

## بررسی روش‌های ترفیع تاج سد باطله معدن مس مزرعه اهر و پیشنهاد طرح بهینه

قدرت برزگری<sup>۱\*</sup>، عطاءاله ندیری<sup>۲</sup>، امیرحسن رضائی فرعی<sup>۳</sup>

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

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

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

\* نویسنده مسئول: [gbarzegari@tabrizu.ac.ir](mailto:gbarzegari@tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳

### چکیده

سدهای باطله، سازه‌های هستند که برای ذخیره‌سازی باطله‌های حاصل از فرآوری مواد معدنی و صنعتی به کار می‌روند. این سدها نقش حیاتی در کنترل آلودگی‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی دارند. عموماً اجرای این سدها تا تراز نهایی به صورت یک‌جا و در یک مرحله انجام نمی‌گیرد بلکه با روند فرآیند استخراج و به تبع آن تولید باطله، تراز ارتفاعی این سدها به صورت مرحله‌ای افزایش می‌یابد. سد باطله معدن مس مزرعه از نوع سد سنگریزه‌ای با گنجایش مخزن حدود ۵۵۰ هزار مترمکعب در آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۸ کیلومتری شمال شهر اهر و در ضلع شرقی توده‌های نفوذی شیور واقع شده است. تراز کنونی سد باطله پس از احداث اولیه و دو مرحله ترفیع ۲۰۸۵ (متر بالاتر از سطح دریا) و با ارتفاع حدود ۵۰ متر از بستر می‌باشد و در حال حاضر عملیات ترفیع مرحله سوم آن تا تراز ۲۰۹۵ متر در دست طراحی و احداث می‌باشد. ساختگاه این سد از سنگ‌های گرانیت تشکیل شده و هوازدگی توده‌سنگ در سطح و در راستای درزه‌ها در حد کم تا متوسط ارزیابی می‌گردد. 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. در این مقاله گزینه‌های ترفیع تراز تاج سد از تراز ۲۰۸۵ تا ۲۰۹۵ متر مورد بررسی قرار گرفته و براساس نتایج به دست آمده و محدودیت‌های موجود، روش بهینه انتخاب شده و با استفاده از نرم‌افزارهای Slope/W، Sigma/W و Plaxis مورد طراحی قرار گرفته است. براساس نتایج به دست آمده استفاده از روش‌های بالادست‌رو روشی اقتصادی ولی خطرپذیر، گزینه پایین‌دست‌رو غیر اقتصادی ولی ایمن و گزینه مرکزرو حالت بینابینی دارد. به دلیل محدودیت‌های موجود و دوره بهره‌برداری کوتاه مدت (حدود ۱۰ سال)، استفاده از روش تلفیقی ۵ متر به صورت مرکزرو و ۵ متر بالادست‌رو به عنوان روش بهینه پیشنهاد گردید. نتایج طراحی نشان می‌دهد شیب شیروانی پایین‌دست در این حالت لازم است از ۱:۱/۶ (عمودی به افقی) در شرایط کنونی، به ۱:۱/۷۵ (عمودی به افقی) کاهش یابد. میزان جابه‌جایی قائم (نشست) پس از انجام ترفیع در حدود ۵۴ تا ۶۰ سانتی‌متر برآورد گردید. برای مرحله بستن و ترک سد باطله مورد مطالعه، کاهش شیب پایین‌دست بدنه سد و انجام تمهیدات لازم برای تحکیم و خشک شدن باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روانگرایی احتمالی) توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** بستن سد باطله، سد باطله معدن مس مزرعه، سد سنگریزه‌ای، طراحی سد، مدلسازی عددی.

### مقدمه

در صنعت معدن، باطله مخلوطی از ضایعات کانسنگ‌ها و مواد شیمیایی مختلف است که طی فرآیند تغلیظ و فرآوری تولید می‌شود (Burritt and Christ, 2018; Kossoff et al.,).

مرتفع‌شونده به‌صورت مرحله‌ای با استفاده از سه روش متداول بالادست‌رو، پایین‌دست‌رو یا مرکزرو، همزمان با بهره‌برداری از معدن و براساس نیاز تکمیل می‌شوند (Vick, 1990; EPA, 1994). احتمال آسیب‌دیدن سدهای بالادست‌رو زیاد است سدهای پایین‌دست‌رو و مرکزرو پایداری بهتری دارند (Lyu et al., 2019). روان‌گرایی استاتیکی و لرزه‌ای یکی از علل رایج شکست سدهای باطله، به‌ویژه از نوع بالادست‌رو می‌باشد (Piciullo et al., 2022; Ormann et al., 2013; Zardari, 2014). البته داده‌های آماری ممکن است گمراه‌کننده باشد چرا که به‌دلیل نیاز به حجم عملیات کمتر و صرفه اقتصادی شرکت‌های معدنی، تعداد سدهای ساخته‌شده به روش بالادست‌رو بیش از سایر روش‌ها است. به‌عنوان مثال بیش از ۹۹ درصد سدهای باطله موجود در اسپانیا از نوع بالادست‌رو هستند (ICOLD, 2001). طبق داده‌های جامع تاریخی، بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۴، آمار جهانی شکست سدهای باطله از ۱۶۰ مورد فراتر رفته و میانگین سالانه آن بین ۲ تا ۵ مورد است (Zhao et al., 2024; WISE, 2024). این حوادث علاوه‌بر آسیب‌های زیست‌محیطی شدید، موجب تلفات انسانی قابل توجهی شده‌اند. برخی از فاجعه‌بارترین شکست‌ها به‌ویژه در مناطقی با فعالیت‌های معدنی زیاد، در دوره ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰ رخ داده است (Yu et al., 2025). هنگامی که سد باطله تخریب می‌شود، خسارات زیادی را به محیط‌زیست، تولیدات کشاورزی، جان و دارایی مردم وارد می‌سازد (Kossoff et al., 2014). در سطح جهانی، صنعت معدن شاهد گسیختگی‌های متعدد سدهای باطله بوده است که منجر به فجایع زیست‌محیطی و انسانی شده و به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی فرآیند استخراج معادن، نگرانی‌های فزاینده‌ای ایجاد کرده است. سوابق نشان می‌دهد که هزاران نفر در اثر شکست سدهای باطله جان خود را از دست داده‌اند (WISE, 2012). از سال ۱۹۱۵، در مجموع ۲۵۷ مورد شکست با حدود ۲۶۵۰ مورد مرگ و میر و ۲۵۰ میلیون متر مکعب باطله آلوده‌کننده محیط‌زیست ثبت شده است. تقریباً ۵۰ درصد (۱۱۵ میلیون متر مکعب) از حجم باطله‌های تخلیه شده پس از سال ۲۰۰۰ ثبت شده است که حدود ۶۴۰ مورد مرگ و میر به همراه

هر معدنی برای ذخیره و نگهداری باطله‌های خود به تأسیسات ذخیره سازه باطله (TSFs<sup>۱</sup>) مناسب همچون سد باطله<sup>۲</sup> نیاز دارد. در دهه اخیر، با اتمام معادن پرعیار، بهره‌برداری از معادن کم‌عیار با توجیه اقتصادی کمتر گسترش یافته و تعداد سدهای خطرناک یا مشکل‌دار نیز در حال افزایش است (Nimbalkar et al., 2018). در حال حاضر حجم باطله‌های معدنی در حدود هزاران میلیون تن در سال تخمین زده می‌شود که به اندازه فرآیندهای زمین‌شناسی در سیمای زمین تأثیرگذار هستند. علاوه‌براین، با افزایش تقاضا و توجیه اقتصادی بهره‌برداری از ذخایر کم‌عیارتر، پیش‌بینی می‌شود که حجم جهانی باطله‌های معدنی روند افزایشی قابل توجهی داشته باشد. کاهش ذخایر فسیلی و به‌تبع آن افزایش بهره‌برداری از ذخایر ماسه‌های نفتی قیری، تأثیر جدی بر این روند خواهد داشت (Kasperski and Mikula, 2011). سدهای باطله جزوه بزرگترین سازه‌های ساخته‌شده توسط مهندسان ژئوتکنیک هستند که در مقیاس جهانی، حوادث مربوط به شکست این سازه‌ها منجر به آلودگی جدی زیست‌محیطی و تلفات جانی شده و هنوز درک کافی از مکانیزم‌های گسیختگی آن‌ها وجود ندارد (Mendoza et al., 2006). هر سد باطله، برای هر مکان خاص، سازه‌ای منحصربه‌فرد است و به طراحی ویژه نیاز دارد و نمی‌توان از طرح‌های معمولی تیپیک و از پیش طراحی‌شده برای احداث این سازه‌ها استفاده نمود (Morgenstern et al., 2016). مصالح مورد استفاده برای احداث سدهای باطله از مصالح طبیعی و سنگدانه‌های متراکم شده حاصل از خاک‌برداری روباره معدنی و یا از مصالح استخراج شده از منبع قرضه مشخص تأمین می‌شود. برای احداث سدهای باطله، ابتدا یک سد اولیه به‌عنوان پاشنه تکیه‌گاه و شروع‌کننده<sup>۳</sup> با ارتفاع مشخص ساخته شده و ارتفاع آن به‌تدریج در طول بهره‌برداری از معدن، افزایش می‌یابد (Edraki et al., 2014). اساساً دو نوع سازه خاکی برای ذخیره و نگهداری باطله‌ها در معادن مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ سدهای نگهدارنده و خاکریزهای قابل ترفیع. سدهای نگهدارنده عموماً قبل از شروع بهره‌برداری، به‌طور کامل تا ارتفاع نهایی احداث می‌شوند، در حالی که خاکریزهای

3 Starter Dam

<sup>1</sup> Tailing Storage Facilities<sup>2</sup> Tailing Dam

سازه‌ای و فونداسیون و از همه مهم‌تر، موقعیت خط فریاتیکی می‌شود (UNEP, 1994). تراز خط فریاتیکی نقش اساسی در خرابی‌های ناشی از سرریز شدن و نشت سدها دارند (Lei et al., 2022). پایداری شیب، زلزله و سرریز شدن سه علت اصلی گسیختگی هستند و برای کاهش خطر، استفاده از سیستم زهکشی، تحلیل‌های مهندسی، ابزار دقیق، نظارت، بازرسی و مطالعه عملکرد سدهای مشابه لازم است (Stark et al., 2022).

اکثر خرابی سدها با علائم هشدار دهنده‌ای همراه هستند، به‌جز مواردی که در اثر زلزله یا طوفان‌های بزرگ باشند. بنابراین، برنامه‌های نگهداری و نظارتی جامع، یک الزام اساسی برای مدیریت مؤثر دفع باطله به‌شمار می‌رود (Martin and Davies, 2000). ترک‌خوردگی، نشست سازه و وجود نقاط مرطوب روی سطح بدنه سد، همگی نشانه‌های دیداری کیفی از مشکلات بالقوه هستند. از پیرومترها، شیب‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها می‌توان در یک پروتکل نظارتی با طراحی معقول بهره برد (Vandenberg et al., 2011). خطرات ناشی از حوادث تخلیه باطله سدها، در رتبه هجدهم در کنار خطرات ناشی از زلزله، وبا، سیل و انفجار بمب هیدروژنی قرار دارد (Kemper and Sommer, 2002). بیشتر تحقیقات در مورد سدهای باطله بر نشست، تحکیم، پایداری و ویژگی‌های لرزه‌ای آن‌ها تمرکز دارد (Lyu et al., 2019). در حال حاضر، اکثر سدهای باطله به‌صورت خاکریزهای نیمه اشباع تا اشباع ساخته می‌شوند که کنترل نشت و پایداری شیب آن‌ها بسیار مهم است (Shahriari and Aydin, 2017). محدودیت‌های دسترسی به سایت، هزینه زیاد و زمان لازم برای انجام آزمایش‌های میدانی باعث شده که اکثر محققان به شبیه‌سازی‌های عددی همچون روش المان محدود (FEM) روی آورند (et al., 2022). Ledesma (2012) و Ozer and Bromwell, (2012)، از روش‌های تعادل حدی و المان محدود برای تحلیل‌گذاری نشت سدهای باطله تحت شرایط کاهش بسیار سریع سطح آب و پایداری شیب در آن شرایط استفاده کرده‌اند. Alizadeh and Latifi, (2025)، با استفاده از روش المان محدود (FEM) و مدل‌سازی

داشته و حاکی از افزایش چالش ذخیره‌سازی ایمن باطله‌های معدنی از نظر مقیاس و پیچیدگی می‌باشد (GRIDA, 2016). تعداد تأسیسات ذخیره باطله‌ها (TSF) های ساخته‌شده در سراسر جهان حدود ۳۰۰۰۰ مورد گزارش شده است (WMTF, 2020). در ۱۸۰۰۰ معدن گزارش‌شده در سراسر جهان، میزان شکست در ۱۰۰ سال گذشته، ۱/۲ درصد تخمین زده شده است. در حالی که میزان شکست سدهای ذخیره آب در حدود ۰/۰۱ درصد است (ICOLD, 2001). نرخ فعلی شکست سدهای باطله بزرگ، حدود دو تا پنج مورد در سال تخمین زده می‌شود، این نرخ بسیار بالاتر از نرخ خرابی سدهای مخزنی آب است که تقریباً یک در ۱۰۰۰۰ است (Davies, 2001). دلایل آسیب‌پذیری بیشتر سدهای باطله نسبت به سایر انواع سازه‌های ذخیره آب، عبارتند از (Rico et al., 2008): (۱) خاکریزهای ساخته‌شده با مصالح خاکی، باطله‌های معدنی و یا مصالح روباره؛ (۲) سدهایی با ذخیره قابل‌توجهی از باطله آبدار (به اضافه آب‌های ناشی از نزولات جوی) که به‌صورت مرحله‌ای مرتفع می‌شوند؛ (۳) فقدان مقررات کافی و استانداردهای طراحی؛ (۴) فقدان الزامات لازم برای حفظ پایداری سدها از جمله نظارت و کنترل مستمر در مراحل احداث و بهره‌برداری؛ (۵) هزینه بالای نگهداری سدهای باطله پس از تعطیلی فعالیت‌های معدنی (فاز بستن و ترک سد) و (۶) با توجه به این که سدهای باطله، منافع اقتصادی مستقیمی برای شرکت بهره‌بردار ندارد لذا اهمیت و تأثیر آن‌ها بر سلامت اقتصادی و زیست‌محیطی نادیده گرفته می‌شود (Niekerk and Viljoen, 2005). حداقل ۳۵۰۰ سد باطله در سراسر جهان وجود دارد (Martin and Davies, 2000) و مساحت این سدها از چند هکتار تا چند هزار هکتار می‌باشد (Davies et al., 2007; Lottermoser, 2000). حدود ۷۶ درصد از حوادث در سراسر جهان مربوط به سدهای باطله بالادست‌رو است، ۵۱ درصد از حوادث گزارش‌شده توسط ICOLD، ناشی از ناپایداری شیروانی سدها به‌دلیل تنش بیش از حد در پی، بدنه سد و افزایش فشار منفذی است (ICOLD, 2001). براساس نتایج به‌دست آمده وقوع سیلاب و تشدید الگوهای بارش، علت اصلی خرابی این تأسیسات می‌باشد.

عوامل ناپایداری سدهای باطله شامل خرابی استاتیکی، نشت (فرسایش داخلی)، سرریز شدن، ناپایداری لرزه‌ای، مشکلات

Sigma/W بررسی کرده‌اند. یکی از مهمترین حوادث مربوط به گسیختگی سدهای باطله در کشور ایران، گسیختگی سد باطله سابق معدن مس مزرعه می‌باشد که با استفاده از خاکریز احداث شده بود. این حادثه در سال ۱۳۸۹، پس از باران شدید اتفاق افتاد و منجر به تخلیه باطله به رودخانه مزرعه از سرشاخه‌های رودخانه اهر گردید. (Khamseh et al., 2017) اثرات زیست‌محیطی این فاجعه معدنی را بررسی کرده‌اند. در این مقاله ضمن ارائه پیشینه تحقیقات انجام شده در این زمینه و بیان اهمیت موضوع، مزایا و معایب روش‌های مختلف ترفیع تراز تاج سد باطله معدن مس مزرعه در حدود ۱۰ متر بررسی شده و روش بهینه براساس محدودیت‌های پروژه، با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد طراحی قرار گرفته و همچنین توصیه‌هایی برای مرحله خاتمه و بستن سد مذکور ارائه شده است. این تحقیق در نوع خود از مقالات و ادبیات فنی موجود متمایز بوده و از نوع‌آوری لازم برخوردار است. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند در توسعه تجربیات و ارتقای سطح مطالعه و طراحی این نوع سدها تأثیر به‌سزایی داشته باشد.

به روش پایین‌رو انجام یافته و مرحله دوم ترفیع آن در سال ۱۳۹۹ تا تراز ۲۰۸۵ متر به روش بالارو انجام شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸). با توجه به پر شدن مخزن، ترفیع تراز تاج سد برای بار سوم به مقدار ۱۰ متر دیگر و تا تراز ۲۰۹۵ متر در دست طراحی و اجراست. موقعیت جغرافیایی، تصویر هوایی و نیمرخ عرضی بدنه سد که مراحل مختلف احداث در آن مشخص شده است به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای احداث بدنه سد باطله مورد مطالعه از مصالح سنگریزه‌ای با دانه‌بندی متفاوت شامل مصالح 3A، 3B و 3B1 (به‌ترتیب درشت دانه به درشت دانه‌تر) و همچنین از مصالح فیلتر (2A) و زهکش (2B) به‌منظور کنترل زهکشی داخل بدنه سد استفاده شده است. توزیع دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

سد باطله بالادسترو ژائولی<sup>۱</sup> نتیجه گرفته‌اند که موقعیت دریاچه، مکش ماتریکس و جدایش، بیشترین تأثیر را بر موقعیت خط فریاتیک دارند. خرابی سدهای باطله در اثر زلزله-های شدید به‌ویژه در شیلی و ژاپن، اهمیت تحلیل پایداری لرزه‌ای در دهه‌های گذشته را زیاد کرده است. Penman, (2001). مطالعات کمی در مورد پایداری لرزه‌ای سدهای باطله وجود دارد که در آن‌ها نیروهای لرزه‌ای ماهیت شبه‌استاتیکی دارند. (Coulibaly et al., 2017) برای ارزیابی پایداری سد باطله معدن وست وود<sup>۲</sup> از مدل‌سازی عددی با Slope/W به همراه پایش ژئوفیزیکی مبتنی بر روش‌های مقاومت الکتریکی استفاده کرده‌اند. (Jakka and Ramana, 2011) با استفاده از مدل‌های Quake/W و Slope/W، پایداری دینامیکی سدهای باطله ساخته‌شده با مصالح خاکی را ارزیابی نموده و نتیجه گرفتند که سدهای باطله پایین‌دسترو عموماً پایدارتر از سدهای بالادسترو هستند. Naeini and Akhtarpour, (2018) رفتار دینامیکی سد باطله معدن سونگون با ارتفاع ۱۷۰ متر با اعمال شرایط نشت، تحکیم و بارگذاری ناشی از ساخت مرحله‌ای به روش مرکرو را با استفاده از نرم‌افزار

## مواد و روش‌ها

### مشخصات سد باطله معدن مزرعه

سد باطله معدن مس مزرعه در استان آذربایجان شرقی، در ۱۸ کیلومتری شمال شهر اهر و در دامنه جنوبی کوه‌های شیور قرار گرفته است. هدف از احداث و ترفیع این سد باطله، جمع‌آوری و ذخیره پساب‌ها و باطله‌های کارخانه تغلیظ معدن مس مزرعه و سونگون است. راه دسترسی به سد مورد مطالعه از طریق جاده آسفالت اهر به روستای مزرعه و در ادامه جاده اختصاصی معدن مس مزرعه می‌باشد. این سد باطله در مرحله کنونی با طول تاج حدود ۳۶۰ متر، عرض تاج ۷ متر، ارتفاع حدود ۵۵ متر از پی و دارای گنجایش مخزن ۵۵۰ هزار مترمکعب می‌باشد. احداث این سد باطله تا تراز ۲۰۷۰ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۰ انجام شده است. به‌منظور افزایش گنجایش مخزن، مرحله اول ترفیع در سال ۱۳۹۶ تا تراز ۲۰۸۰

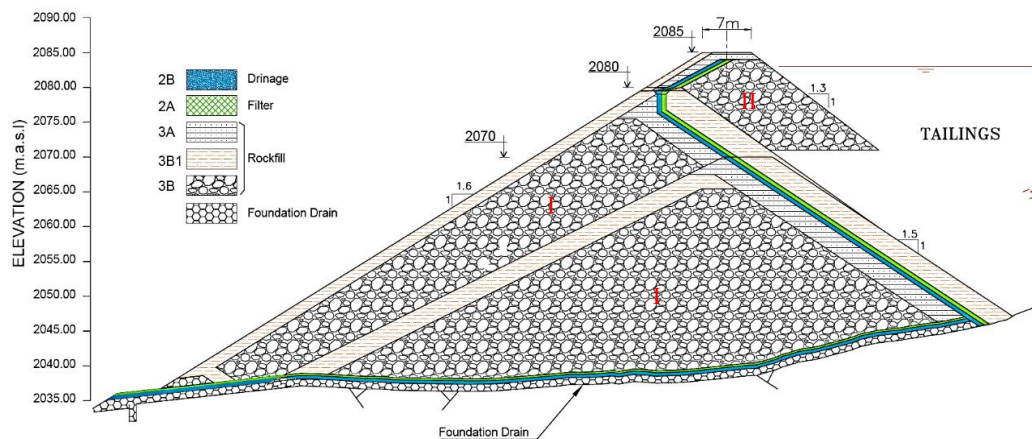
<sup>2</sup> Westwood

<sup>1</sup> Zhaoli



شکل ۱- موقعیت و تصویر ماهواره‌ای سد باطله معدن مس مزرعه.

Figure 1- Location and Satellite images of Mazraeh copper mine tailing dam.



شکل ۲- نیمرخ عرضی و مراحل ترفیع سد باطله معدن مس مزرعه اهر (برزگری و همکاران، ۱۴۰۲).

Figure 2- Typical cross-section and raised stages of Mazraeh copper mine tailing dam (Barzegari et al., 2023).

جدول ۱- مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگریزه‌ای بدنه سد (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

Table 1- Grain size characteristics of rockfill materials in the study dam body (Toossab consulting company, 2018).

| Material type |     | Grain size distribution limits (mm) |        |                  |                  |
|---------------|-----|-------------------------------------|--------|------------------|------------------|
|               |     | % < 2.36                            | % < 19 | D <sub>max</sub> | D <sub>min</sub> |
| 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                |

### زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد باطله مزرعه

منطقه متفاوت است، به‌گونه‌ای که در بخش‌های غرب و جنوب غربی کوارتزموزنونیت تا کوارتزموزنودیوریت و گرانیتی تا گرانودیوریتی است ولی در ساختگاه سد باطله مزرعه، جنس توده نفوذی از نوع گرانیت است. در شمال ساختگاه سد باطله، توده نفوذی شیورداغ در طی الیگوسن به داخل سنگ‌های

با توجه به بررسی‌های میدانی و براساس نقشه زمین‌شناسی، سنگ‌های آتشفشانی با سن الیگوسن موسوم به توده نفوذی شیور، قدیمی‌ترین و مهمترین واحد شناخته شده در منطقه است، به‌طوری که ساختگاه سد باطله به‌طور کامل در بخش جنوب شرقی این توده نفوذی واقع شده است. ترکیب سنگ‌شناسی این توده با توجه به حجم و گسترش آن در

می‌باشد. براساس مطالعات سطحی و زیرسطحی انجام یافته، توده سنگ تشکیل دهنده کل ساختگاه از سنگ‌های گرانیتی خاکستری رنگ به سن الیگوسن تشکیل شده‌اند که از بخشی گستره شرقی باتولیت شیور بوده و در منطقه گسترش وسیعی دارد. توده سنگ گرانیتی در تکیه‌گاه چپ به صورت هوازده رنگ برگشته و با درجه درزه‌داری متوسط تا بالا دیده می‌شود، در این تکیه‌گاه سیستم ناپیوستگی‌ها به وسیله کلسیت پر شده‌اند. در تکیه‌گاه راست نیز آثار هوازدگی درجه پایین تا متوسط در توده سنگی گرانیتی مشهود است.

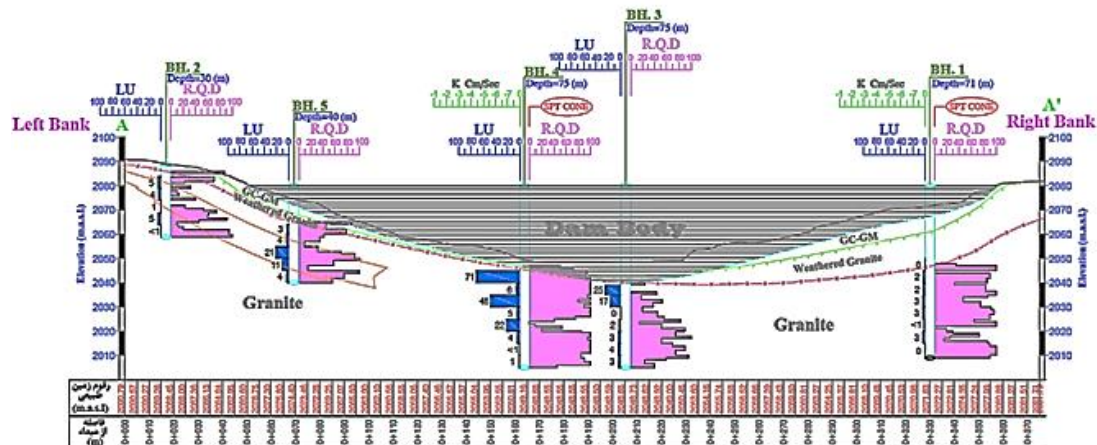
جوان‌ترین رسوبات محدوده محور سد، شامل رسوبات عهد حاضر است. این رسوبات به صورت رسوبات واریزه‌ای ناشی از هوازدگی توده سنگ‌های دامنه و همچنین رسوبات ناشی از فرسایش و آبشستگی‌ها در مسیر آبراهه‌ها هستند. گسترش وسیع تشکیلات ولکانیکی در منطقه و هوازدگی برجای آن‌ها منجر به تشکیل نهشته‌های عهد حاضر با ضخامت متغیر با رنگ خاکستری و مقاومت پایین بر روی واحدهای سنگی قدیمی‌تر بر روی دامنه‌ها و مسیر آبراهه‌ها شده است. این واحد به صورت پوشش رسوبی با ضخامت کم بر روی واحدهای سنگ‌بستر قرار گرفته‌اند. ضخامت این واریزه‌ها در ساختگاه سد حداکثر ۵ متر و بعضاً تا ۷ متر تخمین زده می‌شود.

به منظور انجام مطالعات زیرسطحی در زمان ترفیع مرحله اول سد باطله، ۵ گمانه اکتشافی در موقعیت محور سد شده است. موقعیت گمانه‌ها و نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی در راستای محور سد باطله در شکل ۳ نمایش داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، شاخص کیفی توده سنگ (RQD) در تکیه‌گاه راست با کیفیت بسیار خوب تا عالی ارزیابی شده است. در بستر و تکیه‌گاه چپ، این شاخص تا عمق ۲۰ متری در حد خیلی ضعیف و ضعیف قرار دارد که البته با افزایش عمق، کیفیت آن بهبود یافته و در رده متوسط تا عالی قرار می‌گیرد. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ به روش ژئومکانیکی (RMR) و Q، به ترتیب حاکی از کیفیت نسبتاً مناسب تا مناسب توده سنگ و رده پایین تا مناسب توده سنگ می‌باشد. شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، واحد گرانیتی در حد ۵۰-۶۰ است که در مناطق دگرسان شده در حد ۴۵-۳۵ و در زونهای خرد شده و گسلی تا ۲۵-۲۰ کاهش می‌یابد. در شکل ۴ تصاویری از برونزد توده سنگ گرانیتی سنگ بستر در

رسوبی و ساب‌ولکانیک منطقه نفوذ کرده و موجب اسکارن-زایی، تبلور مجدد و تولید شیبست‌های لکه‌دار و هورنفلس گردیده است. مهم‌ترین تشکیلات آذرین کواترنری در منطقه، شامل گدازه‌های تراکی آندزیتی هستند که البته در ساختگاه سد باطله رخنمون ندارند اما در ارتفاعات شرقی ساختگاه با فاصله حدود ۷۰۰ متر و بر روی توده گرانیتی-گرانودیوریتی شیور در منطقه به صورت سطحی برونزد دارند. ساختگاه سد باطله معدن مس مزرعه بر روی آبراهه اصلی که در پایین دست به رودخانه مزرعه‌چای ملحق می‌شود احداث شده است. در پایین دست محور سد باطله، در مجاورت بستر آبراهه‌های اصلی و فرعی، رسوبات آواری کواترنری که حاصل فرسایش توده-سنگ‌های گرانیتی است، به صورت نهشته‌های آبرفتی نابرجا با ضخامت کم ته‌نشست شده است. این رسوبات عمدتاً شامل واریزه‌ها و رسوبات ناشی از فرسایش و آبشستگی‌های دامنه‌ای و رسوبات بستر رودخانه‌ای می‌باشد. در بالادست مخزن، بلوک‌های سنگی نابرجا ناشی از سقوط قطعات سنگی در اثر هوازدگی و فرسایش توده سنگ‌های موجود قابل مشاهده است.

از ویژگی‌های مهم ریخت‌شناسی این ناحیه، تنوع در اشکال ناهمواری‌ها و چین خوردگی‌ها و بالآمدگی‌ها است که تحت تأثیر تکتونیک منطقه ایجاد شده‌اند. ساختگاه سد باطله مزرعه، شامل دره‌ای با شیب خط‌القعر رو به رودخانه است، شیب دامنه در تکیه‌گاه راست در حدود ۱۵ درجه و در تکیه‌گاه چپ در حدود ۱۳ درجه است. آبراهه موجود در محل مخزن عمدتاً تحت تأثیر عوامل تکتونیک و فرسایشی سنگ بستر تشکیل شده و به دلیل عملکرد چند فاز تکتونیک در منطقه، امتداد آبراهه اصلی ساختگاه سد در امتداد یک شکستگی ایجاد شده است. به نظر می‌رسد علاوه بر تنش‌های غالب تکتونیک در منطقه، نفوذ توده گرانیتی-گرانودیوریتی شیور در شمال غرب منطقه مورد مطالعه و وجود نیروهای فشارشی ناشی از تزریق توده ولکانیکی، نقش مهمی در ایجاد سیستم گسل‌ها و درزه‌ها و ناپیوستگی‌های منطقه با راستای شمال شرق- جنوب غرب داشته است. یکی از بارزترین سیستم شکستگی منطقه مورد مطالعه، گسل‌های با امتداد شمال، شمال شرق- جنوب، جنوب غرب است. عملکرد غالب گسل‌ها در محدوده مطالعه غالباً از نوع شیب‌لغز با جابه‌جایی عمودی همراه با مؤلفه امتدادلغز

تکیه‌گاه‌های سد نشان داده شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷).



شکل ۳- نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی و موقعیت گمانه‌ها در راستای محور سد باطله معدن مزرعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

Figure 3- Boreholes location and engineering geological cross-section along the Mazraeh copper mine tailing dam (Toossab consulting company, 2018).



شکل ۴- رخنمون توده سنگ گرانیتی در تکیه گاه چپ (تصویر چپ) با هوازدگی بالا و تکیه گاه راست (تصویر راست) با هوازدگی پایین تا متوسط.

Figure 4- Granitic rockmass outcrop in the left abutment (left) with high weathering and the right abutment (right) with low to moderate weathering.

### سطوح طراحی لرزه ای

بهره‌برداری مختل می‌شود اما در این شرایط هم می‌بایست یکپارچگی سازه‌ای سد حفظ شده و آب یا رسوب به‌صورت کنترل شده از آن تخلیه شود. دوره بازگشت MDE معمولاً به‌میزان قابل‌ملاحظه‌ای از OBE بیشتر در نظر گرفته می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۴). احتمال رویداد حداکثر زلزله محتمل در طول عمر مفید سازه بسیار کم و بعید است اما غیرممکن نیست. در روش‌های احتمالی دوره بازگشت آن بسیار طولانی و اغلب تا حدود ۱۰۰۰۰ سال و در استاندارد FHWA, (2009)، دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال برای این زمین‌لرزه در نظر گرفته شده است. در صورت وقوع چنین زمین‌لرزه‌ای، انتظار می‌رود آسیب‌های وارد شده به سازه

برای بررسی یک زمین‌لرزه از پارامترهایی که توصیف‌کننده جنبش نیرومند زمین باشد، نظیر بیشینه مقادیر شتاب یا سرعت، طیف پاسخ و شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده استفاده می‌شود. برای تحلیل پایداری بدنه سد در برابر بارهای شبه استاتیکی ناشی از زلزله لازم است مشخصات زلزله مبنای بهره‌برداری ( $OBE^1$ )، حداکثر زلزله طراحی ( $MDE^2$ ) و یا حداکثر زلزله محتمل ( $MCE^3$ ) تعیین گردد. در صورت وقوع زلزله مبنای دوره بهره‌برداری، آسیب‌های وارده محدود و قابل اصلاح بوده و سد باید کماکان قابل بهره‌برداری باشد. اما در حداکثر زلزله طراحی، خرابی‌ها دامنه‌ی وسیع‌تری داشته و

<sup>3</sup> Maximum Credible earthquake

<sup>1</sup> Operating basis earthquake

<sup>2</sup> Maximum design earthquake

سد بروی باطله‌های (تیل‌های) متراکم یافته داخل مخزن و از طرفی پتانسیل وقوع روانگرایی در حین زلزله، بیشترین خطر گسیختگی‌ها وجود دارد. در روش بالارو، پس از احداث خاکریز اولیه، مواد باطله از پیرامون تاج آن تخلیه می‌شود سپس بستر عریض بوجود آمده در اثر این تخلیه، به‌عنوان پی برای خاکریز بعدی عمل می‌کند. در این روش باطله‌ها باید شامل ماسه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد باشد. علاوه بر دانه‌بندی باطله، تراز سطح فریاتیک و روان‌گرایی در عملکرد آن‌ها مؤثر هستند. سطح فریاتیک سطح اشباع در ذخیره‌گاه و خاکریز است.

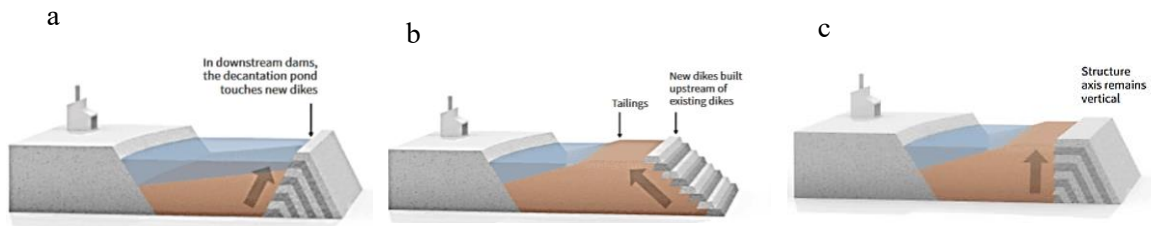
در سدهای پایین‌دست‌رو که برای به حداقل رساندن خطرات گسیختگی ساخته می‌شوند از مصالح سنگریزه‌ای متراکم استفاده می‌شود. برای این منظور می‌توان از ماسه و شن نفوذناپذیر برای پایین آوردن سطح فریاتیک استفاده نمود. مرحله بعدی احداث بر روی شیروانی پایین‌دست قبلی قرار گرفته و تاج سد به سمت پایین‌دست تغییر مکان می‌یابد. این روش نسبت به روش بالادست‌رو به مراتب 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. 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. سدهای مرکرو، روش بینابینی دو روش فوق‌الذکر از نظر هزینه و حجم هستند. در این روش، بدنه سد به طور متوالی با قرار دادن مصالح ساختمانی در ساحل بالادست و بر روی شیب پایین دست بدنه قبلی ساخته می‌شود. محور بدنه سد در مراحل احداث و ترفیع بر روی هم منطبق است. این نوع خاکریز زمانی در برابر فعالیت‌های لرزه‌ای پایدار خواهد بود که مصالح به خوبی متراکم شده و زهکش داخلی مناسبی تعبیه شده باشد.

غیرقابل جبران باشد اما نایبستی سبب فاجعه اجتماعی شود. سناریوهای لرزه‌ای مهم برای ساختگاه مورد مطالعه شامل فعال شدن گسل‌های قلعه جوق، انجرد، صوفیان، میشو، شمال تبریز با سازوکارهای فشاری و راستالغز است. مهمترین سناریوی لرزه‌ای گستره طرح مربوط به گسل قلعه جوق با حداکثر پتانسیل لرزه ای ۶/۶ Ms و از نوع فشاری است که در نزدیکی ساختگاه و در فاصله سطحی دو کیلومتری قرار دارد. براساس مطالعات لرزه‌خیزی، حداکثر شتاب افقی زلزله برای سطوح لرزه‌ای OBE با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، MDE با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله و MCE با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله برای محدوده طرح مورد مطالعه، به ترتیب ۰/۱۵g، ۰/۳۵g و ۰/۶۷g تعیین شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷).

### روش‌های ترفیع سد باطله

برای احداث سدهای باطله از مصالح طبیعی و سنگدانه‌های متراکم شده حاصل از خاکبرداری روباره معدنی و یا از مصالح استخراج شده از منابع قرضه مشخص استفاده می‌شوند. در این سدها، ابتدا یک سد اولیه به‌عنوان پاشنه تکیه‌گاه و شروع کننده<sup>۱</sup> با ارتفاع مشخص ساخته شده و سپس ارتفاع آن به تدریج در طول بهره‌برداری از معدن افزایش می‌یابد. 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 متوالی ارتفاع ادامه یابد. برای افزایش ارتفاع (ترفیع) این سدها، سه روش مختلف بالادست‌رو، پایین‌دست‌رو و مرکرو وجود دارد (شکل ۵). انتخاب هر کدام از این روش‌ها به یکسری پارامترهای فنی و اقتصادی بستگی داشته و هر کدام با سطح خطر مشخصی همراه هستند. سدهای بالادست‌رو که به‌عنوان ارزان ترین و سریعترین روش ترفیع در نظر گرفته می‌شوند، دردسرسازترین آن‌ها نیز هستند. در این روش، به دلیل احداث بخشی از بدنه

<sup>1</sup> Starter



شکل ۵- روش‌های مختلف احداث و ترفیع سدهای باطله معدنی (a) پایین‌دست‌رو (b) بالادست‌رو (c) مرکزرو.  
Figure 5- Different methods of constructing and raising of tailings dams a) downstream b) upstream c) centerline.

باطله معدن مس مزرعه گزینه‌های مختلفی قابل طرح می‌باشد که عبارتند از:

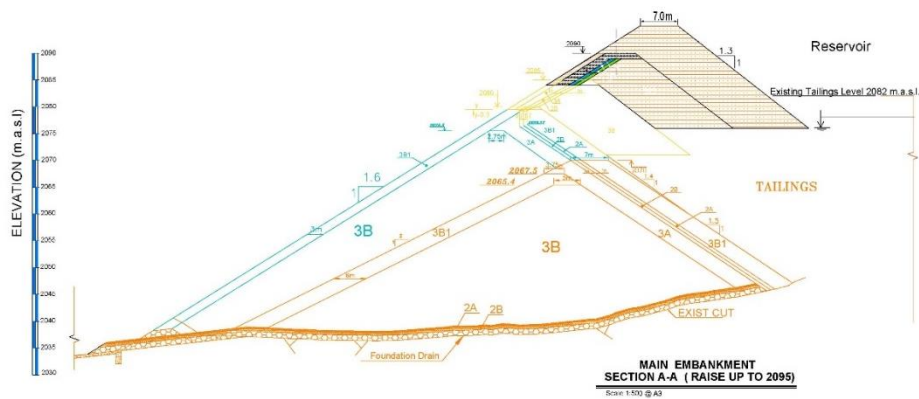
## نتایج و بحث

### روش‌های ترفیع سد باطله مزرعه

همان‌طور که ذکر گردید تراز کنونی سد باطله مورد مطالعه با گنجایش حدود ۵۵۰ هزار متر مکعب، ۲۰۸۵ متر بالاتر از سطح دریاست. با توجه به تداوم عملیات معدنی و تولید باطله معدنی مقرر شده است نسبت به ترفیع تراز تاج سد به مقدار ۱۰ متر دیگر و تا تراز ۲۰۹۵ متر اقدام گردد. با اجرای این مرحله ترفیع، گنجایش مخزن به حدود ۱/۳ میلیون متر مکعب رسیده و تا حدود ۱۰ سال آینده نیاز معدن را برای ذخیره‌سازی باطله‌های معدنی تأمین می‌نماید. برای ترفیع سد

### گزینه ۱) ۱۰ متر به روش بالادست‌رو

مهمترین مزیت این روش، حجم کم عملیات اجرایی و سنگریزی است. در این روش، بخشی از فضای مخزن به‌وسیله مصالح سنگریزه‌ای بدنه سد اشغال می‌شود. به دلیل لرزه‌خیزی بالای منطقه مورد مطالعه و به تبع آن پتانسیل وقوع پدیده روان‌گرایی، استفاده از این روش در اولویت نمی‌باشد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این حالت حدود ۴۸۳ مترمربع برآورد می‌گردد. نیمرخ اولیه این روش در شکل ۶ نشان داده شده است.



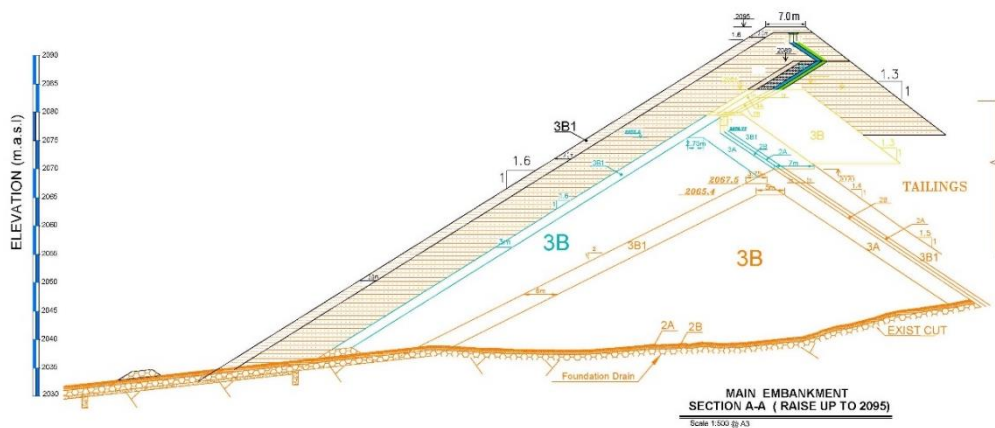
شکل ۶- مقطع عرضی ترفیع سد باطله به روش ۱۰ متر به روش بالادست‌رو.

Figure 6- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m upstream method.

### گزینه ۲) ابتدا ۵ متر بالادست‌رو و سپس ۵ متر پایین‌دست‌رو

در این حالت نیز بخشی از بدنه سد بر روی باطله تحکیم یافته مخزن قرار می‌گیرد. اجرای لایه‌های فیلتر و زهکش به دلیل شیب‌دار بودن آن‌ها نیازمند دقت بیشتر است. با فرض حفظ شیب کنونی شیروانی پایین‌دست، پاشنه بدنه سد نسبت

به شرایط کنونی حدود ۲۱ متر به سمت پایین دست (محدوده سامپ ذخیره) قرار می‌گیرد. مقطع عملیات سنگریزی در این حالت حدود ۱۰۷۰ متر مربع برآورد می‌گردد. نیمرخ اولیه این روش در شکل ۷ نشان داده شده است.

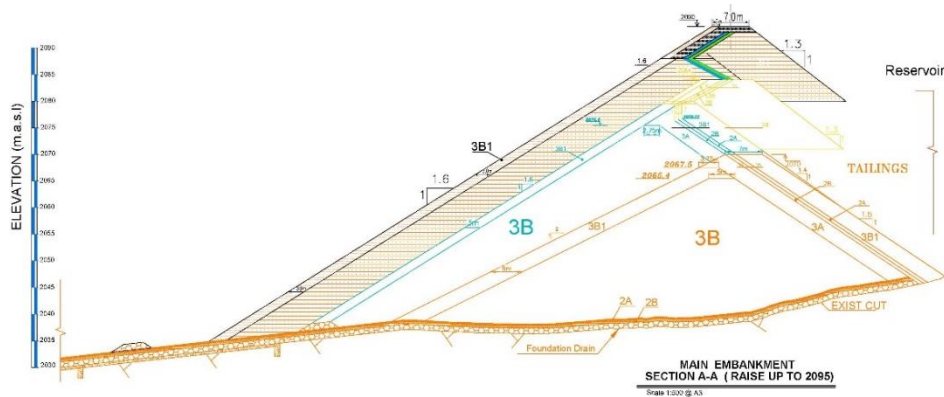


شکل ۷- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر بالادسترو و بعد ۵ متر پایین دسترو.

Figure 7- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m upstream and 5 m downstream method.

پایین دست (محدوده سامپ ذخیره) قرار می گیرد. حجم عملیات سنگریزی نسبت به گزینه ۲ کمتر خواهد بود. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این حالت حدود ۹۳۳ مترمربع برآورد می گردد. نیمرخ اولیه این روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

**گزینه ۳) ابتدا ۵ متر پایین دست رو و سپس ۵ متر بالا دست رو**  
در مقایسه با گزینه ۲، بخش کمتری از بدنه سد بر روی باطله قرار می گیرد. اجرای لایه های فیلتر و زهکش به دلیل شیب دار بودن آن ها نیازمند دقت بیشتر است. پاشنه بدنه سد در پایین دست نسبت به شرایط حاضر حدود ۲۰ متر به سمت

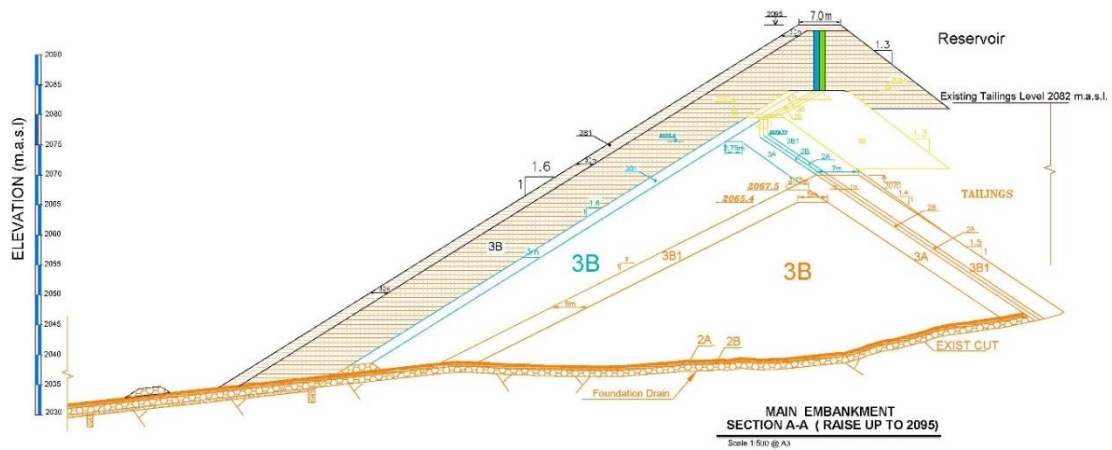


شکل ۸- نیمرخ اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر پایین دسترو و بعد ۵ متر بالادسترو.

Figure 8- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m downstream and 5 m upstream method.

پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می گیرد. روش اجرای راحت تری دارد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش حدود ۱۰۶۵ مترمربع برآورد می گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۹ نشان داده شده است.

**گزینه ۴) ۱۰ متر مرکزرو**  
حجم عملیات سنگریزی نسبت به حالت روش ۲ مقدار جزئی کمتر است ولی نسبت به روش ۳ دارای حجم عملیات بیشتری است. پاشنه سد در این حالت، حدود ۲۳ متر در



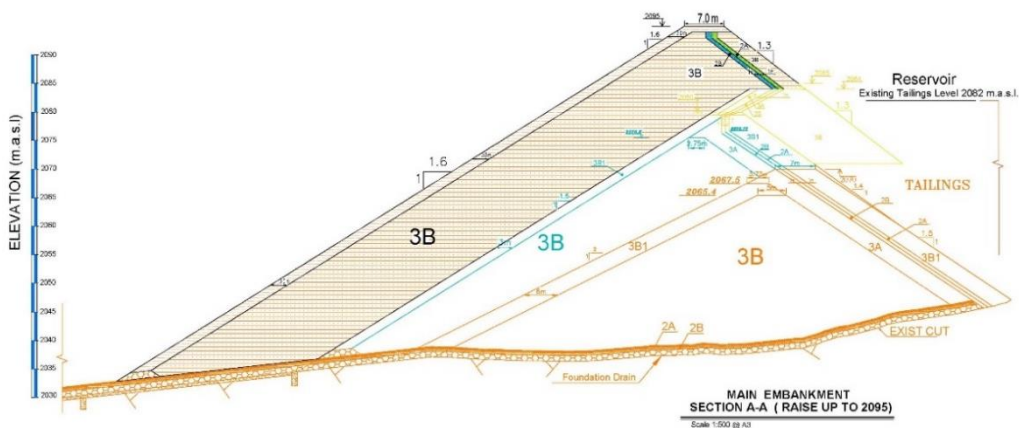
شکل ۹- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ۱۰ متر مرکز رو.

Figure 9- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m centerline method.

بیشتر است. در این روش پاشنه سد حدود ۳۸ متر پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می گیرد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش ۱۶۸۰ مترمربع برآورد می گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

#### گزینه ۵) ۱۰ متر پایین دست رو

تمامی بخش ترفیع بر روی بدنه سد کنونی و پایین دست قرار می گیرد. روش اجرای راحت تری دارد و پایداری سد بیشتر خواهد داشت. حجم عملیات سنگریزی نسبت به سایر گزینه ها



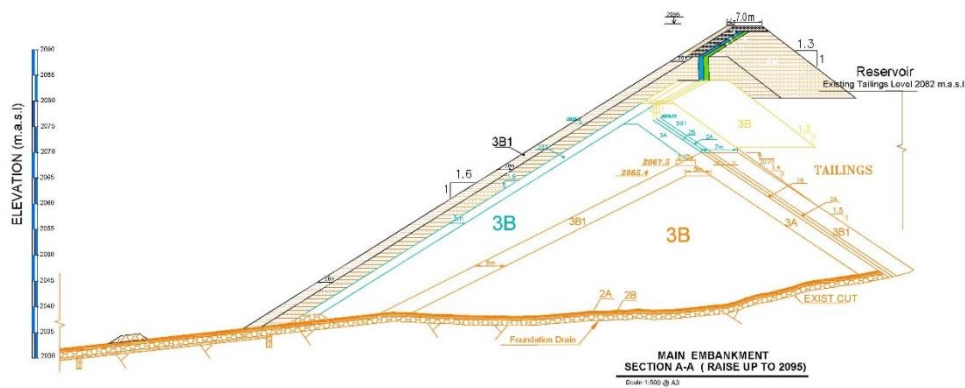
شکل ۱۰- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ۱۰ متر پایین دست رو.

Figure 10- Cross-section of the tailing dam raising using 10 m downstream method.

پایین دست نسبت به شرایط کنونی قرار می گیرد. سطح مقطع عملیات سنگریزی در این روش حدود ۶۶۰ متر مربع برآورد می گردد. مقطع عرضی اولیه این روش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

#### گزینه ۶) ۵ متر مرکز رو و ۵ متر بالادست رو

حجم عملیات سنگریزی نسبت به حالت های قبل به جز گزینه ۱ (۱۰ متر بالادست رو) کمتر است. همچنان بخشی از ترفیع بر روی باطله تحکیم یافته قرار می گیرد. روش اجرای نسبتاً راحت تری دارد. در این روش پاشنه سد حدود ۱۲ متر



شکل ۱۱- مقطع عرضی اولیه ترفیع سد به روش ابتدا ۵ متر مرکز رو و بعد ۵ متر بالارو.

Figure 11- Cross-section of the tailing dam raising using 5 m centerline and 5 m upstream method.

### محدودیت‌های ویژه طرح مورد مطالعه برای ترفیع

مطالعه، نبود فضای کافی متعلق به معدن و همچنین فاصله کم سامپ ذخیره زهاب‌ها با بدنه سد در پایین‌دست می‌باشد. این سامپ ذخیره مستطیلی با ابعاد  $40 \times 25$  متر برای جمع‌آوری زهاب‌های عبوری از طریق زهکش‌های بستر و داخل بدنه سد و پمپاژ مجدد آن به کارخانه برای مصرف مجدد طراحی و احداث گردیده است. این سامپ در فاصله حدود ۱۴ متری از پاشنه شیروانی پایین‌دست سد قرار دارد. حفظ این سامپ و جلوگیری از جابه‌جایی آن با توجه به محدودیت فضا، به‌عنوان یکی از ملاک‌های تعیین نحوه ترفیع سد مطرح گردید (شکل ۱۲). لذا گزینه‌هایی که حداقل جابه‌جایی را در پایین ایجاد نماید در اولویت قرار گرفت.

علی‌رغم اینکه در روش پایین‌دست‌رو، حجم عملیات سنگریزی و به‌تبع آن هزینه اجرایی و زمان لازم بیشتر می‌باشد ولی این گزینه، روشی مطمئن‌تری برای ترفیع سدهای باطله به‌ویژه در مناطق با لرزه‌خیزی بالاست و به‌همین علت، این گزینه ترفیع، روش مطلوب و اولویت اول طراحان و مهندسان در این زمینه می‌باشد. با این حال در برخی موارد، به‌دلیل وجود محدودیت‌های اجرایی، امکان استفاده از این روش وجود ندارد. از جمله این موارد (علاوه بر حجم عملیات و هزینه و زمان اجرایی بالا)، در پروژه مورد مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) محدودیت فضای کافی در پایین‌دست سد: یکی از مهمترین محدودیت‌های موجود برای ترفیع سد باطله مورد



شکل ۱۲- تصویر ماهواره‌ای سد باطله و سامپ ذخیره زهاب‌های عبوری از سد در پایین‌دست آن (برگرفته از google earth).

Figure 12- Satellite image of the tailing dam and the sump in the downstream for storing the passing drains (derived from geegle earth).

ب) حجم مخزن: با توجه به حجم محدود مخزن سد، استفاده از واریانت‌های بالارو طبیعتاً با سنگریزی در داخل مخزن همراه بوده و بخشی از فضای مخزن را اشغال می‌نماید در حالی‌که ایجاد حداکثر گنجایش مخزن با انجام عملیات ترفیع یکی از

که منجر به افزایش تراز تیل و از دست رفتن ارتفاع آزاد منجر می‌گردد. در شکل ۱۳، شرایط کنونی مخزن و تراز تیل در آن نشان داده شده است.

اولویت‌های شرکت‌های معدنی می‌باشد. همچنین با توجه به پرشدن مخزن سد با تیل تا تراز ارتفاع آزاد<sup>۱</sup>، محدودیتی در اجرای عملیات سنگریزی در بالادست در مرحله اول وجود دارد



شکل ۱۳- وضعیت کنونی و تراز مواد تیل (باطله) در داخل مخزن سد.  
Figure 13- Current status and tail elevation inside the dam reservoir.

بالا و گزینه‌ای مطلوب از لحاظ فنی، به دلیل محدودیت زمین در اختیار کارفرمای پروژه در اولویت قرار نگرفت. لذا استفاده از روش ۵ متر مرکز رو و ۵ متر بالارو، که هم به نسبت حجم عملیات کمتری دارد و هم میزان جابه‌جایی پاشنه سد به سمت پایین‌دست کمتر است با لحاظ نمودن محدودیت‌های موجود و زمان بهره‌برداری کم (در حد ۱۰ سال) می‌تواند روش بهینه‌ای برای ترفیع تراز سد به مقدار ۱۰ متر تا تراز ۲۰۹۵ متر در این مرحله باشد. البته پس از اتمام دوره بهره‌برداری، برای فاز بستن و ترک سد، به دلیل عدم نیاز به سامپ ذخیره زهاب و فراهم شدن فضای کافی در پایین‌دست، توصیه می‌گردد ضمن کاهش شیب پایین‌دست بدنه سد از طریق سنگریزی در پای شیروانی تا حد ممکن، حفظ کانال‌های انحراف آب‌های بالادست حوضه آبریز سد به خصوص چشمه‌های انتهایی مخزن، از تحکیم و خشک‌شدن باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روان‌گرایی احتمالی) اطمینان حاصل گردد. بسته به نتایج تحلیل و طراحی شیب شیروانی پایین‌دست تدقیق خواهد شد. نقشه جانمایی اولیه و تصویر هوایی گزینه بهینه برای ترفیع بدنه سد باطله کنونی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به اجتناب‌ناپذیر بودن تداخل بدنه سد با بخشی از سامپ ذخیره پایین دست، امکان

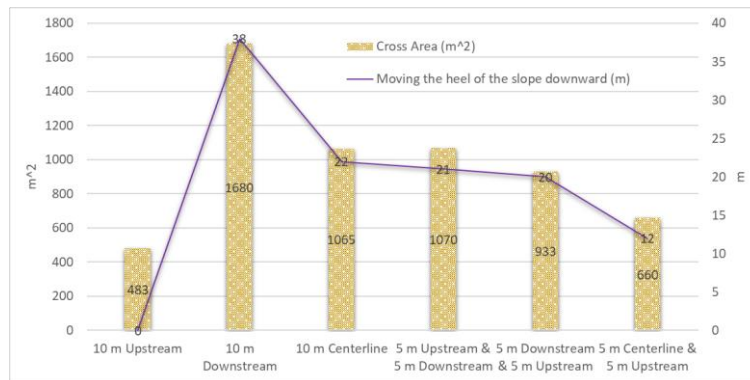
(ج) حجم عملیات اجرایی: این پارامتر، یکی دیگر از پارامترهایی است که تأثیر مستقیم در هزینه و زمان عملیات اجرایی ترفیع سد دارد. بنابراین انتخاب گزینه‌ای با حجم عملیات اجرایی محدود توجیه اقتصادی بیشتری دارد هر چند که اهمیت آن کمتر از سایر مسائل فنی می‌باشد. با توجه به اینکه عمده حجم عملیات اجرایی ترفیع سد، سنگریزی می‌باشد لذا سطح مقطع عملیات سنگریزی در گزینه‌های مختلف به صورت نسبی برآورد و به منظور مقایسه لحاظ گردید.

#### گزینه بهینه ترفیع سد باطله مزرحه

در شکل ۱۴، نمودار تغییرات حجم عملیات سنگریزی واریانت‌های مختلف و همچنین میزان جابه‌جایی پاشنه شیروانی پایین‌دست سد با فرض حفظ شیب کنونی (برای مقایسه نسبی تأثیر آن در موقعیت سامپ) نشان داده شده است. شایان ذکر است چون گزینه‌ها به صورت نسبی مقایسه می‌شوند، اگر چنان‌چه در تحلیل و طراحی در مقدار شیب هر کدام از شیب‌های بالادست و پایین‌دست تغییری ایجاد شود در اولویت‌بندی گزینه‌ها تأثیر چندانی نمی‌گذارد. بررسی گزینه‌های مختلف نشان می‌دهد استفاده از روش بالادست‌رو برای ترفیع کل ۱۰ متری (واریانت ۱)، حجم عملیات کمتری دارد ولی با توجه به لرزه‌خیزی منطقه و به منظور حفظ حداکثر ظرفیت مخزن، این گزینه در اولویت اول قرار نمی‌گیرد. از طرفی دیگر روش پایین‌دست‌رو نیز علی‌رغم اطمینان و ایمنی

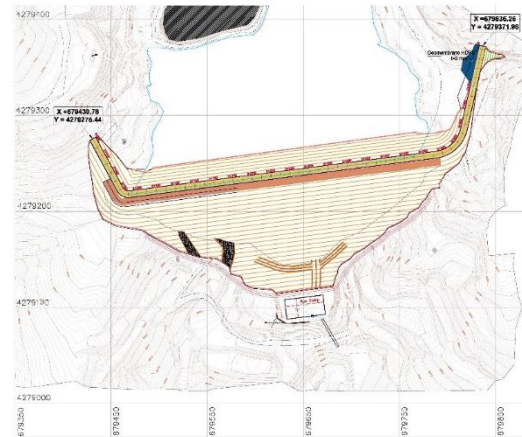
<sup>1</sup> Freeboard

جابه‌جایی سامپ به سمت فضای باقی‌مانده موجود در پایین-  
دست و تأمین حجم آن با افزایش طول و یا عمق آن قابل  
جبران خواهد بود.



شکل ۱۴- مقایسه سطح مقطع عرضی به‌عنوان حجم سنگریزی و مقدار جابه‌جایی پای شیروانی پایین‌دست در گزینه‌های مختلف ترفیع.  
Figure 14- Comparison of the cross-sectional area of the raising operation (rockfill volume) and the amount of downstream slope foot displacement in different raising variants.

طراحی می‌گردد. برای طراحی هندسه بدنه و پی سد باطله مورد مطالعه، شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سد در شرایط مختلف بارگذاری (استاتیکی و شبه استاتیکی) و عملکردی (پایان عملیات ساخت، دوره بهره‌برداری و خاتمه بهره‌برداری) مدل‌سازی شده و پایداری آن با استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل حدی با بهره‌گیری از مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio – Slope/W مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۱۷). براساس ضابطه شماره ۶۸۲ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، حداقل ضریب اطمینان مجاز برای شرایط استاتیکی ۱/۵۰ و برای شرایط شبه استاتیکی برابر ۱ منظور شده است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه جنس مصالح بدنه سد در مرحله احداث اولیه و مراحل ترفیع بعدی آن به‌طور غالب سنگریزه‌ای بوده است، برای حفظ یکنواختی بدنه و امکان دسترسی به مصالح مذکور، در این مرحله نیز برای ترفیع تا تراز ۲۰۹۵ متر نیز همین مصالح منظور شده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده برای تحلیل پایداری در جدول ۴ ارائه شده است. شیب شیروانی پایین‌دست بدنه سد در شرایط حاضر برابر ۱:۱/۱۶ و شیب بالادست ۱:۱/۳ (قائم به افقی) می‌باشد. برای تعیین شیب بهینه و پایدار بدنه سد پس از ترفیع تا تراز ۲۰۹۵، براساس نتایج تحلیل‌های تنش-کرنش برای شیب‌های مختلف، ضریب اطمینان و مقادیر جابه‌جایی بررسی شده و شیب شیب پایین‌دست ۱:۱/۷۵ (قائم به افقی) تعیین



شکل ۱۵- جانمایی بدنه سد پس از ترفیع تا تراز ۲۰۹۵ به روش گزینه بهینه.

Figure 15- Layout of the dam body after raising to level 2095 using the optimal method.



شکل ۱۶- عکس هوایی گزینه بهینه برای ترفیع سد تا تراز ۲۰۹۵.  
Figure 16- Aerial image of the dam body area after raising to level 2095 using the optimal method.

#### طراحی گزینه بهینه برای ترفیع سد

بدنه سد در مقابل بارهای ناشی از فشار هیدرواستاتیک، فشار جانبی مصالح باطله، نیروهای لرزه‌ای و بارهای ثقلی

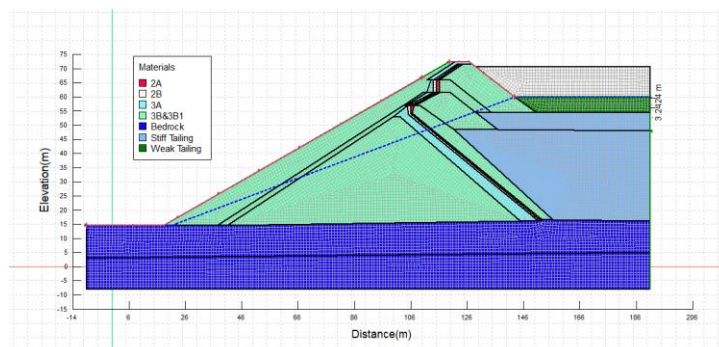
شده است. نتایج تحلیل پایداری نشان داد حداقل ضریب اطمینان شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد در حالت استاتیک، در مراحل مختلف قابل قبول بوده و نشان‌دهنده پایداری مناسب بدنه سد می‌باشد. در تحلیل شبه استاتیک، ضریب اطمینان پایداری شیب سد با اعمال یک ضریب زلزله افقی و یا قائم (در صورت نیاز) بررسی می‌گردد. به عبارتی در این حالت، اثر زلزله به صورت استاتیکی و با اعمال نیروهایی که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افقی و قائم به دست می‌آید، در تحلیل لحاظ می‌شود. براساس توصیه مارکوسن (Marcuson, 1981)، ضریب زلزله مناسب برای طرح لرزه‌ای سدها معادل  $0.33$  تا  $0.5$  برابر

شده است. نتایج تحلیل پایداری نشان داد حداقل ضریب اطمینان شیب‌های بالادست و پایین‌دست سد در حالت استاتیک، در مراحل مختلف قابل قبول بوده و نشان‌دهنده پایداری مناسب بدنه سد می‌باشد. در تحلیل شبه استاتیک، ضریب اطمینان پایداری شیب سد با اعمال یک ضریب زلزله افقی و یا قائم (در صورت نیاز) بررسی می‌گردد. به عبارتی در این حالت، اثر زلزله به صورت استاتیکی و با اعمال نیروهایی که از حاصل ضرب ضرایب زلزله در وزن توده لغزنده در دو امتداد افقی و قائم به دست می‌آید، در تحلیل لحاظ می‌شود. براساس توصیه مارکوسن (Marcuson, 1981)، ضریب زلزله مناسب برای طرح لرزه‌ای سدها معادل  $0.33$  تا  $0.5$  برابر

جدول ۴- پارامترهای مهندسی مصالح مورد استفاده در بدنه سد مورد مطالعه (شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۸).

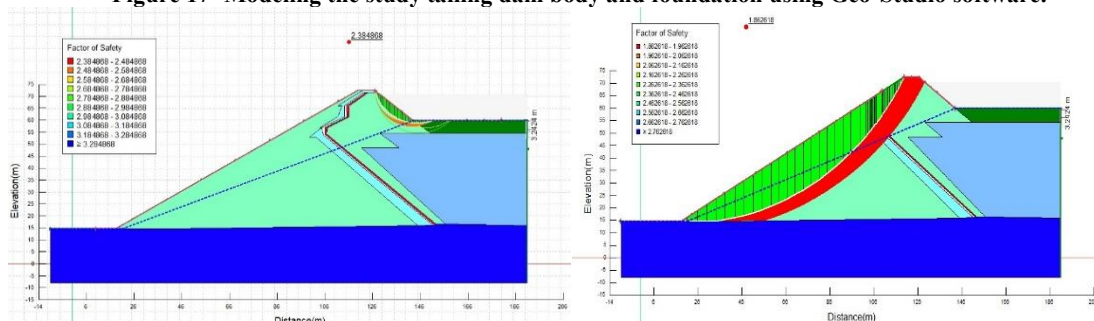
Table 4- Engineering parameters of the materials used in the study dam body (Toossab consulting company, 2018).

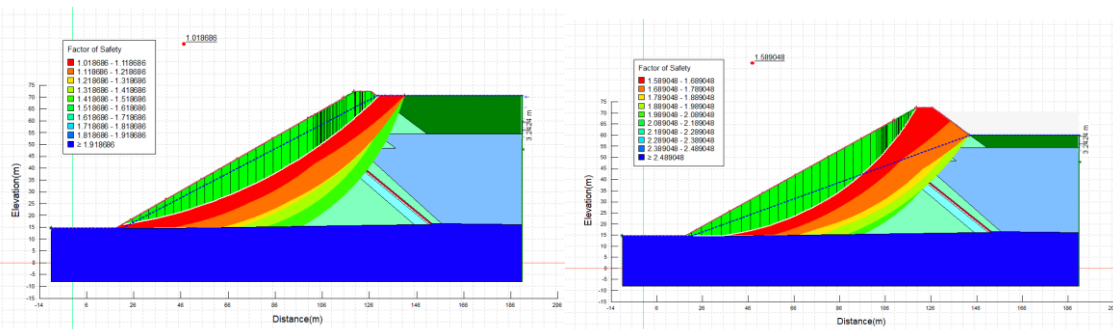
| Material type            | $\Phi'$ (degree)          | C' (kPa) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | E (GPa) |
|--------------------------|---------------------------|----------|-------------------------------|---------|
| Rock fill<br>(3A,3B,3B1) | Normal stress<br>function | 22       | 40                            | 0.30    |
| Filter (2A)              | 36                        | 0        | 20                            | 35      |
| Drainage (2B)            | 36                        | 0        | 20                            | 30      |
| Old tail                 | 31                        | 3        | 19                            | 6       |
| New tail                 | 28                        | 3        | 19                            | 6       |
| Bed Rock                 | Linear Elastic            | 22       | 1000                          | 0.20    |



شکل ۱۷- مدلسازی بدنه و پی سد باطله مورد مطالعه در نرم افزار Geo-Studio.

Figure 17- Modeling the study tailing dam body and foundation using Geo-Studio software.



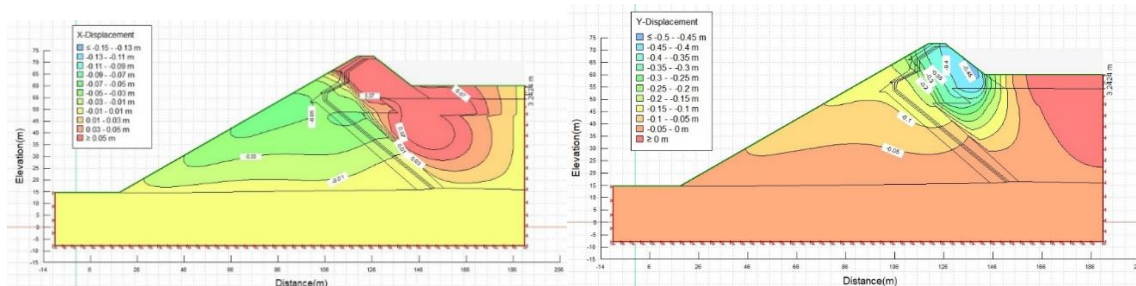


شکل ۱۸- تصاویری از تحلیل پایداری شیب‌های سد باطله و خروجی آن شامل حداقل ضریب اطمینان و سطح گسیختگی بحرانی.  
Figure 18- Images of the tailings dam slopes stability analysis results, including the minimum safety factor and critical failure surface.

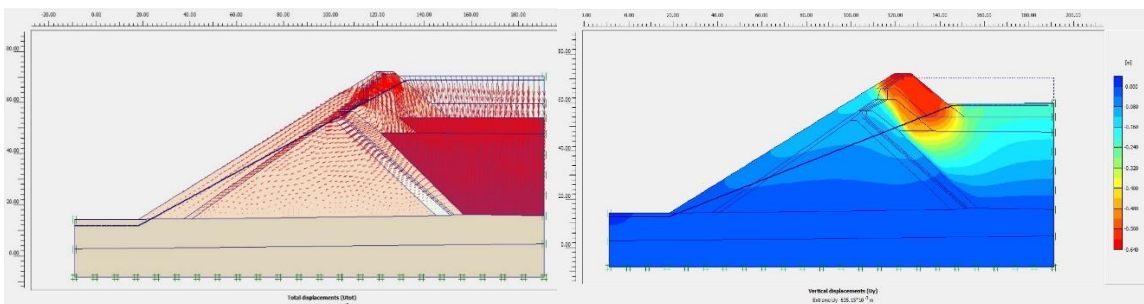
### تحلیل تنش- کرنش

با مصالح باطله اشباع سست، جابه‌جایی قائم در تراز تاج سد به‌صورت تجمعی به حدود ۵۴ سانتیمتر افزایش می‌یابد که مجدداً متمایل به سمت بالادست بدنه می‌باشد. در مدلسازی با استفاده از Plaxis، مدل هندسی سد با فرض حاکم بودن رفتار کرنش صفحه‌ای (Plane Strain) ساخته شده و مدل رفتاری مصالح درشت دانه الاستو پلاستیک موهر-کولمب اعمال شده است. سنگ کف به‌صورت مصالح الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. براساس نتایج به‌دست آمده، حداکثر جابه‌جایی ایجاد شده در تراز تاج سد حدود ۶۰ سانتی‌متر برآورد شده است که هم‌خوانی خوبی با نتایج حاصل از نرم‌افزار Sigma/W دارد (شکل ۲۰).

مقادیر جابه‌جایی‌های محتمل در مراحل مختلف ترفیع سد با استفاده از تحلیل تنش - کرنش در نرم افزار Geostudio Sigma/W و Plaxis ارزیابی شده است. مقدار جابه‌جایی قائم و افقی ناشی از ترفیع سد از تراز ۲۰۸۵ تا ۲۰۹۵ متر در مرحله پایان ساخت در تراز تاج سد به‌ترتیب در حدود ۴۳ و ۷ سانتی‌متر برآورد شده است که در سمت بالادست سد ایجاد می‌شود. ضخامت بالا و شکل‌پذیری باطله موجود در مخزن و مدول الاستیک پایین آن، منجر به تمایل جابه‌جایی‌های قائم به‌سمت بالادست بدنه شده است (شکل ۱۹). در حالت بهره‌برداری و پرشدن کامل مخزن تا تراز نرمال



شکل ۱۹- حداکثر جابه‌جایی قائم و افقی ایجاد شده در بدنه سد در مرحله پایان عملیات ترفیع با استفاده از Sigma/W.  
Figure 19- Maximum vertical and horizontal displacements generated in the dam body at the end of the raising operation using Sigma/W.



شکل ۲۰- حداکثر جابه‌جایی قائم ایجاد شده در بدنه سد در مرحله عملیات ترفیع با استفاده از Plaxis.  
Figure 20- Maximum vertical displacement generated in the dam body during the raising operation stage using Plaxis.

## نتیجه گیری

توصیه می گردد برای زمان خاتمه بهره برداری و مرحله بستن و ترک سد باطله مورد مطالعه، به دلیل عدم نیاز بیشتر به سامپ ذخیره زهاب در پایین دست و فراهم شدن فضای کافی، ضمن کاهش شیب پایین دست بدنه سد با اجرای سنگریزی تا حد ممکن، با ایجاد تمهیدات لازم و حفظ کانال های انحراف آب های بالادست حوضه آبریز سد، از تحکیم و خشک شدن باطله داخل مخزن (برای پیشگیری از روان گرایی احتمالی) اطمینان حاصل گردد.

## سپاسگزاری

بدینوسیله از عوامل محترم شرکت مس مزرعه که در انجام مطالعات و تدوین این تحقیق مساعدت کردند تشکر و قدردانی می شود.

## منابع

برزگری ق.، مشهدی جعفرلو ر.، ندیری ع.، ۱۴۰۲. بررسی عملکرد سد باطله معدن مس مزرعه اهر از لحاظ پایداری و نشست. هیدروژئولوژی، ۸(۱)، ۱۵۶-۱۶۹.

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 زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی ترفیع سد باطله مزرعه. شماره گزارش ۷۷۸۱-۴۱۰۴۸۱.

شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۷. گزارش لرزه-خیزی، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه 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. دیباچه ای بر زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی کشور، ص ۱۰۹.

## Reference

Alizadeh, P., Latifi, M., 2025. The study of the factors affecting phreatic line position and stability in upstream tailings dams. Results in Engineering, 25, 104092.

در این تحقیق، به منظور افزایش حجم مخزن موجود، ترفیع سد باطله معدن مس مزرعه به ارتفاع ۱۰ متر (تا رسیدن به تراز تاج ۲۰۹۵ متری) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مطالعات پایه ساختگاه اعم از زمین شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و لرزه خیزی منطقه انجام شده است. سپس گزینه های مختلف ترفیع با در نظر گرفتن معیارهای مختلف از جمله محدودیت های موجود و نبود فضای کافی در پایین دست سد باطله و حجم عملیات سنگریزی مقایسه شده است. علی رغم اینکه گزینه بالادست رو حجم عملیات و زمان احداث کمی دارد به دلیل لرزه خیزی در منطقه توصیه نمی گردد. استفاده از روش پایین دست رو علی رغم اطمینان بیشتر، به دلیل محدودیت فضای مربوط به معدن در پایین دست سد در اولویت قرار نگرفت و در نهایت، به دلیل زمان کوتاه پیش بینی شده برای بهره برداری (حدود ۱۰ سال)، گزینه ترفیع ترکیبی به صورت افزایش ۵ متر به صورت مرکز رو و سپس ۵ متر به صورت بالادست رو پیشنهاد شده است. موضوع فوق نشان می دهد مکان یابی سد باطله و احداث سازه های جانبی آن می بایست با منظور نمودن مراحل ترفیع بعدی طراحی و اجرا گردد تا از محدودیت ها و یا هزینه های مضاعف جلوگیری شود. برای طراحی بدنه سد، با انجام تحلیل های پایداری شیب های پایین دست و بالادست با مدل سازی در Geostudio Slope/w و همچنین انجام تحلیل های تنش-کرنش با استفاده از نرم افزار Geostudio Sigma/w و Plaxis تعیین شده است. برای حفظ یکپارچگی و یکنواختی، مصالح مورد استفاده برای این مرحله از ترفیع سد به طور مشابه با مصالح بدنه سد باطله موجود، انتخاب شده است. کنترل پایداری سد در دو حالت بارگذاری استاتیکی و اعمال نیروی لرزه ای (تحلیل شبه استاتیکی) در مراحل مختلف پایان ساخت، دوره بهره برداری و خاتمه بهره برداری صورت گرفته است. در تحلیل های شبه استاتیکی، ضریب متناظر با سطح لرزه ای دوره های مختلف به بدنه سد اعمال شده و نتایج موجود نشان داد مقادیر ضریب اطمینان کافی برای پایداری بدنه سد تأمین می شود. براساس نتایج حاصل، حداکثر جابه جایی قائم تجمعی در تراز تاج سد بعد از ترفیع آن تا ۲۰۹۵ متری حدود ۵۴ الی ۶۰ سانتیمتر برآورد گردید. مقایسه نتایج تنش-کرنش بدنه سد با استفاده از نرم افزارهای Sigma/W و Plaxis، هم خوانی خوبی را نشان دارد.

- Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K.A., 2014. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- Ledesma, O., Sfriso, A., Manzanal, D., 2022. Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams. *Computers and Geotechnics*, 144, 104632.
- Lei Y., Dai Q., Zhang B., Kong C., Yang J., 2022. A gradient smoothing technique-based S-FEM for simulating the full impacts of anomalies on seepage solutions and its application in multi-parameter seepage inversion. *Water Resour Manage* 38, 753–773.
- Lottermoser, B., 2007. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, Berlin,
- 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*, 4159306.
- Marcuson III, W.F., 1981. Moderator's report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads. *Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 3, 1175.
- Martin, T.E., Davies, M.P., 2000. Trends in the stewardship of tailings dams. In *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2000*, 16 May 2022 London.
- Management and Planning Organization of Iran, 2015. Guidelines for the design, construction, and operation of tailings dams. Regulation No. 682. [In persian]
- Mendoza, O.T., Hernandez, M.A.A., Abundis, J.G., Mundo, N.F., 2006. Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, Southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 28(3), 243–255.
- Morgenstern, R., Vick, S.G., Viotti, C.B., Watts, B.D., 2016. Fundão tailings dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam.
- Nabavi, M.H., 1976. An introduction to the geology of Iran. *Geological Survey of Iran*, 109 p. [In persian]
- Naeini, M., Akhtarpour, A., 2018. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 179–194.
- Niekerk, H.J.V., Viljoen, M.J., 2005. Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings dam failures. *Land Degradation & Development*, 16(2), 201–212.
- Barzegari, G., Mashhadi Jafarloo, R., Nadiri, A., 2023. Investigating the performance of Mazraeh Ahar copper mine tailings dam from stability and seepage aspects. *Hydrogeology*, 8(1), 156–169. [In persian]
- Burritt, R. L., Christ, K. L., 2018. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. *Journal of Cleaner Production*, 178, 196–205.
- Coulibaly, Y., Belem, T., Cheng, L., 2017. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at Westwood mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, 701–710.
- Davies, M. 2001. Impounded mine tailings: What are the failures telling us? *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 94, 53–59.
- Davies, M., Martin, T., Lighthall, P., 2000. Mine tailings dams: When things go wrong. In *Tailings Dams 2000: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams*. Las Vegas, Nevada.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., Moran, C. J., 2014. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420.
- EPA, 1994. Technical Report - Design and Evaluation of Tailings Dams, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington.63
- GRIDA, 2016. Mine Tailings Storage: Safety is no Accident. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal.
- ICOLD, 2001. Tailings dam-risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.
- Jakka, R. S., Ramana, G., & Datta, M., 2011. Seismic slope stability of embankments constructed with pond ash. *Geotechnique Geology Engineering*, 29(5), 821-835.
- Kasperski, K.L., Mikula, R.J., 2011. Waste streams of mine oil sands: characteristics and remediation. *Elements*, 7(6), 387-392.
- Kemper, T., Sommer, S., 2002. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 36(12), 2742-2747.
- Khamseh, A., Shahbazi, F., Oustan, S., et al., 2017. Impact of tailings dam failure on spatial features of copper contamination (Mazraeh mine area, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(244).

United States Environmental Protection Agency (UNEP)., 1994. Technical report: Design and evaluation of tailings dams. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 68 p.

Vandeberg, G. S., Martin, C. W., Pierzynski, G. M., 2011. Spatial distribution of trace elements in floodplain alluvium of the upper Blackfoot River, Montana. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1521–1534.

Vick, S.G., 1990. Planning, design, and analysis of tailings dams. Wiley, New York, 369 p.

Washington State Department of Transportation (WSDOT)., 2010. Standard specifications for road, bridge, and municipal construction (M 41-10). Construction Administration Office, Engineering and Regional Operations Division, 220 p.

WISE (World Information Service on Energy), 2024. Chronology of major tailings dam failures. Online since.

WISE (World Information Service on Energy Uranium Project), 2012. Chronology of major tailings dam failures. Online since.

Yu, D., Tang, L., Chen, C., 2019. Three-dimensional numerical simulation of mudflow from a tailings dam failure across complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3), 727–741.

Yu, H., Zahidi, I., Fai, C.M., Liang, D., Madsen, D.Ø., 2025. Tailings dam failures: A critical evaluation of current policies and practices. *Results in Engineering*, 25, 103973.

Zardari, M.A., Ormann, L., Mattsson, H., Knutsson, S., 2014. Numerical analysis of staged construction of an upstream tailings dam. In *Proceedings of National Conference on Civil Engineering*. Department of Civil Engineering, QUEST Nawabshah, Pakistan.

Zhao, X., Zhang, L., Li, S., 2024. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions. *Computers and Geotechnics*, 176, 106785.

Nimbalkar, S.S., Annapareddy, V.S., Pain, A., 2018. A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (6), 1082-1090.

Ormann, L., Zardari, M.A., Mattsson, H., Bjelkevik, A., Knutsson, S., 2013. Numerical analysis of strengthening by rockfill embankments on an upstream tailings dam. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(4), 391–399.

Ozer, A.T., Bromwell, L.G., 2012. Stability assessment of an earth dam on silt/clay tailings foundation: A case study. *Engineering Geology*, 151, 89–99.

Penman, A.D., (2001). Risk analyses of tailings dam construction. In *Proceedings of the Conference on Safety of Mining Dams Seminar*, Gällivare, Sweden.

Piciullo, L., Storrøsten, E.B., Liu, Z., Nadim, F., Lacasse, S., 2022. A new look at the statistics of tailings dam failures. *Engineering Geology*, 303, 106657.

Rico, M., Benito, G., Diez-Herrero, A., 2008. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 79–87.

Shahriari, M., Aydin, M. E., 2017. Lessons learned from analysis of Los Frailes tailing dam failure. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, Switzerland.

Stark, T.D., Moya, L. and Lin, J., 2022. Rates and causes of tailings dam failures. *Advances in Civil Engineering*, p.7895880.

Toosab Consulting Engineers, 2018. Final report on geology and engineering geology of the raising of Mazraeh tailings dam. Report No. 7781-410481. [In persian]

Toosab Consulting Engineers, 2018. Seismicity, seismotectonics, and earthquake hazard report of the Mazraeh tailings dam. Report No. 7771-410481. [In persian]

Toosab Consulting Engineers, 2019. Design report of the foundation and body of Mazraeh copper mine tailings dam (raising up to elevation 2085 m). Report No. 7954-410481. [In persian]