

تحلیل پایداری مغارهای نیروگاه سد بختیاری با استفاده از نرم افزار 3DEC

بیژن دهقانی¹، لهراسب فرامرزی^{2*}، منوچهر صانعی³

1- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

2- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

3- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: فروردین 1394، پذیرش: تیر 1394)

چکیده

امروزه فضاهاى بزرگ زیرزمینی به جهت استفاده متعدد در پروژه‌های استراتژیک شامل نیروگاه‌های برق آبی، ذخیره‌سازی نفت و گاز، دفن زباله‌های اتمی و غیره از اهمیت فراوانی برخوردارند. لذا بررسی پایداری آن‌ها نیز به دلیل ابعاد بزرگ و وسیع حائز اهمیت است. در این مقاله با در نظر گرفتن موقعیت ناپیوستگی‌ها و شرایط تنش در منطقه مورد مطالعه مناسب‌ترین راستا برای حفر مغار نیروگاه سد بختیاری ارزیابی شده است. خواص مقاومتی توده سنگ شامل: استحکام برشی سطوح ناپیوستگی‌ها، مدول تغییرشکل پذیری با استفاده از آزمایش‌های برجا تعیین شد و خلاصه نتایج برای مدلسازی عددی آورده شده است. شرایط تنش در ناحیه مورد مطالعه با استفاده از آزمایش شکست هیدرولیکی تعیین شده است. با استفاده از روش عددی المان مجزا و روابط تحلیلی فاصله مناسب بین مغارها با در نظر گرفتن احتمال پدیده انفجار سنگ تعیین شده است. در انتها به کمک مدلسازی عددی و تعیین زون تأثیر (زون پلاستیک)، شیب لایه‌بندی‌ها و مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ، سیستم نگهداری مناسب شامل طول تاندون‌ها و پیچ‌سنگ‌ها و میزان نیروی محوری اعمال شده بر آن‌ها پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی

موقعیت ناپیوستگی‌ها، مدول تغییرشکل‌پذیری، آزمایش‌های برجا، آزمایش شکست هیدرولیکی، فاصله ستون سنگی

* عهده دار مکاتبات: lfaramarzi@cc.iut.ac.ir

1- مقدمه

بین نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده از ابزار دقیق به بررسی پایداری آن‌ها پرداختند [14]. زا و همکاران پایداری مغارهای زیرزمینی در ماسه‌سنگ‌های لایه‌بندی شده را با استفاده از روش عددی المان محدود بررسی کردند [15]. در این تحقیق بر مبنای اهمیت اثر ناپیوستگی‌های ساختگاه بر جهت حفاری نسبت به شرایط تنش در منطقه، راستای مناسب حفاری مغارها تعیین گردید. با استفاده از نرم‌افزار 3DEC حفاری مغارها در 14 مرحله انجام شد، سپس فاصله مناسب بین مغارها بر اساس زون تأثیر، ضخامت ستون سنگی دست نخورده، میزان تنش القایی ایجاد شده و روابط تحلیلی کمانش در ستون‌ها، پیشنهاد شد. همچنین جابجایی در اطراف مغارها قبل و بعد از اعمال سیستم نگهداری برای بررسی میزان ناپایداری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت سیستم نگهداری شامل تاندون‌ها و مونوبارها همراه با طول مناسب، ظرفیت بارپذیری و فاصله‌داری در قسمت‌های مختلف تعیین شد.

2- معرفی نیروگاه سد بختیاری

پروژه سد و نیروگاه بختیاری، در جنوب غربی ایران و در 70 کیلومتری شهر اندیمشک و با ارتفاع 325 متر به‌عنوان بلندترین سد بتونی دو قوسی در جهان خواهد بود. این سد بر روی رودخانه بختیاری، یکی از سرشاخه‌های رود دز قرار دارد و توان تولید 1500 مگاوات برق را خواهد داشت. نیروگاه سد در تکیه‌گاه چپ و در فاصله تقریباً 500 متری از محور سد قرار دارد. این نیروگاه شامل یک مغار اصلی به ابعاد 46 متر ارتفاع، 23 متر عرض و 160 متر طول و یک مغار ترانسفورماتور به ابعاد 13 متر ارتفاع، 13 متر عرض و 182 متر طول در عمق 280 تا 300 متری از سطح زمین واقع شده است [16]. ساختگاه سد در شکل 1 نشان داده شده است.

3- زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ ساختگاه سد و نیروگاه بختیاری

سد و نیروگاه بختیاری در شمال غربی زاگرس چین خورده و در یک ناحیه تکتونیزه شده با لایه‌بندی‌های منحصر به فردی قرار دارد (شکل 2). ساختگاه سد عمدتاً از

بررسی پایداری فضا‌های بزرگ زیرزمینی شامل نیروگاه‌های برق‌آبی، ذخیره‌سازی نفت و گاز، دفن زباله‌های هسته‌ای و غیره از اهمیت بسزایی برخوردار هستند [1]. پایداری مناسب مغارها به پارامترهایی از جمله تعیین جهت [2]، شکل مقطع [3]، فاصله ستون سنگی، انتخاب روش حفر و تعداد مراحل حفاری [4] و اعمال سیستم نگهداری [5] بستگی دارد. تحقیقات وسیعی توسط محققان مختلف در این زمینه انجام شده است. قربانی و شریف‌زاده با استفاده از روش عددی المان مجزا و آنالیز برگشتی به بررسی پایداری مغارهای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در ایران در شرایط خشک و اشباع پرداخته‌اند [6]. لو و همکاران با استفاده از مدلسازی عددی بر روی مغار جوویک در کشور نروژ نشان دادند که در شرایط تنش بالا و روباره کم، جهت حفاری مناسب در راستای تنش افقی بیشینه است [7]. ژو و همکاران بر مبنای پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری مغارها شامل مدول تغییر شکل‌پذیری، ارتفاع روباره، ضریب تنش، فاصله‌ی بین مغارها و ارتفاع مغارها و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به بررسی جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف مغار پرداختند و ارتباط بین جابجایی در مقابل ضریب تنش و فاصله مغارها را مورد بررسی قرار دادند [8-9]. جیانگ و فنگ با استفاده از روش هوشمند ترتیب مراحل حفاری مغارهای نیروگاه برق‌آبی در کشور چین را در شرایط استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار دادند [10]. ژائو و ما با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی و با تغییر دادن فاصله‌ی بین مغارها، میزان زون تأثیر را برای سه گروه سنگی (شامل: نرم، سخت و تا حدودی سخت) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در سنگ‌های نرم و تا حدودی سخت، فاصله بهینه بین مغارها 2 برابر عرض مغار بزرگ‌تر و برای سنگ‌های سخت این فاصله کمتر است [11]. ژانگ و همکاران بر اساس روش تشخیص بلوک‌های ناپایدار، پایداری فضا‌های بزرگ زیرزمینی را بررسی کردند [12]. ژو و همکاران پایداری مغارهای نیروگاه برق‌آبی را تحت شرایط تنش بالا و بر اساس مدلسازی فیزیکی مورد مطالعه قرار دادند [13]. داسگوپتا و همکاران در هند با استفاده از آنالیز دوبعدی و سه‌بعدی مغارهای نیروگاه برق‌آبی و با مقایسه

ضخامت لایه‌بندی متفاوت قرار دارد (شکل 3). ساختار غالب در ساختگاه سد بختیاری شامل لایه‌بندی و سه دسته‌درزه است [17]. پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها تکیه‌گاه چپ در جدول 1 نشان داده شده است.

آهک‌های سیلیسی سازند سروک مربوط به دوران کرتاسه که به 7 واحد Sv1 تا Sv7 تقسیم‌بندی شده، تشکیل شده است. نیروگاه زیرزمینی سد در تکیه‌گاه چپ و در ناحیه Sv4 و Sv5 شامل آهک همراه با ندول‌های سیلیسی با



شکل 1: ساختگاه سد بختیاری [16]

استفاده از آزمایش شکست هیدرولیکی اندازه‌گیری شده است (جدول 3). پارامترهای استحکام برشی سطوح ناپیوستگی‌ها توسط آزمایش‌های برش مستقیم در آزمایشگاه و همچنین آزمایش‌های برش مستقیم برجا تعیین شده است (جدول 4). در شکل 4 محل قرارگیری گالری‌های اکتشافی و انجام آزمایش‌های برجا نشان داده شده است.

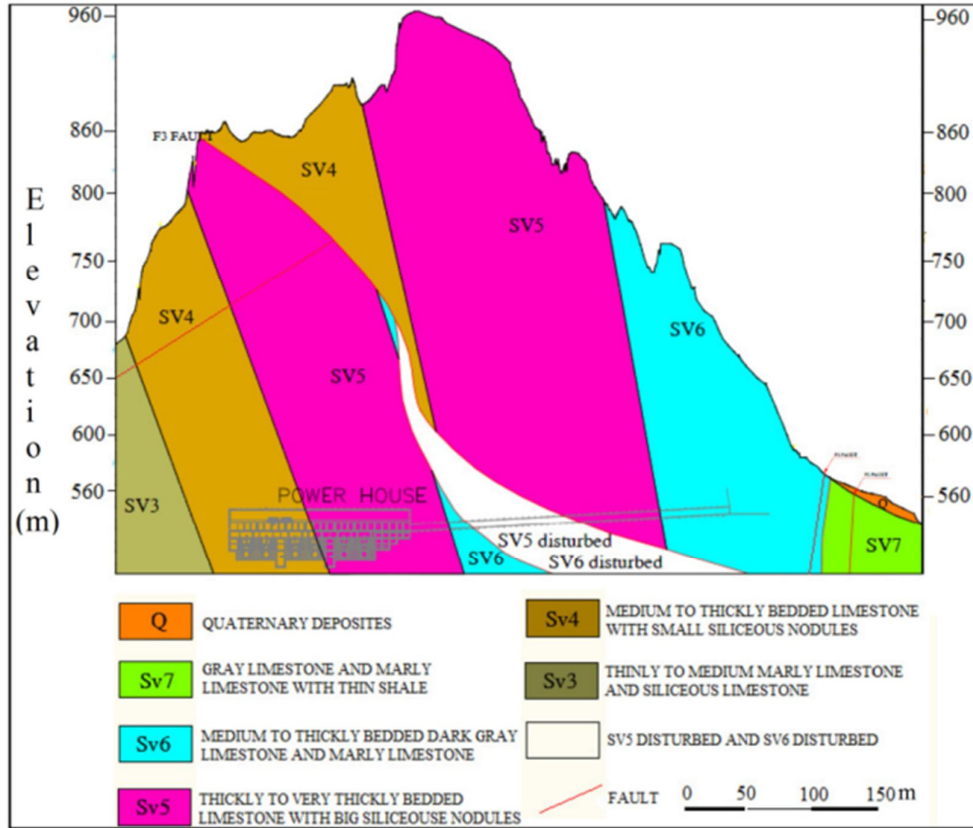


شکل 2: لایه‌بندی و چین‌خوردگی‌های منحصر به فرد ساختگاه سد بختیاری [17].

جدول 1: مختصات فضایی ناپیوستگی‌های اصلی در تکیه‌گاه چپ [17]

| ناحیه | نوع ناپیوستگی | شیب ناپیوستگی‌ها (درجه) | امتداد شیب ناپیوستگی‌ها (درجه) |
|-------------|-----------------|-------------------------|--------------------------------|
| تکیه‌گاه چپ | دسته‌درزه (1-1) | 40 | 310 |
| | دسته‌درزه (2-1) | 70 | 310 |
| | دسته‌درزه 2 | 15 | 45 |
| | لایه‌بندی | 75 | 215 |

به‌منظور تخمین پارامترهای توده‌سنگ ساختگاه سد و نیروگاه آزمایش‌های برجای مکانیک سنگی در گالری‌های اکتشافی انجام شده است. مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ ساختگاه با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای، جک تخت و آزمایش‌های دیلاتومتری (جدول 2) ارزیابی شده است. مقدار و موقعیت تنش‌های اصلی با



شکل 3: مقطع زمین‌شناسی تکیه‌گاه سمت چپ سد و نیروگاه بختیاری [17]

جدول 2: پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و توده‌سنگ تکیه‌گاه چپ سد بختیاری [18]

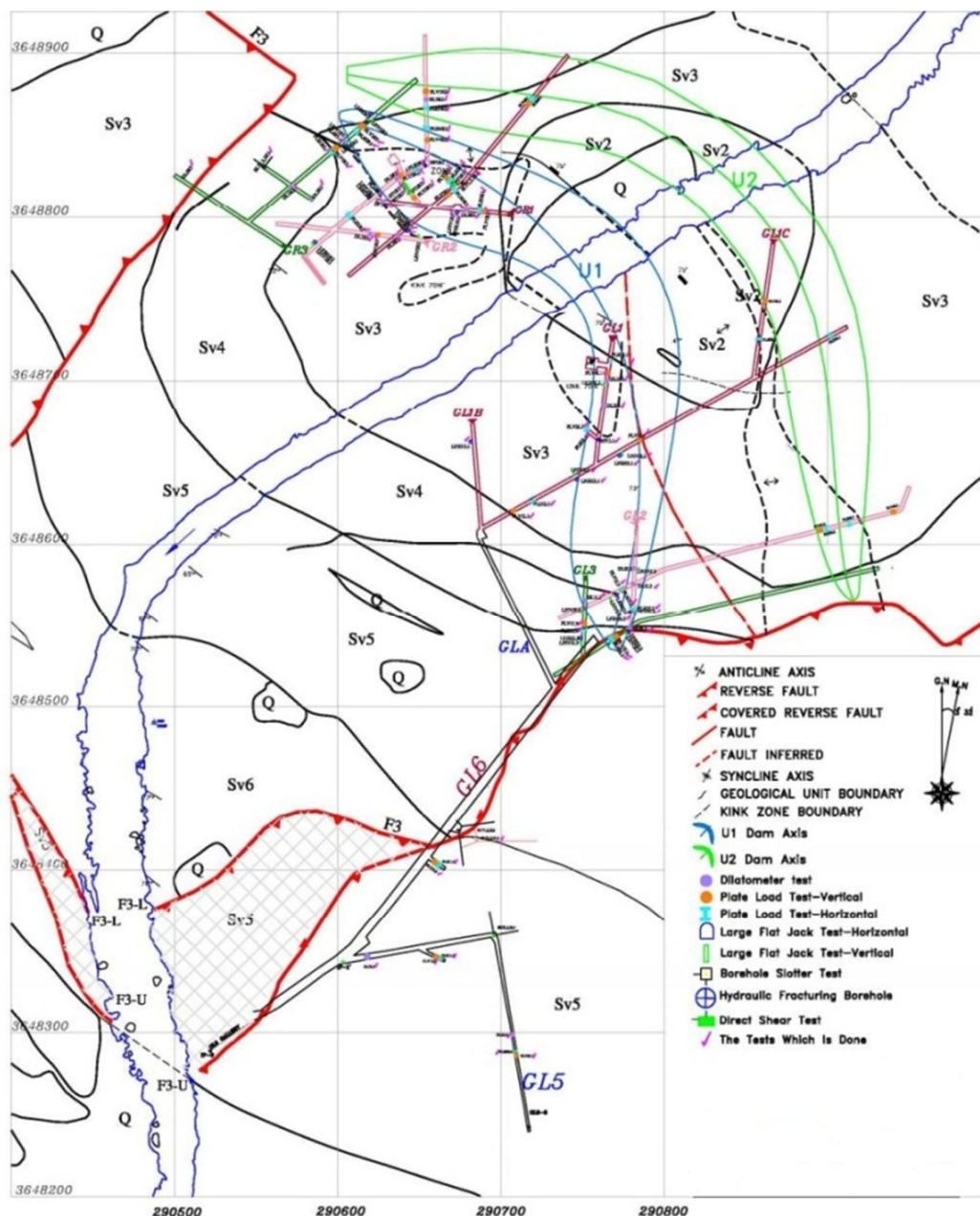
| ناحیه | مدول تغییر شکل پذیری (GPa) | ضریب پواسون | چگالی (gr/cm^3) | مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa) | چسبندگی (MPa) | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) |
|-------|----------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|
| Sv4 | 10 | 0/3 | 2/65 | 120 | 2 | 37 |
| Sv5 | 15 | 0/3 | 2/65 | 125 | 2/75 | 40 |

جدول 3: نتایج حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی در تکیه‌گاه چپ سد [18]

| ناحیه | تنش افقی کمینه (MPa) | تنش افقی بیشینه (MPa) | تنش قائم (MPa) | جهت تنش افقی بیشینه (درجه) |
|------------------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------------------|
| نیروگاه زیرزمینی | 1/2 | 2 | 7/4 | 62/5±44/5 |

جدول 4: پارامترهای استحکام برشی ناپیوستگی‌ها تکیه‌گاه چپ سد [18]

| نوع ناپیوستگی | چسبندگی (KPa) | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) | سختی نرمال (GPa/m) | سختی برشی (GPa/m) |
|---------------|---------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| لایه‌بندی | 50 | 34 | 7 | 2 |



شکل 4: محل و موقعیت گالری‌های اکتشافی و آزمایش‌های برجا [18]

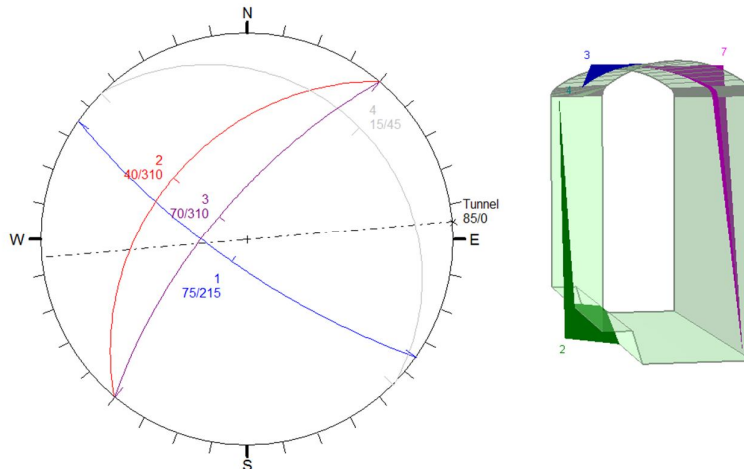
4- تعیین موقعیت محور مغار

جهت و مقدار تنش‌های اصلی از جمله پارامترهای مهم در انتخاب محور مغار در اعماق زیاد است. در اعماق کم، موقعیت دسته‌درزه‌های غالب، ساختار تکتونیکی و وضعیت زمین‌شناسی نقش تعیین‌کننده دارد. در توده‌های سنگی، معمولاً امتداد حفاری موازی با جهت تنش افقی بیشینه

است [19]. در سنگ‌های سخت با روباره کمتر و مقادیر تنش‌های اصلی بیشتر، مطلوب است که جهت حفاری عمود بر بیشینه تنش افقی باشد، این نوع طراحی باعث پایداری بلوک‌های سقف فضاهای زیرزمینی می‌شود [20]. همچنین بهتر است امتداد محور مغار در اعماق کم تا متوسط، بیشترین زاویه را با امتداد دسته‌درزه‌های اصلی داشته باشد (حداقل 30 درجه) [21]. با توجه به انجام آزمایش‌های برجا شکست هیدرولیکی و آنالیزهای صورت

داد که، در حالتی که امتداد حفاری شمالی - جنوبی باشد حجم گوه‌ها بزرگ‌تر و لغزش آن‌ها به سمت داخل فضای زیرزمینی بوده و در شرایطی که جهت حفاری شرقی - غربی است، نظر به اینکه لغزش گوه‌ها تقریباً در همین راستاست، بلوک‌های تشکیل شده کوچک‌تر و فضای زیرزمینی در این جهت از پایداری مطلوب‌تری برخوردار است (شکل 5).

گرفته در موقعیت ساختگاه سد، مشخص شد که تنش‌های افقی بیشینه و کمینه با یکدیگر اختلاف چندانی نداشته و عامل مهم در تعیین موقعیت محور مغار در این پژوهش امتداد ناپیوستگی‌های غالب در منطقه است. بر این اساس با رسم رز دیاگرام مربوط به دسته‌درزه‌ها و لایه‌بندی‌ها دو امتداد مناسب برای حفاری، یکی شمالی - جنوبی و دیگری شرقی - غربی در نظر گرفته شد. بررسی پایداری گوه‌های ایجاد شده بر مبنای جهت لغزش گوه‌ها و شیب آن‌ها نشان

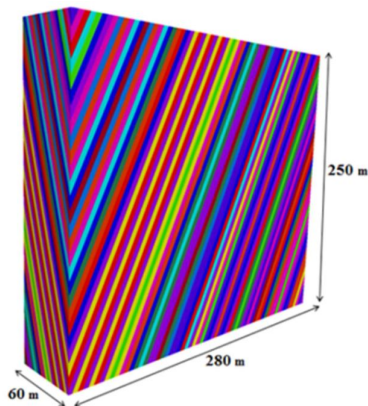


شکل 5: موقعیت حفاری و گوه‌های ایجاد شده در اطراف مغار اصلی

مستطیلی (بنچینگ) با ارتفاع 5 متر نیز در 8 مرحله حفر می‌شود و در نهایت قسمت دایره‌ای مغار ترانسفورماتور در 2 مرحله و قسمت مستطیلی این مغار برداشته می‌شود (شکل 7). پایین‌تر بودن تنش افقی و زیاد بودن روباره موجب افزایش ناپایداری سقف خواهد شد بنابراین تقسیم کردن سقف مغار در چند مرحله باعث پایداری بیشتر آن‌ها می‌شود.

5- مدلسازی عددی مغار نیروگاه با نرم‌افزار 3DEC

با توجه به وضعیت غالب سطوح لایه‌بندی و دسته‌درزه‌ها در ساختگاه سد بختیاری، مدلسازی عددی مغار با استفاده از روش المان مجزا انجام شد [6]. مدل پلاستیسیته موهر-کولمب به عنوان مدل ساختاری بلوک‌ها و مدل لغزش کولمب برای بررسی رفتار بین بلوک‌ها در نظر گرفته شده است. هندسه مغار نیروگاه نعل اسبی با سقف گنبدی شکل و مغار ترانسفورماتور نعل اسبی با سقف دایره‌ای شکل است که در عمق 280 تا 300 متری از سطح زمین واقع شده است. هندسه مدل ساخته شده به ابعاد 280 متر عرض، 250 متر ارتفاع و 60 متر طول در نظر گرفته شد و در ادامه ناپیوستگی‌ها شامل لایه‌بندی‌ها به آن اضافه شده است (شکل 6). روش حفر پیشنهادی برای مغارهای نیروگاه سد بختیاری به صورت پلکانی با استفاده از چالزنی و آتشباری است. ابتدا قسمت قوسی شکل (هدینگ) سقف مغار نیروگاه طی سه مرحله، قسمت



شکل 6: ابعاد مدل ساخته شده

ستون از حد الاستیک تجاوز می‌کنند و کمانش صورت نمی‌گیرد.

پارامتر C_c ، ضریب لاغری ستون در مرز بین حالت الاستیک و غیرالاستیک و با در نظر گرفتن تنش معادل نصف مقاومت فشاری تک‌محوره ستون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3)$$

که در این رابطه F_y مقاومت تسلیم ستون است. شرط لازم و کافی برای وقوع کمانش در ستون‌ها به شرح زیر است:

- 1- $C_c < \lambda$ ضریب لاغری ستون بزرگ‌تر از فاکتور C_c باشد.
- 2- $\sigma > \sigma_{cr}$ تنش ایجاد شده در ستون بزرگ‌تر از تنش اوپلری باشد.

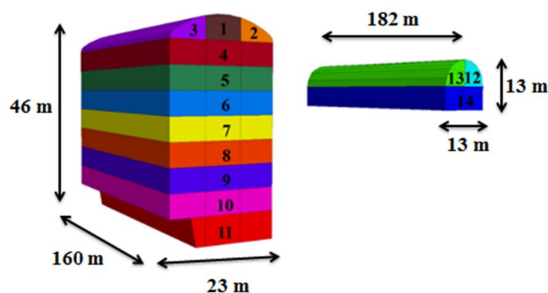
7- تعیین فاصله مناسب برای ستون سنگی بین مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور

در اثر حفاری فضاهای زیرزمینی تنش‌ها در اطراف حفاری‌ها تغییر کرده و باعث به وجود آمدن زون تأثیر پیرامون چنین فضاهایی می‌شود. زون تأثیر یا زون پلاستیک، بخصوص زمانی که تونل‌ها و مغارها در کنار یکدیگر قرار دارند پایداری استاتیکی و دینامیکی حفاریات زیرزمینی را کاهش می‌دهد. ستون سنگی در مقایسه با ساختارهای بتنی مقاومت فشاری بالایی دارد اما به دلیل ویژگی‌های شکننده مواد تشکیل دهنده آن مقاومت کششی و برشی کمتری تحمل می‌کند [22]. ضخامت ستون سنگی مناسب بین مغارها بر اساس دو فرض زیر برآورد شده است:

- 1- زون تأثیر (زون تأثیر تنش برشی و یا زون تأثیر تنش کششی) در اثر حفر مغار اصلی و مغار ترانسفورماتور نباید با یکدیگر تلافی داشته باشند.

2- ستون سنگی ایجاد شده بین دو مغار نباید به اندازه‌ای باریک باشد که باعث وقوع پدیده انفجار سنگ شود.

با توجه به قرار گرفتن مغارها در ناحیه $Sv4$ و $Sv5$ و با در نظر گرفتن فاصله آن‌ها (دیواره تا دیواره W) از 25 تا 100 متر بر اساس ضریبی از ارتفاع مغار بزرگ‌تر (H)، به بررسی زون تأثیر در اطراف مغارها در این دو ناحیه پرداخته شده است. با توجه به شکل مغارها و شیب زیاد



شکل 7: ترتیب و تعداد مراحل حفاری پیشنهادی مغارها

6- کمانش در ستون‌های سنگی

با توجه به قرار گرفتن مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور در کنار یکدیگر، کمتر شدن فاصله بین آن‌ها سبب لاغری شدن ستون سنگی می‌شود. از جمله مشکلاتی که ستون‌های لاغر را با خطر مواجه می‌کند پدیده کمانش است. در چنین ستون‌هایی با افزایش نیرو، ستون از حالت مستقیم خارج شده و دچار کمانش می‌شود. به این حد از نیرو، نیروی بحرانی یا نیروی اوپلری گفته می‌شود. به عبارت دیگر اگر نیروی وارد بر ستون از مقدار بحرانی کمتر باشد، ستون مستحکم باقی می‌ماند و اگر نیروی وارده بیشتر از مقدار بحرانی باشد ستون دچار کمانش می‌شود. در حالتی که ستون در ناحیه الاستیک دچار کمانش شود بار بحرانی و تنش بحرانی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

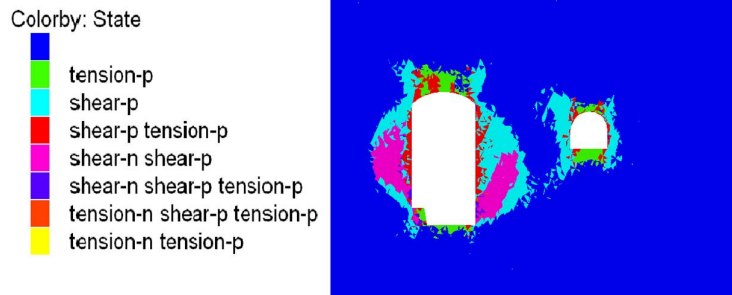
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

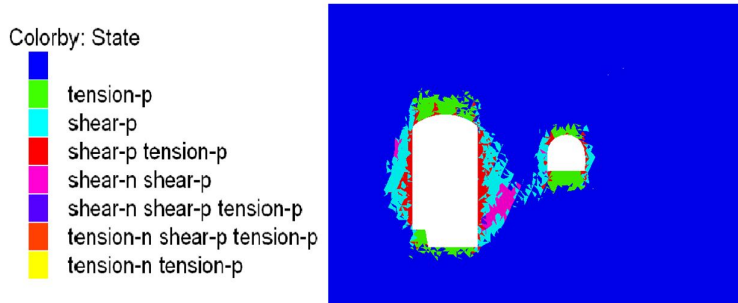
که در این رابطه E مدول الاستیک، λ ضریب لاغری ستون، L طول ستون، r شعاع ژیراسیون، I ممان اینرسی ستون، $Le=KL$ را طول مؤثر ستون گویند که عبارت است از فاصله نقطه عطف منحنی تغییر شکل ستون که بر حسب شرایط گیرداری دو سر ستون متفاوت است، K ضریب طول مؤثر ستون بوده و بر اساس شرایط تکیه‌گاهی محاسبه می‌شود. رابطه اوپلر تنها در محدوده الاستیک و برای ستون‌های لاغر و بلند معتبر است. در ستون‌ها با لاغری متوسط و کم، قبل از شروع کمانش، تنش‌ها در

کاهش فاصله مغارها افزایش و با دور شدن از یکدیگر کاهش می‌یابد. اندازه زون تأثیر در اطراف مغارها در جداول 6 و 7 نشان داده شده است.

لایه‌بندی، دیواره‌ها به سمت داخل فضای مغار تغییر شکل داده و شکست کششی همراه با لغزش در اطراف آن‌ها ایجاد می‌شود. با فاصله گرفتن از دیواره، مکانیزم غالب شکست از نوع برشی خواهد شد (شکل‌های 8 و 9). زون تأثیر با



شکل 8: زون تأثیر و ضخامت ستون سنگی ایجاد شده بین مغارها در ناحیه Sv4 در فاصله‌ی 33 متری



شکل 9: زون تأثیر و ضخامت ستون سنگی ایجاد شده بین مغارها در ناحیه Sv5 در فاصله‌ی 24 متری

جدول 6: اندازه زون تأثیر ایجاد شده اطراف مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور در زون Sv4

| زون تأثیر سقف مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر دیواره راست مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر دیواره چپ مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر پیرامون مغار ترانسفورماتور (m) |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| 8-10 | 18-21 | 13-17 | 5-7 |

جدول 7: اندازه زون تأثیر ایجاد شده اطراف مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور در ناحیه Sv5

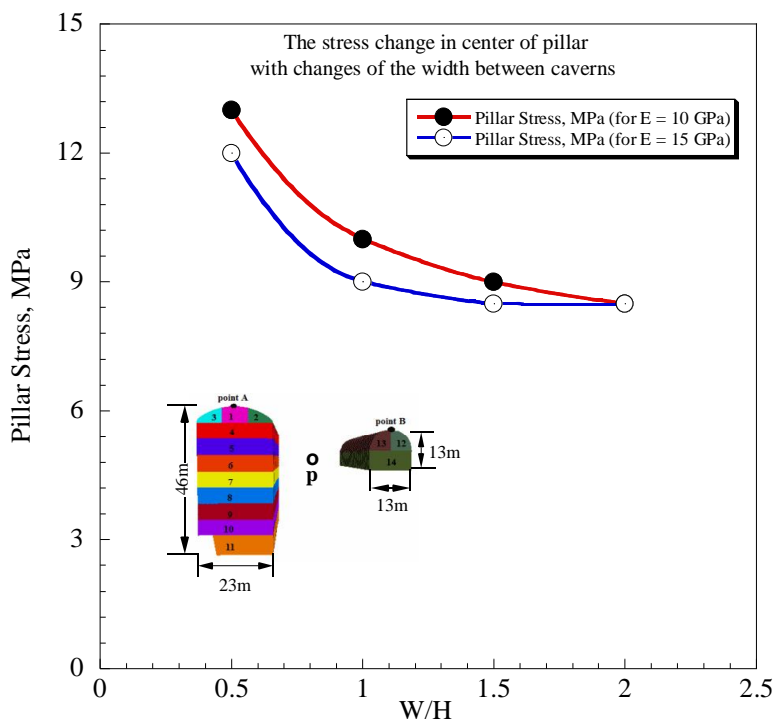
| زون تأثیر سقف مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر دیواره راست مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر دیواره چپ مغار نیروگاه (m) | زون تأثیر پیرامون مغار ترانسفورماتور (m) |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| 8-10 | 13-16 | 8-12 | 4-6 |

تحت تأثیر قرار می‌دهند [22].

در شکل 10 تغییرات تنش در مرکز ستون (نقطه p) بر اساس فاصله مغارها از یکدیگر نشان داده شده است. نمودار مربوطه نشان می‌دهد که اختلاف تنش‌ها از فاصله 25 تا 50 متری حدود 1 مگاپاسکال، از فاصله 50 تا 75 متری حدود 0/5 مگاپاسکال و پس از آن هر دو به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شوند. این بدان معنی است که مغارها

از جمله فاکتورهای مهم دیگری که در پایداری فضاهای زیرزمینی خواه در توده‌سنگ‌های ضعیف و خواه در توده‌سنگ‌های سخت همراه با درزه‌داری نقش اساسی ایفا می‌کند تنش‌های القایی به وجود آمده در اثر حفاری‌هاست [7]. در حالتی که فاصله بین مغارها کمتر از نصف قطر آن‌ها باشد، تنش‌های القایی ایجاد شده به دلیل اثرات متقابل چنین فضایی بر یکدیگر، ستون سنگی را بیشتر

مستقل از یکدیگر و تنش‌های القایی پیرامون مغارها به تنش‌های برجای زمین نزدیک خواهند شد.



شکل 10: تنش‌های القایی ایجاد شده در مرکز ستون (نقطه p) بر اساس تغییر فاصله بین مغارها

ستون سنگی دست نخورده بین آن‌ها ایجاد نخواهد شد. همین روند برای ناحیه Sv5 انجام شد که نهایتاً فاصله بیشتر از 24 متری به‌عنوان فاصله‌ی مناسب تعیین گردید (شکل 9).

جدول 8: تنش‌های اولیه محاسبه شده در مرکز ستون (نقطه p) بر اساس رابطه (2) و (3) برای ناحیه Sv5 و Sv4

| ناحیه Sv5 | | ناحیه Sv4 | |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| تنش بحرانی (MPa) | ضخامت ستون سنگی (m) | تنش بحرانی (MPa) | ضخامت ستون سنگی (m) |
| 27/8 | 2/5 | 30 | 4 |
| 18 | 2 | 25 | 3/5 |
| 10 | 1/5 | 18/8 | 3 |
| 4/5 | 1 | 12/9 | 2/5 |
| - | - | 8/3 | 2 |

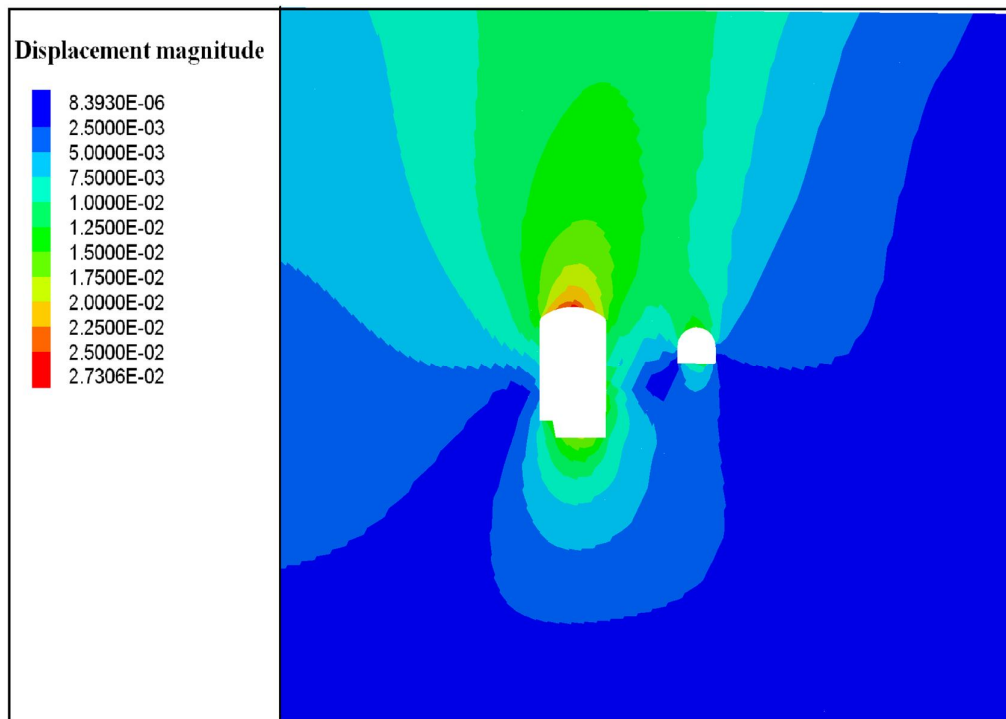
با توجه به ارتفاع زون تأثیر در اطراف مغار ترانسفورماتور (در ناحیه Sv4، 30 متر و در ناحیه Sv5، 25 متر، (شکل‌های 8 و 9)) و شرایط گیرداری ستون ($K=2.1$)، حداکثر ضخامتی که باعث لاغری ستون سنگی می‌شود را بر اساس رابطه (3) برای ناحیه Sv4، 4 متر و برای ناحیه Sv5، 2/5 متر در نظر گرفته شد. همچنین مقدار تنش بحرانی در هر ضخامت بر اساس رابطه (2) برای دو ناحیه نامبرده مورد بررسی قرار گرفت (جدول 8).

مدلسازی‌های انجام شده در ناحیه Sv4 نشان داد که فاصله مناسب برای تشکیل ضخامت ستون سنگی برای حالتی است که دو مغار در فاصله بیشتر از 30 متری قرار دارند (شکل 8). همچنین برای مغارهایی که فاصله‌ی کمتر از 30 متر دارند دو حالت رخ می‌دهد، الف) یا ضخامت ستون سنگی دست نخورده کمتر از 30 متر می‌شود که با توجه به جدول 8 و تنش القایی ایجاد شده در مرکز ستون (شکل 10)، پتانسیل انفجار سنگ ایجاد خواهد شد، ب) یا زون تأثیر در اطراف مغارها با یکدیگر همپوشانی دارند و

8- بررسی جابجایی‌های پیرامون مغار

ممکن است بیشتر از دیواره شود، و از طرف دیگر با توجه به شیب زیاد لایه‌بندی توده سنگ و ارتفاع زیاد دیواره مغار اصلی، لغزش به سمت داخل فضای مغار کاهش یافته و پتانسیل شکست کششی و برشی کمتر خواهد شد. شکل 11 کننتور جابجایی در پیرامون مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور در ناحیه Sv5 و شکل 12 تغییر شکل پیرامون مغارهای نیروگاه و ترانسفورماتور در ناحیه Sv4 را نشان می‌دهد.

یکی از پارامترهای کنترل کننده میزان جابجایی‌ها در اطراف مغار، ضریب تنش است. در شرایطی که اندازه تنش قائم بیشتر از تنش افقی باشد یا به عبارت دیگر ضریب تنش کوچک‌تر از واحد باشد معمولاً جابه‌جایی در سقف بیشتر از دیواره خواهد شد و بالعکس. بنابراین در ساختگاه سد بختیاری، به خاطر کمتر بودن اندازه‌ی تنش افقی نسبت به تنش قائم، ناپایداری و جابجایی در سقف مغارها

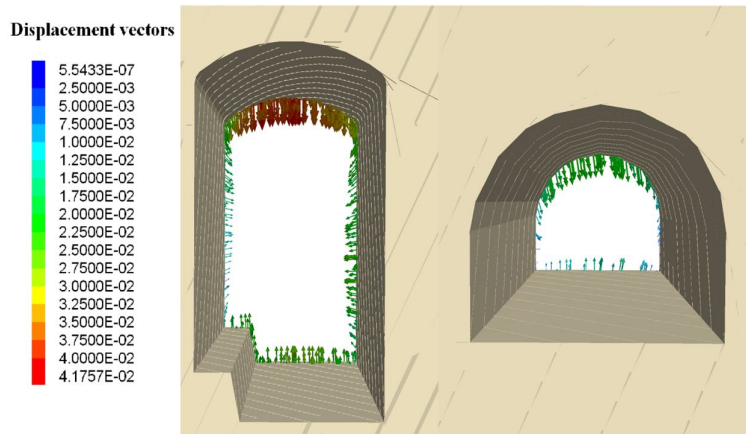


شکل 11: کننتور جابجایی پیرامون مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور در ناحیه Sv5

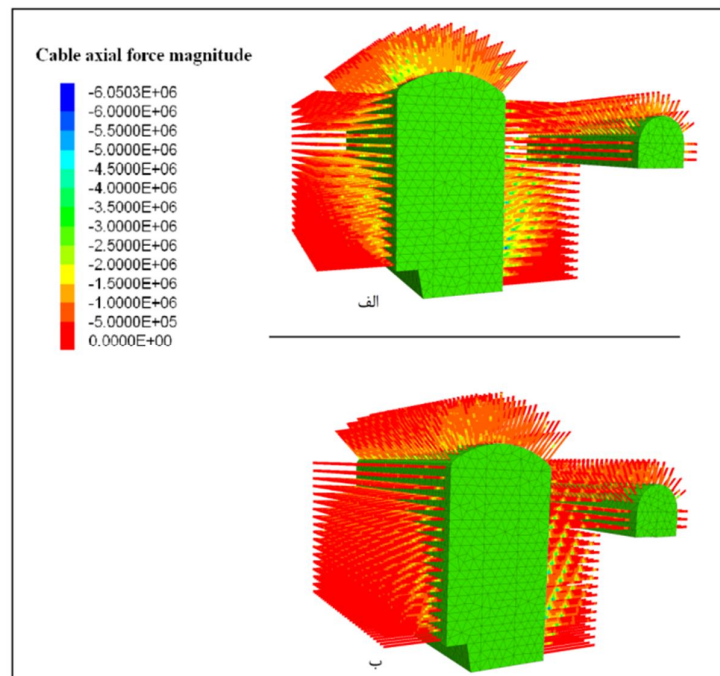
مدلسازی عددی اندازه زون تأثیر (زون پلاستیک) در سقف، دیواره سمت راست، دیواره سمت چپ مغار اصلی و مغار ترانسفورماتور تعیین شد. طول مناسب پیچ‌سنگ‌ها و ظرفیت بارپذیری آن‌ها با استفاده از نتایج حاصل از مدلسازی به دست آمد. به دلیل نیروی کششی بیشتر بر روی سیستم نگهداری اطراف مغار نیروگاه، از تاندون‌ها با ظرفیت بالا و در مغار ترانسفورماتور از پیچ‌سنگ‌ها استفاده شده است. در شکل 13 نیروی محوری وارد بر پیچ‌سنگ‌ها نشان داده شده است.

9- پیشنهاد سیستم نگهداری مغار نیروگاه و مغار ترانسفورماتور

پیچ‌سنگ‌ها از جمله سیستم‌های نگهداری معمول برای کنترل پایداری در فضاهای زیرزمینی است. در انتخاب سیستم نگهداری مغار نیروگاه و ترانسفورماتور در دو ناحیه Sv4 و Sv5 از پیچ‌سنگ‌ها با فاصله‌داری 2x2 متر استفاده شده است. روند اعمال پیچ‌سنگ‌ها مانند ترتیب حفاری مغارها است. طول پیچ‌سنگ‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که از زون تأثیر عبور کرده است. با استفاده از



شکل 12: تغییر شکل پیرامون مغارها در ناحیه Sv4



شکل 13: نیروی محوری اعمال شده بر پیچ‌سنگ‌ها. الف - ناحیه Sv4، ب - ناحیه Sv5

500 کیلو نیوتن و تاندون‌هایی با ظرفیت 1000 کیلو نیوتن پیشنهاد شده است. در ورودی مغارها که تنش‌ها به صورت ناگهانی آزاد می‌شوند نیروی محوری بیشتری بر پیچ‌سنگ‌ها وارد خواهد شد که باید سیستم نگهداری تقویت شود. جداول 9 و 10 طول پیچ‌سنگ‌ها و ظرفیت بارپذیری آن‌ها در اطراف مغار اصلی و مغار ترانسفورماتور برای دو ناحیه Sv4 و Sv5 را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 13 الف، در سقف و دیواره مغار نیروگاه و در سقف مغار ترانسفورماتور به ترتیب پیچ‌سنگ‌هایی با ظرفیت 1500 و 1000 کیلو نیوتن و در دیواره مغار ترانسفورماتور پیچ‌سنگ‌هایی با ظرفیت 500 کیلو نیوتن استفاده شد. در شکل 13 ب، در سقف و دیواره مغار اصلی تاندون‌هایی با ظرفیت 1000 کیلو نیوتن و در دیواره و سقف مغار ترانسفورماتور پیچ‌سنگ‌هایی با ظرفیت

جدول 9: مشخصات سیستم نگهداری برای مغار اصلی و مغار ترانسفورماتور برای ناحیه Sv4

| سیستم نگهداری | طول (m) | ظرفیت (KN) | مکان |
|---------------|---------|------------|------------------------------|
| تاندون | 10 | 1500 | سقف مغار نیروگاه |
| تاندون | 15 | 1500 | دیواره سمت چپ مغار نیروگاه |
| تاندون | 20 | 1500 | دیواره سمت راست مغار نیروگاه |
| تاندون | 6 | 1000 | سقف مغار ترانسفورماتور |
| پیچ‌سنگ | 6 | 500 | دیواره مغار ترانسفورماتور |

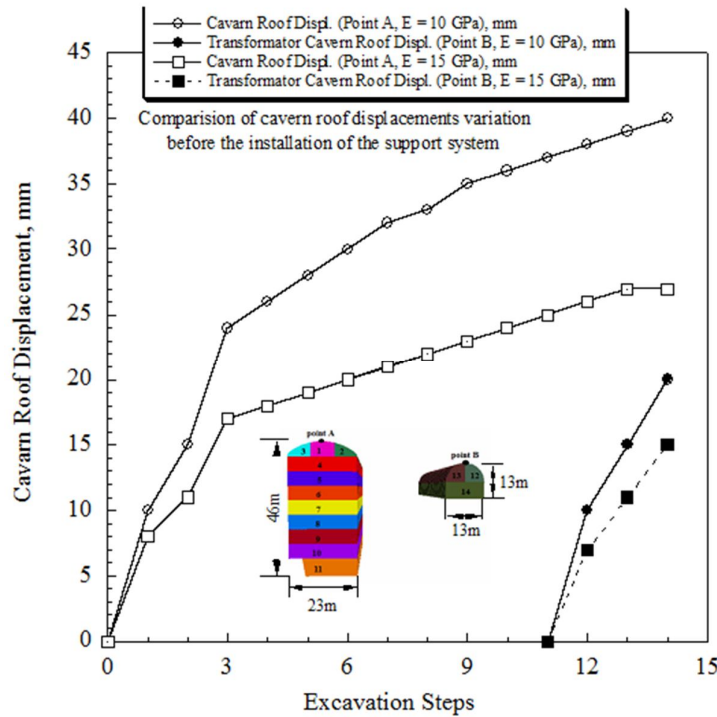
جدول 10: مشخصات سیستم نگهداری برای مغار اصلی و مغار ترانسفورماتور برای ناحیه Sv5

| سیستم نگهداری | طول (m) | ظرفیت (KN) | مکان |
|---------------|---------|------------|------------------------------|
| تاندون | 10 | 1000 | سقف مغار نیروگاه |
| تاندون | 12 | 1000 | دیواره سمت چپ مغار نیروگاه |
| تاندون | 15 | 1000 | دیواره سمت راست مغار نیروگاه |
| پیچ‌سنگ | 6 | 500 | سقف مغار ترانسفورماتور |
| پیچ‌سنگ | 6 | 500 | دیواره مغار ترانسفورماتور |

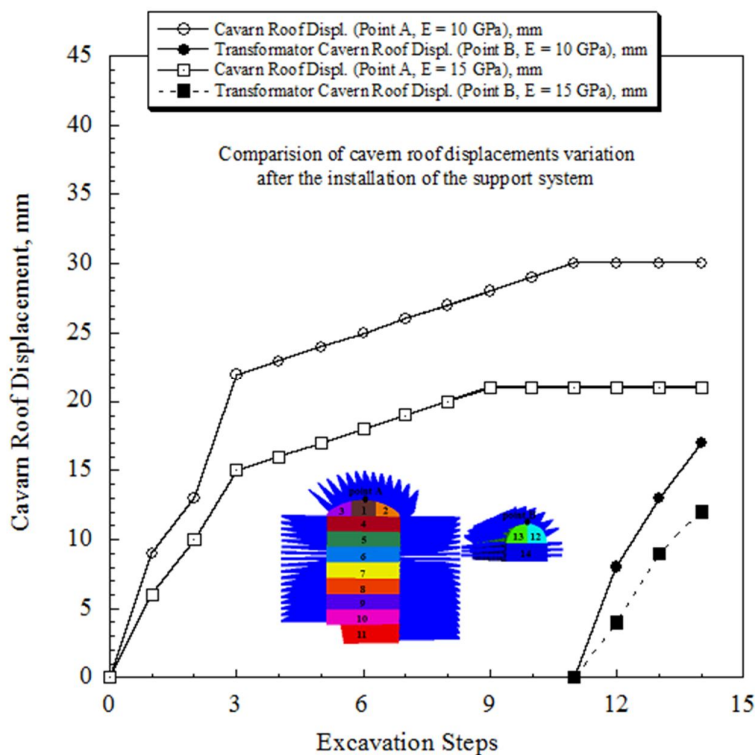
نیروگاه (point A) و سقف مغار ترانسفورماتور (point B) در دو ناحیه یاد شده قبل و بعد از اعمال سیستم نگهداری را نشان می‌دهد.

10- جابجایی‌ها در سقف مغار نیروگاه و ترانسفورماتور قبل و بعد از اعمال سیستم نگهداری

شکل‌های 14 و 15 مقایسه‌ی جابجایی در سقف مغار



شکل 14: مقایسه‌ی جابجایی در مغارها در ناحیه‌های Sv4 و Sv5 قبل از اعمال سیستم نگهداری



شکل 15: مقایسه‌ی جابجایی در مغارها در ناحیه‌های Sv4 و Sv5 بعد از اعمال سیستم نگهداری

موقعیت ناپیوستگی‌های غالب در محدوده نیروگاه دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی برای حفاری مغارها در نظر گرفته شد که با در نظر گرفتن شرایط تنش و تشکیل گوه‌های لغزش در اطراف مغار جهت شرقی-غربی به‌عنوان جهت مناسب برای حفر مغار انتخاب شد.

با حفر مغار نیروگاه در 11 مرحله و مغار ترانسفورماتور در 3 مرحله و با تغییر دادن فاصله دیواره تا دیواره مغارها از 25 متر تا 100 متر در دو ناحیه Sv4 و Sv5 با استفاده مدلسازی عددی و بر اساس زون تأثیر ایجاد شده در اطراف مغارها و روابط تحلیلی کمانش در ستون‌ها، برای ناحیه Sv4 فاصله 30 متر و برای ناحیه Sv5 فاصله 24 متر به‌عنوان فاصله مناسب تعیین شد.

میزان ناپایداری سقف مغارها به دلیل ارتفاع زیاد روباره و کمتر بودن تنش‌های افقی در منطقه بیشتر از دیواره شد. با استفاده از مدلسازی عددی و روش المان مجزا، سیستم نگهداری پیشنهاد شده برای مغارها بر مبنای شیب زیاد لایه‌بندی‌ها و مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، تاندون‌ها و پیچ‌سنگ‌ها با فاصله‌داری 2x2 متر انتخاب شده است. طول پیچ‌سنگ‌ها با توجه به زون تأثیر ایجاد شده در

پس از حفر فضاهای زیرزمینی و اعمال پیچ‌سنگ‌ها در سقف مغار ترانسفورماتور، جابجایی کاهش یافته و با شیب ملایمی به سمت پایدار شدن میل می‌کند و در سقف مغار اصلی به تعادل می‌رسد. پایداری مربوطه در ناحیه Sv4 در دوازدهمین مرحله حفاری و در ناحیه Sv5 به دلیل کیفیت بالای توده سنگ نسبت به ناحیه Sv4، در نهمین مرحله حفاری به وقوع می‌پیوندد. نرخ افزایش جابجایی در ناحیه Sv4 بیشتر از ناحیه Sv5 شده که این تغییرات ناشی از اختلاف مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ در این دو ناحیه بوده و نتیجه حاصل از این مقایسه می‌تواند حاکی از اهمیت تعیین این پارامتر و نقش تعیین‌کننده آن در انتخاب سیستم نگهداری برای فضاهای زیرزمینی در سنگ باشد.

11- بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه طرح نیروگاه زیرزمینی سد بختیاری، پس از مطالعات صحرایی و تعیین موقعیت ساختارهای تکتونیکی منطقه و تعیین خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ با تعیین

[13] Zhu, W.S., Li, Y., Li, S. h., Wang, S. h., Zhang, Q. (2011). Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (48), 199-209.

[14] Dasgupta, B., Sharma, M. K. V., Verman, A. (1999). Design of underground caverns for Tehri Hydropower Project India by numerical modeling. 9th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.

[15] Xia, Y., Peng, S., Gu, Z. (2007). Stability analysis of an underground power cavern in a bedded rock formation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (2), 161-165.

[16] BJVC, Bakhtiary Dam and HEPP. (2009). Updated Feasibility Report of Dam and Appurtenant Structures for Upstream Alternative (U2), Report No. 4673/4159 Rev. 0.

[17] BJVC, Bakhtiary Dam and HEPP. (2009). Geological Report, Report No. 4673/4038 Rev. 2.

[18] BJVC, Bakhtiary Dam and HEPP. (2009). Engineering Geology and Rock Mechanics Report, Report No. 4673/4049 Rev. 1.

[19] Su, D. W. H., & Hasenfus, G. J. (1995). Regional Horizontal Stress and Its Effect on Longwall Mining in the Northern Appalachian Coal Field. *Proceedings of the 14th International Conference. Ground Control in Mining*.

[20] Bhasin, R., Barton, N., & Loset, F. (1993). Engineering Geological Investigations and the Application of Rock Mass Classification Approach in the Construction of Norway's underground Olympic Stadium. *Int Jour Engineering Geology*, (35), 93-101.

[21] Thidemann, A. (1976). The influence of jointing on the overbreak in tunnelling. *Rock Blasting Technique*.

[22] Kim, W.B., Ha, T., Yang, H.S. (2012). An assessment of rock pillar considering excavation damaged rock zone. 12th Rock Mech Congress China. *Harmonising Rock Engineering and the Environment*.

اطراف مغار و میزان ظرفیت بارپذیری آن‌ها در جداول 9 و 10 برای دو ناحیه Sv4 و Sv5 پیشنهاد شده است. نیروی محوری اعمال شده به پیچ‌سنگ‌ها در ناحیه Sv5 به دلیل بالا بودن مدول تغییرشکل‌پذیری، کمتر از ناحیه Sv4 شد.

12- مراجع

[1] Hoek, E. (2001). *Practical Rock Engineering*. Rocscience software tools for rock and soil.

[2] Selmer-Olsen, R., & Broch, E. (1977). General design procedure for underground openings in Norway. *Storage in Excavated Caverns (Rockstore 77)*, (2), 219-226.

[3] Hoek, E. (2011). *Cavern Reinforcement and Lining Design*. prepared for RocNews.

[4] Zhu, W., Zhao, j. (2004). *Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks*. Elsevier Geo-Engineering Book Series.

[5] Hoek, E., & Moy, D. (1993). *Design of Large Powerhouse Caverns in Weak Rock*. *Comprehensive Rock Engineering*, (5), 85-110.

[6] Ghorbani, M., & Sharifzadeh, M. (2009). Long term stability assessment of Siah Bisheh powerhouse cavern based on displacement back analysis method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (24), 574-583.

[7] Lu, M., Grø, E., Holmøy, K.H., Trinh, N.Q & Larsen, T.E. (2010). Tunnel stability and in-situ rock stress. 5th conference of Rock Stress and Earthquakes.

[8] Zhu, W. S., Li, X. J., Zhang, Q. B., Zheng, W. H., Xin, X. L., Sun, A. H., Li, S. C. (2010). A study on sidewall displacement prediction and stability evaluations for large underground power station caverns. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (47), 1055-1062.

[9] Zhu, W. S., Sui, B., Li, X. J., Li, S. C., Wang, W. T. (2008). A methodology for studying the high wall displacement of large scale underground cavern complexes and its applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (23), 651-664.

[10] Jiang, Q., & Feng, X. (2011). *Intelligent Stability Design of Large Underground Hydraulic Caverns*, *Chinese Method and Practice*, (4), 1542-1562.

[11] Zhao, B. Y., & Ma, Z. Y. (2009). Influence of cavern spacing on the stability of large cavern groups in a hydraulic power station. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (46), 506-513.

[12] Zhang, Y., Xiao, M., Chen, J. (2010). A new methodology for block identification and its application in a large scale underground cavern complex. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (25), 168-180.

Stability Analysis of Powerhouse Caverns of Bakhtiary Dam Using 3DEC Software

B. Dehghani¹, L. Faramarzi^{2*}, M. Sanei³

1- PhD. Student of Mining, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

3- MSc. of Rock Mechanics, Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

* Corresponding Author: lfaramarzi@cc.iut.ac.ir

(Received: March 2015, Accepted: June 2015)

Abstract

Today, large underground spaces for multiple strategic projects including hydroelectric power plants, storage of oil and gas, nuclear waste disposal, etc. are important. Stability analysis is of great importance due to the large dimensions of these spaces. In this paper, at first according to the discontinuities orientation and stress conditions of the region, appropriate direction for excavations is selected. The rock mass strength properties including the shear strength of discontinuous rock mass and the modulus of deformation using in situ tests was determined. The numerical modeling results have been summarized. Stress conditions in the study area were determined using a hydraulic fracture tests. In the next step, Using analytical relations and numerical method (Discrete Element Method, 3DEC); as well as, with regard to occurring rock burst phenomenon between the two caverns, and changing of distance between these caverns, the proper optimum distance is determined. Finally using the result of numerical modeling and based on the plastic zone, a suitable support system (consists of length of tendons and rock bolts at different parts of caverns and axial stress applied to those) has been suggested.

Keywords

Discontinuities orientation, deformation modulus, in situ tests, hydraulic fracturing test, rock pillar distance