند. این قسمت باقیمانده به علت کاهش سرعت جریان فرسایش موجب حفظ بخش زیادی از راکفیل سمت راست می‌شود. در مرحله نهایی جریان فرساینده به حالت پایدار خود می‌رسد. به علت فرسایش و جابجایی پسماندها تکیه‌گاه بالادست سد از بین رفته و در نتیجه موجب خرابی قسمت‌های باقیمانده می‌شود.

شکل ۱۱: نمای پایین‌دست خرابی



شکل ۱۲: برش هسته سد

شکل ۱۳: ترانشه شناسایی و نمایش برش پی سد

شکل ۱۴: درون لایه سد

۴-نتیجه گیری

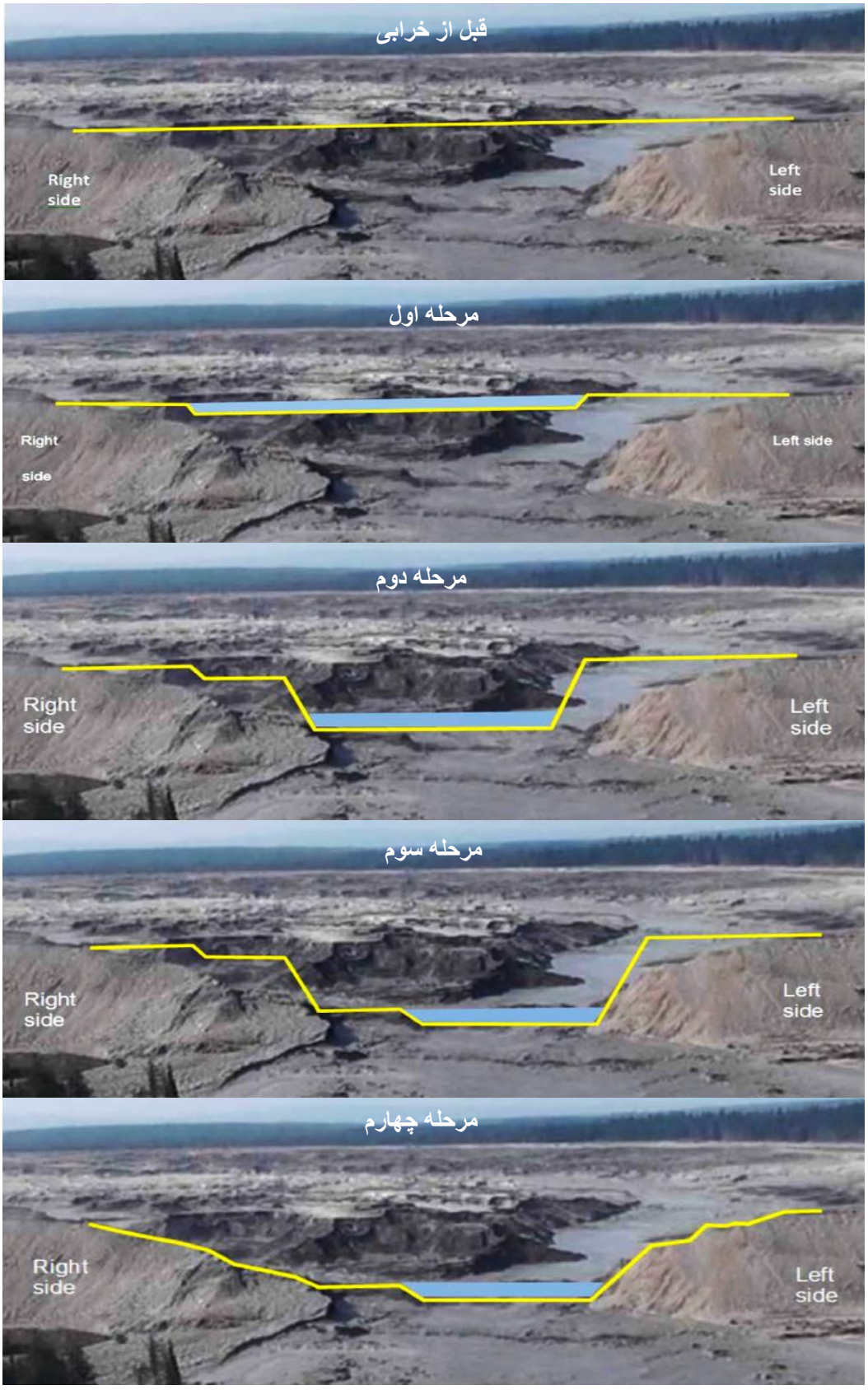
در این مقاله مروری بر تاریخچه خرابی سدهای پسماند و بررسی موردی خرابی سد پسماند «مونت پولی» صورت پذیرفت. نکات اصلی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱) در دهه اخیر به علت افزایش تجربه مهندسی خرابی سدهای پسماند از کشورهای توسعه یافته به کشورهای درحال توسعه منتقل شده‌اند.

۲) مهمترین دلایل خرابی سدهای پسماند "بارش‌های نامعمول" و "مدیریت ضعیف" می‌باشد که تاثیر زیادی بر مکانیزم‌های خرابی دارند.

۳) خرابی‌ها معمولا در سدهای تا ارتفاع ۳۰ متر رخ داده‌است. با بکارگیری استانداردهای مهندسی بالاتر و عدم استفاده از روش ساخت بالارو می‌توان تا حد زیادی جلوی خرابی این سدها را گرفت.

۴) بررسی خرابی سد «مونت پولی» نشان داد که عدم در نظر گرفتن حالات مختلف تنش در حالت زهکش نشده در طراحی می‌تواند منجر به گسیختگی خاک پی سد شود.


قبل از خرابی
Right side
Left side
مرحله اول
Right side
Left side
مرحله دوم
Right side
Left side
مرحله سوم
Right side
Left side
مرحله چهارم
Right side
Left side

شکل ۱۵: توسعه خرابی سد

۵- مراجع

1- Azam, Shahid, and Qiren Li. "Tailings dam failures: a review of the last one hundred years." Geotechnical News 28.4 (2010): 50-54.

2- Norbert R. Morgenstern et al. "Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach" Government of British Columbia of Canada 2015.

3- Lottermoser, Bernd. Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts. Springer Science & Business Media, 2010.

4- Blight, Geoffrey. Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press, 2009.

5- Kossoff, David, et al. "Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation." Applied Geochemistry 51 (2014): 229-245.

6- Owen, John R., et al. "Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure." International journal of disaster risk reduction 42 (2020): 101361.

7- Lyu, Zongjie, et al. "A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history." Advances in Civil Engineering 2019 (2019): 1-18.

8- Rana, Nahyan M., et al. "Catastrophic mass flows resulting from tailings impoundment failures." Engineering Geology 292 (2021): 106262.

9- Araujo, Francisco SM, et al. "Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications." Geosciences 12.9 (2022): 319.

10- Guimarães, Roberta N., et al. "History of tailings dam failure: Impacts on access to safe water and influence on the legislative framework." Science of The Total Environment 852 (2022): 158536.

11- Lumbroso, Darren, et al. "Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced." Natural Hazards and Earth System Sciences 21.1 (2021): 21-37.

12- Niu, Anyi, and Chuxia Lin. "Managing soils of environmental significance: A critical review." Journal of Hazardous Materials 417 (2021): 125990.