# شکسته شدن سد باطله در کشور گویان–هشدار*

(دریافت ۸۰/۱۰/۲۹ پذیرش ۸۱/۲/۱۵)

تخلیص و ترجمه : علی‌اکبر رحمانی*


## چکیده

اثرات شکسته شدن سد اومایی در کشور گویان (آمریکای جنوبی) در اوت ۱۹۹۵ هنوز در صنعت معدن موضوعی حساس است. این مقاله از گزارش نهایی متخصصان مستقلی که از طرف دولت گویان برای بررسی علل شکسته شدن سد انتخاب شدند، تهیه شده است و چگونگی آنچه را که اتفاق افتاده است و عوامل پیش‌گیری از تکرار این حادثه را توضیح می‌دهد.

علی‌رغم اثرات زیست محیطی، بهداشت و مسائل ایمنی که در هر مقیاس عملی قابل چشم‌پوشی بودند، شکسته شدن سد توجه جهانی را به خود جلب نمود. با تغییراتی که در اهداف اکتشافی در کشورهای در حال توسعه صورت پذیرفته، موضوعاتی از قبیل ایمنی سدهای باطله و مدیریت محیط زیست بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. درک دقیق ماهیت شکست و تأثیرات آن کلید دسترسی به این نگرانی است.

نکته‌ی حائز اهمیت در این واقعه این است که : سد از نظر فیزیکی شکسته نشد، بلکه مقره‌ی سد کاملاً یک پارچگی خود را از دست داد و تقریباً تمامی پساب محتوی کارخانه و مقدار کمی از جامدات باطله را به محیط زیست رها کرد. با استفاده از فناوری طراحی و ساخت که امروزه موجود است، از این شکست می‌توانست جلوگیری شود. این حادثه تعهد صنعت معدن در برابر مدیریت مسئولانه‌ی محیط زیست را مجدداً الزامی می‌کند.


## محل حادثه

ذخیره‌ی طلای اومایی در نواحی گرمسیر کشور گویان (مستعمره پیشین انگلستان بین ونزوئلا و سورینام در ساحل شمال شرقی آمریکای جنوبی) قرار دارد. کانی‌سازی بارگه‌ی کوارتز، اساساً در سنگ‌های میزبان دیوریت کوارتزدار و هم‌چنین سایرولیت‌های اضافی باقی مانده از فرایندهای هوازدگی سطحی، همراه است.

تولید طلا در گویان به وسیله‌ی دستگاه کوچک لاروب و عملیات هیدرولیکی و دستی از سال ۱۸۹۶ تا به امروز ادامه داشته است. شرکت آناکوندا عملیات اکتشاف کانساراومایی را در سال ۱۹۵۰ شروع و دیگران آن را دنبال کردند. در سال ۱۹۹۳، شرکت فرآوری معادن طلای اومایی به صورت مشترک با شرکت‌های دیگر، تولید طلا را از معدن روباز شروع کردند.

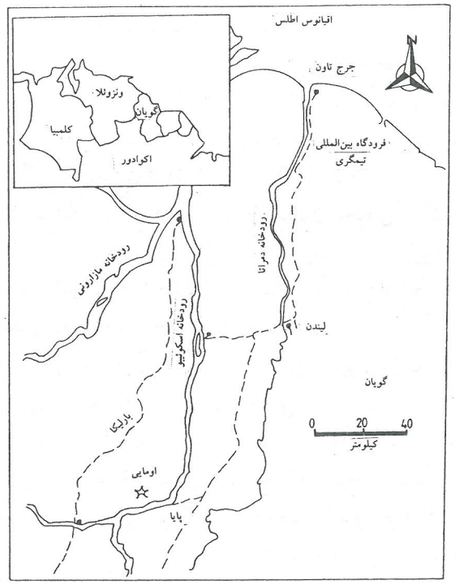
قبل از شکسته شدن سد باطله، شرکت فرآوری معادن طلا، با استفاده از فرآیند معمولی کربن، روزانه عملیات استخراج را بر روی ۱۳۰۰۰تن گل آب[1] انجام می‌داد. جریان باطله عموماً حاوی لجن‌هایی بود که ابعاد ذرات آن کوچک‌تر از ۷۵ میکرون و پساب حاوی ۷۰ تا ۱۰۰ قسمت در میلیون (ppm) سیانور آزاد بود. سیانور آزاد به سد باطله فرستاده می‌شد تا به طور طبیعی قبل از تخلیه‌ی پساب تقلیل داده شود.

سد باطله در ساحل رودخانه‌ی اومایی قرار دارد. رودخانه‌ی اومایی با چندین متر عرض، جریانی برابر ۴/۵ مترمکعب در هر ثانیه دارد و پس از طی مسافتی کم به رودخانه‌ی اسکوئیبو متصل می‌شود. اسکوئیبو یکی از رودخانه‌های اصلی آمریکای جنوبی است و جریانی در

* عضو هیات علمی گروه معدن- دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین

[1] Slurry






**شکل ۱- موقعیت معدن اومایی و رودخانه‌ای که به وسیله آن تأثیرپذیر شد.**

حدود ۲۱۰۰ مترمکعب در هر ثانیه دارد که نهایتاً به اقیانوس اطلس می‌ریزد.

در اواسط سال ۱۹۹۵، ارتفاع سد باطله تنها ۱ متر دیگر با ارتفاع طراحی شده‌ی نهایی فاصله داشت و عملیات آن بدون حادثه پیش می‌رفت. در حدود ساعت ٤ بعدازظهر روزی که سد شکسته شد، بازرسی تاج سد هیچ گونه اثر غیر معمولی را نشان نداد.

## داستان شکسته شدن سد

در تاریکی نیمه شب ۱۹ اوت ۱۹۹۵، یک راننده‌ی آگاه و زیرک متوجه جریان آبی شد که از یک انتهای سد به بیرون جریان پیدا کرده بود. تخلیه‌ی دیگری در سپیده‌دم در انتهای دیگری همراه با شکاف عمیق در تاج سد جلب توجه می‌کرد.

در ساعات اولیه، مجموع تخلیه‌ها به رودخانه‌ی اومایی به ۵۰ مترمکعب در هر ثانیه رسید. شرکت فرآوری معادن طلای اومایی قادر بود یکی از جریان‌های تخلیه را به درون یک گودال هدایت کند. چند روز بعد، تجهیزات موجود در معدن، یک سد حوضچه‌ای برای انحراف جریان تخلیه‌ی دیگری برقرار کرد. نهایتاً، ۱/۳ میلیون مترمکعب پساب سد باطله حاوی ۲۵ قسمت در میلیون کل سیانور به این روش‌ها در گودال‌ها مهار شد. به هر حال، ۲/۹ میلیون مترمکعب پساب باقی مانده به رودخانه‌ی اومایی سرازیر و سرانجام وارد رودخانه‌ی اسکوئیبو شد.

بعد از ٤٨ ساعت، گزارشات شکسته شدن سد توسط ماهواره به جهان مخابره شد. عکس‌العمل فوری دولت گویان این بود که تمام منطقه را یک ناحیه‌ی مصیبت زده تلقی کرد و از کشورهای دیگر کمک خواست. این واقعه با توجه به حادثه‌ی سال ۱۹۷۸ در شهر جونز گویان، جایی که ۹۰۰ نفر بعد از نوشیدن مایعات حاوی سیانور جان خود را از دست دادند، واکنشی بود که قابل درک است.

ولی ارزیابی‌ها و بررسی‌های انجام شده این بار طور مستند بیان کرد که تنها ۳٤٦ ماهی در رودخانه‌ی اومایی تلف شده‌اند، و رودخانه‌ی اسکوئیبو با رقیق نمودن پساب حاوی سیانور توانسته از تأثیرات منفی سیانور بر سلامتی افراد جلوگیری نماید

با این وجود، شکسته شدن سد برای کشور گویان به صورت یک بلای ناگهانی محسوب گشت. معدن، بزرگ‌ترین سرمایه‌گذاری در کشور به حساب می‌آمد و در حدود ۲۵٪ درآمد دولت و چندین درصد تولیدات داخلی

را تأمین می‌کرد و بسته شدن معدن به مدت ٦ ماه باعث مشکلات مالی در سطح کشور شد.

بسیاری از افرادی که در معدن مشغول به کار بودند به دلیل بسته شدن معدن کار خود را از دست دادند، کشورهای دیگر واردات غذاهای دریایی را تحریم کردند و این تأثیرات در اقتصاد گویان باعث شد افراد زیادی از شدت فقر رنج ببرند.

چند روز پس از واقعه، دولت گویان کمیسیون تحقیق را تشکیل داد. سه گروه فنی تحت نظارت کمیسیون معادن و زمین شناسی گویان مأمور جمع‌آوری گزارش از جوانب مختلف حادثه شدند. یکی از این‌ها، گروه ۵ نفره‌ای بود که مطالعات خود را بر روی علل فنی شکسته شدن سد شروع کرد. هدف دیگر تیم کمک به درک این علل در جامعه‌ی مهندسی، بخش صنعت و معدن و مردم گویان بود.

## تحقیقات قانونی

نکته‌ی قابل توجه در این واقعه بدنه‌ی سالم سد بود. تیم بررسی کننده در حین سه ماه تحقیق توانست اطلاعاتی در مورد طراحی و ساخت سد جمع‌آوری نموده و بقایای سد را آزمایش کند. تصاویر هوایی بعد از شکسته شدن سد بررسی و دو ترانشه‌ی عمیق در سد با حفاری در نواحی کلیدی و حساس ایجاد شد. تحقیقات با همکاری بسیار خوب شرکت معادن طلای گویان با تیم ۵ نفره عملی شد.

ساختار سد در زمان شکسته شدن در شکل ۲ نشان داده شده است. ارتفاع نهایی سد ٤٥ متر بود. سد دارای یک مقره‌ی شیب‌دار جریان رو به بالا و یک بخش جریان رو به پایین سنگ‌ریزی شده بود. هر دو بخش از مواد باطله‌ی معدن روباز ساخته شده بودند.

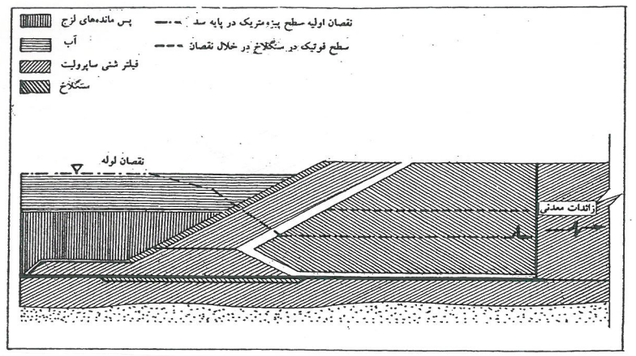
زیربنا و شالوده‌ی سد بر روی بقایایی ساپرولیتی ساخته شده بود. این مواد ساپرولیتی رسی با نفوذپذیری کم در مقره‌ی سد به کار رفته بودند و هم‌چنین اجزای اصلی دپوی باطله را تا ناحیه‌ی وسیعی، در مجاورت بخش سنگ‌ریزی شده‌ی سد تشکیل می‌دادند. این باطله‌ی ساپرولیتی با رودخانه‌ی اومایی در حدود ٤٠٠ متر فاصله داشت که بعد از شکسته شدن سد مواد تخلیه شده آن تمامی ناحیه سنگ‌ریزی شده را (به جز دو ناحیه‌ی محدود انتهایی سد) محصور نمودند. سد حاوی چندین فشار سنج بود که قادر بودند فشارهای آب درون سد را در نواحی مختلف اندازه بگیرند. نمونه فشارهای اندازه‌گیری شده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. آن‌ها نشان دادند که آب باران در درون ناحیه‌ی سنگ‌ریزی شده به دلیل مسدود شدن زهکش‌ها در زیر باطله‌ی ساپرولیتی تجمع یافته و بر این اساس علائمی از احتمال شکسته شدن سد را نشان نداده بودند.

خسارت قابل رؤیت در شکسته شدن سد بعد از حادثه شامل شکاف‌های نافذ در مقره، که در تمام طول تاج گسترش یافته بود، می‌شد. بزرگ‌ترین شکاف‌ها با دوران و کج شدن تاج به طرف محل دپوی باطله همراه بود. در حدود ۲۰ سوراخ و گودی در مقره وجود داشتند که از بقیه مشخص‌تر و واضح‌تر بودند و وقتی که سطح آب دپوی باطله کاهش یافت، نمایان شدند. بعضی از آن‌ها دارای ساختار دهانه‌ی باز بودند که به نظر می‌رسید چندین هفته‌ی پیش ریزش کرده باشند.

این شرایط و ارزیابی‌هایی که صورت گرفت نشان داد که مقره به علت فرایندی که به سایش درونی یا رگ آب معروف است یک پارچگی خود را از دست داده بود. وقتی که این حالت صورت می‌گیرد، ذرات دانه‌ریز خاک به درون حفره‌های مواد درشت تر مجاور نفوذ می‌کنند و نهایتاً تونل‌های سایش و گودال‌هایی در بدنه‌ی سد ایجاد می‌شود. سایش درونی علت اصلی شکست سدهای خاکی معمولی و مسئول شکست دیگر سدهای باطله نیز بوده است.

توسعه‌ی سایش درونی در اومایی به علت دو ویژگی ساختاری می‌باشد که یکی مربوط به مجرای انحراف لوله‌ی فولادی موج‌دار بوده که در زیر سد اولیه برای انحراف موقت جریان‌ها در حین ساختن سد به کار گرفته شد (شکل ۲). تراکم سنگ‌ریزی اطراف مجرا، به دلیل اجتناب از خرد شدن لوله‌ی فولادی موج دار با به کارگیری تجهیزات سنگین، به خوبی صورت نگرفته و در نتیجه عکس‌العمل محل سنگ‌ریزی شده کاهش یافته و این عمل باعث شد سنگ‌ریزی اطراف لوله خوب صورت نگیرد.






**شکل ۲- نمای سد (سطح مقطع) در زمان شکسته شدن.**

هم‌چنین دیگر راه‌های موثر برای کند کردن یا کنترل درست میزان خروج آب به وسیله‌ی زهکش‌ها، که در اطراف محل سنگ‌ریزی شده‌ی بیرون لوله تجمع یافته بودند در نظر گرفته‌نشد و سایش درونی را باعث شده بود.

جنبه‌ی دوم فقدان سازگاری بین ناحیه‌ی کم عمق صافی ماسه‌ای که در زیر مقره قرار داشت (شکل ۲) و سنگ‌ریزی‌های در تماس با آن بود. به عبارت ساده، هیچ گونه مانعی برای جلوگیری از مهاجرت آزادانه‌ی ذرات ماسه به درون حفره‌های سنگ‌ریزی وجود نداشت.

در شب ۱۹ اوت ۱۹۹۵، وقتی که گودال‌های سایش درونی در حال رشد بودند، شکست شروع شد و حفره‌های اطراف لوله‌ای انحرافی به درون آب‌گیر شکسته شدند. بعد از چند ساعت، لجن‌های محکم نشده و آب به درون ناحیه‌ی سنگ‌ریزی محصور شده وارد گردیده و باعث بالا آمدن آب در درون آن می‌شود. این قسمت پیش‌آمدگی صافی ماسه‌ای را اشباع کرده و موجب شد ذرات ماسه آزادانه به درون سنگ‌ریز چکیده و آن را بشویند.

وقتی که حفاظ زیرین در اثرشسته شدن ماسه از بین رفت، مقره‌ی سد سقوط کرد. تاج سد به وسیله‌ی کج شدن و دوران به درون باعث شکاف‌های طولی شد. تحلیل‌های تنشی و تغییر شکل به وسیله تیمی که مسئول بررسی فنی شکسته شدن سد بود به منظور شبیه‌سازی این فرایند انجام گرفتند و الگوهای جابه‌جایی مربوطه، حالت مشابه به حالت شکسته شدن سد را این گونه نشان دادند که بعد از به وجود آمدن شکاف و اختلال بسیار زیاد در مقره، سایش عظیم درونی باعث به وجود آمدن سوراخ‌ها و گودال‌هایی در شیب جریان رو به بالا شده و فرایند شکست را تکمیل نموده‌اند.

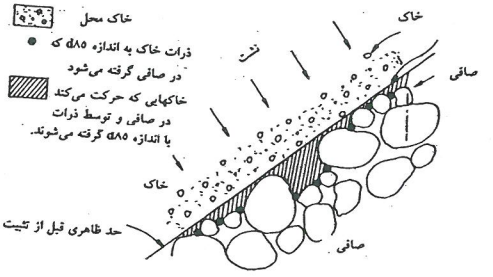
## راه‌کارها

اصول طراحی سدهای فعلی باطله و فنون ساخت آن‌ها برای جلوگیری از مکانیزم‌های شکست که در اومایی رخ داد موجود هستند.

لوله‌ها و مجاری از هر نوعی وقتی در درون مقره‌ی سد باشند همیشه احتمال آسیب‌پذیری به وسیله‌ی نفوذ و سایش درونی در مورد آن‌ها وجود دارد. چرا که تراکم انباشت اطراف لوله‌ها یا مجاری حتی تحت بهترین شرایط مشکلاتی را به وجود خواهد آورد.

پوشش سیمانی لوله‌ها برای دست یابی به تراکم خوب در اطراف آن‌ها مسئله‌ای مهم و اساسی است. طوقه‌های نفوذ، یا حلقه‌های نمایان سیمانی که در محل ساخته می‌شوند، روشی برای جلوگیری از مسیر نفوذ در طول بیرونی لوله است.

امروزه استفاده از زهکش صافی دیافراگمی در اطراف انتهای جریان رو به پائین لوله برای کنترل مطمئن نفوذ از طریق انباشت آن صورت می‌گیرد. به دلیل ماهیت بحرانی این ساختارها، لوله‌ها برای زهکشی، انحراف‌ها، خروجی‌ها و ته‌نشین سازی اغلب استفاده نمی‌شوند و ترجیحاً به جای عبور از درون سد از بالای آن عبور داده می‌شوند. در موارد مشابه، روش‌های بهتری برای طراحی و ساخت نواحی صافی‌برای‌جلوگیری‌ازنوع شسته‌شدن ماسه‌به‌درون سنگ‌ریز که در اومایی‌به‌وقوع‌پیوست‌وجوددارند (شکل ۳). آزمایش‌هایی که در آزمایشگاه انجام شدند نشان دادند که ویژگی اندازه‌ی ذره که توانایی خاک در عبور از درون




**شکل ۳- روش‌هایی برای طراحی و ساخت نواحی فیلتر برای جلوگیری از سایشی که در اومایی رخ داده وجود دارند.**

حفره‌ها (سوراخ‌ها) را کنترل می‌کند $d_{85}$ برای خاک نرم (دانه‌ریز) و $d_{15}$ برای خاک دانه درشت‌تر یا خاک صافی صافی است. $d_{85}$ و $d_{15}$ نشان دهنده‌ی ابعادی است که ۸۵٪ و ۱۵٪ ماده‌ی مربوطه دانه‌ریز است. اگر نسبت $d_{15}/d_{85}$ به ٤ محدود شود، شکل ۳ نشان می‌دهد که چگونه صافی به سرعت ذرات دانه‌ریز خاک را حبس کرده و از حرکت آن‌ها جلوگیری می‌کند.

یک صافی خوب به ساخت آن بستگی دارد. دامنه‌ی وسیعی از ابعاد ذرات در مصالح صافی، تفکیک ابعادی ذره را در حین استقرار تضمین کرده و توانایی آن را برای محبوس نمودن ذرات دانه‌ریز بی‌اثر می‌کند. در نتیجه لایه‌ها به صورت چند لایه‌ای، یا صافی‌های مدرج، یا نواحی دانه‌درشت‌تر که هر کدام دارای ذراتی باحداکثر ابعاد بوده، اغلب ضروری هستند. این‌ها باید با دقت ویژه‌ای ساخته شوند. جعبه‌های پخش کننده یا تجهیزات دیگر که مخصوصاً برای کاهش تفکیک ابعادی طراحی گشته بعضی اوقات باید استفاده شوند. استفاده از ژئوفابریک‌های مصنوعی در کاربردهای صافی سد باطله برای تکمیل صافی‌های مدرج در نواحی غیر حساس رو به رشد است.

سدهای باطله‌ای که برای مواد زائد معدن ساخته می‌شوند، همانند اومایی، راه‌حل مشترک و خوبی برای بسیاری از عملیات معادن روباز فراهم می‌کنند و در بین دیگر سدها از پایدارترین و اقتصادی‌ترین انواع سدها هستند. ولی به هر حال، طراحی صافی، مشکل است، چون درجه‌بندی باطله‌ی معدن معمولاً به طور دقیق قبل از شروع معدن یا عملیات معدنی که به طور آسان کنترل می‌شوند، قابل پیش‌بینی نیست. موادی که در محل موجود هستند و معیارهای صافی را برآورده می‌کنند، احتمالاً مناسب‌اند، در غیر این صورت به فرایند بعدی، شستشو یا سرند کردن و ساختن صافی‌ای که همیشه برای تجهیزات بزرگ حمل و نقل معدنی مناسب نیست احتیاج است. در نتیجه صافی‌ها اغلب پر هزینه‌ترین اجزای سد هستند و مشکل‌ترین فرایند ساخت را دارند. به هر حال امنیت سد باطله‌ی ضایعات معدن باید به همان دقت طراحی، ساخت و کنترل کیفیت صافی‌هایش باشد.

## نتیجه‌گیری

سد باطله در اومایی دیگر قابل بهره‌برداری نیست. لجن‌های باقی مانده در محوطه‌ی سد به همان صورت باقی می‌ماند و سد برای همیشه بدون استفاده باقی خواهد ماند. سدهای جایگزین جدید در اومایی طرح متفاوتی خواهند داشت و هیچ کدام از ویژگی‌هایی که مسئول شکسته شدن سد قدیمی شد را شامل نمی‌گردد. موارد فوق به برقراری آرامش و اعتماد به نفس دولت و مردم گویان کمک کرده است تا اطمینان حاصل کنند که عملیات جدید در اومایی به طور سالم می‌توانند اجرا شوند. عملیات معدنی در فوریه‌ی ۱۹۹٦ از سرگرفته شد. تجربه‌ی اومایی نباید به عنوان انعکاس نادرست مدیریت عملیات باطله در کل صنعت محسوب شود. فناوری‌هایی برای جلوگیری از نوع شکستی که در سد باطله اومایی به وقوع پیوست موجود است. توسعه‌ی بهتر، آگاهی از این فناوری‌ها و درس‌هایی که از اومایی آموخته شدند، می‌توانند ایمنی سدهای باطله را در آینده بهبود بخشند و کمک کنند تا از وقوع حوادث مشابه در جاهای دیگر جلوگیری شود.

★ Vik, S. G. (November 1996) "*Tailings Dam Failure at Omai in Guyana*", Mining Engineering J., 8, PP. 34-37