

## تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری بهینه فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس مجاور - مطالعه موردی

فاطمه بزرگی فیینی<sup>۱</sup>  
علی عالی انوری\*<sup>۲</sup>  
مجید نوریان بیدگلی<sup>۳</sup>

### چکیده

مهم‌ترین هدف این مقاله بررسی پایداری و تعیین سیستم نگهداری بهینه مغارهای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد است. به این منظور با مدل‌سازی سه‌بعدی، تحلیل اندرکنش سازه‌های مذکور قبل و بعد از حفاری و با در نظر گرفتن سیستم نگهداری بر پایه روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از نرم افزار FLAC3D انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند اگرچه حفاری مغار ترانسفرمر باعث افزایش میزان جابجایی‌های القایی سقف مغار نیروگاه شده، ولی جابجایی‌ها در دیواره مغار تغییر محسوسی نداشته، لذا فاصله افقی ۴۴ متر بین دو مغار مذکور، مناسب انتخاب شده است. به منظور پایداری‌سازی مغارها، سیستم‌های نگهداری پیشنهادی سیستم Q، شامل پیچ سنگ همراه با شاکریت، مدل‌سازی شده است. تحلیل حساسیت جابجایی-پیچ سنگ نشان می‌دهد که کاهش فاصله بین پیچ سنگ‌ها، نسبت به افزایش قطر پیچ سنگ‌ها، تاثیر بیشتری در کاهش میزان جابجایی‌های اطراف مغار نیروگاه دارد. در این حالت با اینکه افزایش قطر پیچ سنگ‌ها، مقدار جابجایی در دیواره‌های مغار نیروگاه را کاهش داده ولی تاثیر زیادی بر مقدار جابجایی‌های سقف مغار نداشته است. لذا افزایش قطر پیچ سنگ همراه با کاهش فاصله بین آنها به منظور بهینه‌سازی سیستم نگهداری با هدف کاهش جابجایی‌ها پیشنهاد می‌گردد.

### واژه‌های کلیدی

تحلیل پایداری، روش عددی تفاضل محدود، سیستم نگهداری، مغار نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، سد آزاد

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن - دانشگاه کاشان

<sup>۲</sup> \* استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان. ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان

## مقدمه

امروزه استفاده از فضاهای بزرگ مقیاس زیرزمینی نظیر مغارها و تونل ها در عرصه های گوناگون رو به گسترش است. پایین تر بودن هزینه های اولیه و اجرایی نسبت به ایجاد تاسیسات در سطح زمین، جدا از مسائل توپوگرافی و عدم محدودیت در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی، امنیت در برابر سرقت و خرابکاری و بالاخره پایین بودن هزینه های سرمایه و گرمایش از جمله مزایایی است که باعث رویکرد به استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی در عرصه های گوناگون شده است. دامنه ی کاربری مغارها و فضاهای زیرزمینی بسیار متنوع است. از مراکز شهری و خدماتی نظیر بیمارستان و ورزشگاه گرفته تا نیروگاه های برق آبی و مخازن ذخیره هیدروکربن های نفتی از جمله مواردی است که تاکنون در فضاهای زیرزمینی احداث شده اند؛ در مجموع می توان اصلی ترین کاربری مغارها را در پنج گروه شامل نیروگاه های برق آبی و تلمبه ذخیره ای، ذخیره ی سیالات، مخازن دفن فضولات هسته ای، سیستم های فاضلاب و آب های هرز و کاربری های متفرقه دسته بندی نمود (عالی انوری، ۱۳۹۸).

در اکثر سازه های زیرزمینی نیروگاه های برق آبی، مغار نیروگاه یکی از بزرگ ترین و حساس ترین سازه های حفر شده در مجموعه نیروگاه است. با توجه به اهمیت وسایل و تجهیزاتی که در مغارها جای می گیرد، موضوع پایداری و نگهداری این نوع سازه ها دارای اهمیت بسزایی است. از جمله مهمترین مشکلاتی که در عملیات اجرایی با آن مواجه می شویم، می توان به مواردی همچون کاهش پایداری توده سنگ اطراف مغار، اعمال فشار مازاد بر سیستم نگهدارنده دائم و موقت، تأثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ و متعاقباً ایجاد خطرات جانی و مالی اشاره کرد (کرش<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹).

تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با سه روش تجربی،

تحلیلی و عددی انجام می پذیرد. چگونگی استفاده از این سه روش از اهمیت زیادی برخوردار است، البته این سه روش از یکدیگر مجزا نبوده و با قرارگیری در راستای یکدیگر موجب تکامل روند طراحی سازه های زیرزمینی می گردند. عمدتاً در مراحل اولیه ساخت فضاهای زیرزمینی که داده های فراوان و دقیقی در اختیار نیست، طراحی با روش تجربی که از سرعت و سادگی بیشتری برخوردار است، آغاز می شود. پس از به دست آمدن یک برآورد اولیه از وضعیت فضا و سیستم نگهداری مورد نیاز، فرآیند طراحی با تحلیل های پیچیده تر ادامه می یابد تا ضمن بررسی دقیق تر رفتار توده سنگ و سیستم نگهدارنده، اصلاحات مورد نظر اعمال شود (هوک<sup>۲</sup>، ۱۹۸۳). از جمله مهمترین روش های تجربی می توان به سیستم های مهندسی طبقه بندی توده سنگ و همچنین معادلات تحلیلی اشاره نمود. علاوه بر روش های تحلیلی که بیانگر تخمینی کلی از شرایط پایداری مغار و فضاهای زیرزمینی هستند، با توجه به معادلات اساسی حاکم بر وضعیت ژئومکانیکی توده سنگ و مشخصات ساختگاه، با بهره گیری از روش های عددی نظیر المان محدود (FEM<sup>۳</sup>)، تفاضل محدود (DFM<sup>۴</sup>)، المان های مجزاء (DEM<sup>۵</sup>) و یا حجم محدود (FVM<sup>۶</sup>) می توان وضعیت سازه را شبیه سازی نمود و حالات مختلف آن را مورد بررسی و تحلیل قرار داد (ساکورایی<sup>۷</sup>، ۱۹۹۷). با دقیق شدن اطلاعات ورودی مدل می توان رفتار توده سنگ را با دقت مناسب شبیه سازی کرده و به نتایج قابل قبول تری دست یافت. از مدل های عددی برای محاسبه زون اغتشاش اطراف فضاهای زیرزمینی، مشخص کردن رفتار یک توده سنگ درزه دار در حالت نگهداری شده و یا بدون نگهداری و تعیین مقدار جابجایی های ایجاد شده در محل استفاده می شود (ترزاقی<sup>۸</sup>، ۱۹۵۸). زارعی و همکاران در سال ۲۰۱۸ پایداری دراز مدت مغار نیروگاه سد آزاد با استفاده از نتایج ابزار دقیق را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند و نشان دادند که سازه مغار نیروگاه برای

<sup>6</sup> Finite Volume Method

<sup>7</sup> Sakurai

<sup>8</sup> Terzaghi

<sup>1</sup> Kirsch

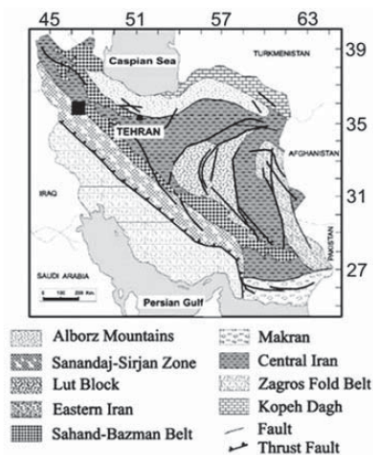
<sup>2</sup> Hoek

<sup>3</sup> Finite Element Method

<sup>4</sup> Differential Fracture Method

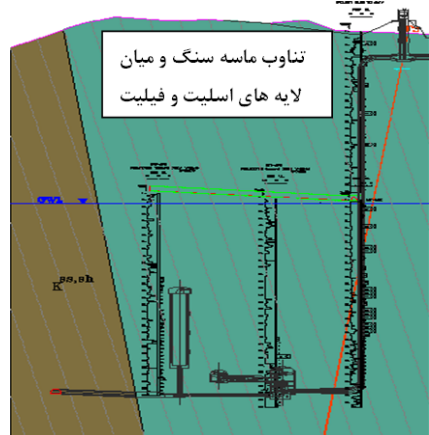
<sup>5</sup> Discrete Element Method

چینه‌ای در محدوده این سازه‌ها، عمدتاً شامل ماسه سنگ‌های دگرگون شده‌ای با ضخامت از چندین سانتی‌متر تا حداکثر ۱ متر است که تحت تاثیر دگرگونی، کمی دگرگون شده‌اند. لایه‌های کالکوفیلیت به ندرت در میان لایه‌ها دیده می‌شود که ضخامت آنها از چندین سانتی‌متر بیشتر نمی‌شود. ابعاد دانه‌ها متوسط تا درشت دانه است و درزه و شکاف‌های این لایه‌ها عمدتاً با پرشدگی کربناته (عمدتاً کلسیتی) با ضخامت در حدود چند میلی‌متر پر شده است (شکل (۱)) (عالی انوری، ۲۰۱۸).



شکل (۱): موقعیت نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد روی نقشه زمین شناسی ایران (عالی انوری، ۲۰۱۸)

شکل (۱) مقطع زمین‌شناسی محدوده قرارگیری مغار نیروگاه را نشان می‌دهد.



شکل (۲): محدوده قرارگیری سازه‌های مورد مطالعه (عالی انوری، ۲۰۱۸)

مغار نیروگاه طرح تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد به عرض ۲۶/۱ متر و ارتفاع ۴۶/۱۴ متر و طول ۸۵ متر در عمق حدود ۵۲۰

یک دوره ۹۵ ساله با ضریب ایمنی ۱ پایدار خواهد بود. کوان جیانگ<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان دادند که تعیین توالی حفاری می‌تواند به طور قابل توجهی هم حجم کل منطقه آسیب و هم شکست شکننده سنگ اطراف را کاهش دهد. علاوه بر این، تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده، عمق منطقه آسیب حفاری آزمایش شده و شکستهای درجا ناشی از طرح حفاری اعمال شده مشابه نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی حفاری مغار بوده است. شنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ مطالعه جامعی در مورد مشکلات لرزه‌های مغارهای زیرزمینی سنگی: مطالعه موردی مجموعه مغار زیرزمینی بایتیان<sup>۲</sup> انجام دادند. در این تحلیل پایداری دینامیکی سازه‌های زیرزمینی تحت یک تست بارگذاری چرخه‌ای با نرخ متوسط انجام شده تا پارامترهای مقاومت دینامیکی مناسب از توده سنگ در آنالیز دینامیکی لرزه‌ای ارائه شود و مشخص شد که طراحی بهبود یافته با چاه استوانه‌ای نسبت به طرح مبدا تحت تأثیر زلزله ایمن تر است. و پایداری مجموعه مغار می‌تواند به خوبی در زیرزمین با طراحی پایه و همچنین زلزله، ارزیابی ایمنی حفظ شود. با توجه به قرارگیری دو مغار بزرگ مقیاس در فاصله نزدیک به هم در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد کردستان، تحلیل پایداری همزمان این دو فضا بسیار حائز اهمیت است. از آنجا که تعیین سیستم نگهداری بهینه مغارها، علاوه بر تامین پایداری مورد نیاز موجب کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های حفاری نیز می‌گردد، لذا در این مقاله تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری دو مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد، با استفاده از روش عددی تقاضل محدود (FDM) و با استفاده از نرم افزار FLAC 3D انجام شده است.

### نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد در استان کردستان و در مجاورت رودخانه کوماسی (چم گوره) از سرشاخه‌های مهم رودخانه سیروان در حال احداث می‌باشد. این نیروگاه بر اساس تقسیم بندی زمین‌شناسی ساختمانی در ناحیه زمین‌شناسی سنندج-سیرجان قرار گرفته است. واحد سنگ

<sup>2</sup> Baytan

<sup>1</sup> Quan Jiang

جدول (۲): پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (گزارش

مکانیک سنگ طرح، ۱۳۹۲)

نوع سنگ	ماسه سنگ دگرگون شده	اسلیت- فیلیت
RMR89	۴۵-۵۳	۳۱-۴۸
Q	۰/۵۵-۰/۹۵	۰/۶-۱/۱
توصیف سنگ براساس روش GSI	Very Blocky-good to fair Rock(48-57)	Blocky-fair Rock(27-44)
چسبندگی (Mpa)	۰/۳-۰/۴	۰/۱۵-۰/۲
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵-۴۰	۲۵-۳۰
مدول تغییر شکل (Gpa)	۴-۶	۱/۵-۲/۵

خصوصیات هندسی و مکانیکی ناپیوستگی ها

رفتار توده سنگ‌ها علاوه بر مشخصات سنگ بکر به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های آن قرار دارد. شکستگی‌های منطقه حاصل چین خوردگی ناحیه ای می باشد که بسته به تنوع لیتولوژی آثار کمی و کیفی متفاوتی از خود بجای گذارده است. برای ارزیابی مشخصات ناپیوستگی‌های موجود در محل سازه‌های زیرزمینی و تونل‌های آب‌بر و دسترسی موجود در طرح تلمبه ذخیره‌ای آزاد از اطلاعات برداشت شده (نقشه‌های حین ساخت) از درون تونل‌های دسترسی (اصلی و میانی) و همچنین ۳۰۰ متر ابتدایی تونل پایاب استفاده شده است. در این راستا در ورودی و خروجی تونل‌ها و مسیر آنها درزه‌نگاری صورت پذیرفت و مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های برداشت شده در درون گمانه‌های اکتشافی نیز مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفت (جدول ۳).

جدول (۳): خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در اطراف

مجموعه نیروگاهی

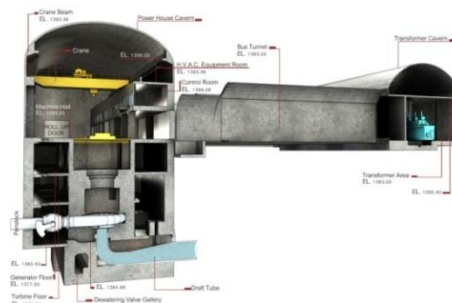
ناپیوستگی	شیب/جهت شیب	فاصله داری (متر)
لایه بندی	۸۲/۰۱۵	۰/۵
J1	۷۰/۲۷۴	۱
J2	۵۴/۱۴۶	۱
J3	۴۹/۰۵۸	۱

تحلیل پایداری مغار با استفاده از سیستم طبقه‌بندی

مهندسی توده سنگ

برای جانمایی و طراحی سازه‌های بزرگ مقیاسی همچون مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر ضروری است که شرایط

متری زمین در ساحل چپ دریاچه‌ی سد آزاد پیش‌بینی شده است. مغار ترانسفورمر نیز به عرض ۱۸/۳ متر، ارتفاع ۱۸/۶ متر و طول ۱۳۶/۸ متر در فاصله حدود ۴۰ متری از مغار نیروگاه جانمایی شده است (شکل (۳)).



شکل (۳): موقعیت تقریبی قرارگیری مغار ترانسفورمر و مغار نیروگاه نسبت به یکدیگر (گزارش زمین شناسی مهندسی طرح، ۱۳۹۲)

پارامترهای ژئومکانیکی سنگهای منطقه

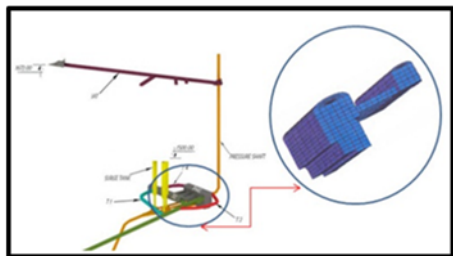
با توجه به اهمیت سازه‌های زیرزمینی در محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد، برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ و توده‌سنگ ساختگاه، برنامه مطالعاتی گسترده‌ای شامل برداشت‌های سطحی زمین‌شناسی، حفر گمانه‌های اکتشافی عمیق و کوتاه، حفر گالری‌های اکتشافی و انجام آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفت. سپس با استفاده از این اطلاعات پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های دربرگیرنده‌ی ساختگاه برآورد شده است. ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ محدوده مغار در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۱): میانگین پارامترهای برآوردشده برای ماده سنگ در

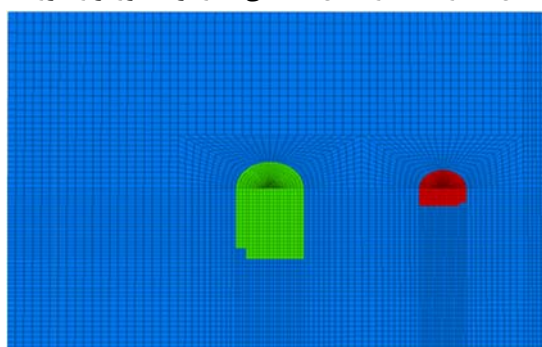
شرایط اشباع (گزارش مکانیک سنگ طرح، ۱۳۹۲)

نوع سنگ	ماسه سنگ دگرگون شده	اسلیت- فیلیت
UCS (Mpa)	۶۹	۲۰
تخلخل (%)	۲/۲۶	۱/۸۴
جذب آب (%)	۰/۸۵	۰/۶۹
سرعت امواج (m/s)	۵۶۴۸	۵۵۳۹
مدول الاستیک (Gpa)	۲۴	۲۲
ضریب پواسون	۰/۲۴	۰/۲۹
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	۲/۶۷	۲/۶۹

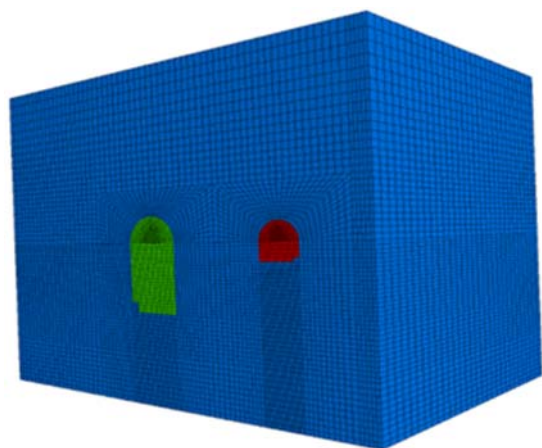
آنها تعیین فاصله‌ی بهینه بین مغار نیروگاه با مغار ترانسفورمر که مهم‌ترین سازه‌ی موجود در کنار مغار نیروگاه می‌باشد، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به مطالعات انجام شده فاصله بهینه میان دو مغار ۴۰ متر در نظر گرفته شده است (عالی انوری، ۱۳۹۸).



شکل (۴): وضعیت و شکل هندسی مغار ترانسفورمر و نیروگاه



شکل (۵): مدل‌سازی دو بعدی مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر



شکل (۶): مدل‌سازی سه بعدی مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر

مدل هندسی سه بعدی مغار نیروگاه و ترانسفورمر سد آزاد به کمک نرم افزار FLAC3D ساخته شده است. شکل نهایی مدل دو بعدی و سه بعدی موقعیت قرارگیری مغارهای ساخته شده در نرم‌افزار مذکور به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. در این مدل‌ها، ابعاد کل مدل ۵ برابر دهانه بزرگترین حفریه (مغار نیروگاه) در نظر گرفته شده است. همچنین ابعاد مدل در بعد سوم (ضخامت) برابر با طول واقعی مغار نیروگاه، یعنی ۸۵ متر انتخاب شده است.

زمین‌شناسی، ساختاری و همچنین تنش‌های موجود در منطقه به طور ویژه مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به اهمیت موضوع در این مقاله به تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری بهینه این فضاها‌ی زیرزمینی پرداخته خواهد شد.

### مدل‌سازی عددی

برای جانمایی و طراحی مغار نیروگاه ضروری است که شرایط زمین‌شناسی، ساختاری و همچنین تنش‌های موجود در منطقه به طور ویژه مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور برنامه‌ی کاملی از بررسی‌های آزمایشگاهی و برجا به همراه برداشت‌های ساختاری در درون گالری‌های اکتشافی برای شناخت کامل توده سنگ و محیط دربرگیرنده‌ی مغار پیش‌بینی و اجرا شده است. در مرحله‌ی طراحی جانمایی محل مغار، تعیین محور مناسب متناسب با شرایط تنش‌های برجا، فاصله دارای آن از سازه‌های مجاور، تعیین شکل بهینه آن به خصوص در سقف و دیواره‌ها و در نهایت تعیین نگهداری مورد نیاز برای کنترل تغییر شکل‌ها و نگهداری زون پلاستیک از مهم‌ترین مراحل انجام یک طراحی مناسب می‌باشند که سعی شده تمامی این مراحل و نکات بیان شده در طراحی مغار نیروگاه طرح آزاد لحاظ گردند. در معیار طراحی ارائه شده توسط هوک نیز کنترل‌های ساختاری به همراه تعیین زون‌های تحت کشش و برش در اطراف مغار که به شدت به وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ وابسته می‌باشند، مورد تأکید قرار گرفته است (هوک، ۲۰۰۷).

همان‌طور که گفته شد علاوه بر روش‌های تحلیلی و تجربی از روش عددی نیز برای پیش‌بینی رفتار توده سنگ اطراف مغار استفاده شده است. اطلاعاتی نظیر شرایط مرزی، سیستم نگهداری اولیه، تنش‌های برجای منطقه (از نوع ثقلی در نظر گرفته شده‌اند) و جهت تنش‌های برجا در محل مغارها به عنوان اطلاعات اولیه در مدل‌سازی وارد شده‌اند. شکل (۴) مدل‌سازی و وضعیت هندسی مغارها نسبت به هم را نشان می‌دهد.

با توجه به اهمیت اندرکنش سازه‌های زیرزمینی و تعیین فاصله‌ی مناسب بین آنها به منظور جلوگیری از تداخل میدان‌های تنش و زون‌های پلاستیک تشکیل شده در اطراف

### شرایط اولیه و مرزی مدل

با توجه به موقعیت قرارگیری این سازه‌ها در اعماق زمین، در تحلیل‌های استاتیکی سازه‌های زیرزمینی، معمولاً تنش قائم برجا بر اساس ارتفاع و وزن مخصوص روباره در نظر گرفته می‌شود. همچنین تنش‌های افقی برجا بر اساس نسبت تنش‌های افقی به قائم منطقه (K) محاسبه می‌گردد. لذا در این مطالعه با توجه به مقدار روباره ۵۲۰ متری، مقادیر تنش برجای قائم ( $S_{ZZ}$ ) و افقی حداقل ( $S_{YY}$ ) و حداکثر ( $S_{XX}$ ) به شرح زیر محاسبه و در مدل‌سازی اعمال شده است:

$$S_{ZZ} = \rho gh = -15.30 \times 10^6$$

$$S_{XX} = \sigma_{ZZ} K_{H(max)} = -16.81 \times 10^6 \quad (1)$$

$$S_{YY} = \sigma_{ZZ} K_{h(min)} = -7.64 \times 10^6$$

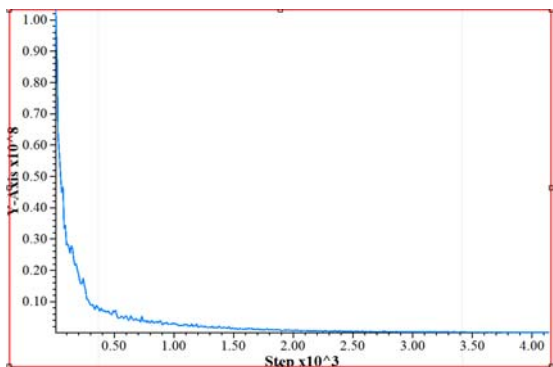
در این روابط مقدار نسبت تنش افقی به قائم حداکثر  $K_{H(max)}$  برابر با ۱/۱ و نسبت تنش افقی به قائم حداکثر  $K_{H(min)}$  برابر با ۰/۵ و نسبت تنش افقی به قائم حداکثر برای اعمال شرایط مرزی مدل، جابجایی مرزهای مدل در اطراف و کف مدل ثابت و بخش بالای مدل در جهت قائم آزاد در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق از مدل رفتاری الاستیک، برای مرحله قبل از حفاری و مدل رفتاری موهر-کلمب برای مرحله بعد از حفاری و تحلیل الاستیک-پلاستیک استفاده شده است و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ‌های دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی بر مبنای اطلاعات ارائه شده در جداول (۱) تا (۳) در نظر گرفته شده‌اند.

### مراحل مدل‌سازی

با ساخت مدل هندسی و اعمال خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ، مدل در مرحله اول اجرا و به تعادل رسیده است. نمودار شکل (۸) رسیدن مدل به حالت تعادل را نشان می‌دهد. برای بررسی پاسخ مدل نسبت به تعادل از نمودار تغییرات نیروی نامتعادل استفاده شده است.

بعد از رسیدن مدل به حالت تعادل، مدل‌سازی وارد مرحله بعدی؛ یعنی اعمال تغییرات اجرایی (نظیر حفاری و اعمال سیستم نگهداری) برای انجام تحلیل تنش-جابجایی می‌شود. با توجه به اینکه در اجرای پروژه برق آبی نیروگاه سد آزاد ابتدا مغار نیروگاه حفاری شده و بعد از پایان حفاری

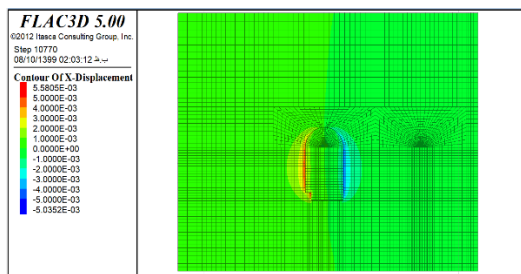
کامل آن، مغار ترانسفرمر حفاری شده است، لذا در این مرحله از مدل‌سازی ابتدا مغار نیروگاه ایجاد شده است. بدین منظور در مدل، مغار نیروگاه در هر مرحله از حفاری طی ۹ گام از سقف به سمت کف حفاری شده و در هر مرحله ۳ متر پیشروی به سمت جلو داشته است. بدین ترتیب کل ۸۵ متر طول مغار نیروگاه طی ۲۸ مرحله مدل‌سازی شده است. با کامل شدن مغار نیروگاه، در مرحله بعد مغار ترانسفرمر با همین گام و مقدار پیشروی در مدل اعمال شده است.



شکل (۸): تغییرات نیروی نامتعادل نسبت به زمان حل مدل قبل از حفاری

### تحلیل پایداری مدل بدون سیستم نگهداری

به منظور بررسی وضعیت جابجایی‌های اطراف مغارها، طی دو مرحله تحلیل پایداری انجام شده است. در مرحله اول، تحلیل پایداری بدون سیستم نگهداری و درست بعد از حفاری مغار نیروگاه انجام شده است. در کلیه مدل‌سازی‌های انجام شده توالی حفاری در نظر گرفته شده است. در این حالت اجرای مدل در هر مرحله از حفاری تا رسیدن به تعادل مدل انجام شده است. شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل پایداری سازه‌ها را در حالت بدون اعمال سیستم نگهداری نشان می‌دهد.

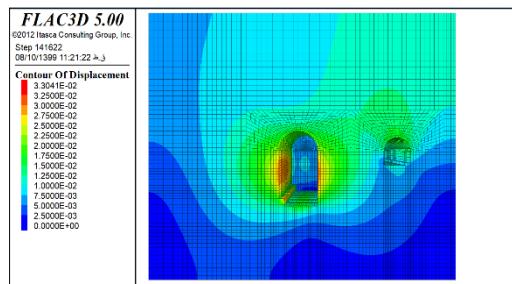


شکل (۹): وضعیت جابجایی در راستای افقی مغار نیروگاه بدون

سیستم نگهداری در گام اول حفاری (۳ متر پیشروی)

نتایج نشان‌دهنده این مطلب است که در گام اول حفاری حداکثر مقدار جابجایی در سقف مغار نیروگاه بعد از ۳ متر

راستای قائم نسبت به حالت قبل از حفر مغار ترانسفرمر تغییر کرده و بیشتر شده است. در حالی که جابجایی‌ها در راستای افقی نسبت به حالت قبل از حفر مغار ترانسفرمر تغییر محسوسی نداشته و تقریباً ثابت مانده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در حالیکه حفاری مغار ترانسفرمر بر میزان جابجایی‌های سقف مغار نیروگاه تاثیر گذاشته، ولی میزان جابجایی‌ها در دیواره مغار بدون تغییر مانده و از این لحاظ فاصله دو مغار از یکدیگر مناسب انتخاب شده است.



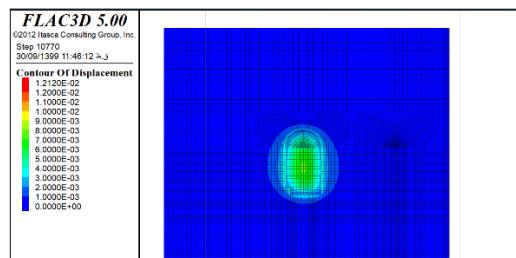
شکل (۱۳): وضعیت جابجایی کل در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت بدون سیستم نگهداری

#### تحلیل پایداری مدل با سیستم نگهداری

همانگونه که نتایج مدل‌سازی در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است، بیشترین مقدار جابجایی در سقف و دیواره‌های مغار نیروگاه است. بر اساس معیار ساکورایی، میزان جابجایی مجاز در سقف و دیواره‌های مغار به ترتیب برابر با  $4/6$  و  $8/2$  میلی‌متر می‌باشد. لذا در این مرحله به منظور کاهش میزان جابجایی و در نتیجه افزایش پایداری مغاره نیروگاه، نیاز به طراحی و اجرای سیستم نگهداری است. مطابق با نحوه اجرا، زمان نصب سیستم نگهداری در هر مرحله در مدل بعد از پایان هر گام حفاری (۳ متر پیشروی) در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۴) سیستم نگهداری نصب شده در مغار نیروگاه بعد از یک گام حفاری (۳ متر پیشروی) نشان داده شده است. نصب سیستم نگهداری در این مرحله باعث کاهش جابجایی‌ها نسبت به قبل شده است.

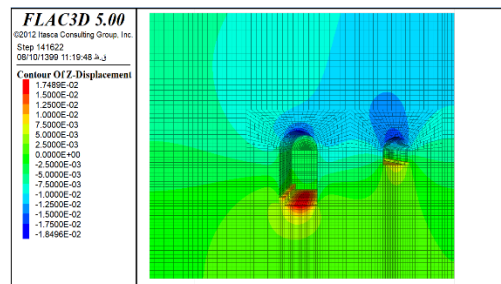
بدین ترتیب حفاری و نصب سیستم نگهداری مغار نیروگاه تا گام آخر، یعنی تا ۸۵ متر پیشروی ادامه یافته است. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نشان‌دهنده کانتورهای جابجایی در راستای قائم، افقی و کل مغار نیروگاه با اعمال سیستم نگهداری در آخرین گام حفاری (یعنی ۸۵ متر پیشروی به

پیشروی حدوداً به مقدار ۵ میلی‌متر رسیده است در حالیکه این میزان جابجایی در دیواره‌ها برابر با  $5/5$  میلی‌متر است که با توجه به گسترش کانتورهای جابجایی اطراف حفاریه در این مرحله، حفاری مغار نیروگاه بر روی مغار ترانسفرمر تاثیری نداشته است.

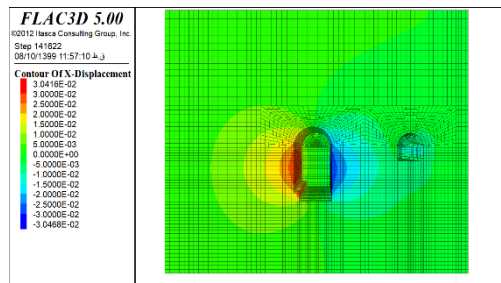


شکل (۱۰): وضعیت جابجایی کل مغار نیروگاه بدون سیستم نگهداری در گام اول حفاری (۳ متر پیشروی)

در ادامه شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نتایج حاصل از مدل‌سازی پس از اتمام حفاری را نشان می‌دهند که حداکثر مقدار جابجایی در سقف مغار نیروگاه بعد از ۳۰ متر پیشروی حدوداً به مقدار  $1/23$  سانتی‌متر رسیده است. این میزان جابجایی و گسترش کانتور جابجایی نسبت به حالت قبل زیادتر شده است. همچنین در این حالت میزان جابجایی در دیواره‌ها بین  $2/5$  تا  $2/6$  سانتی‌متر است.



شکل (۱۱): وضعیت جابجایی در راستای قائم در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت بدون سیستم نگهداری

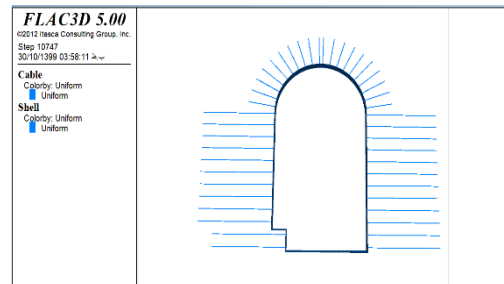


شکل (۱۲): وضعیت جابجایی در راستای افقی در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت بدون سیستم نگهداری

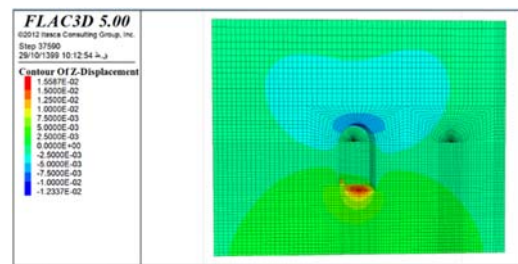
همانطور که در شکل‌ها مشخص است، با تکمیل حفاری مغارهای نیروگاه و ترانسفرمر مقدار و وسعت جابجایی‌ها در

بعد از اعمال سیستم نگهداری کاهش یافته است. در ادامه مدل سازی و بعد از اتمام حفاری و نگهداری مغار نیروگاه، مطابق طرح حفاری و نگهداری مغار ترانسفرمر انجام شده است. شکل های (۲۰) و (۲۱) وضعیت سیستم نگهداری نصب شده در مغارهای نیروگاه و ترانسفرمر را نشان می دهند. شکل های (۲۲) تا (۲۴) به ترتیب نشان دهنده کانتورهای جابجایی در راستای قائم، افقی و کل مغار نیروگاه پس از حفر و نگهداری کامل مغار ترانسفرمر می باشند. مقایسه این شکل ها با حالت قبل از نصب سیستم نگهداری در این مرحله نشان می دهد که میزان حداکثر جابجایی در سقف مغار از مقدار ۱/۸۵ سانتیمتر در حالت بدون نگهداری به مقدار ۱/۴۵ سانتیمتر در حالت با نگهداری کاهش یافته است. همچنین میزان حداکثر جابجایی در دیواره های مغار از مقدار ۳ سانتیمتر در حالت بدون نگهداری به مقدار ۲/۵ سانتیمتر در حالت با نگهداری کاهش یافته است. در این حالت حداکثر جابجایی کل نیز از مقدار ۳/۳ سانتیمتر در حالت بدون نگهداری به مقدار ۲/۵ سانتیمتر در حالت با نگهداری کاهش یافته است.

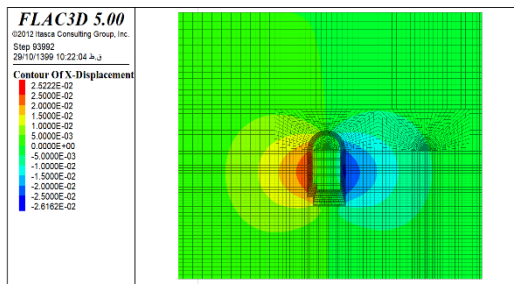
سمت جلو) می باشند. همانطور که در شکل ها مشخص است، مقدار و وسعت جابجایی با اعمال سیستم نگهداری نسبت به قبل کمتر می شود.



شکل (۱۴): سیستم نگهداری نصب شده در مغار نیروگاه بعد از یک گام حفاری (۳ متر پیشروی)

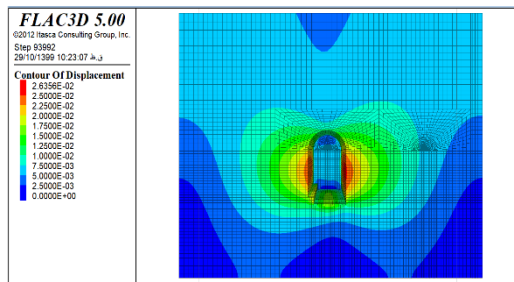


شکل (۱۵): وضعیت جابجایی در راستای قائم مغار نیروگاه با سیستم نگهداری در پایان گام دهم حفاری



شکل (۱۸): وضعیت جابجایی در راستای افقی مغار نیروگاه با

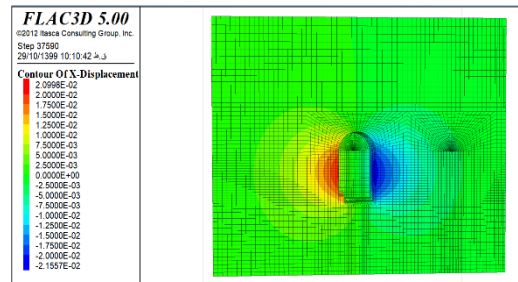
سیستم نگهداری در پایان گام آخر حفاری



شکل (۱۹): وضعیت جابجایی کل مغار نیروگاه با سیستم

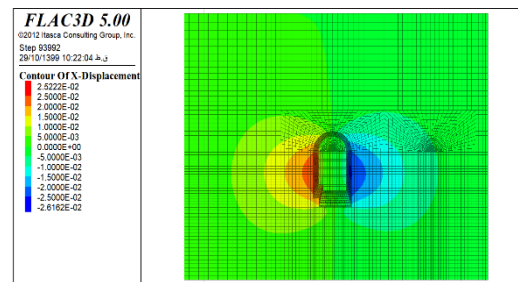
نگهداری در پایان گام آخر حفاری

لازم به ذکر است که در این مرحله نیز هر گام حفاری و نگهداری تا رسیدن مدل به تعادل ادامه می یابد. شکل (۲۵) نشان دهنده تغییرات نیروهای نامتعادل نسبت به زمان حل



شکل (۱۶): وضعیت جابجایی در راستای افقی مغار نیروگاه با

سیستم نگهداری در پایان گام دهم حفاری



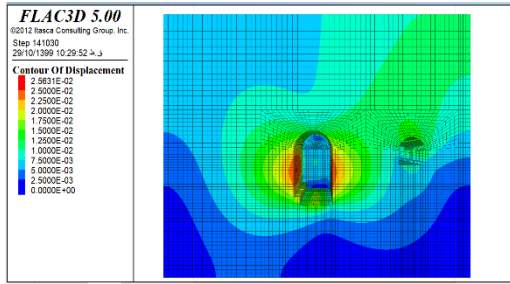
شکل (۱۷): وضعیت جابجایی در راستای افقی مغار نیروگاه با

سیستم نگهداری در پایان گام آخر حفاری

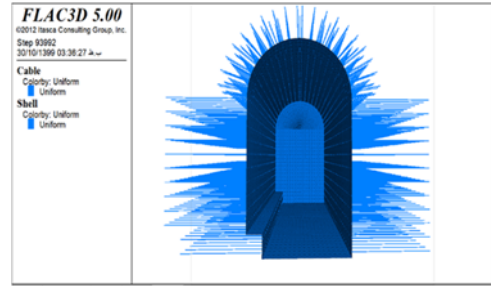
مقایسه شکل های (۱۴) تا (۱۶) با حالت قبل از نصب سیستم نگهداری در این مرحله (شکل های (۱۷) تا (۱۹)) نشان می دهد که هم اندازه جابجایی و هم وسعت کانتورهای جابجایی کمتر شده و وضعیت جابجایی ها در سقف و دیواره های مغار



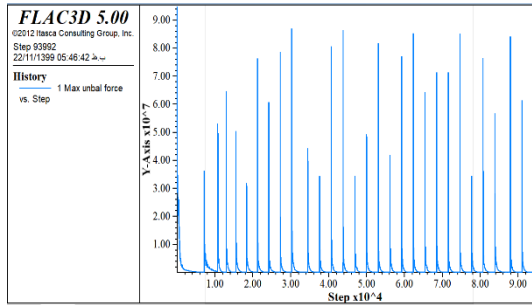
مدل تا رسیدن به تعادل در پایان هر گام حفاری و نگهداری (۲۸ گام پیشروی) است.



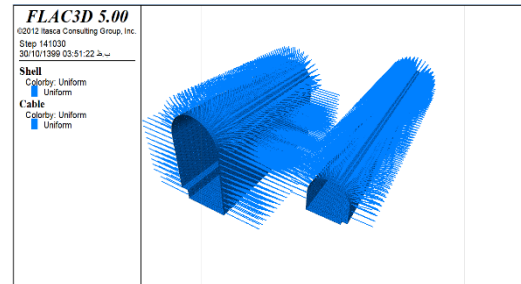
شکل (۲۴): وضعیت جابجایی کل در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت با سیستم نگهداری



شکل (۲۰): وضعیت سیستم نگهداری نصب شده در کل مغار نیروگاه



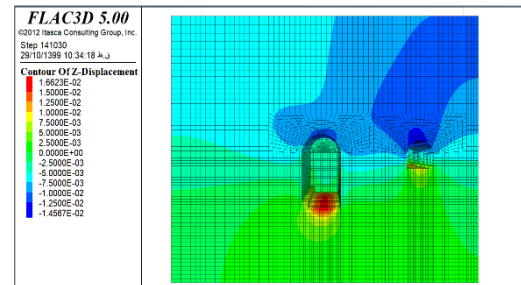
شکل (۲۵): تغییرات نیروهای نامتعادل بعد از پایان هر گام حفاری و نگهداری



شکل (۲۱): وضعیت سیستم نگهداری نصب شده در کل مغارهای نیروگاه و ترانسفرمر

### نتیجه‌گیری

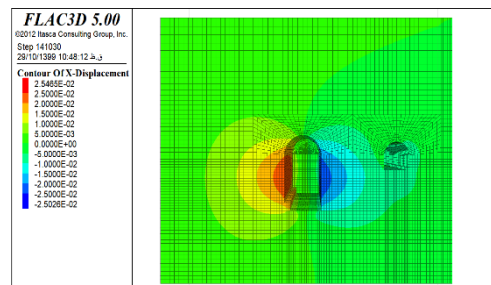
مغارها به عنوان فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس معمولاً به دلیل هزینه‌های بالای ساخت و تجهیزاتی که در آنها جا می‌گیرد نیاز به پایداری مطلق با هدف کاهش جابجایی دارند. در اکثر نیروگاه‌های برق آبی، مغار نیروگاه معمولاً مجاور به مغار ترانسفرمر جانمایی می‌شود، لذا بررسی اندرکنش آنها بر هم و کنترل میزان جابجایی در فاصله‌ی بین این دو طی مراحل ساخت و بهره‌برداری بسیار مهم و ضروری است. لذا تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری بهینه مغارهای نیروگاه و ترانسفرمر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد هدف اصلی انجام این مطالعه بوده است. برای این منظور به کمک نرم‌افزار عددی تفاضل محدود FLAC3D، تحلیل اندرکنش تنش-جابجایی انجام شده و نتایج زیر بدست آمده است.



شکل (۲۲): وضعیت جابجایی در راستای قائم در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت با سیستم نگهداری

الف) در تحلیل اندرکنش مغارها در حالت بدون اعمال سیستم نگهداری:

- با افزایش میزان حفاری و پیشروی در مغار نیروگاه، میزان جابجایی اطراف مغار بیشتر می‌شود.
- مقدار جابجایی‌ها در دیواره‌ها نسبت به سقف مغار نیروگاه بیشتر است.



شکل (۲۳): وضعیت جابجایی در راستای افقی در پایان حفر کامل مغار ترانسفرمر در حالت با سیستم نگهداری

- 7- Hoek, E. (1965). Rock fracture under static stress conditions. Ph.D. thesis, University of Cape Town.
- 8- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of Underground Excavation in Hard Rock. London: Taylor & Francis. ISBN: 9054101865
- 9- Hoek, E. & Moy, D. (1993) " Design of Large Powerhouse Caverns in Weak Rock Comprehensive Rock Engineering, Vol.5, ch.4, Pergamon Press, pp.85-109
- 10- Kirsch, G., (1998). Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre. Veit. Deit. Ing. 42 (28), 797-807.
- 11- Sakurai, S. (1997). Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling. Tunnelling and Underground space Technology, 12(4), 453-460. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00004-2).
- 12- Terzaghi, K. and Richart, F.E. (1952). Stresses in rock about cavities. Geotechnique 3, 57-90.

- حفر مغار ترانسفرمر باعث افزایش جابجایی بیشتری در سقف مغار نیروگاه نسبت به دیواره‌ها شده است.

(ب) در تحلیل اندرکنش مغارها در حالت با اعمال سیستم نگهداری:

- اعمال سیستم نگهداری (پیچ سنگ همراه با شاکریت)، باعث کاهش میزان جابجایی مغار نیروگاه طی کلیه مراحل حفاری نسبت به حالت بدون سیستم نگهداری شده است.

- تاثیر سیستم نگهداری بر روی کاهش میزان جابجایی‌های اطراف مغار نیروگاه، در دیواره‌ها نسبت به سقف مغار بیشتر بوده است.

(ج) در تحلیل حساسیت جابجایی مغار نیروگاه نسبت به نوع سیستم نگهداری:

- گزینه افزایش تعداد پیچ سنگ‌ها، با کاهش فاصله بین پیچ سنگ‌ها به نصف مقدار اولیه، نسبت گزینه افزایش قطر پیچ سنگ‌ها، تاثیر بیشتری در کاهش میزان جابجایی‌های اطراف مغار نیروگاه داشته است.

- افزایش قطر پیچ سنگ‌ها، مقدار جابجایی در دیواره‌های مغار نیروگاه را کمی کاهش داده است ولی تاثیر زیادی بر کاهش مقدار جابجایی‌های سقف مغار نداشته است.

- افزایش قطر پیچ سنگ‌ها همزمان با کاهش فاصله بین پیچ سنگ‌ها تاثیر بیشتری در کاهش میزان جابجایی‌های دیواره‌های مجاور نسبت به سقف مغار نیروگاه داشته است.

## مراجع

- ۱- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (۱۳۹۲)، "گزارش زمین شناسی مهندسی مطالعات مرحله دوم، طرح تلمبه ذخیره‌ای آزاد".
- ۲- عالی انوری، هاشمی، (۱۳۹۸). " جانمایی بهینه افقی میان فضاهای بزرگ مقیاس در سنگ‌های با تناوب سخت و سست - مطالعه موردی"، نشریه سد و نیروگاه برق آبی.
- 3- Aalianvari, A., Soltani-Mohammadi, S. and Rahemi, Z., (2018). Estimation of geomechanical parameters of tunnel route using geostatistical methods. Geomechanics and Engineering, 14(5), pp.453-458.
- 4- Brown, E.T. (1987). " Introduction. Analytical and computational methods in engineering rock mechanics", (ed. E.T. Brown), 1-31. London: Allen and Unwin.
- 5- Chen, J. Wang, Z.H. Zong, (2015), " A new rock mass classification system QHLW for high-level radioactive waste disposal" Engineering Geology, Volume 190, 14 May 2015, Pages 33-51
- 6- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses, 23rd. Rankine. Lecture. Géotechnique 33(3), 187-223.

## Stability analysis and selection of optimal support system of adjacent large-scale cavern-a case study

Fatemeh Bozorgi<sup>1</sup>  
Ali Aalianvari<sup>\*2</sup>  
Majid Noorian-Bidgoli<sup>3</sup>

### Abstract

The main purpose of this paper is to evaluate the stability analysis and selection of Azad pumped storage power plant support systems. For this purpose, by three-dimensional modeling, the interaction analysis of the mentioned structures before and after excavation and considering the support system based on the numerical method of finite difference and using FLAC3D software has been done. Results show that the excavation of transformer cavern increase the vertical displacements on the power house cavern but the wall displacements is negligible. The Q system results show reducing the distance between the rock bolts, compared to increasing the diameter of the rock bolts, and has a greater effect on reducing the amount of movement around the power plant cave. In this case, although increasing the diameter of the rock bolts, the amount of displacement in the cave walls of the power plant has decreased, but has not had much effect on the amount of displacement of the cave roof. Therefore, in order to reduce the displacements, increasing the diameter of rock bolts with reducing the distance between them is recommended.

### Keywords

Stability analysis, Finite difference method, Support system, Power plant cavern, Azad dam

---

<sup>1</sup> Master of Mining Engineering, University of Kashan, Kashan , Iran.

<sup>2\*</sup> Assistant Professor of Mining Engineering Department, University of Kashan, Kashan ,Iran.  
ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor of Mining Engineering Department, University of Kashan, Kashan ,Iran.