دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی معدن

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن
گرایش مکانیک‌سنگ

تحلیل پایداری و ارائه روش بازکردن مغار زیرزمینی نیروگاه تنگ‌معشوره با نرم-افزار FLAC3D

مؤلف:
امیر دریایی

استاد راهنما:
دکتر رضا رحمان‌نژاد

استاد مشاور:
دکتر غلامرضا سعیدی رشک علیا

مشاور صنعتی:
مهندس محسن شریفی بروجردی

آبان ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به :

پدرم و مادرم

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

ای هستی‌بخش، وجود مرا بر نعمات بی‌کرانت توان شکر نیست. ذره‌ذره وجودم برای تو و نزدیک شدن به تو می‌تپد.

الهی مرا مدد کن تا دانش اندکم نه نردبانی باشد برای فزونی تکبر و غرور و نه حلقه‌ای برای اسارت، بلکه گامی باشد برای تجلیل از تو و متعالی ساختن زندگی خود و دیگران.

و بعد از مدتها، پس از پیمودن راههای فراوان که با حضور شیرین اساتید عزیزم، با راهنمایی‌ها و دغدغه‌های فراوانشان و شیطنتهای زیبای آن دوران، نگاه‌های پدر مادرم، با چشمهای پر از برق شوق، و زیبایی حضور خواهران و برادرم در کنارم، که خستگی‌های این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده و امیدوارم بتوانم در آینده‌ای نزدیک جوابگوی این همه محبت آن‌ها باشم ...

اکنون، با احترام فراوان برای این‌همه تلاش این عزیزان برای موفقیت من ....

این پایان‌نامه را به پدر و مادرم، خواهران و برادر مهربانم تقدیم می‌کنم.

از استاد راهنمای ارجمند و عزیز جناب آقای دکتر رحمان نژاد و استاد مشاور جناب آقای دکتر سعیدی که با سعه‌صدر و صبوری مرا راهنمایی نموده و با ارائه نظرات سازنده و رهنمودهای بی دریغشان در پیشبرد این پایان‌نامه سعی تمام، مبذول داشتند، کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس محسن شریفی بروجردی واحد نظارت مکانیک سنگ شرکت مهاب قدس طرح تنگ‌معشوره بخاطر توضیحات و راهنمایی‌های ایشان در مورد ساختگاه سد، سپاسگزارم.

و در نهایت از تمامی دوستان و هم‌کلاسی‌های عزیزم که در طول این مدت افتخار آشنایی و مصاحبت با آنها را داشتم، به پاس محبت‌های بی دریغشان سپاسگزارم.

امیدوارم قادر به درک زیباییهای وجودشان باشم.

چکیده

فضاهای زیرزمینی بزرگ مقطع مانند مغارها به‌دلیل کاربردهای مهم و راهبردی‌شان، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ به همین دلیل شکل مقطع و روش‌های حفاری و ایجاد چنین فضاهایی از موارد حائز اهمیت در این مبحث می‌باشند. عوامل فراوانی بر روی حفاری مغارها تأثیرگذار هستند که یکی از این موارد روش باز کردن مقطع مغار است. از جمله روش‌های باز کردن مقطع مغار می‌توان روش‌های پله‌ای و تونل پیشرو را نام برد و در هر دو این روش‌ها، مغار به‌صورت لایه‌ای از بالا به پایین به صورت پله‌ای حفاری می‌شود. طرح سد و نیروگاه تنگ معشوره در استان لرستان قرار دارد، که در این طرح برای توربین‌ها و تجهیزات الکتریکی تولید جریان برق، دو فضای بزرگ زیرزمینی در نظر گرفته شده است که شامل مغار اصلی (با ابعاد ۵۰×۳۴/۶×۲۰ برحسب متر) و مغار ترانسفورمر (با ابعاد ۵۰×۱۹/۵×۱۲/۴ برحسب متر) می‌باشد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی محاسبه RMR و Q، به بررسی پایداری مغار پرداخته شد. علاوه بر روش تجربی، با استفاده از روش‌های عددی المان محدود و تفاضل محدود به ترتیب توسط نرم‌افزارهای Phase2 و $FLAC^{3D}$ نیز به بررسی پایداری مغار پرداخته شد. مغار توسط نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به صورت یک مرحله‌ای و تمام مقطع حفر شد و ضریب ایمنی در سقف، دیواره‌ها و کف مغار به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۰/۷۰ و ۰/۴۹ محاسبه گردید و سپس نحوه حفر تغییر داده شد و به صورت پله‌ای انجام گردید. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین حالت برای حفر مغار، وجود ۵ پله و قرار دادن تونل پیشرو در قسمت قوس مغار است. در نهایت ضریب ایمنی خروجی از نرم افزار $FLAC^{3D}$، در سقف، دیواره‌ها و کف مغار به ترتیب ۲/۸۰، ۱/۴۰ و ۱/۲۳ بدست آمد. نگهداری پیشنهادی برای این مغار، اعمال شاتکریت به همراه توری سیمی و در بعضی مقاطع پیچ‌سنگ‌های دوغابی است.

کلمات کلیدی: تونل پیشرو، پله‌ای، تحلیل پایداری، حفر مغار، تنگ‌معشوره، $FLAC^{3D}$، Phase2

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

فصل دوم: اصول حفاری مغار

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- برنامه‌ریزی حفاری ۵

۲-۲-۱- قسمت پیشانی ۵

۲-۲-۲- قسمت پله ۸

۲-۳- مشخصات چال‌های حفاری ۹

۲-۴- انواع شکل مغار ۹

۲-۵- انواع روش‌های حفر تونل ۱۰

۲-۵-۱- روش حفر پله‌ای ۱۰

۲-۵-۲- روش تونل پیشرو ۱۰

۲-۵-۳- ترکیب روش حفاری پله‌ای و تونل پیشرو ۱۱

۲-۶- مزایای استفاده از تونل پیشرو در حفاری مغار ۱۱

۲-۷- انتخاب روش حفاری تونل‌های بزرگ مقطع ۱۱

۲-۸- تونل‌های بزرگ در سنگ‌های ضعیف ۱۲

۲-۹- نمونه‌هایی از اجرای سازه‌های بزرگ مقطع ۱۳

۲-۹-۱- طراحی مغار مینگتان در تایوان ۱۳

۲-۹-۲- نیروگاه ژیاُلانگدی ۱۴

۲-۹-۳- روش اجرای حفاری تونل‌های آب‌بر سد گتوند ۱۵

۲-۱۰- جمع‌بندی ۱۷

فهرست مطالب (ادامه)

عنوان **صفحه**

فصل سوم: معرفی پروژه سد و نیروگاه تنگ‌معشوره

۳-۱- معرفی منطقه سد و نیروگاه تنگ‌معشوره ۱۹

۳-۲- وضعیت زمین‌شناسی سد..... ۲۰

۳-۳- معرفی نیروگاه زیرزمینی..... ۲۰

۳-۴- جمع‌بندی..... ۲۲

فصل چهارم: تحلیل پایداری و انتخاب بهینه‌ترین حالت حفر مغار تنگ‌معشوره

۴-۱- مقدمه..... ۲۴

۴-۲- تحلیل پایداری مغار با روش تجربی..... ۲۵

۴-۳- پتانسیل فشارندگی مغار نیروگاه تنگ‌معشوره..... ۲۷

۴-۴- تعیین خصوصیات توده‌سنگ..... ۲۸

۴-۵- تحلیل دوبعدی مغارهای مجموعه نیروگاه تنگ‌معشوره ۲۸

۴-۶- تحلیل سه‌بعدی مغار نیروگاه تنگ‌معشوره..... ۳۳

۴-۶-۱- انتخاب نوع مدل‌سازی و روش عددی برای مغار تنگ‌معشوره..... ۳۳

۴-۶-۲- معرفی نرم‌افزار FLAC3D..... ۳۳

۴-۶-۳- انتخاب روش حفر مغار تنگ‌معشوره..... ۳۴

۴-۶-۴- مدل‌سازی مغار تنگ‌معشوره..... ۳۵

۴-۶-۴-۱- هندسه مدل ۳۵

۴-۶-۴-۲- اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه..... ۳۵

۴-۶-۴-۳- انتخاب مدل رفتاری مناسب..... ۳۵

۴-۶-۴-۴- اجرای مدل و تعادل اولیه..... ۳۶

۴-۷- تحلیل پایداری با تکنیک کنترل مستقیم کرنش ۳۷

۴-۷-۱- تراز هشدار خطر ۳۸

۴-۷-۲- محاسبه کرنش‌های بحرانی توده‌سنگ مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ۳۹

فهرست مطالب (ادامه)

عنوان **صفحه**

۴-۸- حفر مغار بصورت تمام مقطع ۳۹

۴-۹- حفر مغار بصورت پله‌ای ۴۶

۴-۱۰- تحلیل ضریب اطمینان مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ۵۴

۴-۱۱- جمع‌بندی ۵۶

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتایج ۵۹

۵-۲- پیشنهادها ۶۰

منابع ٦١

پیوست‌ها

پیوست ۱: دستورالعمل انتخاب سیستم نگهداری برای تونل‌های با دهانه فعال ۱۰ متر براساس شاخص RMR ٦٤

پیوست ۲: دستورالعمل انتخاب سیستم نگهداری برای سنگ‌های سست (1<Q<4) بر اساس شاخص Q ٦٥

پیوست ۳: دستورالعمل انتخاب سیستم نگهداری براساس مدول درزه‌داری و ضریب پروتودیاکونوف ٦٦

پیوست ٤: نمودارهای مربوط به حفر پله دوم مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ٦٧

پیوست ٥: نمودارهای مربوط به حفر پله سوم مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ٦٩

پیوست ٦: نمودارهای مربوط به حفر پله چهارم مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ٧١

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- مراحل حفاری قوس سقف نیروگاه زیرزمینی ۶

شکل ۲-۲- ابعاد، ترتیب مراحل حفاری و فاصله بین ۳ فضا در پروژه ارتان چین ۶

شکل ۲-۳- ابعاد، ترتیب مراحل حفاری و فاصله بین ۳ فضا در پروژه لانگتن چین ۷

شکل ۲-۴- شکل‌های متداول برای سطح مقطع مغارها ۹

شکل ۲-۵- نمایی از روش حفر پله‌ای ۱۰

شکل ۲-۶- نمایی از ترکیب روش حفاری پله‌ای و تونل پیشرو ۱۱

شکل ۲-۷- نمودار انتخاب روش حفاری در تونل‌های بزرگ مقطع آزادراهی در ژاپن ۱۲

شکل ۲-۸- مراحل حفاری و نگهداری سینه کار در تونل‌های بزرگ ۱۳

شکل ۲-۹- مدل هندسه مغار مینگتان ۱۴

شکل ۲-۱۰- مراحل مختلف حفاری در تونل‌های مختلف پروژه ژیاُلانگدی ۱۵

شکل ۲-۱۱- مقطع سینه کار حفر شده در تونل آب‌بر سد گتوند ۱۶

شکل ۲-۱۲- طرحی از استقرار جامبودریل و واگن دریل در تونل آب‌بر سد گتوند ۱۷

شکل ۳-۱- موقعیت ساختگاه طرح سد و نیروگاه تنگ‌معشوره ۱۹

شکل ۳-۲- نمایی از ورودی تنگه محل سد ۲۰

شکل ۳-۳- مقطع حفاری مجموعه نیروگاه زیرزمینی ۲۱

شکل ۴-۱- ارتباط بین زمان پایداری با عرض فضای حفاری براساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی بینیاوسکی ۲۵

شکل ۴-۲- توزیع جابجایی و زون پلاستیک در اطراف مغارهای مجموعه نیروگاه ۲۹

شکل ۴-۳- توزیع تنش و ضریب اطمینان در اطراف مغارهای مجموعه نیروگاه ۳۰

شکل ۴-۴- منحنی رفتار توده‌سنگ اطراف مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر ۳۱

شکل ۴-۵- توزیع بردار جابجایی کل و ناحیه پلاستیک اطراف مغارهای مجموعه نیروگاه ۳۲

شکل ۴-۶- هندسه مدل ساخته شده ۳۶

فهرست شکل‌ها (ادامه)

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۷- تغییرات نیروهای نامتعادل کننده در طول فرآیند قبل از حفر در مغار نیروگاه تنگ-معشوره ۳۷

شکل ۴-۸- وضعیت زون پلاستیک در مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع ۴۱

شکل ۴-۹- کنتورهای کرنش برشی اطراف توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع..... ۴۲

شکل ۴-۱۰- کنتورهای جابجایی اطراف توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع..... ۴۲

شکل ۴-۱۱- بردارهای جابجایی نگهداری توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع ۴۳

شکل ۴-۱۲- وضعیت زون پلاستیک در مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع جهت رساندن به پایداری ۴۴

شکل ۴-۱۳- کنتورهای کرنش برشی اطراف توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع جهت رساندن به پایداری..... ۴۵

شکل ۴-۱۴- کنتورهای جابجایی اطراف توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع جهت رساندن به پایداری..... ۴۵

شکل ۴-۱۵- بردارهای جابجایی نگهداری توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر تمام مقطع جهت رساندن به پایداری ۴۶

شکل ۴-۱۶- وضعیت زون پلاستیک در تونل پیشرو مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۴۷

شکل ۴-۱۷- کنتورهای کرنش برشی اطراف توده سنگ تونل پیشرو مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۴۸

شکل ۴-۱۸- کنتورهای جابجایی اطراف توده‌سنگ تونل پیشرو مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای..... ۴۸

فهرست شکل‌ها (ادامه)

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱۹- بردارهای جابجایی نگهداری تونل پیشرو مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۴۹

شکل ۴-۲۰- وضعیت زون پلاستیک در قوس مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۰

شکل ۴-۲۱- کنتورهای کرنش برشی اطراف توده سنگ قوس مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۰

شکل ۴-۲۲- کنتورهای جابجایی اطراف توده‌سنگ قوس مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۱

شکل ۴-۲۳- بردارهای جابجایی نگهداری قوس مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۱

شکل ۴-۲۴- وضعیت زون پلاستیک در مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۲

شکل ۴-۲۵- کنتورهای جابجایی اطراف توده‌سنگ مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله‌ای ۵۳

شکل ۴-۲۶- بردارهای جابجایی نگهداری مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x و در حالت حفر پله-ای ۵۳

شکل ۴-۲۷- نمایی از مراحل حفاری مغار تنگ‌معشوره در مقطع x-x ۵۵

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱- مشخصات گمانه‌های حفر شده در محل نیروگاه تنگ‌معشوره ۲۱
جدول ٤-۱- طبقه‌بندی RMR_{89} توده‌سنگ ناحیه اطراف مغار ۲۵
جدول ٤-۲- طراحی تجربی با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی هوک و براون ۲٦
جدول ۴-۳- تعیین مدول درزه‌داری.....۲۷
جدول ۴-۴- نگهداری پیشنهادی تجربی برای تاج و دیواره‌های مغار طبق نظر ماسکوف ۲۷
جدول ۴-۵- خصوصیات توده‌سنگ دربرگیرنده مغار نیروگاه تنگ‌معشوره ۲۸
جدول٤-٦- مقادیر کرنش بحرانی در سنگ های دربرگیرنده مغار ۳۹
جدول ۴-۷- مقادیر کرنش برشی بحرانی در سنگ های دربرگیرنده مغار.....۳۹
جدول ٤-۸- مشخصات پیچ‌سنگ‌های دوغابی استفاده شده در نرم‌افزار FLAC3D.....٤٤
جدول ٤-۹- ضرایب اطمینان، عمق زون پلاستیک و جابجایی‌ها در مقاطع بحرانی از حفر تمام مقطع مغار ۵۵
جدول ٤-۱۰- ضرایب اطمینان، عمق زون پلاستیک و جابجایی‌ها در مقاطع بحرانی از حفر تمام مقطع مغار جهت رساندن به پایداری ۵۵
جدول٤-۱۱- ضرایب اطمینان براساس کرنش برشی در مقاطع بحرانی از پله‌های مغار ۵٦
جدول٤-۱۲- مقادیر عمق زون پلاستیک در مقاطع بحرانی از پله‌های مغار ۵٦
جدول٤-۱۳- مقادیر جابجایی‌ها در مقاطع بحرانی از پله‌های مغار.....۵٦

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به عنوان ماده‌ای بسیار ارزشمند و استراتژیک مدنظر بوده است؛ بطوریکه این موضوع سبب گردیده است تا بندسازی، سدسازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره‌سازی و انتقال آب در آثار به‌جا مانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد. مغارها جزء بزرگترین سازه‌های حفر شده در زیرزمین، توسط بشر هستند که برای مقاصد مختلف احداث شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله موارد استفاده از این فضاهای زیرزمینی علاوه بر استفاده معمول از آن‌ها در نیروگاه‌های برق-آبی و هسته‌ای، می‌توان به مصارف عمومی آن‌ها نیز به‌عنوان پناهگاه‌ها، ورزشگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی مواد نفتی، انبارهای بزرگ جنگ‌افزارهای نظامی و انبارهای آب آشامیدنی و تصفیه خانه‌ها اشاره کرد.

طرح سد و نیروگاه تنگ‌معشوره با هدف تولید انرژی برق-آبی، کنترل سیلاب، تأمین حق آب‌های پایین دست و انتقال آب به اراضی کشاورزی شهرستان کوهدشت بر روی رودخانه کشکان در استان لرستان ساخته می‌شود.

در این طرح برای توربین‌ها و تجهیزات الکتریکی تولید برق، دو فضای بزرگ زیرزمینی – که اصطلاحاً مغار نامیده می‌شود – در نظر گرفته شده است که شامل مغار اصلی (۵۰×۳۴/۶×۲۰) متر و مغار ترانسفورمر (۵۰×۱۹/۵×۱۲/۴) متر، می‌باشد.

در این پایان‌نامه سعی شده است توسط یک برنامه تفاضل محدود سه‌بعدی تحت عنوان FLAC3D تأثیرات مراحل حفاری بر پایداری مغار نیروگاه تنگ‌معشوره مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و بهینه‌ترین حالت حفر و نگهداری مورد نیاز با شرط کمترین جابجایی برای مغار نیروگاه انتخاب گردد. از دیگر ویژگی‌های این پایان‌نامه، مدل‌سازی شرایط واقعی و اجرایی منطقه مغار نیروگاه تنگ‌معشوره است به‌نحوی که سعی شده است تأثیر سازه موجود در مدل‌سازی لحاظ گردد.

مجموعه این مطالب در پنج فصل تنظیم گشته است که مقدمه فصل اول را تشکیل می‌دهد. در فصل دوم سعی شده است تا به اصول طراحی و نحوه حفر مغار و نیز چند پروژه مشابه موجود در ایران و جهان اشاره گردد. فصل سوم به معرفی پروژه سد و نیروگاه تنگ‌معشوره می‌پردازد. فصل چهارم تحلیل پایداری انواع روش‌های حفاری مغار تنگ‌معشوره با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D و بررسی نگهداری این مغار را به خود اختصاص داده است. و نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری از مطالب بیان شده و پیشنهادهای مناسب جهت ادامه روند کار، بیان می‌گردد.

فصل دوم

اصول حفاری مغار

۲-۱- مقدمه

فرآیند طراحی حفاری مغار، یک فرآیندی است که یک سری عناصر در طی آن بهینه می‌شود تا اجرای مغار با یک هزینه مقرون به صرفه عملی شود. این اصول با الگوی زیر دنبال می‌شود:

۱- تشخیص و تعیین شکل بهینه مغار با توجه به ابعاد مورد نیاز برای توربین‌ها و ترانسفورماتورها و لایه‌های زمین شناسی محل.

۲- حفر تونل دسترسی جهت جابجایی تجهیزات و نیروی انسانی، تهویه و تخلیه مواد حفر شده به بیرون از مغار.

۳- حفر تونل پیشرو در قسمت پیشانی مغار.

۴- حفر پله‌های مغار به ترتیب از بالا به پایین مغار .

پارامترهای مهم تأثیرگذار بر محاسبات و طراحی مغارهای نیروگاه‌ها عبارتند از[۱]:

۱- ظرفیت کل PSP[1]، ماکزیمم ظرفیت برای تولیدات نیروگاهی.

۲- طول (L)، عرض (W) و ارتفاع (H)؛

- مساحت مغار (W×L)
- سطح مقطع مغار (W×H)
- حجم مغار (W×L×H)

۳- روباره مغار h

۴- سختی توده‌سنگ و ماده‌سنگ: در اینجا مشخصات توده‌سنگ و ماده‌سنگ لحاظ شده است که E_{int} و E_{rm} هستند. اندیس int مربوط به ماده‌سنگ و rm مربوط به توده‌سنگ است.

۵- مقاومت توده‌سنگ و ماده‌سنگ: مقاومت فشاری تراکمی سنگ بکر و توده‌سنگ به ترتیب با UCS_{int} و UCS_{rm} مشخص می‌شود.

مغارها بیشتر به سه روش تمام مقطع، تونل پیشرو و پله‌ای حفر می‌گردند. مغارهای با ارتفاع ۱۰-۸ متر در سنگ‌های سخت و کم‌درزه، (سطح مقطع کمتر از ۱۰۰ متر مربع) به صورت تمام مقطع اجرا می‌شوند. اجرای حفر مغارها می‌تواند توسط روشهای حفاری سنتی (چالزنی و آتشکاری) و یا روش‌های نیمه مکانیزه (در صورت فراهم بودن شرایط) انجام شود[۲].

در مقاطع بزرگ (بزرگ‌تر از ۱۰۰ متر مربع) بدلیل عدم پوشش کل مقطع توسط تجهیزات چالزنی و هم‌چنین مشکلات پایداری، حفر تمام مقطع مغار امکان پذیر نبوده و سازه در چندین مرحله حفر می‌شود.

[1] Pumped Storage Power Station

پرکاربردترین روش در حفاری مغار، چالزنی و انفجار است. کنترل انفجار از نیازهای طراحی مغار نیست؛ اما بزرگ‌ترین تأثیر انفرادی را بر روی فرآیند حفاری مغار دارد و باید بصورت مناسب مورد توجه قرار گیرد. در یک توده‌سنگ ضعیف توالی حفاری و نگهداری معمولاً از فرآیند برش قسمت فوقانی و پله‌های ۲/۵ تا ۵ متری پیروی می‌کند[۲].

بیشترین کنترل ناحیه آسیب‌دیده، توسط حفاری نیمه مکانیزه بدست می‌آید. برای حفاری مغار استفاده از دستگاه کله‌گاوی پیشنهاد می‌شود. امکان استفاده از دستگاه کله‌گاوی برای حفاری کلی مغار باید در جایی که مقاومت سنگ بکر کمتر از ۶۰ مگاپاسکال است، در نظر گرفته شود.

نیاز به استفاده از ردهدر وقتی نیاز به کنترل لرزه بوجود آمده از انفجار است، بیشتر حس می‌شود. این مورد وقتی بوجود می‌آید که حفاری مغار باید در کنار تأسیسات زیرزمینی موجود صورت گیرد یا مغار باید در فاصله نسبتاً نزدیک به سطح زمین حفر شود[۲].

آتشکاری در مغار می‌تواند به سه روش انجام گیرد:

۱- آتشکاری سینه کار با چال‌های افقی برای حفاری در روش تونل پیشرو.

۲- پله‌ای با چال‌های افقی.

۳- پله‌ای با چال‌های قائم.

همه ۳ روش فوق، عموماً در ساخت همه مغارها استفاده شده است[۳].

۲-۲-برنامه‌ریزی حفاری

قسمت پیشانی اطلاعاتی در اختیار مهندس طراح برای طراحی جزئیات نگهداری قرار می‌دهد تا مهندس با دید بازتری بقیه مغار را طراحی کند. در نمونه طرح داده شده بر پایه مشاهدات در تونل پیشرو، چنانچه اطلاعات غلط باشد براحتی طراحی نگهداری تغییر خواهد کرد تا با شرایط محلی وفق داده شود[۴]. روش و آرایش حفاری، تأثیر زیادی روی تغییر شکل در تونلی که با روش حفاری ترتیبی[1]حفر شده است، دارد. عموماً قانون ساده‌ای برای تصمیم گیری در انتخاب روش حفاری بهینه وجود ندارد. این تصمیم عمدتاً متأثر از تجربیات مهندسی است تا محاسبات نظری[۵,۶].

۲-۲-۱- قسمت پیشانی

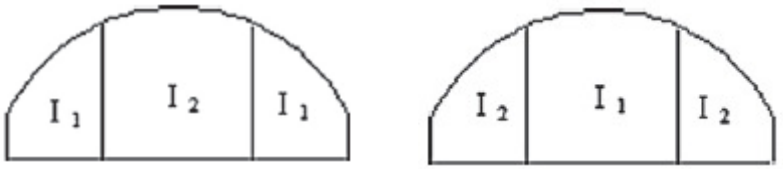
در کشور چین از سال ۱۹۹۰، برای حفاری قوس سقف نیروگاه‌های زیرزمینی ساخته شده یا در حال ساخت، روش حفاری و آتشکاری با یک قطر چال ۵۰-۴۲ میلی‌متر و طول چال ۳/۵-۳ متر بدون استثناء استفاده شده است. امروزه در چین برای حفاری لایه‌های زیری قوس سقف و سرعت

[1] Sequential Excavation Method (SEM)

بخشیدن در ساخت مغارها، روش آتشکاری روباز استفاده شده که عموماً یک چال با قطر ۹۰-۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰-۸ متر اتخاذ می‌شود.

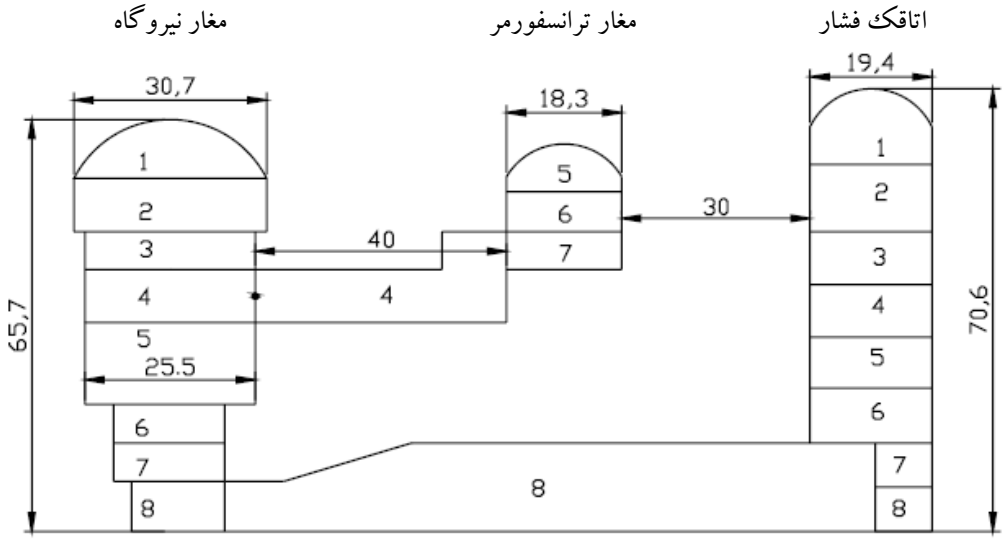
دو مرحله حفاری رایج برای حفر قوس مغار در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. بجز برای نیروگاه لانگتن، مراحل حفاری قوس سقف در همه پروژه‌های دیگر در چین، از روش تونل پیشرو در وسط و در ابتدا حفر شده، اتخاذ شده است و برای گسترش مغار دو دیواره کناری حفر می-شود. که در شکل‌های ۲-۱-الف و ۲-۲ نشان داده شده است.

در نیروگاه لانگتن دو تونل‌های پیشرو کناری در ابتدا حفر شده بودند و سپس ستون وسط حفر شد که در شکل‌های ۲-۱-ب و ۲-۳ نشان داده شده است[۷].

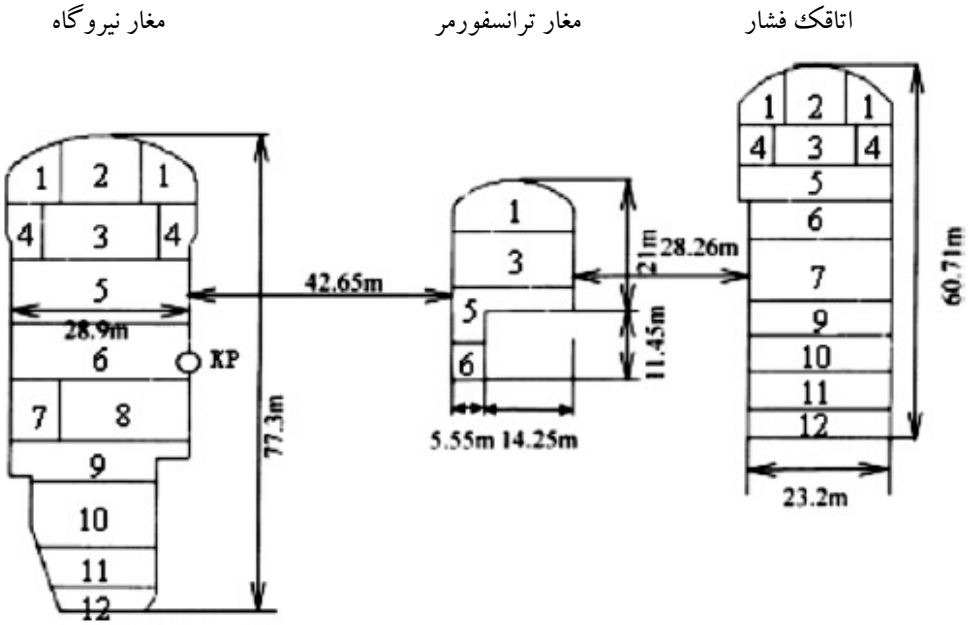


ب) حفر تونل‌های پیشرو کناری در ابتدا الف) حفر تونل پیشرو در وسط در ابتدا

شکل ۲-۱) مراحل حفاری قوس سقف نیروگاه زیرزمینی[۷]



شکل ۲-۲) ابعاد، ترتیب مراحل حفاری و فاصله بین ۳ فضا در پروژه ارتان چین[۸]



شکل ۲-۳) ابعاد، ترتیب مراحل حفاری و فاصله بین ۳ فضا در پروژه لانگتن[۸]

حفاری قسمت پیشانی یک مغار طبیعتاً باید ابتدا با استفاده از روش‌های تونل‌سازی انجام شود و این مورد، دسترسی آسانی را به سقف مغار برای کارهای نصب نگهداری ارائه می‌دهد. سقف محکم، شرایط کاری امنی را برای حفاری ترازهای پایینی مغار فراهم می‌کند. ترازهای پایینی ممکن است با استفاده از روش‌های روباز مانند روش پله‌ای حفر شود.

اندازه پیشانی توسط چندین عامل که عموماً نیاز می‌شود پیشانی را به دو یا چند قسمت تقسیم کند، ارائه می‌گردد. این عوامل عبارتند از :

۱- رسیدن جامبودریل و سکوهای استفاده شده برای کارهای نگهداری که ارتفاع را به ۷ تا ۱۰ متر محدود می‌کند.

۲- سطح نگهداری نشده سقف که تابعی از کیفیت سنگ است.

۳- وجود سنگ ضعیف که ممکن است سطح نگهداری نشده را بر اثر حفر سینه کار به‌دلیل ناپایداری، محدود کند.

۴- محدودیت در مقدار ماده منفجرشده در یک وهله که همراه با معیارهایی برای لرزش آتشکاری است.

۵- عمق چال‌های آتشکاری که ۴ تا ۵ متر است و به سطح مقطع قسمت پیشانی وابسته است.

عوامل بالا ممکن است، سطح مقطع قسمت پیشانی را به حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر مربع محدود کند.

در شرایط سنگ ضعیف، قسمت پیشانی ممکن است کوچک‌تر از ۱۰۰ متر مربع شود. تعداد مراحل حفر با روش پله‌ای بستگی به دهانه مغار و حداکثر سطح مقطع کاربردی دارد[۳].