

بررسی عملکرد سد باطله معدن مس مزرعه اهر از لحاظ پایداری و نشت

قدرتبرزگری^{۱*}، راضیه مشهدی جعفرلو^۲، عطاءاله ندیری^۳

۱- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، زمین شناسی مهندسی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

* نویسنده مسئول: gbarzegari@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

چکیده

پایداری سدهای باطله از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی از اهمیت زیادی برخوردار است. پایداری و ایمنی این سدها یکی از نگرانی‌های کشورهای معدنی جهان از جمله ایران است. سد باطله معدن مس مزرعه در ۱۸ کیلومتری شمال شهرستان اهر، واقع شده است. این سد باطله به منظور ذخیره باطله حاصل از کارخانه تعلیظ و کاهش آلودگی معادن منطقه احداث شده است. تراز کنونی سد باطله پس از احداث و دو مرحله ترفیع ۲۰۸۵ (متر بالاتر از سطح دریا) و با ارتفاع ۴۷ متر از بستر می‌باشد. ساختگاه سد مورد مطالعه در زون زمین ساختی البرز غربی واقع شده است. هوازگی توده سنگ در سطح و در راستای درزه‌ها در حد کم تا متوسط ارزیابی می‌گردد. بطور کلی شاخص کیفی توده‌سنگ تا عمق ۲۰ متری از سطح زمین در حد خیلی ضعیف تا ضعیف و در اعماق بیشتر در حد متوسط تا عالی است. بر اساس نتایج آزمایش لوژان، تراوایی ساختگاه در بستر سد تا عمق حدود ۱۲ متر بطور متوسط ۳۵ لوژان و در تکیه‌گاه‌ها کمتر از ۵ لوژان تعیین شده است. در این تحقیق پایداری و عملکرد سد از لحاظ نشت از طریق مطالعات میدانی و تحلیل تعادل حدی با نرم افزارهای Seep/W و Slope/W مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد شيروانی‌های بالادست و پایین‌دست سد ضریب پایداری لازم را دارند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نشت، آب‌بندی بستر اینگونه سدها بر اساس نفوذپذیری ساختگاه در زمان احداث آن‌ها لازم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، تحلیل نشت، زمین‌شناسی زیست محیطی، سد باطله.

مقدمه

متوالی ارتفاع توسعه باید. عموماً برای احداث سدهای باطله از مصالح سنگریزه‌ای و یا نخاله‌های معدنی استفاده می‌شود. برای افزایش ارتفاع این نوع سدها از سه روش مختلف استفاده می‌شود که عبارتند از: بالارو، پایین‌رو و مرکز رو یا محور ثابت. در روش بالارو، پس از احداث خاکریز اولیه، مواد باطله از پیرامون تاج آن تخلیه می‌شود سپس بستر عریض به‌وجود آمده در اثر این تخلیه، به عنوان پی برای خاکریز بعدی عمل می‌کند. در این روش باطله‌ها باید شامل ماسه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد (Vick, 1990). علاوه بر دانه‌بندی باطله، تراز سطح فریاتیک و

به سازه‌های که برای انباشت و ذخیره پساب و مواد باطله احداث می‌شوند تا از رهاسازی کنترل نشده آن‌ها و انتشار آلودگی‌ها جلوگیری گردد سدهای باطله گفته می‌شود. پایداری و ایمنی سدها یکی از نگرانی‌های کشورهای معدنی خیز همچون ایران است. در سدهای باطله، طرح سد اولیه، هندسه داخلی و خارجی سازه را مشخص می‌کند اگر طراحی سد اولیه شامل آب‌بندها و یا بخش‌های زهکشی باشد، این بخش‌ها باید قبل یا همزمان با ساخت سد اولیه و همچنین با هر افزایش

مرتبط با شکست سدهای باطله که منجر به آلودگی زیست محیطی و تلفات جدی می‌شود وجود ندارد (Macklin et al., 2006). آمار شکست سدهای باطله در ۱۰۰ سال گذشته ۱/۲ درصد برآورد شده است در حالی که این آمار برای سدهای ذخیره آب سنتی، در حد ۰/۱ درصد است (ICOLD, 2001). بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از ۳۰۰ سد باطله، دلایل اصلی شکست سد باطله عبارتند از (Davies et al., 2000): (۱) لغزش دایره‌ای (۲) ظرفیت باربری ناکافی بستر و پی سد (۳) سیلاب و وقوع سرریز از روی بدنه سد باطله (۴) وقوع نشت و به تبع آن جوشش و فرسایش داخلی سد (۵) زلزله. لغزش دایره‌ای، ناشی از تشکیل سطح گسیختگی به شکل قاشقی شکل است که در آن سطح، تنش برشی ایجاد شده بر مقاومت برشی غالب می‌شود و عمده‌تاً بدلیل بارگیری بیش از حد، افزایش فشار منفذی، شیب بیش از حد شیروانی‌ها و بارگذاری لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. سد باطله از نوع سنگریزه‌ای لوس فرایلز^۱ در جنوب اسپانیا، در سال ۱۹۹۸ به سمت پایین دست لغزش کرد و ۱/۳ میلیون متر مکعب باطله از نوع پیریت ریز و ۵/۵ میلیون مترمکعب آب باطله آزاد کرد (Gallart et al., 1999). در سال ۲۰۱۴، سد باطله مونت پولی^۲ کانادا بطور ناگهانی گسیخته شد و حدود ۲۵ میلیون مترمکعب از باطله و زهاب را در حوضه دریاچه رها کرد (Petticrew et al., 2015).

در بارندگی‌های شدید، سطح آب در مخزن سد در مدت زمان کوتاهی بالا می‌رود. بویژه اگر تراوایی مصالح سد پایین باشد، آب حاصله از روی بدنه سد عبور می‌کند^۳ (Lyu et al., 2019). هنگامی که سیلاب از روی شیب سد باطله جاری می‌شود، باعث فرسایش هیدرولیکی و در نتیجه ایجاد شکاف در بدنه سد باطله می‌گردد. همچنین نفوذ آب، باعث اشباع باطله و افزایش بار مرده سد باطله و به تبع فرسایش ثقلی را سبب می‌گردد. اشباع شدن مصالح سد باطله نیز باعث کاهش مقاومت برشی و ناپایداری سد می‌گردد. در سال ۱۹۹۴، سد باطله مری اسپریت^۴ در آفریقای جنوبی پس از بارندگی‌های شدید و عبور آب از تاج سد گسیخته شد و در اثر آن ۶۰۰ هزار مترمکعب مواد باطله و ۹۰ هزار مترمکعب آب باطله رها

روانگرایی در عملکرد آن‌ها مؤثر هستند. سطح فریاتیکی سطح اشباع در ذخیره‌گاه و خاکریز است. چهار عاملی که تراز سطح فریاتیکی را تعیین می‌کنند عبارتند از (Vick, 1990): تراوایی مصالح پی نسبت به مصالح باطله، دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای بدنه سد، تراز باطله سیال مخزن سد و تراوایی جانبی نهشته‌ها. این سدها بدلیل تراکم نسبی پایین مصالح و درجه اشباع شدگی بالا، برای مناطق لرزه‌خیز مناسب نیستند (Zardari, 2011).

برای احداث سد باطله به روش پایین‌رو از مصالح سنگریزه‌ای متراکم استفاده می‌شود برای این منظور می‌توان از ماسه و شن نفوذناپذیر برای پایین آوردن سطح فریاتیکی استفاده نمود. مرحله بعدی احداث بر روی شیروانی پایین‌دست قبلی قرار گرفته و تاج سد به سمت پایین‌دست تغییر مکان می‌یابد. این روش نسبت به روش بالارو هزینه و مزیت بیشتری دارد. از مزایای این روش، امکان تعبیه بخش‌های کنترل نشت از قبیل هسته نفوذناپذیر و زهکش داخلی در بدنه سد است. همچنین به علت تراکم مصالح خاکریز، در برابر روانگرایی مقاوم هستند (Zardari, 2011). از معایب این روش، حجم زیاد مصالح موردنیاز برای افزایش ارتفاع سد است که این حجم با افزایش ارتفاع خاکریز در هر مرحله به صورت صعودی افزایش می‌یابد. احداث سد باطله به روش مرکزرو حالت بینابینی دو روش قبل است. این نوع سد با دایک اولیه شروع می‌شود و مرحله بعدی آن در هر دو طرف روی شیروانی پایین‌دست و بستر بالادست تاج سد ادامه می‌یابد. بطوری که محور مرکزی تاج سد تقریباً در جای خودش ثابت باقی می‌ماند (Vick, 1990). این نوع خاکریز زمانی در برابر فعالیت‌های لرزه‌ای پایدار است که مصالح به خوبی متراکم شده و زهکش داخلی خوبی تعبیه شده باشد (Zardari, 2011).

در سطح جهانی، حوادث زیادی از شکست سدهای باطله گزارش شده است. (Rose et al., 2023) شکست سدهای باطله در ماریانا و برومادینهو در برزیل را مورد بررسی قرار دادند. (Kutter et al., 2023) تأثیر شکست سد باطله بر روی کیفیت آب رودخانه دوس را به عنوان بزرگترین فاجعه زیست محیطی برزیل مطالعه کرده‌اند. درک کافی از مکانیزم‌های

³ Overtopping

⁴ Merriespruit

¹ Los Frailes

² Mount Polley

میدان نشت به عنوان خط حیات^۷ سد باطله شناخته می‌شود. در حال حاضر، شبیه‌سازی عددی رایج‌ترین روش مورد استفاده برای مطالعه میدان نشت در سدهای باطله است (Lyu et al., 2019).

ترکیب شیمیایی زهاب‌های مواد باطله تأثیر بالقوه‌ای در آلودگی‌های زیست محیطی دارند. بیشتر شرکت‌های معدنی با تغییر pH و استفاده از مواد شیمیایی برای استخراج عناصر از سنگ معدن استفاده می‌کنند. از آنجایی که بسیاری از فلزات سنگین آگریز هستند تمایل زیادی به جذب در خاک و یا نفوذ در آب‌های زیرزمینی از طریق بستر مخزن دارند.

در کشور معدن‌خیزی مثل ایران، تحقیقات کمی در رابطه با سدهای باطله انجام شده است. اصول فنی و پایش‌های این سدها با تبعیت از سدهای مخزنی آب طراحی و مدیریت می‌شود و به همین دلیل حوادث و مسائل زیست محیطی متعددی در زمان بهره‌برداری از این سدها گزارش می‌شود که نیاز به پایش و یا در صورت لزوم علاج‌بخشی دارند. از آنجایی که تعداد و اندازه این‌گونه سدها بویژه در کشورمان ایران رو به افزایش است در این مقاله ضمن تشریح مبانی این سدها، به بررسی موردی سد باطله معدن مزرعه پرداخته شده و مسأله پایداری و نشت این سد در تراز فعلی (۱۲۸۵ متر بالاتر از سطح دریا) بررسی شده است. یافته‌های این مقاله می‌تواند در اصلاح بهره‌برداری و ترفیع آتی سد مورد مطالعه و همچنین طراحی، پایش و کنترل سایر سدهای باطله کشور مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

مشخصات سد باطله معدن مزرعه

سد باطله معدن مس مزرعه در فاصله ۱۸ کیلومتری شمال شهرستان اهر و در دامنه کوه‌های شیور واقع شده است. راه دسترسی به این منطقه از طریق مسیر جاده آسفالت اهر به روستای مزرعه و جاده اختصاصی معدن مس مزرعه میسر است. این سد از نوع ذخیره‌گاه درون دره‌ای است. هدف از احداث این سد باطله، جمع‌آوری و ذخیره پساب‌ها و باطله‌های کارخانه تغلیظ معادن مس اطراف آن منطقه است.

شد (Bird et al., 2008). در سپتامبر ۲۰۱۰، سد باطله زیجین^۵ در گوانگدونگ چین به طور ناگهانی فرو ریخت. این رویداد باعث کشته شدن ۲۲ نفر و زیان اقتصادی شدید و آسیب دیدگی ۶۳۷۰ مورد خانه گردید (Shen et al., 2012). بروز نشت و وقوع جوشش^۶ یکی دیگر از علل گسیختگی سدهای باطله است (Lyu et al., 2019). در سال ۱۹۸۵، یک سد باطله در نزدیکی استاوا در شمال ایتالیا در اثر بالا آمدن سطح فریاتیک و وقوع جوشش فرو ریخت و جان ۲۶۸ نفر را گرفت و خسارات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی به بار آورد (Alexander, 1985).

از آنجا که رسوبات باطله از عموماً از مصالح با دانه‌بندی یکنواخت، اشباع و عادی تحکیم یافته تشکیل شده‌اند گسیختگی سدهای باطله در اثر زلزله عمدتاً ناشی از روانگرایی مصالح باطله به‌ویژه در سدهای درون‌دره‌ای است (Harper et al., 1992). موارد متعددی از خرابی بویژه در سدهای باطله بالارو، در اثر روانگرایی مصالح مشاهده شده است. در سال ۱۹۹۴، یک سد باطله ۲۴ متری در تنگه تاپو، ایالات متحده آمریکا در اثر روانگرایی گسیخته شد (Rico, 2008). در سال ۲۰۱۱، وقوع زمین‌لرزه‌ای در شرق ژاپن موجب روانه شدن مواد باطله سد کایاکاری در معدن اوهایا شده و به پایین دست آسیب وارد گردد (Ishihara et al., 2015).

پدیده نشت عبارت است از حرکت سیال (آلوده و غیرآلوده) از مخزن سد به سمت پایین‌دست در اثر نیروی ثقلی که می‌تواند از طریق پی، تکیه‌گاه‌ها و بدنه سد به‌وقوع بپیوندد. در سدهای باطله سنگریزه‌ای بدون سازه آب‌بندی، زهاب‌های نشتی به حوضچه مشخصی در پایین دست منتقل می‌شود. این زهاب‌ها مجدداً در یک چرخه بسته برای استفاده مجدد، بازیافت و یا ذخیره به داخل مخزن سد پمپاژ می‌گردد. پارامترهایی مانند تراوایی توده سنگ بستر و مصالح بدنه سد، دانه‌بندی، مقدار باطله اشباع مخزن سد و تراز زهاب روی آن مستقیماً بر سطح فریاتیک و به تبع آن بر سرعت و مقدار نشت اثرگذار هستند. از آنجایی که مصالح مورد استفاده در احداث سدهای باطله نفوذپذیر هستند، پایداری آن‌ها به میزان زیادی تحت تأثیر میدان نشت و شبکه جریان قرار می‌گیرد. سطح فریاتیک در

⁷ Life line

⁵ Zijin

⁶ Piping

سال ۱۳۹۶ انجام یافته و نهایتاً برای افزایش مجدد ظرفیت مخزن ارتفاع سد تا تراز ۲۰۸۵ متر بالاتر از سطح دریا در سال ۱۳۹۹ به روش بالارو انجام شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸). سد مورد مطالعه از نوع سنگریزه‌ای و دارای فیلتر و زهکش می‌باشد. ارتفاع کنونی سد از بستر در محل تاج ۴۷ متر و عرض تاج آن در مرحله نهایی ۷ متر است. نیمرخ عرضی بدنه سد و تصاویری از وضعیت فعلی آن به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

به دنبال بارندگی‌های شدید اردیبهشت و خرداد ماه سال ۱۳۸۹، سد باطله قبلی معدن مزرعه بطور پیاپی دچار گسیختگی گردید و در پی این رخداد، حجم قابل توجهی از باطله در رودخانه پایین‌دست جاری شد (شکل ۱). سد باطله کنونی با استفاده از مصالح سنگریزه‌ای در همان موقعیت سد قبلی مجدداً طراحی و احداث گردید. مرحله اول ساخت این سد باطله تا تراز ۲۰۷۰ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۰ اجرا شده است. در ادامه به منظور افزایش حجم مخزن، عملیات ترفیع تاج بدنه سد تا تراز ۲۰۸۰ به روش پایین‌رو در



Figure 1- Images of Mazraeh copper mine tailing dam failure in 2010 (Toossab consulting company, 2019).

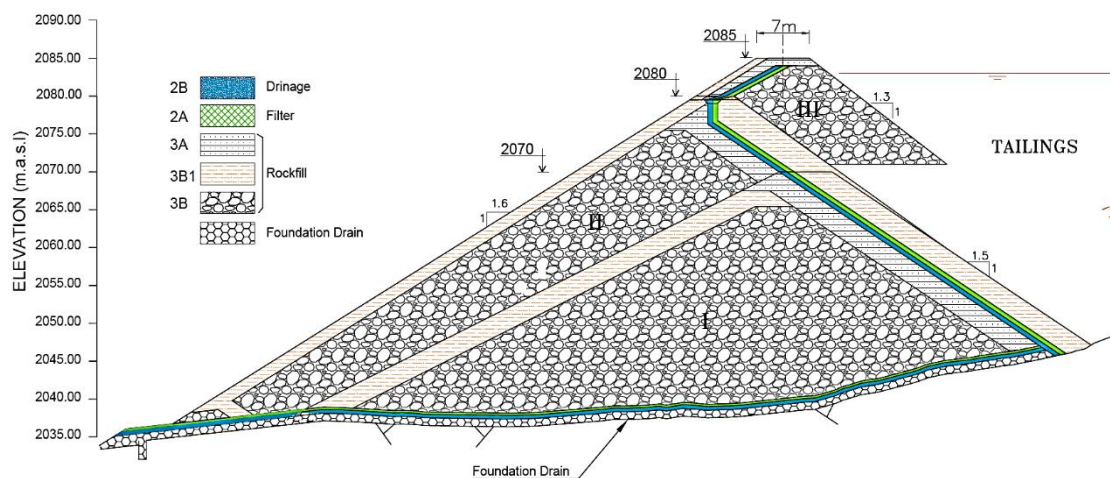


Figure 2- Typical cross-section and raised stages of Mazraeh copper mine tailing dam.

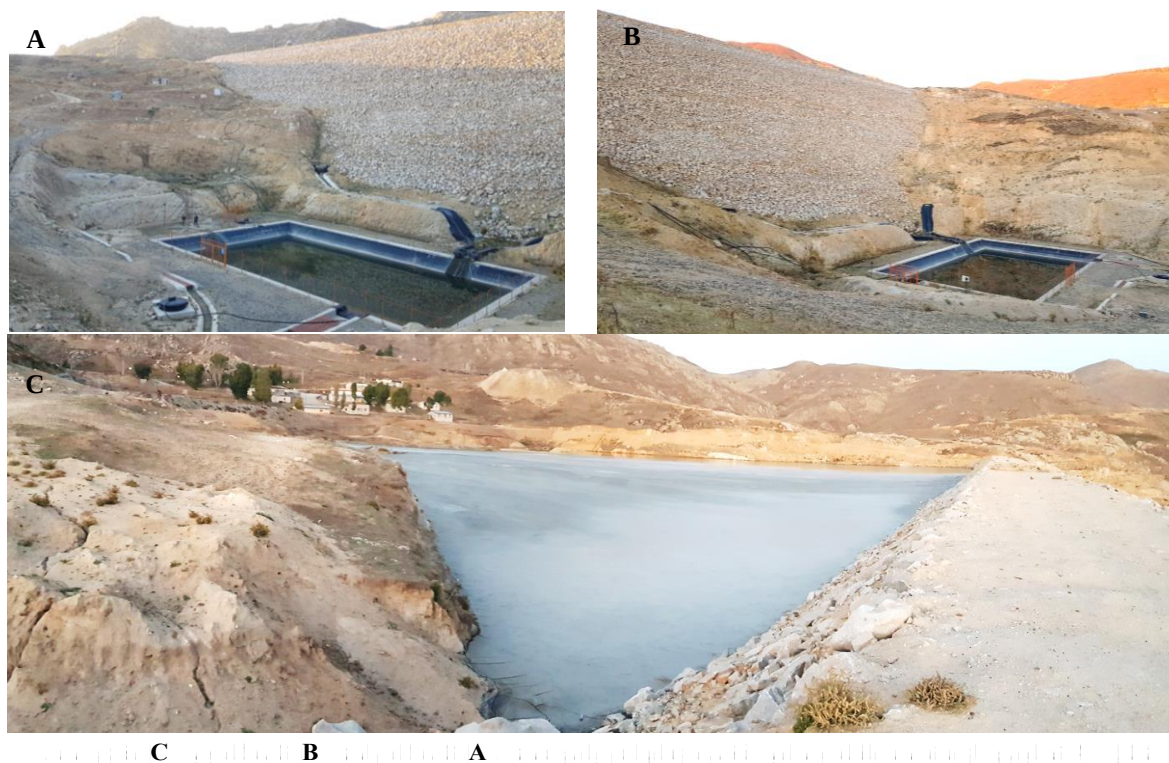


Figure 3- Images from the dam body and drainage sump in downstream A) Right abutment, B) Left abutment C) Dam reservoir.

زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد باطله مورد مطالعه

می‌شود. توده‌سنگ ساختگاه سد بوسیله چهار دسته درزه اصلی عموماً پرشیب با سطح مواج و صفحه‌ای زبر، دارای هوازگی کم با تداوم ۱ تا ۳ متر، بازشدگی کم و فاصله‌داری در حد ۲۰ تا ۶۰ سانتی متر دچار شکستگی شده‌اند (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷).

برای شناسایی زمین‌شناسی زیرسطحی ساختگاه، تعداد ۵ گمانه ماشینی با عمق تا ۷۵ متر حفر شده است. بر اساس نتایج حاصل شده، شاخص کیفی توده‌سنگ در بستر سد، تا عمق ۲۰ متری از سطح زمین در حد خیلی ضعیف تا ضعیف و در اعماق بیشتر در حد متوسط تا عالی است. شاخص کیفی توده‌سنگ در تکیه‌گاه چپ نیز تا عمق ۲۰ متر در رده ضعیف تا نسبتاً ضعیف و در اعماق بیشتر متوسط تا عالی ارزیابی شده است. به نظر می‌رسد این شاخص در تکیه‌گاه راست نیز در ۲۰ متر اول از سطح سنگ بستر مشابه تکیه‌گاه چپ در رده ضعیف تا نسبتاً ضعیف باشد ولی در اعماق بیشتر بجر در عمق ۳۵ تا ۴۵ متری که به یک زون خیلی ضعیف برخورد گردیده در سایر نقاط در حد متوسط تا خوب می‌باشد. تراوایی توده‌سنگ در تکیه‌گاه راست خیلی پایین (کمتر از ۳ لوژان) و در بستر سد بسیار متغیر است بطوری که تا عمق ۳۰ متری در حد بین

گستره مورد بررسی از دیدگاه تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی ایران، در زون البرز - آذربایجان قرار دارد و جزو فعال - ترین مناطق زمین‌ساختی ایران است که رخدادهای آن از پرکامبرین تا عهد حاضر در منطقه قابل مشاهده است (نبوی، ۱۳۵۵). این گستره بخشی از فلات بالآمده ولکانیکی اهر است که بوسیله حوضه چین خورده قره‌داغ و حوضه فرورفته ارسباران در شمال محدود می‌شود. بخش اعظم محدوده را توده‌های نفوذی به سن الیگوسن موسوم به شیورداغ تشکیل می‌دهد که در بخش‌هایی دچار دگرسانی گرمایی شده است. روند ساختاری منطقه عموماً شمال غرب - جنوب شرق است. دره تشکیل دهنده‌ی ساختگاه سد به شکل V باز و نسبتاً متقارن است. عرض بستر رودخانه در محل محور سد حدود ۲۵ متر و در تراز تاج تا ۳۵۰ متر است. متوسط شیب دیواره دره در تکیه‌گاه‌ها حدود ۳۰ درصد است. توده‌سنگ ساختگاه سد از سنگ‌های گرانیتی به سن الیگوسن تشکیل شده است که بطور گسترده‌ای بوسیله رسوبات واریزه‌ای درشت‌دانه پوشیده شده‌اند. بر اساس مطالعات میدانی، هوازگی توده - سنگ در سطح و در راستای درزه‌ها کم تا متوسط ارزیابی

۴ تا ۷۱ لوژان و در اعماق بیشتر، کمتر از ۳ لوژان اندازه‌گیری شده است. تراوایی توده‌سنگ در تکیه‌گاه چپ بدلیل وجود زون خرد شده در عمق ۲۳ تا ۲۷ متری در حد ۱۰ تا ۳۰ لوژان و در سایر مقاطع کمتر از ۵ لوژان است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷). در شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی محدوده سد باطله معدن مس مزرعه نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ بکر بر اساس نتایج آزمایشگاهی (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

Table 1- Physical and Mechanical parameters of the intact rock specimens based on experimental tests (Toossab consulting company, 2018).

Rock type	γ (kN/m ³)		UCS (MPa)		E (GPa)		ν		Water absorption (%)	Triaxial test	
	Sat.	Wet.	Sat.	Wet.	Sat.	Wet.	Sat.	Wet.		ϕ (deg.)	c (MPa)
Granite	25.9	93.62	77.39	29.65	24.42	0.19	0.21		0.77	49.41	7.03

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه سد باطله معدن مزرعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

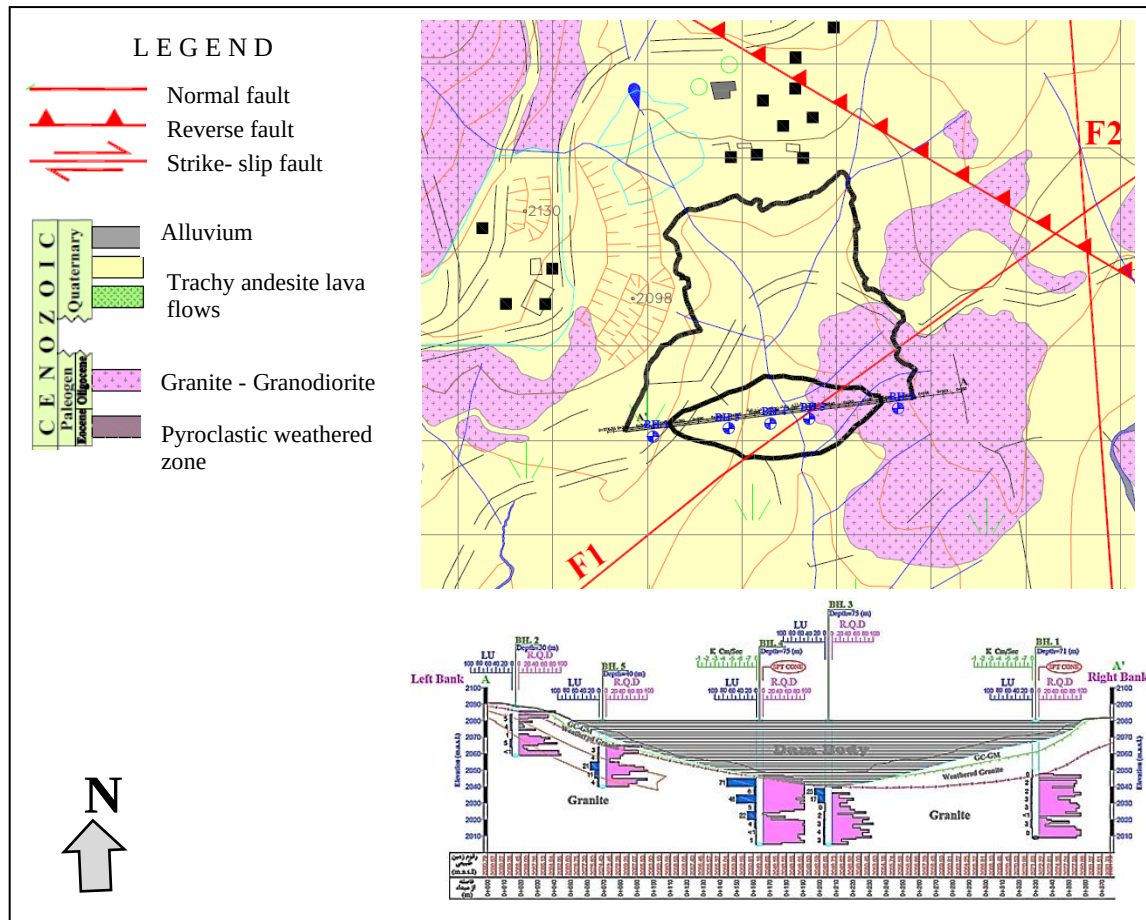
Table 2- Geomechanical parameters of the rockmass at Mazraeh copper mine tailing dam (Toossab consulting company, 2018).

Location	Rock Mass Geomechanical Parameters					
	RMR	Q	σ_m (MPa)	E_d (GPa)	ϕ (deg.)	C (MPa)
Right Abutment	60	6.16	16-17	4-5	37	4.15
River Bed	56	1.31	18-19	3-4	34.63	4.8
Left Abutment	53	4.42	15-16	2-3	32.3	4.2

پارامترهای مهندسی مصالح بدنه سد

بیشتر از خطاهای استفاده از روش‌های تقریبی‌تر تحلیل باشد (USBR, 1987). انتخاب دانه‌بندی به ویژه میزان درصد ریزدانه، دانسیته نسبی، فشار جانبی، شکل ذرات و نسبت تخلخل تأثیر زیادی بر نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی آزمایشگاهی برای هر دو حالت کرنش صفحه‌ای و سه محوری دارد. برای بسیاری از سدها، انتخاب مقادیر مقاومت برشی با مقایسه با نتایج آزمایش به دست آمده از داده‌های منتشر شده برای سدهایی که قبلاً طراحی و ساخته شده‌اند، عملی است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده برای تحلیل پایداری در جدول ۴ ارائه شده است.

پارامترهای توزیع دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده در بدنه سد در جدول ۳ ارائه شده است. مصالح مورد استفاده فاقد چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن تابعی از تنش نرمال می‌باشد. درک و ارزیابی کامل از خواص فیزیکی مصالح سنگریزه‌ای برای استفاده از روش‌های فعلی طراحی ضروری است. اگر تخمین نادرستی از مقاومت برشی مصالح ساختمانی انجام شده باشد، هیچ تحلیل پایداری، صرف نظر از اینکه چقدر پیچیده و از لحاظ نظری دقیق است، نمی‌تواند برای طراحی مفید باشد. در بسیاری از موارد، خطاهای ناشی از ارزیابی نادرست خواص مصالح سنگریزه‌ای می‌تواند بسیار



شکل ۴- نقشه زمین شناسی محدوده ساختگاه سد باطله معدن مزرعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).
Figure 4- Geological map of the Mazraeh copper mine tailing dam site (Toossab consulting company, 2018)

جدول ۳- توزیع دانه بندی مصالح سنگریزه‌ای بدنه سد (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).
Table 3- Grain size distribution of the rock materials of the study dam body (Toossab consulting company, 2018).

Material type		Grain size distribution limits (mm)			
		% < 2.36	% < 19	D _{max}	D _{min}
Rock fill	3A	15	40	400	-
	3B	10	30	800	-
	3B1	10	30	1000	-
Filter	2A	50	90	19	0.075
Drainage	2B	0	19	210	1

جدول ۴- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده در بدنه سد مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).
Table 4- Physical and mechanical parameters of the materials used in the study dam body (Toossab consulting company, 2018).

Material type	Φ' (degree)	C' (kPa)	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν
Rock fill	47	0	22	40	0.3
Filter	36	0	20	35	0.33
Drainage	36	0	20	30	0.33
Old tail	31	3	19	6	0.35
New tail	28	3	19	6	0.45
Bed Rock	32	4000	22	1000	0.2

تحلیل پایداری بدنه سد

تحلیل پایداری بر اساس خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده و ابعاد سد (ارتفاع و شیب طرفین بدنه سد) انجام می‌شود. برای تحلیل پایداری سد باطله مورد مطالعه از نرم‌افزار تعادل حدی Slope/W استفاده شده است. در تحلیل شبه استاتیکی، پایداری شیروانی‌های بدنه سد در برابر بارگذاری زلزله بررسی می‌شود مقدار بار ناشی از زلزله از حاصل ضرب وزن خاک در ضریبی به عنوان ضریب زلزله k تعیین و به عنوان نیروی افقی اعمال می‌شود. برای این منظور لازم است مشخصات زلزله مبنای بهره‌برداری (OBE^8)، حداکثر زلزله طراحی (MDE^9) و یا حداکثر زلزله محتمل (MCE^{10}) تعیین گردد. در صورت وقوع زلزله مبنای دوره بهره‌برداری، آسیب‌های وارده محدود و قابل اصلاح بوده و سد باید کماکان قابل بهره‌برداری باشد. در صورتی که در حداکثر زلزله طراحی، خرابی‌ها دامنه‌ی وسیع‌تری داشته و بهره‌برداری مختل می‌شود اما در این شرایط هم یکپارچگی سازه‌ای سد باید حفظ شده و آب یا رسوب به صورت کنترل شده از آن تخلیه شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۴).

حداکثر زلزله‌ی محتمل، نیرومندترین جنبش زمین است که با توجه به سابقه لرزه‌خیزی و حداکثر فعالیت چشمه‌های لرزه‌زا در گستره مورد مطالعه امکان وقوع آن وجود دارد. احتمال وقوع چنین زمین‌لرزه‌ای در طول عمر سد، بسیار کم و دوره‌ی بازگشت آن بسیار طولانی است (در روش‌های احتمالاتی اغلب تا حدود ۱۰۰۰۰ سال یا بیشتر). بر اساس رهنمودهای ICOLD، مناسب‌ترین روش برای تعیین پارامترهای جنبش نیرومند زمین در سطح MCE ، روش تعیینی است. برای طراحی مرحله‌ی بستن سد و دوره‌ی پس از آن، همواره حداکثر زلزله محتمل ملاک عمل قرار می‌گیرد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۴).

انتخاب ضریب شتاب شبه استاتیک یا ضریب زلزله (k)، مهمترین مرحله تحلیل شبه استاتیکی است که به عوامل مختلفی از جمله شرایط لرزه‌خیزی ساختگاه، درجه اهمیت سد، تبعات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی احتمالی در صورت خرابی، عمر مفید، ابعاد هندسی بدنه (ارتفاع و شیب)،

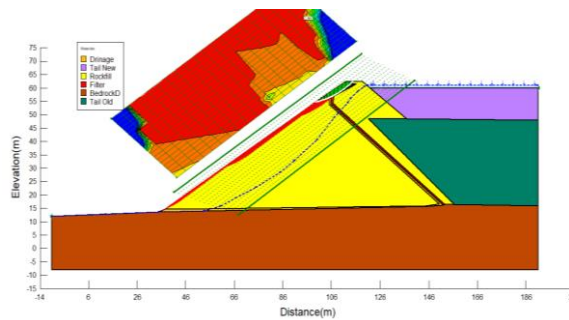
خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح بدنه و پی سد بستگی دارد. در ایالات متحده آمریکا این ضریب بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ و در ژاپن ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین ضریب شتاب شبه استاتیک، انتخاب مقدار آن بر اساس حداکثر شتاب زمین (PGA) در یک زلزله با سطح خطر مشخص و بر اساس رابطه $kh=\alpha PGA/g$ است. در این رابطه α به صورت یک ضریب ثابت در محدوده ۰/۳۳ تا ۰/۵ توصیه می‌شود. حداکثر شتاب نیز معادل شتاب بیشینه زمین در صورت وقوع زلزله طرح می‌باشد که عموماً در سدهای متعارف بر مبنای سطح خطر MDE (حداکثر زلزله طراحی) در نظر گرفته می‌شود. در برخی از مراجع، مقادیر حداقل و حداکثر ضریب زلزله افقی (kh) بین ۰/۱ تا ۰/۲ پیشنهاد شده است. هرگاه سدی با ضریب زلزله شبه استاتیکی بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ و ضریب اطمینان ۱ تا ۱/۱۵ طراحی شود پایدار بوده و تغییرشکل‌های سد در حد قابل قبولی کوچک خواهد بود (Seed et al., 1980). هانیس-گریفین و فرانکلین (۱۹۸۴) در گزارش خود برای گروه مهندسين چنین بیان نموده‌اند که هرگاه سد برای شتابی معادل نصف شتاب حداکثر در پی سد طراحی شده و حداقل یک متر ارتفاع آزاد داشته باشد با اعمال پارامترهای زهکشی نشده و حصول اطمینان یک پایدار خواهد بود. ایشان با بررسی بیش از ۳۵۰ شتاب نگاشت به این نتیجه رسیدند که شیروانی‌های سدهای خاکی با $kh=0.5amax/g$ تغییرشکل‌های بزرگ و خطرناکی نخواهد داشت (Hynes-Griffin and Franklin, 1984). ترزاقی مقدار $kh=0.1$ را برای زلزله‌های شدید (IX) و $kh=0.2$ را برای زلزله‌های بسیار شدید (X) و $kh=0.5$ را برای زلزله‌های فاجعه‌بار پیشنهاد کرده است. بر اساس مطالعات لرزه‌خیزی، حداکثر ضرایب شتاب افقی زلزله برای سطوح لرزه‌ای OBE با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و MDE با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله برای محدوده طرح مورد مطالعه، به ترتیب $g/15$ و $g/35$ تعیین شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷). بنابراین در این مطالعه برای تحلیل پایداری در حالت شبه استاتیک، ضرایب شتاب افقی و قائم به ترتیب برابر $g/175$ و $g/15$ اعمال شده است. در شکل ۵ تصاویری از نتایج تحلیل پایداری شیروانی

¹⁰ Maximum Credible earthquake

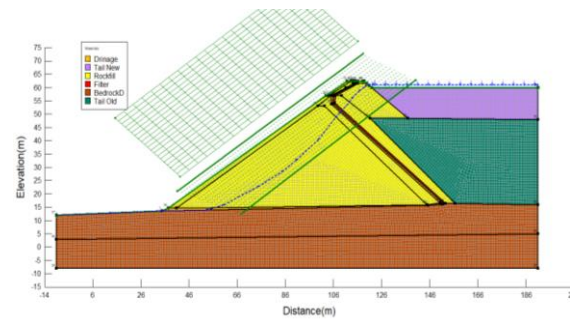
⁸ Operating basis earthquake

⁹ Maximum design earthquake

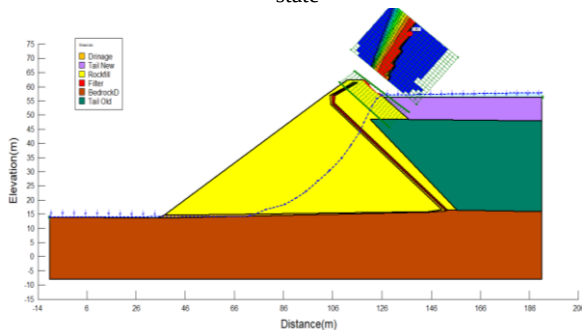
بالادست و پایین دست سد باطله مورد مطالعه در شرایط استاتیکی و شب استاتیکی نشان داده شده است.



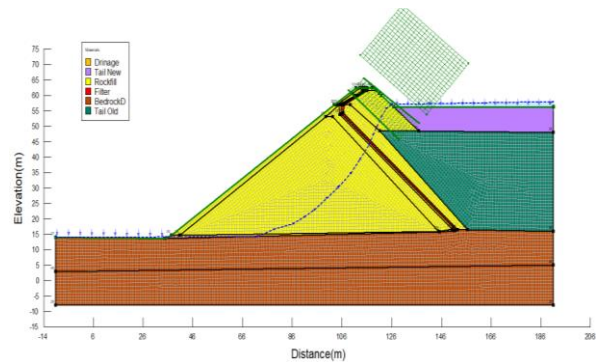
خروجی تحلیل پایداری شیب پایین دست سد، حالت استاتیک
FS=1.64
Output of stability analysis of the downstream slope, static state



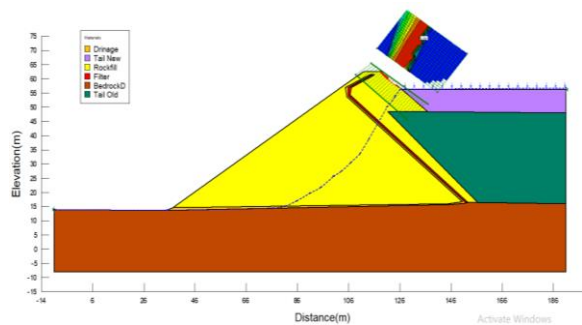
مدلسازی و مش بندی مقطع سد، شیب پایین دست
Modeling and meshing of the dam cross-section, downstream slope



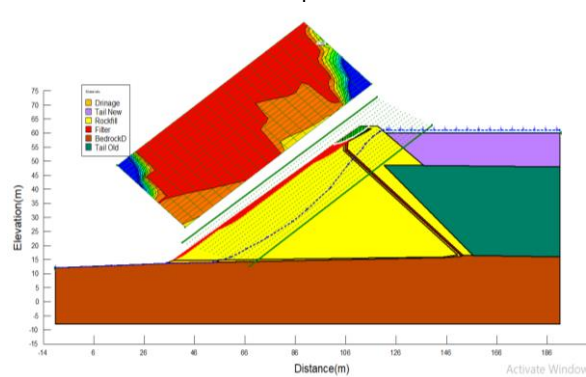
خروجی تحلیل پایداری شیب بالادست سد، حالت استاتیک
FS=1.40
Output of stability analysis of the upstream slope, static state



مدلسازی و مش بندی مقطع سد برای تحلیل پایداری شیب بالادست
Modeling and meshing of the dam cross-section, upstream slope



تحلیل پایداری شیب بالادست سد، حالت شبه استاتیک
FS=1.03
Output of stability analysis of the upstream slope, pseudo-static state



خروجی تحلیل پایداری شیب پایین دست سد، حالت شبه استاتیک
FS=1.19
Output of stability analysis of the downstream slope, pseudo-static state

شکل ۵- تحلیل پایداری سد باطله معدن مس مزرعه.
Figure 5- Stability analysis of the Mazraeh copper mine tailings dam.

است از طریق پی، تکیه گاه ها و بدنه سد بوقوع بپیوندد. عوامل اصلی تأثیرگذار بر مقدار نشت شامل خصوصیات زمین شناسی مهندسی ساختگاه، ارتفاع سد، نوع سد، مصالح بدنه سد،

تحلیل نشت

نشت عبارت است از نفوذ و حرکت آب (آلوده و غیر آلوده) از مخزن و یا ذخیره گاه سد به سمت پایین دست که ممکن

برای این منظور طول و ارتفاع مؤثر بدنه سد در بستر و تکیه-گاه‌های آن به تفکیک تعیین شده و مدل‌سازی هندسی بر اساس آن صورت گرفته است. تراوایی لایه‌های زمین‌شناسی بر اساس نتایج آزمایش‌های لوژان تعیین شده است. در جدول ۵، جزئیات ابعاد هندسی و مقادیر تراوایی برای بخش‌های مختلف بدنه سد ارائه شده است. تراوایی بخش‌های مختلف بدنه سد با استفاده از روش هازن (۱۹۸۲) بر اساس دانه‌بندی تخمین زده شده است (Hazen, 1982). در جدول ۶ مقادیر نفوذپذیری بخش‌های مختلف بدنه سد ارائه شده است. مقدار بخش باطله سیال مخزن که بر روی باطله معدنی انباشت می‌شود بر اساس مشاهدات صورت گرفته به مقدار ۲۰ سانتی متر منظور شده است که البته در بیشتر موارد سال از این مقدار بسیار کمتر می‌باشد. در شکل ۶ تصویری از نتایج تحلیل نشت سد باطله مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۵- ابعاد هندسی و تراوایی ساختگاه به تفکیک در مقاطع تحلیل نشت.

Table 5- Geometric dimensions and permeability of the layers separately in the stages of leakage analysis.

Location	Effective length (m)	Dam height (m)	Permeability (Lu)
Left abutment	70	28	5
River bed Up to 12m	130	46	35
Bottom layer			3
Right abutment	110	28	2

جدول ۶- تراوایی بخش‌های مختلف بدنه سد باطله.

Table 6- Permeability of different parts of tailings dam body.

Material	Permeability (m/s)
Rock-fill	1e-04
Filter	1e-05
Drainage	1e-02
Tail	1e-09

پایداری شیروانی‌های بدنه سد در شرایط استاتیکی و شبه استاتیکی در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد هر دو شیروانی بالادست و پایین‌دست سد با ضریب پایداری قابل قبولی پایدار هستند. با اینحال از آنجایی که ترفیع نهایی سد تا تراز ۲۰۸۵ (بالتر از سطح دریا) بصورت بالارو انجام شده است و بخش قابل توجهی از بدنه سد در تراز ترفیع یافته بر روی باطله قرار دارد. لذا بررسی پتانسیل رونگرایی نهشته‌های باطله داخل مخزن برای بررسی پایداری

ماهیت سیال و یا باطله مخزن سد، عمق سطح آب زیرزمینی و ظرفیت نفوذ منطقه غیر اشباع و باطله می‌باشد. کمیت و کیفیت آب نشتی ارتباط مستقیمی با لیتولوژی زمین‌شناسی حوضه (زمین زاد) و خصوصیات شیمیایی مواد باطله دارد. در سدهای باطله سنگریزه‌ای بدون ساختار آب‌بندی، کنترل سطح فریاتیک نقش اساسی در عملکرد سد از لحاظ جمع‌آوری و انتقال زهاب‌های نشتی به پایین‌دست دارد. در سدهای باطله زهاب‌های نشتی در مخزن پایین دست بنام سامپ^{۱۱} جمع-آوری شده و مجدداً در یک چرخه بسته برای استفاده مجدد، بازیافت و یا به داخل مخزن سد منتقل می‌گردد. ارزیابی مقدار و مسیر نشت، با استفاده از اصول هیدرولیکی محاسبه و در طراحی خاکریز بدنه سد لحاظ می‌شود. در این مطالعه برای انجام تحلیل نشت از نرم‌افزار Seep/W استفاده شده است.

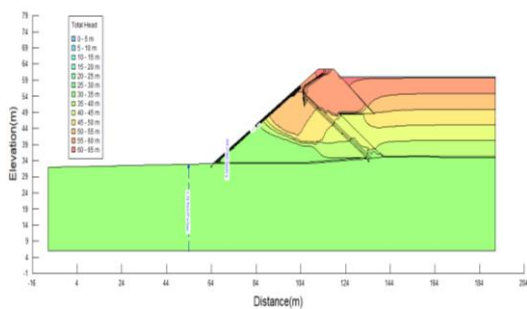
نتایج و بحث

در این مطالعه بر اساس توصیه مهندسی ارتش امریکا (USACE, 2003)، حداقل ضریب پایداری مجاز برای شیروانی پایین دست برای طولانی مدت در شرایط استاتیکی برابر ۱/۵، و برای شیروانی بالادست (رو به مخزن سد) که با گذشت زمان و افزایش تراز باطله در مخزن از ارتفاع آن کاسته می‌شود برابر ۱/۳ و برای شرایط شبه استاتیکی در هر دو شیروانی برابر یک در نظر گرفته شد. ضرایب پایداری بدست آمده از تحلیل

¹¹ Sump

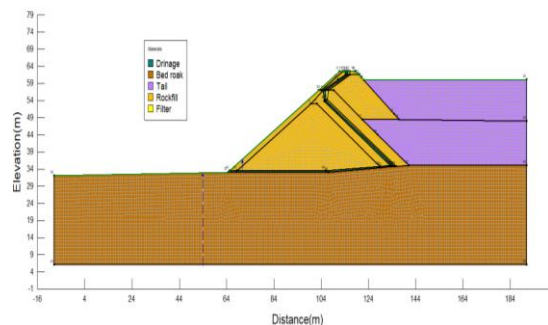
مشکل گردد که البته این موضوع در طول زمان با بررسی حجم تغذیه باطله در مخزن سد و دبی نشت در پایین دست قابل ارزیابی است. برای پیشگیری از سرریز و عبور باطله از تاج سد در هنگام سیلاب بویژه در زمان وقوع بارش های رگباری، لازم است با لایروبی دوره ای کانال های انحراف آب های سطحی حوزه آبریز در بالادست مخزن به هر نحو ممکن از ورود سیلاب به داخل مخزن و به تبع آن از افزایش تراز سطح فریاتیک در داخل بدنه سد جلوگیری شود.

در شرایط دینامیکی لازم به نظر می رسد. اصولاً در مناطق لرزه خیز، ساختگاه سد بایستی به گونه ای انتخاب گردد تا حد ممکن از ترفیع به روش بالارو اجتناب شود. همانطور که اشاره شد یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در پایداری سدهای باطله تراز سطح فریاتیک می باشد. این تراز ممکن است در اثر عوامل مختلفی دست خوش تغییر شود. از جمله آن ها عدم عملکرد مناسب لایه زهکش درون بدنه سد و یا ورود سیلاب به داخل مخازن این سدهاست. عملکرد زهکش های بدنه سدها ممکن است در نتیجه عدم دقت در دانه بندی مصالح در زمان اجرا و یا نفوذ مواد ریزدانه باطله در طول بهره برداری دچار



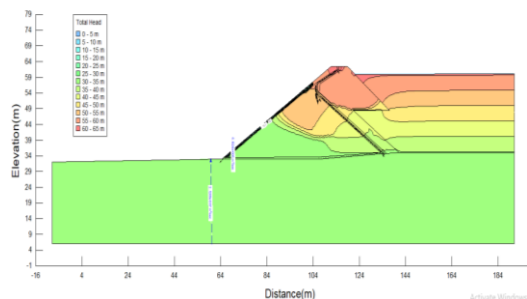
شبکه جریان و نشت در تکیه گاه چپ

Flow network and seepage through left abutment



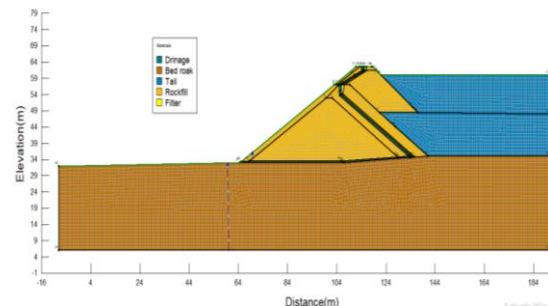
مدلسازی برای تحلیل نشت در مقطع تیپ تکیه گاه چپ

Seepage analysis modeling in the section of left abutment



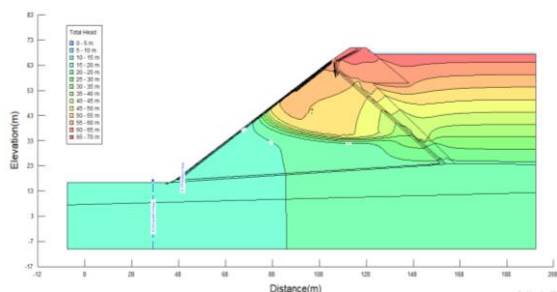
شبکه جریان در تکیه گاه راست

Flow network and seepage through right abutment



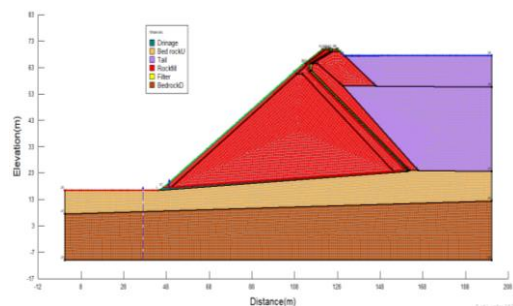
مدلسازی برای تحلیل نشت در مقطع تیپ تکیه گاه راست

Seepage analysis modeling in the right abutment



شبکه جریان در طریق بستر

Flow network and seepage through river-bed



مدلسازی برای تحلیل نشت سد در مقطع بستر

Seepage analysis modeling in the river-bed

شکل ۶- تحلیل نشت سد باطله معدن مسی مزرعه.

Figure 6- Seepage analysis of Mazraeh copper mine tailings dam.

نتایج تحلیل نشت در بخش‌های مختلف پی و بدنه سد باطله معدن مزرعه در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقدار نشت از طریق بدنه سد قابل توجه می‌باشد که البته از طریق زهکش‌های طراحی شده در داخل بدنه سد زهکشی و به سمت پایین دست و مخزن ذخیره هدایت شده و به چرخه مصرف باز می‌گردد.

جدول ۷- ضرایب پایداری سد باطله مزرعه در شرایط مختلف در مقایسه با ضرایب اطمینان مجاز.

Table 7- Stability coefficients of Mazraeh tailings dam in different conditions.

Analysis state	Slope	Factor of Safety	Minimum Factors of Safety	Required
Statistic	Up-stream	1.4	1.3	
	Down-stream	1.64	1.5	
Pseudo-static	Up-stream	1.03	1.0	
	Down-stream	1.19		

جدول ۸- نتایج تحلیل نشت در بخش‌های مختلف پی و بدنه سد باطله معدن مزرعه.

Table 8- The results of seepage analysis through different parts of the Mazraeh tailings dam.

Location	Total amount of seepage (m3/year)	
	Dam body	Foundation
Left abutment	13720	826
River bed	87620	3978
Right abutment	21230	737
Total	122570	5541

نمی‌باشد. البته این زهاب‌ها جمع‌آوری و بصورت کنترل شده به داخل مخزن ذخیره پایین دست سد هدایت می‌شوند.

نتیجه‌گیری

سد باطله مورد مطالعه از نوع سنگریزه‌ای دارای فیلتر و زهکش می‌باشد. ارتفاع کنونی سد از پی ۴۷ متر و عرض تاج آن در مرحله نهایی ۷ متر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد ساختگاه سد از توده سنگ گرانیتی تشکیل شده است. شاخص کیفی توده سنگ در تکیه‌گاه راست در رده بسیار خوب و در بستر سد و تکیه‌گاه چپ، خیلی ضعیف تا نسبتاً ضعیف ارزیابی شده است. تراوایی توده سنگ در تکیه‌گاه‌ها خیلی پایین (کمتر از ۳ لوژان) و تا عمق ۳۰ متری در بستر سد در حد بین ۴ تا ۷۱ لوژان (بطور متوسط ۳۵ لوژان) تعیین شده است. تحلیل پایداری با استفاده از نرم افزار Slope/W، حاکی از پایداری بدنه سد در تراز کنونی می‌باشد. تحلیل نشت با استفاده از نرم افزار Seep/W، مقدار نشت از طریق بستر سد را قابل توجه نشان داد که لزوم اجرای آب بندی بستر اینگونه سدها را در زمان احداث نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده

مقدار نشت از طریق پی که ممکن است آلودگی‌های زیست محیطی را سبب گردد مهمترین هدف تحلیل نشت در این نوع سدها می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد میزان نشت از طریق تکیه‌گاه‌ها بدلیل تراوایی پایین توده سنگ چندان قابل توجه نیست ولی در قسمت بستر میزان نشت قابل ملاحظه است. این مقدار نشت از طریق زهکش‌ها و بدنه سد به داخل زمین نفوذ کرده و به پایین دست منتقل می‌گردد. لازم به ذکر است این مقدار نشت با لحاظ ۲۰ سانتی متر زهاب باطله در مخزن سد (با لحاظ نزولات جوی) برای تعیین حداکثر نشت ممکن بدست آمده است. در واقع در بیشتر موارد مقدار زهاب در کل سطح باطله مخزن سد وجود ندارد و در سطح محدودی از آن و در نقاط پست جمع می‌گردد. با اینحال لازم است بستر اینگونه سدها بویژه در محل کانال‌های زهکش آب‌بندی شود. بر اساس مطالعات میدانی نیز در تکیه‌گاه‌های پایین دست سد در برخی موارد مقداری نشت بصورت نقطه‌ای وجود دارد که با عوارض زمین‌شناسی همچون درزه و گسلش و چشمه مرتبط هستند و مقادیر کمی آن‌ها از طریق تحلیل عددی قابل ارزیابی

- and fate of pyrite mud particles released by the Aznalcóllar mine tailings spill. *Science of the total environment*, 242(1-3): 13-26.
- Hazen, A., 1982. Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. 24th annual report, Massachusetts State Board of Health, Pub.Doc. 34: 539-556.
- Harper, T. G., McLeod, H. N., and Davies, M. P., 1992. Seismic assessment of tailings dams. *Civil Engineering*, 62(12): 64.
- Hynes-Griffin, M.E. and A. G. Franklin, A.G., 1984. Rationalizing the seismic coefficient method. Miscellaneous Paper GL-84-13, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1984, 21p.
- ICOLD, U., 2001. Tailings dams-risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences (bulletin 121). Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 155 p.
- Ishihara, K., Ueno, K., Yamada, S., Yasuda, S., and Yoneoka, T., 2015. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68: 3-22.
- Kütter, V. T., Martins, G. S., Brandini, N., Cordeiro, R. C., Almeida, JP. A., Marques, E. D., 2023. Impacts of a tailings dam failure on water quality in the Doce river: The largest environmental disaster in Brazil, *Journal of Trace Elements and Minerals*, 5,100084.
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., Cao, J., 2019. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. *Advances in Civil Engineering*, ID 4159306, 18.
- Macklin, M. G., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Bird, G., Coulthard, T. J., Dennis, I. A., ... and Turner, J. N., 2006. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology*, 79(3-4): 423-447.
- Petticrew, E. L., Albers, S. J., Baldwin, S. A., Carmack, E. C., Déry, S. J., Gantner, N., ... and Vagle, S., 2015. The impact of a catastrophic mine tailings impoundment spill into one of North America's largest fjord lakes: Quesnel Lake, British Columbia, Canada. *Geophysical Research Letters*, 42(9): 3347-3355.
- Rico, M., Benito, G., and Diez-Herrero, A., 2008. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3): 79-87.
- پیشنهاد می‌گردد برای حفظ پایداری بدنه سد، از ورود سیلاب و سرریز از روی بدنه سد پیشگیری گردد. بدلیل عدم وجود اطلاعات کافی از توان باربری، قوام و روانگرایی باطله داخل مخزن سد، تا حد ممکن از ترفیع سد به روش بالارو اجتناب گردد.
- ### سپاسگزاری
- بدینوسیله از عوامل محترم شرکت مس مزرعه که در جمع‌آوری داده‌ها و انجام تحقیق حاضر که بدون شک در جهت بهبود کیفی و کاهش مخاطرات پروژه‌های مشابه مفید و مثمر ثمر خواهد بود قدردانی می‌شود.
- ### منابع
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۹۴. راهنمای طراحی، ساخت و بهره برداری از سدهای پسماند. ضابطه شماره ۶۸۲.
- شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷. گزارش نهایی زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ترفیع سد باطله مزرعه. شماره گزارش ۷۷۸۱-۴۱۰۴۸۱.
- شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷. گزارش لرزه‌خیزی، لرزه زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه سد باطله مزرعه. شماره گزارش ۷۷۷۱-۴۱۰۴۸۱.
- شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸. گزارش طراحی پی و بدنه سد باطله معدن مس مزرعه (ترفیع تا تراز ۲۰۸۵ متر). شماره گزارش ۷۹۵۴-۴۱۰۴۸۱.
- نبوی م. ح، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، ص ۱۰۹.
- Alexander, D., 1986. Northern Italian dam failure and mudflow disasters, 10(1): 3-7.
- Bird, G., Brewer, P.A., Macklin M. G., Balteanu, D., Serban, M., Driga, B. and Zaharia, S., 2008. River system recovery following the Novat,-Ros,u tailings dam failure, Maramures, County, Romania. *Applied Geochemistry*, 23(12): 3498-3518
- Davies, M. P., Martin, T., and Lighthall, P., 2000. Mine tailings dams: when things go wrong. *Tailings Dams*, 261-273.
- Gallart, F., Benito, G., Martín-Vide, J. P., Benito, A., Prió, J. M., and Regüés, D., 1999. Fluvial geomorphology and hydrology in the dispersal

- Rose, R. L., Mugi, S. R., Saleh J. H., 2023. Accident investigation and lessons not learned: AcciMap analysis of successive tailings dam collapses in Brazil, Reliability Engineering and System Safety, 236, 109308.
- Seed, H.B., Makdisi, F.I. and De Alba, P., 1980. The performance of earth dams under earthquakes. Earthquake Engineering Research Center, Report no. UCB/EERC-77/20, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 57 p.
- Shen, H. B., Xie, Y., and Chen, Z. R., 2012. Environmental protection, corporate social responsibility and its market response: case study based on the environmental pollution incident of Zijin Mining Group Co. China Industrial Economics, 1: 141-151.
- US Army Corps of Engineers, 2003. Engineering and Design: Slope Stability-Engineer Manual, EM-1110-2-1902.
- USBR, 1987. Design of small dams, United States Bureau of Reclamation, A Water Resources Technical Publication, Third Edition. 904 p.
- Vick, S. G., 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams. BiTech Publishers Ltd. 381p.
- Zardari, M. A., 2011. Stability of tailings dams: focus on numerical modelling (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet). Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Quaid-e-Awam University of Engineering Science and Technology, Nawabshah, Pakistan.