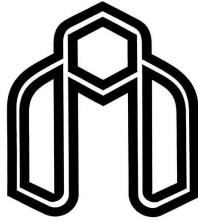


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی پتروشیمی  
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه استخراج معدن

ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از

مدلسازی عددی

دانشجو: امین میخک بیرانوند

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر فرهنگ سرشکی

اساتید مشاور:

مهندس ابوالفضل مهین راد

مهندس فرنوش باسلیقه

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آذر ۱۳۸۸

ب



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

### فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر ( عج ) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای ..... به نام خانم ..... رشته ..... گرایش ..... تحت عنوان ..... که در تاریخ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول ( با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۷/۲۵ ) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۲- بسیار خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۸ )

۴- قابل قبول ( ۱۳/۹۹ - ۱۲ )

۳- خوب ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی  | عضو هیأت داوران (a)             |
|-------|------------|---------------------|---------------------------------|
|       |            | دکتر امیرحسین جعفری | ۱- استاد راهنما                 |
|       |            |                     | ۲- استاد مشاور                  |
|       |            | دکتر امیرحسین جعفری | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
|       |            | دکتر علی محمدی      | ۴- استاد ممتحن                  |
|       |            | دکتر علی محمدی      | ۵- استاد ممتحن                  |

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم به:

دو گوهر گرانبهای زندگی‌ام

مادر مهربان و از خود گذشته‌ام

پدر فداکار و زحمت‌کشم



## تشکر و قدردانی:

پس از حمد و سپاس خداوند حکیم که توفیق کسب علم به من عطا فرموده، وظیفه خود می دانم که از کلیه کسانی که نوشتن این تحقیق ثمره ی کمک، راهنمایی، همفکری و پشتیبانی آنان است، تشکر و قدردانی نمایم به خصوص

- ✓ از آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که راهنمایی این تحقیق را بر عهده داشتند و این تحقیق بدون کمک ها و همفکری های ایشان به ثمر نمی رسید.
- ✓ از آقای دکتر فرهنگ سرشکی که راهنمایی این تحقیق را بر عهده داشتند، از همه ی کمک ها و دلگرمی های که به بنده دادند.
- ✓ از آقای مهندس ابوالفضل مهین راد مشاور این تحقیق به خاطر تمامی کمک ها، همفکری ها و اطلاعاتی که برای انجام تحقیق در اختیار این جانب قرار دادند.
- ✓ از آقای مهندس فرنوش باسلیقه که مشاوره ی این تحقیق را بر عهده داشتند.

## تعهد نامه

اینجانب امین میخک بیرانوند دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از مدل سازی عددی تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Sharood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمده نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

امروزه مصرف انرژی روز به روز در حال افزایش است، با توجه به اینکه از یک سو انرژی الکتریکی تولید شده به سادگی قابل ذخیره سازی نیست و از سوی دیگر تقاضای مصرف برق در ساعات مختلف شبانه روز متغیر است، احداث نیروگاه های تلمبه ذخیره ای برای جلوگیری از ایجاد نوسان در مصرف انرژی برق از اهمیت بالایی برخوردار است. نیروگاه تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه در ۱۲۵ کیلومتری تهران جانمایی شده است. یکی از اجزاء اصلی نیروگاه ها، مغارها هستند. به دلیل ابعاد بزرگ این فضاهای زیرزمینی، حفاری آنها به صورت مرحله ای صورت می گیرد. یکی از دغدغه های طراحان این فضاها ترتیب حفاری مغارها می باشد. یکی از روش های تعیین ترتیب حفاری مغارها، روش های عددی هستند. هدف از این تحقیق انتخاب ترتیب حفاری مناسب مغار نیروگاه سیاه بیشه با استفاده از نرم افزار 3DEC است. در راستای انجام این تحقیق در گام نخست تاثیر متقابل مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر بر روی یکدیگر با استفاده از نرم افزار بررسی شده است. نتیجه این بررسی نشان می دهد که حفاری این دو مغار بر روی یکدیگر بی تاثیر است، لذا در گام های بعدی فقط ترتیب حفاری مغار نیروگاه به همراه گالری های متصل به آن مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس منطق حاکم بر حفر مغار و برای کم کردن زمان اجرای نرم افزار 3DEC، مغار نیروگاه به چهار قسمت تقسیم شده و ترتیب حفاری هر یک از قسمت ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای انتخاب ترتیب حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه ۱۹ مدل ساخته شده و انتخاب ترتیب حفر مناسب بر اساس جابجایی نسبی در دیواره مغار نیروگاه صورت گرفته است. برای تحلیل مدل ها، ابتدا ترتیب حفر مناسب برای قسمت اول از گروه های چهار قسمتی انتخاب شده و پس از حفر قسمت مذکور، قسمت بعدی مورد بررسی قرار می گیرد. این روند تا حفاری کل مغار ادامه پیدا می کند. در پایان برای اطمینان از صحت مدل های ساخته شده نتایج حاصل از کاربرد نرم افزار با نتایج حاصل از تفسیر ابزار دقیق مطابقت داده شده است که نشان دهنده اختلاف جزئی و قابل چشم پوشی هستند.

**کلمات کلیدی:** مغار، نیروگاه سد سیاه بیشه، انتخاب ترتیب حفاری مناسب، نرم افزار 3DEC.

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- بررسی تاثیر متقابل حفاری مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر سد سیاه بیشه بر روی یکدیگر با استفاده از نرم افزار 3DEC، ارائه به دومین همایش ملی سدسازی (پذیرش مقاله)، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان، اسفند ۱۳۸۸.
- ۲- تحلیل پایداری گوه های تشکیل شده در اطراف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با استفاده از نرم افزار UNWEDGE، ارائه به دومین همایش ملی سدسازی (پذیرش مقاله)، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان، اسفند ۱۳۸۸.

## فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- کلیات ..... ۲
- ۱-۲- مروری بر طرح سیاه بیشه ..... ۳
- ۱-۳- ضرورت احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه ..... ۴
- ۱-۴- اهداف تحقیق ..... ۶
- ۱-۵- روش تحقیق ..... ۷

## فصل دوم: مروری بر مغارهای احداث شده و چگونگی مدلسازی و تحلیل عددی فضاهای

## زیرزمینی بزرگ مقیاس

- ۲-۱- مقدمه ..... ۱۰
- ۲-۲- بررسی تحلیل مغارهای احداث شده در جهان ..... ۱۰
- ۲-۲-۱- مغار نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، ریوگراند در آرژانتین ..... ۱۰
- ۲-۲-۲- مغار نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، خیرتان در تایلند ..... ۱۱
- ۲-۲-۳- مغار نیروگاه برق‌آبی، ایرتان در چین ..... ۱۲
- ۲-۲-۴- مغارهای نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، مینگتان در تایوان ..... ۱۲
- ۲-۲-۵- مغارهای نیروگاه برق‌آبی، مسجد سلیمان در ایران ..... ۱۳
- ۲-۲-۶- مغارهای زیرزمینی ذخیره نفت کره جنوبی ..... ۱۵
- ۲-۲-۷- جمع‌بندی ..... ۱۵
- ۲-۳- مروری بر نتایج مدلسازی سه‌بعدی در پروژه‌های زیرزمینی ..... ۱۶
- ۲-۳-۱- پروژه نیروگاه برق‌آبی مسجد سلیمان در ایران ..... ۱۶
- ۲-۳-۲- پروژه نیروگاه برق‌آبی کونیا هند ..... ۱۹

|                                                                                     |                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۲۲.....                                                                             | ۳-۳-۲- نیروگاه سربسیلام هند                                                               |
| ۲۳.....                                                                             | ۴-۳-۲- پروژه نیروگاه تیستا-وی هند                                                         |
| ۲۶.....                                                                             | ۵-۳-۲- بررسی پایداری مخزن دفن پسماند اتمی و چاه‌های دسترسی در سوئد                        |
| ۴-۲- مثال‌هایی در زمینه بهینه‌سازی ترتیب حفر مغارهای نیروگاهی با استفاده از روش‌های |                                                                                           |
| ۲۸.....                                                                             | عددی                                                                                      |
| ۲۸.....                                                                             | ۱-۴-۲- بهینه‌سازی ترتیب حفر مغارهای سد کارون ۳                                            |
| ۲-۴-۲- بررسی اثر مراحل حفاری مغار توسعه بر پایداری فضاهای زیرزمینی مجاور در سد      |                                                                                           |
| ۳۱.....                                                                             | مسجد سلیمان                                                                               |
| ۳۲.....                                                                             | ۵-۲- نتیجه‌گیری به‌منظور روش مدلسازی در پروژه نیروگاه سیاه بیشه                           |
|                                                                                     | <b>فصل سوم: مشخصات ژئومکانیکی ساختگاه مغارها و گالری‌های ارتباطی نیروگاه سد سیاه بیشه</b> |
| ۳۵.....                                                                             | ۱-۳- مقدمه                                                                                |
| ۳۶.....                                                                             | ۲-۳- معرفی محل قرار گیری سد و نیروگاه سیاه بیشه                                           |
| ۳۷.....                                                                             | ۳-۳- مشخصات سد و حفاریات مورد نیاز                                                        |
| ۴۰.....                                                                             | ۴-۳- زمین شناسی عمومی محدوده مغارها و گالری‌های ارتباطی                                   |
| ۴۲.....                                                                             | ۵-۳- سنگ‌شناسی منطقه                                                                      |
| ۴۴.....                                                                             | ۶-۳- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده سازه‌های زیرزمینی                           |
| ۴۵.....                                                                             | ۳-۶-۱- نتایج آزمایشات آزمایشگاهی و برجا                                                   |
| ۴۷.....                                                                             | ۳-۷- مشخصات ناپیوستگی‌ها                                                                  |
| ۵۲.....                                                                             | ۳-۸- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ                                                            |

## فصل چهارم: انتخاب ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با کاربرد روش‌های

## عددی

|         |                                                                                       |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ۵۶..... | ۴-۱- مدلسازی عددی .....                                                               |
| ۵۶..... | ۴-۱-۱- انتخاب مناسب‌ترین روش عددی .....                                               |
| ۵۷..... | ۴-۱-۲- مدلسازی دوبعدی و سه‌بعدی .....                                                 |
| ۵۷..... | ۴-۱-۳- نرم‌افزار 3DEC .....                                                           |
| ۵۸..... | ۴-۲- مدلسازی عددی مغار سیاه بیشه .....                                                |
| ۵۹..... | ۴-۲-۱- هندسه مدل .....                                                                |
| ۵۹..... | ۴-۲-۲- تشریح مدل .....                                                                |
| ۶۰..... | ۴-۲-۳- ابعاد حفريات مدل .....                                                         |
| ۶۲..... | ۴-۲-۴- هندسه و خصوصیات درزه‌ها و توده‌سنگ در مدل 3DEC .....                           |
| ۶۳..... | ۴-۲-۵- شرایط مرزی و اولیه مدل .....                                                   |
| ۶۵..... | ۴-۳- مراحل مدلسازی .....                                                              |
| ۶۶..... | ۴-۴- اجرای مدل تا رسیدن به تعادل .....                                                |
| ۶۷..... | ۴-۵- مقطع بررسی شده در مدل .....                                                      |
| ۶۷..... | ۴-۶- بررسی تاثیر حفر مغار نیروگاه بر جابجایی و شکستگی‌های اطراف مغار ترانسفورمر ..... |
| ۷۰..... | ۴-۷- سیستم نگهداری .....                                                              |
| ۷۰..... | ۴-۷-۱- شبیه‌سازی سیستم نگهداری .....                                                  |
| ۷۰..... | ۴-۷-۲- خصوصیات نگهداری نصب شده .....                                                  |
| ۷۲..... | ۴-۸- انتخاب ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                           |
| ۷۶..... | ۴-۸-۱- نتایج تعادل مدل پس از حفاری .....                                              |

|                                    |                                                                   |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ۷۶.....                            | ۲-۸-۴- معرفی ترتیب‌های مختلف حفاری برای مغار نیروگاه سد سیاه بیشه |
| ۷۷...۱-۲-۸-۴                       | انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۱ (تاج مغار نیروگاه)  |
| ۸۱.....۲-۲-۸-۴                     | انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲                     |
| ۸۳.....۳-۲-۸-۴                     | انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۳                     |
| ۸۵.....۴-۲-۸-۴                     | انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۴                     |
| ۸۸.....                            | ۹-۴- اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده                                |
| <b>فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات</b> |                                                                   |
| ۹۵.....                            | ۱-۶- نتایج                                                        |
| ۹۸.....                            | ۲-۶- پیشنهادات                                                    |
| ۱۰۰.....                           | منابع و مأخذ                                                      |



- شکل ۱-۱- موقعیت قرارگیری سازه‌های زیرزمینی و سدهای طرح سیاه بیشه ..... ۴
- شکل ۱-۲- نمودار انرژی مصرفی و تولیدی در سیکل کاری نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ژاپن ..... ۵
- شکل ۱-۳- شکل شماتیک مسیر آب در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه ..... ۶
- شکل ۱-۲- مقطع زمین شناسی و مغارهای نیروگاه ایرتان چین ..... ۱۲
- شکل ۲-۲- راستای حفريات زیرزمینی در مقایسه با راستای صفحه خاکستری مشخص کننده شیب و امتداد گسل‌ها است ..... ۱۳
- شکل ۳-۲- طرح شماتیکی از مغارهای نیروگاه زیرزمینی مسجد سلیمان ..... ۱۴
- شکل ۴-۲- مقطعی از توپوگرافی منطقه به همراه محل مغارها و تست های برجا تنش در پروژه‌ی مغارهای زیرزمینی نفت کره جنوبی ..... ۱۵
- شکل ۵-۲- مدل‌های ساخته شده در پروژه مغار نیروگاه مسجد سلیمان الف) با استفاده از نرم‌افزار Quasi-3D ب) استفاده از نرم‌افزار Flac2D ..... ۱۸
- شکل ۶-۲- فضاهای موجود در پروژه کونیا ..... ۲۰
- شکل ۷-۲- مدل سه بعدی حفريات پروژه سريسایلام ..... ۲۳
- شکل ۸-۲- الف) هندسه مدل ایجاد شده ب) حفريات مدل شده در پروژه تيستا-وی ..... ۲۴
- شکل ۹-۲- الف) تونل اصلی و چاه‌های ته‌نشست پسماند مدلسازی شده در 3DEC ب) محدوده مدلسازی شده به همراه درزه‌ها و محورهای مختصات ..... ۲۷
- شکل ۱۰-۲- مراحل حفاری مدل اول ..... ۳۱
- شکل ۱-۳- محل قرارگیری و راه‌های دسترسی سد و نیروگاه سیاه بیشه ..... ۳۶
- شکل ۲-۳- پلان مجموعه حفريات نیروگاه سد سیاه بیشه ..... ۳۸
- شکل ۳-۳- برش عرضی از جانمایی مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر و مقاطع مختلف گالری‌های ارتباطی نیروگاه سیاه بیشه ..... ۳۹
- شکل ۴-۳- نقشه زمین شناسی منطقه احداث سد سیاه بیشه و حفريات زیرزمینی آن ..... ۴۱
- شکل ۵-۳- مقطع شماتیک زمین شناسی محدوده قرارگیری مغارها و گالری‌های ارتباطی ..... ۴۲

- شکل ۳-۶- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ی ۱ محدوده قرارگیری مغارها ..... ۴۳
- شکل ۳-۷- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ی ۲ محدوده قرارگیری مغارها ..... ۴۳
- شکل ۳-۸- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ی ۵ محدوده قرارگیری مغارها ..... ۴۴
- شکل ۳-۹- بخشی از نقشه های برداشت های در حین پیشروی سقف مغارها ..... ۵۱
- شکل ۴-۱- نمایی از مرزهای خارجی مدل در محیط نرم افزار 3DEC ..... ۶۰
- شکل ۴-۲- مغارهای مدل شده در محیط نرم افزار 3DEC ..... ۶۱
- شکل ۴-۳- مش بندی بخش داخلی مدل نیروگاه سد سیاه بیشه در محیط نرم افزار 3DEC ..... ۶۲
- شکل ۴-۴- شمایی از محل قرارگیری حفريات، ابعاد مرزها و فاصله مرز لحاظ شده تا سطح زمین ..... ۶۵
- شکل ۴-۵- نمودار نیروهای نامتعادل در حالت اجرا اولیه ..... ۶۶
- شکل ۴-۶- جانمایی مغار نیروگاه و ترانسفورماتور به همراه درزه و شکاف های بردرگیرنده آنها در مقطع شماره ی ۲ ..... ۶۸
- شکل ۴-۷- بردارهای جابجایی در برش عرضی در فاصله ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه ..... ۶۹
- شکل ۴-۸- نواحی پلاستیک و نواحی شکسته شده در برش عرضی در فاصله ی ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه ..... ۶۹
- شکل ۴-۹- مراحل اصلی حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه به منظور بهینه سازی ترتیب حفر این مغار ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۰- مناطق حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۱- تغییرات ماکزیمم نیروی نامتعادل در مدل ساخته شده طی پروسه حفاری مرحله ای ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۲- موقعیت نقاط در نظر گرفته شده برای محاسبه جابجایی نسبی در مغار نیروگاه ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۳- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه (مدل حفاری شده شماره ی ۱) ..... ۷۹

- شکل ۴-۱۴- کنتورهای جابجایی در راستای X پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه  
(مدل حفاری شده شماره ۱) ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۵- کنتورهای جابجایی در راستای Z پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه  
(مدل حفاری شده شماره ۱) ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۶- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۲ مغار نیروگاه سد  
سیاه بیشه ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۷- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۲ و ۳ مغار نیروگاه سد  
سیاه بیشه ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۸- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری کامل مغار نیروگاه سد  
سیاه بیشه ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۹- ترتیب بهینه بدست آمده از نرم افزار 3DEC برای حفاری مغار نیروگاه سد  
سیاه بیشه ..... ۸۸
- شکل ۴-۲۰- مقایسه‌ای بین ترتیب حفر اجرا شده در مغار نیروگاه و ترتیب مناسب حفاری بدست  
آمده از نرم‌افزار 3DEC در طرح سیاه بیشه ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۱- موقعیت نقطه شاهد در سقف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه برای اعتبار سنجی مدل‌های  
ساخته شده در محیط نرم افزار 3DEC ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۲- نتایج ابزار دقیق در مورد جابجایی برای نقطه شاهد در سقف مغار ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۳- نتایج حاصل از 3DEC در مورد جابجایی نقطه شاهد در سقف مغار ..... ۹۳

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۱-۲- خصوصیات مغارهای مشابه با مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                                                                  | ۱۶ |
| جدول ۲-۲- مقادیر جابجایی‌ها در سقف ، کمر بالا و کمر پایین مغار نیروگاه مسجد سلیمان بین نتایج حاصل از نرم‌افزارها و ابزار دقیق ..... | ۱۸ |
| جدول ۳-۲- مشخصات هندسی فضاهای زیرزمینی کونیا.....                                                                                   | ۲۰ |
| جدول ۴-۲- مقایسه تغییر شکل‌های سقف و دیواره در مدل‌های ۲ و ۴ در پروژه تیسنا-وی .....                                                | ۲۶ |
| جدول ۵-۲- ابعاد مغارهای نیروگاه، ترانسفورمر و گالری شیرها .....                                                                     | ۲۹ |
| جدول ۶-۲- خواص ژئومکانیکی مصالح سنگ در اطراف مغارهای کارون ۳ .....                                                                  | ۳۰ |
| جدول ۷-۲- ناپیوستگی‌ها و سیستم درزه و ترک در محل نیروگاه کارون ۳.....                                                               | ۳۰ |
| جدول ۸-۲- خواص ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها در پروژه‌ی کارون ۳ .....                                                                     | ۳۰ |
| جدول ۱-۳- محدوده مقاطع زمین شناسی در طول مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                                                            | ۴۲ |
| جدول ۲-۳- خصوصیات سنگ بکر دربرگیرنده مغارها و گالری‌های ارتباطی حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی .....                                   | ۴۶ |
| جدول ۳-۳- نتایج آزمایش برجا جک تخت .....                                                                                            | ۴۶ |
| جدول ۴-۳- خواص توده‌سنگ در محدوده فضای زیرزمینی نیروگاه سد سیاه بیشه .....                                                          | ۴۸ |
| جدول ۵-۳- ویژگی عمده‌ترین ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر .....                                          | ۴۹ |
| جدول ۶-۳- مقادیر خصوصیات ناپیوستگی‌های مدلسازی .....                                                                                | ۵۲ |
| جدول ۷-۳- طبقه‌بندی توده‌سنگ محدوده حفریات مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                                                          | ۵۴ |
| جدول ۱-۴- ابعاد حفریات موجود در مدل ساخته شده در نرم‌افزار 3DEC .....                                                               | ۶۱ |
| جدول ۲-۴- موقعیت مقاطع پایش در طول مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                                                                  | ۶۷ |
| جدول ۳-۴- مشخصات هندسی نگهداری مجموعه حفریات زیرزمینی مغار نیروگاه سیاه بیشه .....                                                  | ۷۱ |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۴-۴- خصوصیات پیچ‌سنگ‌های تزریقی .....                                        | ۷۲ |
| جدول ۴-۵- خصوصیات بتن‌پاشی استفاده شده در مغار نیروگاه و گالری‌های ارتباطی .....  | ۷۲ |
| جدول ۴-۶- دلایل انتخاب مناطق مختلف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه .....                | ۷۵ |
| جدول ۴-۷- حالات مختلف حفاری تاج مغار .....                                        | ۷۸ |
| جدول ۴-۸- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ .....                          | ۸۲ |
| جدول ۴-۹- ترتیب‌های حفاری رد شده در مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ .....                  | ۸۲ |
| جدول ۴-۱۰- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۳ .....                         | ۸۴ |
| جدول ۴-۱۱- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۴ .....                         | ۸۶ |
| جدول ۴-۱۲- نتایج خروجی‌های نرم افزار برای جابجایی در نقطه شاهد به صورت عددی ..... | ۹۲ |

مقدمه

## ۱-۱- کلیات

فضاهای زیرزمینی، از بشر پارینه سنگی تا انسان معاصر به عنوان یک محل امن برای استفاده‌های مختلف از جمله محل زندگی، انبار مواد غذایی، کارهای نظامی و غیره مورد توجه بوده است. حفر فضاهای زیرزمینی از دیر باز بنا به دلایل مختلف اعم از احداث نیروگاه‌های آبی و استخراج معادن مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک و معدن بوده است. در حال حاضر در اکثر کشورهای جهان فضاهای بزرگ زیرزمینی زیادی وجود دارد که با کاربری‌های بسیار متنوعی در حال بهره‌برداری هستند. استفاده از این فضاها با توجه به نیازهای جدید جامعه بشری روبه گسترش است. از فضاهای زیرزمینی بطور فزاینده‌ای برای ذخیره مواد، عملیات صنعتی، تولید نیرو، امور دفاعی، معدنکاری و بسیاری از اهداف دیگر استفاده می‌شود. استفاده از فضاهای زیرزمینی هر روزه گسترش بیشتری پیدا می‌کند (Jalali et al, 2009).

یکی از کاربری‌های نوین فضاهای زیرزمینی بزرگ، استفاده به عنوان سازه پدافند غیرعامل می‌باشد. یکی از اساسی‌ترین اصول مبحث پدافند غیرعامل، ایجاد سازه‌های امن می‌باشد. از مکان‌های مختلفی از جمله تونل‌های شهری، بیمارستان‌های زیرزمینی، عوارض طبیعی و معادن می‌توان به عنوان سازه‌های امن برای پدافند غیرعامل استفاده کرد. فضاهای حفر شده در معادن زیرزمینی نمک یکی از مکان‌های مناسب به عنوان سازه‌های پدافند غیرعامل می‌باشند (جلالی و همکاران، خرداد ۱۳۸۸).

فضاهای بزرگ زیرزمینی که مساحتی بیشتر از ۱۲۰ متر مربع را اشغال کرده باشند مغار نامیده می‌شود. امروزه با توجه به کاهش فضا در شهرها و نبود زمین کافی فضاهای زیرزمینی به خصوص مغارها به عنوان سازه جایگزین یک گزینه مناسب است. عوامل زمین شناختی و پارامترهای رفتاری سنگ نقش مهمی در مطالعات و اجرای پروژه‌های زیرزمینی دارد. در مورد حفاری آنها با توجه به موقعیت ورودی‌های آنها از روش‌های مختلف برای حفاری آنها استفاده می‌کنند (Jalali et al, 2009). در ادامه به بررسی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه می‌پردازیم.

## ۱-۲- مروری بر طرح سیاه بیشه

طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد سیاه بیشه با ظرفیت تولید ۱۰۴۰ مگا وات برق در استان مازندران در ۱۲۵ کیلومتری تهران و بر روی رودخانه چالوس جانمایی شده است. محل ساختگاه در نزدیکی روستای سیاه بیشه است، لذا طرح به همین نام خوانده می‌شود. اجزاء تشکیل دهنده این طرح عبارتند از ۲ مخزن مشتمل بر مخزن بالا دست (واقع در تراز ۲۴۱۰ متری از سطح دریا) و مخزن پایین دست (واقع در تراز ۱۹۱۱ متری از سطح دریا) که هر کدام در کنار یک سد سنگریزه‌ای با روکش بتنی (CFRD)<sup>۱</sup> و یک سر ریز بتنی واقع می‌باشد. (شرکت مشاوران، ۱۳۸۴).

سازه‌های زیرزمینی نیز از دیگر اجزای طرح بوده که مخزن بالادست را از طریق دو مسیر مجزا به مغار نیروگاه و مخزن پایین دست متصل می‌نماید. هر یک از این آبراهه‌ها شامل تونل‌های آبربر با قطر ۵/۷ متر و طول ۲ کیلومتر، مخزن فشار شکن با قطر ۲۰ متر و عمق ۲۳ متر، چاه‌های تحت فشار با قطر ۵ متر و طول ۷۶۰ متر، تونل‌های آبربر مغار نیروگاه با قطر ۵ متر، تونل‌های پایاب با قطر ۶ متر و دهانه خروجی می‌باشند (شرکت مشاوران، ۱۳۸۴). در شکل (۱-۱) موقعیت قرارگیری سازه‌های زیرزمینی و سدهای طرح سیاه بیشه آورده شده است ([www.fa.iwpc.co.ir](http://www.fa.iwpc.co.ir)).

از جمله حفاریات اصلی این پروژه یک مغار نیروگاه و یک مغار ترانسفورمر بوده که به‌منظور نصب و استقرار ماشین‌آلات و توربین‌ها حفر شده‌اند. این مغارها بوسیله چهار باسداکت<sup>۲</sup> (شامل چهار گالری بالادست و پایین دست و همچنین چهار چاه اصلی) به یکدیگر متصل شده‌اند. گالری تهویه و دیگر تونل‌های دسترسی و سرویس از دیگر حفاریات این نیروگاه می‌باشند. تجهیزات نیروگاه شامل چهار پمپ توربیت<sup>۳</sup> بوده، که ظرفیت هر واحد آن ۲۶۰ مگاوات است. نوع توربین‌ها فرانسسیس<sup>۴</sup> و دبی

1- Concrete Faced Rockfill Dams

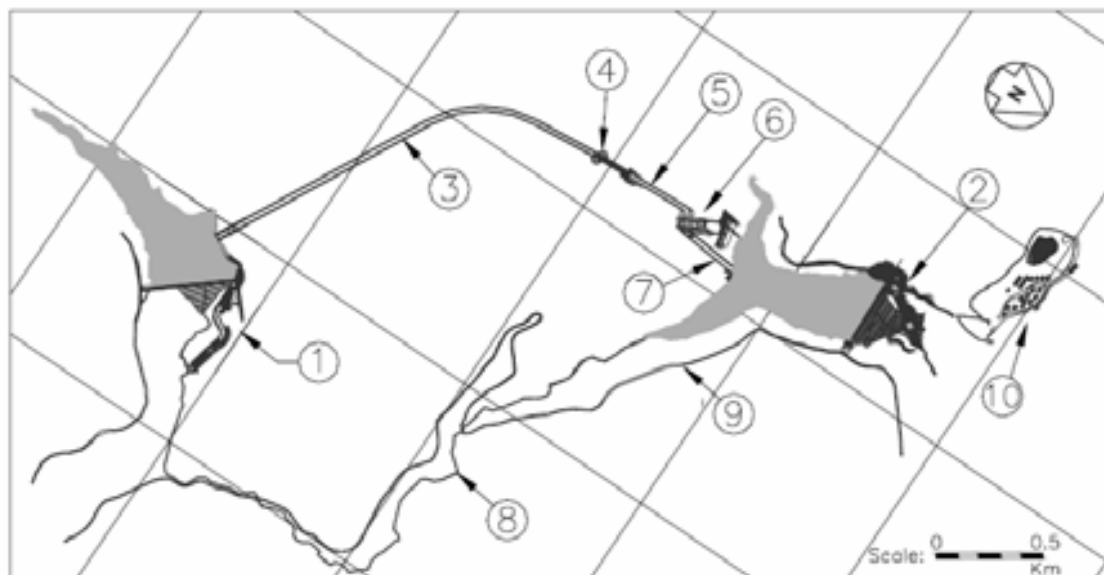
2- Bus Duct

3- Turbit

4 - Francis



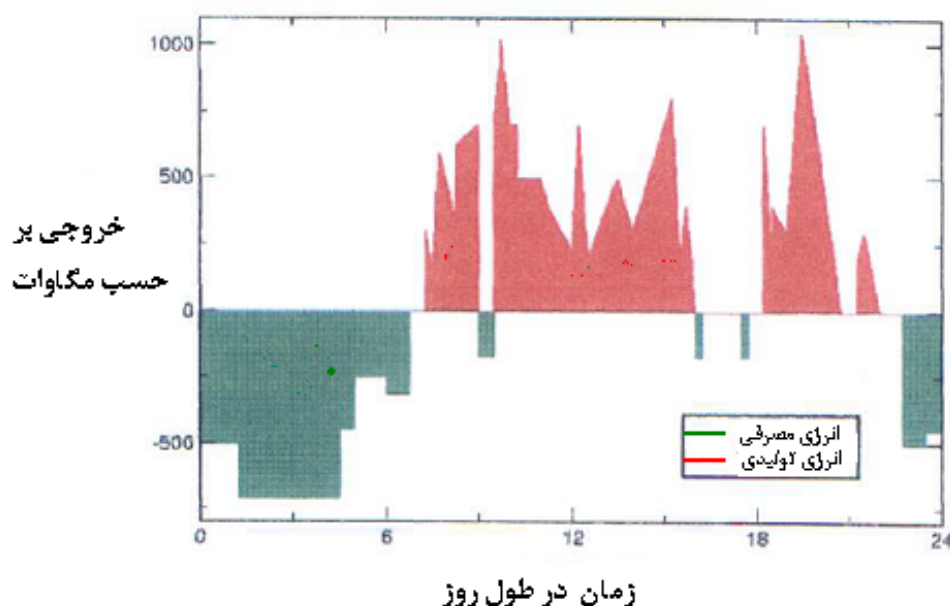
عبوری از هر توربین ۶۲ متر مکعب در ثانیه در زمان تولید و ۴۳ متر مکعب در ثانیه در زمان مصرف می‌باشد (شرکت مشانیر، ۱۳۸۴).



شکل ۱-۱- موقعیت قرارگیری سازه‌های زیرزمینی و سدهای طرح سیاه بیشه (۱-سد بالا ۲-سد پایین ۳-تونل‌های آب‌بر ۴-مخزن فشارشکن ۵-چاه‌های تحت فشار ۶-مغارهای نیروگاهی ۷-تونل‌های پایاب ۸-رودخانه چالوس ۹-جاده تهران-چالوس ۱۰-سایت پروژه) (www.fa.iwpc.co.ir)

### ۳-۱- ضرورت احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه

انرژی الکتریکی تولید شده در نیروگاه‌ها به سادگی قابل ذخیره‌سازی نیست و بدلیل متغیر بودن تقاضای مصرف برق در ساعات مختلف شبانه‌روز، احداث نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای به منظور جلوگیری از ایجاد نوسان در مصرف انرژی برق از اهمیت بالایی برخوردار است. در شکل (۱-۲) نحوه عملکرد یکی از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای کشور ژاپن در طی ساعات شبانه‌روزی نشان داده شده است (Sakata, 1996). بخش زیر محور x در شکل (۱-۲) معرف مصرف برق در نیروگاه یا پمپاژ آب به مخزن بالادست و بخش فوقانی آن معرف تولید برق در نیروگاه می‌باشد.

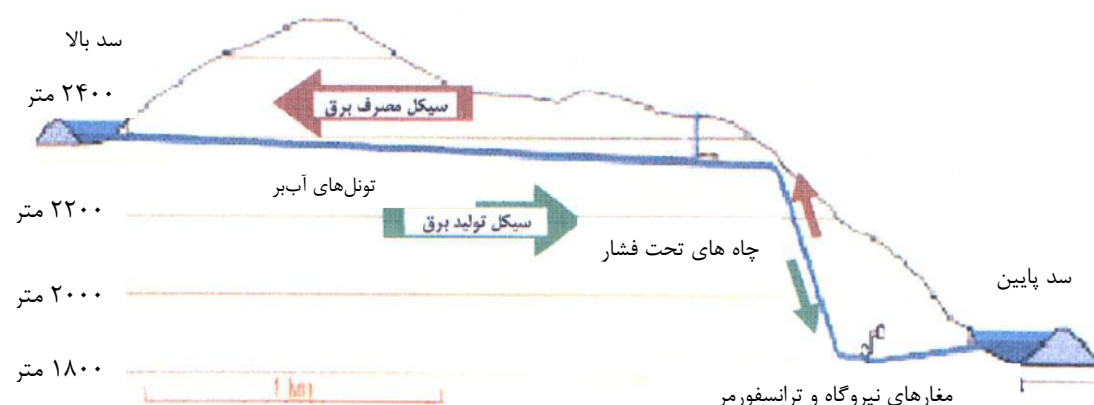


شکل ۱-۲- نمودار انرژی مصرفی و تولیدی در سیکل کاری نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ژاپن (Sakata, 1996)

سیکل فعالیت نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای شامل دو بخش بوده بطوریکه در زمان اوج مصرف (ساعات اولیه شب) برق در ژنراتورها تولید می‌گردد و در ساعات کاهش مصرف (ساعات اولیه روز) انرژی برق صرف پمپاژ آب به سد یا حوضچه بالادست می‌شود، در این صورت ضمن ایجاد تعادل در مصرف برق، بخشی از برق مورد نیاز برای ساعات اوج مصرف نیز تامین خواهد شد.

در شکل (۱-۳) سیکل شماتیک مسیر آب در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه نشان داده شده است. زمان لازم برای شروع به کار این نیروگاه معمولاً بین یک تا چهار دقیقه بوده، لذا با توجه به زمان اندک شروع فعالیت، به کارگیری این نیروگاه‌ها رو به افزایش است. از سوی دیگر بازده نصب تاسیسات بزرگ در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای بیشتر از ۸۵ تا ۹۰ درصد است (Sakata, 1996).

در این روش از انرژی حرارتی قابل توجهی که در پست‌های نیروگاهی حرارتی اتلاف می‌گردد؛ جلوگیری می‌شود، در این صورت می‌توان با یک طرح مناسب و با بکارگیری نیروگاه‌های برق‌آبی تلمبه ذخیره‌ای تاثیرات مخرب زیست‌محیطی نیروگاه‌های حرارتی را کاهش داد.



شکل ۱-۳- شکل شماتیک مسیر آب در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه (شرکت مشانیر، ۱۳۸۴)

با توجه به آنچه در ضرورت احداث این‌گونه نیروگاه‌ها گفته شد، ساخت این نیروگاه‌ها در ایران نیز مورد بررسی قرار گرفت و اقدامات اولیه برای احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه در سال ۱۳۴۹ آغاز و از سال ۱۳۵۷ نیز بررسی‌های زمین‌شناسی مقدماتی آغاز شد. عملیات اجرایی اصلی از سال ۱۳۷۱ در این منطقه آغاز شده که تا به امروز نیز ادامه دارد (شرکت مشانیر، ۱۳۸۴).

#### ۴-۱- اهداف تحقیق

یکی از مسائل مهم در طراحی و حفر مغارها انتخاب ترتیب مناسب حفاری آنها است. برای رسیدن به ترتیب مناسب حفر یک مغار روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های معمول که می‌تواند بهترین جواب را بدست دهد روش عددی است. در این تحقیق با توجه به اینکه تاکنون کار شاخصی در زمینه انتخاب ترتیب مناسب حفاری با استفاده از روش‌های عددی سه‌بعدی صورت نگرفته سعی شده است که با استفاده از نرم افزار 3DEC ترتیب حفر مناسب برای مغار نیروگاه سد سیاه بیشه انتخاب شود. از جمله اهداف فرعی این تحقیق بررسی تاثیر متقابل حفر مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر بر یکدیگر و انتخاب پایه مناسب بین آنها می‌باشد.

## ۱-۵- روش تحقیق

در راستای انجام این تحقیق فضاهای زیرزمینی پروژه‌ی سد سیاه بیشه از قبیل مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر، مغار دریچه‌ها، گالری‌های ارتباطی و چاه‌ها با استفاده از نرم افزار 3DEC مدل‌سازی شده و تاثیر متقابل دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر بر روی یکدیگر بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که حفر این دو مغار با توجه به عرض پایه مناسب بر روی هم بی‌تاثیر می‌باشد. لذا در ادامه این تحقیق، فقط ترتیب حفر مغار نیروگاه برای انتخاب ترتیب مناسب حفر مدنظر قرار گرفته است. در مرحله‌ی بعدی ۱۹ مدل مختلف با ترتیب حفر متفاوت ساخته شده و پس از تحلیل مدل‌های مذکور، با توجه به مقدار جابجایی بدست آمده در نقطه شاهد در نظر گرفته شده ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه تعیین شده است. سپس نتایج نهایی بدست آمده با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده است. در این تحقیق از اطلاعات هندسی ناپیوستگی‌های برداشت شده در حین حفر مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر استفاده شده است.

مطالب حاصل از این تحقیق در ۵ فصل تنظیم شده است:

۱- فصل اول: در این فصل مختصری در مورد تاریخچه استفاده از فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس، ضرورت احداث نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در سطح جهان و به‌خصوص نیروگاه سد سیاه بیشه بحث شده است.

۲- فصل دوم: در این فصل ابتدا چندین مثال از مغارهای احداث شده در سراسر جهان و ایران آورده شده است. در این مثال‌ها روش حفاری به‌صورت پلکانی (روش مورد استفاده در مغارهای سد سیاه بیشه) می‌باشد. در ادامه کارهای انجام شده قبلی در زمینه بهینه‌سازی ترتیب حفر فضاهای بزرگ زیرزمینی آورده شده است. در این قسمت سعی شده است مواردی عنوان گردد که در آنها بهینه‌سازی ترتیب مراحل حفر مثال‌های قبلی با استفاده از نرم افزار سه‌بعدی و به‌خصوص 3DEC انجام شده باشند. با استفاده از این مثال‌ها می‌توان دید کلی

مناسبی برای ساختن مدل و چگونگی تحلیل آن پیدا کرد. در این تحقیق برای ساختن مدل‌ها به‌خصوص در قسمت ابعاد مدل از تجارب حاصل از بررسی کارهای قبلی استفاده شده است.

۳- فصل سوم: با توجه به اهمیت شرایط زمین‌شناسی مهندسی و ویژگی‌های ژئومکانیکی ساختگاه سد و نیروگاه در این فصل پارامترهای مرتبط با زمین‌شناسی و همچنین پارامترهای مورد نیاز نرم افزار 3DEC (زمین‌شناسی ساختمانی ساختگاه، پارامترهای ژئومکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ) جهت ساخت مدلی معرف از شرایط توده‌سنگ ارائه شده است. ضمناً پارامترهای طبقه‌بندی توده‌سنگ و خصوصیات ناپیوستگی‌های دربرگیرنده توده‌سنگ نیروگاه سیاه بیشه نیز ارائه شده است.

۴- فصل چهارم: در این فصل نتایج مدل‌سازی ارائه شده است. به این منظور، ابتدا به روند مدل‌سازی با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ناپیوستگی‌های موجود اشاره شده است. در مرحله‌ی بعدی مغار به ۴ قسمت اصلی تقسیم شده است، هر از این قسمت‌ها در چندین مرحله حفاری شده است. سپس برای حفاری مرحله‌ای مغار نیروگاه سیاه بیشه ۱۹ مدل مختلف ساخته شده که هر یک ترتیب حفر متفاوتی دارد. پس از اجرای مدل‌های ساخته و بررسی خروجی‌های مدل‌ها ترتیب مناسب حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه انتخاب شده است. در نهایت برای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده نتایج حاصل از نرم‌افزار و نتایج تفسیر ابزار دقیق در تاج مغار با هم مقایسه شده است.

۵- فصل پنجم: در این فصل نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادات و راهکارهایی در خصوص ترتیب حفاری مغارها ارائه شده است.

مروری بر مغارهای احداث شده و چگونگی  
مدلسازی و تحلیل عددی فضاها  
زیرزمینی بزرگ مقیاس

## ۲-۱- مقدمه

در ابتدای این فصل چندین مثال مختلف از مغارهای احداث شده در نقاط مختلف دنیا آورده شده است، در این خصوص مغارهایی انتخاب شده است که نحوه اجرای آنها مشابه با نحوه اجرای مغار نیروگاه سیاه بیشه باشد. در ادامه چند مثال از مدلسازی عددی سه بعدی پروژه های زیرزمینی آورده شده است. در این قسمت نیز سعی شده است که تحلیل های انجام شده با استفاده از روش های معمول و نزدیک به روش مورد استفاده در این تحقیق مطرح شود. و در نهایت مثال هایی از بهینه سازی ترتیب حفر مغار آورده شده است.

## ۲-۲- بررسی مغارهای احداث شده در جهان

در این قسمت مثالی مختلفی از مغارهای نیروگاهی آورده شده است. این مغارها همگی با روش پلکانی استخراج شده اند. این بررسی باعث آشنایی اولیه با مغارهای نیروگاه های تلمبه ای ذخیره ای و روش حفر آنها شده است.

### ۲-۲-۱- مغار نیروگاه تلمبه ذخیره ای، ریو گراند<sup>۱</sup> در آرژانتین

پروژه نیروگاه تلمبه ذخیره ای ریو گراند، در استان کوردوبا در جمهوری آرژانتین قرار دارد. در این پروژه، چهار پمپ توربینی برگشت پذیر با بار هیدرولیکی متوسط ۱۷۰ متر به کار افتاده و با عملکرد خود، ظرفیت نصب شده پروژه را به ۷۵۰ مگاوات می رسانند. این توربین ها، در مغار طویلی با دهانه ۲۵ متر، ارتفاع ۵۰ متر و طول ۱۰۵ متر، واقع در عمق متوسط ۱۶۰ متری از سطح زمین، قرار می گیرد (Hoek, 2000).

توده سنگی که سازه های زیرزمینی پروژه ریو گراند در آن واقع شده اند، گنیس تونالیتی با ساخت توده ای و کیفیت عالی است. میانگین مقاومت فشاری تک محوره این گنیس ها، ۱۴۰ مگاپاسکال می باشد. تنش اصلی حداکثر (با آزمایش های بیش مغزه گیری) ۹/۴ مگاپاسکال بوده و غالباً نیز به حالت افقی قرار می گیرد. امتداد و تنش مزبور، تقریباً عمود بر محور مغار است. در سنگ های

1- Rio Grande

توده‌ای، اگر نسبت مقاومت فشاری تک محوره، به تنش اصلی حداکثر، کمتر از ۱۵ به ۱ باشد، ممکن است منجر به گسیختگی قابل توجهی در سنگ خواهد شد. این مطلب، حتی از طریق تحلیل تنش، به روش‌های عددی نیز تایید شده است. نسبت مقاومت فشاری تک محوره به تنش اصلی حداکثر در این سازه زیرزمینی بیشتر از ۱۵ به ۱ است، بنابراین احتمال شکست قابل توجهی در ماده سنگ وجود ندارد. نوع اصلی ناپایداری که انتظار می‌رود در این سازه زیرزمینی بروز نماید، وجود گوه‌ها و بلوک‌های بالقوه ناپایداری هستند که در اثر تقاطع صفحات ساختاری موجود در گنیس‌ها تعریف می‌گردند. (Hoek, 2000).

## ۲-۲-۲- مغار نیروگاه تلمبه‌ذخیره‌ای، خیرتارن<sup>۱</sup> در تایلند

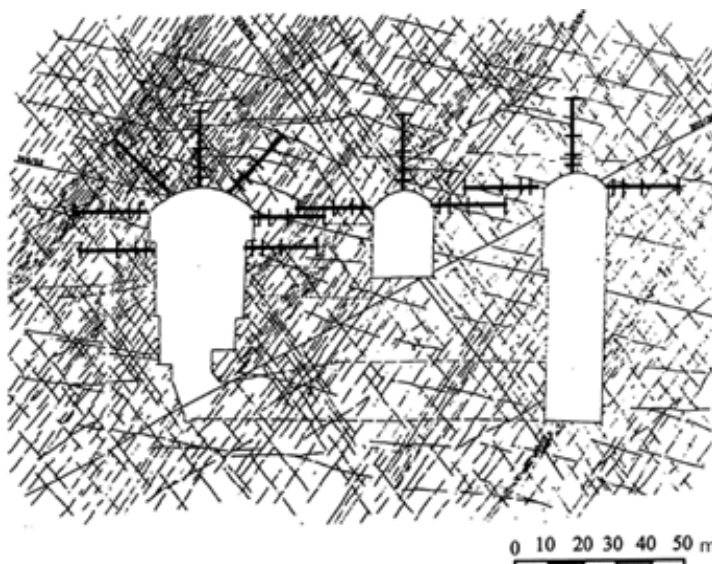
مغار این نیروگاه دارای ۱۷/۵ متر عرض، ۴۲ متر ارتفاع و ۹۵ متر طول می‌باشد و در عمق ۳۸۵ تا ۳۹۰ متری سطح زمین قرار گرفته است. توده سنگ محدوده پروژه دارای اندکی درزه‌داری و مقاومت توده سنگ متوسط تا زیاد است. امتداد صفحات لایه‌بندی اغلب در طول امتداد زون ساختاری و با شیب زیاد می‌باشد. (Phienweij and Anwar, 2005).

تنش افقی حداکثر، در حدود ۱/۸ برابر تنش قائم در اعماق کمتر از ۲۰۰ متر و برابر تنش قائم در اعماق بیشتر می‌باشد. تنش افقی حداقل، در حدود نصف تنش قائم است. تنش افقی حداکثر، دارای آزمون  $13 \pm 127$  درجه است که کم و بیش در طول امتداد دسته ناپیوستگی‌های غالب محدوده پروژه می‌باشد. تنش افقی حداقل در جهت تقریباً عمود بر امتداد زون‌های ساختاری قرار گرفته است. شرایط تنش‌های برجا در محل توسط ساختارهای زمین شناسی اصلی و تکامل تدریجی تکتونیک منطقه کنترل شده است (Phienweij and Anwar, 2005).



### ۳-۲-۲- مغار نیروگاه برق آبی، ایرتان<sup>۱</sup> در چین

مغار این نیروگاه دارای طول ۱۳۴ متر، ۲۵ متر عرض و ۶۰ متر ارتفاع است و جنس سنگ‌های محدوده مغار گرانودیوریت، گابرو و بازالت می‌باشد (شکل ۱-۲). این مغار در عمق حدود ۵۰۰ متری سطح زمین قرار گرفته است (Chen and Zhao, 1998). تنش‌های اولیه بالا، سنگ با درزه‌داری زیاد و ارتفاع زیاد مغار از ویژگی‌های این پروژه هستند. مغار نیروگاه ایرتان در توده‌سنگ‌های گرانودیوریت، گابرو و بازالت قرار گرفته است. بنابراین این نوع سنگ از نظر جنس برای نیروگاه محل مناسبی است.



شکل ۱-۲- مقطع زمین‌شناسی و مغارهای نیروگاه ایرتان چین (Chen and Zhao, 1998)

### ۴-۲-۲- مغارهای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، مینگتان<sup>۲</sup> در تایوان

پروژه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای مینگتان، در منطقه مرکزی جزیره تایوان قرار داشته و با استفاده از ۴۰۰ متر اختلاف بار هیدرولیکی که بین دریاچه سان مون و رودخانه شوئیلی وجود دارد، بیش از ۱۸۰۰ مگا وات برق را در زمان حداکثر نیاز، تولید می‌نماید. مغار نیروگاه، از ۲۲ متر عرض، ۴۶ متر ارتفاع و ۱۵۸ متر طول برخوردار بوده و به موازات آن مغار ترانسفورمر به ابعاد ۱۳ متر عرض،

1- Ertan

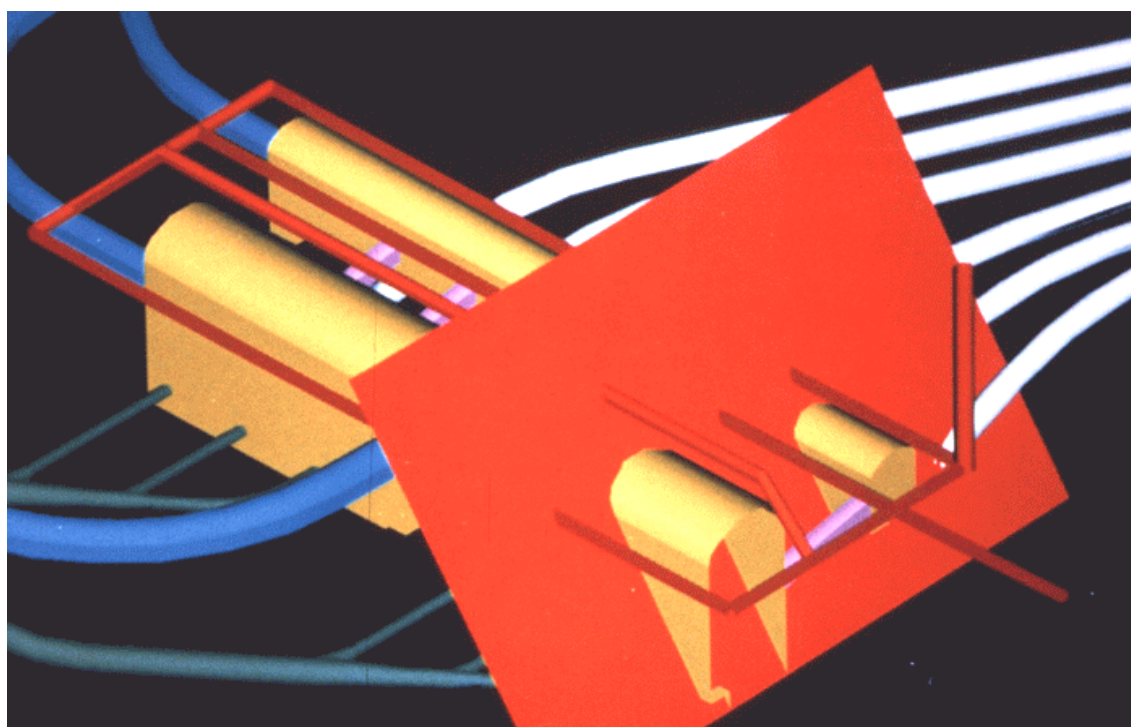
2- Mingtan

۲۰ متر ارتفاع و ۱۷۰ متر طول قرار دارد. فاصله این مغارها از هم ۴۵ متر بوده و همگی در عمق حدود ۳۰۰ متری زیر سطح زمین، در ساحل چپ رودخانه شوئیلی، واقع هستند (شکل ۲-۲) (Cheng and Liu, 1990).

توده سنگ تشکیل دهنده مغار، از میان لایه های ماسه سنگ هوازده، سیلتستون و لایه بندی-هایی که شیب آنها ۳۴ درجه است، تشکیل شده است (Cheng and Liu, 1990). همچنین نسبت تنش افقی به قائم تقریباً ۰/۹ بدست آمده است. تنش اصلی حداکثر، موازی با لایه بندی و عمود بر محور مغار، جهت یافته است (Cheng and Liu, 1990).

#### ۲-۲-۵- مغارهای نیروگاه برق آبی مسجد سلیمان در ایران

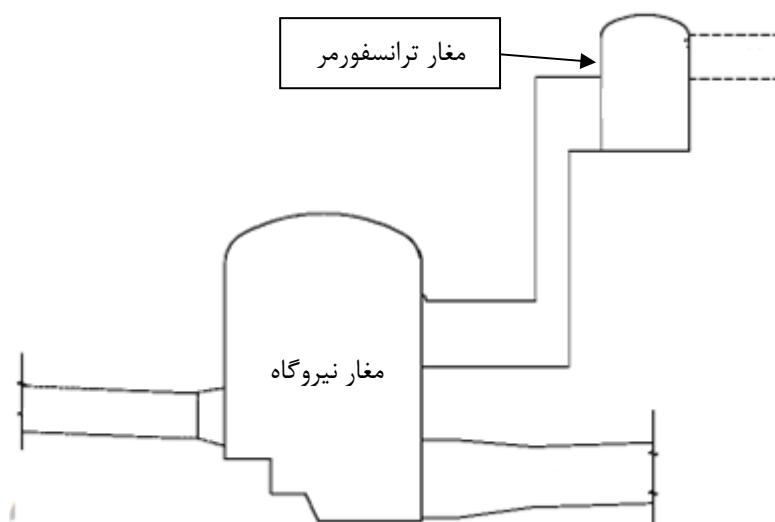
نیروگاه سد مسجد سلیمان در دو بخش شامل فاز یک و طرح توسعه بر روی رودخانه کارون اجرا گردیده است. فاز یک این طرح شامل یک مغار نیروگاه با طول ۱۵۶ متر، عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۵۰ متر و مغار ترانسفورمر با عرض ۱۳/۶ متر، طول ۱۱۰ متر و ارتفاع ۲۱ متر می باشد. از نظر ارتفاعی



شکل ۲-۲- راستای حفاریات زیرزمینی در مقایسه با راستای صفحه خاکستری مشخص کننده شیب و امتداد گسلها است (Cheng and Liu, 1990)

سقف مغار نیروگاه از کف مغار ترانسفورمر ۹ متر پایین تر و از نظر عرضی محورهای آنها ۳۰ متر با هم فاصله دارند. همچنین امتداد هر دو فضا یکسان می باشد. این دو مغار تقریباً در عمق ۲۵۰ متری از سطح زمین قرار گرفته اند. طرح توسعه نیروگاه سد مسجد سلیمان، در امتداد مغار نیروگاه فاز یک می باشد که ابعاد مشابه فاز یک داشته ولی طول کمتری (۱۱۲ متر) نسبت به فاز یک دارد. مغار ترانسفورمر طرح توسعه دقیقاً مشابه مغار ترانسفورمر فاز یک است. در این تحقیق به بررسی نیروگاه فاز یک پرداخته شده است (IWPC, 2000).

مغارهای سد مسجد سلیمان در تکیه گاه راست سد واقع شده اند (شکل ۲-۳). شیب لایه ها در این محل بین ۲۵ تا ۳۰ درجه است و امتداد مغارها به موازات امتداد لایه بندی انتخاب شده است. سقف مغار نیروگاه در کنگلومرا، ماسه سنگ و سنگ رس قرار گرفته است. تقریباً تمام سقف مغار ترانسفورمر از جنس کنگلومرا و ماسه سنگ است (IWPC, 2000).



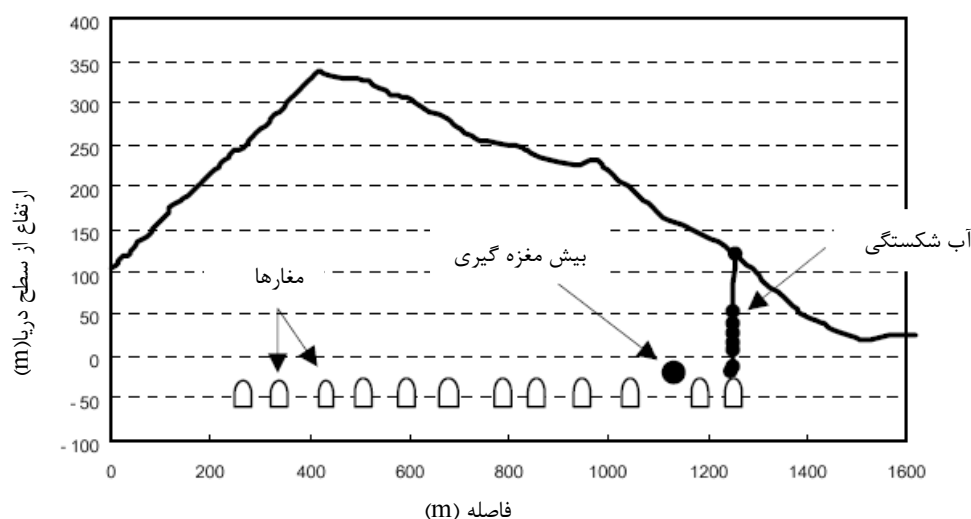
شکل ۲-۳- طرح شماتیکی از مغارهای نیروگاه زیرزمینی مسجد سلیمان (IWPC, 2000)

طراحی اولیه مغار براساس تحلیل نتایج حاصل از گمانه های اکتشافی، آزمایشات ژئوتکنیکی فاز توجیهی و شناخت تفصیلی پروژه انجام شده بود. با حفر گالری اکتشافی، انجام مطالعات تکمیلی و آزمایشات تکمیلی ژئوتکنیکی، آزمایشگاهی و صحرایی، داده های بیشتری حاصل گردیدند. با تحلیل حساسیت پارامترهای ژئوتکنیکی تحلیل پایداری مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر با روش های مختلف

تجربی، عددی و گوه‌ای انجام و درستی نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند. بر این اساس محور نهایی حفر مغارها به موازات امتداد لایه‌ها (N340E) و تقریباً عمود بر تنش افقی حداکثر، تغییر جهت داده شد و تمهیدات نگهداری مناسب پیشنهاد گردید (IWPC, 2000).

## ۲-۲-۶- مغارهای زیرزمینی ذخیره نفت کره جنوبی

این پروژه شامل ۱۲ مغار است که به‌طور موازی کنار هم قرار گرفته‌اند و بین ۱۵۰ تا ۳۷۰ متر روباره دارند (شکل ۴-۲). بزرگترین مغار آن دارای طول ۴۴۰ متر، ارتفاع ۳۰ متر و عرض ۲۰ متر می‌باشد (Song, 2003).



شکل ۴-۲- مقطعی از توپوگرافی منطقه به همراه محل مغارها و آزمایشات برجا تنش در مغارهای زیرزمینی نفت کره- جنوبی (Song, 2003)

اندازه‌گیری تنش برجا با استفاده از تکنیک‌های آب شکستگی و بیش‌مغزه‌گیری انجام شده است. آزمایش آب شکستگی روی سطح زمین قبل از حفاری و آزمایش بیش‌مغزه‌گیری در تونل دسترسی در طول حفاری انجام شده است (Song, 2003).

## ۲-۲-۷- جمع بندی

در پایان این قسمت برای درک بهتر مثال‌های آورده شده سعی شده است که خصوصیات این مغارها در جدول (۱-۲) آورده شده است. این خصوصیات شامل مشخصات هندسی مغارها، نوع

کاربری، نوع سنگ‌های دربرگیرنده، کشور محل احداث و غیره می‌باشد. مشخصات ذکر شده در جدول (۱-۲) مربوط به مغار نیروگاه پروژه‌ها می‌باشد.

جدول ۱-۲- خصوصیات مغارهای مشابه با مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

| ردیف | نام پروژه   | نوع کاربری                   | کشور محل احداث | طول (متر) | عرض (متر) | ارتفاع (متر) | نوع سنگ‌های دربرگیرنده      | روش حفاری |
|------|-------------|------------------------------|----------------|-----------|-----------|--------------|-----------------------------|-----------|
| ۱    | ریوگراند    | نیروگاهی (تلمبه‌ای-ذخیره‌ای) | آرژانتین       | ۱۰۵       | ۲۵        | ۵۰           | گنیس تونالیتی               | پلکانی    |
| ۲    | خیرتان      | نیروگاهی (تلمبه‌ای-ذخیره‌ای) | تایلند         | ۹۵        | ۱۷/۵      | ۴۲           | بازالت                      | پلکانی    |
| ۳    | مینگتان     | نیروگاهی (تلمبه‌ای-ذخیره‌ای) | تایوان         | ۱۵۸       | ۲۲        | ۴۶           | ماسه‌سنگ و سیلتستون         | پلکانی    |
| ۴    | ایرتان      | نیروگاهی (برق آبی)           | چین            | ۱۳۴       | ۲۵        | ۶۰           | گرانودیوریت، گابرو و بازالت | پلکانی    |
| ۵    | مسجد سلیمان | نیروگاهی (برق آبی)           | ایران          | ۱۵۶       | ۳۰        | ۵۰           | کنگلومرا و ماسه‌سنگ         | پلکانی    |
| ۶    | -           | ذخیره‌سازی نفت               | کره جنوبی      | ۴۴۰       | ۲۰        | ۳۰           | گرانودیوریت                 | پلکانی    |

## ۲-۳- مروری بر مدلسازی سه بعدی فضاهای زیرزمینی

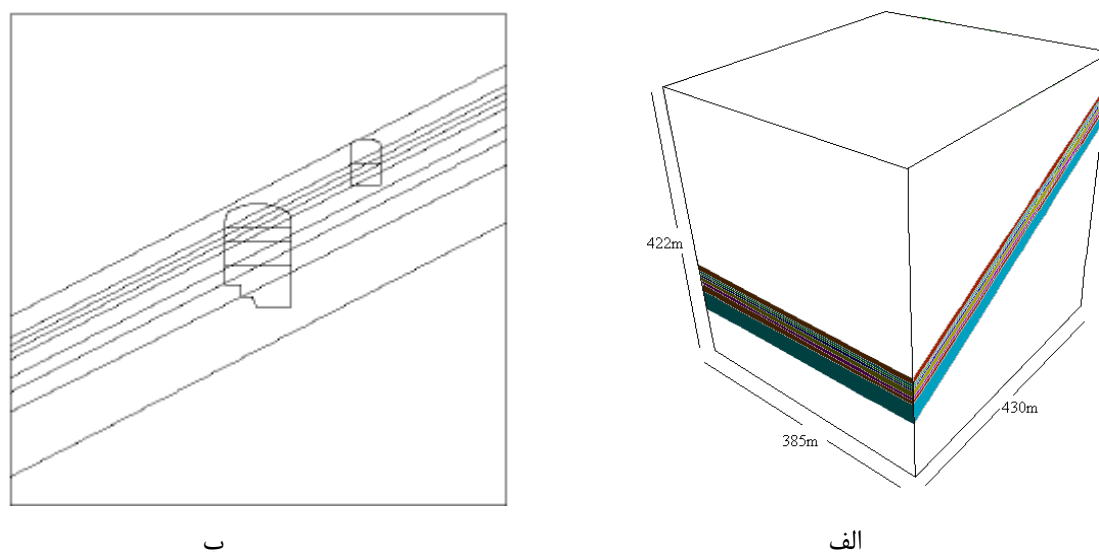
در این قسمت چند مدل سه‌بعدی ساخته شده از پروژه‌های زیرزمینی در محیط‌های پیوسته و ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفته است. در هر یک از پروژه‌های مدل‌های مختلفی ساخته شده و سپس خروجی‌های این مدل‌ها بررسی شده و با نتایج ابزار دقیق مطابقت داده شده است. در نهایت با توجه به نتایج این بررسی سعی شده است بهترین روش عددی، نرم‌افزار مورد استفاده، ابعاد بلوک دربرگیرنده حفاریات و مدل‌های رفتاری توده‌سنگ و درزه‌ها و سایر مشخصات انتخاب شود.

### ۲-۳-۱- پروژه نیروگاه برق آبی مسجد سلیمان در ایران

مشخصات هندسی و زمین شناسی پروژه مسجد سلیمان در قسمت قبلی بررسی شده است. حال در این قسمت به دو تحقیق انجام شده در زمینه مقایسه روش‌های عددی مختلف برای پروژه مسجد سلیمان اشاره شده است.

الف- در پروژه مسجد سلیمان کاربرد روش‌های عددی مختلف جهت بررسی رفتار مغار نیروگاه بررسی شده است. برای نیل به این هدف از روش‌های عددی المان محدود (نرم‌افزار Phase2) و تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC) استفاده شده است. همچنین از روش عددی المان مجزا (نرم‌افزار UDEC) جهت مدلسازی محیط به‌صورت ناپیوسته و مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده شد. در این تحقیق ابتدا مغارهای نیروگاه در شرایط بدون نگهداری و با نگهداری اولیه با روش‌های مختلف عددی مدلسازی شده‌اند. در مرحله‌ی بعد برای طراحی یک سیستم نگهداری بهینه، تحلیل پایداری با استفاده از نرم‌افزار UDEC انجام گرفت و با توجه به ناپایداری‌های مشاهده شده سیستم نگهداری جدید که شامل یک سری تاندون در سقف و دیواره‌ها است ارائه شد. سپس بطور مجزا نرم‌افزارهای FLAC و Phase2 برای مدلسازی با این سیستم نگهداری جدید استفاده شدند و در نهایت نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ساخته شده توسط نرم‌افزار UDEC در مقایسه با دو نرم‌افزار دیگر، به شرایط واقعی زمین نزدیکتر است. با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه مقدار جابجایی‌های رخ داده در اطراف فضای حفاری شده می‌توان گفت که این محیط دارای یک رفتار شبه پیوسته می‌باشد. ولی وجود لایه‌های ضعیف (بخصوص لایه سیلتستون در سقف مغار اصلی) باعث بوجود آمدن درزه‌هایی با پارامترهای مقاومتی پایین شده است که این عامل باعث باز شدگی درزه‌ها و در نتیجه ناپایداری در این نواحی شده‌اند. مدلسازی با UDEC این موضوع را تأیید می‌کند (موسی زاده، ۱۳۸۲).

ب- در پروژه مسجد سلیمان مقایسه بین روش‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی صورت گرفته است. سپس نتایج خروجی‌های نرم‌افزارها با هم مقایسه شده‌اند. در حالت دوبعدی از نرم‌افزار Flac2D و در حالت سه‌بعدی از نرم‌افزارهای Flac3D، 3DEC و Quasi-3D استفاده شده است. در شکل (۲-۵) مدل‌های ساخته شده در حالت دو بعدی با نرم‌افزار Flac2D و سه‌بعدی با نرم‌افزار Quasi-3D نشان داده شده است. در جدول (۲-۲) مقادیر جابجایی در سقف، کمر بالا و کمر پایین مغار نیروگاه مسجد سلیمان بدست آمده از خروجی نرم‌افزارها و ابزار دقیق آورده شده است (Ahmadi et al, 2008).



شکل ۲-۵- مدل‌های ساخته شده در پروژه مغار نیروگاه مسجد سلیمان (الف) با استفاده از نرم‌افزار Quasi-3D (ب) استفاده از نرم‌افزار Flac2D (Ahmadi et al, 2008)

جدول ۲-۲- مقایسه جابجایی‌ها در سقف، کمر بالا و کمر پایین مغار نیروگاه مسجد سلیمان بین نتایج حاصل از نرم‌افزارها و ابزار دقیق (Ahmadi et al, 2008)

| سقف      |           |       | کمر بالا |          |          | کمر پایین |          |          |          |
|----------|-----------|-------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| بالا دست | پایین دست | مرکز  | تراز ۲۰۷ | تراز ۲۱۷ | تراز ۲۲۵ | تراز ۲۰۷  | تراز ۲۱۷ | تراز ۲۲۵ |          |
| ۱۵/۳     | ۲۸/۸۵     | ۱۹/۵  | ۱۵/۷۸    | ۱۹/۹۴    | ۲۵/۰۵    | ۲۹/۱۵     | ۱۶/۵۸    | ۱۹/۸     | پایش     |
| ۲۱/۳۷    | ۳۶/۹      | ۲۷/۸۲ | ۳۵/۱۵    | ۲۸/۷۹    | ۵۴/۱     | ۵۱/۶۱     | ۳۲/۲۳    | ۲۹/۳۶    | Flac2D   |
| ۱۹/۵۱    | ۲۴/۶۲     | ۲۴/۵۴ | ۳۶/۷۸    | ۲۷/۷۸    | ۴۲/۸۲    | ۴۸/۰۵     | ۲۷/۸۸    | ۲۳/۵۹    | Quasi-3D |
| ۱۸/۸۵    | ۲۶/۰۱     | ۲۳/۵۳ | ۴۳/۵۵    | ۲۹/۴۲    | ۳۹/۵۱    | ۴۳/۶۵     | ۲۵/۰۸    | ۲۲/۴۶    | Flac3D   |
| ۱۸/۲۶    | ۲۴/۸۴     | ۲۳/۱۵ | ۳۹/۴۶    | ۲۸/۷۶    | ۳۸/۸۵    | ۴۲/۱۸     | ۲۴/۳     | ۲۱/۸۲    | 3DEC     |

بعد از بررسی خروجی‌های نرم افزارهای مختلف و مقایسه با نتایج ابزار دقیق در پروژه مسجد سلیمان نتایج زیر بدست آمد:

الف- مقایسه بین حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی نشان داده است که حالت سه‌بعدی تاثیر غیرهموزن بودن سنگ را بهتر در نظر گرفته و نرم‌افزارهای سه‌بعدی برای تحلیل سنگ‌های غیرهموزن مناسب‌تر بوده است.

ب- برای مناطق با سنگ‌های ضعیف غیرهموژن مدل الاستو-پلاستیک سه‌بعدی بیشترین مطابقت را با نتایج ابزار دقیق داشته است. ولی حالت دوبعدی الاستو-پلاستیک نتایج محافظه‌کارانه بدست آمده است.

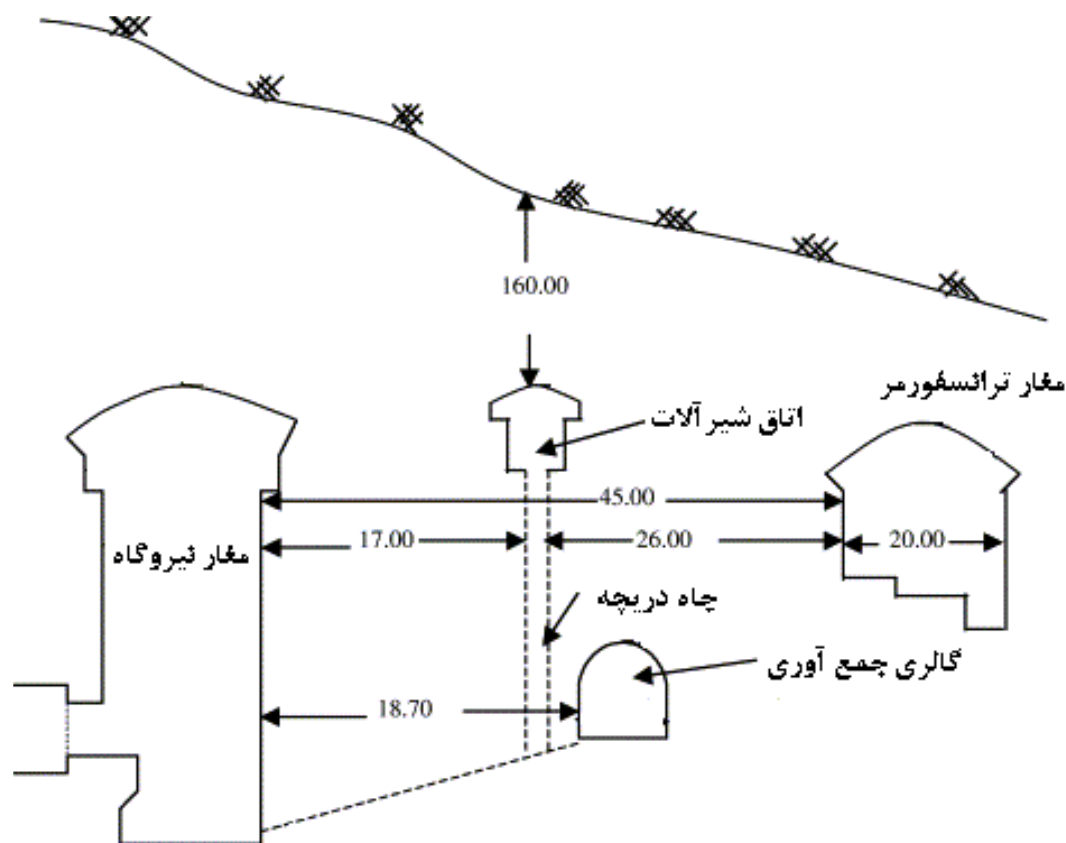
ج- در سنگ ضعیف جابجایی‌های بدست آمده از 3DEC بیشتر از Quasi-3D و در سنگ قوی جابجایی‌ها بدست آمده از 3DEC کمتر از Quasi-3D محاسبه شده‌اند.

د- جابجایی بدست آمده از Flac3D بیشتر از 3DEC بوده، اختلاف جابجایی‌های ثبت شده توسط این دو نرم‌افزار در سنگ ضعیف بیشتر بوده و با افزایش مقاومت سنگ کمتر شده است (Ahmadi et al, 2008).

## ۲-۳-۲- پروژه نیروگاه برق‌آبی کونیا<sup>۱</sup> در هند

در پروژه برق‌آبی کونیا تحلیل‌های الاستو-پلاستیک دو بعدی و سه بعدی در چهار فضای مجزا بررسی شده و تغییر شکل‌های حاصل از مدل با نتایج ابزاربندی مقایسه شده است. در این مدل چهار فضای غیر متقارن نشان داده شده در شکل (۲-۶) در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی فضاهای زیرزمینی پروژه‌ی کونیا در جدول (۲-۳) آورده شده است. این فضاها در بازالت ایجاد شده‌اند. ضخامت متوسط روباره حدود ۱۶۰ متر است. ابعاد مرزهای مدل ساخته شده  $170\text{ m} \times 360\text{ m} \times 300\text{ m}$  است، که ۳ الی ۴ برابر ابعاد فضای حفاری شده است. در این پروژه بررسی‌های برجا جهت تعیین تنش‌های برجا، مدول تغییر شکل، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی صورت پذیرفته است. تنش‌های قائم و افقی به ترتیب  $8/8$  و  $4/8$  مگاپاسکال می‌باشند؛ مقاومت کششی سنگ‌ها نیز از  $1/6$  تا  $4/15$  مگاپاسکال متغیر است (Dahawan, 2002).





شکل ۲-۶- فضاهای موجود در پروژه کونیا (Dahawan, 2002)

جدول ۲-۳- مشخصات هندسی فضاهای زیرزمینی کونیا (Dahawan, 2002)

| نام فضا         | طول (متر) | عرض (متر) | ارتفاع (متر) |
|-----------------|-----------|-----------|--------------|
| مغار نیروگاه    | ۱۴۵       | ۲۰/۶۰     | ۵۰/۱۴        |
| مغار ترانسفورمر | ۱۷۳       | ۲۳/۵      | ۲۰           |
| گالری شیرآلات   | ۱۴۵       | ۷         | ۱۳/۱۵        |
| گالری جمع آوری  | ۱۷۳       | ۱۰/۶      | ۱۰/۸         |

به منظور تحلیل فضاهای زیرزمینی از نرم افزار Solvia90 استفاده شده است. در مدل دو بعدی

ابعاد مدل (۲۶۰ متر × ۲۰۰ متر) و در مدل سه بعدی ابعاد مدل ۳۶۰ متر × ۳۰۰ متر × ۱۷۰ متر در

نظر گرفته شده است. در مدل ساخته شده معیار شکست دراگر-پراگر برای بیان شرایط شکست سنگ

استفاده شده است. در این پروژه با توجه به تاثیر ناچیز سایر فضاهای کوچک مانند تونل های

باسداکت، پایاب و غیره بر پایداری مغار اصلی از مدل‌سازی آنها صرف‌نظر شده است (Dahawan, 2002).

بر اساس نتایج مدل، جابجایی‌های محاسبه شده در مدل دو بعدی، ۲۷ الی ۵۲ درصد پایین‌تر از تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار می‌باشند. در مدل سه‌بعدی بر اساس مقایسه نتایج مدل و ابزار در مغار نیروگاه جابجایی‌های محاسبه شده ۱۰ الی ۲۱ درصد کمتر و در گره‌های دور از فضاهای حفر شده ۱ الی ۲۳ درصد بالاتر از نتایج ابزاربندی می‌باشند. در مغار ترانسفورمر مقادیر تنها ۲ الی ۱۰ درصد تغییر را نشان می‌دهند، علت این امر کوچک‌تر بودن ابعاد مغار ترانسفورمر نسبت به مغار نیروگاه بیان شده است.

با توجه به تحقیق انجام شده در پروژه کونیا می‌توان دریافت برای توده‌سنگ ضعیف و غیرهموزن، تغییر شکل بدست آمده از تحلیل سه‌بعدی الاستو-پلاستیک در مقایسه با تحلیل دو بعدی بیشتر است. بر اساس نتایج این بررسی در توده‌سنگ هموزن و محکم، تغییر شکل‌های تحلیل الاستیک سه‌بعدی کمتر از نتایج تحلیل دو بعدی برآورده شده است. این موضوع بدلیل تاثیر بیشتر نواحی ضعیف بر تغییر شکل‌های تحلیل سه‌بعدی صورت می‌پذیرد. لذا به کارگیری تحلیل سه‌بعدی در محیط‌های ضعیف و شکسته شده مناسب‌تر خواهد بود (Dahawan, 2002).

بر اساس مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ارائه شده، نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- تحلیل سه‌بعدی الاستو-پلاستیک بهترین توافق را با نتایج ابزاربندی نشان داده است.
- ۲- اثر غیر هموزن بودن توده‌سنگ در تحلیل سه‌بعدی بهتر درک شده است (Dahawan, 2002).

### ۲-۳-۳- نیروگاه سریسایلام<sup>۱</sup> هند

نیروگاه سریسایلام در هند، در ساحل رودخانه کریشرا<sup>۲</sup> احداث شده است. به منظور بهینه‌سازی سیستم نگهداری از روش مدلسازی عددی با استفاده از روش تحلیل تنش بهره گرفته شده است (Sharma et al, 1999).

مجموعه فضاهای زیرزمینی شامل سه مغار بزرگ (مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر و مخزن تعادل) است. ساختار سنگ منطقه سیلتستون و کواتزیت است. توده‌سنگ شامل شش دسته درزه است که یکی از آنها افقی و مابقی قائم است. در این بررسی مدلسازی فضاهای حفاری به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. مهم‌ترین موارد بررسی شده عبارتند از:

الف- رفتار توده‌سنگ‌های اطراف حفاری‌ها

ب- تاثیر حفاری‌ها بر همدیگر

ج- تعیین ابعاد مناسب پایه‌های سنگی بین حفاری‌ها جهت کاهش تاثیر حفاریات بر یکدیگر

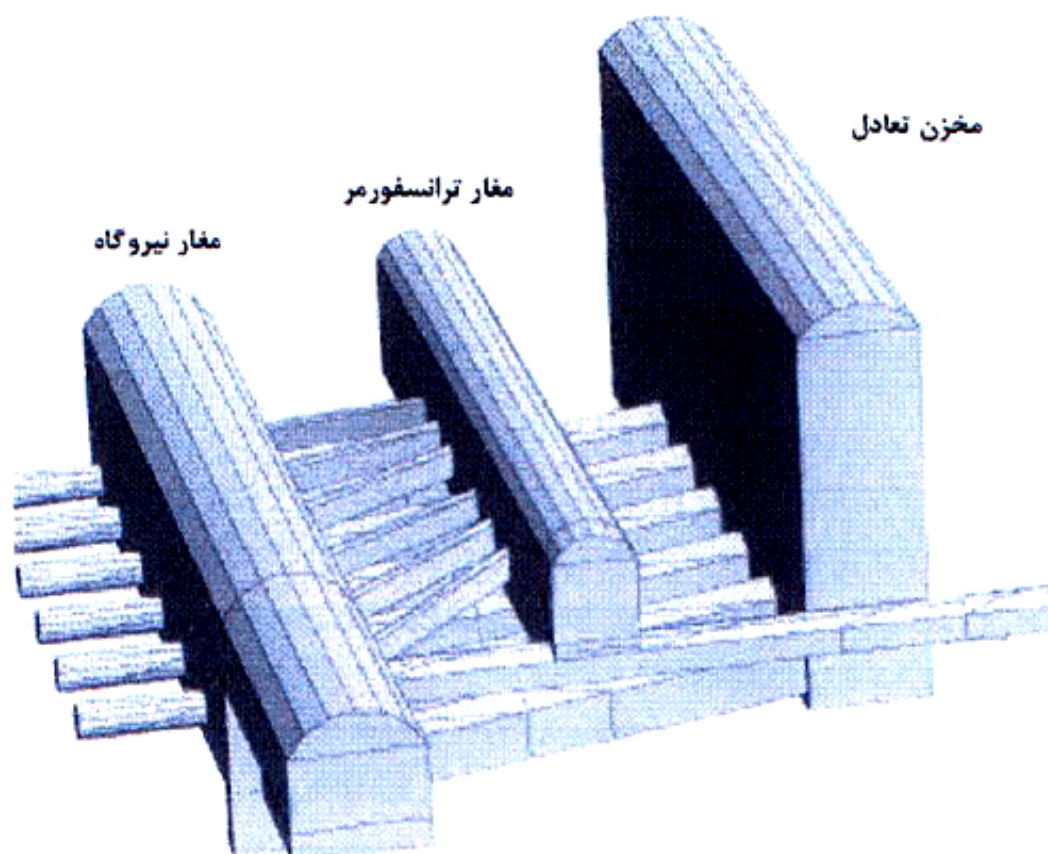
ه- بررسی تاثیر متقابل مغارها و تونل‌های موجود در حالت پیوسته و ناپیوسته

تحلیل پیوسته و ناپیوسته به دو صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. در تحلیل‌های دو بعدی از UDEC و در تحلیل سه بعدی از 3DEC استفاده شده است. هندسه مدل سه بعدی در شکل (۲-۷) ارائه شده است (Sharma et al, 1999).

بر اساس تحلیل صورت گرفته حداکثر جابجایی ۱۴/۹۴ میلی‌متر می‌باشد که در دیواره پایین دست مخزن تعادل در مدل پیوسته حاصل شده است. هر دو دیواره مخزن تعادل از سطح بالایی از تنش برخوردار بوده و ضریب ایمنی در این محدوده برابر ۱ برآورد شده است. ضریب ایمنی در پایه بین دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر در حدود ۲ می‌باشد، که بیانگر مناسب بودن ابعاد پایه است.

1- Srisailam

2-Krishra



شکل ۷-۲- مدل سه بعدی حفريات پروژه سريسايلام (Sharma et.al., 1999)

در تحلیل سه بعدی تمام حفريات مدل شده و در این حالت امکان دسترسی اطلاعات در هر مقطع ممکن می باشد (Sharma et al, 1999).

با توجه به مقایسه انجام شده بین نتایج مدل های دو بعدی و سه بعدی در مقاطع یکسان مشخص گردید که نتایج حاصل از هر دو مدل یکسان است. با توجه به یکسان بودن نتایج مدل های دو بعدی و سه بعدی می توان با ساخت مدل سه بعدی پارامترهای مدل را در هر مقطع مورد نظر ارزیابی و برآورد نمود. (Sharma et al, 1999).

#### ۲-۳-۴- پروژه نیروگاه تیستا-وی<sup>۱</sup> هند

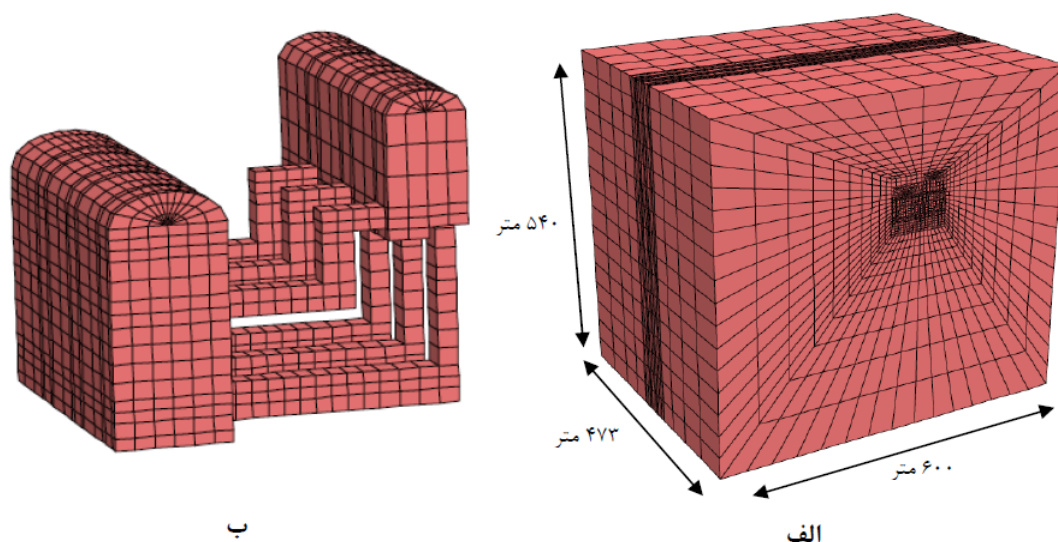
پروژه تیستا-وی در استان سیکیم<sup>۲</sup> در بخش شمال شرقی هند قرار دارد. این سد بر روی رودخانه تیستا احداث شده است. محدوده ی پروژه شامل سنگ های دگرگونی و رسوبی است. پیرامون

1- Teesta-V

2- Sikkim

سد رخنمون سنگ‌های کواتز فیلیتی و کوارتز با لایه‌بندی نازک در بعضی از نواحی دیده می‌شود. محدوده تونل هدایت‌کننده آب، مغار نیروگاه و چاه‌های موج‌شکن، در رسوباتی با توالی لایه‌های فیلیت، کوارتز فیلیتی، کوارتزهای ریز دانه و کوارتزهای میلونیتی ساخته شده است. نیروگاه دارای دو مغار اصلی است؛ که عبارتند از مغار نیروگاه با ابعاد ۴۶ متر × ۲۲ متر × ۱۰۰ متر و مغار ترانسفورمر با ابعاد ۲۵ متر × ۱۵ متر × ۸۲/۵ متر (Sandeep, 2000).

مغار نیروگاه توسط سه تونل باسداکت به مغار ترانسفورمر متصل شده است. همچنین مغار نیروگاه توسط سه گالری ارتباطی به چاه‌های ارتباطی و به مغار ترانسفورمر متصل می‌شود. مدل ۱ و ۳ شامل دو مغار است و مدل‌های ۲ و ۴ شامل تمامی حفاریات مدل می‌باشد (شکل ۲-۸-ب). برای این تحقیق مرزهای خارجی مدل در مکعب مستطیلی با طول ۶۰۰ متر، عرض ۴۷۳ متر و ارتفاع ۵۴۰ متر در نظر گرفته شده است. هندسه مدل برای چهار مدل مشابه است (شکل ۲-۸-الف). در شکل (۲-۸-ب) کل فضاهای حفاری مدل شده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۲-۸-الف) هندسه مدل ایجاد شده ب) حفاریات مدل شده در پروژه تیستا-وی (Sandeep, 2000)

مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر در چهار مرحله حفاری شده‌اند. چاه‌های دریچه<sup>۱</sup> نیز در یک مرحله حفاری شده است. تمام تونل‌های باسداکت و گالری لوله‌ها<sup>۲</sup> در سومین مرحله حفاری مدل‌های ۲ و ۴ حفاری شدند. مدل رفتاری در مدل‌های ۱ و ۲ الاستیک و مدل‌های ۳ و ۴ پلاستیک در نظر گرفته شده است (Sandeep, 2000).

عمده مقادیر جابجایی و تمرکز تنش در مدل‌های الاستیک (مدل ۱) در مقطع ۳۶/۲۵ متر ایجاد شده که معادل ۲/۱۶ سانتی‌متر است. بر اساس نتایج این تحقیق بیشترین جابجایی در تاج نیروگاه بلافاصله در مرحله اول حفاری روی می‌دهد و در سایر مراحل حفاری از روند افزایشی کندتری برخوردار است، ولی جابجایی در دیواره مغار نیروگاه در مراحل مختلف حفاری با روند منظمی افزایش می‌یابد. جابجایی در دیواره بالا دست مغار ترانسفورمر نیز در طی مراحل مختلف حفاری افزایش می‌یابد اما به علت کوچک بودن ابعاد مغار ترانسفورمر، در مقایسه با تغییر شکل دیواره مغار نیروگاه به مقدار قابل توجهی کمتر است (Sandeep, 2000).

در مدل ۳ که توده‌سنگ تحت معیار پلاستیک موهر-کولمب مدل شده، جابجایی‌های حداکثر در نزدیک مرکز دیواره مغار نیروگاه و در حدود ۴/۴۵ سانتیمتر رخ می‌دهد. در مدل ۴ تمام فضاها حفاری شده‌اند و رفتار توده‌سنگ پلاستیک موهر-کولمب است. در این حالت جابجایی حداکثر برابر با ۴/۳ سانتیمتر در نزدیک مرکز دیواره مغار نیروگاه حاصل شده است (Sandeep, 2000).

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق به کارگیری خصوصیات پلاستیک در مدل نتایج معقول‌تری را به دنبال خواهد داشت. در جدول (۴-۲) تغییر شکل سقف و دیواره‌ها برای دو مدل ۲ و ۴ مقایسه شده است همان‌گونه که مشاهده می‌شود تنها وجه تمایز مدل ۲ و ۴ در خصوصیات توده‌سنگ تعریف شده آنها است. بر اثر حفاری گالری‌های ارتباطی و باسداکت‌ها در مدل ۴ مقدار جابجایی افزایش یافته است (Sandeep, 2000).

1- Gate Shaft  
2- draft tubes

جدول ۲-۴- مقایسه تغییر شکل‌های سقف و دیواره در مدل‌های ۲ و ۴ در پروژه تپستا-وی (Sandeep, 2000)

| محل قرار گیری   |        | بیشترین جابجایی در مدل ۲ الاستیک<br>بر حسب میلی‌متر<br>حالتی که گالری‌های ارتباطی و<br>باسداکت‌ها حفر شده‌اند | بیشترین جابجایی در مدل ۴ پلاستیک<br>بر حسب میلی‌متر<br>حالتی که گالری‌های ارتباطی و<br>باسداکت‌ها حفر شده‌اند |
|-----------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مغار نیروگاه    | دیواره | ۱/۸۸                                                                                                          | ۴/۲۰                                                                                                          |
|                 | سقف    | ۰/۳۱                                                                                                          | ۱/۸۱                                                                                                          |
| مغار ترانسفورمر | دیواره | ۰/۸۹                                                                                                          | ۲/۲۵                                                                                                          |
|                 | سقف    | ۰/۱۳                                                                                                          | ۰/۸۵                                                                                                          |

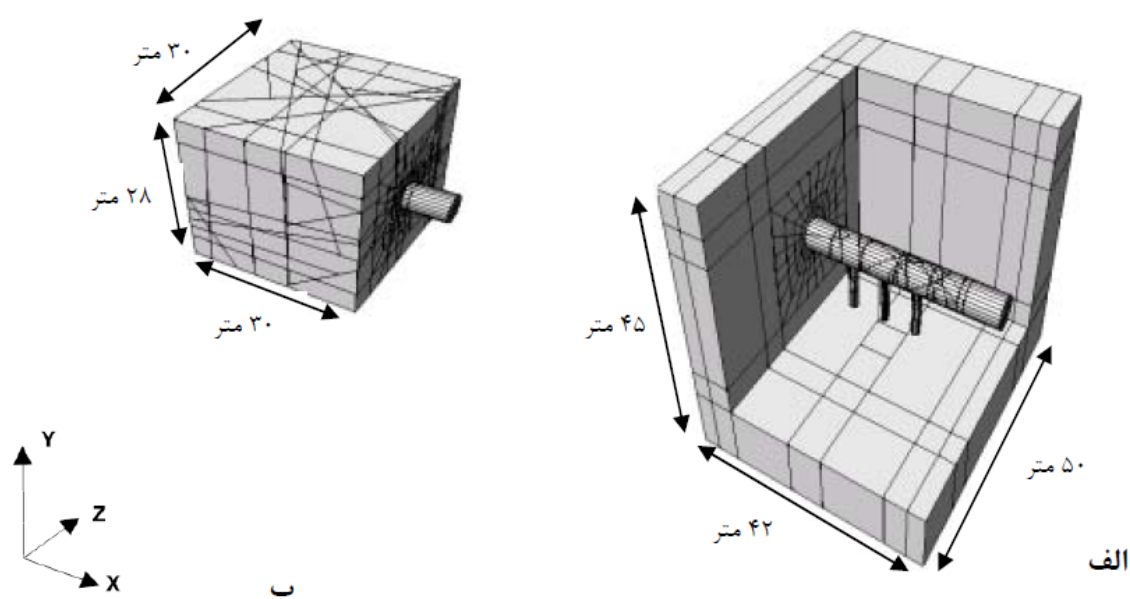
### ۲-۳-۵- بررسی پایداری تونل اصلی و چاه‌های تهنشست پسماند در سوئد

روش عددی که در این تحقیق برای بررسی رفتار توده‌سنگ انتخاب شده است روش المان مجزای سه‌بعدی با استفاده نرم‌افزار 3DEC است. هدف از این مطالعه، بررسی اثر حفاری تونل و چاه دسترسی به همراه دسته درزه‌های موجود بر رفتار توده‌سنگ اطراف تونل می‌باشد. تحلیل ارائه شده در این تحقیق بر تقاطع تونل و چاه تاکید بیشتری دارد (Hokmark, 2003).

در شکل ۲-۹ مشخصات هندسی مرزهای داخلی و خارجی مدل نشان داده شده است. در این شکل تونل اصلی با قطر ۵ متر و سه چاه تهنشست پسماند با قطر ۱/۶ متر در آن نشان داده شده است.

چاه‌های تهنشست پسماند با زاویه ۹۰ درجه به زیر تونل اصلی متصل شده‌اند. بر اساس ابعاد حفاریات مرزهای خارجی مدل (۵۰ متر در جهت محور Z، ۴۲ متر در جهت محور X و ۴۵ در جهت محور Y) تعیین شده است.

در این تحقیق شبکه ناپیوستگی‌ها در کل بلوک اعمال نشده بلکه در بلوک داخلی با ابعاد (طول ۳۰ × عرض ۳۰ × ارتفاع ۲۸ متر) اعمال شده است (شکل ۲-۹ ب). مدل ناپیوستگی‌ها بر اساس ۴۷۰ برداشت در تونل اصلی انجام شده است. بر اساس تحلیل ناپیوستگی‌ها، ۴۶ درزه موثر با شعاع تاثیر ۲ تا ۱۵ متر شناسایی شده‌اند (Hokmark, 2003).



شکل ۲-۹- الف) تونل اصلی و چاه‌های ته‌نشست پسماند مدلسازی شده در 3DEC ب) محدوده مدلسازی شده به همراه درزه‌ها و محورهای مختصات (Hokmark, 2003)

در این مدل از معیار الاستوپلاستیک موهر-کولمب برای درزه‌ها استفاده شده، که انطباق خوبی با رفتار واقعی ناپیوستگی‌ها دارد. در این حالت مقدار تنش‌ها وابسته به سختی درزه می‌باشد. در مدل الاستوپلاستیک مقدار سختی برشی ( $K_s$ ) و نرمال ( $K_n$ ) از پارامترهای مورد نیاز است. مقدار  $K_n$  برابر ۱۰۰ گیگاپاسکال بر متر و مقدار  $K_s$  برابر ۲۰ گیگاپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. بر اساس آزمایش مقاومت برشی، حد پایین زاویه اصطکاک برابر ۳۰ درجه و حد بالای آن ۴۰ درجه در نظر گرفته شده است که در آن حالت، مقدار زاویه اصطکاک ۲۰ درجه، ممکن است بسیار محافظه-کارانه باشد (Hokmark, 2003).

بیشترین جابجایی‌های توده‌سنگ در مقطع افقی چاه ته‌نشست پسماند در فاصله ۵ سانتیمتری از جداره در کف تونل معادل ۲/۲ میلیمتر برآورد شده است. جابجایی در این مقطع متاثر از حفاری تونل و حفاری چاه ته‌نشست پسماند است (Hokmark, 2003). نتایج حاصل از تحلیل مدل به شرح زیر است:

الف- مقدار عمده‌ای از تغییر شکل‌ها در توده‌سنگ در محدوده الاستیک حاصل شده است.



ب- با در نظر گرفتن همه ناپیوستگی‌ها (۲۵ درزه) تنها مقدار ناچیزی به تغییرشکل‌های سنگ در حالتی که فقط درزه‌های اطراف تقاطع‌ها در نظر گرفته شده باشد اضافه شده است.

ج- در نظر گرفتن درزه‌ها در مدل باعث تغییر توزیع تنش و ایجاد ناپیوستگی در کنش‌های تنش می‌گردد.

ه- مقدار حداکثر تنش در مدل مورد نظر به همراه درزه، حدود ۱۶ درصد بیشتر از حالتی است که درزه در مدل وارد نشده است. این نتیجه برای درزه‌هایی با زاویه اصطکاک ۲۰ درجه بدست آمده، برای زاویه ۳۰ و ۴۰ درجه مقدار تغییر تنش به ترتیب ۳ تا ۵ درصد محاسبه گردیده است (Hokmark, 2003).

## ۲-۴- مثال‌هایی در زمینه بهینه‌سازی ترتیب حفر مغارهای نیروگاهی با استفاده از روش‌های عددی

در زمینه بهینه‌سازی ترتیب حفر فضاهای زیرزمینی کارهای معدودی انجام شده است که اکثر این پروژه‌ها به صورت دو بعدی تحلیل شده‌اند. در این پروژه‌ها که از روش‌های عددی استفاده شده است، ملاک مقایسه بین ترتیب‌های مختلف حفر عمدتاً جابجایی در نظر گرفته شده است. در زمینه بهینه‌سازی ترتیب حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ مقیاس با استفاده از مدلسازی سه بعدی کار شاخصی انجام نشده است.

### ۲-۴-۱- بهینه‌سازی ترتیب حفر مغارهای سد کارون ۳

هدف از پروژه تحقیقاتی صورت گرفته بر روی نیروگاه کارون ۳، بهینه‌سازی ترتیب حفر مغارهای سد کارون ۳ با استفاده از نرم‌افزار UDEC است.

مجموعه سد و نیروگاه کارون ۳ شامل سد مخزنی و نیروگاه زیرزمینی با توان ۲۰۰۰ مگاوات است که در استان خوزستان و در ۲۸ کیلومتری جاده ایزه به شهرکرد در حال احداث می‌باشد. از جمله فضاهای زیرزمینی این طرح، مجموعه نیروگاه می‌باشد که مشتمل بر مغار نیروگاه، گالری

شیره‌های ورودی و مغار ترانسفورمر است. ابعاد این فضاها در جدول (۲-۵) آورده شده است (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).

جدول ۲-۵- ابعاد مغارهای نیروگاه، ترانسفورمر و گالری شیرها (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).

| نوع فضای زیرزمینی | طول (متر) | دهانه (متر) | ارتفاع (متر) |
|-------------------|-----------|-------------|--------------|
| مغار نیروگاه      | ۲۵۱/۱     | ۲۵/۴        | ۴۷/۷         |
| مغار ترانسفورمر   | ۲۳۴       | ۲۱          | ۲۷/۸۷        |
| گالری شیرها       | ۲۴۴/۲۸    | ۹/۷۸        | ۲۳/۵۷        |

ارتفاع و بارسنگ در ناحیه گالری شیرها و مغار نیروگاه بین ۱۷۰ تا ۲۹۰ متر و در ناحیه مغار ترانسفورمر بین ۷۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. از لحاظ زمین شناسی، محوطه نیروگاه در محل سازند آسماری که از قدیمی‌ترین سازندهای زاگرس غربی است قرار گرفته است. سنگ‌شناسی ناحیه سنگ آهک توده‌ای به رنگ خاکستری متمایل به زرد است که در بین این لایه‌ها، لایه‌های مارنی ملاحظه می‌شود (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).

اطلاعات ژئومکانیکی از دو دسته آزمایشات استخراج شده است که شامل آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند سه محوری و تک محوری و آزمایش‌های درجا مانند تغییر شکل گمانه‌ای<sup>۱</sup> و بارگذاری صفحه‌ای<sup>۲</sup> هستند. نتایج حاصل از این آزمایشات در جدول (۲-۶) آورده شده است. جهت تعیین تنش‌های درجا که از مهمترین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل می‌باشند ۲۵ آزمایش تنش‌سنجی انجام گرفته است (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).

به دلیل طبیعت ناپیوسته محیط و لزوم آگاهی کامل از مشخصات ناپیوستگی‌ها خصوصاً در مرحله شبیه‌سازی عددی، ناپیوستگی‌های موجود در محل نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که خلاصه نتایج در آن در جدول (۲-۷) آورده شده است.

<sup>۱</sup> - Borehole Deformation

<sup>۲</sup> - Plate Loading

جدول ۶-۲- خواص ژئومکانیکی مصالح سنگ در اطراف مغارهای کارون ۳ (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰)

| خواص                        | نوع سنگ  | سنگ آهک  | آهک مارنی | مارن |
|-----------------------------|----------|----------|-----------|------|
| مدول برشی (GPa)             | ۶/۵۵-۷/۲ | ۳/۸-۴/۷۵ | ۱/۶-۵/۴   |      |
| مدول حجمی (GPa)             | ۱۱/۵-۱۲  | ۶/۸-۹    | ۲/۸-۷     |      |
| نسبت پواسون                 | ۰/۲۵     | ۰/۲۵     | ۰/۲۵      |      |
| زاویه اصطکاک داخلی          | ۳۵-۴۲    | ۳۲-۴۰    | ۲۷-۴۰     |      |
| چسبندگی (MPa)               | ۱-۲/۵    | ۰/۴-۲    | ۰/۲۵-۱/۵  |      |
| دانسیته ( $\text{kg/m}^3$ ) | ۲۴۰۰     | ۲۴۰۰     | ۲۳۰۰      |      |
| مقاومت فشاری تک محوره (MPa) | ۶۰       | ۵۰       | ۱۵        |      |

جدول ۷-۲- ناپیوستگی‌ها و سیستم درزه و ترک در محل نیروگاه کارون ۳ (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰)

| نوع ناپیوستگی‌ها               | شیب (درجه) | فاصله (متر) | دوام (متر) | شکاف (متر) |
|--------------------------------|------------|-------------|------------|------------|
| لایه‌بندی، $J_{4A}$ ، $J_{1A}$ | ۱۰۲        | ۴/۵         | ۲۵۰        | ۰          |
| $J_{1B}$ ، $J_{4B}$            | ۷۷         | ۱۸          | ۲۰         | ۴          |
| $J_{2A}$                       | ۱۳۸        | ۱۸          | ۲۰         | ۴          |
| $J_3$ ، $J_{5B}$ ، $J_{2B}$    | ۲۲         | ۱۲          | ۶          | ۵          |
| $J_{5A}$                       | ۱۳۸        | ۳           | ۲۰         | ۴          |

پارامترهای رفتاری مربوط به ناپیوستگی‌ها که در شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته

است در جدول (۸-۲) ارائه شده است (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).

جدول ۸-۲- خواص ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها در پروژه‌ی کارون ۳ (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰)

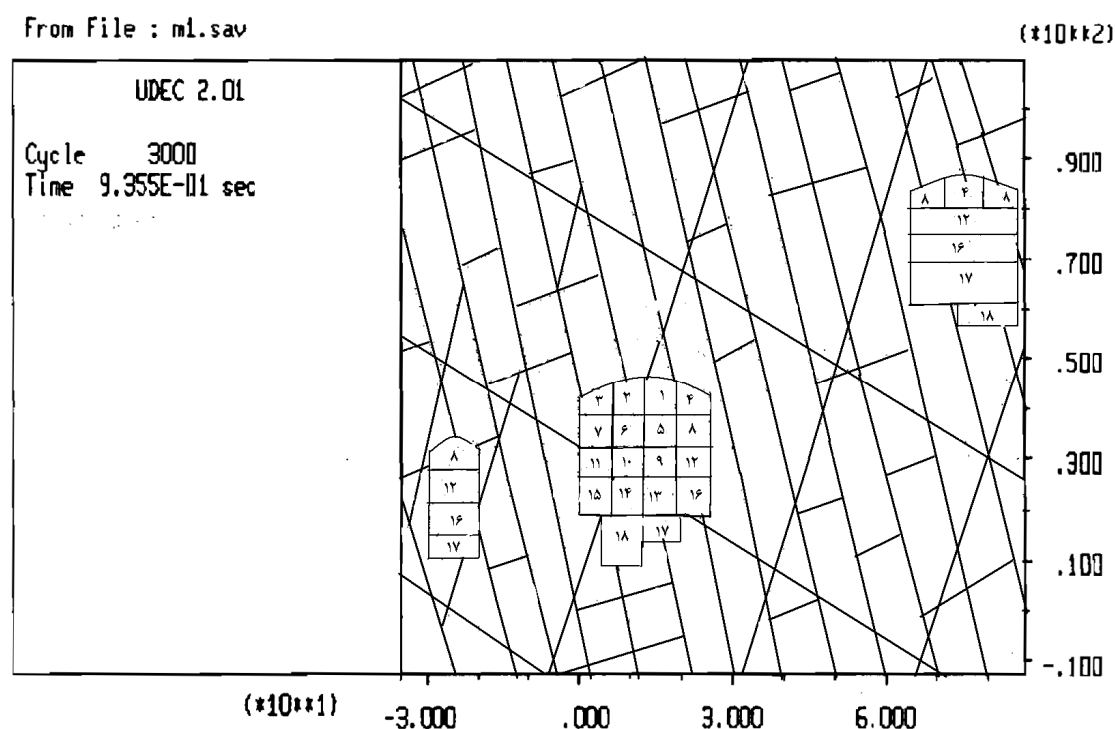
| خواص               | نوع ناپیوستگی | لایه‌بندی | دسته درزه‌ها |
|--------------------|---------------|-----------|--------------|
| سختی نرمال (GPa/m) | ۱/۲           | ۱/۲       | ۱/۲          |
| سختی برشی (GPa/m)  | ۳۲            | ۳۲        | ۳۲           |
| زاویه اصطکاک داخلی | ۴۵            | ۴۵        | ۴۵           |
| چسبندگی (MPa)      | ۰/۴           | ۰/۴       | ۰/۴          |
| زاویه اتساع (درجه) | ۵             | ۵         | ۵            |

پس از انجام آنالیز برگشتی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای رفتاری مصالح سنگ و درزه،

برای حفاری مغار نیروگاه ۶ مدل مختلف ساخته شد. بررسی و مقایسه مدل‌های شش‌گانه از نظر

عددی حائز اهمیت است اما در بعضی از آنها از نظر اجرایی معایبی وجود دارد. در مدل اول، حفاری

در ۱۸ مرحله انجام گرفته است در حالی که در مدل‌های دوم تا پنجم در ۱۴ مرحله انجام گرفته و در مدل ششم، حفاری در ۶ مرحله انجام شده است. مدل‌های سوم، چهارم و ششم دارای مشکلات اجرایی می‌باشند. این مدل‌ها تنها به دلیل کنترل عددی ساخته شده‌اند. پس از بررسی و مطالعه روی نمودارهای تنش و جابجایی ملاحظه می‌گردد که در اکثر نقاط، میزان کمینه تنش‌های حداکثر و جابجایی‌ها مربوط به مدل حفاری اول و یا پنجم می‌باشد. اما با توجه به اینکه از نظر اجرایی روش حفاری با تعداد مراحل کمتر مناسب‌تر می‌باشد لذا مدل مراحل پنجم که از نظر پایداری تفاوت چندانی با مدل نداشته و دارای ۱۴ مرحله حفاری می‌باشد به عنوان گزینه بهینه انتخاب می‌شود. مراحل حفاری در مدل اول که بر اساس نرم‌افزار UDEC بدست آمده، در شکل ۲-۱۰ آورده است (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰).



شکل ۲-۱۰- مراحل حفاری مدل اول (صدقیانی و جمشیدی چناری، ۱۳۸۰)

۲-۴-۲- بررسی اثر مراحل حفاری مغار توسعه بر پایداری فضاهای زیرزمینی مجاور در سد مسجدسلیمان  
در پروژه نیروگاه مسجد سلیمان، بررسی توالی حفاری اجرا شده و تأثیر آن بر پایداری مغار  
طرح توسعه و سپس ارائه پیشنهادهاى مختلف و بررسی یکایک آنها و تحلیل تأثیر آنها بر پایداری

کل سازه و در نهایت آن انتخاب گزینه برتر و بهینه بررسی شده است. قبل از تحلیل توالی های پیشنهادی با استفاده از نرم افزار و ارائه طرح بهینه با استفاده از نتایج حاصله از داده های رفتارنگاری و ابزار بندی و همچنین با استفاده از تکنیک های مختلف آنالیز برگشتی به تدقیق پارامترهای موجود و ارزش دادن به مدل ایجاد شده پرداخته شده است. در این راه از نرم افزار FLAC که از روش تفاضل محدود به منظور انجام تحلیل ها استفاده می کند، بهره گرفته شده است. پس از تحلیل کامل مقاطع پیشنهادی و پس از بررسی مقادیر جابجایی ها و تنش ها و نیز نیروهای وارده به سیستم های مختلف نگهدارنده سازه مقطع بهینه جهت حفاری مغار اصلی طرح و توسعه سد مسجد سلیمان انتخاب گردیده است (آقاخانی، ۱۳۸۱).

## ۲-۵- نتیجه گیری به منظور روش مدلسازی در پروژه نیروگاه سیاه بیشه

با توجه به مطالب عنوان شده در این فصل می توان نتایج زیر را بیان نمود:

الف- بر اساس بررسی های انجام شده در پروژه نیروگاه سربسیایلام، مدل های پیوسته می توانند مناطق پلاستیک را همانند روش های ناپیوسته نشان دهند. اما نکته قابل توجه در مدل های ناپیوسته نشان دادن مناطق پلاستیک و جابجایی های برشی و بلوک هایی است که در حال سقوط به داخل فضای حفاری شده هستند. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل های انجام شده در پروژه های نیروگاه سربسیایلام و مسجد سلیمان روش های ناپیوسته نتایج واقع گرایانه تری نسبت به روش های پیوسته ارائه می دهند. بر اساس تحلیل های انجام شده در مغارهای نیروگاه سربسیایلام، تست-وی و مسجد سلیمان استفاده از روش های مدلسازی پیوسته حالت دور از واقعیتی را از رفتار توده سنگ نشان می دهد که گاه محافظه کارانه و گاه ایده آل گرایانه است. بنابراین به منظور رسیدن به نتایج دقیق تر و واقعی تر باید با جمع آوری دقیق اطلاعات زمین شناسی و توده سنگ از روش های ناپیوسته استفاده نمود که به طور مثال می توان به نرم افزار 3DEC به کار برده شده در پروژه بررسی پایداری تونل اصلی و چاه های ته نشست پسماند در سوئد اشاره کرد.

ب- نتایج بدست آمده از پروژه‌ی سریسایلام، نشانگر تفاوت مهم بین تنش‌های محاسبه شده در حالت دو بعدی و سه‌بعدی در اطراف سازه‌های زیرزمینی است. با توجه به مطالب ارائه شده استفاده از روش‌های سه‌بعدی در تحلیل فضاهاى زیرزمینی متقاطع ضروری است. ولی نباید فراموش کرد که روش‌های سه‌بعدی زمان‌بر بوده و نیازمند اطلاعات بیشتری نسبت به روش‌های دو بعدی است و مهارت بیشتری می‌طلبند.

ج- بر اساس نتایج بدست آمده از پروژه نیروگاه مسجد سلیمان خروجی‌های حاصل از نرم‌افزار 3DEC نسبت به نرم‌افزار Flac3D به نتایج ابزار دقیق نزدیک‌تر بوده است.

د- بر اساس نتایج بدست آمده از پروژه نیروگاه مسجد سلیمان مدلسازی سه‌بعدی نسبت به دوبعدی مطابقت بیشتری با سنگ‌های ضعیف و غیرهموژن داشته است.

مشخصات ژئومکانیکی ساختمانگاه مغارها و

گالری های ارتباطی نیروگاه سد سیاه بیشه

## ۳-۱- مقدمه

به‌طور کلی حفر فضاهای زیرزمینی، بیش از همه فعالیت‌های عمرانی نیاز به شناسایی زمین و در نتیجه انجام مطالعات زمین شناسی دارد. این‌گونه سازه‌ها باید در زمینی مطمئن و مقاوم احداث شوند تا از پایداری لازم برخوردار باشد. بنابراین در انتخاب و تعیین محل مناسب برای حفر این‌گونه سازه‌ها و همچنین برای انتخاب روش اجرا و نوع نگهداری، شرایط زمین شناسی مهندسی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی منطقه یکی از عوامل و پارامترهای اصلی محسوب می‌شود و مسلماً بدون در نظر گرفتن این عامل اجرای این سازه‌ها با مشکلات و مسائل متعددی مواجه خواهد شد.

درک این مطلب که زمین مصالح سازنده فضای زیرزمینی را تشکیل می‌دهد نه پوشش‌های موقت و دائمی، باعث شده است که امروزه طراحان فضاهای زیرزمینی دستورالعمل زیر را در سازه‌های سنگی به کار ببندند (Goodman, 1980):

۱- مطالعه دقیق شرایط زمین شناسی و ژئومکانیکی

۲- تطبیق هر چه بهتر طرح و اجرای پروژه با شرایط طبیعی زمین

۳- اعمال تغییرات لازم در حین اجرا

۴- ثبت دائمی حرکات زمین در اطراف فضای ایجاد شده

مطالعات زمین شناسی مهندسی در محدوده مورد مطالعه، به‌منظور تعیین خصوصیات مهندسی و ارزیابی رفتار مکانیکی توده‌سنگ در برگیرنده صورت پذیرفته است. هدف اصلی این مطالعه دستیابی به اطلاعاتی است که بتوان با استفاده از آنها شرایط ژئومکانیکی و وضعیت پایداری مغارها و گالری‌ها را در توده‌سنگ‌ها پیش‌بینی نمود.

جمع‌آوری اطلاعات ژئومکانیکی و زمین شناسی محدوده‌ی مغارها و گالری‌های ارتباطی نیروگاه سد سیاه بیشه با نظارت بخش آزمایشگاهی شرکت لامایر آلمان انجام گرفته و از این نتایج در



طراحی برای ارزیابی پایداری سازه نیروگاه زیرزمینی استفاده شده است.

### ۲-۳- معرفی محل قرارگیری سد و نیروگاه سیاه بیشه

محل طرح سد و نیروگاه تلمبه - ذخیره‌ای سیاه بیشه در نزدیکی دهکده سیاه بیشه ۱۰ کیلومتر بعد از تونل کندوان به طرف شمال در مسیر جاده کرج- چالوس و در فاصله ۱۲۵ کیلومتری از تهران قرار گرفته است (شکل ۳-۱) ارتفاع ساختگاه پروژه بین ۱۹۰۰ الی ۲۴۰۰ متر نسبت به سطح دریا متغیر بوده و بلندترین نقطه حوضه آبریز آن ۳۸۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).



شکل ۳-۱- محل قرارگیری و راه‌های دسترسی سد و نیروگاه سیاه بیشه (www.fa.iwpc.co.ir)

جاده مزبور مسیر روخانه چالوس را که جریان آن به سوی شمال است همراهی می‌کند. این طرح علاوه بر دو سد در تراز بالا و پایین بر روی رودخانه چالوس مشتمل بر سازه‌های دیگری نظیر

(سرریز، تونل‌های انحراف، تونل‌های تزریق، زهکش و غیره) و یک نیروگاه زیرزمینی و سازه‌های وابسته تونل‌های آبرسان بالا دست و پایین دست، مغار نیروگاه، مغار ترانسفورمر، گالری‌های ارتباطی، تونل‌های زهکشی، S شفت‌های تحت فشار، مخزن فشارشکن و سازه‌های ورودی و خروجی آب به نیروگاه است. در دو مخزن سد بالادست و پایین دست، آب رودخانه چالوس و سیلاب‌های محلی جمع‌آوری می‌شود. حوضه آبریز سد بالا و پایین ۱۹ کیلومتر مربع است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

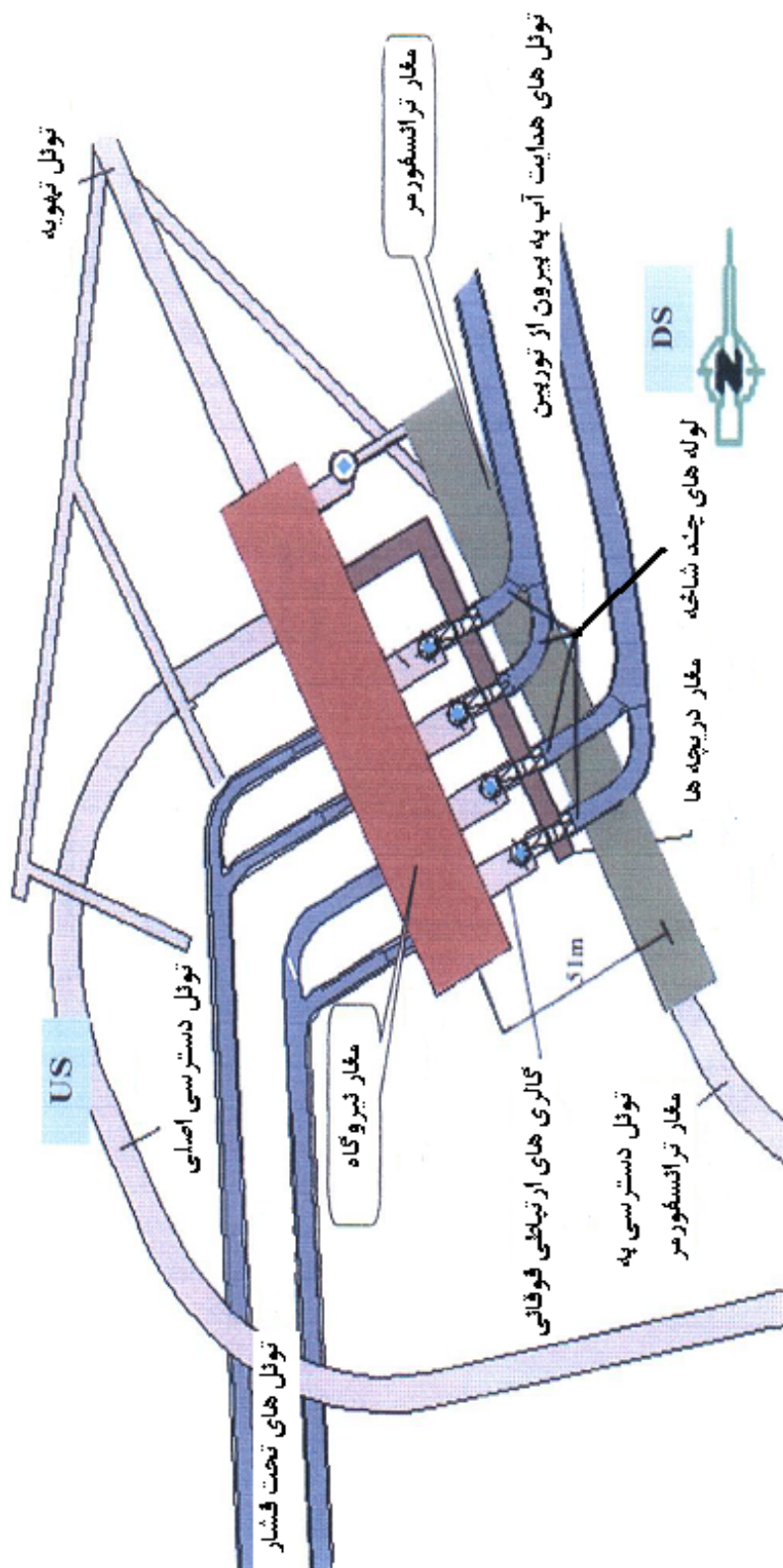
در اشکال (۳-۲) و (۳-۳) به ترتیب پلان‌های مجموعه حفاریات نیروگاه سد سیاه بیشه و برش عرضی از جانمایی مغارها و گالری‌های ارتباطی نشان داده شده است.

### ۳-۳- مشخصات سد و حفاریات مورد نیاز

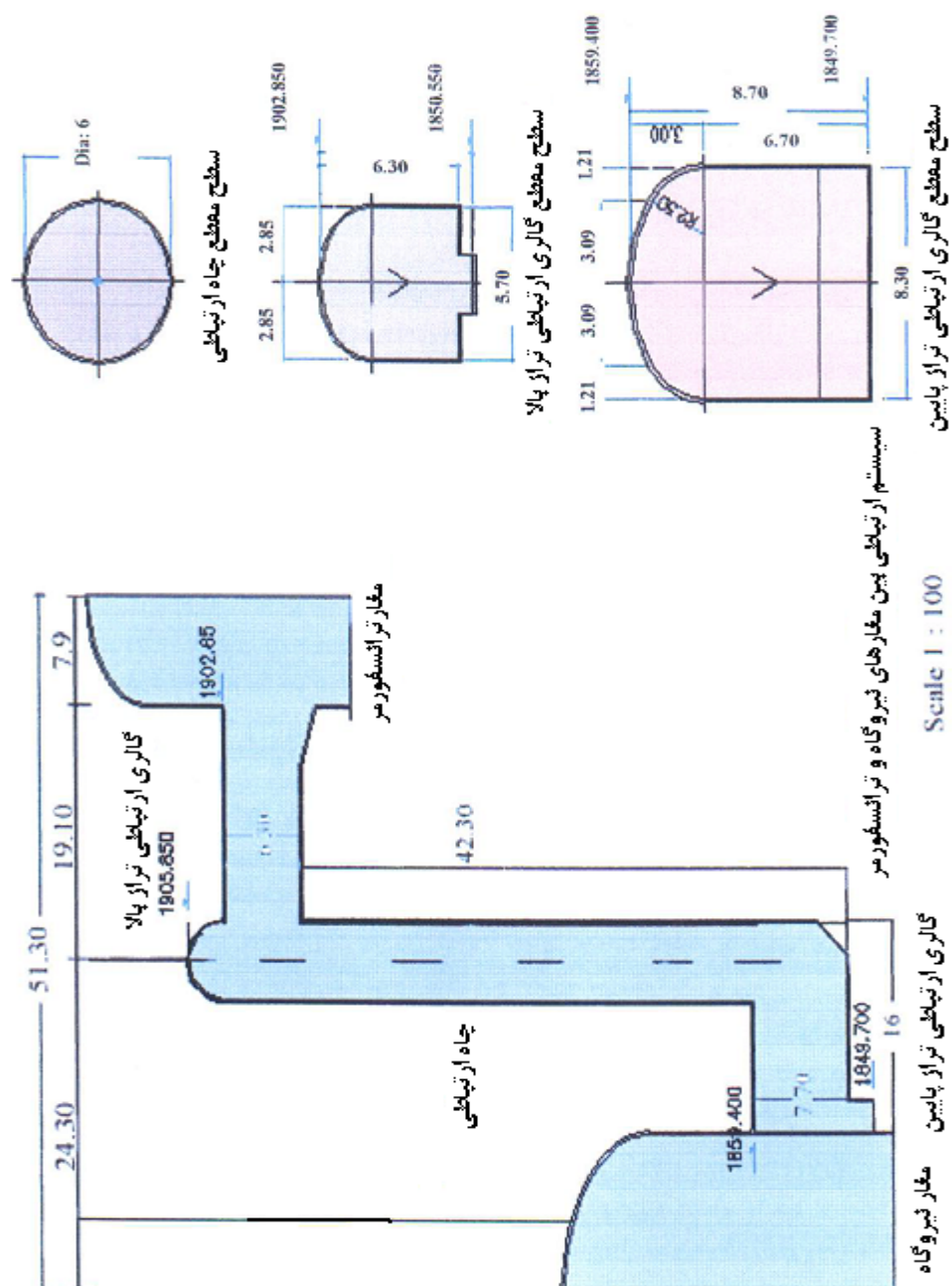
ارتفاع سد بالادست در بخش مرکزی حداکثر ۸۵ متر، طول تاج سد ۴۲۶ متر، عرض تاج ۱۲ متر و حجم آن  $۱۰۶ \times ۲/۴$  متر مکعب خواهد بود. سد در یک دره نامتقارن V شکل در بخش بالایی رودخانه چالوس قرار گرفته است. محدوده پی سد با توجه به مشخصات ارائه شده تقریباً ۶۰۰۰۰ متر مربع خواهد بود (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

سدها از نوع سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD)<sup>۱</sup> بوده و ارتفاع سد پایین‌دست در بخش مرکزی حداکثر ۱۰۴ متر، طول تاج ۳۳۰ متر، عرض تاج ۱۲ متر است. اختلاف ارتفاع این دو سد از یکدیگر ۵۰۰ متر بوده (۲۴۱۰ سد بالادست-۱۹۱۱ سد پایین‌دست) و از این اختلاف ارتفاع در تولید برق استفاده می‌شود. حجم مفید مخزن سد بالا و پایین به ترتیب ۳,۵۲۷,۰۰۰ و ۳,۶۱۴,۰۰۰ متر مکعب برآورده شد است. مطالعات زمین شناسی و ژئومکانیک ساختگاه در سه مرحله به انجام رسیده

1- Concrete Faced Rockfill Dams



شکل ۳-۲- پلان مجموعه حفريات نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب)



شکل ۳-۳- برش عرضی از جانمایی مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر و مقاطع مختلف گالری‌های ارتباطی نیروگاه سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تالیه، ۱۳۸۴ ب)

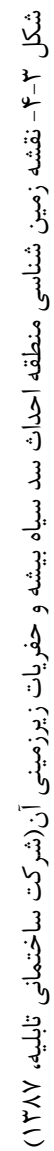
و در طی آن نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱/۲۰۰۰ از ساختگاه طرح تهیه شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

### ۳-۴- زمین شناسی عمومی محدوده مغارها و گالری‌های ارتباطی

محدوده ساختگاه طرح نیروگاه و سد تلمبه - ذخیره‌ای سیاه بیشه در تقسیمات زمین شناسی ساختمانی ایران در بلوک ساختمانی البرز قرار گرفته است این بلوک در فاز کوهزائی آلپی شکل گرفته و محدوده آن با تراست‌ها و گسل‌هایی با شیب تند مشخص می‌گردد. روند عمومی این عوارض طبیعی شمال غرب-جنوب شرق که در دامنه شمالی خود به وسیله گسل‌های متعدد و بزرگ بریده شده است، در این آنتیکلینال ردیف‌شدگی چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی از پرکامبرین تا عهد حاضر مشاهده می‌شود. غالب تحرکات تکتونیکی در این ناحیه از لحاظ سنی بسیار جوان بوده بطوریکه در اثر وجود گسل‌های متعدد زمین لغزش‌های بزرگ و صخره‌های تند حاصل شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

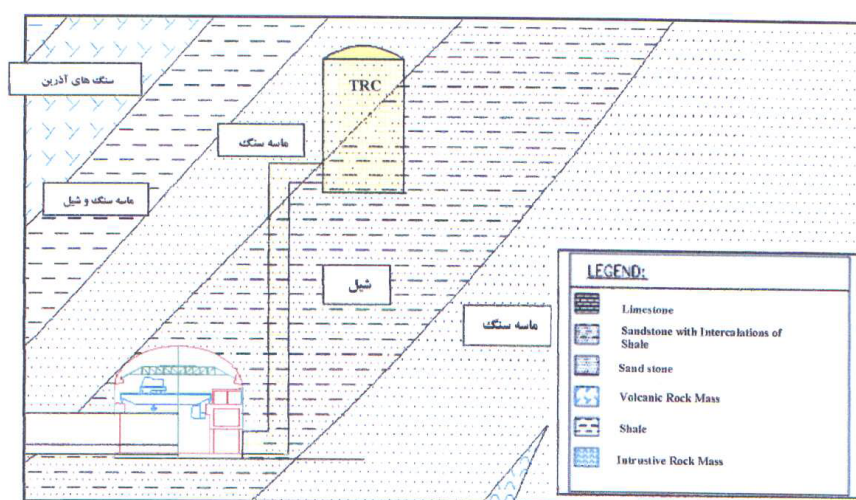
محل قرارگیری دو مغار نیروگاه و تراسفورمر از لحاظ زمین شناسی متعلق به دوره پرمین است. مغارها در سازند درود بالایی قرار خواهند گرفت. لایه‌ها از لایه‌های عمدتاً رسوبی و سنگ‌های آذرین تشکیل شده است. پس از برداشت و جمع‌بندی نتایج محل تقریبی احداث مغارها در توالی لایه‌های ماسه‌سنگ کواتزیتی، لای سنگ شیلی و سنگ آذرین ارزیابی شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب). نقشه زمین شناسی منطقه احداث سد سیاه بیشه و حفاریات زیرزمینی آن در شکل (۳-۴) آورده شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷). در شکل (۳-۵) مقطع زمین شناسی از لایه‌بندی عمده محدوده مغارها و گالری‌های ارتباطی نشان داده شده است. حفاریات زیرزمینی سد سیاه بیشه از لحاظ زمین شناسی دارای ۶ مقطع مختلف می‌باشند. محدوده مقاطع زمین شناسی در طول مغار نیروگاه در جدول ۳-۱ آورده شده است. به‌عنوان مثال در اشکال (۳-۶) و (۳-۷) و (۳-۸) مقاطع شماتیک زمین شناسی شماره‌ی ۱ و ۲ و ۵ آورده شده است.





جدول ۳-۱- محدوده مقاطع زمین شناسی در طول مغار نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷).

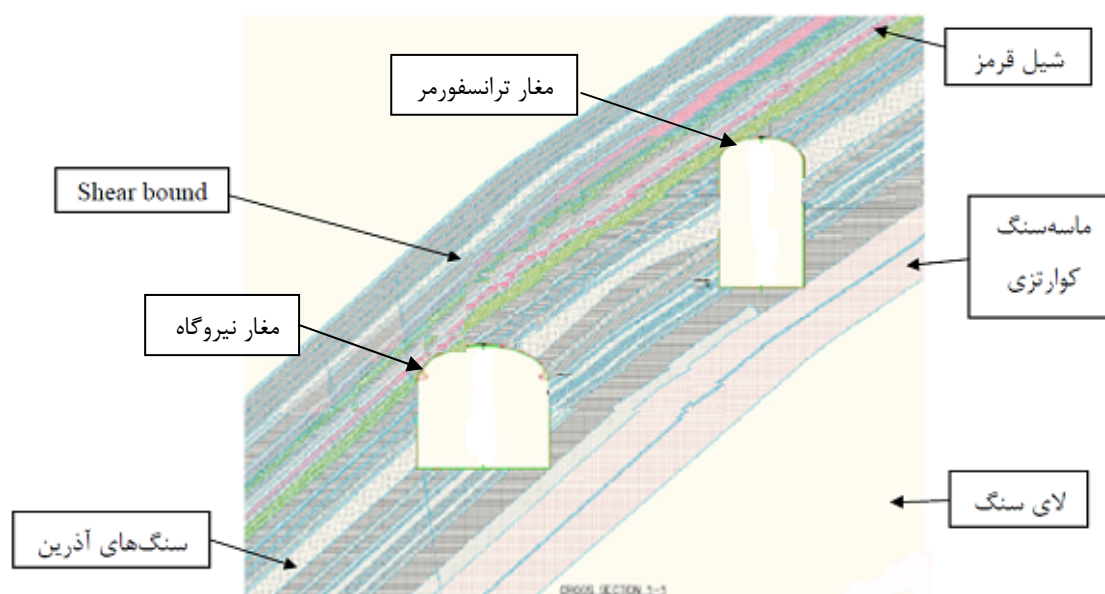
| مقطع زمین شناسی | فاصله از ابتدای مغار نیروگاه<br>(بر حسب متر) |
|-----------------|----------------------------------------------|
| ۱               | ۰ تا ۳۶                                      |
| ۲               | ۳۶ تا ۶۵                                     |
| ۳               | ۶۵ تا ۸۵                                     |
| ۴               | ۸۵ تا ۱۰۰                                    |
| ۵               | ۱۰۰ تا ۱۱۰                                   |
| ۶               | ۱۱۰ تا ۱۳۱/۴                                 |



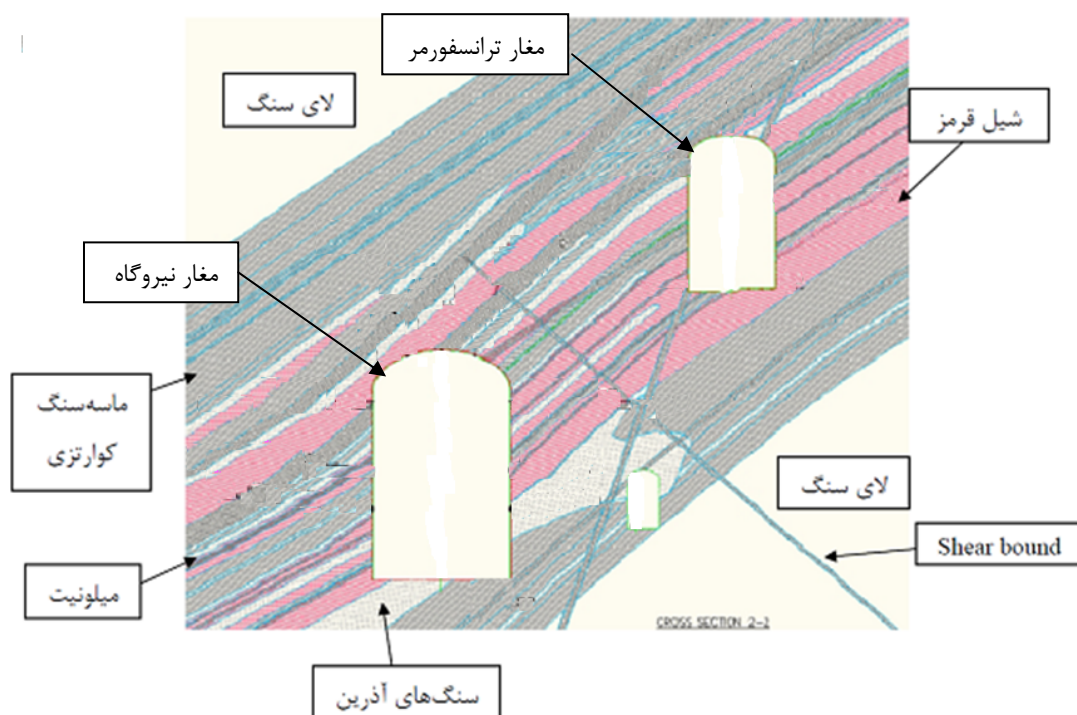
شکل ۳-۵- مقطع شماتیک زمین شناسی محدوده قرارگیری مغارها و گالری‌های ارتباطی (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

### ۳-۵- سنگ شناسی منطقه

سنگ‌های رسوبی در محدوده حفریات عمدتاً ماسه سنگ کواتزی، لای سنگ شیلی به رنگ سیاه و قرمز متمایل به قهوه‌ای و سنگ آهک سیاه متمایل به خاکستری هستند. ضخامت لایه‌ها بین ۲ سانتیمتر تا ۳/۵ متر متغیر است. متوسط ضخامت در اکثر لایه‌ها در حدود ۳۲ سانتیمتر می‌باشد.

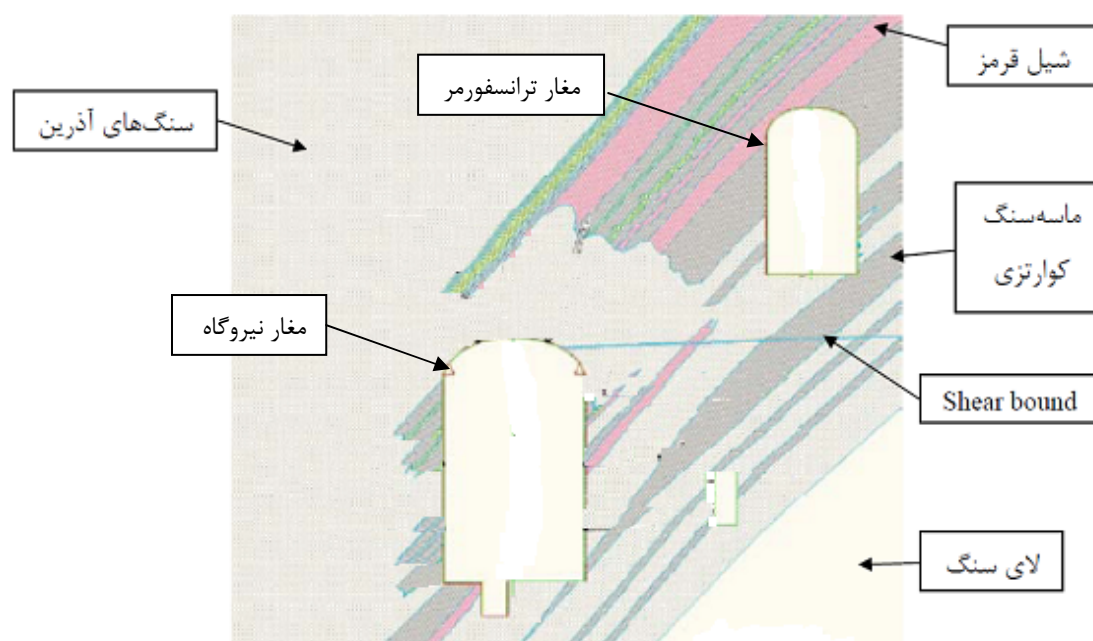


شکل ۳-۶- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ۱ محدوده قرارگیری مغارها (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).



شکل ۳-۷- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ۲ محدوده قرارگیری مغارها (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).





شکل ۳-۸- مقطع شماتیک زمین شناسی شماره ۵ محدوده قرارگیری مغارها (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

سنگ‌های آذرین عبارتند از: داسیت، بازالت اسپلیتی لاتیت که به صورت دایک و سیل در بین لایه‌های سنگ رسوبی قرار گرفته‌اند. در بخش انتهایی مغارها توده‌های نفوذی به صورت گسترده‌تری در لایه‌های رسوبی نفوذ کرده‌اند (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

### ۳-۶- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده سازه‌های زیرزمینی

تعیین مشخصات ژئومکانیکی اطراف سازه‌های زیرزمینی در سد پایین‌دست سیاه بیشه طی سه برنامه تحقیقاتی اکتشافی انجام شده است. در برنامه اول مطالعه امکان‌سنجی ایجاد تلمبه‌خانه‌های ذخیره‌ای در کوه‌های البرز با مشارکت ترادیشنال - پایاب<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۷ میلادی انجام شده است. در این مطالعه سه پتانسیل برای احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای پیشنهاد شده است.

1- Traditional-Payab

برنامه دوم تحقیقاتی روی پتانسیل سیاه بیشه تمرکز یافته و در این برنامه جستجوهای زمین شناسی و جانمایی سازه‌های زیرزمینی توسط همان مجریان مشارکت برنامه اول تا سال ۱۹۸۲ انجام شده است. در برنامه سوم مکان‌های تعیین شده برای مغارها مجدداً بررسی شده است. این برنامه توسط مشارکت مشانیر - لامایر<sup>۱</sup> تا سال ۱۹۸۵ انجام شده است. در برنامه‌های فوق به‌منظور شناسایی وضعیت زمین شناسی زیرسطحی حفریات مختلفی انجام شده است.

در برنامه دوم اقدام به حفر یک گالری اصلی به طول ۳۲۰ متر و با دو تونل دسترسی منشعب شده به طول‌های ۱۵۰ و ۵۰ متر، حفر ۲ گمانه جمعاً به طول ۱۴۰/۵ متر در تونل دسترسی اصلی و حفر ۱۴ گمانه جمعاً به طول ۶۸۰ متر در شاخه اول تونل دسترسی شده است. در برنامه سوم اقدام به حفر یک گالری دنباله‌رو<sup>۲</sup> به طول ۱۹۶/۱۵ متر و حفر ۱۵ گمانه جمعاً به طول ۹۵۶ متر شده است. همچنین از تونل‌ها و گمانه‌ها برداشت‌های زمین شناسی (درزه‌برداری، تعیین گسل، ضخامت لایه‌ها و غیره) شده است. با استفاده از این گمانه‌ها مجموعاً اطلاعات اولیه مناسبی از ویژگی‌های توده‌سنگ در برگیرنده پروژه حاصل شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

### ۳-۶-۱- نتایج آزمایشات آزمایشگاهی و برجا

برای دستیابی به پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های مختلف، آزمایشات آزمایشگاهی از قبیل آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوره، بار نقطه‌ای، آزمون برزیلی و آزمایشات فیزیکی (تعیین دانسیته، تخلخل، جذب آب) انجام شده است. با استفاده از نتایج این آزمایشات خصوصیات سنگ بکر در محدوده مغارها مشخص شده است. که خلاصه این نتایج در جدول (۳-۲) ارائه شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۵ الف).

2- Moshanir-Lahmayer

3- Vault Adit

به منظور تعیین مدول ارتجاعی توده سنگ، آزمون‌های برجا از قبیل اتساع سنجی<sup>۱</sup>، جک

تخت<sup>۲</sup> و اندازه‌گیری تنش برجا به روش بیش‌مغزه‌گیری انجام شده است. محل انجام این آزمون‌ها

جدول ۳-۲- خصوصیات سنگ بکر دربرگیرنده مغارها و گالری‌های ارتباطی حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی

(شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۵ الف)

| خصوصیات سنگ  |               |             |                 |                             |                            | جنس سنگ          |
|--------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|
| زاویه اصطکاک | چسبندگی (MPa) | نسبت پواسون | مدول یانگ (GPa) | مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa) | چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ ) |                  |
| ۴۷           | ۱/۳           | ۰/۲۴        | ۱۱/۲۵           | ۲۷/۵                        | ۲/۶۳                       | لای سنگ          |
| ۳۲/۸-۳۹      | ۰/۷۴-۰/۹۳     | ۰/۱۴-۰/۲۶   | ۵/۲۵-۶          | ۲۸-۵۰                       | ۲/۷۹                       | شیل قرمز         |
| ۴۲/۴-۵۰/۴    | ۱/۲۸-۱/۵۲     | ۰/۲         | ۱۰/۵-۱۲         | ۶۲-۸۵                       | ۲/۸۱                       | ماسه سنگ کوارتزی |
| ۴۳/۲-۵۱/۳    | ۱/۳۶-۱/۶۵     | ۰/۲۵        | ۹/۶-۱۳/۸        | ۴۱/۱                        | ۲/۷۲                       | ملافیر           |
| ۳۰/۴-۳۴/۲    | ۰/۷۴-۰/۸۸     | ۰/۲۵        | ۵/۵             | -                           | ۲/۵۲                       | میلونیت          |

عمدتاً در گالری دنباله‌رو می‌باشد. نتایج حاصل از آزمایش برجا جک صفحه‌ای در جدول (۳-۳) نشان

داده شده است. این نتایج شامل مدول یانگ و نسبت پواسون برجا می‌باشد.

جدول ۳-۳- نتایج آزمایش برجای جک تخت (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب)

| نسبت پواسون برجا (ν) | مدول ارتجاعی برجا (E) (GPa) | جنس سنگ          |
|----------------------|-----------------------------|------------------|
| ۰/۲                  | ۱۵                          | ماسه سنگ کواتزیت |
| ۰/۲۵                 | ۷/۵                         | شیل قرمز         |

1- Dilatometer Test

2- Large Flat Jack Test

بدلیل متغیر بودن ضخامت‌های لایه‌های موجود در توده‌سنگ مورد نظر و لزوم در نظر گرفتن خصوصیات توده‌سنگ برای ساخت مدل معرف توده‌سنگ، پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ نیز از طریق آزمایشات برجا اندازه‌گیری شده است. در جدول (۳-۴) خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ حفريات نیروگاه سیاه بیشه نشان داده شده است. در تعیین خصوصیات جدول (۳-۴) از ضریب اغتشاش<sup>۱</sup> که در سال ۲۰۰۲ توسط هوک ارائه شده، استفاده گردید. ضریب اغتشاش متأثر از روش حفاری بوده و بر اساس کیفیت دیواره‌های برجا مانده پس از حفاری تعیین می‌گردد. با توجه به روش حفاری مقدار ضریب اغتشاش که با D نشان داده می‌شود، معادل  $0/7$  به‌عنوان خصوصیات توده‌سنگ در مدل لحاظ شده است.

مقدار نسبت تنش‌های افقی و قائم (K) بر اساس آزمایش‌های بیش‌مغزه‌گیری در دو نقطه اندازه‌گیری شده است. محل آزمایش‌ها در گالری دنباله‌رو بوده است. بر اساس آزمایشات صورت پذیرفته مقادیر بدست آمده از  $0/66$  تا  $1/33$  متغیر است، لذا بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات برجا و لحاظ نمودن شرایط تکتونیکی محدوده حفريات، مقدار K معادل  $1/1$  به‌عنوان نسبت بین تنش‌های افقی و قائم در هر دو راستای x و y پیشنهاد شده است. نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی در محدوده حفريات مغارها بیانگر بالا بودن سطح تنش‌های افقی برجا است، وجود گسل‌های رورانده و معکوس در این محدوده دلیل دیگری بر بالا بودن تنش‌های افقی می‌باشد. با توجه به نزدیکی محل آزمون برجای بیش‌مغزه‌گیری گالری دنباله‌رو به مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر مقدار K به‌خوبی مبین وضعیت تنش‌های برجا در محدوده حفريات خواهد بود (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۵ الف).

## ۷-۲- مشخصات ناپیوستگی‌ها

مشخصات ناپیوستگی‌ها بر رفتار ژئومکانیکی توده‌سنگ تاثیر بسزایی دارند، این مشخصات را

جدول ۳-۴- خواص توده‌سنگ در محدوده فضای زیرزمینی نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۵ الف)

| D: (Disturbance Factor)     |     |              |    | D=۰                   |            |                     |            | D=۰/۷                 |            |                     |            |
|-----------------------------|-----|--------------|----|-----------------------|------------|---------------------|------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|
| خصوصیات توده سنگ<br>جنس سنگ | GSI | UCS<br>(MPa) | mi | $\varphi$<br>(Degree) | C<br>(MPa) | $\sigma_c$<br>(MPa) | E<br>(GPa) | $\varphi$<br>(Degree) | C<br>(MPa) | $\sigma_c$<br>(MPa) | E<br>(GPa) |
| ماسه سنگ                    | ۵۳  | ۸۵           | ۲۰ | ۵۳                    | ۱/۶        | ۲۲                  | ۱۱         | ۴۶                    | ۱/۱        | ۱۴                  | ۷/۱        |
| شیل قرمز                    | ۴۸  | ۵۰           | ۹  | ۴۱                    | ۰/۹۸       | ۷/۹                 | ۶/۳        | ۳۲                    | ۰/۶۶       | ۴/۷                 | ۴/۱        |
| ملافیر                      | -   | -            | -  | ۵۴                    | ۱/۷        | -                   | ۱۳/۸       | ۴۸                    | ۱/۳        | -                   | ۹/۶۶       |
| میلونیت                     | -   | -            | -  | ۳۸                    | ۰/۹۸       | -                   | ۵/۵        | ۲۹                    | ۰/۶۶       | -                   | ۵/۵        |

می‌توان در دو گروه ویژگی‌های هندسی و ویژگی‌های مکانیکی دسته‌بندی کرد. ویژگی‌های دسته اول شامل موقعیت فضایی و هندسه ناپیوستگی‌ها (جهت شیب، زاویه شیب، تعداد ناپیوستگی‌ها، فاصله-داری و تداوم)، ویژگی دوم شامل شرایط سطوح ناپیوستگی‌ها (زبری، موج‌داری، مقاومت دیواره، بازشدگی، مواد پرکننده و غیره). هندسه ناپیوستگی‌های موجود بر اساس برداشت‌های ضمن حفاری در سقف مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر اصلاح شده و مشخصات درزه‌ها به کمک نرم‌افزار Dips مورد بررسی قرار گرفته است. درزه‌های عمده موجود به‌عنوان پارامترهای ورودی ناپیوستگی در مدلسازی لحاظ گردیده است. در جدول (۳-۵) خصوصیات هندسی و مکانیکی درزه‌های موجود در توده سنگ ارائه شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب). بر اساس جدول ۳-۵ می‌توان به این نتیجه رسید که محیط قرار گیری مغارها کاملاً درزه‌دار است. ولی با توجه به اینکه بعضی از دسته درزه‌ها

جدول ۳-۵- ویژگی عمده‌ترین ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب)

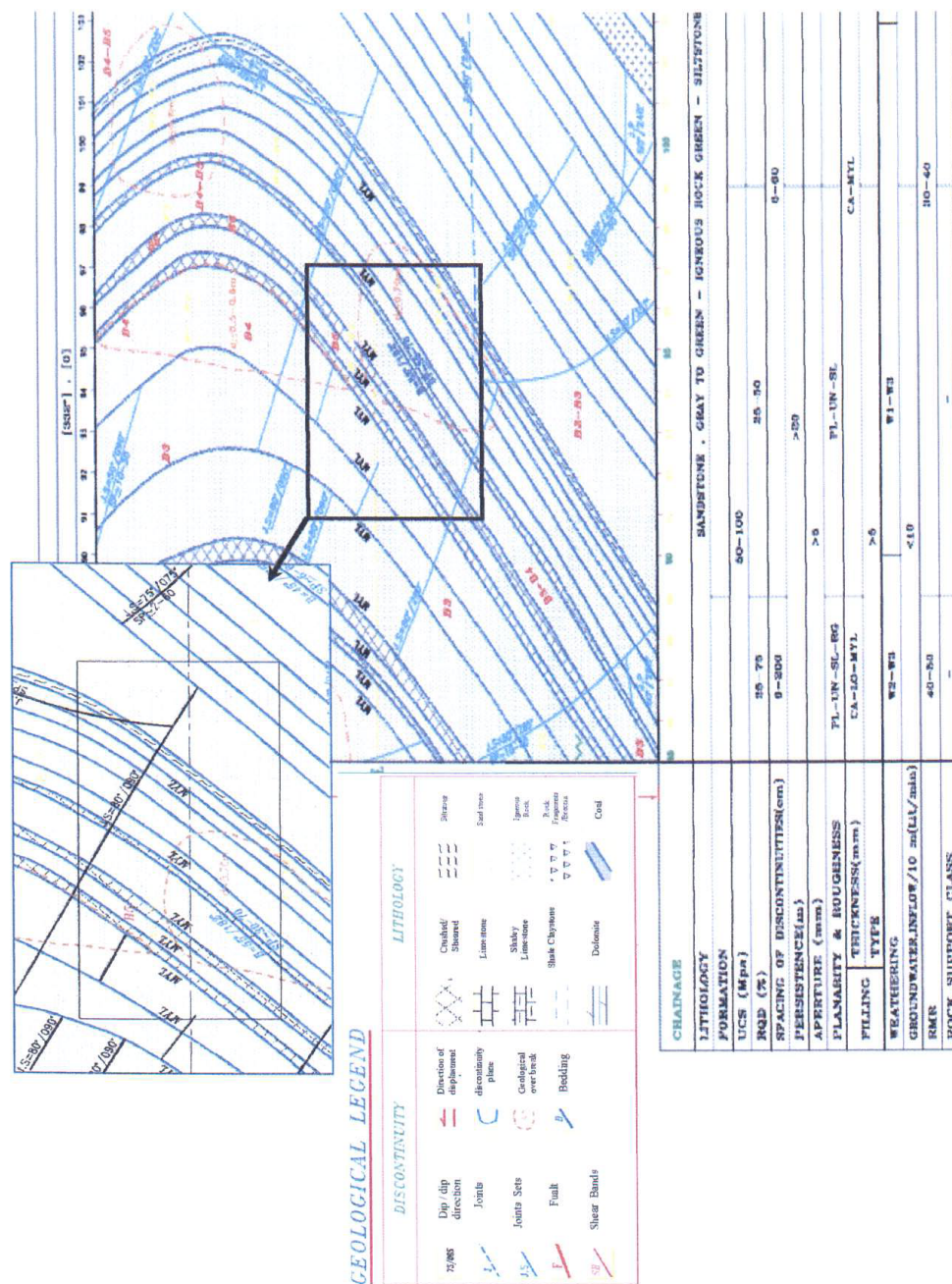
| مشخصات ناپیوستگی<br>سطوح ناپیوستگی | شیب<br>(درجه) | جهت شیب<br>(درجه) | فاصله‌داری<br>(متر) | سختی نرمال<br>(GPa/m) | سختی برشی<br>(GPa/m) | زاویه<br>اصطکاک |
|------------------------------------|---------------|-------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| لایه‌بندی                          | ۶۰            | ۱۴۷               | متغیر               | ۲۰                    | ۷/۵                  | ۲۵              |
| دسته درزه ۱                        | ۷۰            | ۲۹۵               | ۰/۵                 | ۲۰                    | ۷                    | ۳۰              |
| دسته درزه ۲                        | ۶۰            | ۱۷۵               | ۱/۲                 | ۲۰                    | ۷                    | ۳۰              |
| دسته درزه ۳                        | ۷۶            | ۹۲                | ۱                   | ۲۰                    | ۷/۵                  | ۳۵              |
| دسته درزه ۴                        | ۸۱            | ۲۸۴               | ۱/۵                 | ۲۰                    | ۷                    | ۲۷              |
| دسته درزه ۵                        | ۵۳            | ۳۲۴               | ۰/۷۵                | ۲۰                    | ۷                    | ۳۰              |

تقریباً هم راستا هستند در نتیجه احتمال تقاطع آنها کمتر بوده، لذا احتمالاً تعداد زیاد دسته درزه‌ها از لحاظ پایداری مشکل خاصی برای مغارها ایجاد نخواهد شد.

به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها از نتایج برداشت‌های درزه‌ها و لایه‌بندی در طی حفاری مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر استفاده شده است. پس از برداشت دسته درزه‌ها و جمع‌بندی تمامی نتایج جانمایی مغارها در توالی لایه‌های ماسه‌سنگ کوارتزیتی، سنگ آذرین و لای سنگ شیلی قرار داده شد. با توجه به پارامترهای هندسی درزه‌ها و شرایط توده‌سنگ محور اصلی مغارها در راستای N150E در نظر گرفته شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ الف). در طول اجرای پروژه برداشت‌های روزانه در مغار ترانسفورمر و نیروگاه انجام شده و نتایج این برداشت‌ها در نقشه‌های زمین شناسی وارد شده است. این نتایج شامل راستا و شیب لایه‌بندی، نوع مواد تشکیل دهنده، راستا، فاصله‌داری و پرتدگی درزه‌ها و گسل‌ها و سایر پارامترهای توصیفی سنگ است. در شکل (۳-۹) نمونه‌ای از پلات برداشت‌های سقف مغار ترانسفورمر نشان داده شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ الف).

بر اساس نتایج حاصل از برداشت‌های شرکت تابلیه در خصوص شرایط زمین شناسی و قرار دادن محدوده مغارها و گالری‌های ارتباطی مورد نظر در نقشه‌های یاد شده و صرف‌نظر از لایه‌هایی با ضخامت بسیار کم، فضای مدلسازی به سه لایه عمده قابل تقسیم است. محدوده مورد نیاز مدلسازی در مرز سه لایه ماسه‌سنگ کوارتزیتی و شیل قرمز واقع شده است. با توجه به موازی بودن لایه‌بندی دربرگیرنده حفریات، تنها پارامتر متغیر ضخامت لایه‌ها است که با وجود پارامترهای توده‌سنگ تفکیک مناسبی از لایه‌بندی ارائه شده است.

در خارج از این محدوده وجود سنگ‌های آذرین نیز مشاهده می‌شود که در انتهای مغار در برخورد با این لایه‌ها می‌باشد؛ عمده سنگ‌های آذرین موجود از جنس داسیت است. همان‌طوریکه در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود اکثر لایه‌ها دارای راستا و شیب یکسان بوده و موازی یکدیگر هستند. لذا بر این اساس راستای ۱۴۷ و شیب ۶۰ برای لایه‌بندی لحاظ شده است، که بر اساس برداشت‌ها قابل تأیید است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ الف).



شکل ۹-۳ بخشی از نقشه‌های برداشت‌های در جین پیشروی سقف مغارها (شرکت ساختمانی تالبیه، ۱۳۸۴ الف)



به‌منظور تعریف وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در مدل، داشتن پارامترهای سختی برشی، سختی نرمال و زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها الزامی است. لذا در مدل ارائه شده نیز این پارامترها بر اساس داده‌های مربوط به درزه‌هایی که از تحلیل‌های شرکت مشاور حاصل شده در مدل منظور گردیده است.

در این بررسی به تمامی درزه‌های موجود در مدل مقادیری مساوی  $K_s$  و  $K_n$  تخصیص داده شده است. این مقادیر در شرایط فرضی نوار برشی<sup>۱</sup> به ضخامت ۱۰ سانتیمتر و مدول ارتجاعی<sup>۲</sup> گیگاپاسکال بین دو لایه شیل قرمز و ماسه سنگ برآورد شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب). مقادیر ذکر شده در جدول (۳-۶) با توجه به لحاظ نمودن ضریب ایمنی ضعیف‌تر از مقادیر واقعی در نظر گرفته شده‌اند. زیرا در این صورت اگر سیستم نگهداری برای مغارها انتخاب شود این سیستم خود به خود دارای ضریب ایمنی می‌باشد، زیرا که درزه‌ها را از حالت واقعی ضعیف‌تر در نظر گرفته‌ایم و در نتیجه توده‌سنگ ضعیف‌تر می‌شود.

جدول ۳-۶- مقادیر خصوصیات ناپیوستگی‌های مدلسازی (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب)

| نوع ناپیوستگی | زاویه اصطکاک $\phi$ (درجه) | C (KPa) | $K_s$ (GN/m) | $K_n$ (GN/m) |
|---------------|----------------------------|---------|--------------|--------------|
| درزه          | ۳۰                         | -       | ۷/۶          | ۲۰           |
| لایه‌بندی     | ۲۵                         | ۰       | ۷/۶          | ۲۰           |

### ۳-۸- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

به‌منظور فراهم کردن داده‌های مورد نیاز برای طراحی، دانستن خواص مکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ برجا از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌طور کلی پارامترهای توده‌سنگ برجا را می‌توان به دو

1- Shear Bands Thickness

صورت مورد ارزیابی قرار داد. یکی از این روش‌ها انجام آزمایش‌های برجا در مقیاس میدانی و تعیین پارامترهای مقاومتی و مکانیکی توده‌سنگ است. در روش دوم با استفاده از دستورالعمل‌های سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ و همچنین برداشت‌های صحرایی از محل مورد نظر می‌توان خواص مکانیکی و مقاومتی حاصله از مطالعات آزمایشگاهی را به خواص توده‌سنگ برجا تعمیم داد.

با کاربرد صحیح هر یک از این روش‌ها می‌توان با تقریب قابل قبولی خواص مکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ برجا را ارزیابی کرد. از میان روش‌های طبقه‌بندی، تاکنون روش‌های Q، RMR و GSI بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Hudson and Harrison, 2000).

روش Q بیشتر در اروپا و عموماً با هدف طراحی سیستم نگهداری مورد استفاده گرفته است. در حالی‌که روش‌های GSI، بیشتر در آمریکای شمالی و به‌منظور تعیین پارامترهای مورد نیاز برای طراحی استفاده می‌شود. روش‌های RMR و GSI مستقیماً پارامترهای مهندسی طراحی مورد استفاده در معیار شکست هوک-بروان و موهر-کولمب را به‌دست می‌دهد. در توده‌سنگ مورد مطالعه، شرایط و وضعیت ناپیوستگی‌ها و ماده‌سنگ مطالعه شده و با انجام تحلیل‌های آماری و قضاوت مهندسی پارامترهای مورد نظر بدست آمده است. با استفاده از این پارامترها، روابط و جداول مربوطه، مقادیر RQD، RMR، Q و GSI؛ توده‌سنگ سقف مغار نیروگاه، که بر اساس گمانه حفر شده، تعیین گردیده و نتایج آن در جدول (۷-۳) درج شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

مقدار Q بر اساس ارتباط بین Q و  $RMR_{89}$  بیناویسکی به‌صورت زیر برآورد شده است (Hudson and Harrison, 2000).

$$RMR = 9 \ln(Q) + 44 \quad \text{رابطه (۷-۳)}$$

بر اساس داده‌های بدست آمده میزان تغییرات توده‌سنگ در اثر تغییر جنس آن چندان زیاد نمی‌باشد، بطوری‌که در مقدار GSI حاصل شده حداکثر تغییرات برابر با ۱۰ واحد می‌باشد. با توجه به نمودار تغییرات GSI تمامی مواد در محدوده توده‌سنگ‌های بلوکی تا خیلی بلوکی واقع می‌شوند.

جدول ۳-۷- طبقه‌بندی توده‌سنگ محدوده حفاریات مغار نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب)

| پارامتر                  | واحد | ماسه سنگ کوارتزی                             | شیل قرمز                                           | شیل سیاه                                           | سنگ‌های آذرین                                    |
|--------------------------|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| مقاومت فشاری<br>تک محوره | MPa  | ۸۵                                           | ۵۰                                                 | ۳۵                                                 | ۶۰                                               |
| RQD                      | %    | ۴۰                                           | ۴۰                                                 | ۳۰                                                 | ۵۰                                               |
| فاصله‌داری<br>درزه‌ها    | cm   | ۱۴                                           | ۱۷                                                 | ۱۲                                                 | ۱۴                                               |
| شرایط درزه               |      | سطح آنها کمی زبر و بدون جداشدگی و کمی هوازده | سطح آنها کمی زبر و بدون جداشدگی و با هوازدگی محدود | سطح آنها کمی زبر و بدون جداشدگی و با هوازدگی محدود | سطح آنها کمی زبر و بدون جداشدگی و با کمی هوازدگی |
| RMR <sub>89</sub>        |      | ۴۸                                           | ۴۳                                                 | ۴۰                                                 | ۵۰                                               |
| Q                        |      | ۱/۵۵                                         | ۰/۸۹                                               | ۰/۶۴                                               | ۱/۹۴                                             |
| GSI                      |      | ۵۳                                           | ۴۸                                                 | ۴۵                                                 | ۵۵                                               |

انتخاب ترتیب مناسب حفر مغارنیروگاه سد

سیاه‌پشه با کاربرد روش‌های عددی

#### ۴-۱- مدل‌سازی عددی

یکی از روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌های زیرزمینی استفاده از روش‌های عددی است. تقریباً تمام روش‌هایی که در تحلیل‌های عددی وجود دارد مانند روش اجزا محدود، تفاضل محدود، اجزای مرزی، اجزا مجزا و روش‌های ترکیبی به طور چشم‌گیری در پروژه‌های عظیم و صنعتی در سنگ یا خاک استفاده می‌شود.

کاربرد روش‌های عددی در ژئومکانیک را می‌توان به زمان پیدایش روش اجزا محدود در دهه ۷۰ میلادی نسبت داد. به طوری که این نوع از مدل‌سازی به طور موردی در آن سال‌ها مورد توجه قرار گرفته بود. با کاربرد کامپیوترهای سریع روش‌های عددی در ژئومکانیک وارد مرحله تازه‌ای شده است، به طوری که امروزه متناسب با روش‌های متعدد عددی برنامه کامپیوتری مرتبط با آن نیز وجود دارد (مدنی، ۱۳۸۳).

#### ۴-۱-۱- انتخاب مناسب‌ترین روش عددی

هر یک از روش‌های عددی دارای معایب و محاسنی هستند که باید برای هر مورد خاص و برای هدف مطالعاتی مورد نظر بهترین روش ارائه گردد. می‌توان گفت که در بسیاری از موارد، در مدل‌سازی، اهمیت شناخت محیط‌های ناپیوسته و پیوسته تاثیر بسیار زیادی در فرایند شبیه‌سازی مساله خواهد گذاشت، پس لازم است که از فاکتورهایی برای شناسایی انواع محیط‌ها استفاده نماییم. اگر توده سنگ کم درزه و دارای حفاری‌های نسبتاً بزرگی باشد به طوری که تغییرشکل‌پذیری توده سنگ بیش از تغییرشکل‌پذیری در امتداد درزه‌ها باشد در چنین حالتی می‌توان مدل را پیوسته فرض نمود. بنابراین فرضیه پیوستگی مناسب خواهد بود، در چنین مواقعی روش تفاضل محدود و روش اجزا محدود مفید واقع خواهد بود. در صورتی که میانگین فاصله‌داری درزه‌ها مرتبه‌ای از ابعاد حفاری باشد در چنین حالتی تغییرشکل‌پذیری در امتداد درزه‌ها بیشتر از تغییرشکل‌پذیری درون بلوک خواهد بود. در این شرایط تئوری ناپیوستگی بسیار مناسب خواهد بود و استفاده از روش المان مجزا توصیه می‌گردد (مدنی، ۱۳۸۳).

## ۴-۱-۲- مدل‌سازی دوبعدی یا سه‌بعدی

در مواردی که طول تونل در مقایسه با ابعاد مقطع آن به مراتب بزرگتر باشد، برای تجزیه و تحلیل تنش‌ها می‌توان از روش‌های دوبعدی استفاده کرد. در چنین مواردی، انتهای تونل (و یا هر نوع حفاریات دیگر نظیر گمانه)، تاثیری بر وضعیت تنش در سطح عمود بر محور تونل ندارد زیرا به‌اندازه کافی از مقطع مورد بررسی، دور است. از سوی دیگر، در مورد یک فضای زیرزمینی با ابعاد مشخص مثل کارگاه استخراج معادن زیرزمینی و یا مغار، دیگر نمی‌توان نقش انتهای حفاری را نادیده گرفت. بنابراین باید وضعیت تنش‌ها را با مدل‌های سه بعدی تحلیل کرد. واضح است که تحلیل‌های سه بعدی به مراتب پیچیده‌تر از انواع دوبعدی است. در این موارد، باید از برنامه‌های کامپیوتری کمک گرفت (مدنی، ۱۳۸۳).

## ۴-۱-۳- نرم افزار 3DEC

3DEC برنامه عددی سه بعدی است که بر پایه روش محاسباتی المان مجزا برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته بنا نهاده شده است. این برنامه براساس فرمول‌سازی آزمایش شده‌ای تدوین شده است که در نسخه دوبعدی (UDEC) از آن بهره گرفته شده است. 3DEC پاسخ یک محیط ناپیوسته (مانند یک توده سنگ درزه‌دار) را که در معرض بارهای ایستا و پویا قرار گرفته است، شبیه‌سازی می‌کند. محیط ناپیوسته، به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های ناپیوسته نشان داده می‌شود. ناپیوستگی‌ها مانند شرایط مرزی میان بلوک‌ها رفتار می‌کنند و جابجایی‌های گسترده و چرخش بلوک‌ها مجاز می‌باشد. بلوک‌ها به‌صورت مواد صلب و شکل‌پذیر می‌توانند رفتار کنند. بلوک‌های شکل‌پذیر به شبکه‌ای از عنصرهای «اجزای محدود» تقسیم می‌شوند و هر عنصر بر طبق یک قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی پاسخ می‌دهد. همچنین، حرکت نسبی ناپیوستگی‌ها با روابط خطی یا غیرخطی نیرو-جابجایی که برای حرکت در جهت‌های عمود و یا برشی تنظیم شده‌اند، کنترل می‌شود. 3DEC چندین مدل رفتاری برای مواد مدلسازی شده در آن دارد که این مدل‌ها هم برای ماده بکر و هم برای ناپیوستگی‌ها قابل تعریف هستند. بدین ترتیب پاسخ‌های شبیه‌سازی شده، نماینده

نایپوستگی‌ها، ماده سنگ هستند. 3DEC از ترتیب محاسباتی لاگرانژی استفاده می‌کند که برای مدل کردن حرکت‌ها و تغییرشکل‌های بزرگ در یک دستگاه بلوکی بسیار مناسب است (Itasca Consulting Group, 2000)

مشخصات برجسته 3DEC را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- توده‌سنگ سنگ به عنوان یک مجموعه سه بعدی از بلوک‌های صلب یا شکل پذیر مدل می‌شود.
- ۲- نایپوستگی‌ها به عنوان برهم‌کنش‌های مرزی در میان این بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شوند که باید برای این برهم‌کنش‌ها یک رفتار درزه تعیین کرد.
- ۳- بر پایه مبانی ایستایی، می‌توان الگوهای درزه پیوسته یا نایپوسته تولید کرد و می‌توان یک ساختار درزه را مستقیماً از نقشه‌های زمین شناسی، وارد مدل کرد.
- ۴- 3DEC یک روش و الگوریتم حل «زمان- صریح»<sup>۱</sup> دارد که جابجایی‌های بزرگ و چرخش‌ها را با هم وفق می‌دهد و اجازه محاسبات را در محدوده زمانی مشخص می‌دهد.
- ۵- قابلیت‌های گرافیکی، اجازه عملیات واکنش‌دار روی عناصر سه‌بعدی را می‌دهد. در حالت گرافیکی کاربر می‌تواند در مدل حرکت کند و مناطقی را نامرئی کند. تا هدف را بهتر مشاهده نماید.
- تدوین و توسعه روش اجزای مجزا که در 3DEC به کار گرفته شده، در یک دوره ۲۵ ساله انجام شده و مرتب پیشرفت کرده است (Itasca Consulting Group, 2000).
- برای مدل‌های رایج که شامل ۲۰۰۰ بلوک صلب (یا ۱۰۰۰ بلوک شکل پذیر) یا کمتر هستند، حل زمان- صریح نیاز به تقریباً ۲۰۰۰ الی ۴۰۰۰ گام دارد تا به جواب برسد (Itasca Consulting Group, 2000).

#### ۲-۴- مدل‌سازی عددی مغار سیاه بیشه

در مدل‌سازی مغار نیروگاه سیاه‌بیشه به دلیل وجود تقاطع‌ها، برقرار نبودن فرض کرنش صفحه‌ای، کم بودن نسبت طول به عرض حفریات زیرزمینی پروژه و همچنین به دلیل نایپوستگی‌های

1- explicit-time

موجود با توجه به مطالب عنوان شده در فصل دوم به کارگیری نرم‌افزارهای ناپیوسته سه‌بعدی در ساخت مدل معرف توده‌سنگ مناسب‌تر خواهد بود. لذا از نرم‌افزار 3DEC به منظور بررسی رفتار مکانیکی توده‌سنگ اطراف مغار استفاده شده است که از قابلیت خوبی در مدلسازی ناپیوستگی‌ها و تقاطع‌ها برخوردار است.

#### ۴-۲-۱- هندسه مدل

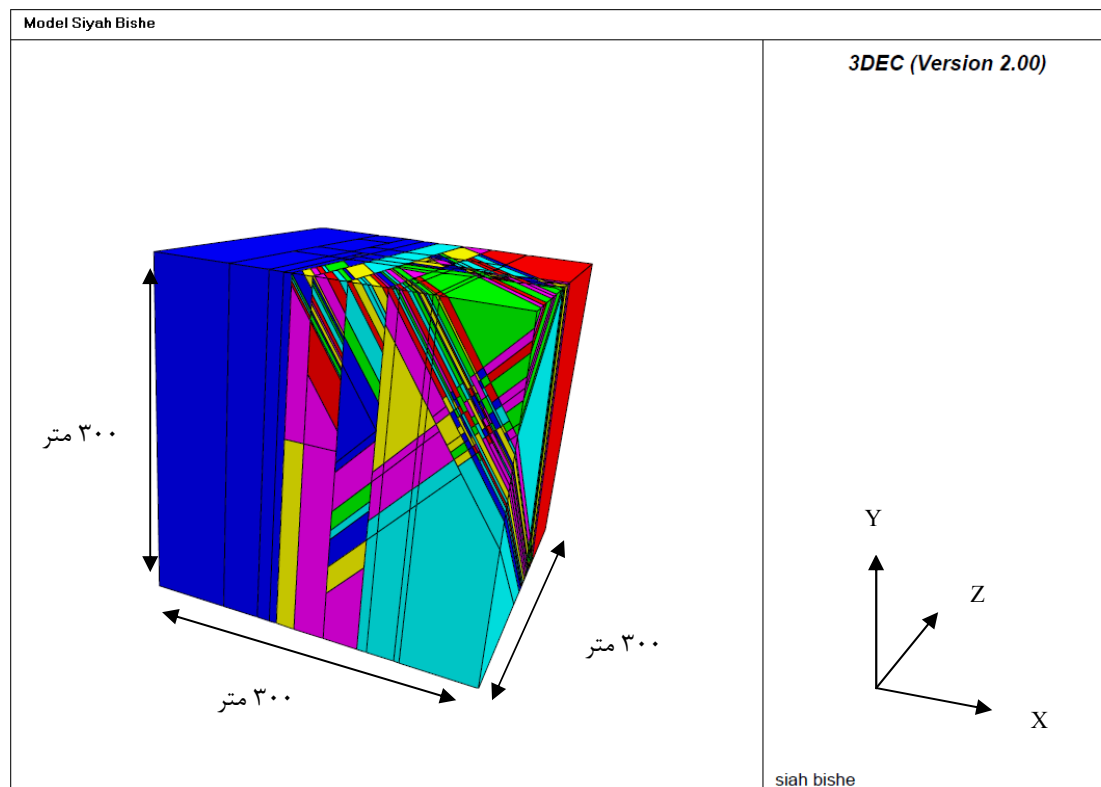
به منظور ساخت مدل، ابتدا هندسه سه‌بعدی مدل مورد نظر بر اساس نقشه‌های طراحی تهیه شده و سپس مختصات نقاط از نقشه‌های سه‌بعدی تعیین و در مدل نرم‌افزار 3DEC با استفاده از تابع Fish اعمال شده است. تابع Fish ابزار اجرای عملیات‌هایی است که دستور آنها برای نرم‌افزار 3DEC تعریف نشده است. در تعیین هندسه مدل مجموعه حفریات در مرکز فضای مدلسازی قرار گرفته است. در مدلسازی مذکور توجه ویژه‌ای به ابعاد و اندازه‌های آن شده است تا از تاثیری که ممکن است به سبب مدلسازی نامناسب مرزهای واقعی ایجاد شود جلوگیری به عمل آید. در این نرم‌افزار عرض، ارتفاع و طول مدل بترتیب در راستای محوره‌های X، Y و Z قرار داده می‌شوند.

#### ۴-۲-۲- تشریح مدل

در نرم‌افزارهایی که بر مبنای المان مجزا می‌باشند بر خلاف نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزا مرزی، مرزهای مصنوعی تاثیر قابل توجهی در شرایط فیزیکی مدل بر نتایج تحلیل‌های عددی می‌گذارند. به‌طوری که باعث ایجاد خطاهای انکارناپذیری می‌گردند. بنابراین برای غلبه بر این مشکل هرچه فاصله بین مرزهای مصنوعی و حقیقی زیادتر در نظر گرفته شود، از مقدار این خطاهای انکارناپذیر کاسته می‌گردد. البته مواردی نیز وجود دارد که ایجاب می‌نماید با توجه به ابعاد مدل و حجم نرم‌افزار، این فاصله تقلیل پیدا نماید (Itasca Consulting Group, 2000). مدل ساخته شده در 3DEC از یک مکعب که شامل سنگ‌های در برگیرنده مجموعه حفریات است، تشکیل شده است. سپس مغارها، گالری‌ها و چاه‌های ارتباطی آن و همچنین شبکه ناپیوستگی‌ها در این مکعب منظور شده است. ابعاد این مکعب پس از آزمایش مدل‌های مختلف به منظور کاهش اثر مرزها بر نتایج،



۳۰۰ متر ۳۰۰×۳۰۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مرزهای مدل با توجه به ابعاد حفاریات و بررسی تاثیر ابعاد مرزها بر نتایج مدل‌های اولیه، تعیین شده است، به‌طوری که کمترین تاثیر بر نتایج مدل داشته باشد. در شکل (۱-۴) نمایی از مرزهای خارجی مدل نشان داده شده است.



شکل ۱-۴- نمایی از مرزهای خارجی مدل در محیط نرم‌افزار 3DEC

#### ۴-۲-۳- ابعاد حفاریات مدل

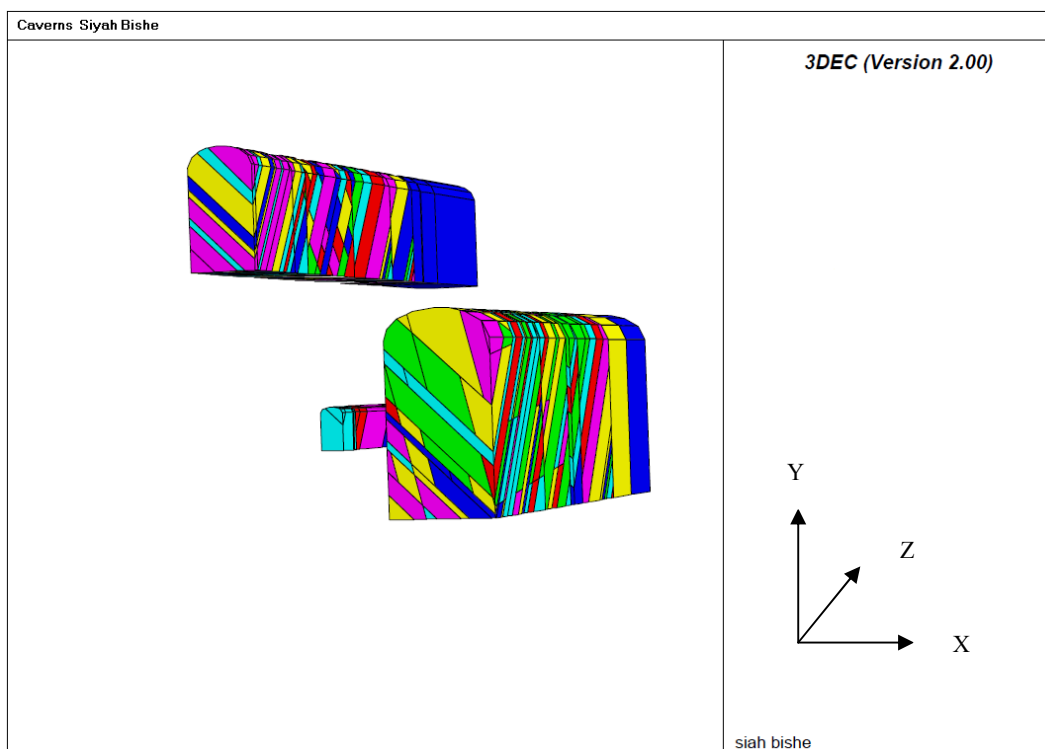
در مدلسازی صورت گرفته برای پروژه سد سیاه بیشه، ابعاد تمامی فضاها بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود تهیه شده است. ابعاد حفاریات موجود در مدل ساخته شده در جدول (۱-۴) آورده شده است. پس از ساخت بلوک اولیه مشخصات هندسی این حفاریات برای مدل تعریف شده است.

در شکل (۲-۴) مغارهای مدل شده در محیط نرم‌افزار 3DEC نشان داده شده است. مجموعه حفاریات شکل (۲-۴) در مرکز بلوک خارجی قرار داده شده است. برای مش‌بندی از مش‌بندی شعاعی استفاده شده است. دلیل استفاده از مش‌بندی شعاعی این است که بلوک‌های واقع در مرکز دارای ابعاد

جدول ۴-۱- ابعاد حفريات موجود در مدل ساخته شده در نرم‌افزار 3DEC

| ابعاد                                                 | طول   | عرض  | ارتفاع | قطر | واحد |
|-------------------------------------------------------|-------|------|--------|-----|------|
| مغار نیروگاه                                          | ۱۳۱/۴ | ۲۴/۵ | ۴۶/۵   | -   | متر  |
| مغار ترانسفورمر                                       | ۱۶۰/۶ | ۱۵/۸ | ۲۸/۶۵  | -   | متر  |
| مغار دریچه‌ها                                         | ۹۲    | ۶    | ۸      | -   | متر  |
| گالری‌های بالادست (محل اتصال گالری و مغار ترانسفورمر) | ۱۹/۱  | ۵/۷  | ۶/۳    | -   | متر  |
| گالری‌های پایین دست (محل اتصال گالری و مغار نیروگاه)  | ۱۶    | ۸/۳۰ | ۸/۷۰   | -   | متر  |
| چاه‌های ارتباطی بین دو گالری                          | ۳۷    | -    | -      | ۶   | متر  |

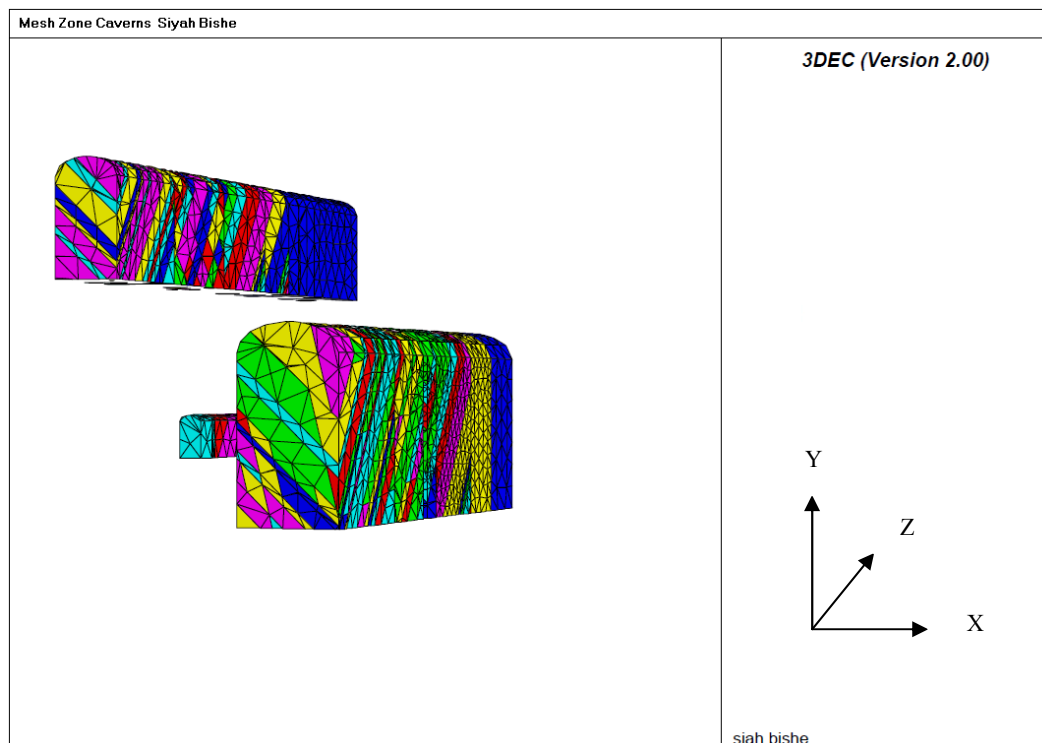
کمتری بوده و بلوک‌های وقع در گوشه‌ها ابعاد بزرگتری دارند. اندازه مش‌ها در مرکز ۴ برابر متراکم‌تر از محدوده‌ی خارجی بلوک است.



شکل ۴-۲- مغارهای مدل شده در محیط نرم‌افزار 3DEC

همان‌طوری که در اشکال (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده است، ناپیوستگی‌ها و درزه‌های موجود بر اساس روند ارائه شده در فصل سوم در مدل منظور شده است. در این خصوص راستای محور مغارها نیز بر اساس مقادیر واقعی در مدل لحاظ شده است. راستای مغار نیروگاه ۱۵۲ درجه در نظر گرفته شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

در شکل (۳-۴) مش‌بندی بخش داخلی مدل که شامل مغارها می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- مش‌بندی بخش داخلی مدل نیروگاه سد سیاه بیشه در محیط نرم‌افزار 3DEC

#### ۴-۲-۴- هندسه و خصوصیات درزه‌ها و توده‌سنگ در مدل 3DEC

در نرم‌افزار 3DEC امکان استفاده از ۶ نوع مدل رفتاری مصالح سنگی وجود دارد که عبارتند از: مدل حفاری<sup>۱</sup>، مدل الاستیک همسانگرد<sup>۲</sup>، مدل دراگر-پراگر<sup>۳</sup>، مدل موهر-کولمب<sup>۴</sup>، مدل موهر-کولمب نرم شونده و سخت شونده<sup>۵</sup>، مدل درزه‌های فراگیر<sup>۶</sup>، هریک از مدل‌های رفتاری ذکر شده با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و یک سری از آزمایش‌های شاخص برای شناسایی پارامترهای لازم در مدل رفتاری انتخاب می‌شوند (Itasca Consulting Group, 2000). با توجه به مطالعه نمونه‌های مشابه در فصل دوم این مدل به‌خوبی معرف رفتار ناپیوستگی‌ها در محیط‌های سنگی است. در مورد خصوصیات سنگ موجود در فاصله بین ناپیوستگی‌ها از معیار موهر-کولمب

<sup>۱</sup> -Null

<sup>۲</sup> -Elastic

<sup>۳</sup> -Drucker-Prager plasticity

<sup>۴</sup> -Mohr-Coulomb plasticity

<sup>۵</sup> -Strain-hardening/softening Mohr-Coulomb

<sup>۶</sup> -Ubiquitous-joint

استفاده شده است. این مدل، رفتار درزه‌ها در بخش الاستیک را نفی نکرده بلکه رفتار آنها پس از محدوده الاستیک و در محدوده پلاستیک را نیز شامل می‌شود (Hoek and Brown, 2002).

خصوصیات مصالح استفاده شده در فرآیند مدلسازی با نرم افزار 3DEC بایستی تا حد ممکن به مقدارهای واقعی شرایط فیزیکی مساله مطابقت نماید. این نکته در مسایل مربوط به سنگ از اهمیت ویژه‌ای نسبت به حل مسایل مرتبط با خاک و مسایل عمومی مکانیک دارد. یعنی خصوصیاتی که در آزمایشگاه به دست آمده نمی‌تواند به طور مستقیم در حل مسایل بزرگ مقیاس به کار رود. برای این منظور این خصوصیات بدست آمده یا باید به طور مستقیم و از طریق آزمایش‌های برجا در روند حل مساله وارد شوند و یا اینکه در یک مقیاس مناسب تبدیل شده و سپس با استفاده از آنها به حل مساله پرداخته شود (Itasca Consulting Group, 2000). تعیین پارامترهای درزه‌ها و توده-سنگ در مدل نیروگاه سد سیاه بیشه، مطابق با خصوصیات آورده شده در فصل سوم اعمال شده است.

۴-۲-۵- شرایط مرزی و اولیه مدل

تنش‌های موجود در توده‌سنگ به دو دسته کلی تنش‌های القایی و تنش‌های برجا تقسیم می‌شوند. تنش‌های برجا قبل از اینکه هرگونه تغییری در توده‌سنگ ایجاد شود در آن وجود دارند در حالی که تنش‌های القایی در اثر حفاری، تغییرات طبیعی نظیر خیس و خشک شدن و آماس به وجود می‌آیند. آگاهی از وضعیت تنش‌های برجا زمین از جمله اطلاعات اساسی مورد نیاز در طراحی سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. عامل اصلی تنش‌های برجا، وزن طبقات و فعالیت‌های تکتونیکی منطقه است. در تعیین تنش‌های اولیه، عمق حفاریات نسبت به سطح زمین، وضعیت توپوگرافی و وضعیت ساختاری نقش اصلی را به عهده دارند (Goodman, 1980).

از طرفی وجود گسله‌ها و ناپیوستگی‌ها در توده‌های سنگی نیز از جمله عوامل دیگری هستند که در آرایش تنش‌های برجا نقش عمده‌ای دارند. تنش‌های برجا زمین در حالت ایده‌آل به دو دسته

تنش‌های افقی و قائم تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجا که عامل اصلی تنش‌های قائم وزن سنگ‌های روباره است، لذا مقادیر این تنش‌ها را می‌توان از رابطه زیر برآورد نمود:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot z \quad \text{رابطه (۱-۴)}$$

در رابطه (۱-۴)  $\rho$  چگالی سنگ بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و  $g$  شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه و  $z$  عمق محل قرار گیری سازه از سطح زمین بر حسب متر می‌باشد. تنش‌های افقی به خصوصیات توده‌سنگ و بارهای ناشی از جاذبه زمین بستگی دارد. اگر توده‌سنگ دارای خصوصیات الاستیک خطی و همگن باشد در این صورت تنش‌های افقی از رابطه زیر بدست می‌آید:

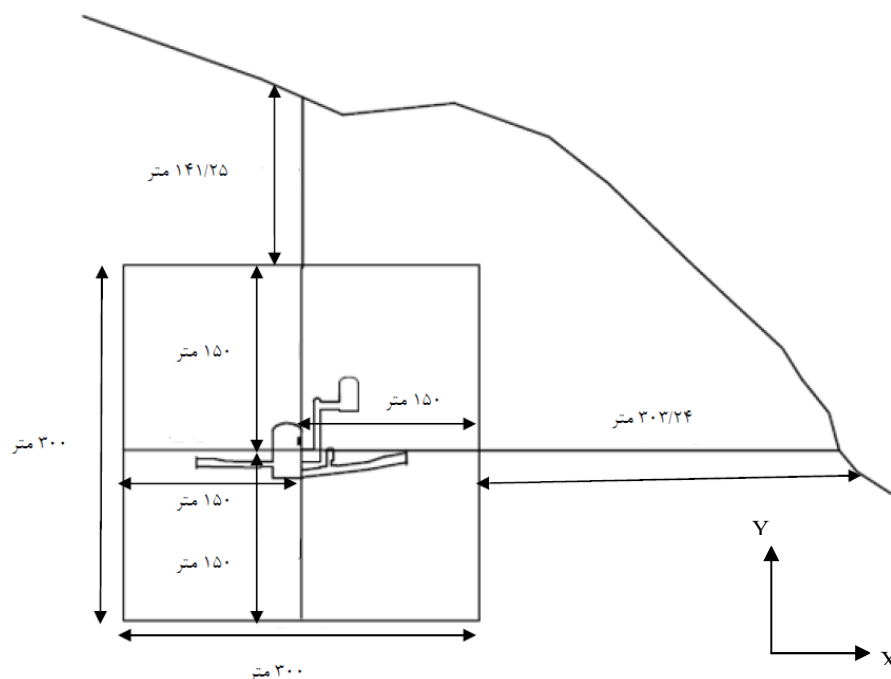
$$\sigma_h = (v/1-v) \times \sigma_v \quad \text{رابطه (۲-۴)}$$

در رابطه (۲-۴)،  $v$  ضریب پواسون است. اگر توده‌سنگ از شرایط الاستیک پیروی نکند؛ در این صورت تنش‌های افقی از رابطه زیر حاصل می‌شود (Goodman, 1980).

$$\sigma_h = k \sigma_v \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

با توجه به نقش تنش‌های برجای منطقه و به‌خصوص نسبت تنش افقی به قائم ( $K$ ) در تحلیل‌های مربوط، مقدار  $K$  بر اساس آزمایش بیش‌مغزه‌گیری اندازه‌گیری شده است. بر اساس آزمایشات برجا و تحلیل نتایج آن مقدار  $K$  در محدوده حفریات زیرزمینی نیروگاه سیاه‌بیشه ۱/۱ ارزیابی شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ب).

در شکل (۴-۴) شمایی از محل قرارگیری حفریات، ابعاد مرزها و فاصله مرزهای لحاظ شده تا سطح زمین نشان داده شده است. مقدار متوسط روباره در بالای سقف مغار نیروگاه در حدود ۱۳۶ متر در نظر گرفته شده است (علت حدودی بودن این مقدار وجود عوارض توپوگرافی در بخش سطح زمین می‌باشد که مقدار بیان شده بر اساس مقدار متوسط در مقطع توپوگرافی تعیین شده است). لذا بر اساس روابط فوق و مقدار  $K$ ، تنش‌های اولیه افقی و قائم در مرزهای مدل به‌صورت زیر محاسبه شده است. چگالی متوسط توده‌سنگ فوقانی در مدل برابر با  $2700 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۴- شمایی از محل قرارگیری حفاریات، ابعاد مرزها و فاصله مرز لحاظ شده تا سطح زمین

مقدار تنش اولیه قائم در مرز مدل (تنش ناشی از وزن طبقات فوقانی):

$$9/8 \times 2700 \times 136 = 3598860 \text{ Pa}$$

تنش افقی برجا با توجه به تابع تغییر در محیط مدل، اعمال شده است.

در 3DEC این قابلیت وجود دارد که شرایط مرزی در مرزهای مصنوعی به صورت سرعت، تنش و نیرو بسته شوند (Itasca Consulting Group, 2000). شرایط مرزی اعمال شده در مدل شامل مرز پایین و مرزهای طرفین مدل می‌باشد که مرزهای کناری در راستای X و Z مرز پایین مدل در راستای Y ثابت شده است. بخش فوقانی نیز با استفاده از تنش اعمال شده ناشی از وزن روباره بسته شده است. در این تحقیق شرایط مرزی به صورت مرزهایی با سرعت ثابت در اطراف مدل اعمال شده‌اند.

### ۴-۳- مراحل مدل‌سازی

به منظور ساخت مدلی مناسب روند مدل‌سازی به شرح مراحل زیر اجرا شده است:

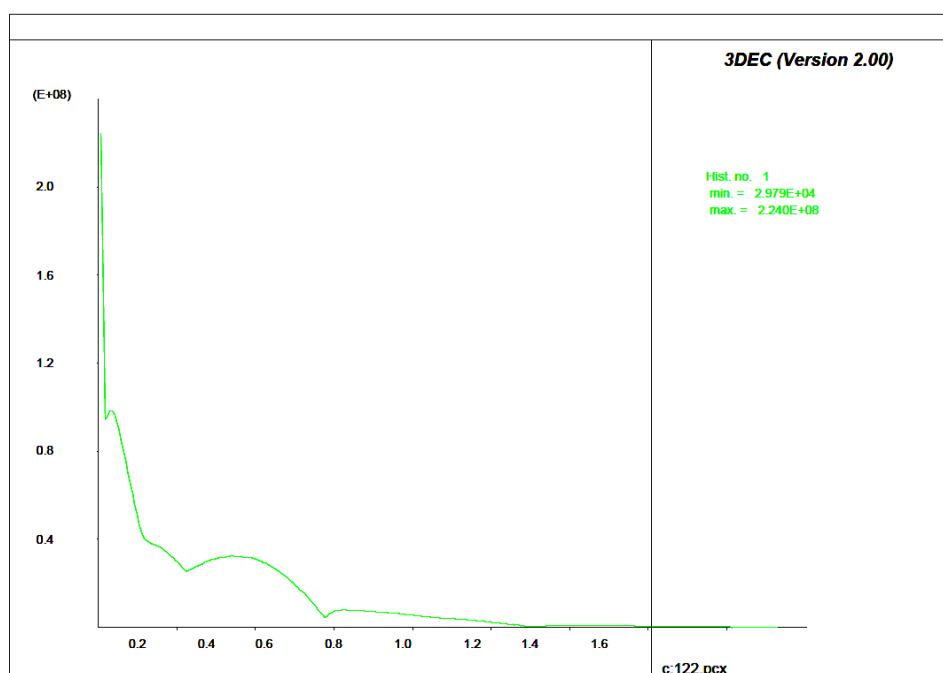
- ساختن مدل با استفاده از دستورات موجود برای طراحی مراحل حفاری مغار نیروگاه و تعیین سیکل

حفاری

- وارد کردن درزه‌ها، خصوصیات درزه و سنگ بکر در مدل
- اجرای مدل تا رسیدن به تعادل اولیه
- حفاری کامل مغار نیروگاه و ترانسفوماتور
- بررسی تاثیر حفر مغار نیروگاه بر مقادیر جابجایی و تنش در مغار ترانسفورمر
- حفاری و نگهداری مرحله‌ای تا حفر کامل مغار نیروگاه به همراه گالری‌های متصل به آن
- محاسبه جابجایی‌ها بعد از حفر مرحله‌ای و رسیدن به تعادل

#### ۴-۴- اجرای مدل تا رسیدن به تعادل

پس از تکمیل داده‌های اولیه مورد نیاز، در قدم اول به منظور رسیدن به تعادل اولیه، مدل اجرا و تحلیل گردید. رسیدن مدل به تعادل اولیه بیانگر صحت مدل‌سازی بوده و از این حیث از اهمیت بالایی برخوردار است. در مدل ارائه شده نیز پس از ساخت، این فرآیند به عنوان اولین بخش از روند مدل‌سازی اجرا شده است. در شکل (۴-۵) نمودار نیروهای نامتعادل در حالت اجرای اولیه نشان داده شده است. در شکل (۴-۵) محور افقی تعداد سیکل‌های نرم‌افزار و محور قائم مقدار نیرو را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵- نمودار نیروهای نامتعادل در حالت اجرا اولیه

#### ۴-۵- مقطع بررسی شده در مدل

در فرآیند بررسی نتایج مدل پس از حفاری، تعیین مقطع مورد نظر برای بررسی وضعیت پایداری مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا با توجه به اینکه در مدل مغار نیروگاه سد سیاه بیشه از لحاظ زمین شناسی، نصب و پایش ابزار دقیق در طول مغار نیروگاه ۶ مقطع وجود دارد. مقطع مورد نظر از بین همین مقاطع انتخاب گردید زیرا برای اعتبارسنجی مدل نیز به اطلاعات این مقاطع نیاز است. به این منظور از بین این مقاطع بحرانی‌ترین مقطع از لحاظ پایداری انتخاب شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده مقطع ۲ وضعیت پایداری نامساعدتری نسبت به بقیه مقاطع دارد. موقعیت مقاطع پایش در طول مغار نیروگاه سد سیاه بیشه در جدول (۴-۲) آورده شده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷). در شکل (۴-۶) نمایی از جانمایی مغار نیروگاه و ترانسفورمر به همراه درزه و شکاف‌های بردگیرنده آنها در مقطع ۲، نشان داده شده است.

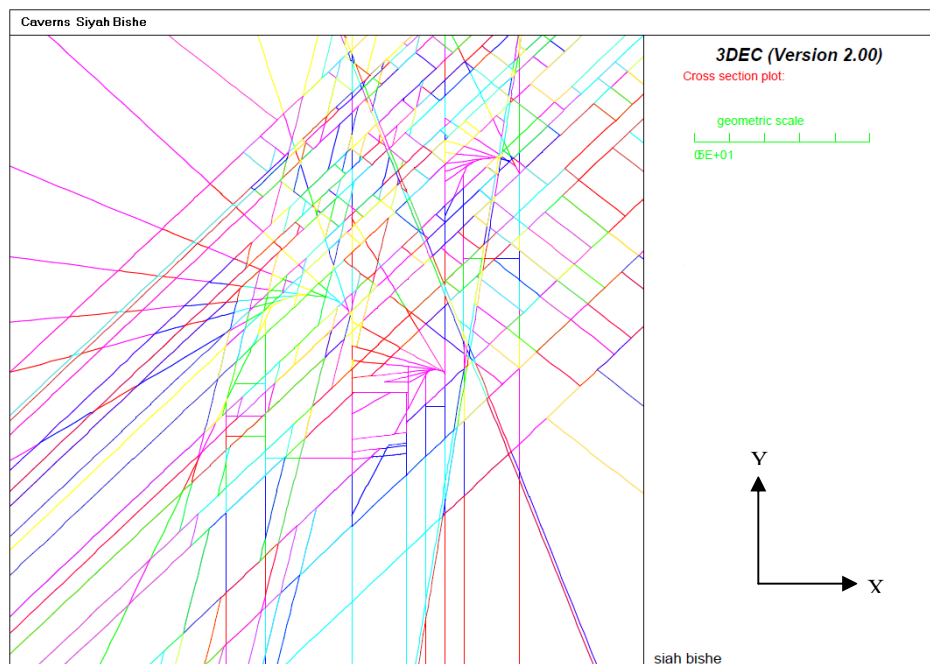
#### ۴-۶- بررسی تاثیر حفر مغار نیروگاه بر جابجایی و شکستگی‌های اطراف مغار ترانسفورمر

برای بررسی تاثیر حفاری متقابل مغار نیروگاه و ترانسفورمر در مدل ساخته شده این دو مغار به صورت کامل حفاری شدند. پس از تحلیل کامل مدل، مقادیر بردارهای جابجایی بخش‌های پلاستیک و شکسته شده و همچنین کنتورهای جابجایی آنها مورد آنالیز قرار گرفت که نتیجه آن حاکی از تاثیر ناچیز حفاری مغار نیروگاه بر مغار ترانسفورمر می‌باشد.

جدول ۴-۲- موقعیت مقاطع پایش در طول مغار نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷)

| مقطع پایش | فاصله از ابتدای مغار نیروگاه<br>(بر حسب متر) |
|-----------|----------------------------------------------|
| ۱         | ۲۶                                           |
| ۲         | ۴۸/۷۰                                        |
| ۳         | ۶۷/۱۰                                        |
| ۴         | ۸۶/۷۰                                        |
| ۵         | ۱۰۵/۱۰                                       |
| ۶         | ۱۲۰/۵۰                                       |

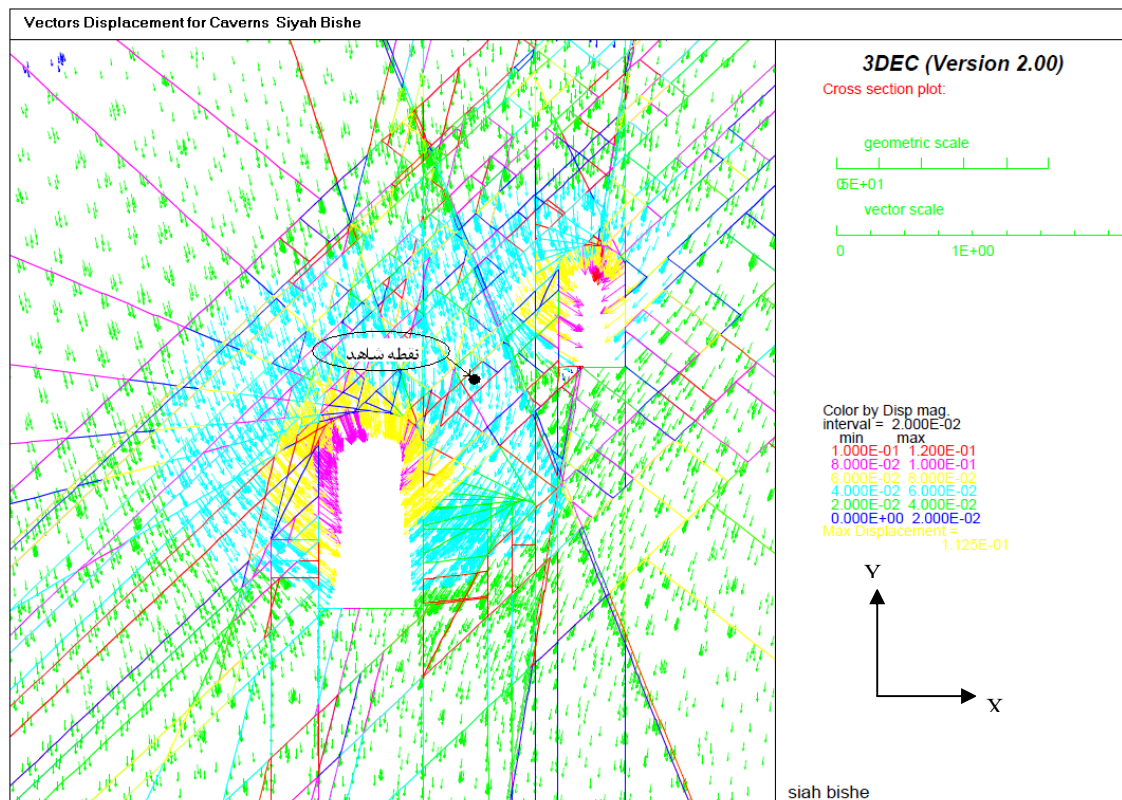




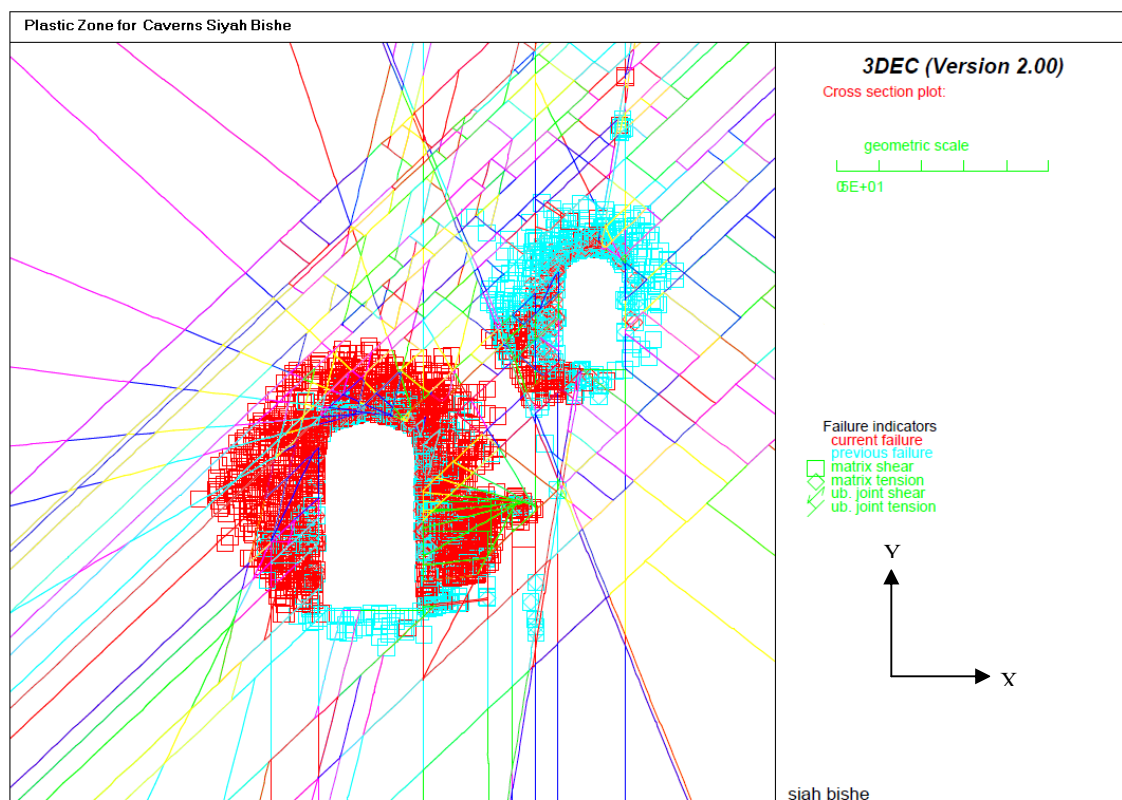
شکل ۴-۶- جانمایی مغار نیروگاه و ترانسفورماتور به همراه درزه و شکاف‌های بردرگیرنده آنها در مقطع شماره ۲

در شکل (۷-۴) مقطعی از بردارهای جابجایی حاصل از اجرای مدل با حفاری کامل مغار نیروگاه و ترانسفورمر در فاصله‌ی ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه نشان داده شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌شود مقادیر جابجایی در وسط پایه بین دو مغار در محدوده ۴ سانتی‌متری است. مطابق با شکل (۷-۴) می‌توان نتیجه گرفت که حفاری مغار نیروگاه باعث تغییر جهت در بردارهای جابجایی به صورت تاثیرگذار نشده است و جهت‌گیری بردارهای جابجایی در مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر مانند حالت اولیه (حالتی که مغار نیروگاه و ترانسفورمر به صورت جداگانه حفر می‌شوند) می‌باشد.

در شکل (۸-۴) نواحی پلاستیک و نواحی شکسته شده در برش عرضی در فاصله‌ی ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه نشان داده شده است. بر اساس نواحی پلاستیک و شکسته شده شکل (۸-۴) می‌توان دریافت که گسترش این ناحیه‌ها در فضای بین دو مغار به یکدیگر متصل نمی‌شود و می‌توان از تاثیر اندک حفاری این دو مغار بر یکدیگر صرف‌نظر کرد. ابعاد پایه باقیمانده بین دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر در حدود ۳۴ متر می‌باشد که بیانگر مناسب بودن فاصله عرضی دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر از یکدیگر می‌باشد.



شکل ۴-۷- بردارهای جابجایی در برش عرضی در فاصله‌ی ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه



شکل ۴-۸- نواحی پلاستیک و نواحی شکسته شده در برش عرضی در فاصله‌ی ۶۰ متری از ابتدای مغار نیروگاه

#### ۷-۴- سیستم نگهداری

هدف اصلی از نصب سیستم نگهداری، کنترل جابجایی رو به درون دیواره‌ها و سقف فضای حفاری شده و جلوگیری از سست شدن سنگ است که در صورت عدم نصب آن امکان دارد به ریزش و به شکست منجر شود. در واقع، تعبیه سیستم‌های نگهداری از قبیل پیچ‌سنگ، بتن پاشی و قاب‌های فولادی، قادر نیست که از شکستگی سنگ‌های اطراف حفاری که تحت تنش بیش از مقاومت خود قرار گرفته‌اند، جلوگیری کند اما این شیوه نگهداری، نقش مهمی در کنترل تغییر شکل دیواره‌ها و سقف فضای حفاری شده به‌عهده دارد.

در صورت عدم نصب به‌موقع نگهداری، نگهداری جبهه‌کار، در کنترل تغییر شکل نتیجه دلخواه را نخواهد داشت. در این حالت اگر توده‌سنگی به‌اندازه کافی محکم باشد که در برابر ایجاد شکستگی مقاومت کند و به‌بیان دیگر وقتی مقاومت فشاری بیش از دو برابر تنش‌های محیطی باشد، جابجایی الاستیک ایجاد خواهد شد ولی در صورتی که شکستگی ایجاد شود، تغییر شکل پلاستیک حاصل می‌شود که در صورت عدم نصب به‌موقع نگهداری منجر به بروز تخریب در فضای حفاری شده می‌شود (Hoek and Brown, 2002).

#### ۷-۴-۱- شبیه‌سازی سیستم نگهداری

حفاری و ساخت ایمن و اقتصادی سازه‌های زیرزمینی و مغارهای نیروگاه به عوامل متعددی وابسته است، که انتخاب صحیح سیستم نگهداری یکی از مهمترین آنها است. سیستم‌های نگهداری پیشنهادی در مغار نیروگاه و گالری‌های ارتباطی از سه مولفه عمده‌ی بتن پاشی، پیچ‌سنگ و کابل‌های تزریقی کششی تشکیل شده است. شرح ابعاد و مشخصات سیستم نگهداری نصب شده در مدل‌های ساخته شده در جدول (۳-۴) آورده شده است.

#### ۷-۴-۲- خصوصیات نگهداری نصب شده

در مدلسازی پیچ سنگ‌ها و کابل‌های تزریقی در 3DEC علاوه بر خصوصیات مکانیکی فولاد، خصوصیات دوغاب تزریق شده نیز مورد نیاز می‌باشد. پارامترهای مانند سختی محدوده دوغاب و

جدول ۳-۴- مشخصات هندسی نگهداری مجموعه حفاریات زیرزمینی مغار نیروگاه سیاه بیشه  
(شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ج)

| محل نگهداری              | نوع نگهداری | شبکه (m)                | قطر (mm) | طول المان (m) | میزان بار مجاز (KN) |
|--------------------------|-------------|-------------------------|----------|---------------|---------------------|
| مغار نیروگاه (سقف)       | پیچ سنگ     | ۳×۳                     | ۲۵       | ۵             | ۱۴۰                 |
|                          | تاندون      | ۳×۳                     | ۲۶/۵     | ۱۵            | ۸۹۰                 |
|                          | بتن پاشی    | در سقف و کف ۲۰ سانتیمتر |          |               |                     |
| مغار نیروگاه (دیواره‌ها) | پیچ سنگ     | ۳×۳                     | ۲۵       | ۵             | ۱۴۰                 |
|                          | تاندون      | ۳/۵×۳/۵                 | ۲۶/۵     | ۱۲            | ۳۰۰                 |
|                          | بتن پاشی    | ۱۵ سانتیمتر             |          |               |                     |
| گالری‌های ارتباطی        | پیچ سنگ     | ۱/۴×۱/۴                 | ۲۵       | ۵             | ۱۴۰                 |
|                          | بتن پاشی    | ۱۰ سانتیمتر             |          |               |                     |

مقاومت محدوده دوغاب از روابط موجود محاسبه و در مدل منظور می‌گردد. مقدار سختی مذکور از رابطه زیر قابل برآورد می‌باشد (Itasca Consulting Group, 2000).

$$K_{bond} = \frac{2\pi G_g}{10 \ln \left(1 + \frac{2t}{D}\right)} \quad \text{رابطه (۴-۴)}$$

در رابطه (۴-۴)  $K_{bond}$  سختی محدوده دوغاب (N/m/m)،  $t$  ضخامت حلقه دوغاب (m)،  $G_g$  مدول برشی دوغاب و  $D$  قطر بولت (m) است. دیگر پارامتر معرف دوغاب، مقاومت محدوده دوغاب بوده که هم از طریق کشش برجا بولت و هم از طریق رابطه زیر قابل برآورد است (Itasca Consulting Group, 2000).

$$S_{bond} = \pi(D + 2t)\tau_{peak} \quad \text{رابطه (۵-۴)}$$

در رابطه (۵-۴)  $\tau_{peak}$  حداکثر مقاومت برشی در حلقه دوغاب است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\tau_{peak} = \tau_1 \times Q_B \quad \text{رابطه (۶-۴)}$$

$\tau_1$ : یک دوم کمترین مقاومت فشاری ضعیف‌ترین سنگ یا دوغاب مورد استفاده می‌باشد:  $Q_B$  بیان کننده کیفیت دوغاب ریزی است که در بهترین حال  $Q_B = 1$  می‌باشد (Itasca Consulting Group, 2000).

بر اساس آنچه در جدول (۴-۴) آورده شده است، خصوصیات مقاومتی بولت‌های تزریقی و در

جدول (۴-۵) خصوصیات مقاومتی بتن پاشی نصب شده در مدل‌ها آورده شده است.

جدول ۴-۴- خصوصیات پیچ سنگ‌های تزریقی (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۵ ب)

| نوع نگهداری          | مقاومت فشاری<br>دوغاب (MPa) | مدول الاستیسیته<br>(GPa) | $G_g$<br>(GPa) | $T_{peak}$<br>(MPa) | $K_{bond}$<br>(N/m/m) | $S_{bond}$<br>(N/m) |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| بولت‌های تمام تزریقی | ۲۰                          | ۱۰۰                      | ۹              | ۱۰                  | $۱۳ \times ۱۰^۹$      | $۱/۲ \times ۱۰^۶$   |

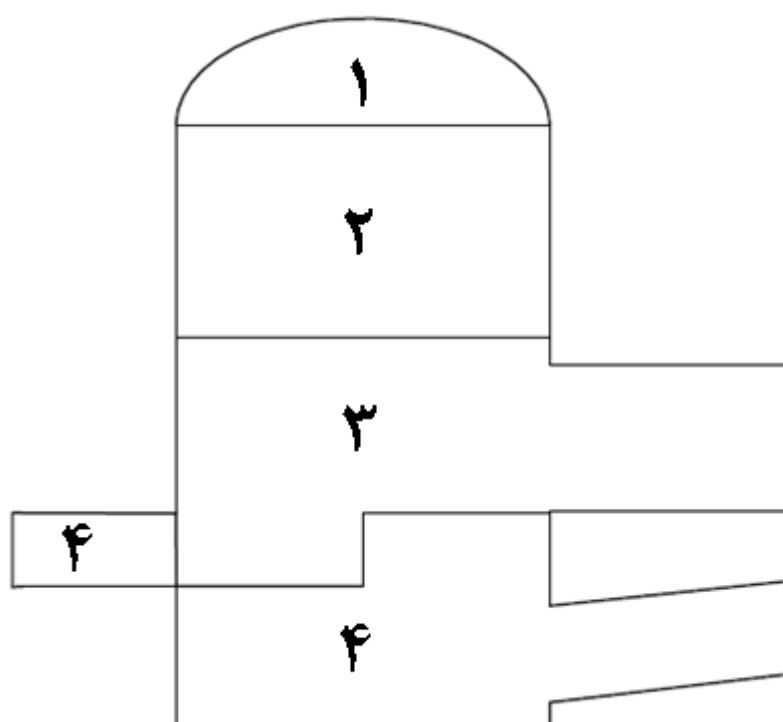
جدول ۴-۵- خصوصیات بتن پاشی استفاده شده در مغار نیروگاه و گالری‌های ارتباطی

(شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۴ ج)

| نوع<br>نگهداری | جرم<br>حجمی<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | مدول<br>الاستیسیته<br>(GPa) | مقاومت<br>فشاری<br>(MPa) | ضریب<br>پواسون | سختی نرمال<br>(GPa) | سختی برشی<br>(GPa) | چسبندگی<br>(MPa) | زاویه اصطکاک<br>(درجه) |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|--------------------|------------------|------------------------|
| بتن پاشی       | ۲۵۰۰                                | ۲۱                          | ۳۰                       | ۰/۲            | ۳/۵                 | ۲/۱                | ۰/۵              | ۳۵                     |

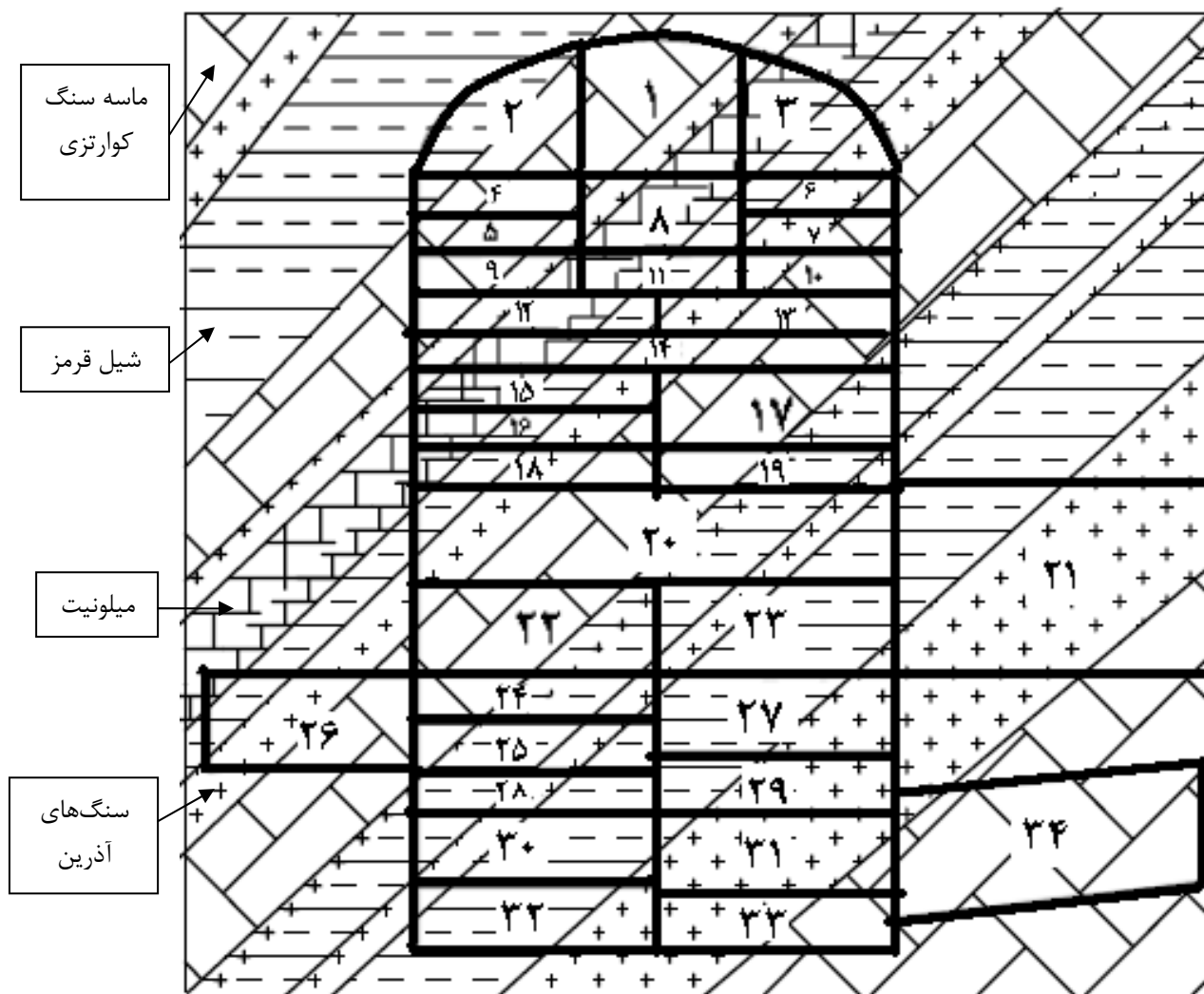
#### ۴-۸- انتخاب ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

ملاک برای تشخیص حالت مناسب حفاری برای مغار نیروگاه سد سیاه بیشه تغییرات جابجایی در نقاط شاهد است. هر چه تغییرات جابجایی‌ها در نقاط مذکور کمتر باشد آن ترتیب حفر را می‌توان به‌عنوان یک ترتیب حفر بهتر در نظر گرفت. در ابتدا با توجه به شرایط زمین شناسی، حفاریات متصل به مغار نیروگاه و سایر شرایط از بین ۶ مقطع، مقطع شماره ۲ برای انتخاب ترتیب مناسب حفر مغار نیروگاه در نظر گرفته شده است. از جمله شرایطی که در انتخاب مقطع ۲ لحاظ شده است می‌توان به تعدد لایه‌بندی‌ها، نازک بودن لایه‌بندی‌ها و وجود لایه ضعیف میلونیت اشاره کرد. پس از انتخاب مقطع مورد نظر برای ارائه ترتیب حفر مناسب‌تر و همچنین کاهش زمان محاسبات، مغار نیروگاه به ۴ مرحله اصلی تقسیم شده است. که هر یک از این مراحل خود شامل چندین مرحله‌ی فرعی می‌باشد. انتخاب مراحل اصلی نیز بر اساس شرایط زمین شناسی، تعداد مراحل فرعی، شرایط اجرایی و ممکن حفاری و سایر حفاریات متصل به مغار نیروگاه صورت گرفت. مراحل اصلی در نظر گرفته شده برای حفاری مغار نیروگاه در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. روند کار



شکل ۴-۹- مراحل اصلی حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه به منظور انتخاب ترتیب مناسب حفر این مغار

انتخاب ترتیب مناسب حفر به این صورت است که ابتدا مرحله اصلی شماره‌ی ۱ در نظر گرفته شده و سپس ترتیب مناسب مرحله‌های فرعی آن انتخاب می‌شود. در ادامه مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۱ به همان ترتیب حفر و مرحله‌ی اصلی بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که تمام ۴ مرحله‌ی اصلی حفاری شوند. در نهایت پس از حفر تمام مراحل (حفر کامل مغار نیروگاه به همراه حفریات متصل) تغییرات جابجایی محاسبه شده و ترتیب حفاری که کمترین تغییرات جابجایی را دارد به عنوان ترتیب مناسب حفر انتخاب شود. مطابق با طراحی صورت گرفته توسط شرکت مشاور پروژه سد سیاه بیشه مغار نیروگاه به همراه حفریات متصل به آن در مقطع ۲ در ۳۴ مرحله حفر می‌شود. هدف از این تحقیق نیز انتخاب ترتیب مناسب حفر برای این ۳۴ مرحله حفاری می‌باشد. مناطق حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه در شکل (۴-۱۰) نشان داده است. شایان ذکر



شکل ۴-۱۰- مناطق حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷)

است در بعضی از الگوهای حفاری چندین مرحله به صورت همزمان حفر شده‌اند. انتخاب ارتفاع و عرض پله‌ها بر اساس خصوصیات مکانیک سنگی سنگ‌های دربرگیرنده مغار، وضعیت ناپیوستگی‌ها در اطراف مغار نیروگاه، گالری‌های متصل به مغار، زمان اجرای پروژه (در جایی که امکان‌پذیر است حداکثر ارتفاع و عرض پله بیشتر در نظر گرفته شود) و کارهای مشابه قبلی اجرا شده، امکانات حفر چال، توجه به گوشه‌های تیز و سایر شرایط محلی بوده است (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷).

دلایل انتخاب مناطق مختلف حفاری برای مغار نیروگاه سیاه بیشه در زیر آورده شده است:

دلایل انتخاب مناطق مختلف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه در جدول (۴-۶) ذکر شده است.

این دلایل برای هر یک از مناطق به صورت جداگانه آورده شده است.



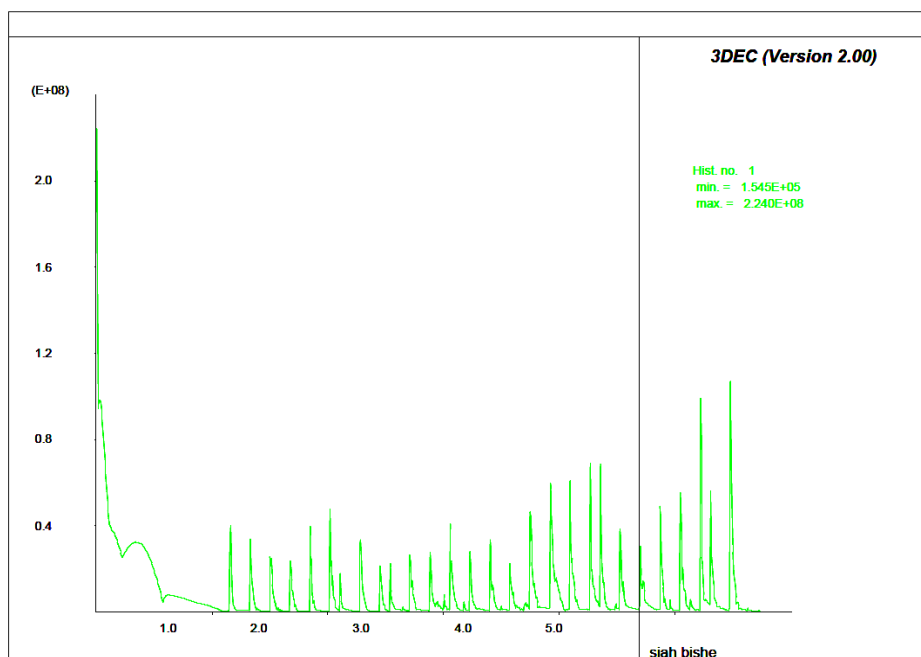
جدول ۴-۶- دلایل انتخاب مناطق مختلف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

| شماره منطقه     | دلیل انتخاب ارتفاع و عرض و موقعیت منطقه                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱، ۲ و ۳        | دهانه معادل برای مغار نیروگاه در حدود ۸ متر محاسبه شده در نتیجه عرض مغار به ۳ قسمت تقسیم شده است. در ضمن به دلیل دشواری حفر قوس‌ها این قسمت باید در یک مرحله حفاری شود که این باعث شد که از لحاظ ارتفاعی تاج مغار در یک مرحله حفر شود. |
| ۴، ۵، ۶ و ۷     | وجود لایه‌های نازک و نزدیکی به گوشه‌ها باعث شده که ارتفاع پله و عرض پله کم در نظر گرفته شده است.                                                                                                                                       |
| ۸               | وجود سه سطح آزاد باعث افزایش ارتفاع پله شده است                                                                                                                                                                                        |
| ۹               | وجود رگه نازک آذین باعث شده که برای حفاری این رگه به صورت جداگانه ارتفاع پله را کم در نظر بگیریم.                                                                                                                                      |
| ۱۰              | به دلیل تقسیم بندی منطقه‌ی ۱۱ و عبور کردن لایه ضعیف میلونیت به ناچار باید که ارتفاع و عرض این منطقه کم در نظر گرفته شود.                                                                                                               |
| ۱۱              | وجود لایه ضعیف میلونیت در این منطقه باعث شده که عرض و ارتفاع پله کم در نظر گرفته شده است.                                                                                                                                              |
| ۱۲              | به دلیل عبور کردن لایه میلونیت ارتفاع کم ولی چون لایه میلونیت تقریباً از قسمت سمت چپ پله عبور می‌کند لذا عرض پله بیشتر در نظر گرفته شده است.                                                                                           |
| ۱۳              | به دلیل وجود لایه‌های نازک ماسه سنگ کوارتزی و شیل قرمز ارتفاع آن کم انتخاب شده است.                                                                                                                                                    |
| ۱۴              | به دلیل دور بودن از گوشه‌ها عرض آن زیاد انتخاب شده ولی با وجود لایه‌های نازک نمی‌توان ارتفاع را زیاد انتخاب شود.                                                                                                                       |
| ۱۵ و ۱۶         | عبور لایه ضعیف و نازک میلونیت دلیل انتخاب ارتفاع کم پله می‌باشد.                                                                                                                                                                       |
| ۱۷              | وجود لایه نسبتاً ضخیم شیل و با مقاومت مناسب باعث افزایش ارتفاع شده است.                                                                                                                                                                |
| ۱۸              | وجود لایه نازک شیل قرمز باعث انتخاب پله با ارتفاع کم شده است.                                                                                                                                                                          |
| ۱۹              | مجاورت با گوشه ایجاد شده ناشی از تقاطع گالری‌های ارتباطی دلیل انتخاب پله با ارتفاع کم شده است.                                                                                                                                         |
| ۲۰              | وجود لایه نسبتاً ضخیم شیل و همچنین مجاورت با حفریات متصل به مغار باعث می‌شود که بحث آسیب رساندن به دیواره‌ها کمتر مطرح باشد لذا باعث افزایش ارتفاع و عرض پله شده است.                                                                  |
| ۲۱              | وجود توده نفوذی آذرین باعث حفر یک مرحله‌ی گالری پایین دست شده است                                                                                                                                                                      |
| ۲۲ و ۲۳         | وجود لایه ضخیم ماسه سنگی باعث افزایش ارتفاع پله شده و نزدیکی به گوشه‌ها باعث کاهش عرض پله‌ها شده است.                                                                                                                                  |
| ۲۴، ۲۵ و ۲۸     | وجود لایه‌های نازک شیل قرمز و رگه‌های سنگ آذرین باعث کاهش ارتفاع پله‌ها شده است.                                                                                                                                                       |
| ۲۶              | حفر تونل متصل به مغار نیروگاه به دلیل قطر کم به صورت تک مرحله‌ای در نظر گرفته شده است.                                                                                                                                                 |
| ۲۷، ۲۹، ۳۱ و ۳۳ | به دلیل توده سنگ آذرین و مقاومت بالای آن ارتفاع نسبتاً زیادی دارند.                                                                                                                                                                    |
| ۳۰ و ۳۲         | وجود لایه ضخیم شیل باعث افزایش ارتفاع پله شده است.                                                                                                                                                                                     |
| ۳۴              | حفر تونل ارتباطی با مغار دریچه‌ها به دلیل قطر کم به صورت تک مرحله‌ای در نظر گرفته شده است.                                                                                                                                             |



## ۴-۸-۱- نتایج تعادل مدل پس از حفاری

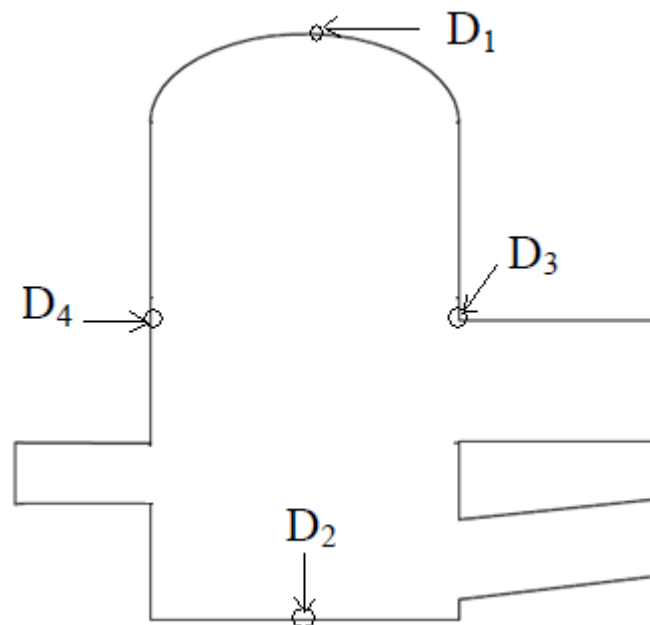
پس از انجام کامل سیکل حفاری مغار نیروگاه به‌منظور بررسی صحت مدل ارائه شده نیروهای نامتعادل حاصل از مراحل حفاری مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۴-۱۱) تغییرات ماکزیمم نیروی نامتعادل در مدل ساخته شده طی پروسه حفاری مرحله‌ای نشان داده شده است. در شکل (۴-۱۱) محور افقی تعداد سیکل‌های نرم‌افزار و محور قائم مقدار نیرو را نشان می‌دهد. نقاط ماکزیمم این منحنی نشان دهنده سیکل‌های متوالی حفاری است و نقاط حداقل این منحنی نیز نشان دهنده حالت تعادل سیستم بعد از حفاری می‌باشد. پس از حصول اطمینان از به تعادل رسیدن مدل بررسی پارامترهای خروجی را می‌توان مورد بررسی قرار داد.



شکل ۴-۱۱- تغییرات ماکزیمم نیروی نامتعادل در مدل ساخته شده طی پروسه حفاری مرحله‌ای

## ۴-۸-۲- معرفی ترتیب‌های مختلف حفاری برای مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

در این تحقیق مبنای انتخاب ترتیب مناسب حفاری جابجایی نسبی منظور شده است. برای انتخاب صحیح، از صرفاً به بررسی جابجایی در یک نقطه اکتفا نشده است، بلکه جابجایی در چهار نقطه در بالا و پایین و سمت راست و چپ مغار در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۱۲). سپس جابجایی‌های حادث شده در این چهار نقطه محاسبه و در نهایت بر اساس رابطه (۴-۷) به‌عنوان



شکل ۴-۱۲- موقعیت نقاط در نظر گرفته شده برای محاسبه جابجایی نسبی در مغار نیروگاه

ملاک محاسبات برای انتخاب ترتیب مناسب حفاری برآورد شده است. در نهایت برای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده نقطه‌ای به‌عنوان نقطه‌ی شاهد منظور شده و جابجایی بدست آمده برای این نقطه با جابجایی‌های بدست آمده از تحلیل نتایج ابزار دقیق مقایسه شده است.

$$D_r = \frac{D_1 - D_2}{D_3 - D_4} \quad \text{رابطه (۴-۷)}$$

در رابطه (۴-۷)  $D_r$  جابجایی نسبی مغار نیروگاه در راستای  $Y$ ،  $D_1$  جابجایی تاج مغار در راستای  $Y$ ،  $D_2$  جابجایی کف مغار در راستای  $Y$ ،  $D_3$  جابجایی دیواره راست مغار در راستای  $Y$  و  $D_4$  جابجایی دیواره چپ مغار در راستای  $Y$  می‌باشد. نکته قابل توجه اینکه ملاک برای دیواره چپ و راست راستای  $X$  می‌باشد، به‌طوری که جهت مثبت  $X$  سمت راست به حساب می‌آید.

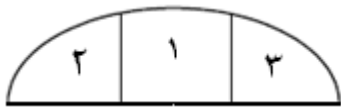
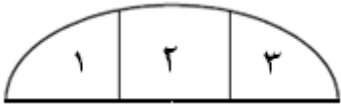
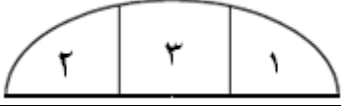
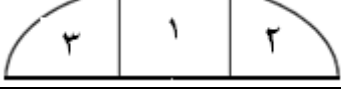
#### ۴-۸-۲-۱- انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۱ (تاج مغار نیروگاه)

برای حفاری تاج مغار نیروگاه ۶ حالت مختلف در نظر گرفته شده است، برای هر یک از این حالات مدلی ساخته شد و سپس به‌صورت مرحله‌ای حفاری و نگهداری تاج مغار تحلیل شده است. باید توجه کرد که این حالات از لحاظ فنی کاملاً قابل اجرا هستند. حالات مختلف دیگری هم وجود دارد که از لحاظ فنی قابل اجرا نیستند، لذا از ساختن مدل مربوط به این حالات خودداری شده است.

بعد از اجرای مدل‌های مختلف، جابجایی‌های نسبی ناشی از حفاری هر مرحله ثبت شده و سپس این جابجایی‌ها با هم مقایسه شده‌اند. بعد از مقایسه نتایج، ترتیب حفاری که باعث کمترین جابجایی در نقطه مذکور شده به‌عنوان ترتیب مناسب حفر تاج مغار در نظر گرفته شده است. در جدول (۷-۴) حالات مختلف ترتیب حفاری تاج مغار به‌همراه جابجایی‌های نسبی بدست آمده از رابطه (۷-۴) آورده شده است.

با توجه به جدول (۷-۴) جابجایی نسبی مدل شماره ۱ از بقیه مدل‌ها کمتر است. لذا این ترتیب حفر را می‌توان به‌عنوان ترتیب حفر مناسب تاج تونل در نظر گرفت. در مراحل بعدی، قسمت تاج مغار طبق مدل حفاری شماره ۱ به‌صورت حفر شده در نظر گرفته می‌شود و سپس مرحله‌ی اصلی بعدی به‌صورت مرحله‌ای حفاری و نگهداری شده و نتایج آن تحلیل شده است.

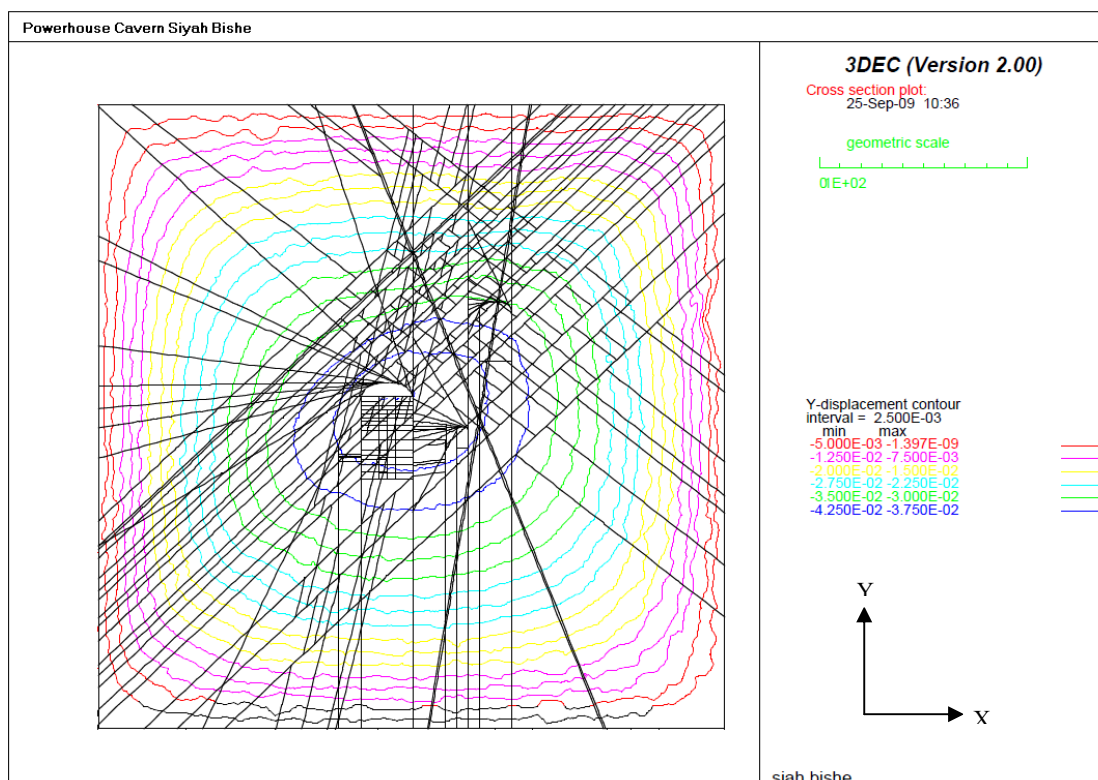
جدول ۷-۴- حالات مختلف حفاری تاج مغار

| شماره‌ی مدل | حالات حفاری | ترتیب حفاری                                                                         | جابجایی نسبی |
|-------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ۱           | ۱           |  | ۳/۹۲         |
| ۲           | ۲           |  | ۵/۵۱         |
| ۳           | ۳           |  | ۴/۴۶         |
| ۴           | ۴           |  | ۵/۶۲         |
| ۵           | ۵           |  | ۴/۷۳         |
| ۶           | ۶           |  | ۴/۲۵         |

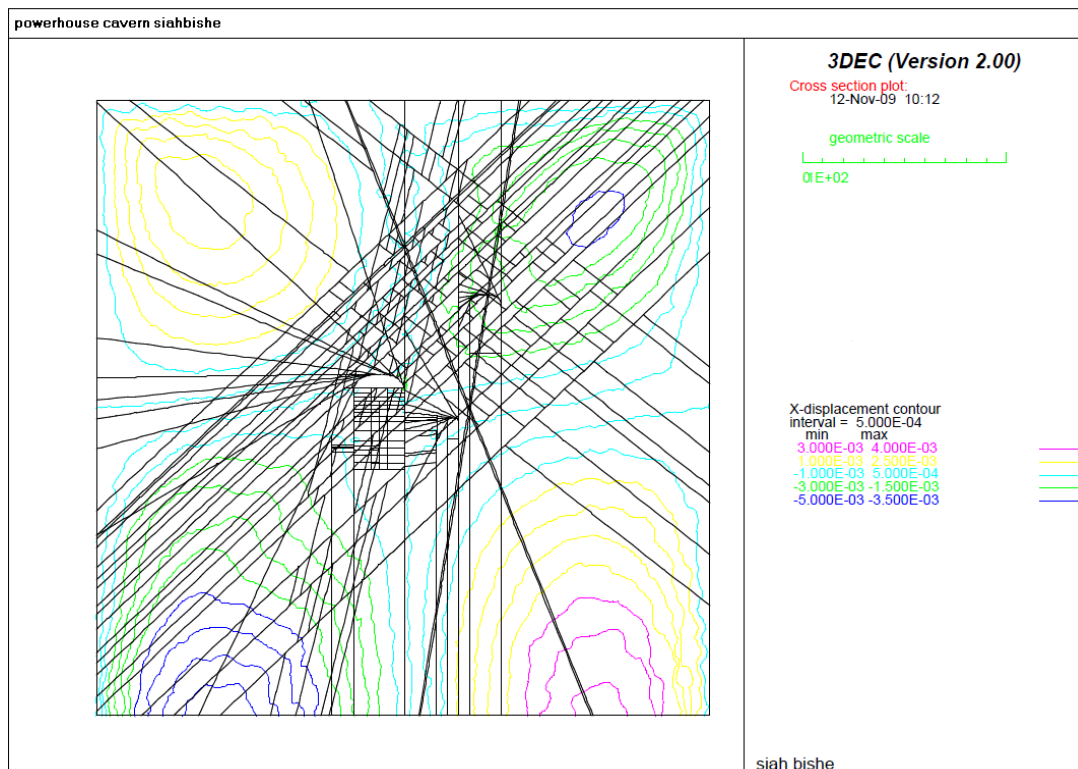
در شکل (۴-۱۳) کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با ترتیب حفاری شماره‌ی ۱ نشان داده شده است. با توجه به این کنتورها می‌توان تغییرات جابجایی ناشی از حفر تاج مغار نیروگاه را بررسی کرد. این بررسی نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات

جابجایی در اطراف قسمت حفر شده است. در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) کنتورهای جابجایی در راستای X و Z پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه با ترتیب حفاری شماره‌ی ۱ نشان داده شده است. طبق شکل‌های مذکور تغییرات جابجایی در اطراف مغار در راستای X و Z کم بوده لذا جابجایی در راستای Y بررسی می‌شود.

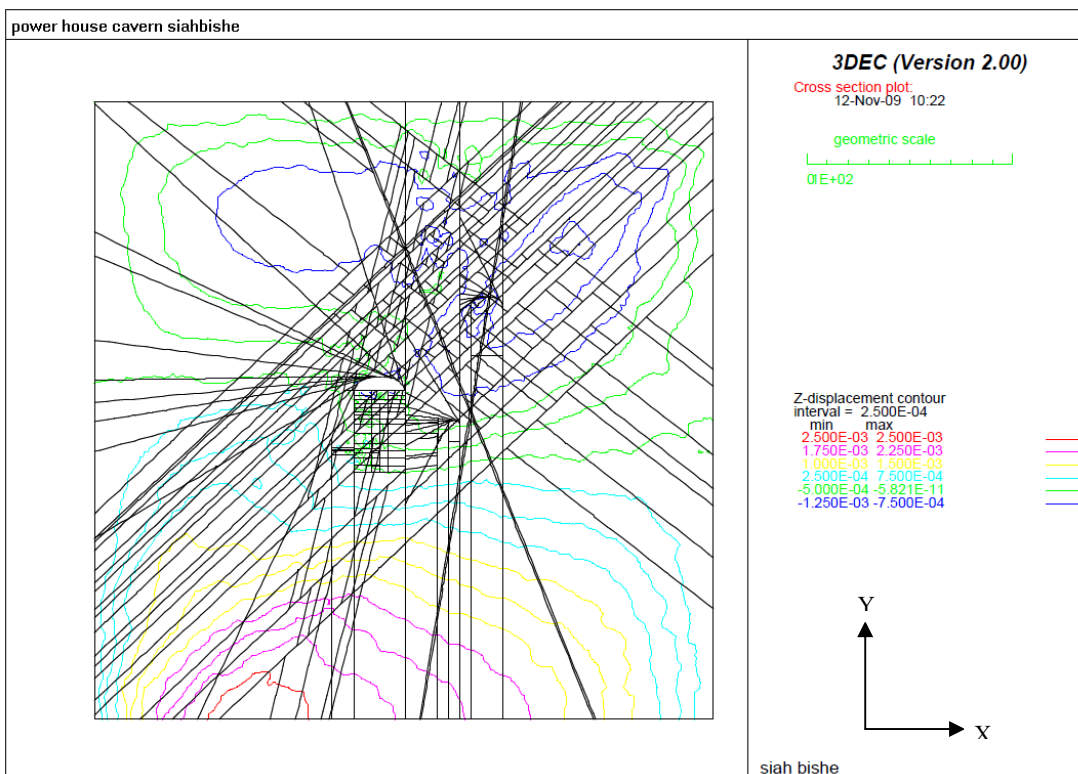
با توجه به پلات‌های نشان داده شده در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) و (۴-۱۵) کنتورهای جابجایی در راستای X و Z دارای کمترین تغییرات و اغتشاش می‌باشد و این نشان می‌دهد که جابجایی در این راستاها نمی‌تواند ملاک مناسبی برای تعیین ترتیب مناسب حفاری مغار باشد. برای بررسی جابجایی نسبی مغار نیروگاه نیاز است که از هر مدل پلات‌های مختلفی بررسی شود که به دلیل تعدد مدل‌ها از آوردن همگی پلات‌ها خودداری شده است و خروجی‌های نرم‌افزار به صورت عددی تحلیل شده‌اند.



شکل ۴-۱۳- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه  
(مدل حفاری شده شماره‌ی ۱)



شکل ۴-۱۴- کنتورهای جابجایی در راستای X پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه  
 (مدل حفاری شده شماره ۱)



شکل ۴-۱۵- کنتورهای جابجایی در راستای Z پس از حفاری تاج مغار نیروگاه سد سیاه بیشه  
 (مدل حفاری شده شماره ۱)

## ۴-۸-۲-۲- انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله اصلی شماره‌ی ۲

برای حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ مغار نیروگاه، ۴ حالت مختلف در نظر گرفته شد، برای هر یک از این حالات مدلی ساخته شد و سپس به‌صورت مرحله‌ای حفاری و نگهداری هر مرحله اجرا شده است. نگهداری طبق الگو ارائه شده در جدول (۴-۳) اجرا شده است. پس از هر مرحله نصب نگهداری مدل اجرا شده است تا بدین وسیله پایداری مغار تامین گردد و از ریزش گوه‌ها جلوگیری شود. بعد از اجرای چهار مدل مذکور جابجایی‌های ناشی از حفاری در راستای Y در نقاط مشخص شده در شکل (۴-۱۲) ثبت و سپس این جابجایی نسبی محاسبه شده و در نهایت جابجایی‌های نسبی ۴ مدل مذکور با هم مقایسه شده‌اند. بعد از مقایسه، ترتیب حفاری که باعث کمترین جابجایی نسبی شده به‌عنوان ترتیب مناسب برای حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ در نظر گرفته شده است. در جدول (۴-۸) حالات مختلف ترتیب حفاری تاج مغار به‌همراه جابجایی‌های نسبی بدست آمده از رابطه (۴-۴) آورده شده است.

با توجه به جدول (۴-۸) جابجایی نسبی حالت ۴ از بقیه حالات کمتر است. لذا این ترتیب حفر را می‌توان به‌عنوان ترتیب مناسب حفر برای مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ در نظر گرفت. در مراحل بعدی این قسمت طبق مدل حفاری شماره ۱۰ به‌صورت حفر شده در نظر گرفته می‌شود و سپس مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۳ به‌صورت مرحله‌ای حفاری و جابجایی آن تحلیل خواهد شد.

ذکر این نکته ضروری است که ترتیب‌های حفر دیگری نیز می‌توان برای حفاری مغار نیروگاه متصور بود. ولی بدلیل امکان‌پذیر نبودن از لحاظ فنی، زمین شناسی و سایر شرایط از ساختن مدل برای این حالت خودداری شده است. برای مثال در جدول (۴-۹) چندین ترتیب حفر در مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲ که قابلیت اجرا ندارند به همراه دلایل رد شدن این حالات آورده شده است. البته در سایر مراحل اصلی نیز ترتیب‌های حفاری که از لحاظ فنی و زمین شناسی رد شده‌اند وجود دارد که از آوردن آنها خودداری شده است.

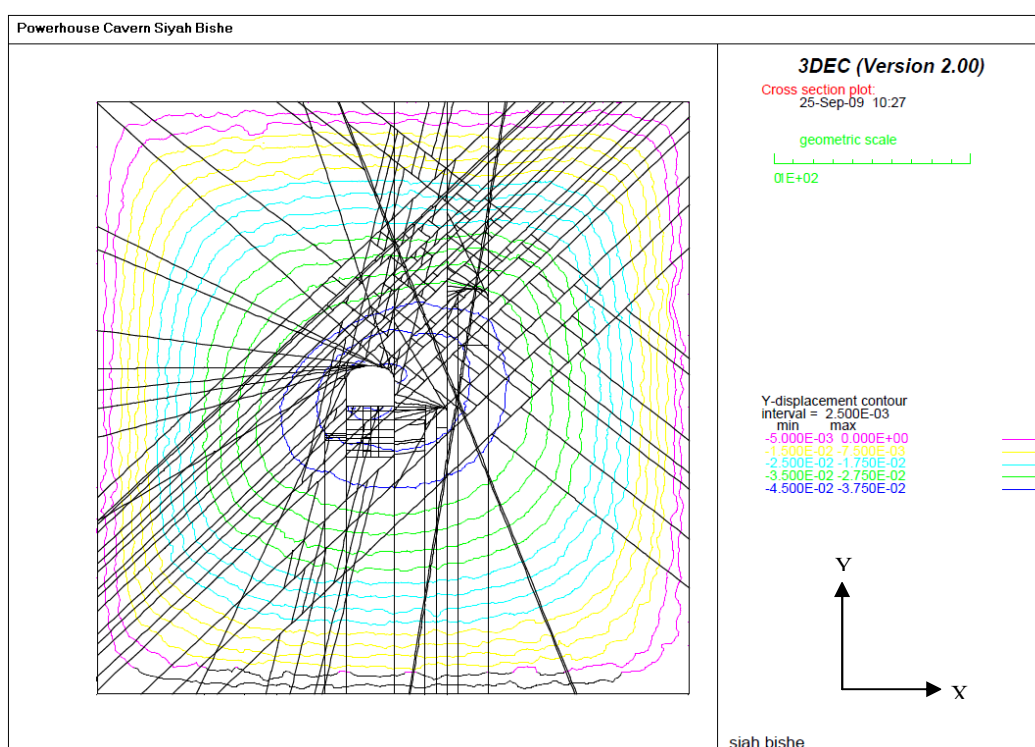
جدول ۴-۸- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲

| شماره‌ی مدل | حالات حفاری | ترتیب حفاری                                                                                                                                                                                                                                                                              | جابجایی نسبی |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
|-------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---|---|---|---|---|---|----|--|----|----|--|--|----|----|--|----|--|
| ۷           | ۱           | <table><tr><td>۴</td><td rowspan="3">۷</td><td>۵</td></tr><tr><td>۵</td><td>۶</td></tr><tr><td>۸</td><td>۹</td></tr><tr><td colspan="2">۱۱</td><td>۱۲</td></tr><tr><td colspan="3">۱۳</td></tr><tr><td>۱۴</td><td rowspan="2">۱۶</td><td></td></tr><tr><td>۱۵</td><td></td></tr></table> | ۴            | ۷ | ۵ | ۵ | ۶ | ۸ | ۹ | ۱۱ |  | ۱۲ | ۱۳ |  |  | ۱۴ | ۱۶ |  | ۱۵ |  |
| ۴           | ۷           | ۵                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۵           |             | ۶                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۸           |             | ۹                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۱          |             | ۱۲                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۴          | ۱۶          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۵          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۸           | ۲           | <table><tr><td>۵</td><td rowspan="3">۷</td><td>۴</td></tr><tr><td>۶</td><td>۵</td></tr><tr><td>۹</td><td>۸</td></tr><tr><td colspan="2">۱۲</td><td>۱۱</td></tr><tr><td colspan="3">۱۳</td></tr><tr><td>۱۵</td><td rowspan="2">۱۴</td><td></td></tr><tr><td>۱۶</td><td></td></tr></table> | ۵            | ۷ | ۴ | ۶ | ۵ | ۹ | ۸ | ۱۲ |  | ۱۱ | ۱۳ |  |  | ۱۵ | ۱۴ |  | ۱۶ |  |
| ۵           | ۷           | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۶           |             | ۵                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۹           |             | ۸                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۲          |             | ۱۱                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۵          | ۱۴          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۶          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۹           | ۳           | <table><tr><td>۴</td><td rowspan="3">۶</td><td>۴</td></tr><tr><td>۵</td><td>۵</td></tr><tr><td>۷</td><td>۸</td></tr><tr><td colspan="2">۱۰</td><td>۱۱</td></tr><tr><td colspan="3">۱۲</td></tr><tr><td>۱۳</td><td rowspan="2">۱۴</td><td></td></tr><tr><td>۱۳</td><td></td></tr></table> | ۴            | ۶ | ۴ | ۵ | ۵ | ۷ | ۸ | ۱۰ |  | ۱۱ | ۱۲ |  |  | ۱۳ | ۱۴ |  | ۱۳ |  |
| ۴           | ۶           | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۵           |             | ۵                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۷           |             | ۸                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۰          |             | ۱۱                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۲          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          | ۱۴          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۰          | ۴           | <table><tr><td>۵</td><td rowspan="3">۶</td><td>۴</td></tr><tr><td>۵</td><td>۴</td></tr><tr><td>۸</td><td>۷</td></tr><tr><td colspan="2">۱۱</td><td>۱۰</td></tr><tr><td colspan="3">۱۲</td></tr><tr><td>۱۳</td><td rowspan="2">۱۴</td><td></td></tr><tr><td>۱۳</td><td></td></tr></table> | ۵            | ۶ | ۴ | ۵ | ۴ | ۸ | ۷ | ۱۱ |  | ۱۰ | ۱۲ |  |  | ۱۳ | ۱۴ |  | ۱۳ |  |
| ۵           | ۶           | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۵           |             | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۸           |             | ۷                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۱          |             | ۱۰                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۲          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          | ۱۴          |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |
| ۱۳          |             |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |              |   |   |   |   |   |   |    |  |    |    |  |  |    |    |  |    |  |

جدول ۴-۹- ترتیب‌های حفاری رد شده در مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۲

| شماره | ترتیب‌های حفاری رد شده                                                                                                                                                                                                                                                                                              | دلایل رد شدن ترتیب حفاری |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---|---|---|--|---|---|----|----|----|--|----|--|----|--|----|--|----|----|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱     | <table border="1"> <tr><td>۵</td><td>۴</td><td>۵</td></tr> <tr><td>۷</td><td></td><td>۶</td></tr> <tr><td>۹</td><td>۸</td><td>۱۰</td></tr> <tr><td>۱۱</td><td></td><td>۱۲</td></tr> <tr><td></td><td>۱۳</td><td></td></tr> <tr><td>۱۴</td><td></td><td>۱۶</td></tr> <tr><td>۱۵</td><td></td><td></td></tr> </table> | ۵                        | ۴ | ۵ | ۷ |  | ۶ | ۹ | ۸  | ۱۰ | ۱۱ |  | ۱۲ |  | ۱۳ |  | ۱۴ |  | ۱۶ | ۱۵ |  |  | حفاری قسمت ۴ و ۸ به دلیل سطح آزاد کم مشکل است و آتشیاری این مناطق باعث آسیب دیدن مناطق ۵ و ۶ و ۷ می‌شود که به دلیل سنگ ضعیف باعث آسیب به دیواره‌ها می‌شود. |
| ۵     | ۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۵                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۷     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۶                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۹     | ۸                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۱۰                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۱    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۲                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
|       | ۱۳                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۴    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۶                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۵    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۲     | <table border="1"> <tr><td>۴</td><td>۷</td><td>۶</td></tr> <tr><td>۵</td><td></td><td>۵</td></tr> <tr><td>۸</td><td>۱۰</td><td>۹</td></tr> <tr><td>۱۱</td><td></td><td>۱۲</td></tr> <tr><td></td><td>۱۳</td><td></td></tr> <tr><td>۱۴</td><td></td><td>۱۶</td></tr> <tr><td>۱۵</td><td></td><td></td></tr> </table> | ۴                        | ۷ | ۶ | ۵ |  | ۵ | ۸ | ۱۰ | ۹  | ۱۱ |  | ۱۲ |  | ۱۳ |  | ۱۴ |  | ۱۶ | ۱۵ |  |  | حفاری قسمت ۶ قبل از ۵ غیر ممکن است و باید ترتیب از بالا به پایین در تمامی موارد رعایت شود.                                                                 |
| ۴     | ۷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۶                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۵     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۵                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۸     | ۱۰                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ۹                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۱    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۲                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
|       | ۱۳                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۴    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۶                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۵    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۳     | <table border="1"> <tr><td>۵</td><td>۶</td><td>۴</td></tr> <tr><td>۵</td><td></td><td>۴</td></tr> <tr><td>۸</td><td>۹</td><td>۷</td></tr> <tr><td>۱۱</td><td></td><td>۱۰</td></tr> <tr><td></td><td>۱۲</td><td></td></tr> <tr><td>۱۴</td><td></td><td>۱۳</td></tr> <tr><td>۱۴</td><td></td><td></td></tr> </table>  | ۵                        | ۶ | ۴ | ۵ |  | ۴ | ۸ | ۹  | ۷  | ۱۱ |  | ۱۰ |  | ۱۲ |  | ۱۴ |  | ۱۳ | ۱۴ |  |  | حفر قسمت ۱۳ باعث ایجاد شکستگی و ناپایداری در قسمت ۱۳ می‌شود زیرا از قسمت ۱۴ لایه میلونیت عبور کرده است. لذا قسمت ۱۳ حتماً باید قبل از قسمت ۱۴ حفر شود.     |
| ۵     | ۶                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۴                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۵     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۴                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۸     | ۹                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ۷                        |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۱    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۰                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
|       | ۱۲                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۴    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ۱۳                       |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |
| ۱۴    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                          |   |   |   |  |   |   |    |    |    |  |    |  |    |  |    |  |    |    |  |  |                                                                                                                                                            |

در شکل (۴-۱۶) کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۲ مغار نیروگاه سد سیاه بیشه طبق مدل حفاری شماره‌ی ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این کنتورها می‌توان تغییرات جابجایی ناشی از حفر این مناطق از مغار نیروگاه را بررسی کرد. این بررسی‌ها حاکی از آن است که بیشترین تغییرات جابجایی در اطراف قسمت حفر شده می‌باشد و به‌جزء این قسمت در سایر قسمت‌های مدل کنتورهای جابجایی به‌صورت کاملاً متقارن می‌باشند. هر چه از منطقه حفاری دورتر می‌شویم به‌هم‌ریختگی کنتورهای جابجایی کمتر می‌شود.



شکل ۴-۱۶- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۲ مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

#### ۴-۸-۲-۳- انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۳

پس از مشخص کردن ترتیب مناسب حفر مراحل اصلی ۱ و ۲ نیروگاه، این قسمت‌ها حفاری شده و سپس قسمت اصلی شماره‌ی ۳ که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است حفاری می‌شود. برای حفاری این قسمت به‌صورت مرحله‌ای، ۴ حالت در نظر گرفته شده است. برای هر یک از این ۴ حالت مدلی به‌صورت جداگانه ساخته شده است. سپس حفاری و نگهداری به‌صورت مرحله‌ای صورت گرفته، در ادامه جابجایی‌های نسبی حادث شده در مغار نیروگاه در هر مدل محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند.



بعد از مقایسه انجام شده ترتیب حفاری که باعث کمترین جابجایی بود به‌عنوان ترتیب مناسب حفر منطقه‌ی اصلی شماره‌ی ۳ مغار نیروگاه در نظر گرفته شده است.

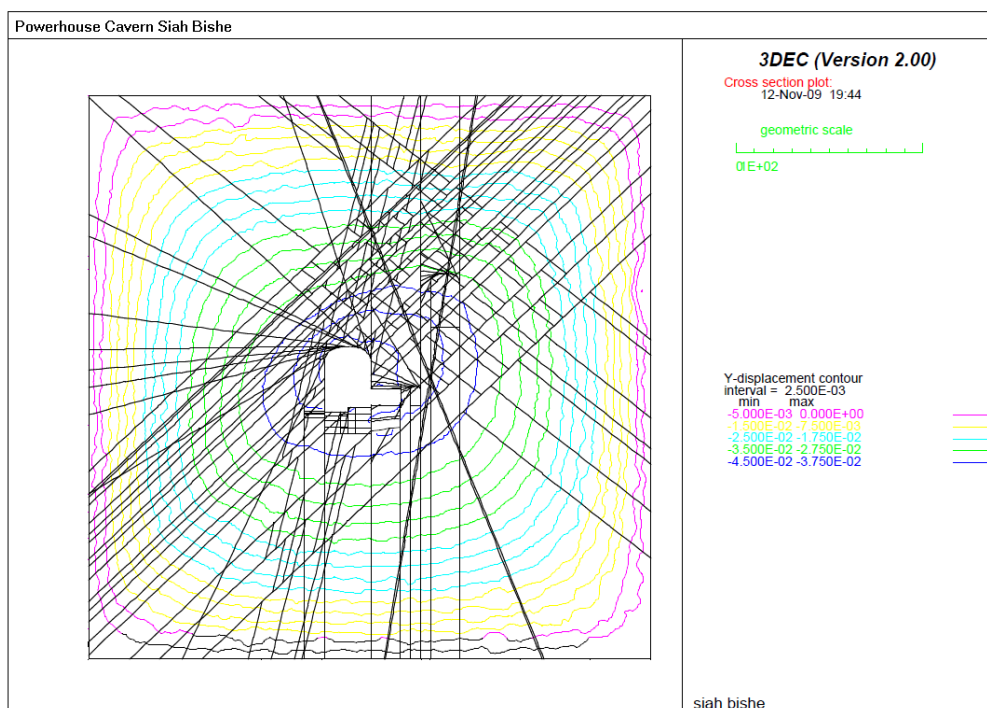
در جدول (۴-۱۰) حالات مختلف ترتیب حفاری منطقه‌ی شماره‌ی ۳ به‌همراه جابجایی‌های نسبی آورده شده است.

جدول ۴-۱۰- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۳

| شماره‌ی مدل | حالات حفاری | ترتیب حفاری                                                                                                                                                                           | جابجایی نسبی |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
|-------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----|----|--|----|----|----|----|----|------|
| ۱۱          | ۱           | <table><tr><td>۱۵</td><td>۱۶</td></tr><tr><td colspan="2">۱۷</td></tr><tr><td>۱۸</td><td rowspan="4">۱۹</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۱</td></tr><tr><td>۲۲</td></tr></table> | ۱۵           | ۱۶ | ۱۷ |  | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۲ | ۱/۶۵ |
| ۱۵          | ۱۶          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۷          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۸          | ۱۹          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۱          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۲          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۲          | ۲           | <table><tr><td>۱۵</td><td>۱۶</td></tr><tr><td colspan="2">۱۷</td></tr><tr><td>۱۸</td><td rowspan="4">۱۹</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۱</td></tr><tr><td>۲۱</td></tr></table> | ۱۵           | ۱۶ | ۱۷ |  | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۱ | ۱/۵۳ |
| ۱۵          | ۱۶          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۷          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۸          | ۱۹          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۱          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۱          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۳          | ۳           | <table><tr><td>۱۶</td><td>۱۵</td></tr><tr><td colspan="2">۱۷</td></tr><tr><td>۱۸</td><td rowspan="4">۱۹</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr></table> | ۱۶           | ۱۵ | ۱۷ |  | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۲/۵۴ |
| ۱۶          | ۱۵          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۷          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۸          | ۱۹          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۴          | ۴           | <table><tr><td>۱۵</td><td>۱۶</td></tr><tr><td colspan="2">۱۷</td></tr><tr><td>۱۸</td><td rowspan="4">۱۹</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr><tr><td>۲۰</td></tr></table> | ۱۵           | ۱۶ | ۱۷ |  | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۰ | ۲۰ | ۲/۵۶ |
| ۱۵          | ۱۶          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۷          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۱۸          | ۱۹          |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |
| ۲۰          |             |                                                                                                                                                                                       |              |    |    |  |    |    |    |    |    |      |

در شکل (۴-۱۷) کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۳ مغار نیروگاه سد سیاه بیشه طبق مدل حفاری شماره‌ی ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این کنتورها می‌توان تغییرات جابجایی ناشی از حفر این مناطق از مغار نیروگاه را بررسی کرد. پس از بررسی انجام شده مشخص شده است که بیشترین تغییرات جابجایی در اطراف قسمت حفر شده بوده و به‌جزء این

قسمت در سایر قسمت‌های مدل کنتورهای جابجایی به صورت کاملاً متقارن می‌باشند. هر چه از منطقه حفاری دورتر می‌شویم به هم‌ریختگی کنتورهای جابجایی کمتر می‌شود.



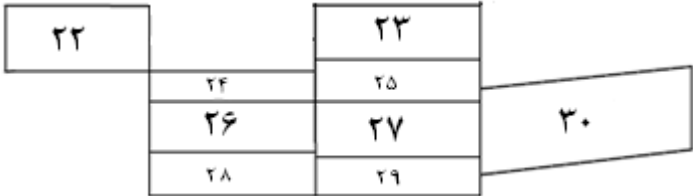
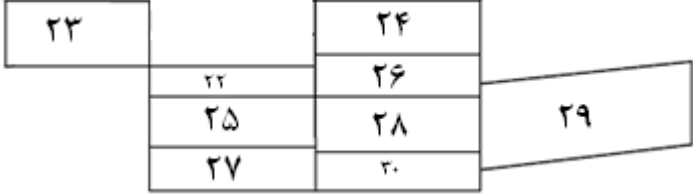
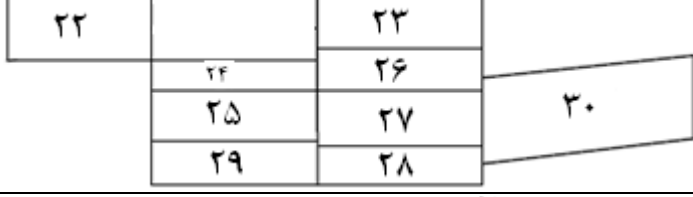
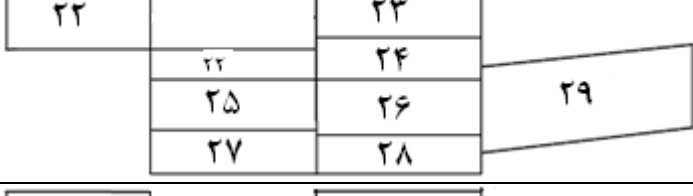
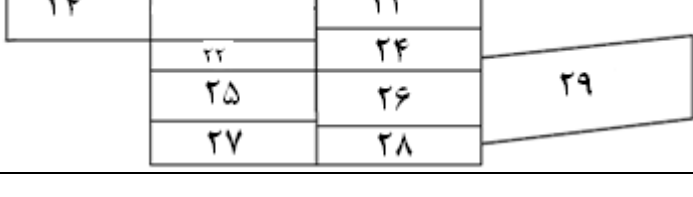
شکل ۴-۱۷- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری مناطق ۱ و ۲ و ۳ مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

#### ۴-۸-۲-۴ - انتخاب ترتیب مناسب حفر مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۴

در این مرحله حفاری مغار نیروگاه به صورت کامل صورت می‌گیرد یعنی تمام مغار حفر می‌شود. برای اجرای مرحله‌ی شماره‌ی ۴، پنج حالت حفاری مختلف در نظر گرفته شده است (در این مرحله به دلیل تعداد سیکل‌های بیشتر مراحل بیشتری در نظر گرفته شده است). این ۵ حالت از ترتیب‌های مختلف حفر به همراه جابجایی‌های نسبی ناشی از آنها در جدول (۴-۱۱) آورده شده است. پس از ساخت ۵ مدل مذکور هر کدام از مدل‌ها اجرا و تحلیل شده‌اند و سپس جابجایی نسبی در راستای Y برای هر یک از مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی‌ها مشخص شد که حالت حفاری شماره‌ی ۵ یا به عبارتی مدل ۱۹ بهترین مدل جواب‌ها و مناسب‌ترین گزینه می‌باشد. پس از بررسی پلات‌های جابجایی ۵ مدل یاد شده نیز مشخص شد که جابجایی‌ها در مدل شماره‌ی ۱۹ دارای کمترین

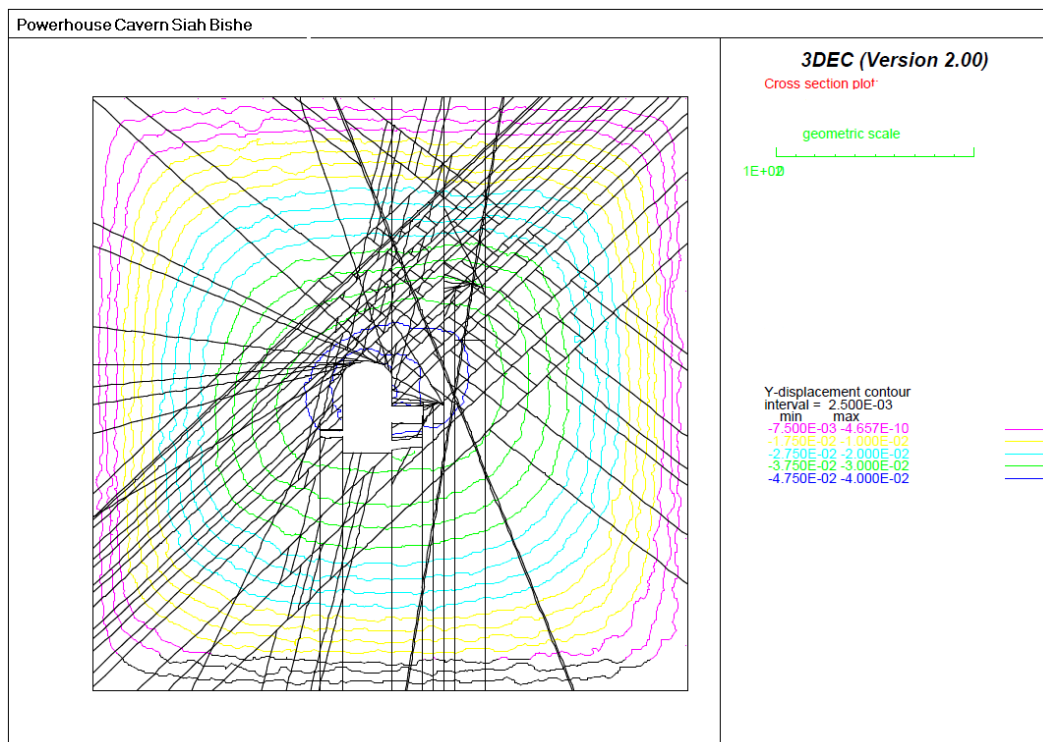
به هم‌ریختگی می‌باشند. لذا مدل شماره‌ی ۱۹ به‌عنوان ترتیب مناسب حفاری مغار نیروگاه انتخاب شد.

جدول ۴-۱۱- حالات مختلف حفاری مرحله‌ی اصلی شماره‌ی ۴

| شماره‌ی مدل | حالات حفاری | ترتیب حفاری                                                                          | جابجایی نسبی |
|-------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ۱۵          | ۱           |    | ۴/۲۷         |
| ۱۶          | ۲           |    | ۵/۵۱         |
| ۱۷          | ۳           |   | ۵/۵۱         |
| ۱۸          | ۴           |  | ۳/۸۱         |
| ۱۹          | ۵           |  | ۳/۷۱         |

در شکل (۴-۱۸) کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری کل مغار نیروگاه سد سیاه بیشه نشان داده شده است. پس از بررسی خروجی‌های نرم‌افزار که از مدل‌های مرحله‌ی اصلی پنجم بدست آمده مشخص شد که مدل شماره‌ی ۱۹ گزینه مناسب برای حفاری مغار می‌باشد. در این مدل

جابجایی نسبی محاسبه شده دارای کمترین مقدار خود می‌باشد. با اجرای این مرحله مغار کامل حفر شده و ترتیب مناسب حفر مغار مشخص شده است.

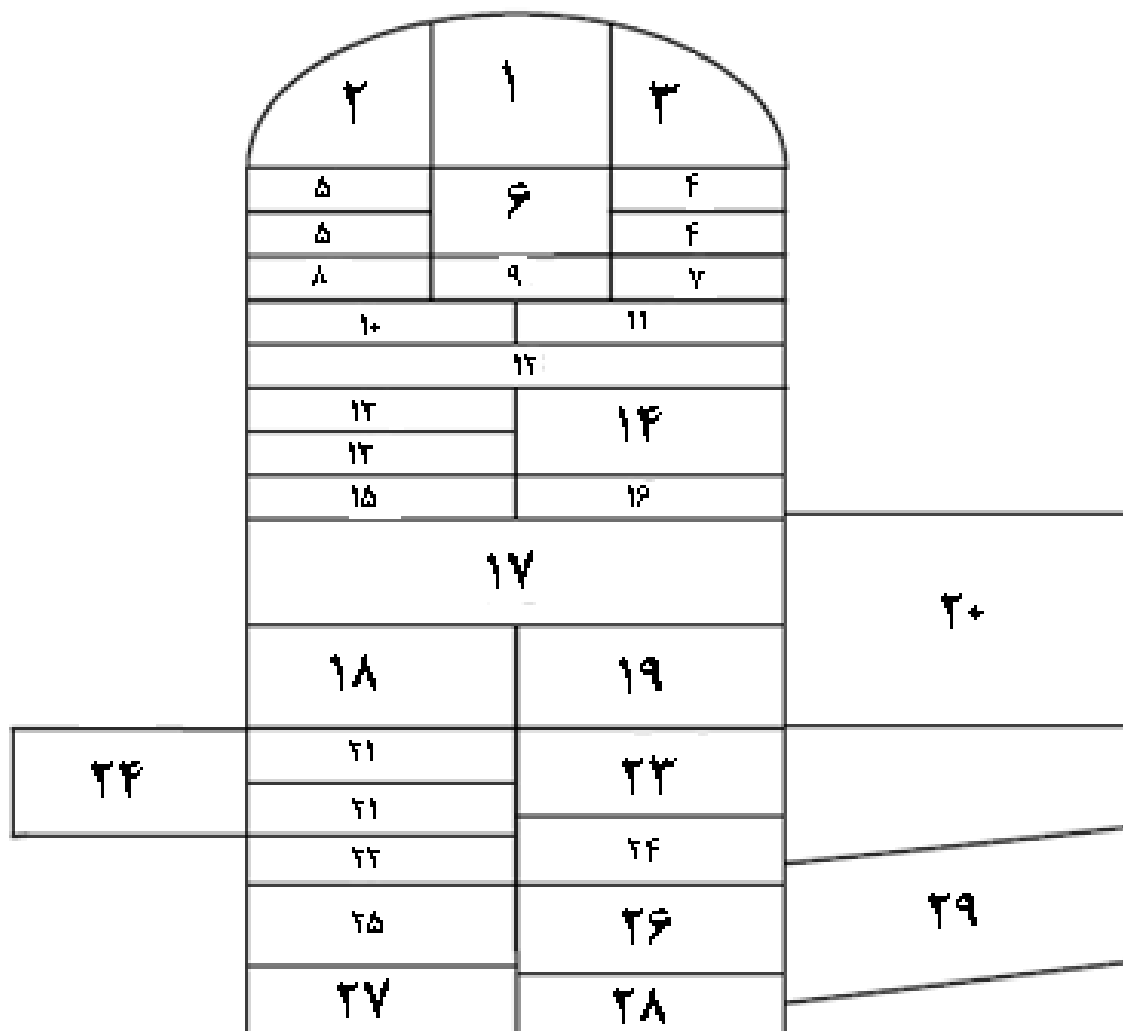


شکل ۴-۱۸- کنتورهای جابجایی در راستای Y پس از حفاری کامل مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

ترتیب مناسب حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه که با استفاده از روش‌های عددی و نرم افزار 3DEC بدست آمده در شکل (۴-۱۹) آورده شده است. این ترتیب حفاری از مجموعه ۴ ترتیب مناسب حفاری در چهار مرحله‌ی اصلی حفاری مغار بدست آمده است. بر اساس ترتیب حفر مشخص شده در شکل (۴-۱۹) کل مغار نیروگاه به همراه گالری‌های متصل به آن در ۲۹ مرحله حفاری شده‌اند. این ترتیب برای حفاری مقطع شماره ۲ مشخص شده است. به دلیل اینکه این مقطع بحرانی‌ترین مقطع مغار نیروگاه است و اینکه ترتیب حفاری در کل مغار باید ثابت باشد می‌تواند این ترتیب به سایر مقاطع مغار نیز تعمیم داده شود.

برای انجام این تحقیق ۱۹ مدل مختلف ساخته و تحلیل شده است. باید توجه داشت که زمان تحلیل مدل‌ها بسیار طولانی و گاهی مدت اجرای برنامه برای تحلیل یک مرحله حفاری به بیش از ۳۰

ساعت نیز می‌رسد. با توجه به تعداد مراحل حفاری زیاد این موضوع باعث شده است تعداد مدل‌های حفاری کمترین مقدار ممکن در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۱۹- ترتیب مناسب حفاری بدست آمده از نرم افزار 3DEC برای حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه

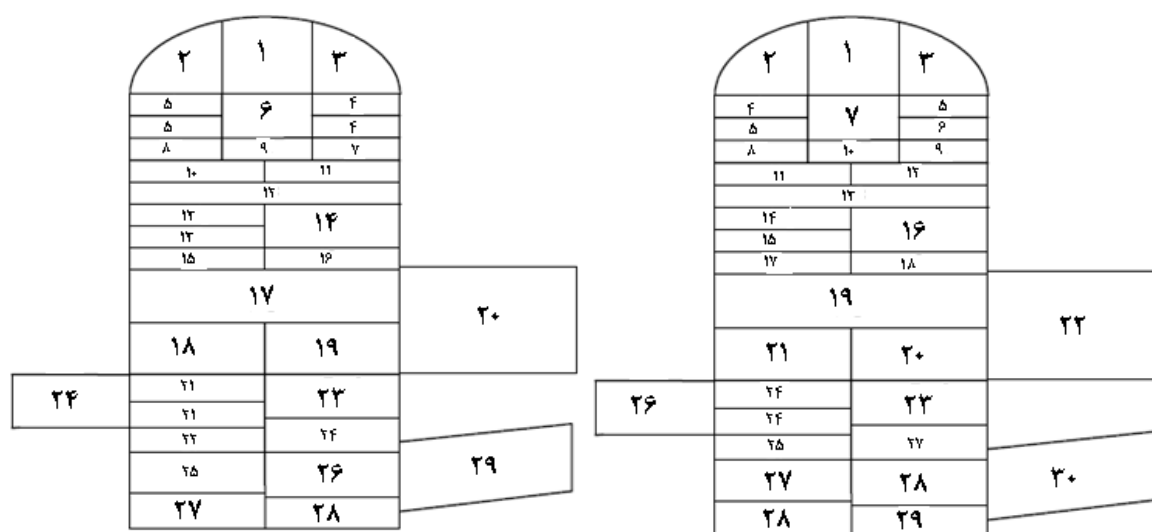
#### ۴-۹- اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده

برای اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده در محیط نرم افزارهای المان مجزا چندین راه وجود دارد. یکی از این راه‌ها، بررسی نمودار تغییرات ماکزیمم نیروهای نامتعادل قبل و بعد از حفاری مغار است. در این مساله به‌خصوص، بدلیل حفاری مرحله‌ای می‌توان تغییرات ماکزیمم نیروهای نامتعادل پس از هر حفاری را بررسی کرد. در صورت صحت مدل این نیروها باید به تعادل رسیده و به سمت

صفر حرکت کنند و نهایتاً به صفر برسند. با توجه به شکل (۴-۵) نیروی نامتعادل در حالت اجرای اولیه به صفر می‌رسند و در نتیجه این موضوع حاکی از صحت مدل ساخته شده قبل از حفاری مغار نیروگاه است. همچنین با توجه به شکل (۴-۱۱) که معرف نیروی‌ها نامتعادل بعد از مراحل مختلف حفاری و نگهداری مغار نیروگاه است (این شکل مربوط به ترتیب مناسب حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه می‌باشد) و به تعادل رسیدن این نیروها می‌توان از صحت مدل‌های ساخته شده اطمینان حاصل کرد.

راه دیگر برای اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده مقایسه بین خروجی‌های نرم افزار (جابجایی) با مقادیر واقعی برداشت شده در محل مغار می‌باشد. این راه‌حل بهترین راه ممکن برای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده می‌باشد. مقایسه باید بین حالت حفر شده‌ی مغار در پروژه سیاه بیشه که در نرم‌افزار مدل شده با نتایج ابزار دقیق صورت گیرد. برای اعتبار سنجی از ترتیب حفر اجرا شده در مغار نیروگاه سد سیاه بیشه استفاده شده است. در شکل (۴-۲۰) مقایسه‌ای بین ترتیب حفر اجرا شده در مغار نیروگاه و ترتیب مناسب حفاری بدست آمده از نرم‌افزار 3DEC در طرح سیاه بیشه صورت گرفته است.

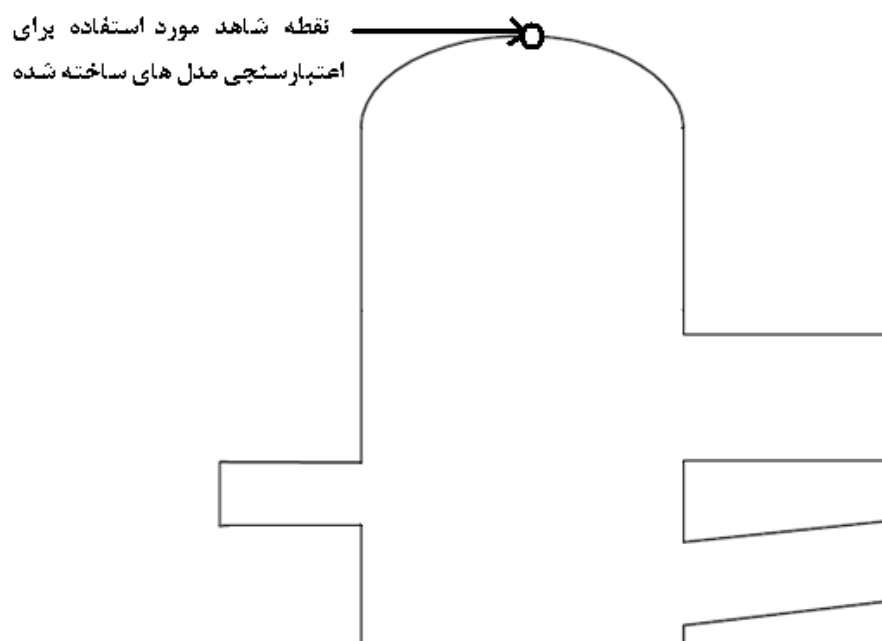
به منظور اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده یک نقطه شاهد در نظر گرفته شده و سپس مقادیر جابجایی در این نقطه با استفاده از نرم افزار و مقادیر واقعی بدست آمده از تحلیل نتایج ابزار دقیق را با هم مقایسه شده است. در این پروژه با توجه به در دسترس بودن نتایج ابزار دقیق در سقف مغار، نقطه‌ی شاهد در سقف مغار نیروگاه در نظر گرفته شده است. موقعیت نقطه شاهد برای اعتبار سنجی مدل‌های ساخته شده در محیط نرم افزار 3DEC در شکل (۴-۲۱) نشان شده است.



ترتیب مناسب حفاری بدست آمده از نرم‌افزار 3DEC

ترتیب حفر اجرا شده

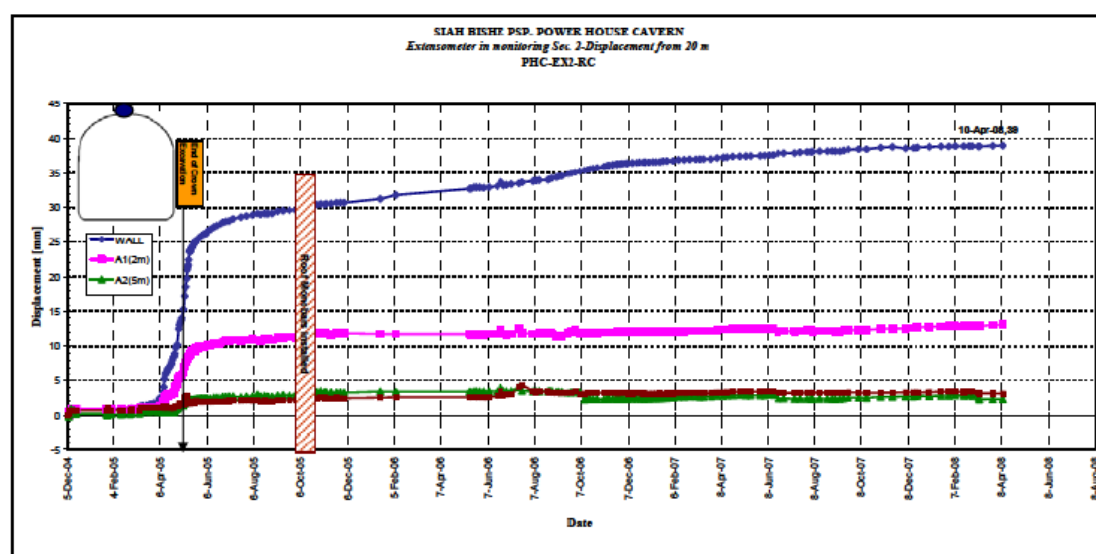
شکل ۴-۲۰- مقایسه‌ای بین ترتیب حفر اجرا شده در مغار نیروگاه (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷) و ترتیب مناسب حفاری بدست آمده از نرم‌افزار 3DEC در طرح سیاه بیشه بیشه



شکل ۴-۲۱- موقعیت نقطه شاهد در سقف مغار نیروگاه سد سیاه بیشه برای اعتبارسنجی مدل‌های ساخته شده در محیط نرم‌افزار 3DEC

بعد از تعیین نقطه شاهد نتایج ابزار دقیق برای این نقطه مورد بررسی قرار گرفته این نتایج در شکل (۴-۲۲) آورده شده است. این شکل نمودار جابجایی‌های مختلف سقف مغار در نقطه‌ی شاهد را نشان می‌دهد. از بررسی این نمودار می‌توان دریافت که جابجایی نقطه شاهد در حالت واقعی در حدود ۴۰ میلی‌متر می‌باشد (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷).

نتایج خروجی‌های نرم افزار برای جابجایی در نقطه شاهد به صورت عددی در جدول (۴-۱۲) و به صورت نموداری در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است. با بررسی این نمودار می‌توان دریافت که جابجایی پس از حفر کامل مغار به حدود ۴۴/۲۹ میلی‌متر می‌رسد. اختلاف بین نتایج مدل‌های ساخته شده و نتایج واقعی در حدود ۴ میلی‌متر است که با توجه به تاثیر آتشیاری‌ها بر جابجایی نقاط قابل صرف نظر می‌باشد. لذا می‌توان با استفاده از این مقایسه نسبت به صحت مدل اطمینان حاصل کرد.

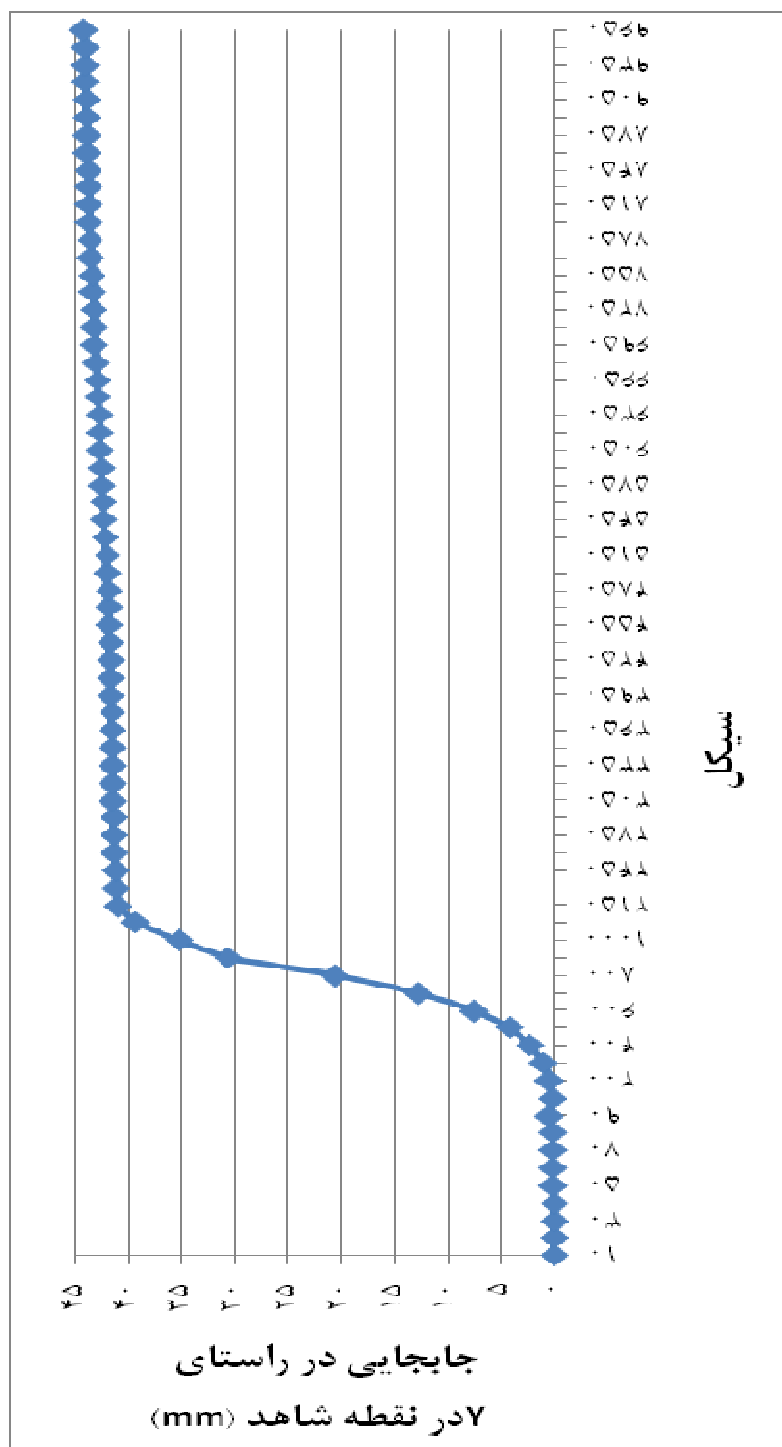


شکل ۴-۲۲- نتایج حاصل از ابزار دقیق برای جابجایی نقطه شاهد در سقف مغار (شرکت ساختمانی تابلیه، ۱۳۸۷).



جدول ۴-۱۲- نتایج خروجی‌های نرم افزار برای جابجایی در نقطه شاهد به صورت عددی

| سیکل | جابجایی در نقطه<br>شاهد (میلی متر) | سیکل | جابجایی در نقطه<br>شاهد (میلی متر) | سیکل | جابجایی در نقطه<br>شاهد (میلی متر) |
|------|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------------------------|
| ۱۰   | ۰/۰۶۷۹۵                            | ۲۷۵۰ | ۴۱/۴۲                              | ۶۳۵۰ | ۴۲/۷۷                              |
| ۲۰   | ۰/۰۲۱۷۵                            | ۲۹۰۰ | ۴۱/۴۴                              | ۶۵۰۰ | ۴۲/۹۰                              |
| ۳۰   | ۰/۰۳۸۰۶                            | ۳۰۵۰ | ۴۱/۵۱                              | ۶۶۵۰ | ۴۳/۰۵                              |
| ۴۰   | ۰/۰۵۳۵۷                            | ۳۲۰۰ | ۴۱/۵۳                              | ۶۸۰۰ | ۴۳/۱۵                              |
| ۵۰   | ۰/۰۶۹۹                             | ۳۳۵۰ | ۴۱/۵۴                              | ۶۹۵۰ | ۴۳/۲۳                              |
| ۶۰   | ۰/۰۸۷۲۳                            | ۳۵۰۰ | ۴۱/۵۵                              | ۷۱۰۰ | ۴۳/۳۲                              |
| ۷۰   | ۰/۱۰۵۳                             | ۳۶۵۰ | ۴۱/۶۱                              | ۷۲۵۰ | ۴۳/۴۰                              |
| ۸۰   | ۰/۱۲۴۶                             | ۳۸۰۰ | ۴۱/۶۴                              | ۷۴۰۰ | ۴۳/۴۸                              |
| ۹۰   | ۰/۱۴۵۱                             | ۳۹۵۰ | ۴۱/۶۸                              | ۷۵۵۰ | ۴۳/۵۶                              |
| ۱۰۰  | ۰/۱۴۶۱                             | ۴۱۰۰ | ۴۱/۷۰                              | ۷۷۰۰ | ۴۳/۶۳                              |
| ۲۰۰  | ۰/۱۴۸۶۳                            | ۴۲۵۰ | ۴۱/۷۴                              | ۷۸۵۰ | ۴۳/۷۰                              |
| ۳۰۰  | ۱/۰۰۴                              | ۴۴۰۰ | ۴۱/۸۱                              | ۸۰۰۰ | ۴۳/۷۷                              |
| ۴۰۰  | ۲/۱۸۴                              | ۴۵۵۰ | ۴۱/۸۵                              | ۸۱۵۰ | ۴۳/۸۰                              |
| ۵۰۰  | ۴/۱۵۶                              | ۴۷۰۰ | ۴۱/۹۰                              | ۸۳۰۰ | ۴۳/۸۴                              |
| ۶۰۰  | ۷/۴۹۶                              | ۴۸۵۰ | ۴۱/۹۹                              | ۸۴۵۰ | ۴۳/۸۸                              |
| ۷۰۰  | ۱۲/۸۲                              | ۵۰۰۰ | ۴۲/۰۵                              | ۸۶۰۰ | ۴۳/۹۳                              |
| ۸۰۰  | ۲۰/۵۹                              | ۵۱۵۰ | ۴۲/۱۵                              | ۸۷۵۰ | ۴۳/۹۹                              |
| ۹۰۰  | ۳۰/۶۴                              | ۵۳۰۰ | ۴۲/۳۱                              | ۸۹۰۰ | ۴۴/۰۵                              |
| ۱۰۰۰ | ۳۵/۳۱                              | ۵۴۵۰ | ۴۲/۴۱                              | ۹۰۵۰ | ۴۴/۰۸                              |
| ۲۰۰۰ | ۳۹/۴۳                              | ۵۶۰۰ | ۴۲/۴۶                              | ۹۲۰۰ | ۴۴/۱۱                              |
| ۲۱۵۰ | ۴۱/۱۰                              | ۵۷۵۰ | ۴۲/۵۳                              | ۹۳۵۰ | ۴۴/۱۵                              |
| ۲۳۰۰ | ۴۱/۱۳                              | ۵۹۰۰ | ۴۲/۶۲                              | ۹۵۰۰ | ۴۴/۱۸                              |
| ۲۴۵۰ | ۴۱/۲۶                              | ۶۰۵۰ | ۴۲/۷۱                              | ۹۶۵۰ | ۴۴/۲۹                              |
| ۲۶۰۰ | ۴۱/۳۳                              | ۶۲۰۰ | ۴۲/۷۴                              |      |                                    |



شکل ۴-۲۳- نتایج حاصل از 3DEC در مورد جابجایی نقطه شاهد در سقف مغار

## نتایج و پیشنهادات

## ۵-۱- نتایج

در این تحقیق مدل‌های مختلفی برای رسیدن به ترتیب مناسب حفاری مغار نیروگاه سد سیاه بیشه ساخته و تحلیل شده است. از خروجی‌های مدل‌های ساخته شده و تحلیل این خروجی‌ها نتایج مختلفی بدست آمد. از جمله نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بر اساس نتایج و تجربیات حاصل از کارهای مشابه قبلی در این زمینه استفاده از روش‌های عددی سه‌بعدی نسبت به روش‌های دوبعدی جواب‌های دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت را بدست می‌دهد. لذا در این تحقیق از روش‌های سه‌بعدی استفاده شد.

۲- با توجه به مواردی که تاکنون با استفاده از مدل‌سازی عددی به تحلیل مغارها پرداخته شده است، می‌توان نتیجه حاصل می‌شد که استفاده از روش‌های ناپیوسته در مدل‌سازی، نتایج واقع‌گرایانه‌تری نسبت به روش‌های پیوسته بدست می‌دهد. لذا در این تحقیق نیز برای رسیدن به جواب‌های واقعی از روش‌های ناپیوسته استفاده شده است.

۳- لزوم استفاده از روش‌های ناپیوسته با قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی برای و بررسی ترتیب حفاری مرحله‌ای باعث شده است که نرم افزار 3DEC برای مدل‌سازی در این تحقیق انتخاب شود.

۴- ابعاد مرزهای مدل با توجه به ابعاد کل حفاریات زیرزمینی مدل و بررسی تاثیر هر یک از بعدها بر نتایج  $300 \times 300 \times 300$  متر، تعیین شده است. با توجه به صحت خروجی‌های نرم افزار مشخص شده که ابعاد مدل کاملاً مناسب انتخاب شده است و مرزها کمترین تاثیر را بر روی نتایج مدل‌سازی دارد.

۵- حفاری مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر بر هم بی‌تاثیر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عرض پایه بین مغارها درست انتخاب شده است و حفاری مغارها از هم مستقل بوده و می‌توان

حفاری مغار نیروگاه را برای انتخاب ترتیب مناسب مراحل حفر آن به صورت جداگانه بررسی کرد.

۶- مراحل حفاری در نظر گرفته شده در این تحقیق با توجه به شرایط زمین شناسی، گالری‌های ارتباطی و امکان‌پذیری فنی انتخاب شده‌اند. در هر صورت، مراحل حفاری دیگری را نیز می‌توان در نظر گرفت که لحاظ فنی این مراحل قابلیت اجرایی نداشته باشند. لذا در انجام این تحقیق از اجرای این مدل‌ها خودداری شده است.

۷- بدلیل تعداد زیاد مراحل حفاری و زمان زیادی که برای اجرای مدل‌ها باید در نظر گرفته شود، مغار نیروگاه به چهار قسمت اصلی تقسیم و مراحل مناسب حفاری به صورت جداگانه انتخاب شده است. انتخاب ترتیب مناسب حفاری به صورت مرحله‌ای باعث کاهش زمان اجرای مدل‌ها و رسیدن به جواب مناسب در زمان کمتری می‌شود.

۸- به کارگیری انتخاب ترتیب مناسب حفاری به صورت مرحله‌ای باعث کاهش تعداد مدل‌ها و کاهش مدت زمان اجرای مدل‌ها برای رسیدن به جواب مورد نظر می‌شود. لذا استفاده از انتخاب ترتیب مناسب حفاری به صورت مرحله‌ای مغار بر انتخاب ترتیب مناسب حفاری کلی مغار ترجیح داده می‌شود.

۹- انتخاب مناسب ترتیب حفر با روش‌های تحلیلی کار بسیار وقت‌گیر و دارای محاسبات پیچیده است. لذا استفاده از روش‌های عددی می‌تواند باعث کاهش وقت و کاهش اشتباهات شده و جواب دقیق‌تری را بدست بدهد.

۱۰- ملاک مقایسه بین مدل‌های مختلف ساخته شده جابجایی نسبی محاسبه شده از جابجایی نقاط در نظر گرفته شده در سقف، کف و دیواره‌های مغار نیروگاه می‌باشد. جابجایی نسبی در مقایسه با جابجایی نقطه‌ای ملاک دقیق‌تری برای مقایسه می‌باشد.

۱۱- پس از مقایسه بین مدل‌های مختلف از بین ۱۹ مدل ساخته مدل شماره‌ی ۱۹ به‌عنوان ترتیب مناسب حفاری انتخاب شد.

۱۲- با مقایسه بین نتایج حاصل از کاربرد روش عددی و نتایج ابزار دقیق می‌توان به اختلاف اندک بین این نتایج پی برد، این اختلافات به دلیل تاثیرات آتشیاری قابل چشم‌پوشی می‌باشند.

۱۳- سیستم نگهداری مورد استفاده در مدلسازی مطابق با سیستم نگهداری نصب شده در مغار نیروگاه سد سیاه بیشه است. با توجه به پایداری مغار در حالت نصب سیستم نگهداری می‌توان نتیجه گرفت که سیستم نگهداری نصب شده سیستم مناسبی می‌باشد.

۱۴- پس از بررسی مدل‌های مختلف در نتیجه مدلی که دارای مراحل کمتری بودند دارای جابجایی نسبی کمتری بودند. پس می‌توان نتیجه که هر چه مراحل کمتر باشند به حالت مناسب نزدیک‌تر می‌شویم.

۱۵- هر چه پله‌های حفاری دارای ارتفاع کمتری باشند جابجایی ناشی از حفاری آنها کمتر ولی زمان حفاری کل افزایش می‌یابد. درکل هر چه ارتفاع پله‌ها بیشتر باشد جابجایی دیواره مغار افزایش می‌یابد (منظور جابجایی پس از حفر کامل مغار می‌باشد).

۱۶- برای اعتبار سنجی مدل و نتایج حاصل از آن، از نتایج ابزار دقیق نصب شده در سقف مغار نیروگاه استفاده شده است. پس از مقایسه بین نتایج ابزار دقیق و مدلسازی اختلاف جزئی در حدود ۴ میلی‌متر بین این نتایج بدست آمد؛ که به دلیل مقدار اندک آن قابل چشم‌پوشی است.

۱۷- یکی دیگر از راه‌های اعتبارسنجی صحت مدل‌های ساخته شده بررسی نیروی نامتعادل قبل از حفاری و بعد است. پس از بررسی این نیروها به سمت صفر حرکت کردند و به صفر رسیدند که این نشان دهنده صحت مدل‌های ساخته شده می‌باشد.

## ۵-۲- پیشنهادات

در این تحقیق نتایج مختلفی بدست آمد که با توجه به این نتایج یک‌سری پیشنهادات و راهکارها ارائه شده است.

۱- تحلیل دینامیکی مغار نیروگاه با در نظر گرفتن اثرات آتشیاری از اهمیت برخوردار است، پیشنهاد می‌شود که برای تحلیل دینامیکی از نرم‌افزار سه‌بعدی ناپیوسته به‌خصوص 3DEC استفاده شود.

۲- در این تحقیق مغار به‌روش پلکانی حفر شده و تمامی نتایج برای مغارهای حفاری شده با این روش می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود که انتخاب ترتیب مناسب حفر برای حفاری مغارها با سایر روش‌های حفاری مغار نیز انجام شود.

# منابع و مأخذ



## منابع و مأخذ

آقاخانی ح، (۱۳۸۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد " بررسی اثر مراحل حفاری مغار توسعه بر پایداری فضاهای زیرزمینی مجاور در سد مسجدسلیمان"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۵۲ صفحه

جلالی س م، میخک بیرانوند ا، سالکی م و افتخاری م (۱۳۸۸)، "امکان سنجی مقدماتی استفاده از فضاهای بزرگ در معادن زیرزمینی سنگ نمک به عنوان سازه های پدافند غیرعامل"، هشتمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۴۴۳-۴۴۸، تهران

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۴ الف)، "گزارش برداشت های زمین شناسی مغار"

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۴ ب) "گزارش زمین شناسی و ژئوتکنیک، لامایر-تابلیه"

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۴ ج)، "گزارش طرح نگهداری پیشنهادی سازه های زیرزمینی نیروگاه تلمبه ذخیره ای سد سیاه بیشه"

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۵ الف)، "گزارش طرح و مراحل حفاری مغار"

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۵ ب)، "گزارش نتایج تست کشش بولت ها و تاندون های نصب شده"

شرکت ساختمانی تابلیه، (۱۳۸۷)، "گزارش پایش مغار نیروگاه سد سیاه بیشه"

شرکت مشاورین، (۱۳۸۴)، "کلیات طرح و گزارش زمین شناسی عمومی محدوده سد و نیروگاه سیاه بیشه"

صدقیانی م ح و جمشیدی چناری ر، (۱۳۸۰)، "اثر مراحل اجرایی مغارهای بزرگ زیرزمینی در پایداری آنها"، اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مدنی ح، (۱۳۸۳)، "تونل سازی - تحلیل پایداری"، جلد سوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

موسی زاده، س، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد "مقایسه روش های عددی مختلف برای تحلیل پایداری و سیستم نگهداری مغار نیروگاه مسجد سلیمان"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۲۶ صفحه

Ahmadi M., Goshtasbi K., and Ashjari R., (2008) "2-D and 3-D Analyses of Underground Openings in an Inhomogeneous Rock Mass" Iranian Journal of Scienc & Technology, Transaction B, Engineering Vol 32, No B2, pp 161-166.

Chen S.G., and Zhao J., (1998) "Use of Monitoring Records and Management System in Ertan Cavern Construction" Rock Mech. Rock Engng. 31 (2), 125 –131.

Cheng Y., and Liu S.C., (1990) "Power caverns of the Mingtan Pumped Storage Project", In Comprehensive Rock Engineering (ed. J.A. Hudson) 5, PP 111-132, Taiwan,

Dahawan K.R. (2002) "2D and 3D Finite Element Analysis Of Underground Opening in Inhomogeneous Rock Mass" Int.J. Rock Mech & Min Sci, PP 217-227.

Goodman R.E. (1980). "Introduction to Rock Mechanics", Wiley, New York.

Hoek E. (2000), "Design of Large Powerhouse Caverns in Weak Rock", Rock Engineering, ch. 13, PP 222- 255.

Hoek E. and Brown E.T. (2002) "Underground Excavation in Rock", London: Institution of Mining and Metallurgy.

Hokmark H., (2003), "Canister Positioning Influence of Fracture System on Deposition Hole Stability", Svensk Karnbranslehantering AB., Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Hudson J.A. and Harrison J.P. (2000) "Engineering Rock Mechanics ", oxford, Vol 1, pergamon press.

IWPC (Iran Water and Power Resources Development Co Authority)., (2000) "Dam & Powerhouse of Masjed-Soleiman".

Itasca Consulting Group, Inc., (2000) "3DEC 3 Dimensional Distinct Element Code", Version 2.00, User Manual.

Jalai S.M.E., Mikhak Beiranvand A., and Eftekhari M., (2009) " APPLication of Large Underground Spaces in Hard Rocks: Past, Present and the Future", SGEM - International Multidisciplinary Scientific Geo Conference, PP 1156-1164.

Phienwej N., and Anwar S., (2005) " Rock Mass Characterization for the Underground Cavern Design of Khiritharn Pumped Storage Scheme", Geotechnical and Geological Engineering 23: 175–197.

Sakata J., (1996) "Natural Environment Preservation Measures at Pilot Plant in Seawater Pumped Storage", Generation Technology Demonstration Tests, Large Dams Japanese.

Sandeep M., (2000) " A Study of The Tunnel and Underground Power-House for TEESTA\_V Hydro-Electric Project, Sikkim, India", M.Sc Thesis, PP 130.

Sharma V. M., Saxena K.R., and Woods R.D., (1999) "Distinct Element Modeling In Geomechanics", A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Song W.K., (2003) "In-situ Stress Measurements in Underground an Oil Storage Cavern Using Hydro-Fracturing and Overcoring Methods", ISRM –Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.

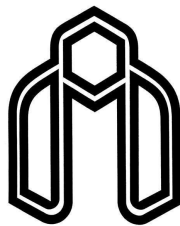
WWW.FA.IWPCO.IR (سایت توسعه منابع آب و نیروی ایران - طرح سیاه بیشه)

## **Selection of proper sequences of excavation in Siah Bishe cavern using numerical modeling**

### ***Abstract:***

Nowadays, the electricity consumption tends to increase since the electrical energy can not be saved and also due to variable electricity demand during different hours of day, construction and establishing of pumped storage power plants has great importance. The project of Siyah Bishe pumped storage power plant with 1040 MW electricity production capability located in Mazendaran province, at 125km from Tehran, is constructed on Chaloos river. The caverns are important parts of power plants. They are constructed and excavated in several steps due to large scale dimensions. The sequence of excavation in such constructions is one of the designers concerns. The numerical analysis is one of the recent approaches to determine the priority of excavation sequence. The selection of proper excavation sequence in the cavern of Siyah Bishe power plant using 3DEC software is the purpose of this research. First, the interaction of the caverns of the power plant and transformer is studied using the software. As a result, the excavation of these caverns donot affect on the other one. Therefore, only the excavation sequence of the power plant cavern associatd with the connected galleries was taken into account. For reducing of the running-time of the software, the cavern was divided into four sections; the excavation sequence is then analyzed separately for each part. For selecting the proper excavation sequence in the power plant cavern, 19 different models were built. The selection was preformed based on the relative displacement of the power plant wall. The first part was selected and excavated, then selection of next section is started. Eventually, the obtained results of the software analysis were conformed to the results of instrumentation to validate the accuracy and reliability of the constructed models. As a result, there were negligible and insignificant differences.

***Key words:*** Cavern; Siyah Bishe dam; Proper excavation sequence selection; 3DEC software.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

# **Selection of proper sequences of excavation in Siah Bishe cavern using numerical modeling**

**Amin Mikhak Beiranvand**

## **Supervisors:**

**Dr. Seid Mohammad Esmaeil Jalali**

**Dr. Farhang Sereshki**

## **Consultants:**

**Abolfazl Mahinrad**

**Farnoosh Basalighe**

**Date: December 2009**