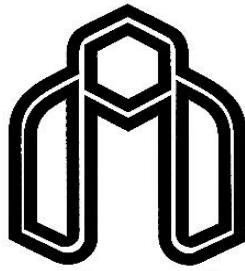


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری مغار دریچه‌های کنترل در سد

چم شیر به روش عددی

نگارنده: سولماز جباری

استاد راهنما

دکتر شکراله زارع

اسفند ۱۳۹۵

شماره: ۲۴۱۵/۱۹.۹
تاریخ: ۹۵/۱۲/۲۳
رویش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خطوط متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزانی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم سواست جاری به شماره دانشجویی ۹۲۰۵۳۵۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک بسنگ تحت عنوان تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری معار در پهنه های کنترل سد چم شیو به روش عددی که در تاریخ ۹۵/۱۲/۱۶ بحضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: تفاهل) ☒ / ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

- ۱- عالی (۲۰-۱۹)
۲- خوب (۱۸-۱۷)
۳- قابل قبول (۱۶-۱۵)
۴- نیاز به اصلاح (۱۴-۱۳)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد اتمای اول	دکتر شکراله زارع	دانشیار	
۲- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی لوریزی	استادیار	
۳- استاد مسئول اول	دکتر احمد رمضان زاده	استادیار	
۴- استاد مسئول دوم	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	

رئیس دانشگاه شاهرود:

تعهد نامه

اینجانب سولماز جباری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری معار در پیچته‌های کنترل در سد چم شیر به روش عددی تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه ناگزیر 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrud University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا پافت‌های 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 اخلاقی رعایت شده است.

۹۶/۱/۱۹

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تالیفات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

• متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

طرح سد و نیروگاه چم شیر بر روی رودخانه زهره در استان کهگیلویه و بویراحمد در حال احداث است. جهت تخلیه مخزن سد، کنترل اولیه آبگیری مخزن و همچنین تنظیم و کنترل سطح آب مخزن سد از یک مجرای تخلیه کننده استفاده می‌شود. در پروژه سد و نیروگاه چم شیر با توجه به نوع سد بتن غلتکی و جدا شدن سازه‌های جانبی آن از بدنه سد، مجرای تخلیه کننده به صورت یک رشته تونل به طول ۳۳۶ متر پیش‌بینی شده است. این مجرا شامل قسمت ورودی کانال آبگیر، تونل، مغار دریاچه‌های کنترل و حوضچه آرامش است. برای کنترل ورودی و خروجی این مجرا ۳ دریاچه پیش‌بینی شده که یک دریاچه در محل آبگیر و دو دریاچه دیگر در بخش انتهایی تونل در یک مغار به عرض ۱۵، طول ۲۳ و ارتفاع ۳۷ متر نصب خواهد شد. با توجه به موقعیت قرارگیری مغار از لحاظ زمین‌شناسی و ناپیوستگی‌های موجود، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری سازه مذکور ضروری است. در این پژوهش ابتدا طبقه‌بندی توده سنگ اطراف مغار با استفاده از روش‌های تجربی Q و RMR سیستم نگهداری اولیه مغار برآورد شد. با استفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار 3DEC، مغار دریاچه‌های کنترل مدل‌سازی و پس از واردکردن ناپیوستگی‌ها تحلیل پایداری مغار انجام شد. تحلیل حساسیت عوامل مؤثر شامل متغیرهای مقاومتی سنگ و ناپیوستگی‌ها در پایداری مغار بررسی شد. در نهایت به کمک مدل‌سازی عددی سیستم نگهداری مناسب برای مغار دریاچه‌ها طراحی گردید. سیستم نگهداری طراحی شده شامل بتن پاشیده به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و پیچ‌سنگ‌هایی به قطر ۳۲ میلی‌متر و طول ۸ متر با فاصله‌داری ۲×۲ در دیواره و ۱/۵×۲ در سقف است. بیش‌ترین جابه‌جایی در دیواره چپ رخ داده و روند جابه‌جایی‌ها مشابه نتایج ابزار دقیق با افزایش فاصله از سطح کاهش داشته است اما مقدار جابه‌جایی‌ها در بعضی نقاط تفاوت زیادی دارد. با نصب سیستم نگهداری جابه‌جایی‌ها تا حدود ۴۱ درصد کاهش داشته است. واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، طراحی نگهداری، روش‌های تجربی، روش عددی، تحلیل حساسیت.

مقاله مستخرج از پایان نامه

"تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری مغار دریچه‌های سد چم شیر با استفاده از نرم افزار 3DEC"،

ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، بهمن ماه ۱۳۹۵، تهران-ایران.

فهرست

صفحه	عنوان
۱	۱. فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق.....
۳	۳-۱ مراحل انجام تحقیق.....
۳	۴-۱ تشریح مراحل اصلی پژوهش.....
۴	۵-۱ ساختار گزارش.....
۷	۲. فصل دوم: مروری بر روش‌های تحلیل پایداری و بررسی مطالعات گذشته.....
۸	۱-۲ مقدمه.....
۸	۲-۲ روش‌های تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی.....
۸	۱-۲-۲ روش‌های تجربی.....
۹	۱-۲-۲-۱ طبقه‌بندی ژئومکانیکی.....
۱۰	۱-۲-۲-۲ شاخص کیفی توده سنگ.....
۱۲	۲-۲-۲ روش‌های مشاهده‌ای.....
۱۳	۱-۲-۲-۲ روش تونل‌سازی جدید اتریشی.....
۱۴	۳-۲-۲ روش‌های تحلیلی و حل بسته.....
۱۴	۴-۲-۲ روش‌های عددی.....
۱۴	۱-۴-۲-۲ تفاضل محدود.....
۱۵	۲-۴-۲-۲ روش المان محدود.....
۱۶	۳-۴-۲-۲ روش المان مرزی.....
۱۶	۴-۴-۲-۲ روش المان مجزا.....
۱۷	۳-۲ مروری بر مطالعات گذشته.....
۲۵	۴-۲ جمع‌بندی.....
۲۷	۳. فصل سوم: معرفی ساختگاه و انتخاب روش عددی.....
۲۸	۱-۳ مقدمه.....
۲۸	۲-۳ زمین‌شناسی عمومی.....
۳۲	۱-۲-۳ ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های تشکیل‌دهنده مغار.....
۳۲	۲-۲-۳ وضعیت ناپیوستگی‌های توده سنگ.....
۳۳	۳-۳ انتخاب روش عددی.....
۳۵	۴-۳ سازوکار نرم‌افزار 3DEC.....
۳۵	۵-۳ جمع‌بندی.....
۳۷	۴. فصل چهارم: مدل‌سازی مغار در پیچه‌های کنترل.....
۳۸	۱-۴ مقدمه.....
۳۸	۲-۴ مدل‌سازی مغار با نرم‌افزار 3DEC.....
۳۸	۱-۲-۴ تعریف هندسه مدل.....
۳۸	۲-۲-۴ تخصیص مدل رفتاری سنگ و ناپیوستگی.....
۳۸	۳-۲-۴ اعمال شرایط مرزی و آغازین.....

۳۹.....	۴-۲-۴ ایجاد تعادل اولیه در مدل.....
۴۱.....	۵-۲-۴ ایجاد تغییرات در مدل.....
۴۲.....	۳-۴ نتایج حاصل از مدل سازی.....
۴۳.....	۱-۳-۴ جابه جایی ها.....
۴۵.....	۲-۳-۴ وضعیت تنش ها.....
۴۸.....	۴-۴ جمع بندی.....
۴۹.....	۵. فصل پنجم: تحلیل حساسیت.....
۵۰.....	۱-۵ مقدمه.....
۵۰.....	۲-۵ نتایج تحلیل حساسیت با مدل سازی عددی.....
۵۰.....	۱-۲-۵ تأثیر نسبت تنش در جابه جایی.....
۵۳.....	۲-۲-۵ تأثیر متغیرهای مقاومتی سنگ در جابه جایی.....
۵۷.....	۳-۲-۵ تأثیر متغیرهای مکانیکی ناپیوستگی ها در جابه جایی.....
۶۳.....	۳-۵ جمع بندی.....
۶۵.....	۶. فصل ششم: تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری مغار در یخچه های کنترل.....
۶۶.....	۱-۶ مقدمه.....
۶۶.....	۲-۶ طبقه بندی سنگ با روش های تجربی.....
۶۶.....	۱-۲-۶ رده بندی ژئومکانیکی.....
۶۷.....	۲-۲-۶ شاخص کیفیت توده سنگ.....
۶۷.....	۳-۲-۶ برآورد اولیه سیستم نگهداری مغار.....
۶۹.....	۳-۶ ارزیابی عملکرد سیستم نگهداری مغار به روش عددی.....
۶۹.....	۱-۳-۶ مشخصات مکانیکی سیستم نگهداری.....
۷۱.....	۲-۳-۶ تحلیل پایداری مغار دارای سیستم نگهداری.....
۷۳.....	۳-۳-۶ نتایج مدل سازی عددی سیستم نگهداری.....
۷۴.....	۱-۳-۳-۶ جابه جایی ها.....
۷۷.....	۲-۳-۳-۶ وضعیت تنش ها.....
۸۰.....	۴-۶ اعتبارسنجی.....
۸۲.....	۵-۶ جمع بندی.....
۸۳.....	۷. فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۸۴.....	۱-۷ مقدمه.....
۸۴.....	۲-۷ نتیجه گیری.....
۸۶.....	۳-۷ پیشنهادها.....
۸۷.....	منابع و مراجع.....

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۹	شکل (۱-۲): نمای بالای بلوک‌های ناپایدار.....
۲۲	شکل (۲-۲): ساختار قاب فولادی برای آزمایش مدل.....
۲۳	شکل (۳-۲): مقطع طولی و عرضی اتاقک کنترل تونل‌های انحراف.....
۲۴	شکل (۴-۲): ترتیب و تعداد مراحل حفاری پیشنهادی مغارها.....
۲۵	شکل (۵-۲): موقعیت قرارگیری حفاری‌ها اطراف مغار.....
۲۹	شکل (۱-۳): موقعیت کلی طرح سد و نیروگاه چم شیر.....
۲۹	شکل (۲-۳): راه‌های دسترسی به سد و نیروگاه چم شیر.....
۳۰	شکل (۳-۳): نمایی از ناودیس چم شیر و شکل دره.....
۳۱	شکل (۴-۳): موقعیت گالری‌های اکتشافی سد چم شیر.....
۳۱	شکل (۵-۳): واحد میشان میانی و ناحیه انتقال در سد.....
۳۳	شکل (۶-۳): درزه‌های موجود در ساختگاه مغار دریچه‌های کنترل.....
۴۰	شکل (۱-۴): شبکه المان مجزا در اطراف مغار.....
۴۲	شکل (۲-۴): (الف) هندسه بلوک، (ب) ابعاد مغار دریچه‌ها و ترتیب مراحل حفاری.....
۴۲	شکل (۳-۴): موقعیت نقاط شاهد در مدل.....
۴۳	شکل (۴-۴): جابه‌جایی‌های نقاط شاهد ۲۲ تا ۲۶ در مراحل مختلف حفاری.....
۴۴	شکل (۵-۴): جابه‌جایی جداره‌ی مغار (الف) در راستای افقی و (ب) در راستای قائم (متر).....
۴۶	شکل (۶-۴): (الف) تنش در راستای افقی و (ب) تنش در راستای قائم (کیلو پاسکال).....
۴۷	شکل (۷-۴): (الف) بیش‌ترین و (ب) کم‌ترین تنش اصلی (تنش فشاری = منفی).....
۵۲	شکل (۱-۵): (الف) تا (د) جابه‌جایی برآیند در نسبت تنش‌های متفاوت.....
۵۵	شکل (۲-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف چسبندگی سنگ.....
۵۶	شکل (۳-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک سنگ.....
۶۰	شکل (۴-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک درزه.....
۶۱	شکل (۵-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف سختی نرمال درزه.....
۶۲	شکل (۶-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف سختی برشی درزه.....
۷۲	شکل (۱-۶): سیستم نگهداری مغار؛ (الف) پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی، (ب) بتن پاشیده.....
۷۳	شکل (۲-۶): (الف) نیروی محوری وارده بر پیچ‌سنگ‌ها (مگا نیوتن) و (ب) جابه‌جایی پیچ‌سنگ‌ها (متر).....
۷۵	شکل (۳-۶): جابه‌جایی برآیند مغار (الف) بدون سیستم و (ب) دارای سیستم نگهداری (متر).....
۷۶	شکل (۴-۶): جابه‌جایی جداره‌ی مغار (الف) در راستای افقی و (ب) در راستای قائم (متر).....
۷۸	شکل (۵-۶): (الف) تنش در راستای افقی و (ب) تنش در راستای قائم (کیلو پاسکال).....
۷۹	شکل (۶-۶): (الف) بیش‌ترین و (ب) کم‌ترین تنش اصلی (تنش فشاری = منفی).....
۸۰	شکل (۷-۶): نمایی از محل نصب ابزار دقیق در مغار.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲): نگهداری پیشنهادشده توسط روش RMR.....	۱۰
جدول (۲-۲): مقادیر ESR پیشنهادشده برای فضاهای مختلف.....	۱۱
جدول (۱-۳): ویژگی‌های سنگ بکر تشکیل‌دهنده مغار.....	۳۲
جدول (۲-۳): خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در اطراف مغار دریچه‌های کنترل.....	۳۳
جدول (۳-۳): پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها.....	۳۳
جدول (۱-۴): جابه‌جایی‌های نقاط شاهد در جداره‌ی مغار.....	۴۳
جدول (۲-۴): مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از حفاری.....	۴۵
جدول (۱-۵): روابط تخمین نسبت تنش و مقادیر محاسبه شده برای مغار.....	۵۱
جدول (۲-۵): متغیرهای مقاومتی سنگ در مدل‌سازی عددی.....	۵۳
جدول (۳-۵): متغیرهای مقاومتی درزه‌ها در مدل‌سازی عددی.....	۵۸
جدول (۱-۶): طبقه‌بندی RMR توده سنگ اطراف مغار.....	۶۷
جدول (۲-۶): مشخصات بتن پاشیده.....	۷۰
جدول (۳-۶): مشخصات سطح تماس بین بتن پاشیده و سنگ.....	۷۰
جدول (۴-۶): مشخصات پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی.....	۷۰
جدول (۵-۶): مشخصات دوغاب سیمانی بکار برده شده برای تزریق پیچ‌سنگ‌ها.....	۷۱
جدول (۶-۶): مقایسه مقادیر جابه‌جایی جداره‌ی مغار بدون سیستم و دارای سیستم نگهداری.....	۷۴
جدول (۷-۶): مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از نگهداری.....	۷۷
جدول (۱-۷): نگهداری پیشنهادی روش‌های مختلف.....	۸۵
جدول (۲-۷): مقایسه بیش‌ترین جابه‌جایی جداره‌ی مغار بدون سیستم و دارای سیستم نگهداری.....	۸۶

فهرست نمودارها

صفحه	عنوان
۱۲	نمودار (۱-۲): نگهداری پیشنهادی شاخص کیفی توده سنگ
۴۱	نمودار (۱-۴): تاریخچه نیروهای نامتعادل در مدل
۴۱	نمودار (۲-۴): سرعت قائم در سقف و سرعت افقی در دیواره مغار
۵۱	نمودار (۱-۵): روند تغییر جابه‌جایی برآیند مدل با نسبت تنش
۵۴	نمودار (۲-۵): تغییرات چسبندگی سنگ با میزان جابه‌جایی برآیند مغار
۵۴	نمودار (۳-۵): تغییرات زاویه اصطکاک سنگ با میزان جابه‌جایی برآیند مغار
۵۸	نمودار (۴-۵): تغییرات زاویه اصطکاک درزه با میزان جابه‌جایی برآیند مغار
۵۸	نمودار (۵-۵): تغییرات سختی نرمال درزه با میزان جابه‌جایی برآیند
۵۹	نمودار (۶-۵): تغییرات سختی نرمال درزه با میزان جابه‌جایی نرمال درزه
۵۹	نمودار (۷-۵): تغییرات سختی برشی درزه با میزان جابه‌جایی برآیند
۵۹	نمودار (۸-۵): تغییرات سختی برشی درزه با میزان جابه‌جایی برشی درزه
۶۸	نمودار (۱-۶): نگهداری دائم بر اساس شاخص کیفیت توده سنگ
۶۹	نمودار (۲-۶): نگهداری موقت بر اساس شاخص کیفیت توده سنگ
۸۱	نمودار (۳-۶): مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق و مدل‌سازی در (الف) دیواره راست (ب) دیواره چپ (ج) سقف

فصل اول

کلیات

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؛ به طوری که این موضوع سبب گردیده تا سدسازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره‌سازی و انتقال آب در اولویت قرار گیرد.

مغارها و فضاهاى زیرزمینی بزرگ همواره یکی از نیازهای اساسی سدسازی کشور بوده است. بر این اساس در برخی از سدها محل قرارگیری نیروگاه‌های برق‌آبی در داخل مغارها است. علاوه بر این سازه‌هایی مانند دریچه‌های کنترل جریان خروجی به واسطه ابعاد بزرگ و ضرورت قرارگیری در داخل توده سنگ، در مغارها جانمایی می‌شوند.

۱-۲ اهداف و ضرورت انجام تحقیق

طرح سد و نیروگاه چم شیر باهدف ذخیره سیلاب‌ها و استفاده از آب ذخیره‌شده برای توسعه و بهبود فعالیت‌های کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی، مهار سیل و پیشگیری از خسارات ناشی از آن در دشت‌های سردشت، زیدون و هندیجان و کمک به حل معضل شوری آب رودخانه زهره در پایین‌دست تنگه چم شیر بر روی رودخانه زهره در استان کهگیلویه و بویراحمد در حال احداث است. جهت تخلیه مخزن سد، کنترل اولیه آبیگری مخزن و همچنین تنظیم و کنترل سطح آب مخزن سد از یک مجرای تخلیه کننده استفاده می‌شود. مشخصات این مجرا بر اساس حجم مخزن، رسوبات مخزن و همچنین زمان تخلیه و آبیگری مخزن تعیین می‌شود. در پروژه سد و نیروگاه چم شیر با توجه به نوع سد (بتن غلتکی) و جدا شدن سازه‌های جانبی آن از بدنه سد، مجرای تخلیه کننده فوق به صورت یک رشته تونل به طول ۳۳۶ متر پیش‌بینی شده است. این مجرا شامل قسمت ورودی کانال آبیگر، تونل، مغار دریچه‌های کنترل و حوضچه آرامش است. برای کنترل ورودی و خروجی این مجرا ۳ دریچه پیش‌بینی شده که یک دریچه در محل آبیگر و دو دریچه دیگر در بخش انتهایی تونل در یک مغار به عرض ۱۵، طول ۲۳ و ارتفاع ۳۷ متر نصب خواهد شد (گزارش مکانیک سنگ، ۱۳۹۲).

توده سنگ مغار دریچه‌ها تحت تأثیر چین‌خوردگی منطقه دارای چندین دسته‌درزه بوده که در ترکیب با گسل‌ها و ناحیه‌های برشی می‌تواند باعث ناپایداری در این فضای بزرگ و اخلاص در عملکرد سازه در طول عمر آن شود. با توجه به حساسیت مغار دریچه‌ها به دلیل ابعاد بزرگ و ضرورت عملکرد بدون نقص آن تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

۳-۱ مراحل انجام تحقیق

انجام این تحقیق مراحل زیر را شامل می‌شود:

- (۱) گردآوری اطلاعات و مطالعه کارهای انجام‌شده
- (۲) تسلط بر نرم‌افزار عددی سه‌بعدی
- (۳) بررسی ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها
- (۴) مدل‌سازی عددی اتاق دریچه‌ها و تحلیل پایداری
- (۵) تحلیل حساسیت
- (۶) طراحی سیستم نگهداری مغار و مقایسه با روش‌های تحلیلی و تجربی
- (۷) اعتبارسنجی مدل
- (۸) بررسی و تفسیر نتایج

۴-۱ تشریح مراحل اصلی پژوهش

مدل‌سازی مغار دریچه‌های کنترل با توجه به شرایط هندسی، زمین‌شناسی و ویژگی‌های سنگ و ناپیوستگی‌ها انجام و نتایج با به‌کارگیری شاخص جابه‌جایی بررسی شده است. به منظور تعیین متغیرهای بحرانی، تحلیل حساسیت بر روی نسبت تنش‌ها، متغیرهای مقاومت برشی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها انجام شده است. طبقه‌بندی توده سنگ به روش‌های تجربی و عددی بررسی شده و سیستم نگهداری پیشنهادی هر کدام از روش‌ها برای مغار تعیین شده است. در نهایت نتایج مدل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و گزارش نهایی تدوین شده است.

۱-۵ ساختار گزارش

گزارش نهایی در هفت فصل به شرح زیر تدوین شده است:

۱. کلیات

در این فصل کلیاتی در رابطه با اهداف و ضرورت، روش انجام تحقیق، مراحل اصلی پژوهش و ساختار گزارش بیان شده است.

۲. مروری بر روش‌های تحلیل پایداری و بررسی مطالعات پیشین

در این فصل به اختصار در مورد روش‌های مختلف تحلیل پایداری فضاها، زیرزمینی پرداخته شده و همچنین خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده ارائه شده است.

۳. معرفی ساختگاه و انتخاب روش عددی

در این فصل زمین‌شناسی عمومی، ویژگی‌های مقاومتی سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها، وضعیت درزه‌ها ارائه شده و روش عددی مناسب برای مدل‌سازی انتخاب شده است.

۴. مدل‌سازی مغار دریاچه‌های کنترل

در این فصل مدل‌سازی مغار انجام شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

۵. تحلیل حساسیت

در این فصل تحلیل حساسیت بر روی نسبت تنش‌ها، متغیرهای مقاومتی سنگ و ناپیوستگی‌ها انجام شده، تأثیر این متغیرها بر جابه‌جایی‌های رخ داده در جداره مغار تحلیل و حساس‌ترین متغیر انتخاب گردید.

۶. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری مغار دریاچه‌های کنترل

در این فصل طبقه‌بندی توده سنگ با استفاده از روش‌های تجربی انجام و سیستم نگهداری اولیه پیشنهاد شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی، سیستم نگهداری مورد نیاز تعیین شد.

۷. جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادها

در این فصل نتایج به دست آمده از مدل سازی، تحلیل حساسیت، تحلیل ساختاری، طبقه بندی سنگ و نگهداری پیشنهاد شده از روش های مختلف جمع بندی شده و راهکارهای مورد نظر ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر روش‌های تحلیل
پایداری و بررسی مطالعات
گذشته

۲-۱ مقدمه

توده سنگ از سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تشکیل شده است، ناپیوستگی‌ها مانند گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها که به‌طور قابل‌توجهی پایداری توده سنگ‌های اطراف فضای حفاری شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تغییر شکل و پایداری توده سنگ اطراف حفره در معرض تغییر شرایط، که تابعی از شرایط برجا قبل از حفاری و اختلال به دلیل فعالیت‌های ساخت‌وساز است، کنترل می‌شود. ناپایداری فضاهای زیرزمینی که اغلب توسط توزیع مجدد تنش در اطراف توده سنگ ناشی از فعالیت‌های حفاری، تنش بیش‌ازحد یا تغییر شکل بیش‌ازحد ایجاد می‌شود؛ نتیجه تعامل میان توده سنگ، شرایط مرزی و فعالیت‌های مهندسی است (Zhao & Zhu, 2003). در این فصل ابتدا به روش‌های تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی اشاره شده و سپس مروری بر پژوهش‌های مختلف ارائه شده است.

۲-۲ روش‌های تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی

از روش‌های تجربی، روش‌های مشاهده‌ای، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی استفاده می‌شود.

۲-۲-۱ روش‌های تجربی

در امکان‌سنجی و طراحی مراحل اولیه یک پروژه، وقتی که اطلاعات دقیق بسیار کمی وجود دارد. در مورد توده سنگ، تنش و ویژگی‌های هیدرولوژیکی، استفاده از یک روش طبقه‌بندی توده سنگ می‌تواند مفید باشد. در ساده‌ترین حالت، از طبقه‌بندی برای حصول اطمینان از اینکه تمام اطلاعات مربوط در نظر گرفته شده استفاده می‌شود. از طرف دیگر، یک یا چند روش طبقه‌بندی توده سنگ می‌تواند برای ایجاد یک دید کلی از ویژگی‌های توده سنگ برای برآورد نگهداری اولیه موردنیاز، مقاومت و تغییر شکل مورد استفاده قرار بگیرد. درک محدودیت‌های روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ و کاربرد این روش‌ها اهمیت دارد. استفاده از این روش طراحی نیاز به دسترسی به اطلاعاتی در مورد تنش برجا، خواص توده سنگ و توالی حفاری برنامه‌ریزی شده دارد. کاربرد روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ باید به‌روز شده و در رابطه با تحلیل مکان خاص مورد استفاده قرار بگیرد. روش‌های طبقه‌بندی برای کاربرد اصلی خود

مناسب هستند، به خصوص اگر در چارچوب ساختگاهی که از آنها توسعه داده شده استفاده شوند، احتیاط قابل توجهی باید در استفاده از طبقه‌بندی توده سنگ برای سایر مسائل مهندسی سنگ اعمال شود. سیستم‌های مختلف طبقه‌بندی تأکید متفاوت بر روی متغیرهای مختلف دارند و توصیه می‌شود که حداقل دو روش در هر مکان در طول مراحل اولیه یک پروژه استفاده شود. از مهم‌ترین این طبقه‌بندی‌ها، سیستم امتیازدهی توده سنگ RMR و شاخص کیفی توده سنگ Q است (Hoek, 2006).

۲-۱-۱ طبقه‌بندی ژئومکانیکی

بیناوسکی در سال 1976 اطلاعات مربوط به یک طبقه‌بندی توده سنگ به نام طبقه‌بندی ژئومکانیکی یا سیستم امتیاز توده سنگ^۱ RMR منتشر کرد. نسخه‌ای که در اینجا شرح داده شده نسخه طبقه‌بندی بیناوسکی در سال 1989 است. شش متغیر مورد استفاده در روش RMR عبارت است از:

الف) مقاومت فشاری تک‌محوری ماده سنگ

ب) کیفیت سنگ^۲ (RQD)

ج) فاصله ناپیوستگی

د) وضعیت ناپیوستگی

ه) شرایط آب زیرزمینی

و) راستا ناپیوستگی

در این سیستم طبقه‌بندی، توده سنگ به تعدادی از مناطق ساختاری تقسیم شده است. مرزهای مناطق ساختاری ویژگی‌های عمده ساختاری مانند یک گسل یا با تغییر در نوع سنگ است. در برخی موارد تغییرات قابل توجهی در فاصله‌داری ناپیوستگی یا ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در همان نوع سنگ، ممکن است تقسیم توده سنگ به تعدادی از مناطق ساختاری کوچک را ضروری کند. پیشنهاد برای انتخاب

^۱ Rock Mass Rating

^۲ Rock Quality Designation

سیستم نگهداری تونل در جدول (۱-۲) ارائه شده است. این پیشنهادها برای تونلهایی به عرض ۱۰ متر که با روش چالزنی و آتشیاری حفاری شده است (Bieniawski, 1989).

جدول (۱-۲): نگهداری پیشنهاد شده توسط روش RMR (Bieniawski, 1989)

امتیاز توده سنگ	پیچ سنگ ^۱ ها (قطر ۲۰ میلی متر، تمام تزریقی)	بتن پاشیده	قاب های فولادی
بسیار خوب (۸۱-۱۰۰)	به نگهداری نیاز ندارد	-	-
خوب (۶۱-۸۰)	پیچ سنگ ها به صورت موضعی در سقف با طول ۳ متر فاصله داری ۲/۵ متر با توری سیمی	۵۰ میلی متر در سقف	-
متوسط (۴۱-۶۰)	پیچ سنگ های منظم با طول ۴ متر، فاصله داری ۱/۵- ۲ متر در سقف و دیواره ها با توری سیمی	۵۰-۱۰۰ میلی متر در سقف و ۳۰ میلی متر در دیواره	-
ضعیف (۲۱-۴۰)	پیچ سنگ های منظم با طول ۵-۴ متر، فاصله داری ۱/۵-۱ متر در سقف و دیواره ها با توری سیمی	۱۰۰-۱۵۰ میلی متر در سقف و ۱۰۰ میلی متر در دیواره	قاب های سبک تا متوسط فاصله داری ۱/۵ متر
خیلی ضعیف (کمتر از ۲۰)	پیچ سنگ های منظم با طول ۶-۵ متر، فاصله داری ۱/۵-۱ متر در سقف و دیواره ها با توری سیمی	۱۵۰-۲۰۰ میلی متر در سقف و ۱۵۰ میلی متر در دیواره	قاب های متوسط تا سنگین، فاصله داری ۰/۷۵ متر

۲-۱-۲-۲ شاخص کیفی توده سنگ

بر اساس ارزیابی تعداد زیادی از مطالعات موردی زیرزمینی، بارتن و همکارانش از موسسه ژئوتکنیک نروژ شاخص کیفیت توده سنگ^۲ را برای تعیین ویژگی های توده سنگ و نگهداری مورد نیاز تونل پیشنهاد دادند. مقدار عددی شاخص Q در مقیاس لگاریتمی از 0.001 تا 1000 تغییر می کند. رابطه (۱-۲) شاخص کیفیت توده سنگ را ارائه می کند.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1-2)$$

¹Rock bolt

² Rock Mass Quality

RQD معرف کیفیت سنگ

J_n تعداد دسته درزه

J_r وضعیت زبری درزه

J_a وضعیت هوازدگی

J_w عامل کاهش آب درزه

SRF عامل کاهش تنش

نگهداری پیشنهادشده با این روش در نمودار (۱-۲) آمده است. در رابطه با شاخص Q در مورد پایداری و نگهداری موردنیاز حفاری‌های زیرزمینی بارتن متغیر بعد معادل را تعریف کرده است. بعد معادل^۱ (D_e) از تقسیم طول، قطر و یا ارتفاع حفاری بر ضریب نگهداری فضای حفاری شده^۲ به دست آمده است. از این رو مقدار ضریب نگهداری فضای حفاری به کاربرد فضا و به درجه‌ی امنیتی بستگی دارد که به نصب سیستم نگهداری برای حفظ پایداری حفاری مربوط می‌شود. مقادیر مجاز ESR در جدول (۲-۲) آمده است؛ بزرگ‌ترین دهانه خود پایدار می‌تواند با رابطه (۲-۲) تخمین زده شود (Barton et al, 1974).

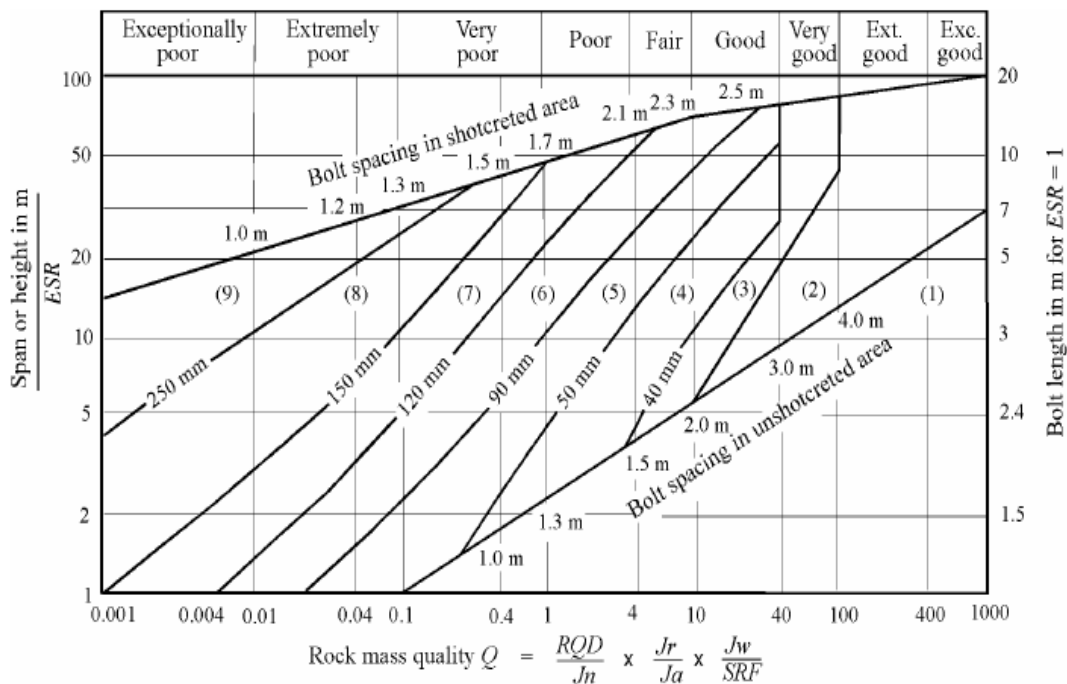
$$D_e = 2 \text{ ESR } Q^{0.4} \quad (2-2)$$

جدول (۲-۲): مقادیر ESR پیشنهادشده برای فضاهاى مختلف (Barton & Grimstad, 2014)

نسبت نگهداری _ حفاری	انواع حفاری
۲-۵	فضاهای معدنی موقت
۱/۶-۲	فضاهای معدنی دائم، تونل‌های آب برای نیروگاه، تونل‌ها، بازکننده‌ها
۱/۲-۱/۳	مغارهای ذخیره‌سازی
۰/۹-۱/۱	تونل‌های فرعی جاده و راه‌آهن، مغارها و تونل‌های دسترسی، نیروگاه‌ها، سازه‌های پدافند، ورودی‌ها، محل تقاطع
۰/۵-۰/۸	تونل‌های اصلی جاده و راه‌آهن، نیروگاه‌های زیرزمینی هسته‌ای، ایستگاه‌های راه‌آهن، ورزشگاه‌ها و مکان‌های عمومی، کارخانه‌ها

¹ Equivalent dimension

² Excavation Support Ratio



$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

- (۱) بدون نیاز به نگهداری
- (۲) استفاده از پیچ سنگ به صورت موضعی
- (۳) نصب پیچ سنگ به صورت منظم
- (۴) نصب پیچ سنگ به صورت منظم با ۴۰ تا ۱۰۰ میلی متر بتن پاشی غیر مسلح
- (۵) بتن پاشی مسلح شده با الیاف به ضخامت ۵۰ تا ۹۰ میلی متر و پیچ سنگ
- (۶) بتن پاشی مسلح شده با الیاف به ضخامت ۹۰ تا ۱۲۰ میلی متر و پیچ سنگ
- (۷) بتن پاشی مسلح شده با الیاف به ضخامت ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی متر و پیچ سنگ
- (۸) بتن پاشی مسلح شده با الیاف به ضخامت بالای ۱۵۰ میلی متر و پیچ سنگ
- (۹) بتن ریزی

نمودار (۱-۲): نگهداری پیشنهادی شاخص کیفی توده سنگ (Grimstad & Barton, 1993)

۲-۲-۲ روش های مشاهده ای

روش های مشاهده ای در شرایط پیچیده و غیر قابل پیش بینی زمین شناسی به کار می رود. طراحی سیستم نگهداری زیرزمینی درواقع یک فرآیند مکرر طراحی و ارزیابی است. روش های مشاهده ای سیستم نگهداری را بر اساس رفتار زمین ارائه می کنند. چون عدم قطعیت ها در تخمین تنش برجا، متغیرهای مقاومتی، بار سنگ و تغییر شکل، ناشی از تغییر پیوسته شرایط پیچیده زیرزمینی وجود دارد. مزایای روش های مشاهده ای پایش حرکات زمین در حین حفاری، اندازه گیری فشار سنگ بر سیستم نگهداری، تعیین نواحی ناپایدار، اختصاص دادن اندازه گیری ها برای تقویت توده سنگ یا سیستم نگهداری، تحلیل

واکنش بین سنگ و سیستم نگهداری، میزان همگرایی سازه، وسعت ناحیه خردشده اطراف سازه، تعیین فشار نگهداری موردنیاز و صلبیت آن است (Ramamurthy, 2010). از روش‌های مشاهده‌ای می‌توان روش تونل سازی جدید اتریشی^۱ را نام برد که بر تفسیر داده‌های رفتار سنجی تأکید دارند.

۲-۲-۱ روش تونل سازی جدید اتریشی

در این روش پایداری تونل با کنترل آزادسازی تنش انجام می‌شود. توده سنگ اطراف، به سازه خود نگهدار همراه با نصب نگهداری تبدیل می‌شود؛ به شرطی که از خسارت سست شدن، در نتیجه از دست دادن قابل توجهی از مقاومت، اجتناب شود. خود نگهداری توسط کنترل آزادسازی تنش با معرفی اصطلاح "پوشش نیمه صلب" که از پیچ‌سنگ با استفاده از یک پوشش بتن پاشیده به دست می‌آید.

NATM بر اساس این مفهوم از ظرفیت توده سنگ برای نگهداری باید استفاده شود. کنترل نیروها در فرایند توزیع مجدد در توده سنگ احاطه‌کننده هنگامی که یک حفره ایجاد می‌شود زمانی طول می‌کشد. از ویژگی‌های اصلی این روش این است که توده سنگ در مجاورت تونل به‌عنوان یک عضو متحمل بار همراه با سیستم نگهداری فرض شده است. حلقه بیرونی توده سنگ با استفاده از پیچ‌سنگ همراه با بتن پاشیده فعال می‌شود. نصب و راه‌اندازی پیچ‌سنگ‌ها با پوشش بتن پاشیده اجازه تغییر شکل محدود می‌دهد اما از سست شدن توده سنگ جلوگیری می‌کند. بنابراین، NATM طرفدار نصب و راه‌اندازی نگهداری در زمان خود ایستایی برای جلوگیری از حرکات است. در بررسی استاتیکی تونل به‌عنوان یک لوله دیوار ضخیم متشکل از یک حلقه قوس سنگی و پوشش نگهدارنده رفتار می‌کند. از آنجاکه یک لوله تنها اگر بسته باشد می‌تواند به‌عنوان یک لوله عمل کند، بسته شدن حلقه اهمیت فوق‌العاده دارد، به‌خصوص جایی که در آن پی سنگی با توجه به تنش بالا در شرایط زمین مچاله شونده ناتوان است.

اصول اساسی NATM به‌عنوان خلاصه استفاده از مقاومت توده سنگ و نگهداری بتن پاشیده برای حفظ ظرفیت تحمل بار توده سنگ و نظارت بر تغییر شکل توده سنگ، ارائه نگهداری انعطاف‌پذیر اما فعال به شکل یک حلقه نگهداری، تحمل بار برای کنترل تغییر شکل توده سنگ است. NATM بیشتر مناسب

¹ New Austrian Tunneling Methode

برای زمین نرم است که می‌تواند به صورت ماشینی یا سنتی حفاری شود، که در آن درزه‌داری و شکستگی در دیواره غالب نیست، اغلب رفتارسنجی نقش مهمی در تصمیم‌گیری زمان‌بندی و میزان نگهداری ثانویه ایفا می‌کند (Goel & Singh, 2011).

۲-۲-۳ روش‌های تحلیلی و حل بسته

در این روش‌ها تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در اطراف سازه انجام می‌شود. از معادلات ریاضی برای تعیین تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها استفاده می‌شود به همین دلیل ناگزیر به در نظر گرفتن فرضیات ساده‌ای هستند که ممکن است کاربرد آن‌ها را در شرایط پیچیده با محدودیت روبرو کند. روش‌های تحلیلی مثل راه‌حل فرم بسته هنوز هم برای درک مفهومی رفتار، آزمایش و اعتبارسنجی مدل‌های عددی به کار می‌رود. این روش محدود به حفره‌هایی با سطح مقطع ساده، با شکل منظم و موادی با مدل‌های رفتاری ساده است (Hoek, et al, 2000).

۲-۲-۴ روش‌های عددی

روش‌های عددی به علت انعطاف‌پذیری، سرعت و دقت در انجام مدل‌سازی و تحلیل کاربرد وسیعی در حل مسائل مکانیک سنگی پیدا کرده‌اند. روش‌های المان محدود^۱ (FEM)، تفاضل محدود^۲ (FDM)، المان مرزی^۳ (BEM)، المان مجزا^۴ (DEM) و تحلیل تغییر شکل ناپیوسته^۵ (DDA) از جمله روش‌های عددی هستند.

۲-۲-۴-۱ تفاضل محدود

تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و شرایط مرزی است. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در نقاط دلخواه از فضا است، جایگزین می‌شود. در ابتدای توسعه

¹ Finite Element Methods

² Finite Difference Methods

³ Boundary Element Methods

⁴ Discrete Element Methods

⁵ Discontinuous Deformation Analysis Methods

روش‌های عددی، روش‌هایی مانند المان محدود مرسوم بوده‌اند. این روش‌ها اغلب ماتریس المان‌ها را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی سراسری بزرگ را می‌سازند. درحالی‌که درروش تفاضل محدود به طور معمول این عمل انجام نمی‌گیرد و قابلیت نسبی برای تولید مجدد معادله‌های تفاضل محدود در هر گام وجود دارد. از آنجاکه لازم نیست یک ماتریس سراسری تشکیل شود، تجدید مختصات در وضعیت کرنش‌های بزرگ، مسأله مشکلی نیست. تغییر مکان‌های جزئی گره‌ها به مختصات گره‌ها اضافه می‌شوند. به‌نحوی‌که شبکه با مصالح ارائه شده آن حرکت می‌کند و تغییر مکان می‌دهد. نام این عمل، فرمول‌بندی لاگرانژی است که در این روش به کار گرفته می‌شود. از معایب این روش صرف زمان زیاد برای تحلیل مسائل استاتیکی خطی است (Jing, 2003).

۲-۴-۲ روش المان محدود

انعطاف‌پذیری در مواجهه با ناهمگنی و ناهمسان‌گردی مواد، شرایط مرزی پیچیده و مسائل دینامیکی، همراه با توانایی در مواجهه با مدل‌های ساختاری پیچیده و شکستگی‌ها از مزایای این روش است. به‌طور اساسی گام‌های زیر برای تحلیل المان محدود نیاز است. (۱) تقسیم‌بندی محیط پیوسته به تعدادی زیرمجموعه به نام المان محدود با اندازه، شکل و جهت‌داری دلخواه. (۲) فرض می‌شود که هر المان با المان‌های مجاور تنها در تعداد محدودی نقاط مجزا به نام گره، متصل هستند که بر روی مرز المان قرار می‌گیرند. (۳) جابه‌جایی‌ها در گره‌ها به‌عنوان مجهولات اساسی مسأله هستند، کل تعداد مؤلفه‌های جابه‌جایی گره‌ای را تعداد درجه آزادی مدل المان محدود می‌نامند. (۴) فرض می‌شود که بردار جابه‌جایی گره‌ای المان معلوم است. (۵) با فرض معلوم بودن بردار جابه‌جایی گره‌ای، جابه‌جایی داخلی در المان با استفاده از درون‌یابی (توابع شکل) به دست می‌آید. (۶) زمانی که جابه‌جایی در داخل المان معلوم شد، کرنش را می‌توان با استفاده از روابط جابه‌جایی کرنش به دست آورد. (۷) با استفاده از روابط تنش-کرنش نیز می‌توان تنش در المان را محاسبه کرد. (۸) اصل کار-مجازی به‌عنوان روشی جایگزین برای بیان معادلات تعادل برای رسیدن به معادلات اساسی المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. (۹) ماتریس سختی المان و بردار بار المان برای المان‌های مختلف برای رسیدن به سیستم معادلات جبری

خطی، به یکدیگر اضافه می‌شوند. کرنش و ماتریس جابه‌جایی کرنش محاسبه می‌شود، در نهایت مؤلفه-های تنش در داخل المان با استفاده از معادله تنش به دست می‌آید (خانی‌زاده بهابادی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۲-۴-۳ روش المان مرزی

برخلاف روش المان محدود و تفاضل محدود، این روش ابتدا به دنبال یک راه‌حل ضعیف در سطح کلی از طریق یک بیان انتگرالی است. مزیت اصلی روش المان مرزی کاهش ابعاد محاسباتی مدل، با تولید مش و آماده‌سازی داده‌های ورودی بسیار ساده‌تر در مقایسه با روش‌های تقسیم‌بندی تمام ناحیه همانند المان محدود و تفاضل محدود است. معرفی المان‌ها با استفاده از مراتب مختلف توابع شکل، به شیوه‌ای یکسان همانند المان محدود، قابلیت کاربرد المان مرزی را برای مسائل تحلیل تنش به‌شدت افزایش داد. هیچ‌کدام به‌اندازه المان محدود در مواجهه با ناهمگنی مواد کارایی نداشته و بیشتر برای حل مسائل شکست در اجسام الاستیک خطی و همگن مناسب است. روش المان مرزی را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی می‌کنند. در روش مستقیم، جابه‌جایی‌ها و کشش‌های موجود در معادلات دارای مفهوم فیزیکی واضحی بوده و مجهولات اساسی معادلات انتگرال مرزی هستند که به‌طور صریح بر روی مرز مسأله شرح داده‌شده و می‌توان به‌طور مستقیم با حل معادلات انتگرالی به دست آورد. در روش غیرمستقیم، مجهولات اساسی دارای مفهوم فیزیکی نبوده و تنها تراکم منبع موهومی مربوط به متغیرهای فیزیکی مانند جابه‌جایی و کشش است. مفهوم اساسی رویکرد غیرمستقیم، قرار دهی حوزه محدود موردنظر بر یک حوزه بی‌نهایت بزرگ به‌صورت فرضی (تمام یا نیم‌صفحه) برای استنتاج معادلات انتگرال مرزی مربوط به متغیرهای فیزیکی مربوط به تراکم منبع موهومی، مانند بار موهومی (تنش) یا جابه‌جایی ناپیوسته است (خانی‌زاده بهابادی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۲-۴-۴ روش المان مجزا

اساس نظریه این روش، حل معادلات حرکت اجسام صلب و یا تغییر شکل‌پذیر با استفاده از فرمولاسیون ضمنی است. این روش دارای کاربرد گسترده‌ای در برنامه‌های مکانیک سنگ، مکانیک خاک، تحلیل

سازه، مواد دانه‌ای، پردازش مواد و مکانیک سیالات است. مفهوم کلیدی المان مجزا این است که دامنه موردنظر به‌عنوان اجتماعی از بلوک‌ها، ذرات، اجسام صلب یا تغییر شکل‌پذیر تلقی شده و تماس بین آن‌ها بایستی تشخیص داده‌شده و به‌طور پیوسته در طی تمامی فرآیند تغییر شکل یا حرکت به‌روزرسانی گردد و توسط مدل ساختاری مناسب بیان شود برای فرموله کردن روش المان مجزا به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند دینامیکی در برنامه‌های مکانیک سنگ، مسائل زیر بایستی حل شود. (۱) تقسیم‌بندی فضا و شناسایی موقعیت بلوک‌ها، (۲) نمایش تغییر شکل بلوک (صلب یا تغییر شکل‌پذیر)، با استفاده از المان محدود، (۳) توسعه الگوریتمی برای تشخیص تماس یا ضرایب لاگرانژی افزوده، (۴) به دست آوردن معادلات ساختاری برای بلوک‌های سنگی و شکستگی‌ها، (۵) انتگرال‌گیری از معادلات حرکت بلوک‌ها، برای آنالیز بلوک صلب، طرح صریح پیشروی با زمان برای حل معادلات دینامیکی حرکت بلوک‌های صلب یا روش تفاضل محدود در حوزه زمانی استفاده می‌شود. برای بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر، راه‌حل برای تغییر شکل‌پذیری بلوک متفاوت است. یکی، راه‌حل صریح با تقسیم‌بندی حجم محدود فضای داخلی بلوک بدون نیاز به حل معادلات ماتریسی بزرگ‌مقیاس است. دیگری، راه‌حل ضمنی با تقسیم‌بندی فضای داخلی بلوک بوده که منجر به معادله ماتریسی بیانگر تغییر شکل‌پذیری سیستم‌های بلوکی که مشابه المان محدود است، می‌شود (خانی زاده بهابادی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳-۲ مروری بر مطالعات گذشته

مطالعات زیادی برای تحلیل پایداری مغارها با روش‌های مختلف انجام‌شده که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

مغار نیروگاه Kazunogawa در Tokyo

استفاده از روش ساخت مشاهده‌ای به همراه تحلیل برگشتی در این مغار نتایج زیر را در برداشته است. به‌عنوان یک ارزیابی مقدماتی، روش مناسبی برای تعیین ویژگی‌های تغییر شکل و تنش اولیه برای بررسی رفتار توده سنگ در حین حفر مغار است. تحلیل برگشتی باعث کشف دلایل رفتار تغییر شکل

ناپیوسته در مراحل اولیه حفر مغار شده است. حفر مغار بزرگ مقیاس در توده سنگ به شدت در زده دار و شرایط پیچیده زمین شناسی و تنش اولیه با این روش امکان پذیر شده است (Tezuka & Seoka, 2003).

مغار نیروگاه زیرزمینی Koyna در India

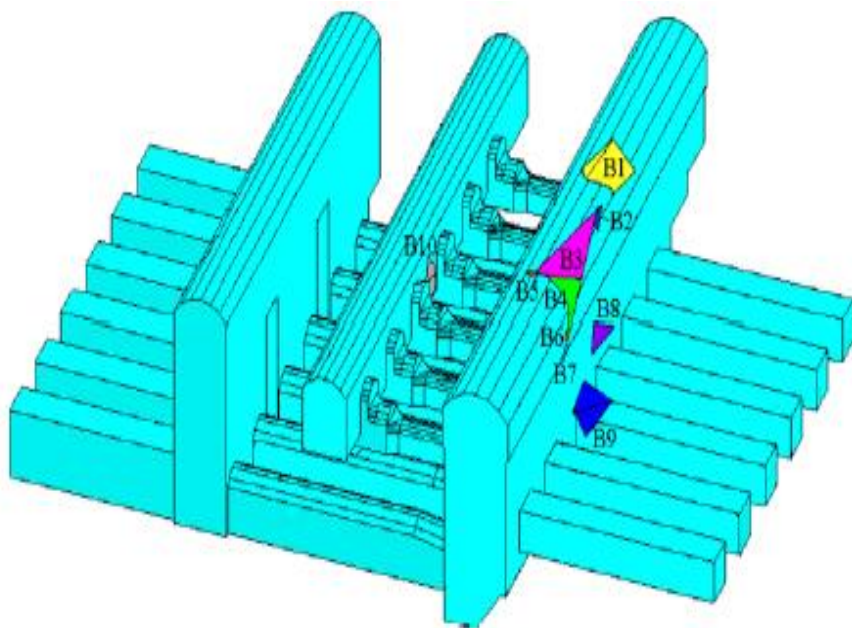
کارایی مطالعات رفتارسنجی برای تعیین تغییر شکل و توزیع تنش در اطراف مغار نیروگاه زیرزمینی Koyna در توده سنگ ناهمگن، با استفاده از روش المان محدود دوبعدی و سه بعدی بررسی شده است. رفتار توده سنگ به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده و اثر مناطق ضعیف و ایجاد مغارهای متعدد در توده سنگ لحاظ شده است. تأثیر ناحیه ضعیف در توده سنگ را می توان با اتخاذ مدول تغییر شکل واقعی و محل صحیح خود در مدل، به جای توجه به مقدار میانگین مدول تغییر شکل برای تمام توده سنگ بهتر درک کرد. چنین تحلیلی برای تعیین تنش در مراحل حفاری که در انتخاب شکل و اندازه حفاری مفید هستند و برای تقویت سنگ، در صورت نیاز مناسب می باشند. تغییر شکل پیش بینی شده در منطقه اطراف مغار، با تحلیل دوبعدی کمتر به دست آمده است اما در تحلیل سه بعدی با اندازه گیری های به دست آمده توسط کشیدگی سنج گمانه های چند نقطه ای تطابق قابل قبولی داشته است (Dhawan, et al., 2002, 2004).

مغار نیروگاه Xiaolangdi در China

تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیرزمینی Xiaolangdi واقع در لایه های ماسه سنگ با استفاده از روش المان محدود انجام شده است. دو مدل با شیب های لایه بندی متفاوت برای بررسی پایداری و جابه جایی توده سنگ اطراف باهم مقایسه شده اند. نتایج هر دو مدل تطابق مناسبی با یکدیگر داشتند. نتایج نشان داده که جابه جایی سنگ اطراف حساس به مقادیر چسبندگی و اصطکاک صفحات ضعیف نبوده، چرا که صفحات لایه بندی دارای زاویه شیب کم و ناپیوستگی ها با صفحات عمودی و نرخ اتصال کمتر از ۵۰٪ بود. این زاویه برای پایداری مغار سنگی مطلوب بوده و نتایج حاصل از روش عددی با اندازه گیری های میدانی شباهت داشته است (Xia et al., 2007).

مغار نیروگاه Ludila در China

از یک روش جدید برای تشخیص بلوک‌های ناپایدار با استفاده از مدل‌سازی المان محدود در بررسی پایداری مغار نیروگاه بزرگ زیرزمینی Ludila استفاده شده است. این روش جدید از مدل‌سازی المان محدود برای شناسایی بلوک‌ها استفاده می‌کند که متفاوت از الگوریتم‌های رایج برای شناسایی بلوک‌ها بر مبنای توپولوژی است. این روش می‌تواند بلوک‌ها را با توجه به لایه‌بندی مغارهای زیرزمینی تشخیص دهد و بلوک‌های محدب و مقعر را شناسایی کند. سیستم تشخیص بلوک به‌طور مستقیم در مدل‌سازی المان محدود تعریف شده است. نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های مشاهده‌شده از تحقیقات در محل مقایسه شده است و نشان می‌دهد که روش پیشنهادی شناسایی بلوک قابل‌اعتماد است. شکل (۱-۲) نمای بالای بلوک‌های ناپایدار را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2010).



شکل (۱-۲): نمای بالای بلوک‌های ناپایدار (Zhang et al., 2010)

مغار نیروگاه Kazunogawa در Tokyo

در مغار نیروگاه Kazunogawa از GSI^1 برای کمی کردن عدم قطعیت‌ها در طراحی و سیستم نگهداری موردنیاز توده سنگ استفاده شده است. این روش بر مبنای ارتباط بین زمین‌شناسی توصیفی و متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری مانند فاصله‌داری درزه و زبری ساخته شده است. با استفاده از مقادیر GSI به‌دست‌آمده متغیرهای مقاومت موهر - کلمب و مدول تغییر شکل‌پذیری محاسبه شده است. با روش مونت‌کارلو در المان محدود تحلیل تنش‌ها با روش برآورد نقطه انجام شده است. بر اساس توزیع به‌دست‌آمده از ویژگی‌های توده سنگ میزان جابه‌جایی‌ها و ناحیه تسلیم به‌دست‌آمده است. نتایج نشان داده که میزان نگهداری برای ناحیه تسلیم در دیواره‌ها بسیار کم است (Cai, 2011).

مغار نیروگاه Shuangjiangkou در China

پایداری مغارهای نیروگاه برق‌آبی Shuangjiangkou تحت شرایط تنش بالا و بر اساس مدل‌سازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمون‌های مدل فیزیکی به‌عنوان یک روش قدرتمند برای یافتن اثر رفتار غیرخطی مواد، جریان شکل‌پذیر و شکست پوسته‌ای در سازه‌های ساخته شده در سنگ‌های ناپیوسته پیشنهاد می‌شود. برای شرایط تنش افقی بالا آزمایش‌های مدل نشان داده که تحت نسبت تنش به مقاومت کمتر از $1/5$ شکست محدود است. وقتی نسبت تنش به مقاومت بیش از $1/5$ شود تغییر شکل مدل افزایش می‌یابد و شکست با پوسته‌شدن شروع شده است. تلاش برای تطابق رفتار مشاهده شده با مدل‌های عددی پیوسته شامل شکست شکل‌پذیر و جریان تنها در سطوح متوسط بیش از تنش موفقیت‌آمیز بوده است. وقتی تنش‌ها باعث پوسته‌شدن می‌شوند مدل‌های پیوسته حالت و میزان شکست را به‌طور مناسب ارائه نداده است. مدل‌های تحلیلی ساده منطبق با شکست پوسته‌ای می‌تواند در عمق و وسعت شکست نزدیک حفره مناسب باشد (Zhu et al., 2011).

¹Geological Strength Index

مغارهای نیروگاه Laxiwa

با استفاده از روش هوشمند ترتیب مراحل حفر مغارهای هیدرولیکی زیرزمینی بزرگ را در حالت استاتیکی و دینامیکی موردبررسی قرار داده‌اند. روش‌های هوشمند، ازجمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به‌طور گسترده‌ای در حوزه‌های بسیاری برای بهینه‌سازی و کنترل استفاده‌شده است و نتایج مطلوبی در بهبود بهره‌وری و کیفیت تولید نشان می‌دهد. از آنجا که طراحی پایداری مغار زیرزمینی هیدرولیک یک کار پیچیده و سخت است، روش‌های هوشمندانه را می‌توان برای حل مسأله طراحی پایداری مطلوب معرفی کرد. هدف اصلی این روش برای کمک به طراحان برای بهبود پایداری و بهره‌گیری از مغارهای زیرزمینی بزرگ برق‌آبی است. این روش شامل دو بخش است، یک طراحی اولیه قبل از حفر مغار و دیگر طراحی دینامیکی در حین حفر مغار است. نتایج نشان داده این روش مناسب برای بهبود پایداری و ساخت مغار است (Jiang & Feng, 2011).

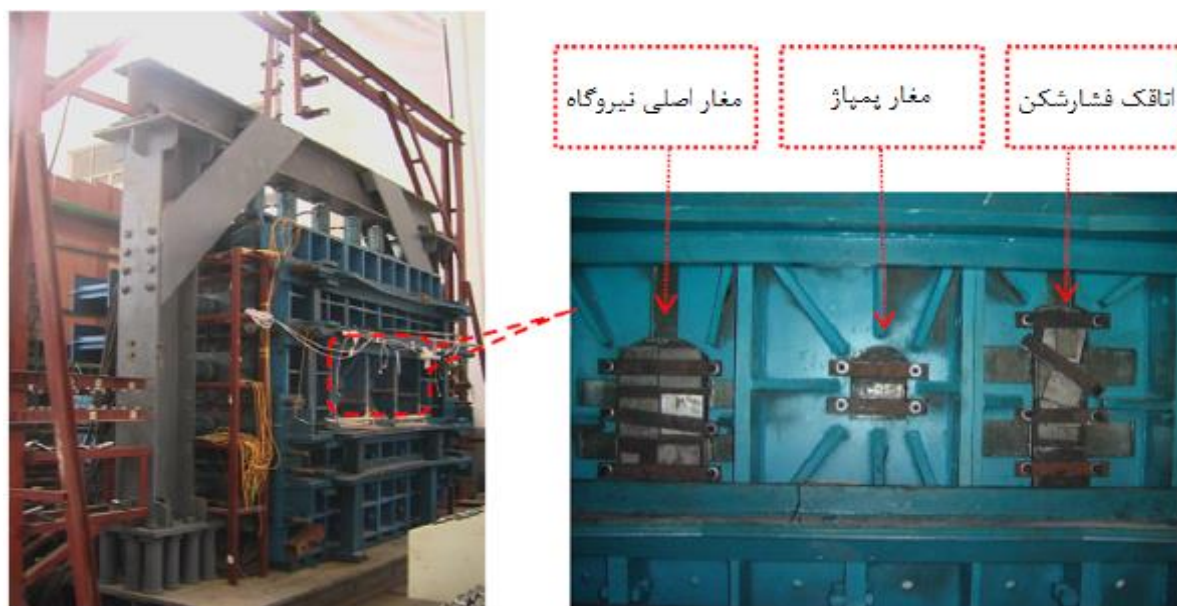
مغار نیروگاه سیاه‌بیشه

با استفاده از تحلیل برگشتی عددی مبتنی بر جابه‌جایی‌ها متغیرهای توده سنگ در مغار نیروگاه سیاه‌بیشه با استفاده از مدل‌سازی عددی پیوسته و ناپیوسته برآورد شده است. خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌ها، نسبت تنش و ویژگی‌های درزه‌ها مشخص‌شده و متغیرهای محاسبه‌شده با متغیرهای طراحی اولیه مقایسه شده است. نتایج هر دو مدل‌سازی پیوسته و ناپیوسته تطابق مناسبی با جابه‌جایی اندازه‌گیری شده داشته‌اند که نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی عددی و نتایج تحلیل برگشتی است (Yazdani et al., 2012).

مغار نیروگاه Shuangjiangkou در China

پایداری یک گروه مغار زیرزمینی بر اساس آزمایش بزرگ‌مقیاس مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. روش‌های اندازه‌گیری متعدد برای بررسی همگرایی تغییر شکل در مغار، جابه‌جایی نقاط کلیدی در دیوارهای جانبی و الگوی آسیب در طول فرآیند شبیه‌سازی حفاری استفاده‌شده

است. روش گره مبتنی بر تحلیل تغییر شکل ناپیوسته^۱ (NDDA) برای شبیه‌سازی کل فرآیند از آزمون مدل فیزیکی و مقایسه با نتایج تجربی اعمال شده است. نتایج نشان داده که استفاده از روش‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی در توده سنگ برای مغارهای بزرگ مقیاس تحت تنش سه‌بعدی نتایج رضایت‌بخش به دست آورده است. شکل (۲-۲) ساختار قاب فولادی مدل را نشان می‌دهد (Zhang & Zhu, 2016).

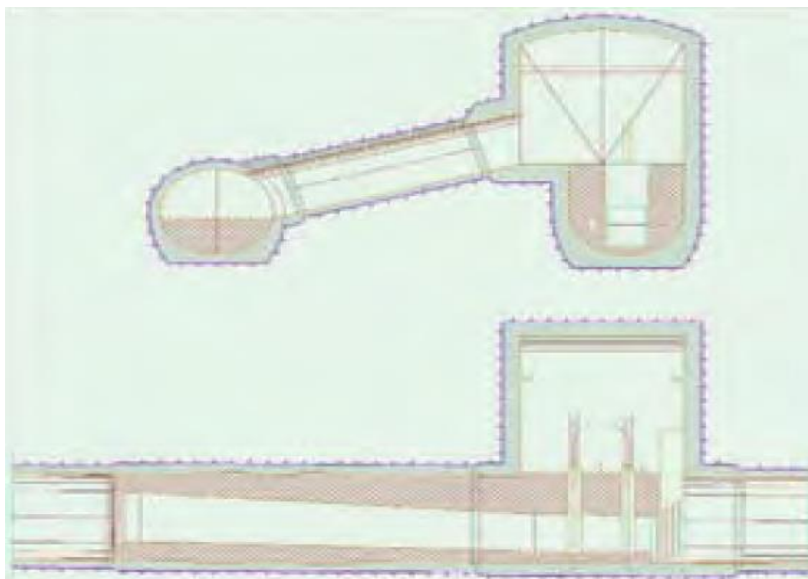


شکل (۲-۲): ساختار قاب فولادی برای آزمایش مدل (Zhang & Zhu, 2016)

اتاقک شیرهای کنترل تونل‌های انحراف آب سد سردشت

سیستم نگهداری اتاقک شیرهای کنترل تونل‌های انحراف آب ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی تعیین شده، سپس با استفاده از نرم‌افزار اجزای مجزای سه‌بعدی (3DEC) تحلیل پایداری سازه صورت گرفته و میزان سیستم نگهداری مقایسه شده است. نتایج مدل‌سازی با استفاده از 3DEC با توجه به جابه‌جایی بلوک‌ها و تنش‌های القایی به نگهداری بیشتری از نگهداری پیشنهاد شده توسط روش‌های تجربی برای تأمین ضریب ایمنی و پایداری سازه نیاز است. شکل (۳-۲) مقطع طولی و عرضی اتاقک کنترل را نشان می‌دهد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۰).

^۱ Nodal-based Discontinuous Deformation Analysis



شکل (۳-۲): مقطع طولی و عرضی اتاقک کنترل تونل‌های انحراف (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۰)

مغار توسعه نیروگاه سد مسجدسلیمان

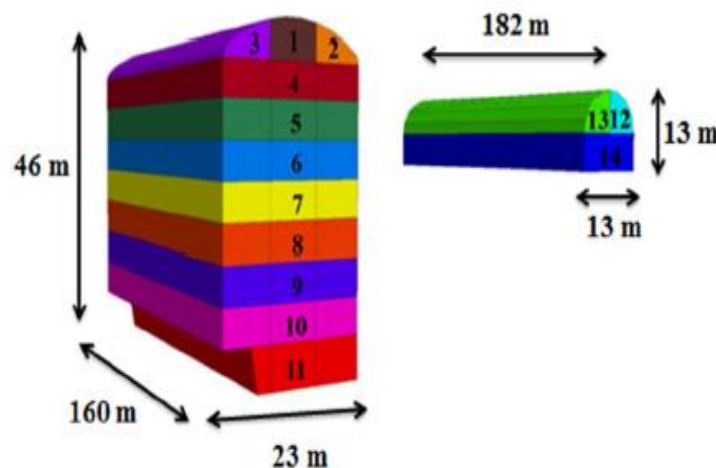
روش‌های عددی مختلف در تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیرزمینی مسجدسلیمان مقایسه شده و از نرم‌افزارهای مربوط به محیط پیوسته و ناپیوسته بهره گرفته شده است. مغارهای نیروگاه با اعمال یک سیستم نگهداری در روش‌های مختلف عددی مدل‌سازی شده و در نهایت با نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که مدل ساخته شده با UDEC در مقایسه با PHASE2 و FLAC به شرایط واقعی زمین در این مطالعه نزدیک‌تر است (موسی زاده و همکاران، ۱۳۹۲).

مغار زیرزمینی نیروگاه تنگ معشوره

تحلیل پایداری و ارائه روش باز کردن مغار زیرزمینی نیروگاه تنگ معشوره با استفاده از روش‌های تجربی RMR و Q و روش تفاضل محدود FLAC3D انجام شده است. با مقایسه کردن سیستم نگهداری پیشنهاد شده از سوی روش‌های تجربی و عددی چنین استدلال می‌شود که روش تجربی نگهداری سنگین‌تری را لحاظ کرده ولی تحلیل سه‌بعدی به دلیل انعطاف‌پذیری در انواع حفر توانسته نگهداری را بهینه کند (دریایی و همکاران، ۱۳۹۳).

مغار نیروگاه سد بختیاری

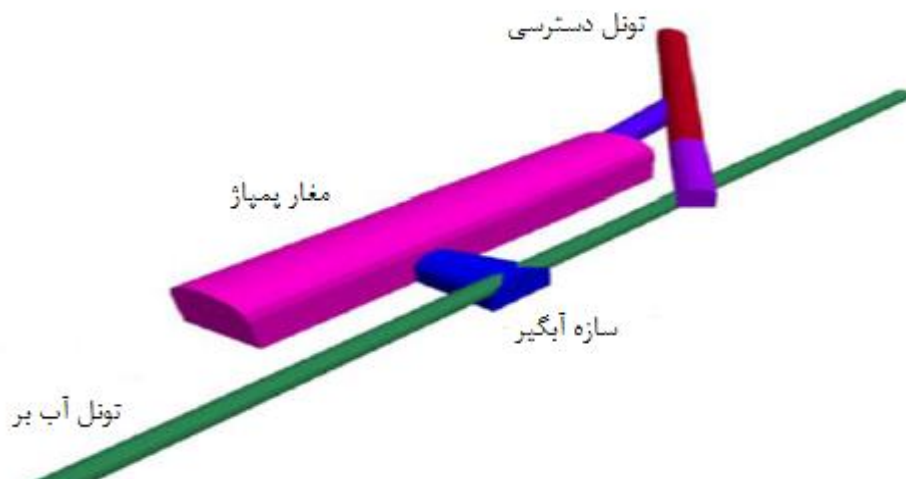
تحلیل پایداری مغارهای نیروگاه سد بختیاری با استفاده از نرم افزار 3DEC انجام شده است. با استفاده از روش عددی المان مجزا و روابط تحلیلی فاصله مناسب بین مغارها و با در نظر گرفتن شرایط تنش و تشکیل گوه‌های لغزش جهت مناسب برای حفر مغار را انتخاب شده است. در انتها به کمک مدل سازی عددی و تعیین ناحیه شکل پذیر، شیب لایه بندی ها و مقدار مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، سیستم نگهداری پیشنهاد شده برای مغارها تاندون ها و پیچ سنگ ها با فاصله داری 2×2 متر انتخاب شده است. شکل (۲-۴) ترتیب و تعداد مراحل حفاری را نشان می دهد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل (۲-۴): ترتیب و تعداد مراحل حفاری پیشنهادی مغارها (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۳)

مغار پمپاژ تونل انتقال آب گلاب

پایداری مغار پمپاژ گلاب با استفاده از مدل سازی عددی سه بعدی (3DEC) تحلیل شده است. با توجه به ناپیوسته بودن محیط، از نرم افزار المان مجزای سه بعدی جهت بررسی بارهای وارد بر نگهداری دائم مغار استفاده شده است. نتایج نشان داده که بتن پاشیده ی مسلح می تواند به عنوان نگهدارنده دائم مورد استفاده قرار گیرد به طوری که در نتیجه انجام این روش مشکلات قالب بندی و بتن ریزی پوشش نهایی از فرایند اجرایی حذف شده و منجر به کاهش هزینه در اجرای پوشش نهایی مغار شده است. شکل (۲-۵) موقعیت قرارگیری حفاری ها اطراف مغار را نشان می دهد (اسلامی و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل (۵-۲): موقعیت قرارگیری حفاری‌ها اطراف مغار (اسلامی و همکاران، ۱۳۹۴)

مغار طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان

اثر آب بر پایداری فضای زیرزمینی و عملکرد سیستم نگهداری را در مغار طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان با استفاده از UDEC بررسی کردند. با استفاده از روش عددی المان مجزا تأثیر متغیرهای مقاومتی بر روی پایداری فضاها را زیرزمینی و همچنین تأثیر ورود آب به محیط، بر چهار متغیر مورد بررسی قرار گرفته است؛ که عبارت‌اند از: تغییر در میزان جابه‌جایی‌ها در اطراف فضا در حضور آب، زمان نصب سیستم نگهداری، بررسی عملکرد المان بتن پاشیده و پیچ‌سنگ در حضور آب. مدل‌ها در نرم‌افزار در دو حالت خشک و اشباع اجرا شده، در ابتدا بدون نگهداری و در ادامه با نصب سیستم نگهداری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده که کاهش متغیرهای مقاومتی درزه‌ها تا یک مقدار خاص می‌تواند بر روی پایداری در اثر ورود آب تأثیرگذار باشد (نجمی و همکاران، ۱۳۹۴).

۴-۲ جمع‌بندی

روش‌های مختلفی برای تحلیل پایداری فضاها را زیرزمینی وجود دارد. انواع روش‌های تحلیل پایداری عبارت است از: روش‌های تجربی، مشاهده‌ای، تحلیلی و عددی. هر کدام از این روش‌ها محدودیت‌ها و مزایای خاص خود را دارند و در شرایط مختلف می‌توان از آن‌ها بهره گرفت. از ویژگی‌های روش‌های تجربی این است که به سنگ‌ها امتیاز می‌دهند و در آخر یک عدد معرف وضعیت توده سنگ است. این

روش‌ها بر اساس تعداد محدودی متغیر وضعیت توده سنگ را توصیف می‌کنند و به‌عنوان پیش تخمین برای سیستم نگهداری اولیه مفید هستند. روش‌های مشاهده‌ای بر اساس تفسیر داده‌های رفتار سنجی و پایش زمین در حین و یا بعد از حفر است و نگاهی به نگهداری موقت در این روش‌ها وجود دارد. روش‌های تحلیلی بر اساس ایجاد روابط ریاضی منطبق بر ویژگی‌های سازه است که همواره با ساده‌سازی همراه است. از مزایای روش‌های عددی انعطاف‌پذیری بالا، سرعت و دقت انجام فرایند است.

فصل سوم

معرفی ساختگاه و انتخاب روش

عددی

۳-۱ مقدمه

در این فصل ضمن معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی ساختگاه سد، متغیرهای توده سنگ دربرگیرنده مغار برآورد شده و روش مناسب برای تحلیل پایداری مغار انتخاب شده است.

۳-۲ زمین‌شناسی عمومی

سد چم شیر در حدود ۲۹ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان گچساران (دو گنبدان) در استان کهگیلویه و بویراحمد، قبل از پیوستن رودخانه خیرآباد به رودخانه زهره در مجاورت محلی به نام تنگه چم شیر نزدیک به مرز استان بوشهر در دست ساخت است. شکل (۳-۱) موقعیت کلی طرح سد و نیروگاه چم شیر را نشان می‌دهد. شکل (۳-۲) راه‌های دسترسی به ساختگاه سد و نیروگاه چم شیر را نشان می‌دهد (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۱).

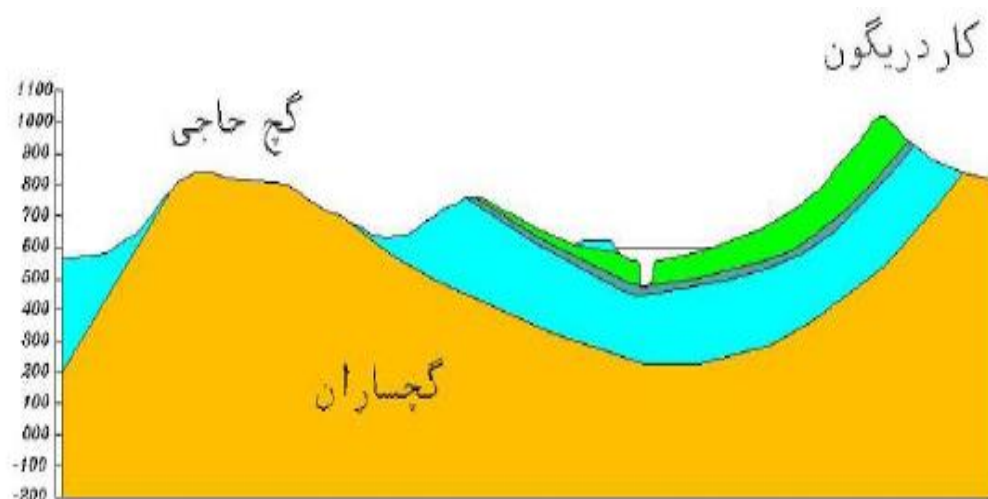
در زیر نهشته‌های کواترنری محدوده مورد مطالعه، علاوه بر سنگ مارن و سنگ‌آهک‌های سازند میشان، واحدهای گچی (ژیپس و انیدریت) و مارنی سازند گچساران و مارن و ماسه‌سنگ‌های سازند آغاچاری قرار دارند. ریخت‌شناسی این محدوده متأثر از ساختار منطقه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و همچنین عملکرد پدیده‌های ژئودینامیک از جمله فرسایش و هوازدگی است. ارتفاعات مهم در این محدوده، شامل ارتفاعات کاردریگون در سمت تکیه‌گاه راست و ارتفاعات گچ حاجی در سمت تکیه‌گاه چپ است. ارتفاعات کاردریگون از سنگ‌آهک‌های سازند میشان تشکیل شده که در یال شمال شرق ناودیس چم شیر و در اثر چین‌خوردگی شکل گرفته است. شکل (۳-۳) نمایی از ناودیس چم شیر و شکل دره در موقعیت ساختگاه سد را نشان می‌دهد. ساختارهای زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها، ناپیوستگی‌ها، چین‌خوردگی‌ها و ناحیه‌های خردشده در تعیین رفتار زمین و پایداری سازه‌های بزرگ مهندسی نقشی انکارناپذیر دارند. باید پذیرفت که ساختارهای زمین‌شناسی به همراه ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ‌ها، تعیین‌کننده رفتار زمین و از مؤلفه‌های اصلی پایداری چنین سازه‌هایی به شمار می‌روند (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۱).



شکل (۳-۱): موقعیت کلی طرح سد و نیروگاه چم شیر (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۱)



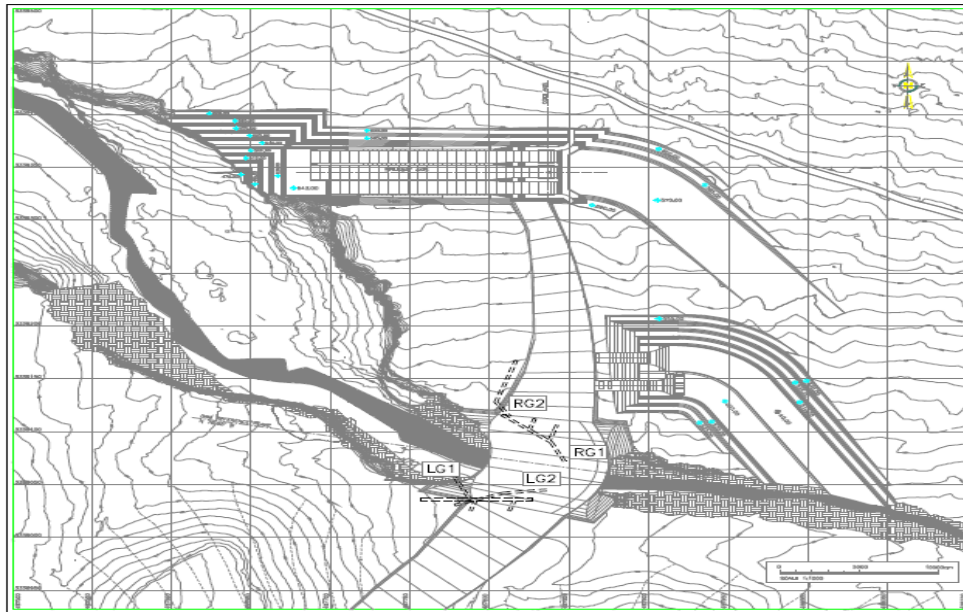
شکل (۳-۲): راه‌های دسترسی به سد و نیروگاه چم شیر (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۱)



شکل (۳-۳): نمایی از ناودیس چم شیر و شکل دره (گزارش زمین‌شناسی مهندسی، ۱۳۹۱)

با توجه به جانمایی ارائه شده برای بدنه سد و سازه‌های وابسته و همچنین مشخص شدن موقعیت نیروگاه، به‌منظور ارزیابی کیفیت توده سنگ‌های پی و همچنین بررسی آب‌بندی مخزن سد علاوه بر برداشت‌های صحرایی، ۱۷ حلقه گمانه اکتشافی در مجموع به طول ۲۳۶۸/۵ متر در محدوده سد و سازه‌های جانبی، نیروگاه و مخزن باهدف بررسی زمین‌شناسی مهندسی زیرسطحی، تعیین متغیرهای ژئومکانیکی و هیدرولوژیکی واحدهای سنگی ساختگاه سد و ۴ گالری اکتشافی به طول ۳۱۹/۵ متر جهت شناخت بهتر ساختگاه و انجام آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ در تکیه‌گاه‌ها حفاری گردید. شکل (۴-۳) محل قرارگیری گالری‌های اکتشافی در ساختگاه چم شیر را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های صحرایی و کاوش‌های زیرسطحی، توده سنگ‌های تشکیل‌دهنده ساختگاه سد چم شیر از نظر سنگ چینه‌شناسی، تنها از واحدهای سنگ‌آهک و سنگ مارن متعلق به سازند میشان تشکیل شده است. از نظر زمین‌شناسی مهندسی، سازند میشان در محدوده ساختگاه از قدیم به جدید، به ۴ ناحیه مجزا قابل تفکیک است. سنگ‌شناسی این ناحیه‌ها از سنگ مارن و مارن‌های آهکی خاکستری تا سیاه‌رنگ واحد میشان زیرین با میان لایه‌های نازک آهکی، تناوب سنگ‌آهک و سنگ مارن‌های متوسط لایه، ناحیه انتقال همراه با سیلت‌های مارنی، سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه با میان لایه‌های نازک مارنی، واحد میشان میانی و سنگ مارن با میان لایه‌های آهکی واحد میشان بالایی

تشکیل شده است. شکل (۵-۳) واحد میشان میانی و ناحیه انتقال در تکیه گاه راست را نشان می دهد
(گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۱).



شکل (۴-۳): موقعیت گالری های اکتشافی سد چم شیر (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۱)



شکل (۵-۳): واحد میشان میانی و ناحیه انتقال در سد (گزارش زمین شناسی مهندسی، ۱۳۹۱)

۳-۲-۱ ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های تشکیل‌دهنده مغار

عملیات اکتشافی انجام‌شده در مطالعات مرحله دوم طرح سد و نیروگاه چم شیر شامل حفر گمانه‌ها و تونل‌های اکتشافی، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی شامل بارگذاری صفحه‌ای جهت تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ و آزمایش‌های برش مستقیم برجا به‌منظور تعیین متغیرهای مقاومت برشی توده سنگ است. متغیرهای موردنیاز برای تحلیل مغار دریچه‌های کنترل با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور، مقاومت فشاری نا محصور و مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزلی) و متغیرهای مقاومت برشی سنگ بکر بر اساس معیار موهر-کلمب در نظر گرفته‌شده، محاسبه و در جدول (۳-۱) آمده است (گزارش مکانیک سنگ، ۱۳۹۲).

جدول (۳-۱): ویژگی‌های سنگ بکر تشکیل‌دهنده مغار (گزارش مکانیک سنگ، ۱۳۹۲)

متغیر	واحد	ناحیه انتقال
مدول الاستیک	گیگا پاسکال	۱۴
نسبت پواسون	-	۰/۲۹
چسبندگی	مگا پاسکال	۷/۶
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۴۲
مقاومت کششی	مگا پاسکال	۶/۴۱
مقاومت فشاری	مگا پاسکال	۶۰/۵۷
چگالی	کیلوگرم بر مترمکعب	۲۵۶۰

۳-۲-۲ وضعیت ناپیوستگی‌های توده سنگ

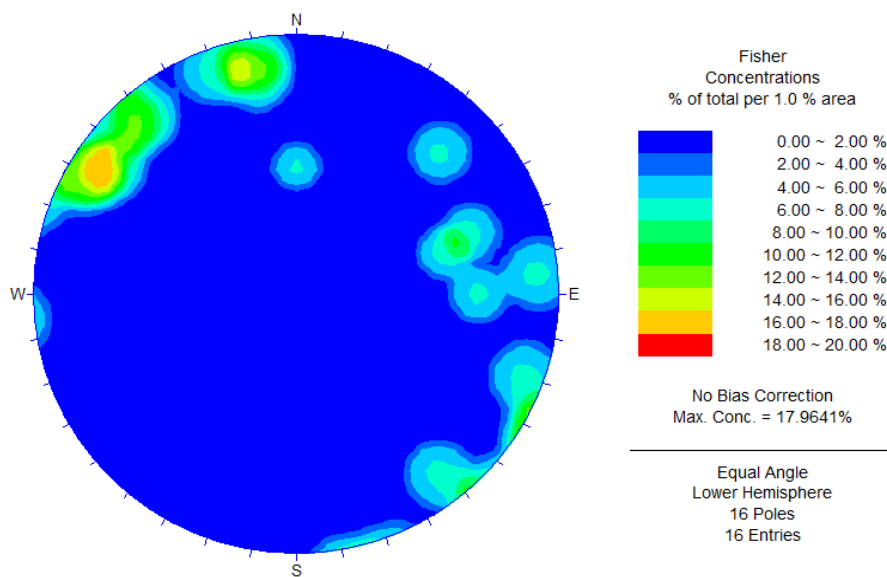
به‌منظور بررسی وضعیت پایداری فضاهای زیرزمینی، برداشت درزه در موقعیت‌های مختلف ساختگاه انجام گردید. با بررسی داده‌های زمین‌شناسی مغار دریچه‌ها با استفاده از نرم‌افزار DIPS سه دسته‌درزه تشخیص داده‌شده که در جدول (۳-۲) شیب، جهت شیب و میانگین فاصله‌داری آن‌ها مشخص است. شکل (۳-۶) پراکندگی درزه‌ها را نشان می‌دهد. متغیرهای مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی‌ها توسط آزمایش‌های برشی مستقیم برجا و آزمایشگاهی تعیین‌شده و در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول (۲-۳): خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در اطراف مغار دریچه‌های کنترل

ناپیوستگی	شیب / جهت شیب (درجه)	میانگین فاصله‌داری (متر)
دسته‌درزه ۱	۱۶۷/۸۳	۳
دسته‌درزه ۲	۱۳۰/۸۶	۳
دسته‌درزه ۳	۲۶۰/۷۱	۲

جدول (۳-۳): پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها (گزارش مکانیک سنگ، ۱۳۹۲)

نوع	چسبندگی	زاویه اصطکاک	سختی نرمال	سختی برشی
ناپیوستگی	(کیلو پاسکال)	داخلی (درجه)	(گیگا پاسکال / متر)	(گیگا پاسکال / متر)
درزه	۷۰	۳۰	۷	۳



شکل (۳-۶): درزه‌های موجود در ساختمان مغار دریچه‌های کنترل

۳-۳ انتخاب روش عددی

پایداری سازه‌های زیرزمینی وابسته به رفتار توده سنگ اطراف آن است. رفتارهای مختلف نیازمند روش‌های متفاوت ارزیابی و یا محاسبات برای طراحی مناسب است.

هر شکستی می‌تواند با روش پیوسته یا ناپیوسته ارزیابی شود. انتخاب روش پیوسته یا گسسته به بسیاری از عوامل در مسأله خاص بستگی دارد، اما اغلب به مقیاس مسأله و وضعیت هندسی ناپیوستگی‌ها مرتبط است. روش پیوسته باید برای توده سنگ‌هایی که بدون شکستگی هستند یا شکستگی بسیار دارند؛ استفاده شود. رفتار دوم از طریق خواص معادل ایجادشده توسط یک فرایند همگن‌سازی است. روش پیوسته همچنین می‌تواند در حالتی که چند شکستگی حضور دارند که بدون بازشدگی هستند و جدا شدن کامل بلوک‌ها امکان‌پذیر نیست استفاده شود. روش گسسته مناسب برای توده سنگ شکسته است که در آن شکستگی کمتر از شرایط محیط شبه پیوسته با خواص معادل است، یا امکان جابه‌جایی بلوک‌های مجزا در مقیاس بزرگ وجود دارد (Jing, 2003). مقدار شاخص کیفیت توده سنگ برای محدوده مغار، ۵/۳ به دست آمده است؛ طبق نظر بارتن اگر Q بین ۰/۱ تا ۱۰۰ باشد می‌توان از روش گسسته استفاده کرد (Barton, 1998).

یکی دیگر از معیارهای مهمی که در این مورد وجود دارد فاکتور پیوستگی است. این فاکتور $^{1}(CF)$ به صورت نسبت قطر تونل (D_t) به قطر بلوک‌ها (D_b) تعریف می‌شود که نشان دهنده‌ی تعداد بلوک‌های موجود در سقف یا دیواره تونل است که از رابطه (۱-۳) برآورد می‌شود.

$$CF = D_t / D_b \quad (1-3)$$

بر اساس فاکتور پیوستگی، تقسیم‌بندی زیر برای تعیین مرز محیط پیوسته و ناپیوسته ارائه شده است:

پیوسته (سالم): تعداد درزه کم یا فاصله‌داری زیاد، $CF < 6$.

ناپیوسته (بلوکی): توده سنگ با درزه‌داری کم تا زیاد، $CF = 3-30$.

پیوسته (معادل): قطعات سنگی و ذرات ریز، توده سنگ درزه‌دار به شدت خردشده، $CF > 15$.

پیوسته (سالم) - ناپیوسته (بلوکی) $CF = 3-6$.

ناپیوسته (بلوکی) - پیوسته (معادل) $CF = 15-30$ (Stille & Palmström, 2008).

¹ Continuity factor

با توجه به مطالب اشاره شده، هندسه ناپیوستگی‌ها و فاکتور پیوستگی که در محدوده‌ی ۳-۶ قرار گرفته، توده سنگ ناپیوسته در نظر گرفته شده و روش عددی المان مجزا به عنوان مناسب ترین روش انتخاب شد. در مورد دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل، با توجه به اینکه توزیع میدان تنش و جابه جایی حالت سه بعدی دارد. بنابراین برای بررسی دقیق تر میدان تنش و تغییر شکل تحلیل سه بعدی کارآیی بیشتری دارد و نتایج نزدیک به واقعیت ارائه می کند. با توجه به هندسه و ابعاد مغار و برقرار نبودن کرنش صفحه‌ای در این تحلیل از مدل سه بعدی استفاده شده است.

۳-۴ سازوکار نرم افزار 3DEC

3DEC نرم افزاری بر مبنای روش المان مجزا است. این نرم افزار بر اساس یک طرح محاسباتی لاگرانژی است که برای مدل کردن حرکت‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ در یک سیستم بلوکی بسیار مناسب است. در این نرم افزار ابتدا هندسه مدل تعریف شده و مدل رفتاری بلوک سنگ و ناپیوستگی‌ها تعیین می شوند. شرایط مرزی و آغازین حالت برجای مسأله را تعریف می کند. بعد از این که این شرایط تعریف شد مدل به تعادل اولیه می رسد و پاسخ مجموعه بررسی می شود. سپس تغییرات مورد نیاز مانند حفر ماده یا تغییر در شرایط مرزی اعمال شده و پس از تعادل مدل نتایج تفسیر می شوند.

۳-۵ جمع بندی

در این فصل زمین شناسی عمومی، ویژگی های سنگ های تشکیل دهنده ساختگاه و وضعیت ناپیوستگی ها بررسی شد. مغار در تکیه گاه راست و از نظر زمین شناسی در ناحیه انتقال (گذار از میشان میانی به میشان زیرین) قرار گرفته است. سه دسته درزه در محدوده ی مغار تشخیص داده شد. با توجه به شرایط زمین شناسی مغار، ناپیوستگی های موجود، شاخص کیفیت توده سنگ و فاکتور پیوستگی، روش عددی المان مجزا برای مدل سازی انتخاب شد.

فصل چهارم

مدل سازی مغار دریچه های

کنترل

۴-۱ مقدمه

در فصل سوم نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مطالعات میدانی انجام‌شده به‌صورت مختصر ارائه شد؛ همچنین متغیرهای موردنیاز مدل‌سازی نیز تعیین‌شده است. در این فصل به مدل‌سازی مغار دریچه‌های کنترل پرداخته و نتایج حاصل از مدل‌سازی بررسی شده است.

۴-۲ مدل‌سازی مغار با نرم‌افزار 3DEC

۴-۲-۱ تعریف هندسه مدل

اولین قدم در مدل‌سازی انتخاب هندسه مسأله است که باید در برگیرنده محدوده مورد مطالعه و عوامل هندسی تأثیرگذار در رفتار محیط باشد. باید به اندازه‌ای گسترده باشد تا ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی را پوشش دهد و مرزهای مدل خارج از محدوده تأثیر فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد. به منظور عدم تمرکز تنش در مرزها و عدم تأثیر مرزها بر نتایج، بلوکی به عرض ۱۰۰ متر، طول ۴۰ متر و ارتفاع ۱۲۰ متر برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مغار دریچه‌ها به عرض ۱۵ متر، طول ۲۳ متر و ارتفاع ۳۷ متر در این بلوک مشخص شد. فاصله مرزهای خارجی با صحیح و خطا، طوری در نظر گرفته شد که آشفته‌گی تنش در مرزها وجود نداشته باشد.

۴-۲-۲ تخصیص مدل رفتاری سنگ و ناپیوستگی

مدل رفتاری باید بر اساس ویژگی‌ها و خواصی از مواد در برگیرنده سازه مورد نظر باشد که در دسترس است و شامل هدف تحلیل باشد. در حفريات متداول استفاده از مدل رفتاری موهر-کلمب جواب‌های مناسبی را ارائه می‌کند. بنابراین مدل رفتاری موهر-کلمب برای ماده سنگ و مدل لغزش کلمب برای درزه‌ها در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۳ اعمال شرایط مرزی و آغازین

در تحلیل‌های عددی بخش کوچکی از زمین شامل محدوده مورد مطالعه و تغییرات حین اجرا در آن محدوده در نظر گرفته می‌شود. به منظور شبیه‌سازی محیط بی‌نهایت باید در مرزهای مدل شرایطی را فراهم کرد که نزدیک‌ترین حالت را با واقعیت مسأله داشته باشد. کف مدل ثابت، مرزهای جانبی به

صورت غلتکی و در مرز فوقانی معادل سربار مدل نشده تنش اعمال شده است. یکی دیگر از ورودی‌های مهم در این بخش تنش برجا که شامل گرانش و تنش ثقلی است. با توجه به ماهیت لایه‌ای ساختگاه سد چم شیر و همچنین نزدیکی مغار به سطح زمین انتظار می‌رود که تنش‌های افقی مقداری برابر یا بزرگ‌تر از تنش‌های قائم داشته باشند، از این‌رو نسبت تنش‌ها برابر با ۱ فرض شده است.

۴-۲-۴ ایجاد تعادل اولیه در مدل

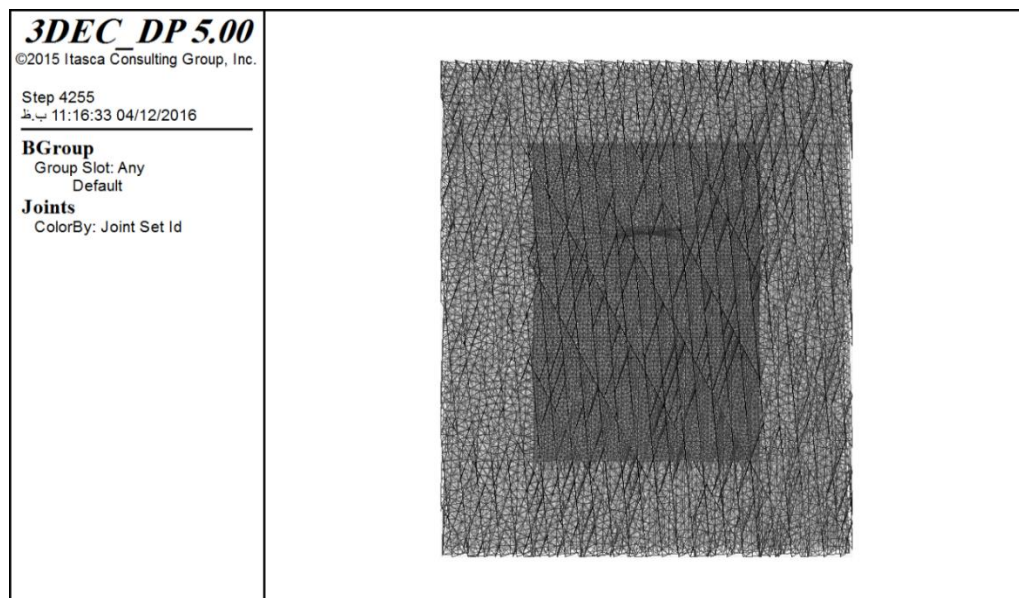
در اولین مرحله مدل با فرض حالت الاستیک و بدون در نظر گرفتن درزه‌ها به تعادل رسانده شد. در مرحله بعد با تغییر خواص ماده به شکل‌پذیر، مغار به صورت تک‌مرحله‌ای حفر و دوباره به تعادل رسانده شده است. در مرحله سوم مدل با وارد کردن ناپیوستگی‌ها، با فرض رفتار شکل‌پذیر خطی موهر-کلمب برای بلوک و رفتار لغزش کلمب برای درزه‌ها به تعادل رسانده شده است. در این مرحله با کاهش نسبت بیش‌ترین نیروهای نامتعادل به مقدار متوسط گره‌ای وارد بر تمام گره‌های شبکه به مقداری کمتر از ^۵-۱۰٪ مدل به تعادل رسیده است.

نیروی نامتعادل نشان‌دهنده زمان رسیدن به حالت تعادل مکانیکی (یا آغاز لغزش درزه، یا جریان پلاستیک) برای یک تحلیل استاتیک است. یک مدل در تعادل کامل است اگر بردار نیروی گره‌ای در مرکز هر بلوک یا نقطه-شبکه صفر باشد. زمانی گفته می‌شود مدل در تعادل است که حداکثر نیروی نامتعادل در مقایسه با نیروهای معرف در مسأله، کوچک باشد. اگر نیروی نامتعادل به مقداری ثابت و غیر صفر نزدیک شود، نشان‌دهنده آن است که لغزش درزه یا شکست بلوک و جریان پلاستیک در حال وقوع است (Itasca, 2015).

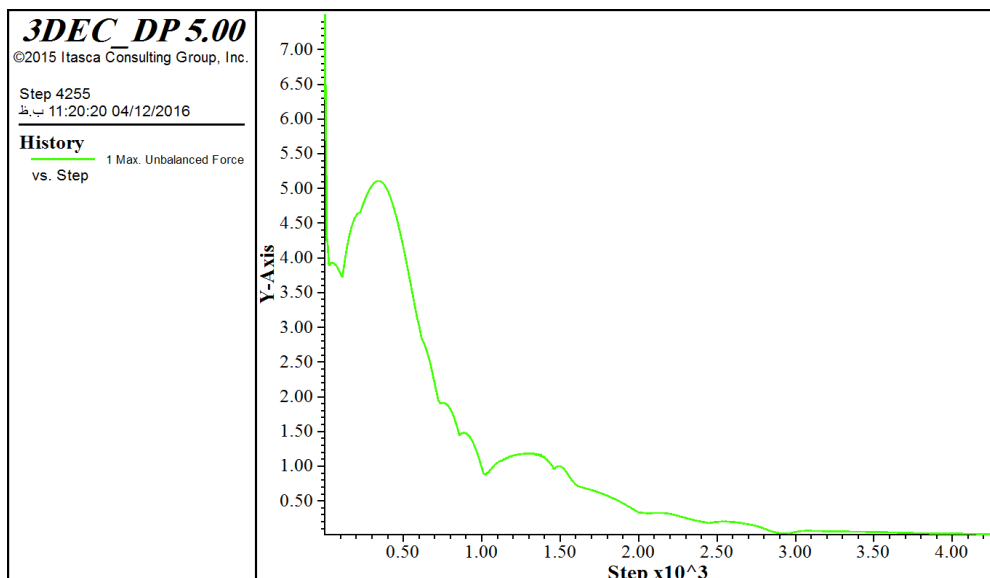
در هنگام مراحل محاسبه، بیش‌ترین نیروی نامتعادل برای تمام شبکه تعریف می‌شود که مقدار آن برای تخمین وضعیت بسیار مهم است. نسبت بیش‌ترین نیروی نامتعادل به معرف نیروی درونی با درصد بیان شده و هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد. مقدار کوچک این نسبت نشان می‌دهد که نیروها در تمام گره‌های شبکه در تعادل هستند. هرچند که ممکن است جریان پایدار شکل‌پذیر نیز در این حالت اتفاق بیفتد.

به همین دلیل برای درک تعادل واقعی مدل باید سرعت‌ها و جابه‌جایی‌های مدل نیز مورد بررسی قرار گیرند (Itasca, 2015).

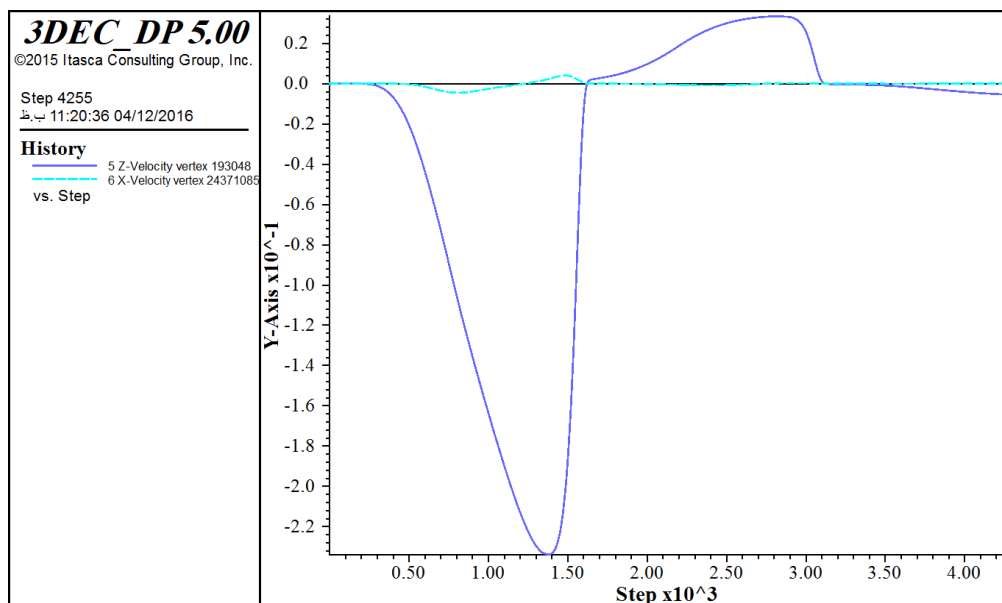
سرعت گره‌ای در مدل (نسبت جابه‌جایی بر تعداد گام‌ها) و جابه‌جایی‌ها نیز یکی دیگر از معرف‌های تعادل مدل هستند. اگر مؤلفه‌های سرعت در تمام نقاط گره به مقداری برابر با صفر همگرا شود، در این صورت مدل در تعادل مطلق است. علاوه بر این اگر مؤلفه‌های سرعت به مقداری ثابت و غیر صفر همگرا شود، جریان شکل‌پذیر در مدل رخ داده است و اگر همچنان در نوسان باشد، مدل در شرایط گذار است (Itasca, 2015). در شکل (۱-۴) شبکه‌المان مجزا اطراف مغار مشاهده می‌شود. نمودار (۱-۴) بیشترین نیروی نامتعادل شبکه، نمودار (۲-۴) جابه‌جایی در راستای محورهای مختصات، نمودار (۳-۴) تنش افقی در سقف و تنش قائم در دیواره مغار و نمودار (۴-۴) سرعت قائم در سقف و سرعت افقی در دیواره مغار، به‌عنوان اثبات متعادل بودن مدل آورده شده است.



شکل (۱-۴): شبکه‌المان مجزا در اطراف مغار



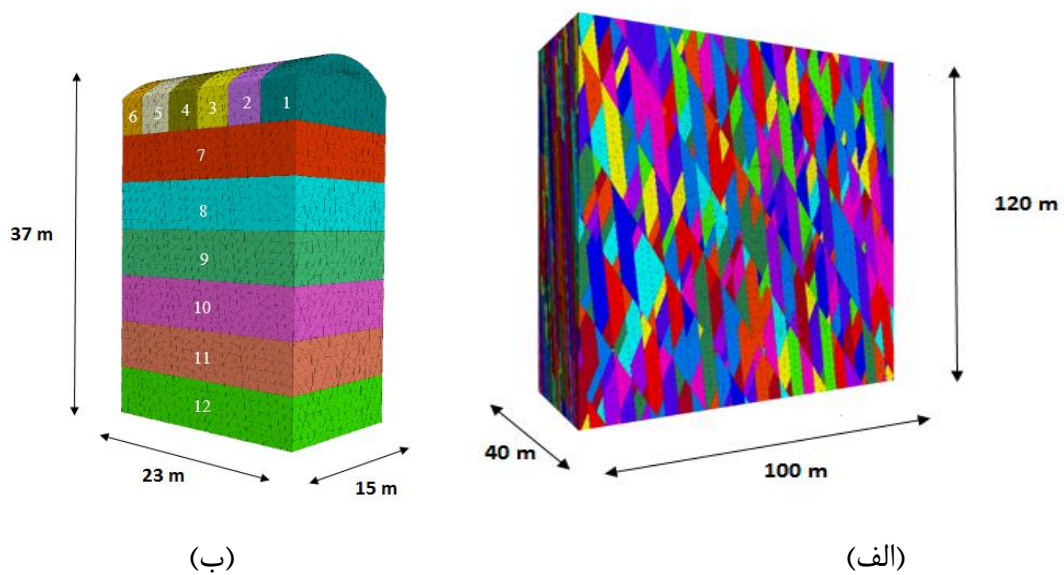
نمودار (۴-۱): تاریخچه نیروهای نامتعادل در مدل



نمودار (۴-۲): سرعت قائم در سقف و سرعت افقی در دیواره مغار

۴-۲-۵ ایجاد تغییرات در مدل

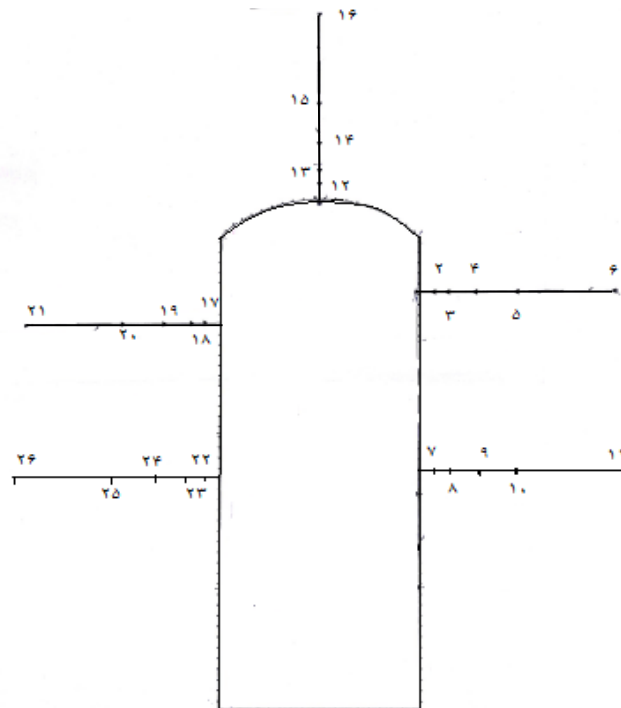
پس از متعادل شدن مدل، حفر مغار در ۱۲ مرحله انجام شده است. هندسه مغار دریچه‌ها نعل اسبی با سقف قوسی شکل است. ابتدا قسمت قوسی شکل سقف مغار دریچه‌ها در ۶ مرحله با توجه به گام حفاری ۴ متری و سپس قسمت مستطیلی با ارتفاع ۵ متر در ۶ مرحله حفر می‌شود. شکل (۴-۲) ابعاد مغار دریچه‌ها و ترتیب مراحل حفاری مغار را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): (الف) هندسه بلوک، (ب) ابعاد مغار دریچه‌ها و ترتیب مراحل حفاری

۳-۴ نتایج حاصل از مدل‌سازی

پس از حفر مغار، مقادیر جابه‌جایی، بزرگی تنش‌ها در جهت محورهای مختصات، بزرگی بیش‌ترین و کم‌ترین تنش‌های اصلی در نقاط شاهد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل (۳-۴) نقاط شاهد در سقف و دیواره مغار مشاهده می‌شود.



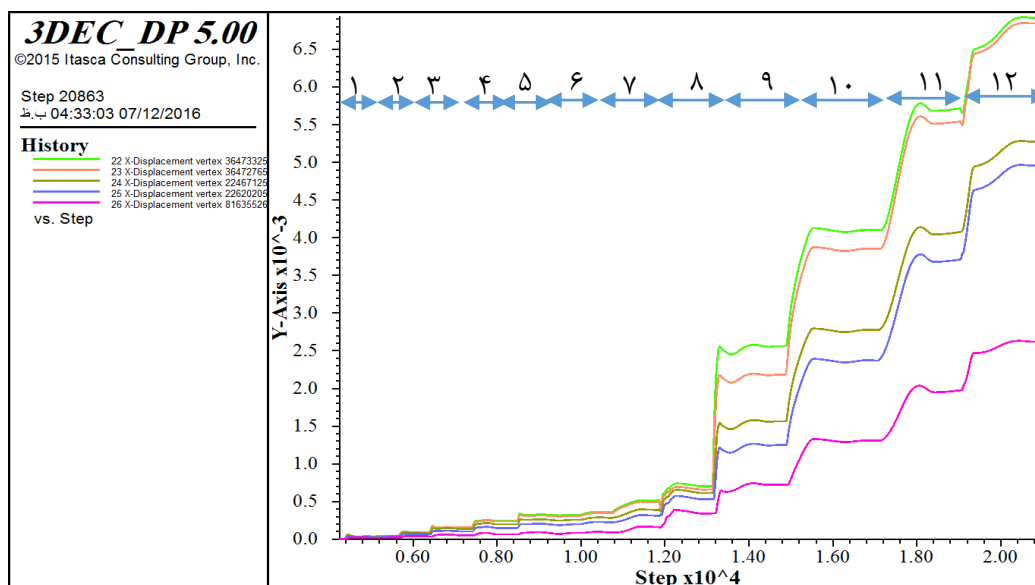
شکل (۳-۴): موقعیت نقاط شاهد در مدل

۴-۳-۱ جابه‌جایی‌ها

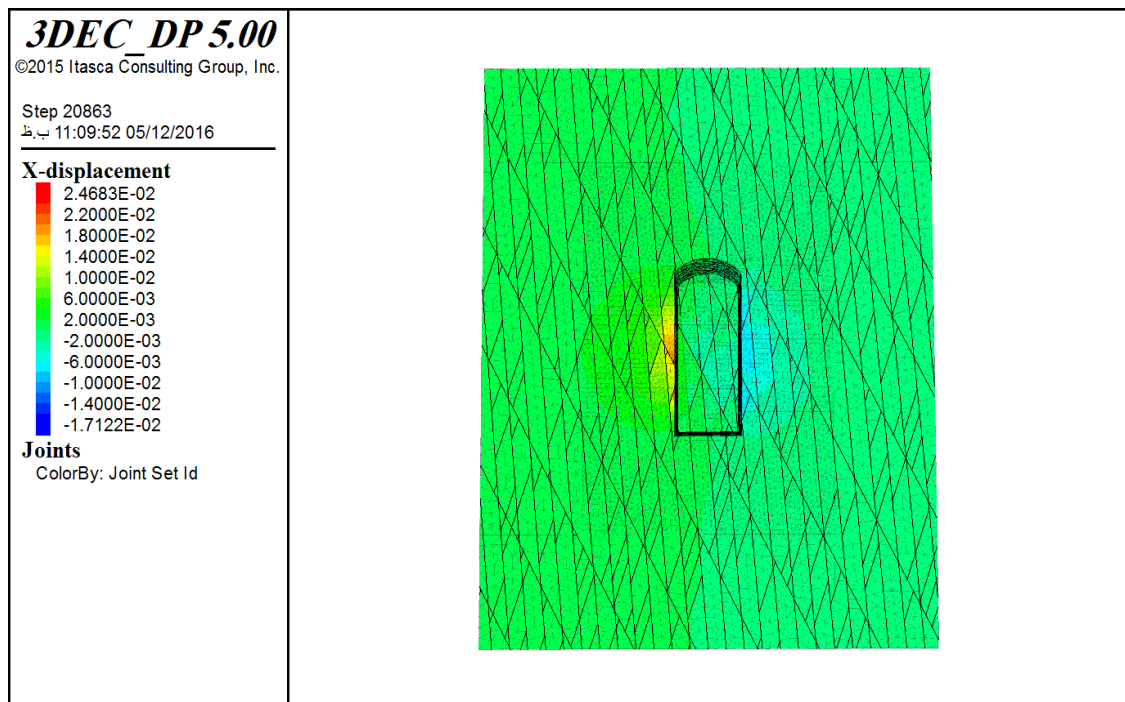
تغییر شکل‌ها در سقف و کف مغار تابعی از جابه‌جایی قائم و در دیواره‌ها بیش‌تر ناشی از جابه‌جایی افقی است. بیش‌ترین میزان تغییر شکل در دیواره سمت چپ مغار یا همان دیواره‌ی شمالی رخ می‌دهد. سپس سقف و کم‌ترین میزان تغییر شکل، در دیواره سمت راست مغار اتفاق افتاده است. ناپایداری‌ها در حفاری‌های نزدیک سطح زمین بیش‌تر ناشی از عوارض ساختاری است. در دیواره‌ی چپ با توجه به جهت شیب خط تقاطع درزه‌ها که به سمت داخل فضای مغار است و بلوک‌ها تمایل به لغزش به سمت سطح آزاد دارند، میزان جابه‌جایی افزایش پیدا کرده است. مقدار جابه‌جایی‌ها در نقاط شاهد ۷، ۱۲ و ۲۲ برای سقف و دیواره‌ها در جدول (۴-۱) ارائه شده است. در شکل (۴-۴) جابه‌جایی‌های نقاط شاهد ۲۲ تا ۲۶ در مراحل مختلف حفاری را نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) جابه‌جایی مغار در راستای افقی و قائم را نشان می‌دهد. بیش‌ترین جابه‌جایی نهایی افقی به میزان ۲/۴۶ سانتی‌متر در دیواره‌ی چپ اتفاق افتاده و جابه‌جایی نهایی افقی دیواره راست در حدود ۱/۷۱ سانتی‌متر است. جابه‌جایی نهایی قائم سقف ۱ سانتی‌متر و جابه‌جایی نهایی قائم کف در حدود ۰/۷۱ سانتی‌متر است.

جدول (۴-۱): جابه‌جایی‌های نقاط شاهد در جداری مغار

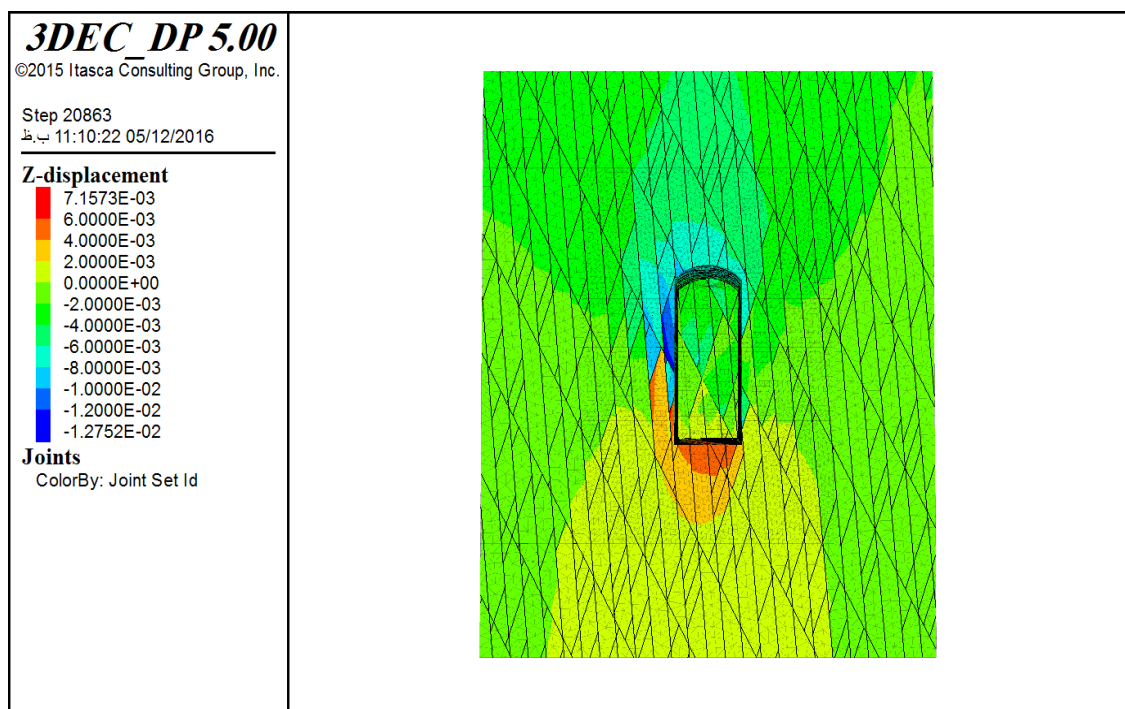
نقاط شاهد	سقف	دیواره سمت راست	دیواره سمت چپ
جابه‌جایی (میلی‌متر)	۶/۳	۲/۸	۷



شکل (۴-۴): جابه‌جایی‌های نقاط شاهد ۲۲ تا ۲۶ در مراحل مختلف حفاری



(الف)



(ب)

شکل (۴-۵): جابه‌جایی جداره‌ی مغار (الف) در راستای افقی و (ب) در راستای قائم (متر)

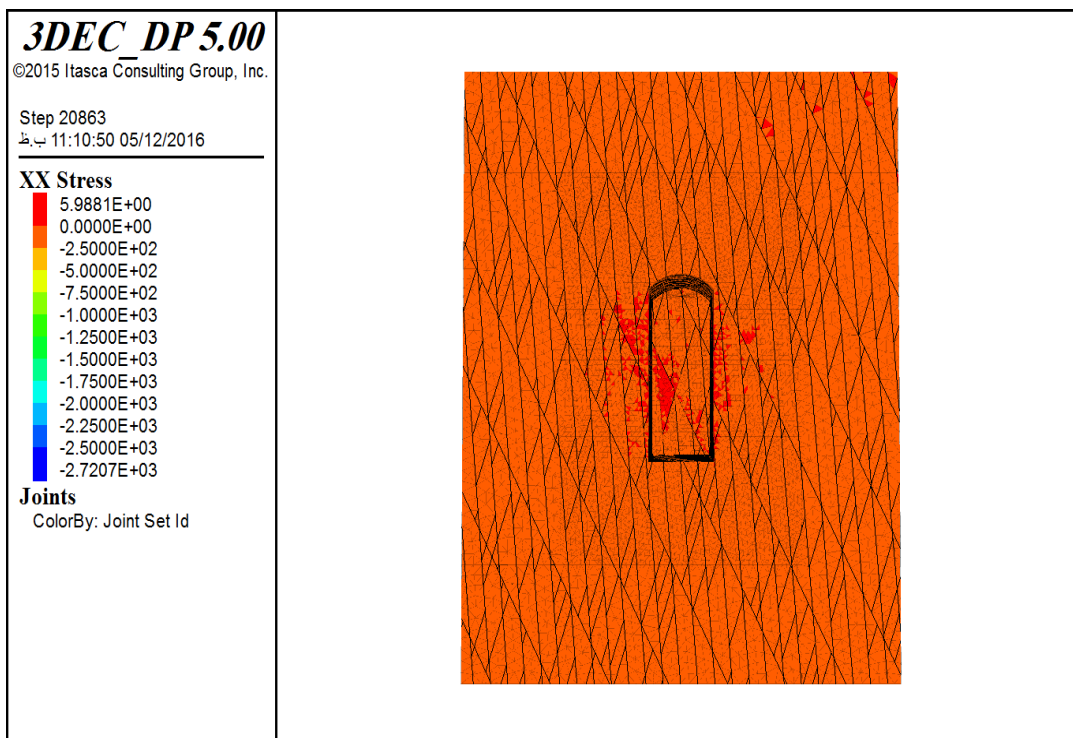
۲-۳-۴ وضعیت تنش‌ها

از عوامل مؤثر بر پایداری سازه زیرزمینی تنش برجای موجود در منطقه است. پس از حفر سازه به تناسب بزرگی و جهت تنش‌های برجا و هندسه سازه تنش‌ها دوباره در اطراف سازه توزیع می‌شوند. وضعیت تنش‌ها در اطراف جداره مغار از اهمیت خاصی برخوردار است. مقدار تنش به شکل سازه و خواص تغییر شکل‌پذیری توده سنگ وابسته است. در این بخش وضعیت تنش‌ها در اطراف مغار برآورد و تحلیل شده است.

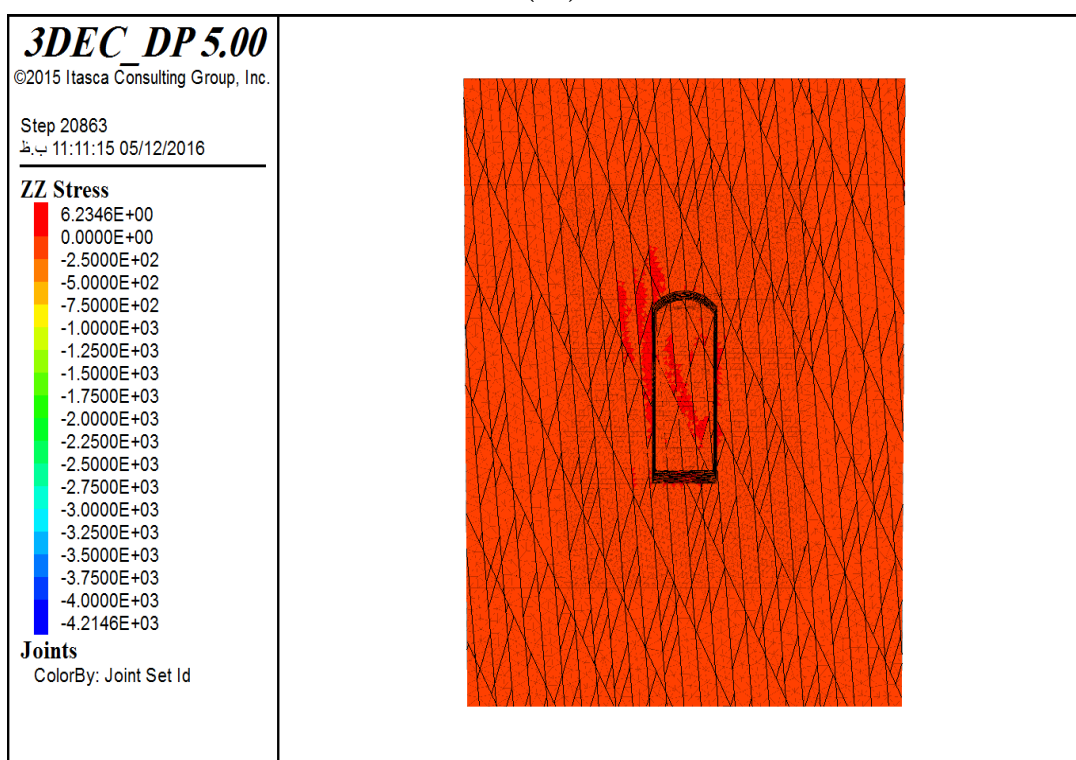
حفر یک سازه باعث توزیع مجدد تنش در محیط دربرگیرنده سازه می‌شود. تغییر شکل توده سنگ با آزادسازی و کاهش تنش همراه است. مقدار کاهش تنش‌ها در راستای افقی یا قائم نسبت به مقادیر تنش‌های اولیه در همان راستا، آزادسازی تنش نامیده می‌شود. در شکل (۴-۶) تنش افقی و قائم مغار نشان داده شده است. شکل (۴-۷) نشان دهنده بیش‌ترین و کم‌ترین تنش‌های اصلی بعد از حفاری است. در جدول (۴-۲) مقادیر تنش‌ها در راستای افقی و قائم و تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه، قبل و بعد از حفر مغار مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش‌های کششی بعد از حفر افزایش پیدا کرده و تنش‌های فشاری کاهش داشته است.

جدول (۴-۲): مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از حفاری

تنش‌ها (کیلو پاسکال)			قبل از حفر	بعد از حفر
تنش در راستای افقی	تنش فشاری	۳۱۴۰	۲۷۲۰	
	تنش کششی	۳/۲۵	۵/۹۸	
تنش در راستای قائم	تنش فشاری	۴۴۰۸	۴۲۱۰	
	تنش کششی	۳/۴۷	۶/۲۳	
تنش اصلی بیشینه	تنش فشاری	۱۷۶۰	۱۴۸۰	
	تنش کششی	۶/۱۶	۶/۳۶	
تنش اصلی کمینه	تنش فشاری	۵۷۸۰	۵۴۵۰	
	تنش کششی	۰/۰۳	۱/۳۱	

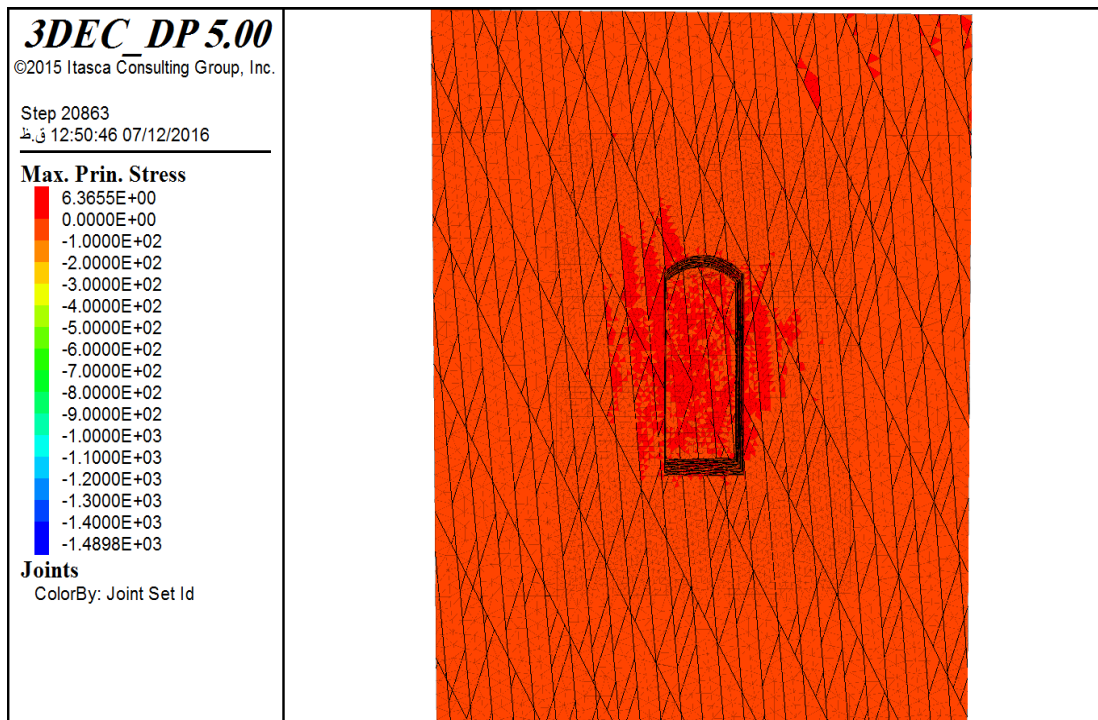


(الف)

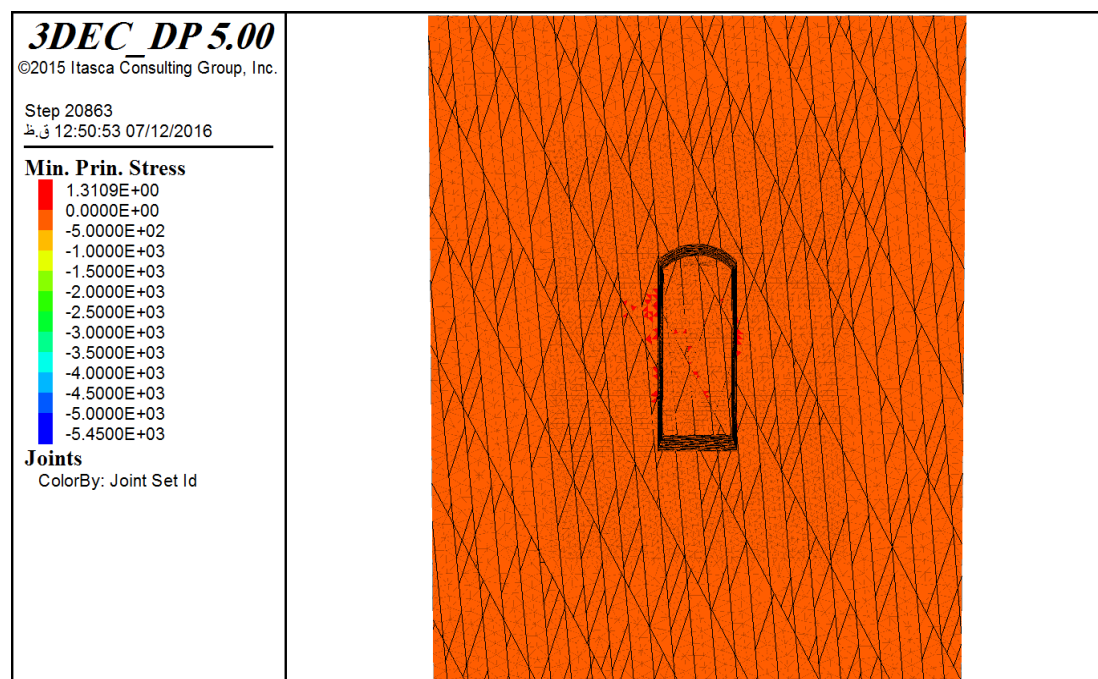


(ب)

شکل (۴-۶): (الف) تنش در راستای افقی و (ب) تنش در راستای قائم (کیلو پاسکال)



(الف)



(ب)

شکل (۷-۴): (الف) بیشترین و (ب) کمترین تنش اصلی (تنش فشاری = منفی)

۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل با اطلاعات به‌دست‌آمده در فصل قبل مدل‌سازی مغار دریچه‌های کنترل با نرم‌افزار 3DEC انجام شده است. ابعاد مناسب برای بلوک با توجه به ابعاد مغار تعیین و ناپیوستگی‌ها در مدل لحاظ شده است. مدل در شرایط مورد نظر به تعادل رسیده و میزان جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها مورد تحلیل قرار گرفته و بیش‌ترین جابه‌جایی در دیواره سمت چپ اتفاق افتاده است. مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از حفاری نشان می‌دهد که تنش‌های کششی بعد از حفر افزایش پیدا کرده و تنش‌های فشاری کاهش داشته است.

فصل پنجم

تحليل حساسيت

۵-۱ مقدمه

عدم قطعیت در برآورد شرایط توده سنگ یکی از مهم‌ترین مشکل‌های طراحی سازه‌ها در محیط‌های سنگی است. در تحلیل پایداری، ویژگی‌های مقاومت برشی نقش مهمی در مقدار جابه‌جایی‌ها و پایداری سازه‌ها ایفا می‌کنند. از این‌رو در تحلیل پایداری مغار ویژگی‌هایی از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ بکر و درزه، همچنین سختی نرمال و برشی درزه در بازه مناسبی تغییر داده شده‌اند تا بتوان میزان تغییرات پایداری مغار را برآورد نمود. نتایج مورد بررسی جابه‌جایی‌های رخ داده در جداری مغار است.

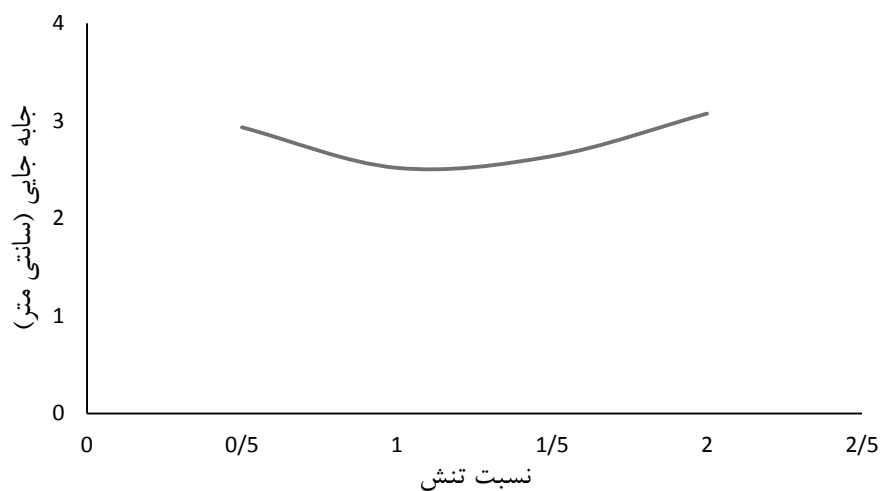
۵-۲ نتایج تحلیل حساسیت با مدل سازی عددی

۵-۲-۱ تأثیر نسبت تنش در جابه‌جایی

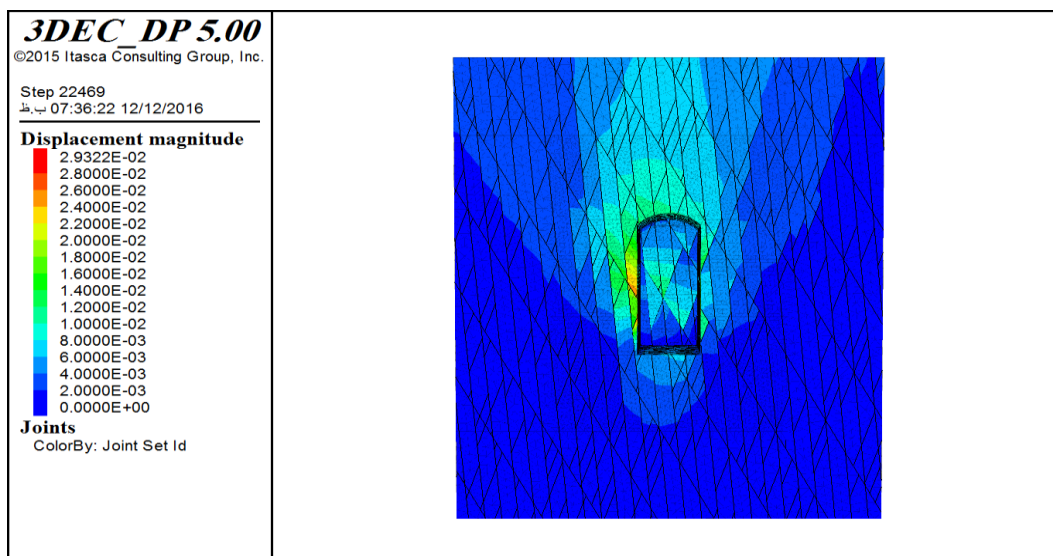
در مدل مرجع تنش عمودی ثابت به مقدار $2/56$ مگا پاسکال به سطح بالای مدل اعمال شده است. در جدول (۵-۱) نسبت تنش با استفاده از روابط مختلف تخمین زده شده و مقدار برآورد شده از هر روش ارائه شده است. برای بررسی تأثیر نسبت تنش در جابه‌جایی مقادیر $0/5$ ، 1 ، $1/5$ و 2 در نظر گرفته شد. نتایج مدل سازی عددی نشان داد که با افزایش مقدار نسبت تنش از $0/5$ به 1 مقدار جابه‌جایی کاهش پیدا کرده و با افزایش مقدار نسبت تنش از 1 به 2 مقدار جابه‌جایی افزایش پیدا کرده است. برای همه مقادیر نسبت تنش بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در امتداد محل تقاطع درزه‌ها روی دیواره سمت چپ رخ داده است. نمودار (۵-۱) تغییر مقادیر بیش‌ترین جابه‌جایی برآیند مدل با نسبت تنش‌های متفاوت را نشان می‌دهد. شکل (۵-۱) جابه‌جایی برآیند رخ داده در مدل در نسبت تنش‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت تنش کانتورهای جابه‌جایی از حالت قائم به افقی تبدیل شده است.

جدول (۱-۵): روابط تخمین نسبت تنش و مقادیر محاسبه شده برای مغار

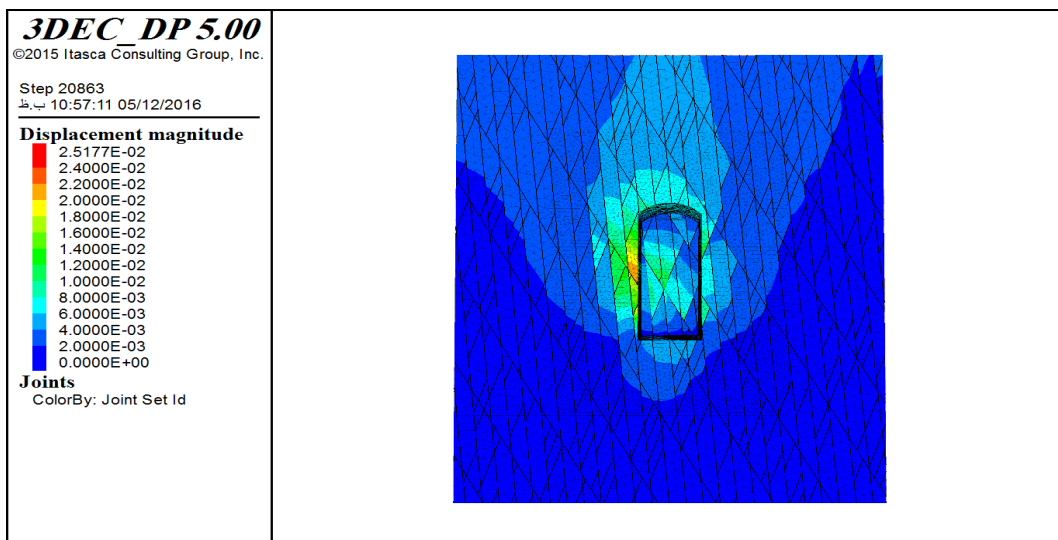
شماره رابطه	رابطه تخمین نسبت تنش	مقدار برای مغار	منبع
(۱-۵)	$K = \frac{v}{1-v}$	۰/۴	(Terzaghi & Richart 1952)
(۲-۵)	$0.3 + \frac{100}{z} < K < 0.5 + \frac{1500}{z}$	$1/3 < K < 15/5$	(Brown & Hoek, 1978)
(۳-۵)	$K = 0.25 + 7 E (0.001 + \frac{1}{z})$	۰/۶	(Sheorey, 1994)
(۴-۵)	$K = \frac{12.6}{\sqrt[3]{z}}$	۲/۷	(مومیوند, ۱۳۸۶)



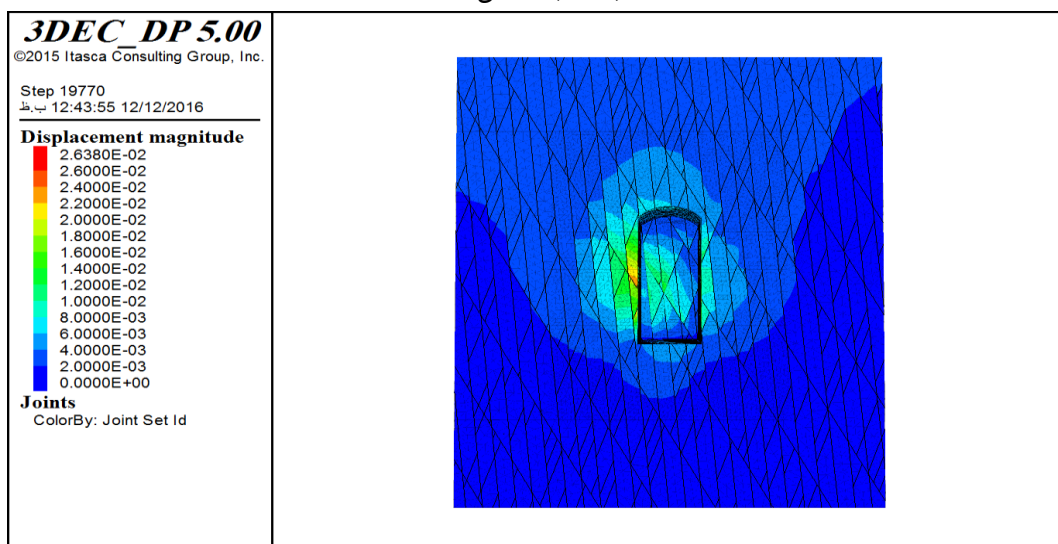
نمودار (۱-۵): روند تغییر جابه‌جایی برآیند مدل با نسبت تنش



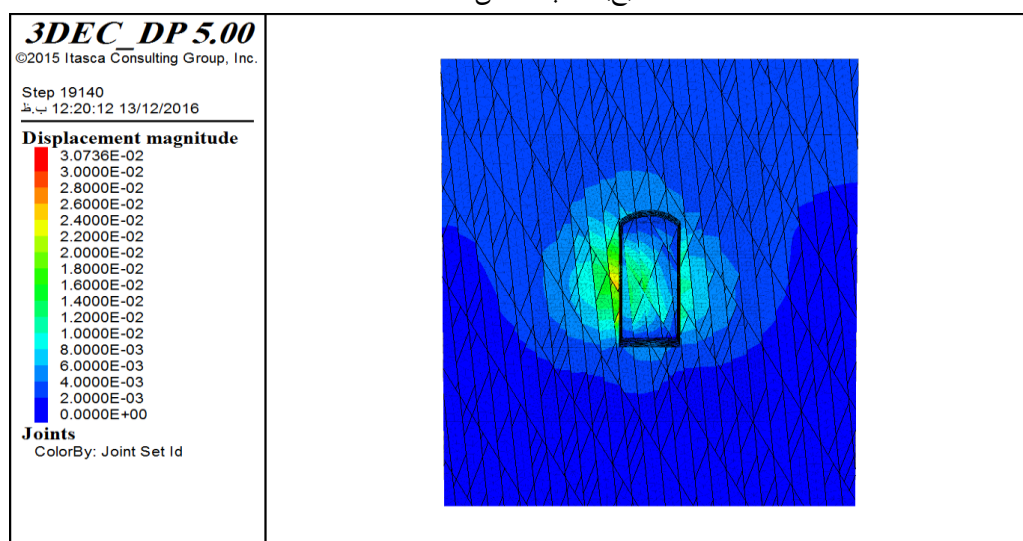
(الف) نسبت تنش = ۰/۵



(ب) نسبت تنش = ۱



(ج) نسبت تنش = ۱/۵



(د) نسبت تنش = ۲

شکل (۱-۵): (الف) تا (د) جابه‌جایی برآیند در نسبت تنش‌های متفاوت

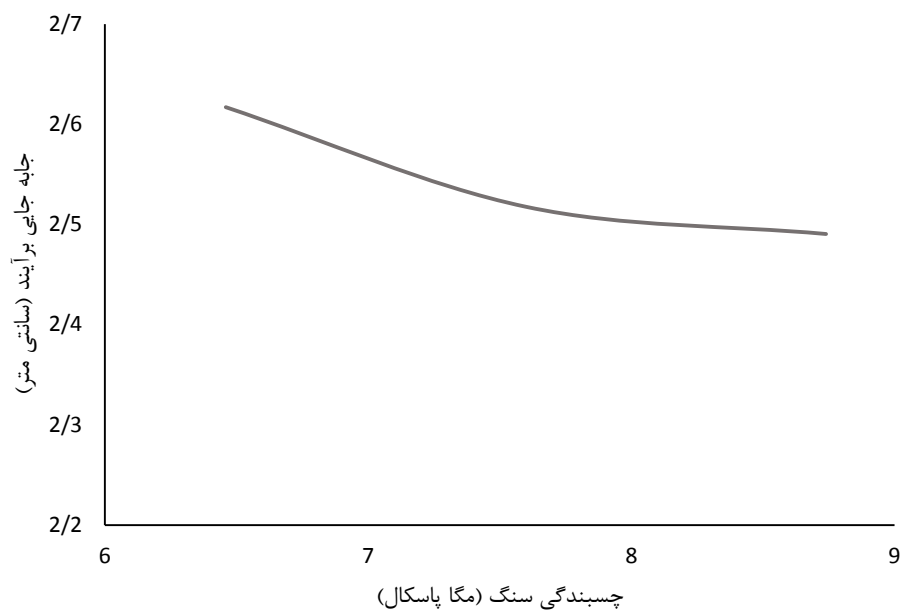
۵-۲-۲ تأثیر متغیرهای مقاومتی سنگ در جابه‌جایی

وقتی اطلاعات کافی برای تعیین ضریب تغییرات ویژگی‌های موردنظر وجود ندارد می‌توان از مقادیر پیشنهادی محدوده‌ی ضریب تغییرات توسط پژوهشگران استفاده کرد. (Rethati, 1988) محدوده ضریب تغییرات را بین ۱۵٪ تا ۲۰٪ پیشنهاد داده است. (Hoek, 2006) مقدار ضریب تغییرات را برای عدم قطعیت‌های کوچک ۵٪ و برای عدم قطعیت‌های قابل توجه ۲۵٪ پیشنهاد داده است. برای محاسبه عدم قطعیت متغیرهای مقاومتی توده سنگ، فرض بر این است که ضریب تغییرات متغیرهای مقاومت سنگ حدود ۱۵٪ است. با استفاده از ضریب تغییرات فرض شده، انحراف استاندارد زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سنگ محاسبه شده است. برای مدل‌سازی عددی، مقدار میانگین هر متغیر به‌علاوه و منه‌ای انحراف استاندارد تعیین شد درحالی‌که متغیر دیگر در مقادیر متوسط در نظر گرفته شده است.

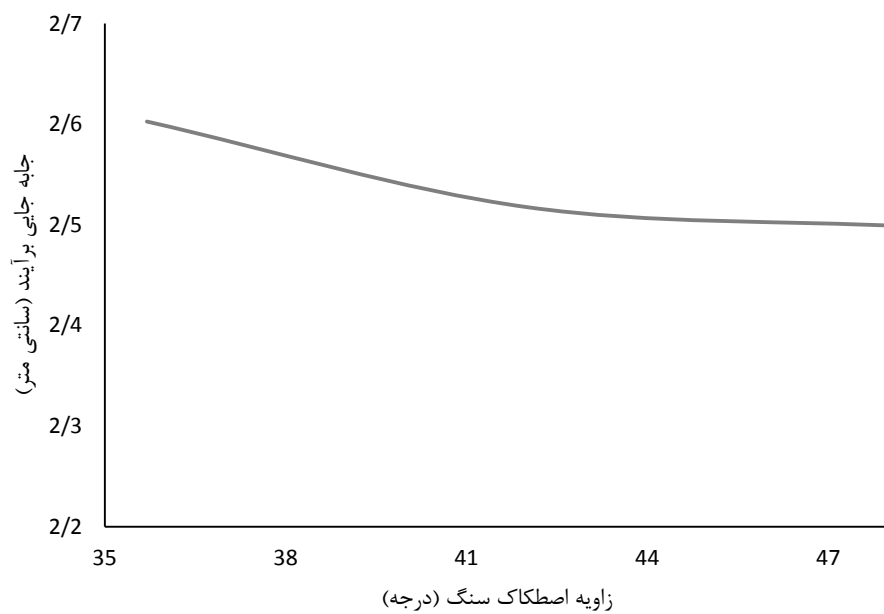
در جدول (۵-۲) مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ مورد استفاده در مدل‌سازی عددی ارائه شده است. همان‌طور که در نمودار (۵-۲) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار چسبندگی سنگ میزان جابه‌جایی برآیند مغار کاهش یافته است. نمودار (۵-۳) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه اصطکاک سنگ میزان جابه‌جایی‌ها کاهش یافته است. مقاومت برشی سنگ تحت تأثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ است؛ بنابراین انتظار می‌رود با افزایش این دو متغیر مقدار مقاومت برشی افزایش یابد و در نتیجه میزان جابه‌جایی کاهش پیدا کند. شکل (۵-۲) و (۵-۳) به ترتیب جابه‌جایی برآیند مغار را در مقادیر مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ نشان می‌دهند.

جدول (۵-۲): متغیرهای مقاومتی سنگ در مدل‌سازی عددی

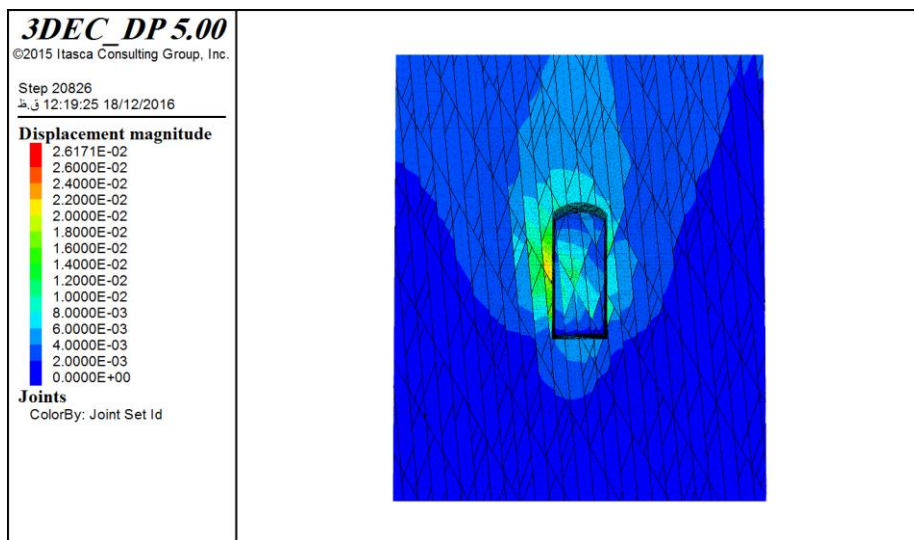
متغیر	انحراف استاندارد	مقدار میانگین	میانگین + انحراف استاندارد	میانگین - انحراف استاندارد
چسبندگی (مگا پاسکال)	۱/۱۴	۷/۶۰	۸/۷۴	۶/۴۶
زاویه اصطکاک (درجه)	۶/۳	۴۲/۰	۴۸/۳	۳۵/۷



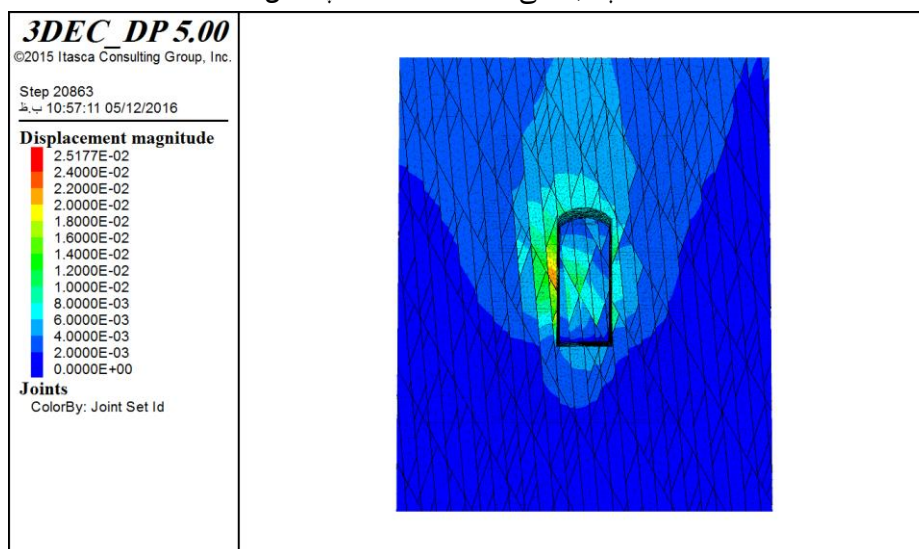
نمودار (۲-۵): تغییرات چسبندگی سنگ با میزان جابه جایی برای سائی مغار



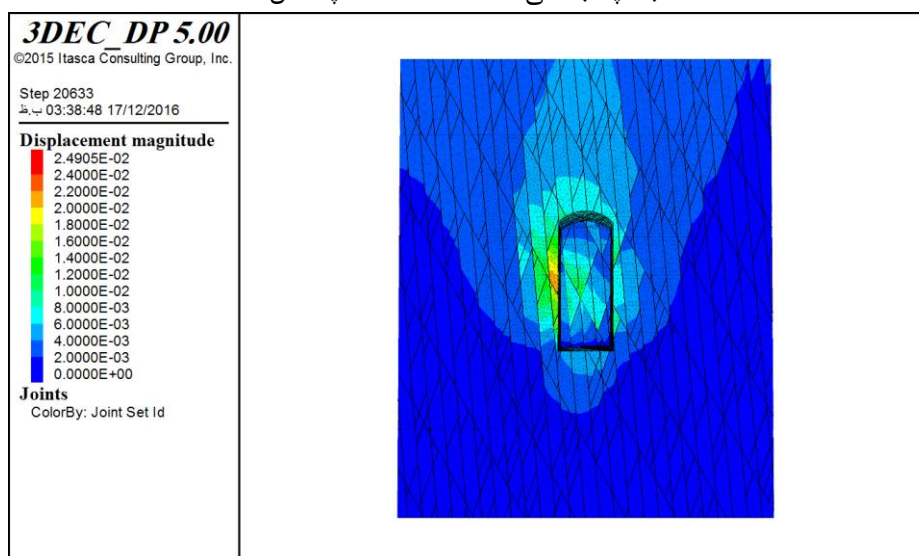
نمودار (۳-۵): تغییرات زاویه اصطکاک سنگ با میزان جابه جایی برای سائی مغار



(الف) چسبندگی سنگ = ۶/۴۶ مگا پاسکال

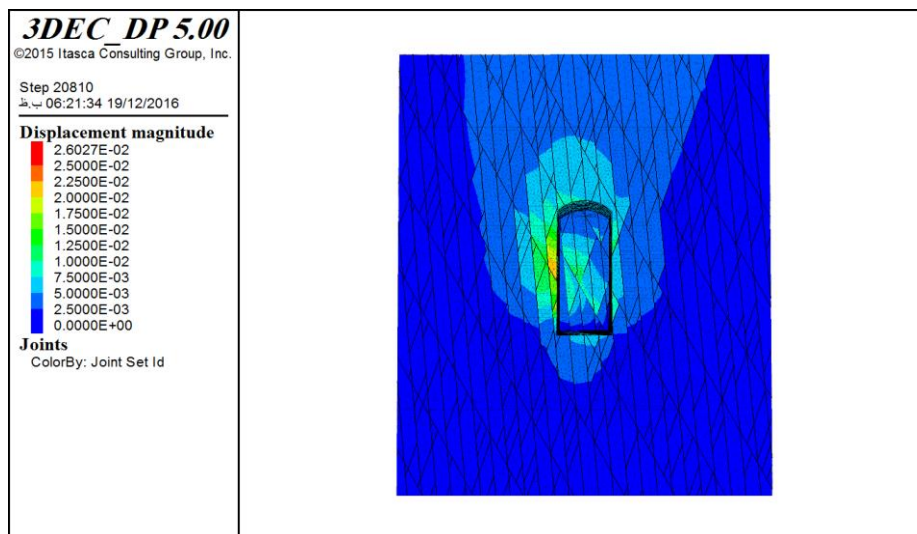


(ب) چسبندگی سنگ = ۷/۶۰ مگا پاسکال

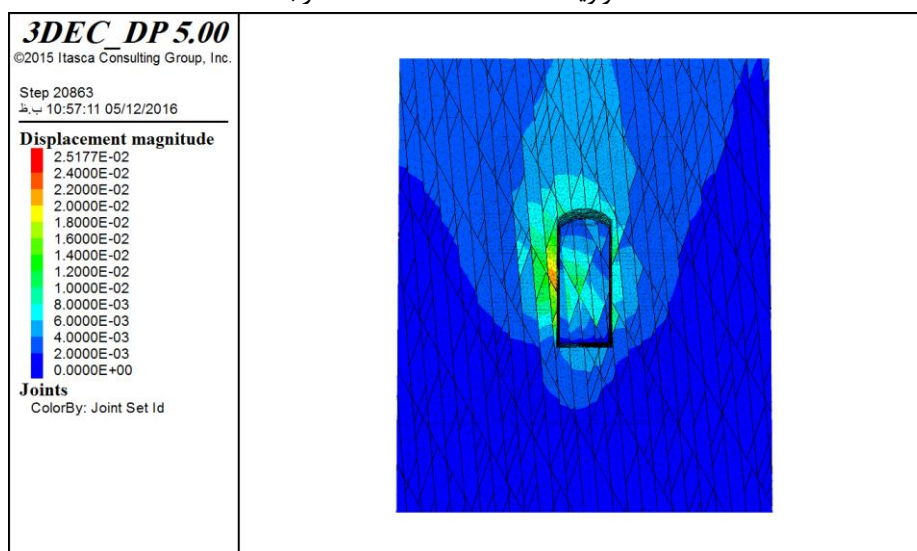


(ج) چسبندگی سنگ = ۸/۷۴ مگا پاسکال

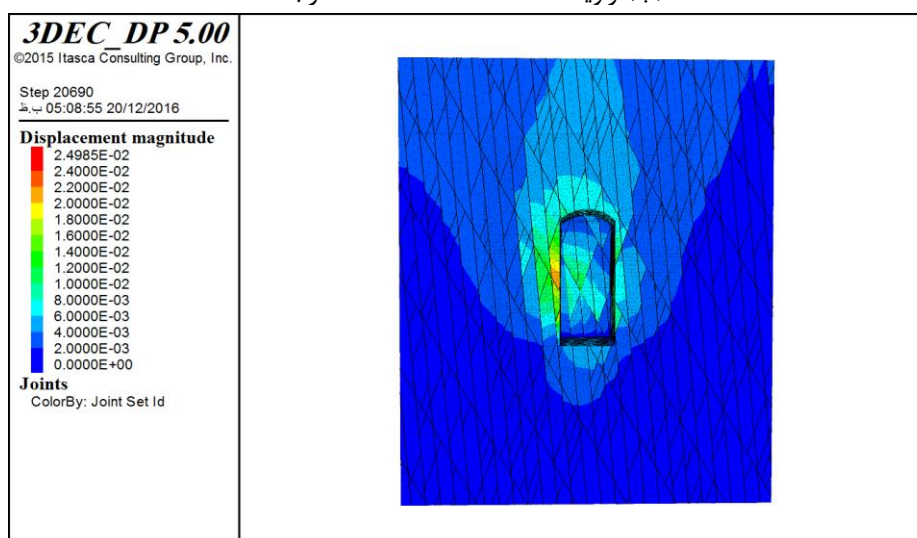
شکل (۵-۲): (الف) تا (ج) جابه جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف چسبندگی سنگ



(الف) زاویه اصطکاک سنگ = $35/7$ درجه



(ب) زاویه اصطکاک سنگ = $42/0$ درجه



(ج) زاویه اصطکاک سنگ = $48/3$ درجه

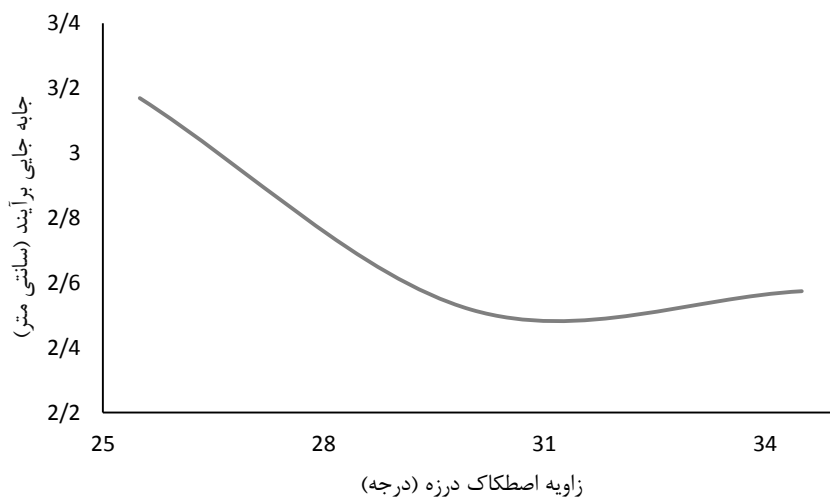
شکل (۵-۳): (الف) تا (ج) جابه جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک سنگ

۵-۲-۳ تأثیر متغیرهای مکانیکی ناپیوستگی‌ها در جابه‌جایی

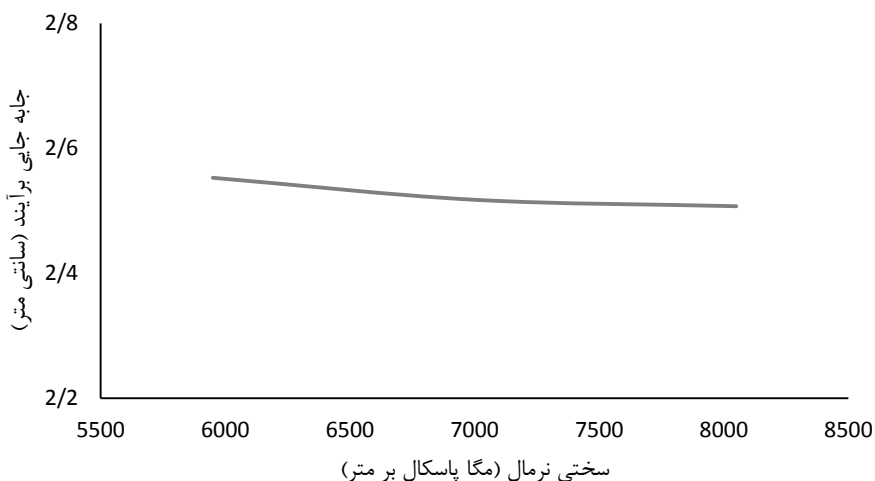
مشابه بخش قبل فرض بر این است که ضریب تغییرات متغیرهای مقاومتی درزه حدود ۱۵٪ است. با استفاده از ضریب تغییرات فرض شده، انحراف استاندارد زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، سختی نرمال و برشی درزه محاسبه شده است. برای مدل‌سازی عددی، مقدار میانگین هر متغیر به‌علاوه و منهای انحراف استاندارد تعیین شده درحالی‌که متغیر دیگر در مقادیر متوسط در نظر گرفته شده است. در جدول (۵-۳) مقادیر متغیرهای مقاومتی درزه‌ها در مدل‌سازی عددی ارائه شده است. نمودار (۵-۴) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه اصطکاک درزه میزان جابه‌جایی‌ها کاهش یافته است. بنابراین زاویه اصطکاک درزه رابطه معکوس با میزان جابه‌جایی برآیند مغار دارد. نمودار (۵-۵) و (۵-۶) به ترتیب تغییرات سختی نرمال درزه با میزان جابه‌جایی برآیند و میزان جابه‌جایی نرمال درزه را نشان می‌دهند. وقتی تنش نرمال به درزه وارد می‌شود درزه شروع به بسته شدن می‌کند با افزایش تنش نرمال جابه‌جایی نرمال افزایش پیدا می‌کند تا اینکه در سطحی از تنش بسته شدن درزه متوقف می‌شود. این ثابت بودن جابه‌جایی نرمال درزه با افزایش سختی نرمال به این دلیل بوده است که در این محدوده از جابه‌جایی قرار گرفته است. سختی نرمال را می‌توان شیب نمودار تنش نرمال و جابه‌جایی نرمال تعریف کرد. افزایش سختی نرمال یعنی شیب این نمودار افزایش پیدا کرده است یعنی سطح تنش بیشتری را می‌تواند تحمل کند و کمتر جابه‌جا شود. نمودار (۵-۷) و (۵-۸) به ترتیب تغییرات سختی برشی درزه با میزان جابه‌جایی برآیند و میزان جابه‌جایی برشی درزه را نشان می‌دهند. با افزایش سختی برشی درزه یعنی افزایش مقاومت درزه در برابر جابه‌جایی درزه، میزان جابه‌جایی برآیند و جابه‌جایی برشی درزه کاهش یافته است. شکل (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶) به ترتیب جابه‌جایی برآیند مغار را در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک، سختی نرمال و برشی درزه نشان می‌دهند.

جدول (۳-۵): متغیرهای مقاومتی درزه‌ها در مدل‌سازی عددی

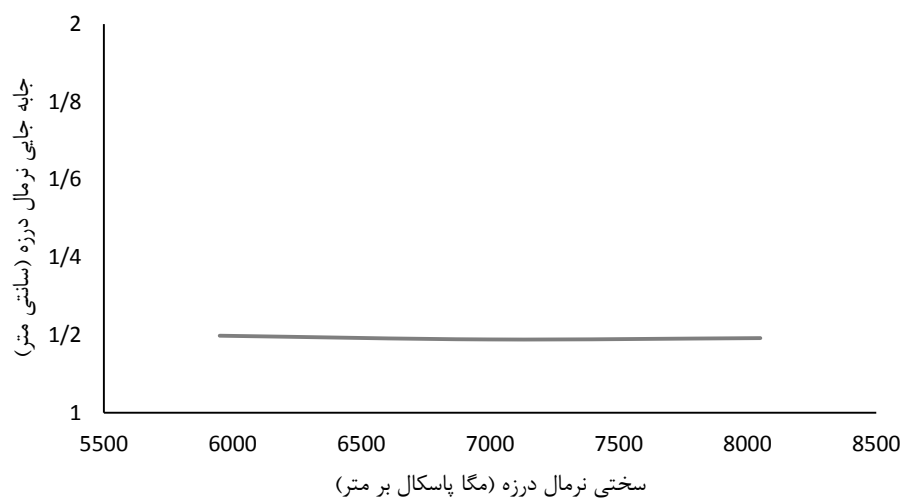
متغیر	انحراف استاندارد	مقدار میانگین	میانگین + انحراف استاندارد	میانگین - انحراف استاندارد
زاویه اصطکاک (درجه)	۴/۵	۳۰/۰	۳۴/۵	۲۵/۵
سختی نرمال (مگا پاسکال بر متر)	۱۰۵۰	۷۰۰۰	۸۰۵۰	۵۹۵۰
سختی برشی (مگا پاسکال بر متر)	۴۵۰	۳۰۰۰	۳۴۵۰	۲۵۵۰



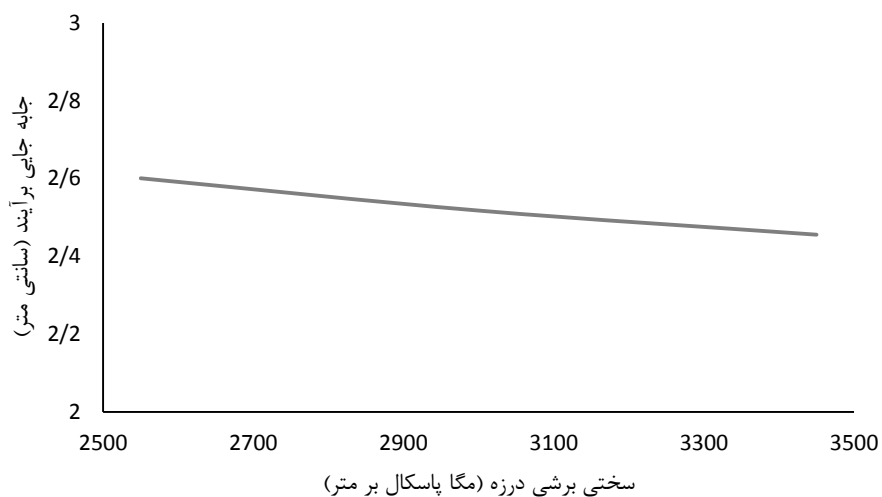
نمودار (۴-۵): تغییرات زاویه اصطکاک درزه با میزان جابه‌جایی برآیند مغار



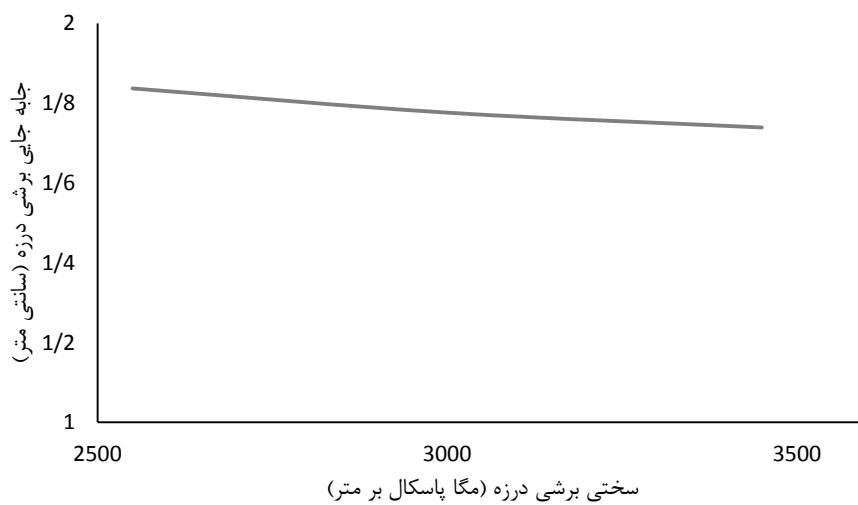
نمودار (۵-۵): تغییرات سختی نرمال درزه با میزان جابه‌جایی برآیند



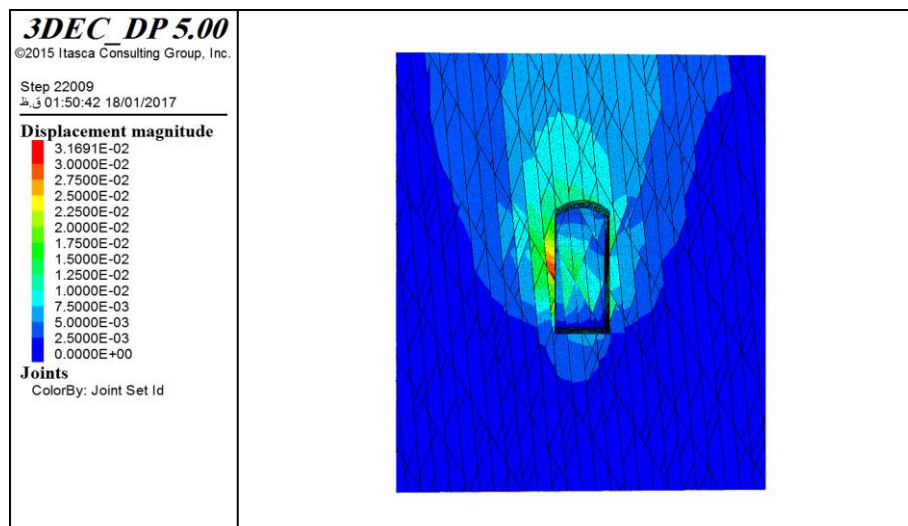
نمودار (۵-۶): تغییرات سختی نرمال درزه با میزان جابه جایی نرمال درزه



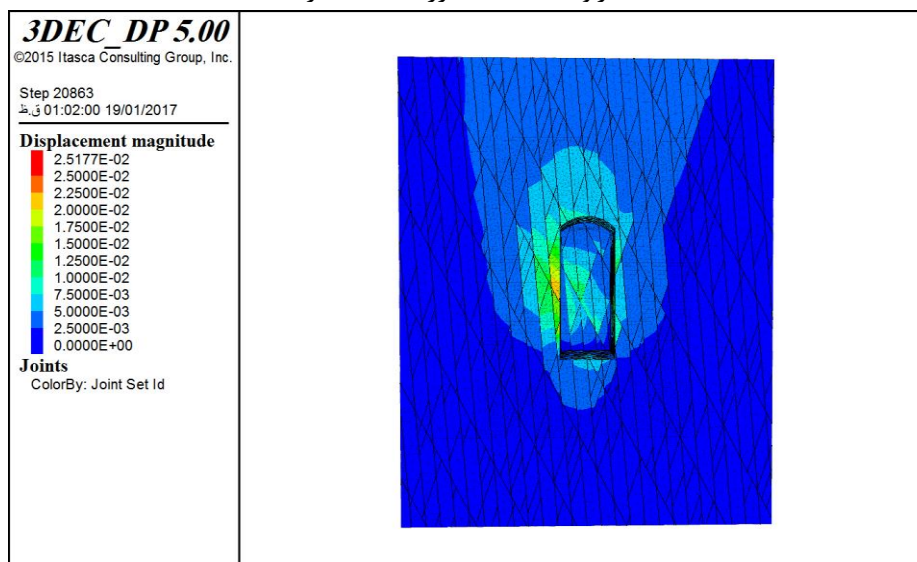
نمودار (۵-۷): تغییرات سختی برشی درزه با میزان جابه جایی برآیند



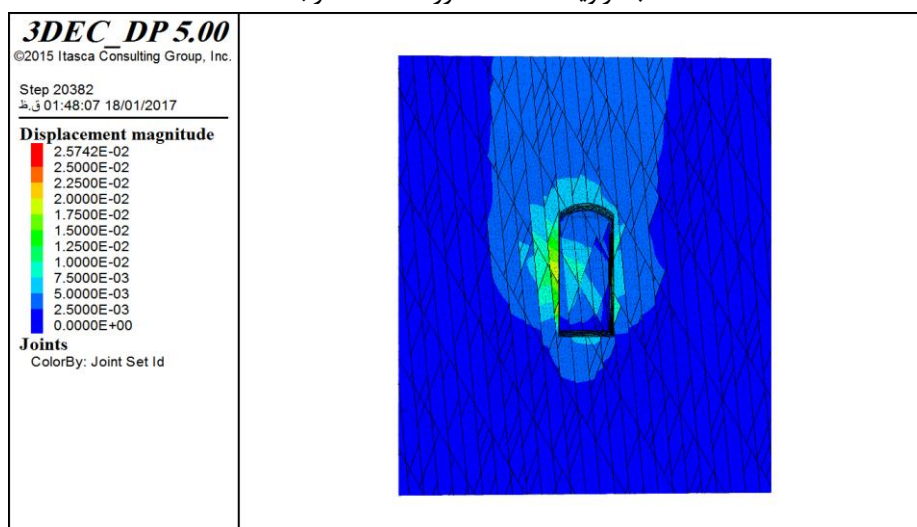
نمودار (۵-۸): تغییرات سختی برشی درزه با میزان جابه جایی برشی درزه



(الف) زاویه اصطکاک درزه = $25/5$ درجه

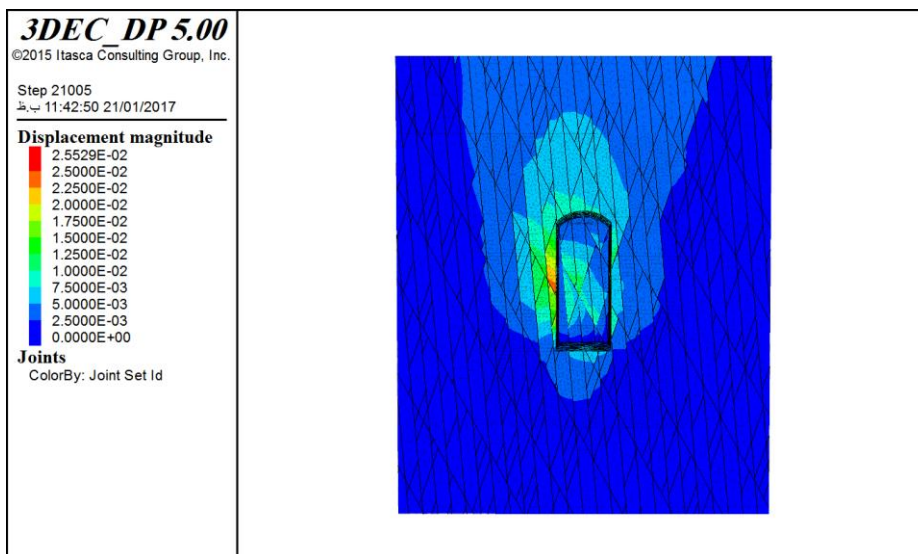


(ب) زاویه اصطکاک درزه = $30/0$ درجه

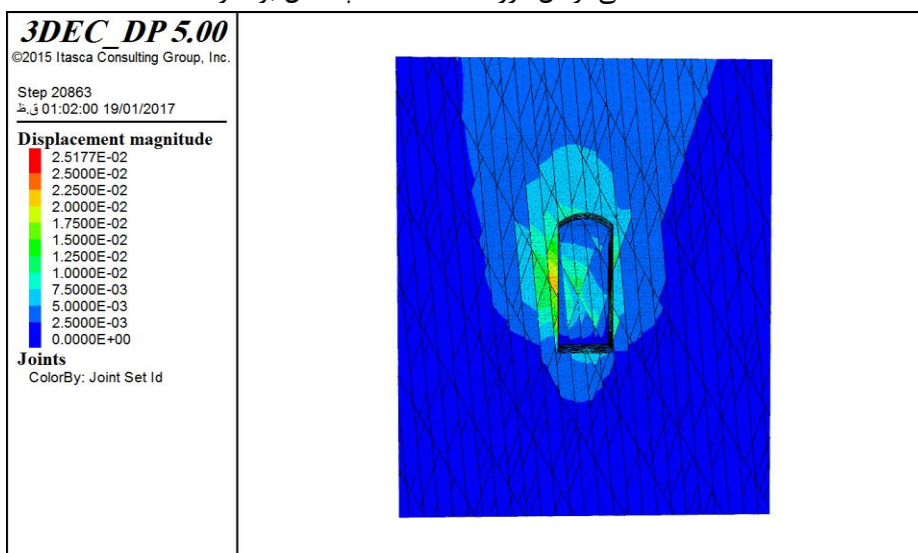


(ج) زاویه اصطکاک درزه = $34/5$ درجه

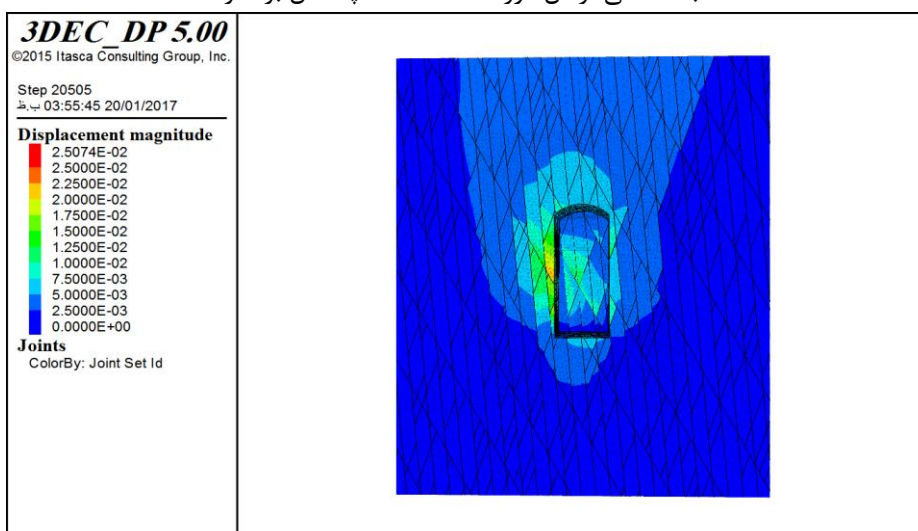
شکل (۴-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک درزه



(الف) سختی نرمال درزه = ۵۹۵۰ مگا پاسکال بر متر

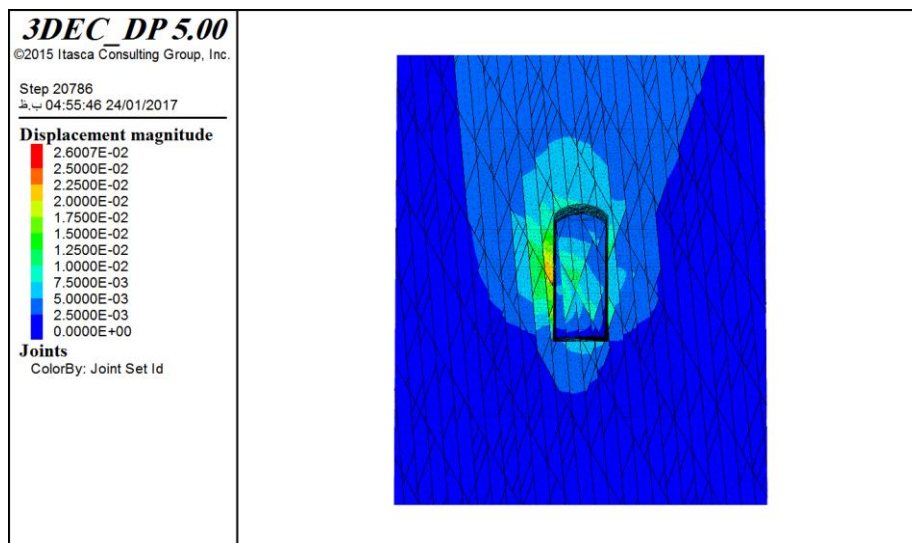


(ب) سختی نرمال درزه = ۷۰۰۰ مگا پاسکال بر متر

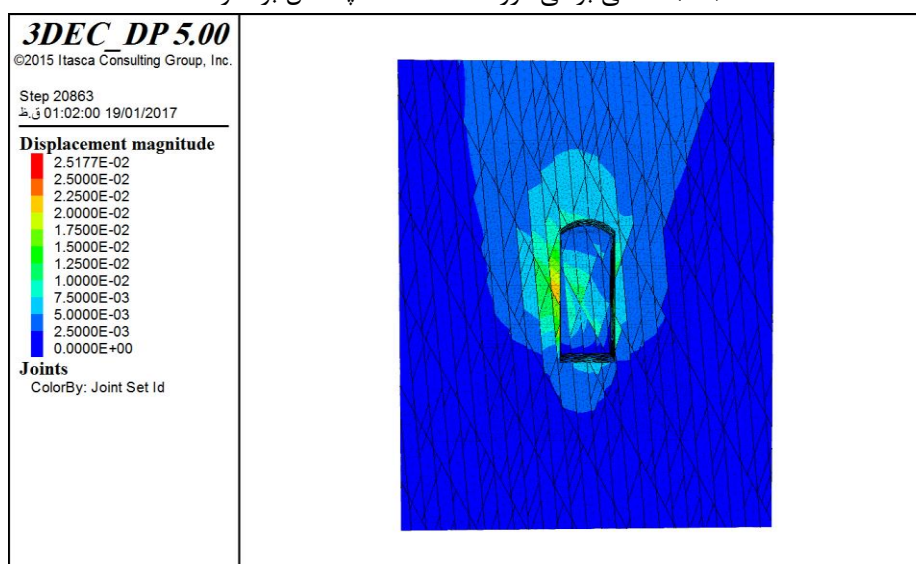


(ج) سختی نرمال درزه = ۸۰۵۰ مگا پاسکال بر متر

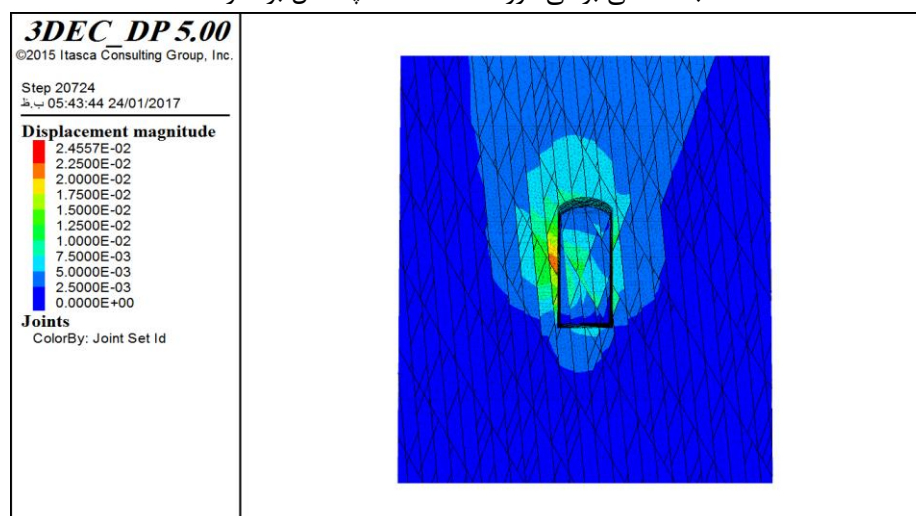
شکل (۵-۵): (الف) تا (ج) جابه‌جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف سختی نرمال درزه



(الف) سختی برشی درزه = ۲۵۵۰ مگا پاسکال بر متر



(ب) سختی برشی درزه = ۳۰۰۰ مگا پاسکال بر متر



(ج) سختی برشی درزه = ۳۴۵۰ مگا پاسکال بر متر

شکل (۵-۶): (الف) تا (ج) جابه جایی برآیند مغار در مقادیر مختلف سختی برشی درزه

۵-۳ جمع‌بندی

با افزایش مقدار نسبت تنش میزان جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند و برای همه مقادیر نسبت تنش بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در امتداد محل تقاطع درزه‌ها روی دیواره سمت چپ رخ داده است. با توجه به اینکه چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ از ویژگی‌های مقاومت برشی سنگ است، با افزایش مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ میزان مقاومت برشی افزایش یافته و جابه‌جایی برآیند مغار کاهش داشته است. با در نظر گرفتن این موضوع که افزایش زاویه اصطکاک درزه نیز باعث افزایش مقاومت برشی درزه می‌شود، با افزایش زاویه اصطکاک درزه میزان مقاومت برشی افزایش و جابه‌جایی‌ها کاهش یافته است. سختی نرمال و برشی درزه شیب نمودار تنش (نرمال و برشی) - جابه‌جایی (نرمال و برشی) تعریف می‌شود. افزایش سختی نرمال و برشی درزه یعنی افزایش این شیب به معنای افزایش مقاومت درزه در برابر جابه‌جایی است، یعنی سطح بیشتری از تنش را می‌تواند تحمل کند. پس انتظار می‌رود افزایش مقاومت باعث کاهش جابه‌جایی برآیند رخ داده در مدل شود. محدوده‌ی تغییرات سختی نرمال درزه در جایی قرار گرفته که جابه‌جایی ثابت شده است اما با افزایش سختی برشی درزه جابه‌جایی مقدار کمی کاهش یافته است.

فصل ششم

تحلیل پایداری و طراحی سیستم
نگهداری مغار دریچه‌های کنترل

۱-۶ مقدمه

ایمنی در حین ساخت و پایداری بلندمدت مواردی هستند که باید در حفاری و اجرای سازه‌های سنگی موردتوجه قرار گیرند. این توجه نیازمند تقویت یا نصب نگهداری در سازه‌ی موردنظر است. باید توجه کرد که تقویت و نصب نگهداری دو نقش متفاوت در مهندسی سنگ دارد. تقویت سنگ، همان‌طور که از نامش پیداست برای بهبود مقاومت و یا رفتار تغییر شکل‌پذیری توده سنگ استفاده می‌شود. تقویت سنگ شامل پیچ‌سنگ‌ها و مهری‌ها است که داخل سنگ قرار می‌گیرند تا از سست شدگی و حرکت بلوک‌های سنگی جلوگیری کنند. در حالت کلی برای توده سنگ‌هایی با مقاومت متوسط مناسب هستند؛ برای سنگ‌های ضعیف تا خیلی ضعیف که بیشتر چسبنده هستند کارآمد نیست. در این موارد اغلب از نصب نگهداری استفاده می‌شود. نگهداری شامل قاب‌های فولادی و بتن پاشیده و پوشش‌های بتنی است (Hoek, 2006).

برای پایدار کردن سازه‌های سنگی ابتدا باید مقاومت توده سنگ تا حد امکان حفظ‌شده و یا بهبود یابد. باید اجازه داده شود مقدار بار وارد بر سیستم نگهداری به سطح قابل قبولی کاهش یابد. یکی از معیارهای ارزیابی پایداری سازه، مقدار جابه‌جایی‌های رخ‌داده است. همچنین بار وارد بر پوشش نیز علاوه بر صلبیت سیستم با این مقدار مرتبط است. با توجه به مطالب ارائه شده در ادامه سیستم نگهداری مناسب برای پایداری مغار دریچه‌های کنترل سد چم شیر تحلیل می‌شود. با به‌کارگیری روش‌های تجربی و عددی سیستم نگهداری مغارها طراحی می‌شود.

۲-۶ طبقه‌بندی سنگ با روش‌های تجربی

برای طبقه‌بندی توده سنگ اطراف مغار از شاخص کیفیت توده سنگ و رده‌بندی ژئومکانیکی که از پرکاربردترین روش‌های تجربی هستند استفاده‌شده که در ادامه جزئیات ارائه شده است.

۱-۲-۶ رده‌بندی ژئومکانیکی

در بخش ۱-۲-۲ در مورد این رده‌بندی به صورت کامل توضیح داده شد. جدول (۱-۶) مقادیر متغیرهای موردنیاز برای این سیستم طبقه‌بندی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده

می‌شود مقدار RMR، ۵۹ به دست آمده به این معنا که سنگ‌های محدوده‌ی مغار در این طبقه‌بندی در رده‌ی سنگ‌های متوسط قرار دارند.

جدول (۶-۱): طبقه‌بندی RMR توده سنگ اطراف مغار

متغیر	توصیف شاخص	امتیاز
مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر	۶۰/۶ مگا پاسکال	۷
شاخص کیفیت سنگ (RQD)	٪۷۵-٪۹۰	۱۷
شرایط جهت‌داری درزه‌ها	نامساعد	۱۰-
وضعیت سطح درزه‌ها	۵-۱ میلی‌متر	۱۰
فاصله‌داری درزه‌ها	۲ متر	۲۰
وضعیت آب	به‌طور کامل خشک	۱۵
RMR	متوسط	۵۹

۲-۲-۶ شاخص کیفیت توده سنگ

برای حصول اطمینان بیشتر در روش‌های تجربی بهتر است از چندین روش تجربی استفاده کرد. سیستم طبقه‌بندی Q از دیگر روش‌های طراحی تجربی است. مقدار این متغیر به‌صورت مستقیم به دست نیامده و از رابطه (۶-۱) برای تعیین شاخص کیفیت توده سنگ استفاده می‌شود.

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (۶-۱)$$

RMR امتیاز رده‌بندی ژئومکانیکی

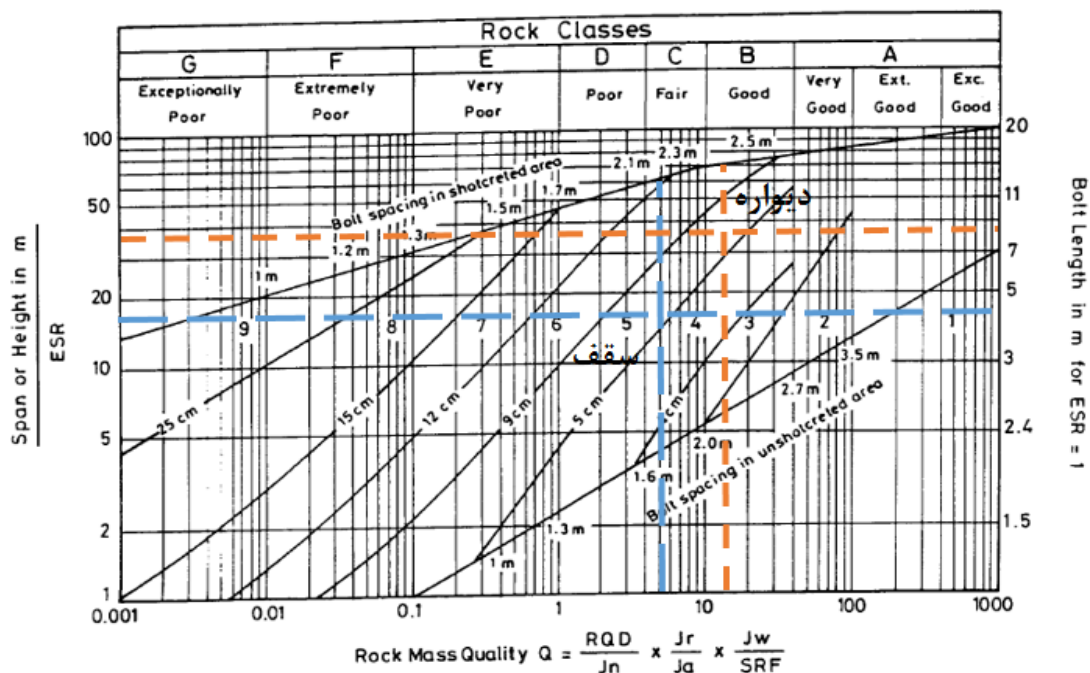
Q شاخص کیفیت توده سنگ

مقدار این شاخص برای سقف ۵/۳ برآورد شده است. برای دیواره مغار با در نظر گرفتن ۲/۵ برابر شاخص کیفیت توده سنگ مقدار ۱۳/۲ به دست آمده است.

۳-۲-۶ برآورد اولیه سیستم نگهداری مغار

روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها از جمله شاخص‌ترین شیوه‌های تجربی بررسی پایداری تونل به شمار می‌آید. در این روش‌ها با تعیین مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌ها میزان نگهداری مورد نیاز پیشنهاد می‌شود. نگهداری پیشنهادی بر اساس طبقه‌بندی RMR شامل ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر بتن پاشیده در سقف

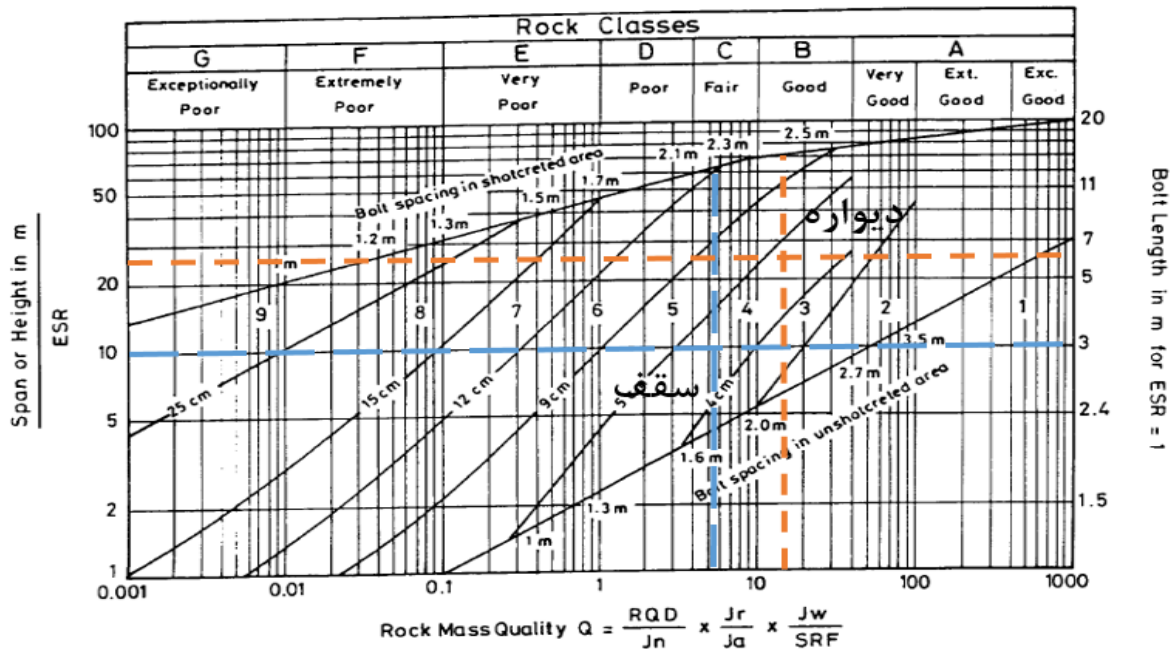
و ۳ سانتی متر در دیواره‌ها و پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی به قطر ۲۰ میلی متر با طول ۴ متر و فاصله‌داری ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیواره‌ها است. با مدنظر قرار دادن ۱ برای ضریب نگهداری فضای حفاری، بعد معادل برای سقف ۱۵ متر و برای دیواره ۳۷ متر در نظر گرفته شده است. نگهداری دائم پیشنهاد شده با شاخص کیفیت توده سنگ در نمودار (۶-۱) نشان داده شده است. در نمودار به‌روز شده‌ی کیفیت توده سنگ سیستم نگهداری مورد نیاز برای سقف و دیواره در گروه ۵ قرار می‌گیرد. در این گروه برای پایدارسازی سقف مغار به ۵ تا ۹ سانتی متر بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌های با طول ۴ متر و فاصله‌داری ۲/۲ نیاز است. در این گروه برای پایدارسازی دیواره به ۵ تا ۹ سانتی متر بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۸ متر و فاصله‌داری ۲/۴ متر نیاز است.



نمودار (۶-۱): نگهداری دائم بر اساس شاخص کیفیت توده سنگ (Grimstad & Barton, 1993)

با توجه به اینکه نگهداری پیشنهاد شده در این نمودار به‌عنوان نگهداری دائم است برای اینکه بتوان به‌عنوان نگهداری موقت از آن استفاده کرد باید مقدار Q را ۵ برابر کرد و یا مقدار ESR را ۱/۵ برابر در نظر گرفت. نگهداری موقت پیشنهاد شده با شاخص کیفیت توده سنگ در نمودار (۶-۲) نشان داده شده است. در نمودار کیفیت توده سنگ سیستم نگهداری موقت مورد نیاز برای سقف و دیواره در گروه ۴ قرار می‌گیرد. در این گروه برای پایدارسازی سقف مغار به ۴ تا ۱۰ سانتی متر بتن پاشیده‌ی غیرمسلح و

پیچ‌سنگ‌های با طول ۳ متر و فاصله‌داری ۲/۲ نیاز است. در این گروه برای پایدارسازی دیواره به ۴ تا ۱۰ سانتی‌متر بتن پاشیده غیرمسلح و پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۶ متر و فاصله‌داری ۲/۴ متر نیاز است.



نمودار (۲-۶): نگهداری موقت بر اساس شاخص کیفیت توده سنگ (Grimstad & Barton, 1993)

۳-۶ ارزیابی عملکرد سیستم نگهداری مغار به روش عددی

برای مدل‌سازی اولیه‌ی سیستم نگهداری با به‌کارگیری روش عددی، مغار در چند مرحله حفر و نصب سیستم پس از حفاری انجام‌شده است. بتن پاشیده با دستور لاینر^۱ و پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق سیمانی با دستور کابل^۲ به‌عنوان سیستم نگهداری مغار دریچه‌های کنترل انتخاب‌شده‌اند.

۱-۳-۶ مشخصات مکانیکی سیستم نگهداری

مشخصات مکانیکی تعیین‌شده برای اجزا سیستم نگهداری مغار دریچه‌های کنترل با به‌کارگیری روش عددی در جدول‌های (۲-۶)، (۳-۶) و (۴-۶) مشاهده می‌شود.

^۱ liner

^۲ cable

جدول (۶-۲): مشخصات بتن پاشیده

متغیر	واحد	مقدار
ضخامت	سانتی متر	۱۵
مدول الاستیک	گیگا پاسکال	۲۰
نسبت پواسون	-	۰/۲
مقاومت کششی	مگا پاسکال	۲/۷

جدول (۶-۳): مشخصات سطح تماس بین بتن پاشیده و سنگ

متغیر	واحد	مقدار
چسبندگی	مگا پاسکال	۰/۶
زاویه اصطکاک	درجه	۳۰
سختی نرمال	گیگا پاسکال بر متر	۱/۶
سختی برشی	مگا پاسکال بر متر	۵/۶

جدول (۶-۴): مشخصات پیچ سنگ‌های تمام تزریقی

متغیر	واحد	مقدار
طول در سقف و دیواره	متر	۸
فاصله‌داری در سقف	مترمربع	۱/۵×۲
فاصله‌داری در دیواره	مترمربع	۲×۲
سطح مقطع	میلی متر مربع	۸۰۴/۲۵
چگالی	کیلوگرم بر مترمکعب	۷۸۴۶
مدول الاستیک	گیگا پاسکال	۲۰۰
مقاومت تسلیم کششی	کیلو نیوتن	۴۰۰

متغیرهای موردنیاز برای مدل سازی مشخصات مکانیکی دوغاب سیمانی شامل قطر چال‌ها ۷۶ میلی متر (شعاع حلقه برابر با ۲۲ میلی متر)، مدول الاستیک دوغاب سیمان برابر با ۱۵ گیگا پاسکال، نسبت پواسون ۰/۲، مدول برشی دوغاب سیمانی ۶/۲۵ گیگا پاسکال و مقاومت فشاری تک محوری ۳۵ مگا

پاسکال است. برای محاسبه مقاومت چسبندگی و سختی دوغاب سیمانی از روابط (۲-۶) و (۳-۶) استفاده و مقادیر برآورد شده در جدول (۵-۶) ارائه شده است.

$$C = \pi \cdot D \cdot \tau_1 \cdot Q_B \quad (2-6)$$

C مقاومت چسبندگی دوغاب سیمانی (مگا نیوتن بر متر)

D قطر پیچ سنگ (متر)

τ_1 نصف مقاومت فشاری تک محوری دوغاب سیمانی

Q_B ضریب چسبندگی (در بهترین شرایط برابر با ۱)

$$k = \frac{2\pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (3-6)$$

k سختی دوغاب سیمانی (گیگا پاسکال)

t شعاع حلقه (متر)

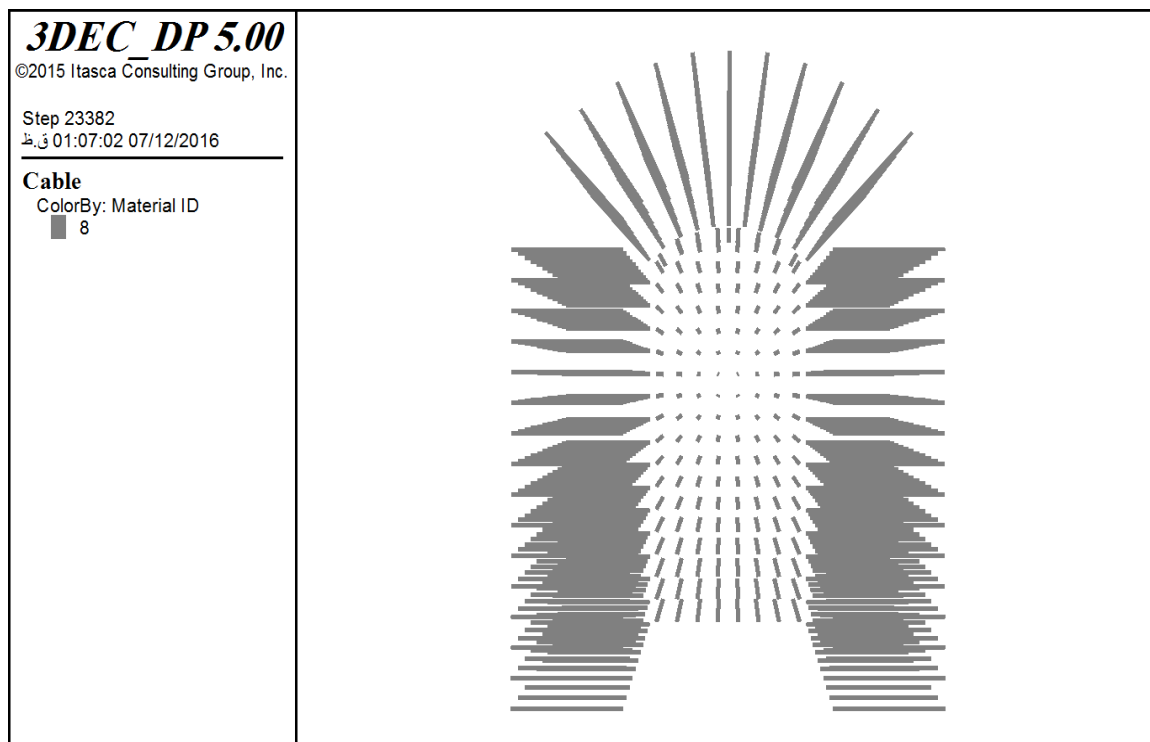
G مدول برشی دوغاب سیمانی (گیگا پاسکال)

جدول (۵-۶): مشخصات دوغاب سیمانی بکار برده شده برای تزریق پیچ سنگ ها

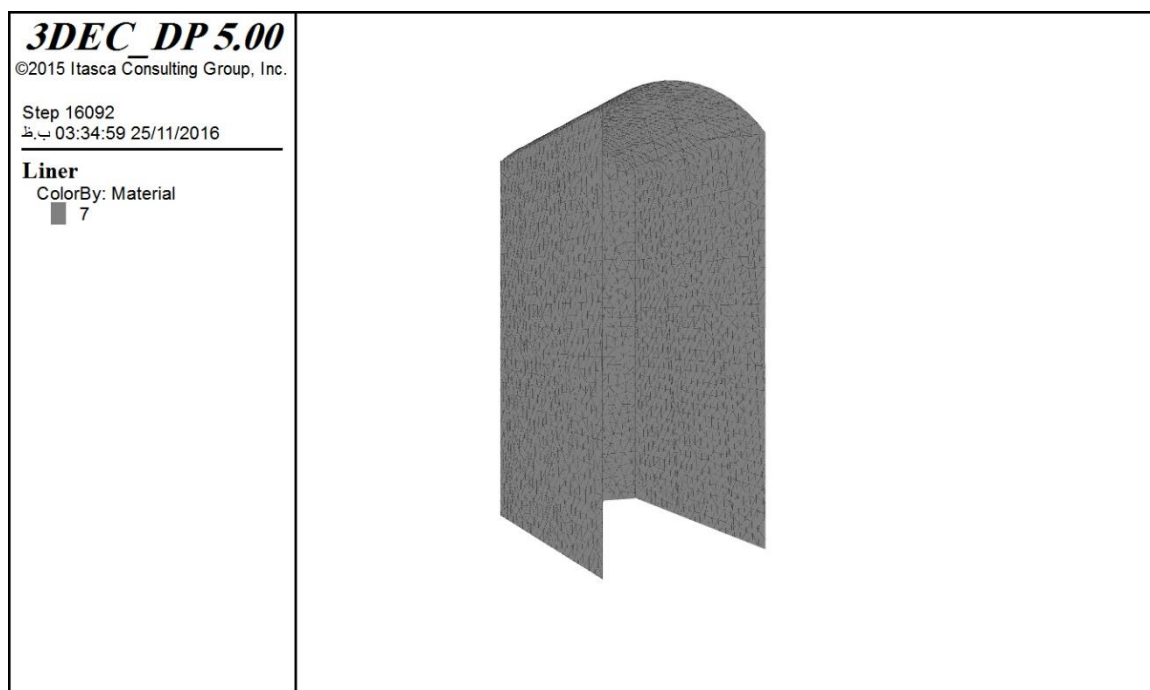
مقدار	واحد	متغیر
۱/۷۵	مگا نیوتن بر متر	مقاومت چسبندگی دوغاب سیمانی
۴/۵۴	گیگا پاسکال	سختی دوغاب سیمانی

۲-۳-۶ تحلیل پایداری مغار دارای سیستم نگهداری

در شکل (۱-۶) سیستم نگهداری نصب شده در مدل سازی عددی مغار دریچه های کنترل شامل بتن پاشیده و پیچ سنگ های تمام تزریق سیمانی مشاهده می شود.



(الف)

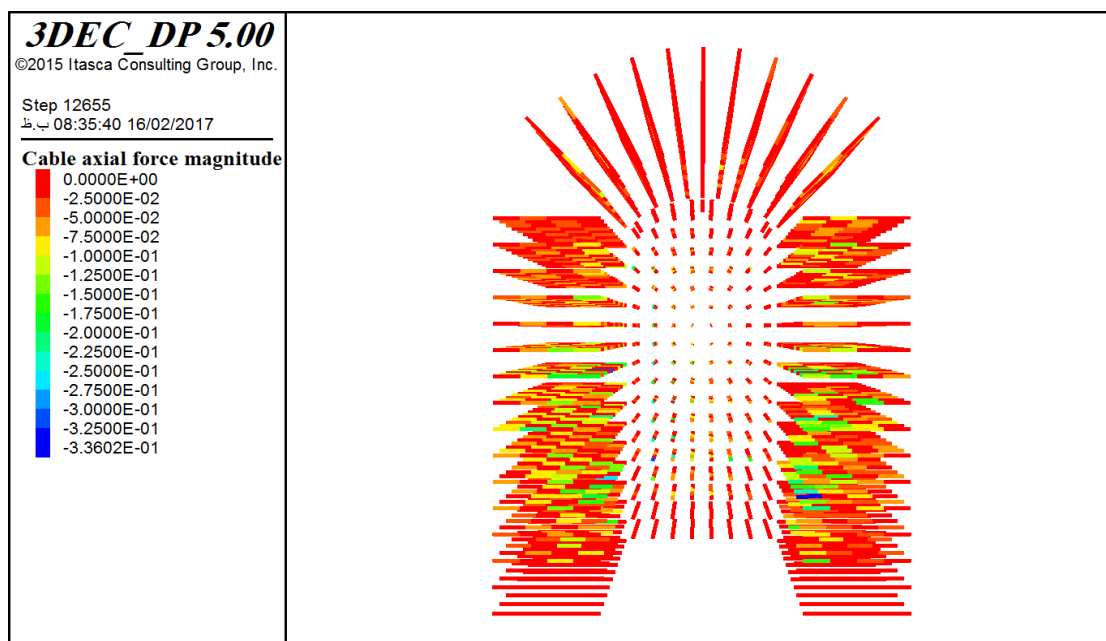


(ب)

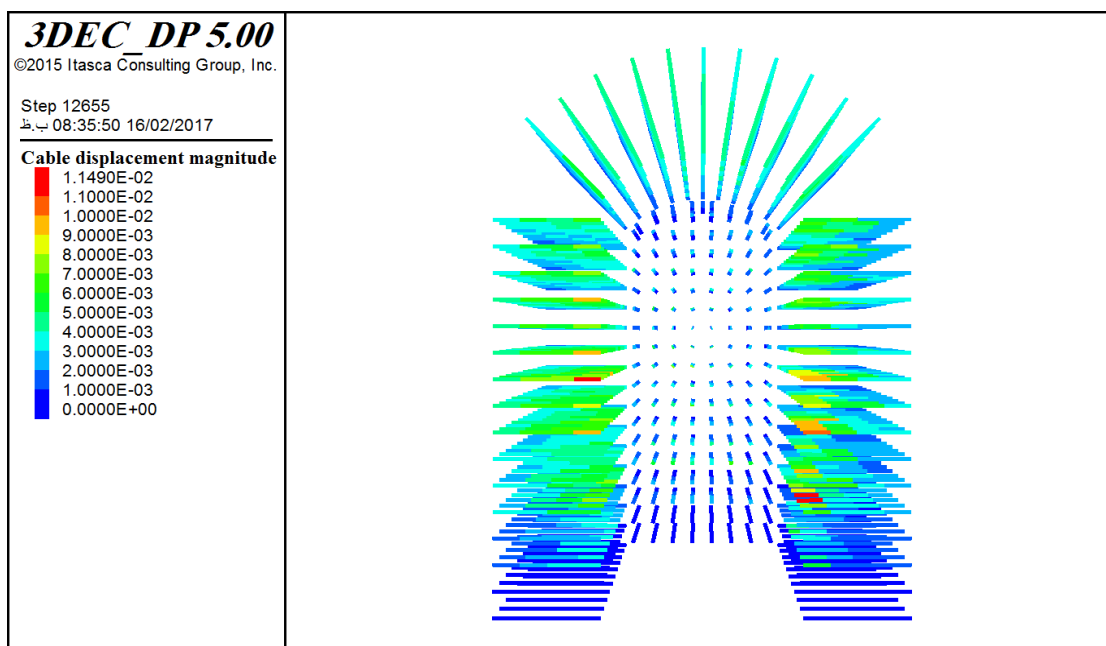
شکل (۱-۶): سیستم نگهداری مغاره؛ (الف) پیچ سنگ‌های تمام تزریقی، (ب) بتن پاشیده

۳-۳-۶ نتایج مدل سازی عددی سیستم نگهداری

در شکل (۲-۶) نیروی محوری وارده بر پیچ سنگ ها و جابه جایی پیچ سنگ ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیش ترین نیروی محوری وارد شده به پیچ سنگ ها حدود ۳۳۶ کیلو نیوتن که کمتر از مقاومت تسلیم پیچ سنگ (۴۰۰ کیلو نیوتن) است. بیش ترین جابه جایی در پیچ سنگ ها در فواصل نزدیک سطوح حفاری رخ داده است.



(الف)



(ب)

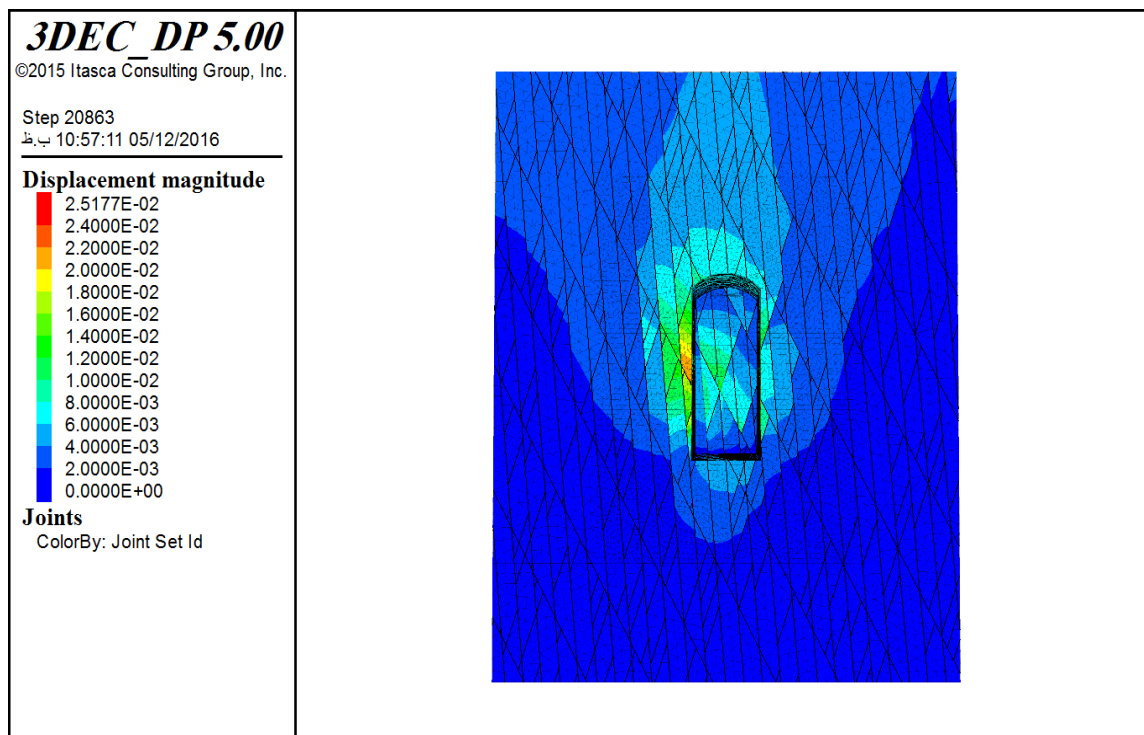
شکل (۲-۶): (الف) نیروی محوری وارده بر پیچ سنگ ها (مگا نیوتن) و (ب) جابه جایی پیچ سنگ ها (متر)

۳-۳-۳-۶ جابه‌جایی‌ها

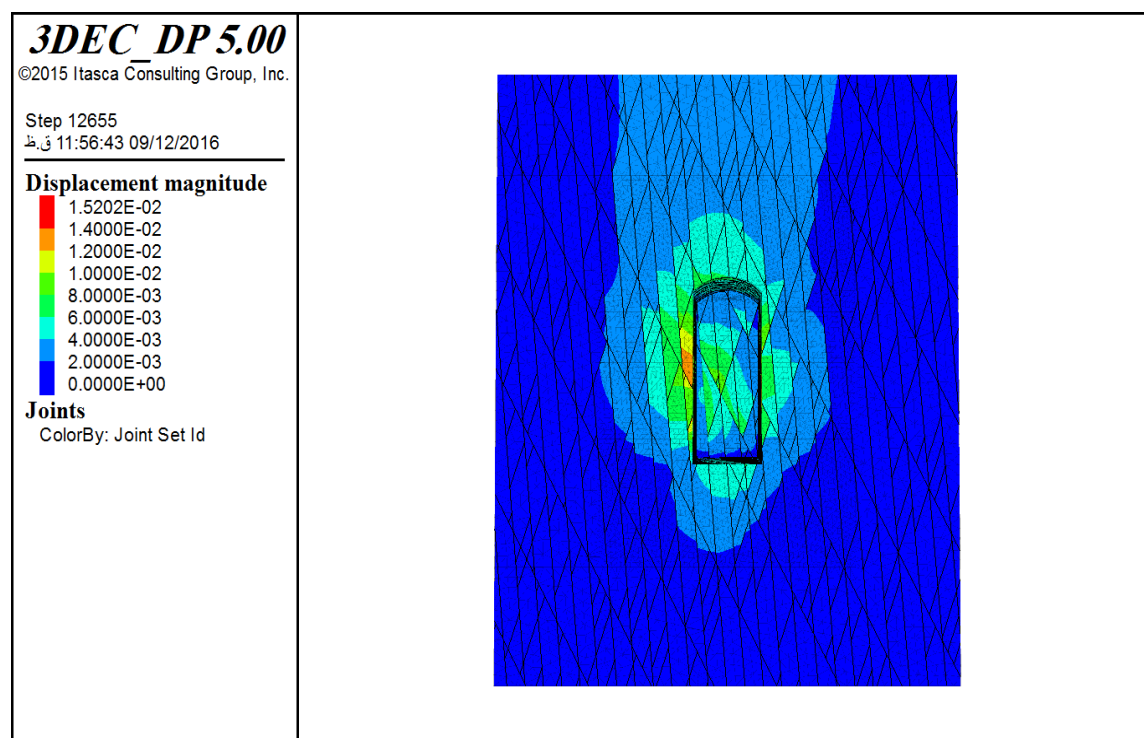
شکل (۳-۶) نشان دهنده‌ی جابه‌جایی برآیند در کل مدل قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کانتورهای جابه‌جایی بعد از نصب نگهداری محدودتر و میزان جابه‌جایی‌ها کاهش داشته است. شکل (۴-۶) جابه‌جایی‌های افقی و قائم جداره‌ی مغار ارائه شده است. بیش‌ترین جابه‌جایی افقی به میزان $1/43$ سانتی‌متر در دیواره‌ی چپ اتفاق افتاده که نسبت به حالت بدون نگهداری ۴۱ درصد کاهش داشته است. دیواره راست در حدود $1/26$ سانتی‌متر جابه‌جا شده که نسبت به حالت بدون نگهداری ۲۶ درصد کاهش داشته است. سقف به میزان $0/8$ سانتی‌متر جابه‌جا شده که نسبت به حالت بدون نگهداری ۲۰ درصد کاهش داشته است. بررسی نتایج نقاط شاهد ۷، ۱۲ و ۲۲ در جدول (۶-۶) نشان داده شده است.

جدول (۶-۶): مقایسه مقادیر جابه‌جایی جداره‌ی مغار بدون سیستم و دارای سیستم نگهداری

نقطه‌ی شاهد	جابه‌جایی		
	بدون نگهداری	با نگهداری	مقدار کاهش
واحد	میلی‌متر	میلی‌متر	درصد
سقف	۶/۳	۵	۲۰
دیواره راست	۲/۸	۲/۶	۷
دیواره چپ	۷	۶/۳	۱۰

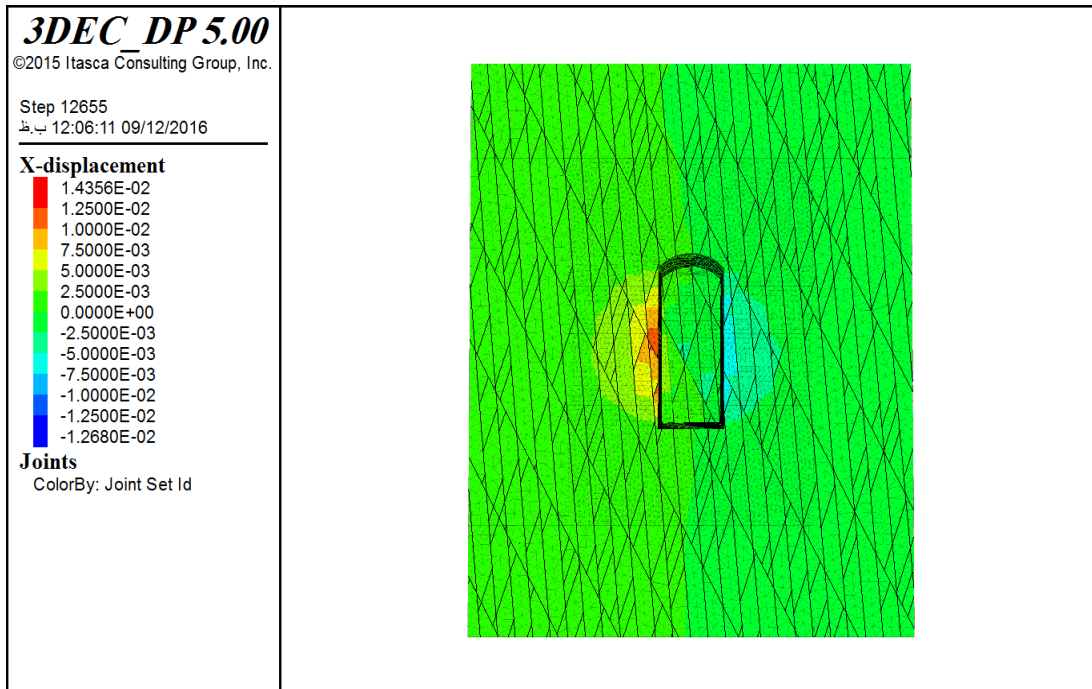


(الف)

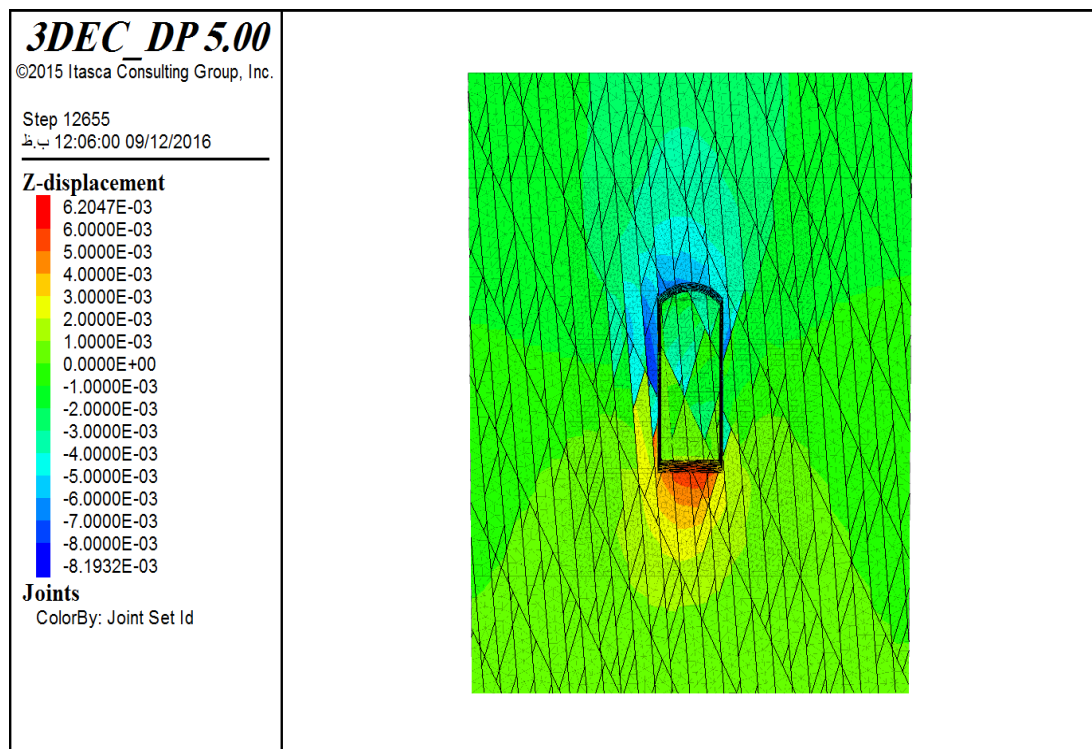


(ب)

شکل (۳-۶): جابه‌جایی برآیند مغار (الف) بدون سیستم و (ب) دارای سیستم نگهداری (متر)



(الف)



(ب)

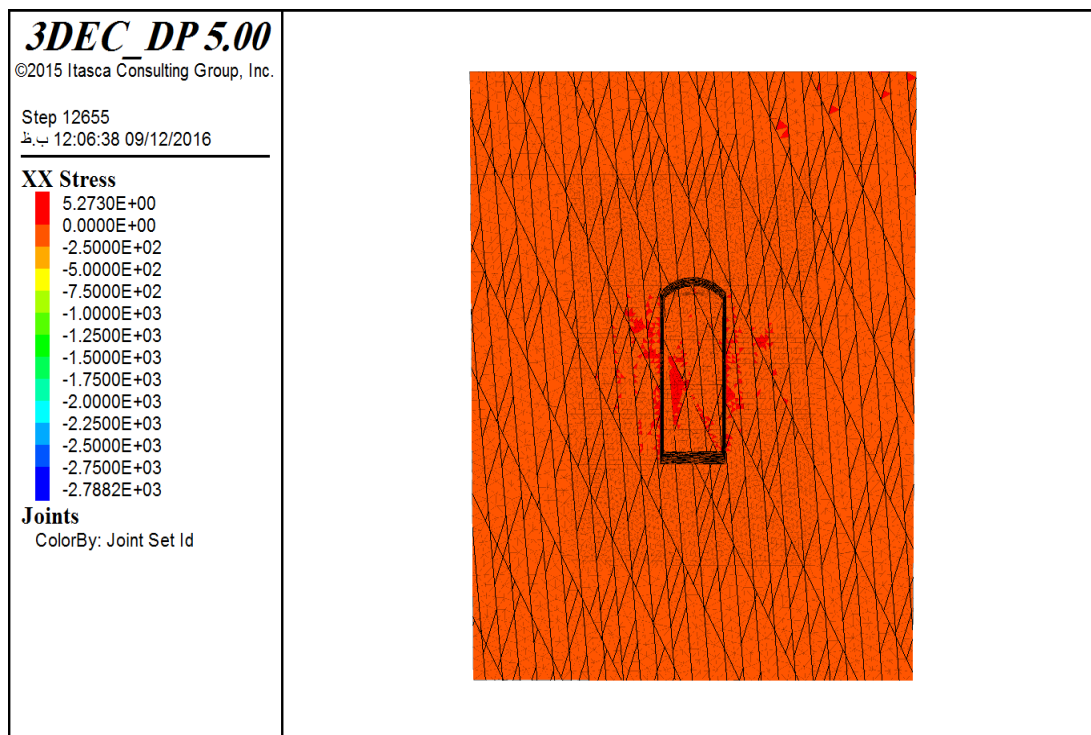
شکل (۴-۶): جابه‌جایی جداره‌ی مغار (الف) در راستای افقی و (ب) در راستای قائم (متر)

۲-۳-۳-۶ وضعیت تنش‌ها

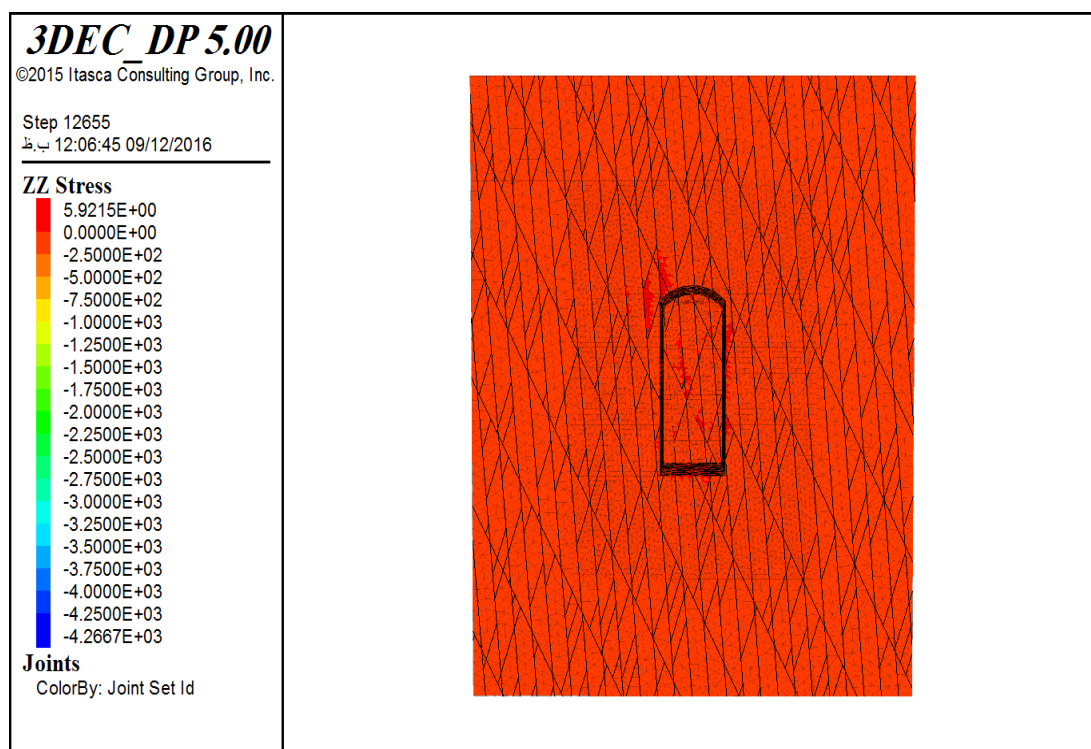
در شکل (۵-۶) تنش در جهت محورهای مختصات و در شکل (۶-۶) تنش‌های اصلی برای مقایسه با حالت بدون سیستم نگهداری ارائه شده است. در جدول (۷-۶) مقادیر تنش‌ها قبل و بعد از نگهداری مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش‌های کششی در راستای افقی و قائم کاهش و تنش‌های فشاری افزایش داشته است. در مورد تنش‌های اصلی تنش‌های فشاری و کششی هر دو افزایش داشته است.

جدول (۷-۶): مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از نگهداری

تنش‌ها (کیلو پاسکال)	قبل از نگهداری	بعد از نگهداری
تنش در راستای افقی	تنش فشاری ۲۷۲۰	۲۷۸۰
	تنش کششی ۵/۹۸	۵/۲۷
تنش در راستای قائم	تنش فشاری ۴۲۱۰	۴۲۶۰
	تنش کششی ۶/۲۳	۵/۹۲
تنش اصلی بیشینه	تنش فشاری ۱۴۸۰	۱۵۱۲
	تنش کششی ۶/۳۶	۶/۴
تنش اصلی کمینه	تنش فشاری ۵۴۵۰	۵۵۴۷
	تنش کششی ۱/۳۱	۱/۴۹

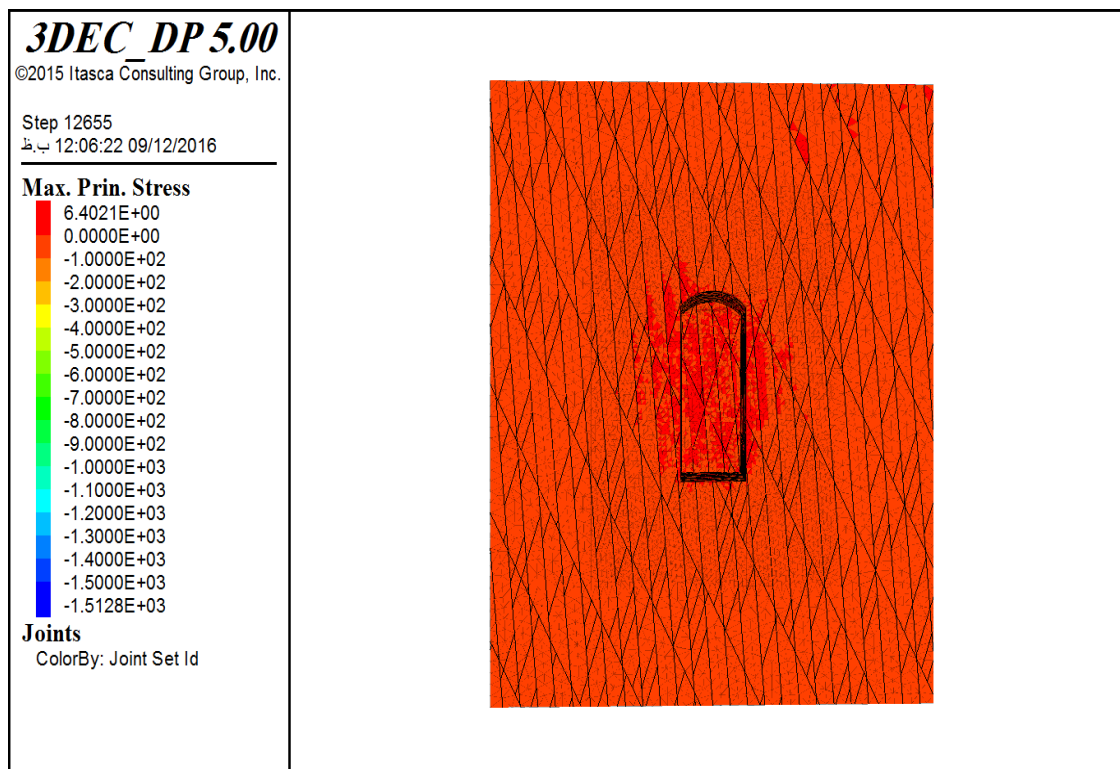


(الف)

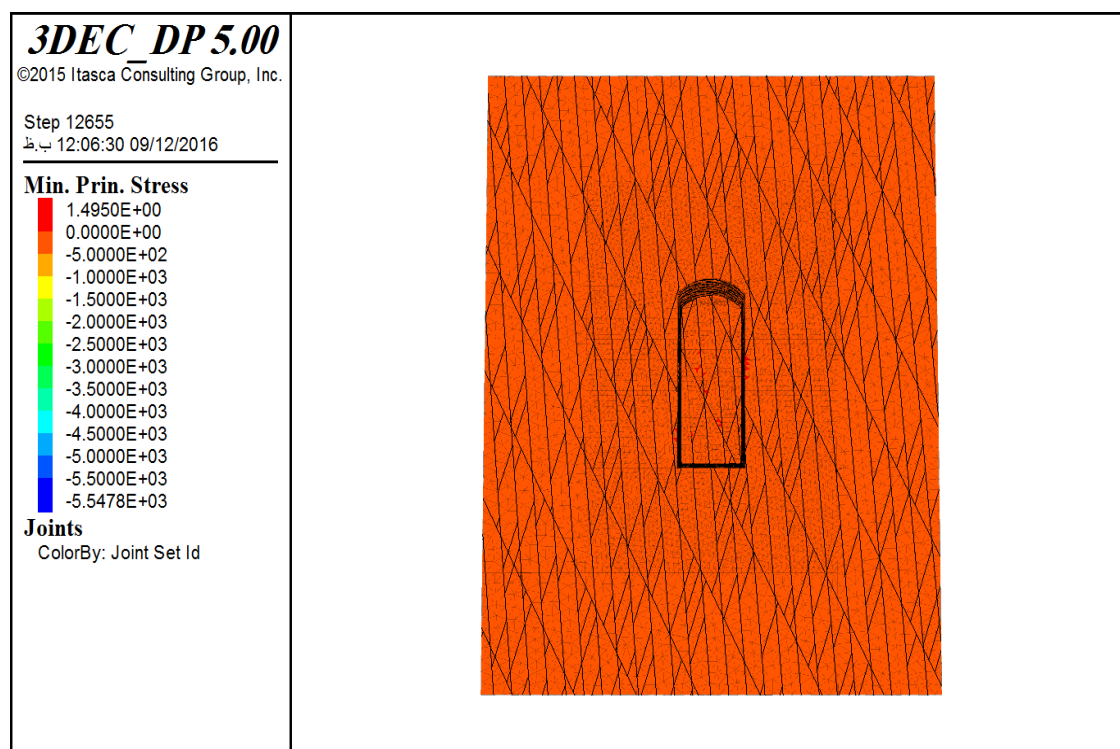


(ب)

شکل (۵-۶): (الف) تنش در راستای افقی و (ب) تنش در راستای قائم (کیلو پاسکال)



(الف)

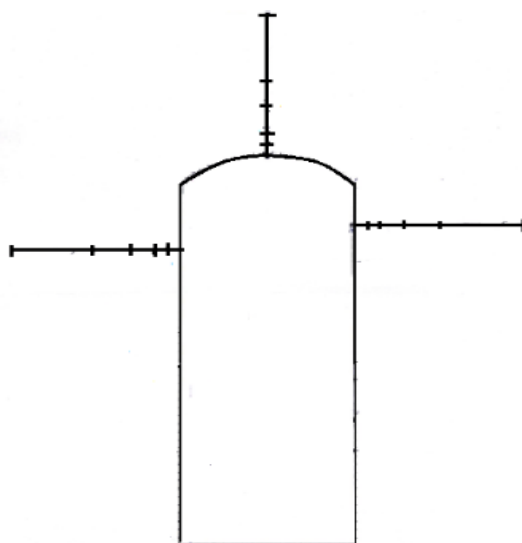


(ب)

شکل (۶-۶): (الف) بیشترین و (ب) کمترین تنش اصلی (تنش فشاری = منفی)

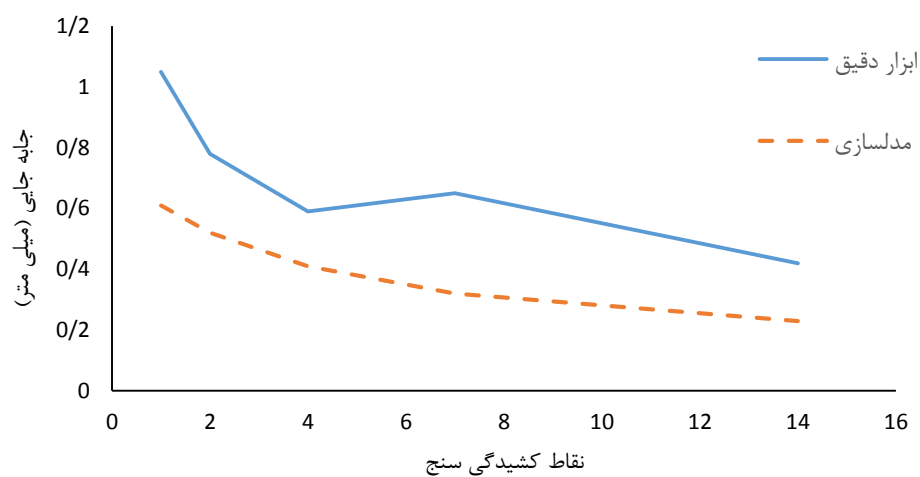
۴-۶ اعتبارسنجی

به منظور بررسی رفتار زمین بعد از هر مرحله حفاری و نصب سیستم نگهداری، ابزار دقیق نصب شده است. برای بررسی جابه‌جایی‌ها در مغار از کشیدگی سنج‌های پنج نقطه‌ای گمانه‌ای استفاده شده است که در شکل (۷-۶) نمایی از محل نصب ابزار در صفحه X-Z مشاهده می‌شود و در راستای Y ابزار در صفحه میانی مغار قرار دارند. شکل (۸-۶) تصویر واقعی از محل نصب ابزار در مغار را نشان می‌دهد.

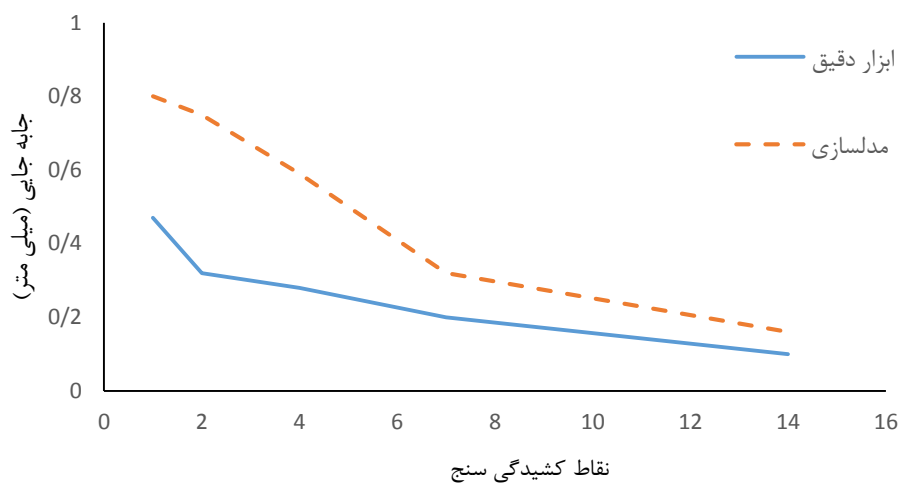


شکل (۷-۶): نمایی از محل نصب ابزار دقیق در مغار (گزارش مکانیک سنگ، ۱۳۹۲)

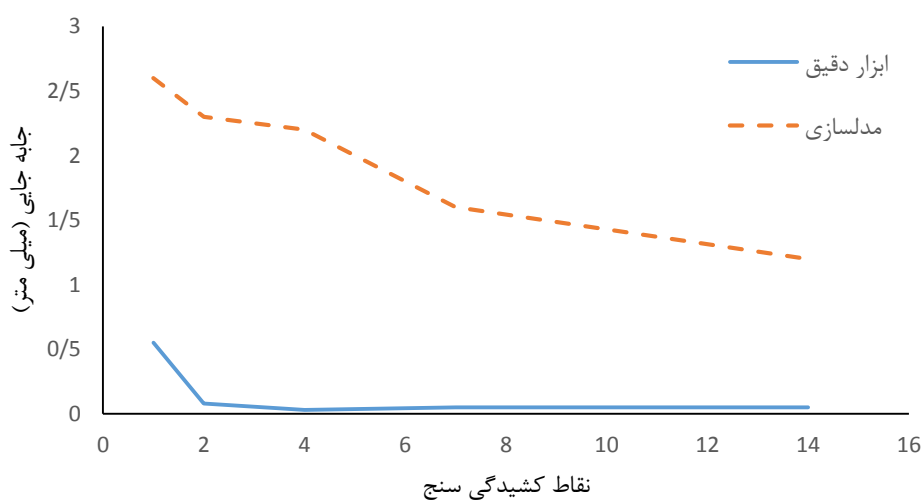
نقاط شاهد طوری در نظر گرفته شده‌اند که امکان مقایسه نتایج ابزار دقیق با نتایج مدل وجود داشته باشد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج ابزار دقیق مغار در نقاط نصب کشیدگی سنج مقایسه شده و در نمودار (۳-۶) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند جابه‌جایی‌ها مشابه بوده و با افزایش فاصله از سطح حفاری جابه‌جایی‌ها کاهش داشته است اما مقادیر جابه‌جایی‌ها در بعضی نقاط نزدیک و در بعضی نقاط تفاوت زیادی دارد.



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار (۳-۶): مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق و مدل سازی در (الف) دیواره راست (ب) دیواره چپ (ج) سقف

۵-۶ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا توده سنگ محدوده مغار با استفاده از روش‌های تجربی رده‌بندی ژئومکانیکی و شاخص کیفیت توده سنگ طبقه‌بندی شده و سنگ این محدوده در رده‌ی سنگ‌های متوسط تا خوب قرار گرفته است. سیستم نگهداری اولیه بر اساس پیشنهاد روش‌های تجربی ارائه و سپس با استفاده از روش عددی سیستم نگهداری پیشنهاد شده است که شامل بتن پاشیده و پیچ‌سنگ است. ضخامت بتن پاشیده ۱۵ سانتی‌متر در تمام جداره‌ی مغار، پیچ‌سنگ‌هایی به قطر ۳۲ میلی‌متر و طول ۸ متر با فاصله‌داری $2 \times 1/5$ در سقف و 2×2 در دیواره در نظر گرفته شده است. نتایج بعد از نصب سیستم نگهداری بررسی شد. پس از حصول اطمینان از درگیری سیستم نگهداری با توده سنگ، جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در حالت قبل و بعد از نصب نگهداری مقایسه شده است. بیش‌ترین جابه‌جایی افقی به میزان $1/43$ سانتی‌متر در دیواره‌ی چپ اتفاق افتاده که نسبت به حالت بدون نگهداری ۴۱ درصد کاهش داشته است. دیواره راست در حدود $1/26$ سانتی‌متر جابه‌جا شده که نسبت به حالت بدون نگهداری ۲۶ درصد کاهش داشته است. جابه‌جایی قائم در سقف $0/8$ سانتی‌متر که نسبت به حالت بدون نگهداری ۲۰ درصد کاهش داشته و جابه‌جایی قائم در کف $0/62$ سانتی‌متر نسبت به حالت بدون نگهداری ۱۲ درصد کاهش داشته است. مقایسه تنش‌ها نشان می‌دهد که مقدار تنش‌های فشاری در راستای افقی و قائم افزایش و تنش‌های کششی کاهش داشته است. نتایج ابزار دقیق، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را تایید نمی‌کند و تفاوت مقدار جابه‌جایی‌ها در برخی نقاط بسیار زیاد است.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۷-۱ مقدمه

طرح سد و نیروگاه چم شیر بر روی رودخانه زهره در استان کهگیلویه و بویراحمد در حال احداث است. در بخش انتهایی تونل تخلیه کننده، مغار درپچه‌های کنترل به عرض ۱۵، طول ۲۳ و ارتفاع ۳۷ متر احداث شده است. با توجه به موقعیت قرارگیری مغار از لحاظ زمین‌شناسی و ناپیوستگی‌های موجود، ناپایداری در این فضای بزرگ موجب اخلاص در عملکرد سازه در طول عمر آن می‌شود. برای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری سازه مذکور از روش‌های تجربی و عددی استفاده شده است که در ادامه نتایج تحلیل‌ها ارائه شده است.

۷-۲ نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از بررسی زمین‌شناسی منطقه و ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مغار، ویژگی‌های مورد نیاز برای تحلیل جمع‌آوری شده و سپس با استفاده از نرم افزار 3DEC مدل‌سازی انجام شده است. بررسی نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان جابه‌جایی در امتداد درزه‌ها در دیواره چپ به میزان ۲/۵۱ سانتی‌متر رخ داده است. مقایسه تنش‌ها قبل و بعد از حفر مغار نشان داد که توزیع مجدد تنش‌ها در منطقه باعث شده که تنش‌های فشاری بعد از حفر کاهش و تنش‌های کششی افزایش پیدا کند. به‌منظور بررسی میزان تأثیر ویژگی‌ها بر جابه‌جایی مغار، تحلیل حساسیت بر روی نسبت تنش، ویژگی‌های مقاومتی سنگ و ناپیوستگی‌ها انجام شده است. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار نسبت تنش میزان جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند و برای همه مقادیر نسبت تنش بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در امتداد محل تقاطع درزه‌ها روی دیواره سمت چپ رخ می‌دهد. افزایش مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک سنگ، باعث افزایش مقاومت برشی سنگ شده و میزان جابه‌جایی برآیند مغار کاهش یافته است. با افزایش زاویه اصطکاک درزه مقاومت برشی درزه افزایش و میزان جابه‌جایی‌ها کاهش یافته است. با افزایش سختی نرمال و برشی درزه، مقاومت درزه در برابر جابه‌جایی افزایش و جابه‌جایی برآیند کاهش یافته است. با افزایش سختی برشی درزه جابه‌جایی برشی درزه کاهش داشته است.

توده سنگ محدوده مغار با استفاده از روش‌های تجربی رده‌بندی ژئومکانیکی و شاخص کیفیت توده سنگ طبقه‌بندی شده و سنگ این محدوده در رده‌ی سنگ‌های متوسط تا خوب قرار گرفته است. سیستم نگهداری اولیه بر اساس پیشنهاد روش‌های تجربی ارائه و سپس با استفاده از روش عددی سیستم نگهداری پیشنهاد شده است. نتایج بعد از نصب سیستم نگهداری بررسی شد. پس از حصول اطمینان از درگیری سیستم نگهداری با توده سنگ، جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در حالت قبل و بعد از نصب نگهداری مقایسه شده است. در جدول (۷-۱) نگهداری‌های پیشنهاد شده با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است. استفاده از روش‌های تجربی برای تعیین سیستم نگهداری اولیه با در نظر گرفتن محدودیت‌های آن‌ها می‌تواند مفید باشد.

جدول (۷-۱): نگهداری پیشنهادی روش‌های مختلف

روش	بتن پاشیده	پیچ سنگ
RMR	۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سقف و ۳ سانتی‌متر در	تمام تزریقی به قطر ۲۰ میلی‌متر با طول ۴ متر و فاصله‌داری ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیوارها
Q	۴ تا ۱۰ سانتی‌متر بتن پاشیده‌ی غیرمسلح در	به طول ۳ متر و فاصله‌داری ۲/۲ در سقف و به طول ۶ متر و فاصله‌داری ۲/۴ در دیوارها
3DEC	۱۵ سانتی‌متر در سقف و دیوارها	با قطر ۳۲ میلی‌متر و طول ۸ متر با فاصله‌داری ۱/۵ × ۲ در سقف و ۲ × ۲ در دیواره

در جدول (۷-۲) بیش‌ترین جابه‌جایی جداره‌ی مغار بدون سیستم و دارای سیستم نگهداری مقایسه شده است. بیش‌ترین جابه‌جایی در دیواره چپ اتفاق افتاده که با نصب سیستم نگهداری ۴۱ درصد کاهش داشته است. مقایسه نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که روند جابه‌جایی‌ها مشابه بوده و با افزایش فاصله از سطح حفاری میزان جابه‌جایی‌ها کاهش داشته است. مقادیر جابه‌جایی‌ها در بعضی نقاط تفاوت زیادی و در بعضی نقاط تفاوت کمی با هم دارند.

جدول (۷-۲): مقایسه بیشترین جابه‌جایی جداره‌ی مغار بدون سیستم و دارای سیستم نگهداری

بیش‌ترین جابه‌جایی	بدون نگهداری	با نگهداری	مقدار کاهش
واحد	سانتی‌متر	سانتی‌متر	درصد
سقف	۱	۰/۸	۲۰
کف	۰/۷۱	۰/۶۲	۱۲
دیواره راست	۱/۷۱	۱/۲۶	۲۶
دیواره چپ	۲/۴۶	۱/۴۳	۴۱

۳-۷ پیشنهادها

موارد زیر جهت بررسی‌های آینده پیشنهاد می‌گردد.

۱. استفاده از داده‌های ابزار دقیق به‌منظور تحلیل برگشتی ویژگی‌های توده سنگ پیشنهاد می‌شود.
۲. تحلیل دینامیکی و مطالعه تأثیر انفجارهای زیرزمینی می‌تواند مفید باشد.
۳. به‌کارگیری محیط معادل و مقایسه با محیط ناپیوسته پیشنهاد می‌شود.

منابع و مراجع

اسلامی، م.، روشنی، ا.، افتخاری، ع.، و ناصحی، م. (۱۳۹۴). "استفاده از شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری دائم مغار پمپاژ تونل آب بر گلاب"، دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران، تونل‌ها و آینده.

خانی زاده بهابادی، م.، محبی، م.، دهقان‌زاده بافقی، ر.، و مقصودی، ع. (۱۳۹۳). "روش‌های عددی در مسائل مکانیک سنگ"، همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.

دریایی، ا.، رحمان نژاد، ر.، ربیعی، م.، شریفی بروجردی، م.، عبداللهی پور، ا.، و حسین‌علی نژادی، ع. (۱۳۹۳). "تحلیل پایداری و ارائه روش باز کردن مغار زیرزمینی نیروگاه تنگ معشوره با نرم‌افزار *FLAC3D*، پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، مصلی امام خمینی تهران.

دهقانی، ب.، فرامرزی، ل.، و صانعی، م. (۱۳۹۳). "تحلیل پایداری مغارهای نیروگاه سد بختیاری با استفاده از نرم‌افزار *3DEC*"، نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۸، ۹۵-۱۰۸.

سعیدی، ا.، رستمی، م.، وحیدی، ح.، و پیروی نسب، پ. (۱۳۹۰). "مقایسه سیستم نگهداری با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، اتافک شیرهای کنترل تونل‌های انحراف آب سد سردشت". اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی.

گزارش مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگ (۱۳۹۲)، مطالعات مرحله دوم طرح سد و نیروگاه چم شیر، شماره گزارش ۵۵۸۹۶۰۲.

گزارش زمین‌شناسی مهندسی (۱۳۹۱)، مطالعات مرحله دوم طرح سد و نیروگاه چم شیر، شماره گزارش ۵۵۸۹۶۰۲-۳۱۱۰.

موسی زاده، س. ا.، گشتاسبی، ک.، و قزوینیان، ع. (۱۳۹۲). "مقایسه روش‌های عددی مختلف در تحلیل پایداری مغار نیروگاه زیرزمینی مسجدسلیمان"، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۵، ۸۹-۹۸.

مومیوند، ح. (۱۳۸۶). "بررسی تخمین تنش‌های برجای قائم و افقی در سنگ و ارائه راه‌کار تجربی مناسب"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

نجمی نیا، ح.، احمدی، م.، و مهین روستا، ر. (۱۳۹۴). "بررسی اثر آب بر پایداری فضای زیرزمینی و عملکرد سیستم نگهداری با نگرشی ویژه به مغار طرح تلمبه ذخیره‌ای رودبار لرستان"، دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران، تونل‌ها و آینده.

- Barton, N. (1998). “Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement” (Special Lecture 1). Paper presented at the Int. Conf. on Hydro power Development in Himalayas, Shimla .
- Barton, N., & Grimstad, E. (2014). “Forty years with the Q-system in Norway and abroad”. *Fjellsprenningsteknikk*, NFF .
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support”. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236 .
- Bieniawski, Z. T. (1989). “*Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*”: John Wiley & Sons.
- Brady, B. H & ,Brown, E. T. (2013). “*Rock mechanics: for underground mining*”, Springer Science & Business Media.
- Brown, E., & Hoek, E. (1978). “Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth”. Paper presented at the *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.
- Cai, M. (2011). “Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design”. *Rock mechanics and rock engineering*, 44(4), 379-399 .
- Dhawan, K., Singh, D., & Gupta, I. (2002). “2D and 3D finite element analysis of underground openings in an inhomogeneous rock mass”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), 217-227 .
- Dhawan, K., Singh, D., & Gupta, I. (2004). “Three-dimensional finite element analysis of underground caverns”. *International Journal of Geomechanics*, 4(3), 224-228 .
- Goel, R., & Singh, B. (2011). “Engineering rock mass classification”.
- Grimstad, E., & Barton, N. (1993). “Updating the Q-system for NMT. Paper presented at the Proc. int. symp. on sprayed concrete-modern use of wet mix sprayed concrete for underground support”.
- Hoek, E. (2006). “*Practical rock engineering*”. vancouver, canada: Rocscience.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). “Support of underground excavations in hard rock”: CRC Press.
- Itasca. (2015). Three-Dimensional Distinct Element Code. ver 5.0 .
- Jiang, Q., & Feng, X. (2011). “Intelligent stability design of large underground hydraulic caverns: Chinese method and practice”. *Energies*, 4(10), 1542-1562 .
- Jing, L. (2003). “A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353 .

- Ramamurthy, T. (2010). "Engineering in rocks for slopes, foundations and tunnels": PHI Learning Pvt. Ltd.
- Rethati, I. (1988). "Probabilistic solutions in geotechnics". *Developments in Geotechnical Engineering*, (46)Elsevier .
- Sheorey, P. (1994). "A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock". Paper presented at the *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*.
- Stille, H., & Palmström, A. (2008). Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(1), 46-64 .
- Terzaghi, K., & Richart, F. (1952). "Stresses in rock about cavities". *Geotechnique*, 3(2), 57-90 .
- Tezuka, M., & Seoka, T. (2003). "Latest technology of underground rock cavern excavation in Japan". *Tunnelling and underground space technology*, 18(2), 127-144 .
- Vandewalle, M. (1998). "Use of steel fibre reinforced shotcrete for the support of mine openings". *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 98(3), 113-120 .
- Weishen, Z., Yong, L., Shucui, L., Shugang, W., & Qianbing, Z. (2011). "Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 199-209 .
- Xia, Y., Peng, S., Gu, Z., & Ma, J. (2007). "Stability analysis of an underground power cavern in a bedded rock formation". *Tunnelling and underground space technology*, 22(2), 161-165 .
- Yazdani, M., Sharifzadeh, M., Kamrani, K., & Ghorbani, M. (2012). "Displacement-based numerical back analysis for estimation of rock mass parameters in Siah Bisheh powerhouse cavern using continuum and discontinuum approach". *Tunnelling and underground space technology*, 28, 41-48 .
- Zhang, Q., He, L., & Zhu, W. (2016). "Displacement measurement techniques and numerical verification in 3D geomechanical model tests of an underground cavern group". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 54-64 .
- Zhang, Y., Xiao, M., & Chen, J. (2010). "A new methodology for block identification and its application in a large scale underground cavern complex". *Tunnelling and underground space technology*, 25(2), 168-180 .
- Zhao, J., & Zhu, W. (2003). "Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks" (Vol. 1): Elsevier.

Abstract

Chamshir Dam and power plant has been designed to control Floodwater, agricultural activities, hydroelectric power generation. This Dam is under construction on Zohre River and located in Kohgiluyeh and Boyer Ahmad. According to the position of the cavern and discontinuities, the instability in this huge space would disrupt the performance of the structure during the operation, the stability analysis and design of support system for gate chamber is necessary. Firstly, using experimental methods RMR and Q, were classified rock mass of gate chamber and temporary support were estimated. In addition these approaches, using numerical methods, discrete element method and software 3DEC, modeling and stability analysis of gate chamber was conducted considering different discontinuities. To investigate the priority of these strength properties of rock and joint in the stability of gate chamber, a sensitivity analysis has been performed. Finally, proper support system of sprayed concrete and rock bolt was verified for gate chamber. Support system includes sprayed concrete thickness of 15 cm and rock bolt diameter of 32 mm with a length of 8 meters spacing 2×2 in walls and 1.5×2 on the roof. Most displacement occurred in the left side wall. The results of modelling include the trend of displacement according to the results of field instrumentation. After support system installation decreases displacements about 41 percent.

Keywords: stability analysis, design support system, experimental methods, numerical method, sensitive analysis.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics
M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

Stability Analysis and Design of Support System for Gate Chamber of Chamshir Dam Using Numerical Method

By: Solmaz Jabbari

Supervisor:
Dr. Shokrollah Zare

March 2017